



The role of cadmium-resistant bacteria and modifiers in improving rice crop quality

Shayan Shariati¹ | Naser Mehrdadi² | HoseinAli Alikhani³ | Komeil Zeynali⁴

1. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran,

Tehran, Iran. E-mail: shayan_shariati@ut.ac.ir

2. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail:

mehrdadi@ut.ac.ir

3. Department of Soil Science Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: halikhan@ut.ac.ir

4. Department of Soil Science Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: komeilzeynali7899@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: Sep. 1, 2024

Revised: March. 8, 2025

Accepted: May. 27, 2025

Published online: Aug. 2025

Keywords:

**Bioaccumulation,
Bioremediation,
Cadmium,
PGPR,
Rice**

ABSTRACT

Ensuring food security is essential for human survival. Rice (*Oryza sativa* L.) is a globally significant food crop and serves as the staple diet for more than half of the world's population. According to statistics from the Food and Agriculture Organization (FAO), rice consumption per capita in Iran is 60% higher than the global average. Therefore, addressing challenges that threaten this strategic crop is of paramount importance. In this context, numerous studies have identified cadmium as one of the common and critical contaminants of rice. Cadmium is toxic to plants, animals, and humans and does not play any role in biological processes. Due to its high water solubility, rapid accumulation in the food chain, severe toxicity to living organisms, and mutagenic nature, cadmium is considered one of the most hazardous heavy metal pollutants. Several reports highlight the ease with which cadmium is absorbed by rice plants and transferred to their stems and grains. Given the cadmium contamination in some paddy fields in Iran and its implications for food security, this review aims to investigate the factors influencing cadmium accumulation in rice plants and examine various physical, chemical, and especially biological methods for mitigating cadmium toxicity in rice. The findings suggest that remediation strategies such as inoculating soil with cadmium-resistant microorganisms and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), using plant growth stimulants, signaling molecules, organic and inorganic amendments like biochar, compost, nitrogen, iron, zinc, animal manure, plant residues, cultivating rice varieties with low cadmium uptake capacity, and proper water management can effectively reduce cadmium accumulation in rice.

Cite this article: Shariati, Sh., Mehrdadi, N., Alikhani, H. A., Zeynali, K., (2025) The role of cadmium-resistant bacteria and modifiers in improving rice crop quality, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (6), 1685-1714. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389250.669871>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389250.669871>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Achieving food security is critical to human survival. Rice (*Oryza sativa* L.), a globally important food crop, is a staple food for more than half of the world's population. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), per capita rice consumption in Iran is 60% higher than the world average, underscoring its vital role in providing food and energy for the Iranian population. A major environmental concern is the contamination of rice with heavy metals. Heavy metals can transfer and accumulate in rice under certain conditions, such as water and soil pollution, proximity of rice fields to industrial centers and wastewater, and use of chemical fertilizers and pesticides. Unlike organic pollutants, which can be broken down by microorganisms, heavy metals tend to persist and accumulate in the soil. Among these contaminants, cadmium is particularly noteworthy because of its toxicity to plants, animals, and humans. Cadmium does not play a role in biological processes. It is considered one of the most important heavy metal pollutants due to its high solubility in water, rapid accumulation in the food chain, and severe toxic effects. Cadmium is classified as a Group 1 carcinogen. It poses serious health risks, including kidney dysfunction, osteoporosis, cancer and cardiovascular disease. Studies have reported the easy uptake of cadmium by rice plants, leading to its transfer to stems and grains. In view of the cadmium contamination in rice fields as well as its impact on food security, the aim of this review article is to examine the factors influencing cadmium accumulation in rice. It also evaluates various physical, chemical, and especially biological methods to reduce cadmium toxicity in rice, based on reputable studies and publications from national and international journals.

Materials and Methods

This article has been compiled from a variety of sources. These include reputable national and international articles and books between 1998 and 2024. The writing of this review article involved the use of internationally renowned publishers, including Nature, Springer, Elsevier, Taylor & Francis, Wiley, and American Chemical Society, among others.

Results and Discussion

Investigations across the country have shown that cadmium levels in some rice fields and rice plants in Fars, Isfahan and Khuzestan provinces were higher than the permissible limit. This was also the case for rice imported from some countries, such as India. Research has proven that cadmium stress causes reduced growth, biomass production, photosynthesis, water use efficiency, grain quality and yield, release of reactive oxygen species (malondialdehyde), and protein and genetic disorders in rice plants. Findings suggest that various remediation strategies such as inoculating soil with cadmium-resistant microorganisms and plant growth-promoting rhizobacteria, using plant growth stimulants and signaling molecules, applying organic and inorganic amendments, cultivating rice varieties with low cadmium uptake, and managing water—can be employed to reduce cadmium accumulation in rice. Biological methods are often more cost-effective, efficient, and environmentally friendly compared to other approaches. For instance, microorganisms can stabilize cadmium in non-toxic forms by altering gene expression and the soil bacterial community, thereby reducing cadmium uptake in rice. Microbial cell walls, composed of polysaccharides, lipids, and proteins, provide carboxylate, hydroxyl, amino, and phosphate groups that stabilize cadmium within the cell wall structure. Recent studies have identified various cadmium-resistant bacterial genera, such as *Aeromonas*, *Bacillus*, *Brevundimonas*, *Geobacillus*, *Ochrobactrum*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Stenotrophomonas*, *Sphingomonas*, *Burkholderia*, and *Comamonas*. Some species can tolerate multiple metalloids, enhancing rice seedling growth under cadmium stress and mitigating oxidative stress caused by cadmium, thereby promoting plant growth. Microbes not only help decrease cadmium concentrations in rice roots and grains but also increase the availability of essential nutrients such as iron and manganese, competitively limiting cadmium transport through cation channels.

Conclusion

Cadmium leaching into rice fields and rice plants not only reduces the quality and yield of the crop, but also threatens food security and human health. Reducing the use of chemical fertilizers, especially phosphorus fertilizers, and increasing the use of organic and biological fertilizers are the main ways to reduce cadmium inputs to rice fields. Meanwhile, choosing the right rice variety, modifying cropping patterns and soil pH, and managing water use, along with the use of organic and mineral amendments and plant growth stimulants, reduce plant stress to cadmium. In addition, cadmium-resistant bacteria resist cadmium toxicity by prolonging the lag phase, transforming cadmium into less toxic forms, active current system, and forming complexes with thiol-containing molecules, and can protect the plant from the toxic effects of heavy metals. Through these

mechanisms, cadmium-binding bacteria can reduce the bioavailability of cadmium and limit the entry of this element into the roots, stems and seeds of rice plants, thereby improving the quality of rice consumed and playing a very important role in ensuring human food security.

Data Availability Statement

Data will be available based on request from the authors.

Author Contributions

“Conceptualization, Shayan Shariati, Naser Mehrdadi, Hossein Ali Alikhani, Komeil Zeynali; Methodology, Shayan Shariati, Hossein Ali Alikhani; Data curation, Shayan Shariati, Komeil Zeynali; Writing—original draft preparation, Shayan Shariati, Komeil Zeynali; Funding acquisition and project administration, Shayan Shariati; Visualization, Shayan Shariati, Komeil Zeynali; Results Interpretation, Shayan Shariati, Naser Mehrdadi, Hossein Ali Alikhani; Review and Editing, Final report review, Shayan Shariati, Naser Mehrdadi, Hossein Ali Alikhani.” All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to thank Graduate Faculty of Environment and College of Agriculture & Natural Resources of University of Tehran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no competing interests.

نقش باکتری‌های مقاوم به کادمیوم و اصلاح‌کننده‌ها در بهبود کیفیت محصول برنج

شایان شریعتی^۱ | ناصر مهرداد^۲ | حسینعلی علیخانی^۳ | کامیل زینالی^۴^۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: shayan_shariati@ut.ac.ir^۲. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Mehrdadi@ut.ac.ir^۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: halikhan@ut.ac.ir^۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: komeilzeynali7899@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله مروری

حصول امنیت غذایی برای بقا حیات انسانی بسیار مهم است. برنج (*Oryza Satvia L.*)، یک محصول غذایی مهم جهانی بوده و غذای عمده و اصلی بیش از نصف جمعیت جهان محسوب می‌شود. بر اساس آمار سازمان جهانی خواربار و کشاورزی فائو، سرانه مصرف برنج در ایران ۶۰ درصد بیشتر از میانگین جهانی است؛ بنابراین، رفع کردن موانعی که باعث ایجاد خطر برای این محصول استراتژیک می‌شوند، حائز اهمیت است. در این راستا پژوهش‌های متعدد نشان داده یکی از آلاینده‌های رایج و مهم برنج، کادمیوم می‌باشد که برای گیاهان، حیوانات و انسان سمی است. کادمیوم در هیچ یک از فرایندهای زیستی نقش ندارد و به دلیل حلالیت بالا در آب، تجمع سریع در چرخه غذایی، اثرات سمی شدید بر روی موجودات زنده و طبیعت جهش‌زا، یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های فلزات سنگین محسوب می‌شود. گزارشات متعددی در زمینه جذب آسان کادمیوم توسط گیاه برنج و انتقال آن به ساقه و دانه‌های برنج وجود دارد. باتوجه به وجود آلودگی کادمیوم در برخی از شالیزارهای کشور و اهمیت این موضوع در امنیت غذایی، هدف از این مقاله مروری، بررسی عوامل مؤثر بر تجمع کادمیوم در گیاه برنج و بررسی روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بویژه زیستی در کاهش سمیت کادمیوم در برنج می‌باشد. یافته‌ها نشان داده استفاده از روش‌های اصلاحی شامل تلقیح خاک با میکروارگانیسم‌های مقاوم به کادمیوم و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، استفاده از مواد محرک رشد گیاه، مولکول‌های سیگنال دهنده، اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی مانند بیوجار، کمپوست، نیتروژن، آهن، روی، کود دامی، بقایای گیاهی، استفاده از کولتیوارهای برنج با قابلیت پائین جذب کادمیوم، مدیریت آب و... می‌تواند برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج استفاده شوند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۶

تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

برنج،

تجمع زیستی،

زیست‌پالایی،

کادمیوم،

PGPR.

استناد: شریعتی؛ شایان، مهرداد؛ ناصر، علیخانی؛ حسینعلی، زینالی؛ کامیل، (۱۴۰۴) نقش باکتری‌های مقاوم به کادمیوم و اصلاح‌کننده‌ها در بهبود کیفیت محصول برنج،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۶)، ۱۶۸۵-۱۷۱۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389250.669871>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389250.669871>

مقدمه

بدون شک امنیت غذایی و حصول درجه اطمینان دسترسی به غذا به حیات اقتصادی و سیاسی و بالاخره به حیات امنیتی کشور مرتبط است و در واقع حیات امنیتی وام‌دار حیات امنیت غذایی است (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۱). در سال ۱۹۹۶ در اجلاس جهانی غذا آخرین تعریف امنیت غذایی به شرح فوق اعلام شد: امنیت غذایی یعنی همه مردم در تمامی ایام به غذایی کافی، سالم و مغذی دسترسی فیزیکی و اقتصادی داشته باشند و غذای در دسترس، نیازهای یک رژیم تغذیه‌ای با ترجیحات آنان را برای یک زندگی فعال و سالم فراهم سازد (World Food Summit, 1996). این تعریف نشان می‌دهد، بخش کشاورزی با افزایش و بهبود کیفیت تولید محصولات غذایی، نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای را در تحقق امنیت غذایی بر عهده دارند (قریب، ۱۳۹۱). برنج (*Oryza Satvia* L.)، یک محصول غذایی مهم جهانی همراه با گندم و ذرت بوده و غذای عمده (اصلی) بیشتر از نصف جمعیت جهان محسوب می‌شود (Mohammadian et al., 2020; Alikhani et al., 2022). همچنین برنج نقش حیاتی در تغذیه و تأمین انرژی مردم ایران دارد (فلاح و همکاران، ۱۴۰۱). با توجه به مدیریت پایدار زنجیره تأمین محصولات کشاورزی، برنج در بین سایر محصولات ایران رتبه اول را دارد. آمارهای رسمی در سال ۲۰۲۰ حاکی از آن است که مصرف سرانه برنج در ایران ۳۷/۴ - ۳۹/۱ کیلوگرم و کل تقاضای سالانه جمعیت ایران برای این محصول حدود ۳/۵۹ میلیون تن است (فلاح و همکاران، ۱۴۰۱؛ OECD/FAO, 2022). کل سطح برداشت و تولید برنج در ایران به ترتیب حدود ۵۲۹۰۰۰ هکتار و ۲/۳ میلیون تن برآورد شده است و دولت باید سالانه ۱/۷ میلیون تن برنج وارد کند تا تقاضای بالای برنج در کشور را جبران کند (Kouchaki-Penchah et al., 2023). استان‌های مازندران، گیلان، گلستان، فارس و خوزستان به ترتیب بیشترین سطح زیر کشت برنج را دارا می‌باشند (Najafabadi et al., 2022).

فلزات سنگین بیشتر از طریق پدیده‌های جوی، فرسایش زمین و فعالیت‌های انسانی مانند تولید فاضلاب خانگی و صنعتی وارد محیط‌های آبی و خاکی می‌شوند و حتی در غلظت‌های پایین، تهدیدی برای موجودات آبرزی و انسان هستند (Shariati et al., 2019; Zhao et al., 2022). برخلاف آلاینده‌های آلی که توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شوند فلزات سنگین معمولاً تمایل به پایداری و تجمع در خاک دارند. آلودگی برنج با فلزات سنگین یکی از موارد محتمل آلودگی‌های محیطی است که طی آن تحت شرایط خاصی از قبیل آلودگی آب، خاک و نزدیکی مزارع برنج به مراکز صنعتی و فاضلاب‌های مربوطه، استفاده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها، عناصر سنگین به برنج منتقل شده و در آن تجمع پیدا می‌کنند (Palansooriya et al., 2020; Yang et al., 2022). محققین بیان کردند یکی از آلاینده‌های مهم برنج، کادمیوم می‌باشد که انسان برای ادامه حیات خود هیچ نیازی به این فلز ندارد. کادمیوم در هیچ یک از فرایندهای زیستی درگیر نیست و به دلیل حلالیت بالا در آب، تجمع سریع در چرخه مواد غذایی، اثرات سمی شدید بر روی موجودات زنده و طبیعت جهش‌زا، به عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست شناخته می‌شود (Sterckeman et al., 2015; Nagaraju et al., 2022). سطوح بالای کادمیوم موجب تغییرات متعدد نامطلوبی در خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و ساختمانی گیاه، مانند بازدارندگی رشد، عدم تعادل آب در گیاه و بازدارندگی جوانه زنی بذر می‌شود (Tran & Popova, 2013; Li et al., 2023a). علاوه بر اثرات نامطلوب کادمیوم بر گیاهان، کادمیوم می‌تواند در دانه و میوه گیاهان خوراکی تجمع یافته و وارد زنجیره غذایی شود (Chavez et al., 2015). گزارشات متعددی در زمینه جذب آسان کادمیوم توسط گیاه برنج و انتقال آن به ساقه و دانه‌های برنج وجود دارد (Wang et al., 2015; Song et al., 2015; al., 2014). در مورد آلودگی برنج به کادمیوم، حتی غلظت پائینی از کادمیوم در خاک و کشت کوتاه مدت گیاه برنج در خاک آلوده به کادمیوم موجب کاهش کیفیت برنج شده و انسان را در معرض سمیت کادمیوم قرار می‌دهد (Du et al., 2013; Anwen et al., 2021). در ایران نیز مطالعاتی در زمینه وجود کادمیوم در برنج‌های تولید داخل و خارجی صورت گرفته است. نتایج مطالعه پیرزاده و همکاران (۱۳۹۱) بر روی میزان کادمیوم ۱۳۶ نمونه گیاه و خاک سطحی زیر کشت از مزارع برنج استان‌های اصفهان، فارس و خوزستان نشان داد غلظت کادمیوم در خاک‌های شالیزاری و بخش خوراکی ۱۲ درصد از نمونه‌های استان اصفهان، بیشتر از حد توصیه شده سازمان بهداشت جهانی بود. دامنه تغییرات کادمیوم در اصفهان بالا (۰/۱ تا ۵/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. میانگین غلظت کادمیوم در استان خوزستان ۰/۴ و بیشترین غلظت کادمیوم ۱ میلی گرم بر کیلوگرم بود. غلظت کادمیوم در بخش خوراکی برنج (دانه سفید) کشت شده در این استان‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۵۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود. میانگین غلظت کادمیوم در دانه برنج در ۱۱ درصد برنج تولید شده در این مناطق، بیشتر از حد مجاز بود. در استان فارس ۴٪ و در استان اصفهان حدود ۱۲٪ از دانه‌های گیاهان برنج دارای غلظت بیشتر از حد مجاز کادمیوم بودند. علت این امر را می‌توان به مصرف بالای لجن فاضلاب و کمپوست و همچنین مصرف بیش از حد کودهای فسفره ربط داد.

رحمانی و خان‌محمدی (۱۴۰۳) گزارش کردند، غلظت کادمیوم را در ۲۱ درصد نمونه‌های خاک و برنج کشت شده در استان اصفهان بیشتر از حد مجاز ارائه شده توسط سازمان محیط‌زیست کشور برای خاک‌های کشاورزی بود. رضائیان عطار و حصاری (۱۳۹۲) بیان کردند میانگین غلظت کادمیوم و سرب در نمونه‌های برنج وارداتی پر مصرف شهر تبریز به طور قابل توجهی بالاتر از ضوابط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی بود. بررسی رحیمی و چرخ آبی (۱۳۹۲) بر روی مقدار فلزات سنگین (کادمیوم، سرب، آهن و منگنز) در خاک، آب و اندام‌های برنج (به ترتیب ۶، ۴۱ و ۹۰ نمونه) منطقه لنجان استان اصفهان، نشان داد غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و دانه‌های برنج به ترتیب ۱/۶، ۱/۱ و ۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که بسیار بالاتر از حد مجاز (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. همچنین بیان کردند میزان فاکتور تجمع کادمیوم در ریشه و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به ساقه و ساقه به دانه، بالاتر از سه عنصر دیگر بود. شادبورستان و همکاران (۱۳۹۰) بیان کردند در ۴۰٪ نمونه‌های برنج مطالعه شده در شهرستان مبارکه، میزان کادمیوم برابر یا بالاتر از حد استاندارد بود. Ghoreyshi et al., (2019) در مطالعه‌ای بیان کردند غلظت کادمیوم و سرب در دانه‌های برنج مناطق اطراف اصفهان بالاتر از حد استاندارد بود. Rezaei et al., (2021) بیان کردند که غلظت آرسنیک، سرب و کادمیوم در نمونه برنج استان هرمزگان به ترتیب برابر بود با ۰/۰۴۵، ۰/۰۵۷ و ۰/۰۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم؛ که این مقادیر کمتر از غلظت این فلزات در نمونه‌های برنج هندی و پاکستانی بود. Tarviji et al., (2023) مطالعه‌ای در زمینه بررسی غلظت عناصر سنگین آرسنیک و کادمیوم در نمونه‌های برنج خام و پخته شده ایرانی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که غلظت کادمیوم در برنج خام و پخته شده به ترتیب برابر با ۸/۵۴ و ۸/۶۴ میکروگرم بر کیلوگرم می‌باشد. Niknejad et al., (2024) خطر سلامتی فلزات سنگین (کادمیوم، آرسنیک، روی، کرم، مس، آهن و سرب) در برنج تولید شده مناطق آمل و محمودآباد استان مازندران را مورد بررسی قرار دادند. این محققین بیان کردند غلظت کادمیوم در شالیزارهای مناطق مورد بررسی، در حد بحرانی قرار ندارد. Rastmanesh et al., (2023) در مطالعه‌ای به بررسی غلظت عناصر غذایی میکرو (آهن، روی، مس، منگنز و کبالت) و فلزات سنگین (آرسنیک و سرب) در خاک و دانه برنج در استان خوزستان پرداختند. نتایج آنالیزهای دستگاهی نشان داد غلظت متوسط آرسنیک، آهن، کبالت، مس، منگنز، سرب و روی در خاک به ترتیب ۲/۷۱، ۲۰۰۶۵/۸، ۱۰/۴۳، ۲۲/۲۸، ۴۲۲/۲۸، ۵/۸۵ و ۴۷/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. نویسندگان با ارزیابی خطر سلامتی، بیان کردند که مقدار عناصر میکرو در این مناطق کم بوده و فلزات سنگین غلظت بالایی دارند که می‌تواند برای سلامتی انسان خطرآفرین باشد. با ورود کادمیوم به مزارع برنج، این عنصر به راحتی از طریق زنجیره غذایی به بدن انسان راه پیدا می‌کند. بنابراین، استراتژی اصلاح در حین تولید، به عنوان یک راه حل مهم برای به حداقل رساندن خطر برنج آلوده به کادمیوم پیشنهاد شده است. (Olvera & Avelizapa, 2022; Rizwan et al., 2016). روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مختلفی برای پاکسازی شالیزارهای آلوده به کادمیوم پیشنهاد شده‌اند. برخی از روش‌های غیرزیستی عبارتند از: استفاده از عناصر غذایی (نیتروژن، روی، آهن)، مولکول‌های سیگنال‌دهنده، ارقام با تجمع کم کادمیوم، مدیریت آب آبیاری، کشت تناوبی و روش‌های زیستی نسبت به سایر روش‌ها کم‌هزینه‌تر، مؤثرتر و با محیط زیست سازگارتر هستند. برخی از این روش‌ها عبارتند از: استفاده از بیوپار، کودهای آلی و کمپوست، بقایای گیاهی و میکروارگانیسم‌های مقاوم به کادمیوم (Jing et al., 2023; Xin, 2024). باتوجه به وجود آلودگی کادمیوم در برخی مزارع برنج ایران و اهمیت این موضوع در امنیت غذایی مردم کشور، یافتن روش‌های مؤثر در جهت کاهش یا حذف این آلاینده به منظور دستیابی به امنیت غذایی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. با توجه به این که در زمینه روش‌های کاهش سمیت کادمیوم بویژه روش‌های زیستی در ایران مطالعه‌ای صورت نگرفته، هدف از این مقاله مروری، بررسی عوامل مؤثر بر تجمع کادمیوم در گیاه برنج و بررسی روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بویژه زیستی در کاهش سمیت برنج می‌باشد.

یافته‌ها

منابع ورودی کادمیوم به مزارع برنج

وقوع گسترده آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های خاک-برنج بر تولید برنج ایمن تأثیر منفی می‌گذارد. در شرایط طبیعی، فلزات سنگین در خاک عموماً در غلظت‌های پایین وجود دارند و فعالیت‌های آتشفشانی و هوازدگی سنگ‌ها از منابع طبیعی آلودگی شالیزار هستند. از طرف دیگر کادمیوم از طریق فعالیت‌های انسانی شامل جذب اتمسفری ذرات معلق ناشی از فعالیت‌های صنعتی و حمل و نقل، فعالیت‌های کشاورزی مثل آبیاری با پساب، استفاده از آفت‌کش‌ها و کودها (به‌خصوص کودهای فسفاته و دامی)، استفاده از لجن و معدن‌کاری، وارد شالیزارها شده و موجب آلودگی گیاه برنج و تهدید امنیت غذایی انسان می‌گردد (فلاح و همکاران، ۱۴۰۱؛ Zou et al., 2021). منابع کادمیوم در خاک، در بین کشورها و مناطق مختلف به دلیل تفاوت در رشد جمعیت، سطح صنعتی شدن، سطح توسعه کشاورزی و ویژگی‌های

خاک، متفاوت است (Shi et al., 2018; Rai et al., 2019). متقابلاً، آبشویی، رواناب سطحی و برداشت محصول مسیرهای اصلی خروجی فلزات سنگین از خاک هستند. کادمیوم یک عنصر کمیاب غیرضروری است که به طور طبیعی وجود دارد و میانگین غلظت آن در خاک، در سطح جهان، ۰/۱ تا ۲ میلی گرم در کیلوگرم است. کادمیوم عمدتاً به صورت کمپلکس با گوگرد وجود دارد و در هنگام هوازدگی سنگ معدنی در محیط آزاد می‌شود. بنابراین، مواد مادری میزان کادمیوم را در سیستم‌های خاک تعیین می‌کنند. خاک‌های مشتق شده از مواد مادری، ویژگی‌های منشاء و محتوای عناصر کمیاب آن‌ها را به ارث می‌برند (Gao et al., 2022).

فعالیت‌های انسانی به طور قابل توجهی بر تجمع فلزات سنگین در اکوسیستم‌های زمین‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد. منابع معدنی، مواد ضروری برای فعالیت‌های صنعتی هر کشوری هستند. فلزات سنگین و فاضلاب اسیدی تولید شده در معدن طی فرآیند استخراج، منابع اصلی آلودگی هستند که تهدیدی بالقوه برای سلامتی محیط زیست به حساب می‌آیند. آب اسیدی حاوی کادمیوم از طریق منافذ توده‌های پسماندسنگ^۱ و استخرباطله‌ها^۲ لایه زیرین خاک شالیزار نفوذ کرده و در نهایت باعث ایجاد مسمومیت برای موجودات می‌شود (Navarro et al., 2008). جذب ذرات معلق نشأت گرفته از فعالیت‌های معدن کاری و گداختن^۳ نیز، باعث افزایش غلظت کادمیوم در مزارع برنج می‌شود (Gao et al., 2022). همچنین، کودها، به‌ویژه کودهای فسفاته، از منابع اصلی ورود فلزات سنگین به زمین‌های زراعی هستند، که به‌طور قابل توجهی در آلودگی کادمیوم نقش دارند (Rai et al., 2019; Peng et al., 2019).

جذب و مکانسیم سمیت کادمیوم بر روی برنج

کادمیوم فلزی با تحرک بالا و قابلیت جذب راحت در گیاه می‌باشد، که می‌تواند به راحتی از طریق ریشه جذب و وارد بافت گیاه شده و به اندام‌های فوقانی گیاهان منتقل شود (Song et al., 2017). جذب کادمیوم از ریشه و از طریق برگ دو مسیر مهم برای تجمع کادمیوم در برنج هستند که هر دو به تحرک کادمیوم در سیستم خاک-ریشه بستگی دارد (Wang et al., 2022b). کادمیوم معمولاً به فرم Cd^{2+} از خاک جذب شده و از طریق نوار کاسپاری^۴ و اندودرمیس^۵ به استوانه آوندی انتقال می‌یابد، سپس از طریق زایلیم به ساقه (Hu et al., 2011; Song et al., 2013) و در نهایت از طریق بافت آبکش^۶ گر دانه تجمع می‌یابد (Uraguchi et al., 2014; Jing et al., 2023). تحقیقات نشان داده تنش کادمیوم موجب کاهش رشد، تولید بیوماس (Mostofa et al., 2015; Rehman et al., 2015)، فتوسنتز و کارایی مصرف آب (Wang et al., 2014) در گیاه برنج می‌شود. سمیت کادمیوم طول ریشه، ساقه، برگ، سطح ریشه و تعداد ریشه و برگ‌های گیاه برنج را کاهش می‌دهد (Song et al., 2015). محققین بیان کردند سمیت کادمیوم با رهاسازی گونه‌های اکسیژنی فعال و مالون‌دی‌آلدئید^۷ موجب افزایش تنش‌های اکسیداتیو در جوانه‌های برنج می‌شود (Yu et al., 2013; Srivastava et al., 2015). سمیت کادمیوم موجب تغییر فراساختمانی ریشه و برگ شده و موجب صدمات ساختاری به اندام‌های فتوسنتزی برنج می‌شود. کادمیوم موجب القای پلی مورفسم^۸ DNA متناسب با دوز مواجهه می‌شود (Chen et al., 2023). Lee et al., (2010) بیان کردند در اثر مواجهه با غلظت ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم در مقایسه با شاهد، تنظیم ۳۶ پروتئین در برنج دچار اختلال شد (Lee et al., 2010). علاوه بر این، نویسندگان گزارش کردند که بیان بیش از حد ژن گلوتامین سنتتاز تحت تنش کادمیوم که واسطه پاسخ اکسیداتیو است، می‌تواند منجر به مرگ گیاه شود (Lee et al., 2013). تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم با تداخل در مسیرهای سیگنال‌دهی از جمله فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و تعرق باعث کلروز، نکروز، پژمردگی و توقف رشد محصول در گیاهان برنج می‌شود. علاوه بر این، رقابت برای ناقلان ممکن است جذب آهن و روی را مختل کرده و باعث کمبود آهن و روی در برنج شود که بر فعالیت فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد (Huang et al., 2020a; Kulsum et al., 2023).

خطرات کادمیوم برای انسان

علاوه بر تأثیر سوء بر عملکرد محصول، تجمع کادمیوم در بخش‌های خوراکی گیاهان مانند دانه‌ها و میوه‌ها، منجر به ورود این عنصر سمی به چرخه غذایی انسان می‌گردد (Chavez et al., 2015). کادمیوم به طور مؤثری در کلیه‌ها باقی مانده و نیمه عمر بیولوژیکی طولانی در

1 Waste rock

2 Tailing ponds

3 Smelting

4 Casparian strip

5 Endodermis

6 Phloem

7 Malondialdehyde

8 Polymorphism

حدود ۱۰ تا ۳۰ سال را نشان می‌دهد؛ در نتیجه با افزایش سن، غلظت تجمع‌ی کادمیوم در بدن افزایش می‌یابد. بنابراین، حتی قرار گرفتن در معرض کادمیوم با غلظت پائین نیز به‌عنوان یک تهدید جدی برای سلامت انسان تلقی می‌شود (Haider et al., 2021). کادمیوم به‌عنوان مواد سرطان‌زا (Waalkes & Misra, 2023) گروه یک طبقه بندی می‌شود و مسبب انواع خطرات جدی سلامتی از جمله شکستن DNA و ناهنجاری‌های کروموزومی، جهش‌زایی اختلال عملکرد کلیوی، ریه، سیستم تولید مثلی، پوکی استخوان، جذب عناصر به‌ویژه روی و بیماری‌های قلبی عروقی می‌باشد (Charkiewicz et al., 2023; Satarug et al., 2022; Lin et al., 2021). بدترین مورد بیماری که از مصرف برنج آلوده به کادمیوم ایجاد می‌شود بیماری ایتای-ایتای^۱ می‌باشد (Nogawa & Kido, 2023). فاکتور مهمی که باعث شیوع این بیماری می‌شود، مصرف طولانی مدت برنج رشد یافته در خاک‌های آلوده به کادمیوم و سطح کم کلسیم، آهن و روی در دانه می‌باشد (Nogawa & Kido, 2023).

مکانیسم‌های تحمل برنج در برابر سمیت کادمیوم

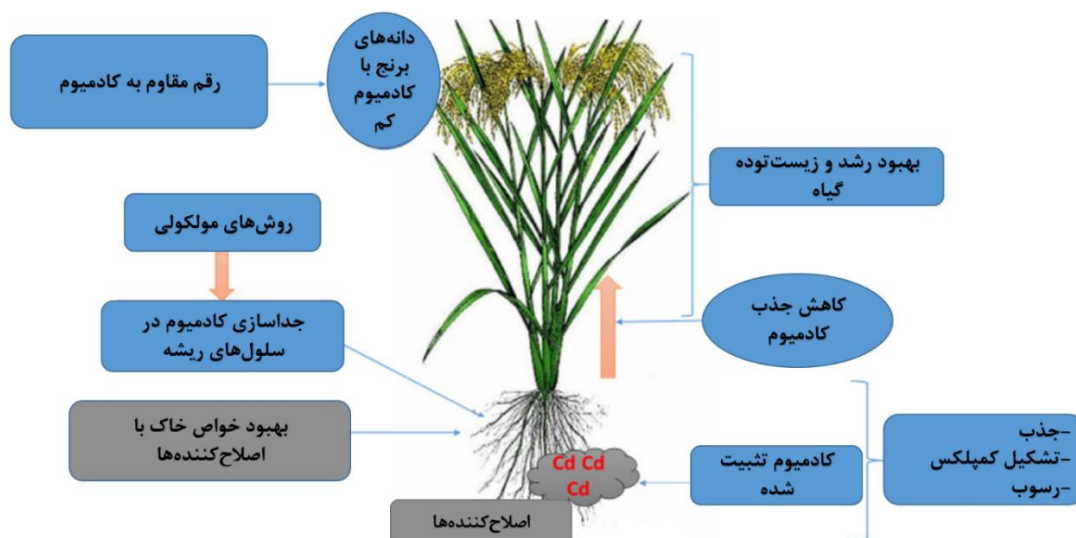
به منظور جلوگیری از سمیت کادمیوم، برنج دارای برخی از مکانیسم‌های تحمل در سطوح فیزیولوژیکی و مولکولی می‌باشد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است (Shah & Nahakpam, 2012; Zhang et al., 2013a): ۱- از طریق ترسیب کادمیوم در ریشه و کاهش انتقال آن به ساقه ۲- اتصال کادمیوم به دیواره‌های سلولی و واکوئل‌ها و ترکیب با مواد مختلف مانند اسیدهای آلی، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها (Zhang et al., 2009) ۳- تحریک سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی^۴ تنظیم اسمزی^۵ تولید بیش از حد مولکول‌های سیگنال دهنده ۶- هموستازی یون و ۷- بیان بیش از اندازه ژن‌های مختلف (Shah & Nahakpam, 2012; Srivastava et al., 2015). نتایج بسیاری از تحقیقات نشان داده با افزایش غلظت کادمیوم تا سطح معینی از تنش، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یافته و با بالاتر رفتن سطح تنش کادمیوم، این فعالیت کاهش می‌یابد (Shah & Nahakpam, 2012; Roychoudhury et al., 2012). Asgher et al., (2014) بیان کردند گیاهان با تولید مواد محرک رشد، مانند آسکوربیک اسید، آب‌سزیک اسید، جاسمونیک اسید، گلوکاتایون، فیتوکلانتین‌ها، پلی‌آمین‌ها، نیتریک اکسید و براسینو استروئیدها می‌توانند سمیت فلزات سنگین را تحمل کنند. (Zhang & Ying, 2008) گزارش کردند غلظت گلوکاتایون در ریشه‌های برنج بیشتر از ساقه‌ها بود و با افزایش مقادیر کادمیوم در طول دوره رشد، غلظت گلوکاتایون در ساقه افزایش یافت، در حالی که مقدار آن در ریشه کاهش یافت. غلظت بالاتر گلوکاتایون در ریشه نسبت به ساقه نشان دهنده سمیت‌زدایی بالای کادمیوم در ریشه‌ها نسبت به ساقه است. (Chao et al., 2010a) بیان کردند سالیسیک اسید تولید شده توسط گیاه برنج از طریق پائین آوردن مقدار هیدروژن پراکسید، تنش اکسیداتیو برنج را کاهش می‌دهد. (Wang et al., 2011) گزارش کردند رقم‌های برنج دارای ROL^۲ بیشتر، توانایی بالاتری در کاهش جذب و انتقال کادمیوم دارند. (Zhang et al., 2013a) بیان کردند کادمیوم می‌تواند از طریق تشکیل کلات با ترکیبات غیر پروتئینی تیول‌ها^۳ در ریشه برنج ترسیب شود. تحقیقات (Khavari-Nejad et al., 2014) نشان داد مقدار کل پروتئین در بافت‌های برنج در غلظت ۵۰ میکرومولار کادمیوم افزایش یافت ولی با اضافه کردن ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم در محلول غذایی، مقدار کل پروتئین کاهش یافت. (Sasaki et al., 2014) و (Yan et al., 2024a) بیان کردند بیان بیش از حد OsHMA3، ناقل مستقر در تونوپلاست برای کادمیوم در ریشه برنج، موجب کاهش انباشتگی کادمیوم در دانه شد.

روش‌های کاهش جذب و تنش گیاه برنج در مقابل کادمیوم

تجمع کادمیوم در گیاه با عوامل مختلفی شامل نوع گیاه، ژنوتیپ گیاه، خصوصیات خاک، فاکتورهای زیست‌محیطی و حضور سایر مواد معدنی و غذایی کنترل می‌شود (Volpe et al., 2015; Li et al., 2020). روش‌های مختلفی، از جمله روش‌های فیزیوشیمیایی، برای غلبه بر مشکل سمیت کادمیوم استفاده می‌شوند. این روش‌ها به دلیل هزینه‌های بالا و ایجاد آلودگی ثانویه، چندان مؤثر و عملی نیستند (Song et al., 2023; Pramanik et al., 2018). با این حال، تلقیح خاک با میکروارگانیسم‌ها و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه که باعث افزایش رشد گیاه تحت تنش کادمیوم می‌شوند، برخی از گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه می‌باشند که با محیط‌زیست سازگار هستند. سایر روش‌های اصلاحی مانند استفاده از مواد محرک رشد گیاه، مولکول‌های سیگنال دهنده، اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی مانند بیوپچار، کمپوست، نیتروژن، آهن، روی، کود دامی، بقایای گیاهی، استفاده از کولتیوارهای برنج با قابلیت پائین جذب کادمیوم، مدیریت آب و... نیز می‌توانند برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج استفاده شوند (شکل ۱) (Gu et al., 2019; Kulsum et al., 2023).

1 Itai-itai disease
2 Radial oxygen loss
3 Thiols

است خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک را تنظیم کرده و گونه‌زایی شیمیایی کادمیوم را در خاک تغییر دهد. بنابراین، فراهمی زیستی کادمیوم ممکن است از طریق فرایندهای تثبیت، جذب و رسوب کاهش یابد (Bradham et al., 2018; Cambier et al., 2019). در ادامه به توضیح این روش‌ها پرداخته شده است.



شکل ۱. سازوکارهای کاهش غلظت کادمیوم در برنج (Hussain et al., 2021)

استفاده از مواد محرک رشد گیاه

یکی از مسیرهایی که برنج و سایر گیاهان برای مقابله با سمیت کادمیوم از خود نشان می‌دهند، ترشح هورمون‌های گیاهی مثل اکسین، سالیسیک اسید، ابسیزیک اسید و... می‌باشد (El Rasafi et al., 2022). اما در حضور کادمیوم، کارایی این سیستم درون‌زا کاهش پیدا می‌کند، بنابراین اضافه کردن فیتوهورمون‌ها می‌تواند مقاومت گیاه به استرس کادمیوم را افزایش دهد (Dai et al., 2023; Cao et al., 2015). محققین بیان کردند کاربرد خارجی آبسیزیک اسید، از طریق افزایش جذب کادمیوم گروه تیول‌ها (SH) در ریشه‌های برنج و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت مانند اسکوربات پراکسیداز، سوپراکسیداز دیسموتاز، کاتالاز و پائین آوردن غلظت هیدروژن پراکسید در ساقه‌ها، جذب و سمیت کادمیوم در برنج را کاهش می‌دهد (Zhao et al., 2023b; Singh & Shah 2015). (He et al., 2014) بیان کردند پیش تیمار برنج با سالیسیک اسید، جوانه زنی، بذر، رشد نهال و فعالیت آمیلازی را در برنج افزایش می‌دهد. فاروق و همکاران (Farooq et al., 2015) بیان کردند اگرچه ال-تریپتوفان غلظت کادمیوم در کاه برنج را زیاد می‌کند، ولی انتقال کادمیوم به دانه‌های برنج را کاهش داده و موجب افزایش رشد و عملکرد برنج می‌شود. از دیگر مواد محرک رشد می‌توان به گلوتامین اشاره کرد که اضافه کردن این ماده باعث افزایش رشد، فتوسنتز، بیومس، جذب عناصر غذایی روی، مس و منگنز و کاهش جذب کادمیوم در برنج می‌شود (Cai et al., 2011a; Jiang et al., 2020). همچنین اضافه کردن گلوتامین باعث بهبود پاسخ آنتی‌اکسیدانتی بوته‌های برنج به تنش کادمیوم و افزایش عملکرد دانه شد. البته این نتایج به غلظت کادمیوم و ژنوتیپ مورد بررسی بستگی دارد (Cao et al., 2015). علاوه بر مواد محرک رشدی که در بالا ذکر شد، سایر مواد محرک رشد مانند جاسمونات اسید و متیل جاسمونات نیز موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه برنج در حضور کادمیوم شدند (Singh & Shah 2014ab; Li et al., 2022b). پژوهش‌های فوق نشان داد اضافه کردن هورمون‌ها و اسمولیت‌های گیاهی، از طریق کاهش جذب کادمیوم، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، افزایش عملکرد فتوسنتتیک، افزایش جذب عناصر غذایی و اصلاح فراساختار گیاه، نقش حیاتی در کاهش سمیت و جذب کادمیوم در برنج دارند. البته باید در نظر داشت تمام نتایج فوق با گونه، غلظت کادمیوم و مدت زمانی که گیاه تحت تنش می‌باشد می‌تواند تغییر کند.

استفاده از مولکول‌های سیگنال دهنده

اضافه کردن مولکول‌های سیگنال دهنده مختلف مانند نیتریک اسید (HNO_3) و هیدروژن پراکسید (H_2O_2) به‌عنوان یکی از روش‌های

بهبود سمیت کادمیوم در نهال‌های برنج به کار برده شده است (Zhang et al., 2012; Wu et al., 2015). He et al., (2014) بیان کردند اضافه کردن سدیم نیتروپروساید موجب کاهش تجمع کادمیوم، تنش‌های اکسیداتیو، تولید هیدروژن پراکسید، مالون دی‌آلدئید و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت سوپراکسیددسیموتاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و مقدار پرولین در ریشه‌ها و ساقه‌ها شد. همچنین سدیم نیتروپروساید با افزایش پکتین و همی سلولز در دیواره سلولی ریشه و بازگرداندن یکپارچگی غشاء، تحمل گیاه برنج در برابر تنش کادمیوم را افزایش می‌دهد (Singh & Shah, 2014c).

Wang et al., (2022a) بیان کردند افزودن هیدروژن پراکسید از طریق کاهش پیوند کادمیوم با پکتین دیواره سلولی ریشه برنج باعث کاهش جذب کادمیوم می‌شود. یکی دیگر از مواد سیگنال دهنده نیز نیتریک اکسید است که موجب کاهش جذب کادمیوم و افزایش مقاومت گیاه به تنش کادمیوم می‌شود (Meng et al., 2022). هیدروژن پراکسید در غلظت‌های کم به‌عنوان مولکول سیگنال دهنده عمل کرده و در تنظیم گیاه و سیستم دفاعی نقش دارد؛ در حالی که در غلظت‌های بالاتر موجب تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود. Wu et al., (2015) بیان کردند پیش تیمار برنج با هیدروژن پراکسید به مدت ۲۴ ساعت، تنش کادمیوم در برنج را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، مقدار تیول‌ها و گلوتاتیون اس ترانسفراز^۱ کاهش داد. Mostofa et al., (2015) بیان کردند هیدروژن سولفید، تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم را از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و هموستازی عناصر معدنی در ریشه‌ها و برگ‌های گیاه برنج و حفظ کردن کادمیوم، کاهش داد.

اصلاح pH خاک به منظور کاهش فراهمی کادمیوم

پتانسیل اکسیداسیون-احیا و اسیدیته، بر حلالیت و قابلیت جذب فلزات سنگین از جمله کادمیوم خاک تأثیر دارد. همچنین شرایط اکسایشی و اسیدی، مناسب‌ترین وضعیت برای حلالیت این فلزات است (Kicińska et al., 2022). در pH پائین، دسترسی کادمیوم زیاد بوده و با افزایش pH از دسترسی آن کاسته می‌شود (Ali et al., 2020). خاک‌های اسیدی توانایی خیلی کمی نسبت به خاک‌های خنثی در جذب و نگهداری کادمیوم از خود نشان می‌دهند و با افزایش pH خاک تحرک عناصر سنگین کاهش می‌یابد (Soubasakou et al., 2022). با بررسی توزیع و شکل فلزات سنگین در برخی از خاک‌های کشاورزی، این نتیجه به دست آمد که در خاک‌های اسیدی با pH بین ۴/۲ تا ۶/۶، کادمیوم دارای پویایی متوسط است (Shen et al., 2020). از اصلاح‌کننده‌های pH خاک و کاهش دهنده جذب عناصر سمی به گیاه می‌توان مواد آهکی را نام برد (Mahar et al., 2015). کربنات کلسیم آزاد می‌تواند کادمیوم و سرب را جذب کرده و از قابل دسترس بودن آن برای گیاه بکاهد (Mubeen et al., 2023). همچنین کادمیوم گرایش فراوانی به واکنش با کربنات کلسیم (کلسیت) از خود نشان می‌دهد (Liu & Lian, 2019). البته دو مسئله ای که باید به آن توجه شود یکی ظرفیت بافری خاک است که در مقابل افزایش pH مقاومت می‌کند و باید مقدار آهک بیشتری اضافه شود و دیگری این است که وقتی آهک اضافه می‌شود و pH بالا می‌رود، جذب عناصر ریز مغذی مانند مس، آهن، روی و منگنز نیز کاهش می‌یابد، لذا برای افزایش pH به منظور کاهش جذب کادمیوم باید سایر عناصر نیز در خاک و گیاه مورد توجه باشند تا مشکلی در تعادل عناصر غذایی در گیاه ایجاد نشود. Siddique et al., (2022) در پژوهشی میزان تجمع زیستی کادمیوم را در دو خاک با pHهای متفاوت (۶/۶ و ۴/۶) و در شرایط افزودن آهن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد غلظت کادمیوم در دانه برنج، در خاک با pH ۴/۶، ۲/۸ برابر بیشتر از خاک با pH ۶/۶ بود. همچنین این محققین بیان کردند که تشکیل کمپلکس‌های آهن، تا حد زیادی به pH خاک بستگی دارد.

استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی

کودهای معدنی می‌توانند گزینه دیگری برای کاهش مؤثر جذب و تجمع کادمیوم در برنج از خاک‌های آلوده باشند. تحقیقات گذشته نشان داده تغذیه مناسب گیاه در خاک آلوده به کادمیوم با مواد مغذی اساسی گیاهان از قبیل نیتروژن، روی، آهن و سلنیوم موجب کاهش سمیت کادمیوم شده است. نقش برخی از کودهای معدنی مهم، در کاهش تجمع کادمیوم در برنج در زیر شرح داده شده است (Palansooriya et al., 2020).

نیتروژن

تحقیقات نشان داده فراهمی نیتروژن سمیت کادمیوم در برنج را کاهش می‌دهد و کمبود نیتروژن در محیط کشت گیاه، جذب کادمیوم

توسط برنج را افزایش می‌دهد (Jalloh et al., 2009; Zhang et al., 2020). البته فرم نیتروژن استفاده شده در سمیت کادمیوم تأثیرگذار است (Paul et al., 2022). (Hassan et al., 2005) بیان کردند کمترین مقدار کادمیوم در ساقه‌های برنج در اثر کاربرد سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم و نیترات کلسیم تحت کشت هیدروپونیک در تیمار سولفات آمونیوم مشاهده شد. در یک مطالعه دیگر، این محققین بیان کردند افزایش رشد و زیست‌توده گیاه ممکن است به دلیل کمترین کاهش در فعالیت نیترات رداکتاز در گیاهانی که با سولفات آمونیوم در مقایسه با سایر اشکال نیتروژن تغذیه شدند باشد (Hassan et al., 2008). (Wu et al., 2020) در مطالعه‌ای بیان کردند که فرم آمونیوم نیتروژن (NH_4^+) توانایی بیشتری نسبت به فرم نیترات نیتروژن (NO_3^-) در کاهش اثر سمی کادمیوم در برنج دارد. نویسندگان همچنین مکانیسم این عمل را افزایش آنتی‌اکسیدانت‌ها و کارایی چرخه گلوکاتایون-آسکوربیت توسط آمونیوم بیان کردند. (Jalloh et al., 2009) گزارش کردند، تحت تنش کادمیوم، عملکرد دانه در تیمارهای نیتروژن از منبع آمونیوم و نیتروژنی آمونیومی بیشترین مقدار بود. بیشترین مقدار کادمیوم در تیمار نیتروژن نیتراتی و کمترین مقدار کادمیوم در تیمار نیتروژن آمونیومی مشاهده شد. بیشترین غلظت نیتروژن هم در تیمارهای نیتروژن از منبع اوره و نیتروژن آمونیومی مشاهده شد. (Yang et al., 2016) بیان کردند نیترات اضافی در محلول غذایی تأثیری روی رشد گیاه نداشته ولی غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و دانه‌های برنج را در مقایسه با گیاه شاهد افزایش داد. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان بیان کرد برای کشت برنج و کاهش سمیت کادمیوم بهتر است که سولفات آمونیوم به‌عنوان کود نیتروژنه استفاده شود. البته تأثیر فراهمی نیتروژن بر جذب کادمیوم به ژنوتیپ گیاه نیز بستگی دارد و در بعضی از ژنوتیپ‌ها با فراهمی نیتروژن کمتر، جذب کادمیوم کمتری نسبت به ژنوتیپ دیگر با مقدار کود نیتروژنه بیشتر مشاهده شد.

آهن

مطالعات بسیاری نشان داده فراهمی آهن غلظت کادمیوم در داخل برنج را کاهش و رشد و عملکرد برنج را افزایش می‌دهد (Wang et al., 2013; Sebastian & Prasad, 2015a). محققین دلیل این امر را تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه دانسته‌اند (Liu et al., 2022; Sun et al., 2021; Wang et al., 2022b). در این راستا، (Siddique et al., 2022) بیان کردند تشکیل پلاک‌های آهن، به طور معنی‌داری به pH خاک، رقم برنج و افزودن آهن بستگی دارد. البته تشکیل پلاک آهن و ترسیب کادمیوم به عوامل مختلفی مانند شرایط هوازای و بی‌هوازی (Xu & Yu, 2013) و تفاوت ژنوتیپی در تشکیل پلاک آهن تحت تنش کادمیوم (Zhou et al., 2015) و شرایط ریزوسفر (Liu et al., 2013a, b) بستگی دارد. (Khavari-Nejad et al., 2014) بیان کردند وجود کادمیوم به همراه آهن (Fe-EDTA)، غلظت مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را در بافت‌های برنج کاهش می‌دهد. (Sebastian & Prasad, 2015b) نیز بیان کردند فراهمی آهن تحت تنش کادمیوم، زنجیره انتقال الکترون فتوسنتتیک را در مقایسه با نبود آهن ترمیم می‌کند که این امر مقاومت گیاه برنج در برابر تنش کادمیوم را بهبود می‌بخشد. بنابراین با توجه به نتایج فوق، می‌توان بیان کرد که پلاک‌های آهن موجود در سطح ریشه می‌توانند کادمیوم را جذب سطحی کنند و از جذب آن توسط گیاه جلوگیری کنند و همچنین اضافه کردن آهن و فراهمی آن نیز موجب کاهش سمیت کادمیوم در برنج می‌شود. در پژوهشی، (Zhou et al., 2023) با استفاده از مواد نانو بر پایه آهن، موفق به کاهش تجمع کادمیوم در اندام هوایی برنج به میزان ۷۵ تا ۸۰ درصد شدند. علاوه بر این، مواد نانو باعث افزایش پلاک‌های آهن به میزان ۲۶۷٪ شدند و از جذب کادمیوم توسط ریشه جلوگیری کردند. به‌طور خلاصه، نویسندگان این مقاله، مکانیسم این عمل را تنظیم هورمون‌های گیاهی، تشکیل فیتوکلات‌ها و ژن‌های انتقال کادمیوم عنوان کردند.

روی

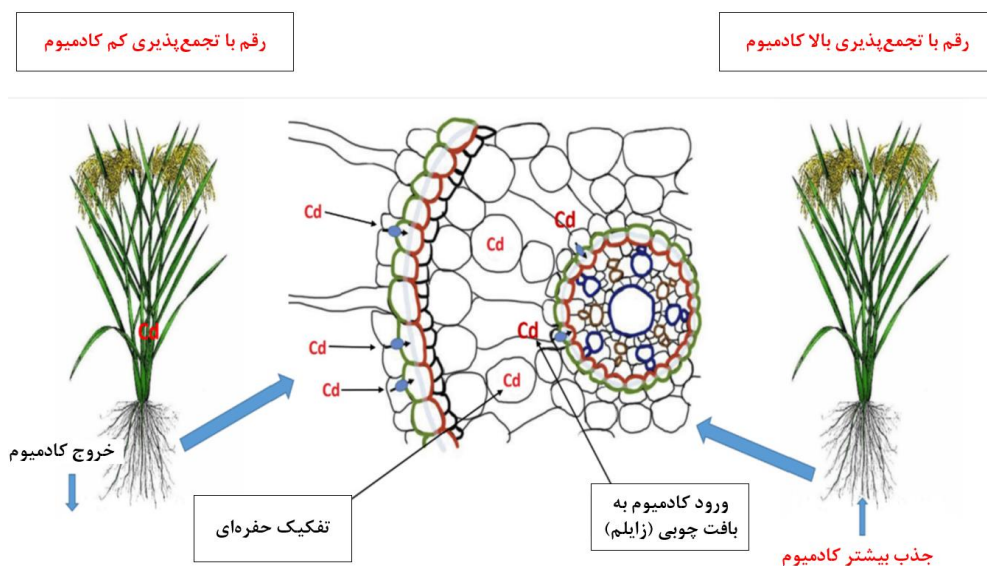
خواص فیزیکی و شیمیایی روی تقریباً مشابه کادمیوم است که با افزایش آن، احتمال کاهش سمیت کادمیوم در گیاهان افزایش می‌یابد (Hassan et al., 2006; Yang et al., 2021). به طور کلی، دو نوع فعل و انفعال بین فلزات در طول جذب آن‌ها توسط گیاهان وجود دارد که یا هم‌افزایی است (افزودن یک فلز باعث افزایش جذب فلز دیگر می‌شود) یا متضاد است (افزودن یک فلز باعث کاهش جذب فلز دیگر می‌شود). بسیاری از مطالعات، اثر متقابل کادمیوم و روی در گیاه برنج را اثبات کرده‌اند (Basnet et al., 2014; Fahad et al., 2015). البته (Hassan et al., 2005) بیان کردند غلظت ۱ میکرومولار روی در محلول غذایی، باعث افزایش انتقال کادمیوم از ریشه به شاخه‌ها شد. با این حال، تأمین روی باعث افزایش رشد گیاه و رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش غلظت MDA و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی در برنج تحت تنش کادمیوم شد. (Ma et al., 2020) در پژوهشی، با کاربرد مواد نانو اکسید روی (ZnO) موفق به کاهش

همزمان کادمیوم و آرسنیک در بافت‌های گیاه برنج شدند. Hu et al., (2023) بیان کردند که پاشش کود روی در سطح برگ، باعث کاهش کادمیوم و سرب به ترتیب به میزان ۲۹/۵۲ تا ۵۶/۰۱ درصد و ۱۱/۱۰ تا ۲۸/۳۴ درصد در مقایسه با تیمار شاهد، شد. Fahad et al., (2015) گزارش کردند، تمام تیمارهای روی باعث کاهش غلظت کادمیوم در گیاهان و افزایش پارامترهای رشد، تعداد سنبله‌ها، تعداد خوشه‌ها در هر سنبله، باروری خوشه‌ها و عملکرد دانه شدند. این نتایج میدانی نشان داد که کاربرد خاکی روی ممکن است یک گزینه مؤثر برای کاهش غلظت کادمیوم در برنج باشد؛ اما پاسخ‌ها، به منابع روی متفاوت است. در این راستا، Chang et al., (2023) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که افزایش کاربرد روی در برنج آلوده به کادمیوم، باعث افزایش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی گیاه می‌شود.

سایر فعالیتهای کشاورزی

استفاده از کولتیوارهای برنج با قابلیت پائین جذب کادمیوم

انتخاب و پرورش ارقام برنج با توانایی تجمع کم کادمیوم می‌تواند راه دیگری برای کاهش غلظت کادمیوم در برنج باشد. اثبات شده است که تجمع کادمیوم در برگ و دانه‌های برنج بین ارقام مختلف حتی در شرایط رشد یکسان و آلودگی فلزی، به طور قابل توجهی متفاوت است (شکل ۲) (Uraguchi & Fujiwara 2013; Song et al., 2014). Hu et al., (2013a) به این نتیجه رسیدند که تجمع کادمیوم بین ارقام برنج متفاوت است. Zhao et al., (2023a) در مقایسه دو رقم برنج ZZ143 (رقم با تجمع کم کادمیوم) و YX409 (رقم با تجمع زیاد کادمیوم)، به این نتیجه رسیدند که رقم ZZ143 حاوی کادمیوم بیشتری در ریشه خود نسبت به رقم YX409 بود. گزارش شده است که ارقام برنج با تجمع کم کادمیوم ممکن است فلزات سنگین دیگر را انباشته کنند (Hu et al., 2013a, b). بنابراین، انتخاب ارقام با توانایی تجمع کم کادمیوم باید با دقت بسیاری انجام شود، به ویژه برای خاک‌های آلوده به فلزات مختلط، کاهش تجمع کادمیوم در ژنوتیپ‌های برنج ممکن است به دلیل مکانیسم‌های مختلفی در طول جذب کادمیوم توسط گیاهان باشد. Wang et al., (2013) گزارش دادند که گونه HA63 با فعال‌سازی فیتوسیدروفورها، جذب کادمیوم را کاهش داده و جذب آهن را در مقایسه با ارقام دیگر افزایش داد. مطالعات فوق نشان دادند که پتانسیل استفاده از ارقام برنج با تجمع کم کادمیوم، در تولید برنج در خاک‌های آلوده به کادمیوم وجود دارد. Akram et al., (2024) در مطالعه‌ای تحت شرایط هیدروپونیک و طرح آماری کاملاً تصادفی چند فاکتوره، میزان تجمع کادمیوم را در دوازده رقم متفاوت برنج در غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ μM کادمیوم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین غلظت کادمیوم در ریشه‌ها و اندام هوایی، مربوط به رقم V20 (IRRI-6) و کمترین غلظت مربوط به رقم V1 (Super Basmati) در غلظت کادمیوم ۱۵ μM بود.



شکل ۲. ارقام برنج با تجمع پذیری کم و زیاد کادمیوم و مکانیسم آن‌ها در پاسخ به حضور کادمیوم در محیط (Hussain et al., 2021)

مدیریت آب

مدیریت آب در مزارع برنج، یک روش مقرون به صرفه برای کاهش جذب و تجمع کادمیوم در گیاهان برنج است (Wang et al., 2023; Hu et al., 2013a, b, 2015; Pan et al., 2016). غرقابی بودن مداوم در طول رشد برنج، جذب کادمیوم را کاهش می‌دهد. غلظت‌های

کادمیوم در پوست برنج در تیمارهای متناوب و غرقابی، کمتر از تیمارهای هوازی متناوب بود. در آزمایش میدانی، با افزایش حجم آبیاری از هوازی به غرقابی، غلظت‌های کادمیوم در ساقه برنج از ۱/۷۶ به ۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (Hu et al., 2015). Hu et al., 2013 گزارش دادند که عملکرد دانه برنج با تیمارهای متناوب و مرسوم آبی در مقایسه با تیمارهای هوازی و غرقابی افزایش یافت. به‌علاوه، Hu et al., 2013b اثبات کردند که آبیاری غرقابی مناسب، تا مرحله پنجه زنی کامل همراه با آبیاری متناوب در مقایسه با آبیاری‌های غرقابی و هوازی در یک خاک آنتروسول تیپیکال که آهن آن آبشویی شده است، باعث افزایش عملکرد دانه و کاهش تجمع کادمیوم و آرسنیک در برنج قهوه‌ای می‌شود. در شرایط غرقابی، کاهش دسترسی کادمیوم ممکن است به دلیل تشکیل CdS غیر محلول در خاک باشد (Rehman et al., 2015). مدیریت آب به همراه سایر اصلاح‌کننده‌ها ممکن است نقش مؤثری در کاهش کادمیوم در برنج ایفا کند. گزارش شده است که استفاده از سپیولیت به همراه کود فسفات، غلظت‌های کادمیوم قابل جذب را در برنج قهوه‌ای به میزان ۵۲/۳، ۴۶ و ۴۶/۸ درصد، به ترتیب در شرایط غرقابی مداوم، آبیاری سنتی و آبیاری مرطوب در مقایسه با تیمارهای شاهد کاهش داده است (Li & Xu 2015). Shehzad et al., (2022) پیشنهاد دادند که آبیاری هوازی-غرقابی می‌تواند یک استراتژی مؤثر برای کاهش غلظت‌های سرب و آرسنیک به‌طور همزمان در دانه‌های برنج باشد. در مطالعه‌ای دیگر Li et al., (2022a) بیان کردند که آبیاری با تنظیم مقدار اکسیژن، بر pH و پتانسیل احیای خاک تأثیر می‌گذارد و باعث تنظیم دسترسی زیستی کادمیوم می‌شود. این دانشمندان بیان کردند که آبیاری با تنظیم مقدار اکسیژن همچنین با تأثیر بر پلاک‌های آهن، موانع از دست دادن اکسیژن رادیکال، دیواره سلولی و جریان انتشار می‌تواند تجمع کادمیوم در ریشه را کاهش دهد.

تناوب و الگوی کشت

میزان تجمع فلزات سنگین در محصولات، بسته به سیستم کشت متفاوت است (Kang et al., 2020; Kang et al., 2021). درواقع، غلظت نهایی کادمیوم در محصولات مخلوط، به ترکیب زراعی بستگی دارد و این مسئله برای انتخاب ترکیب کشت مخلوط مناسب در مواجهه با مناطق مختلف مزرعه برنج آلوده به کادمیوم حائز اهمیت می‌باشد (Senila & Kovacs, 2024). تناوب زراعی روش جایگزین دیگری است که در کاهش فراهمی زیستی کادمیوم در محصولات، همزمان با تأمین غذا استفاده می‌شود (Jing et al., 2023). ثابت شده است که کشت مخلوط برنج با تجمع زیاد یا کم کادمیوم و با سایر گیاهان غنی از کادمیوم می‌تواند به طور قابل توجهی ارتفاع بوته برنج، تعداد پنجه و زیست توده را در تمام قسمت‌ها افزایش داده و سمیت فلز را در برنج و بذر کاهش دهد (Xu et al., 2021). به‌طور کلی پذیرفته شده است که کشت مخلوط، به‌طور غیرمستقیم اثر کادمیوم را با افزایش pH خاک، افزایش محتوای پلاک آهن و تغییر پتانسیل ردوکس خاک بین ریشه‌ای برنج کاهش می‌دهد (Kang et al., 2021). Yu et al., (2014) یک آزمایش مزرعه ای را در خاک لوم آلوپال تحت تناوب کلزا-برنج انجام دادند. کشت برنج پس از کلزا باعث افزایش غلظت کادمیوم در گیاه برنج شد. این نتیجه نشان داد که کشت دانه‌های کلزا در خاک، کادمیوم را متحرک کرده و جذب آن را با محصول متوالی برنج افزایش داد. جذب کادمیوم بین ارقام کلزا و برنج متفاوت است (Yu et al., 2014)، که نشان دهنده اهمیت گونه‌های گیاهی در طول تناوب زراعی برای اطمینان از امنیت غذایی می‌باشد. در دسترس بودن کادمیوم نه تنها با تناوب زراعی متفاوت است، بلکه با الگوهای کشت نیز متفاوت است (Liu et al., 2014). گزارش شده است که غلظت کادمیوم در دانه برنج رشد یافته در شرایط کشت مستقیم بذر در آب (dry direct-seeded flooded rice) نسبت به شرایط هوازی کشت خشکه کاری (dry direct-seeded rice culture) کمتر بود ولی در مقایسه با برنج کشت شده به روش نشاءکاری غرقابی (transplanted-flooded) قابل توجه بود. محتوای کادمیوم در دانه‌های برنج کشت شده به روش خشکه کاری ۳۳ تا ۶۰ برابر بیشتر از برنج کشت شده به روش مرسوم (نشاءکاری غرقابی) بود. غلظت بالاتر Cd در دانه‌های برنج کشت شده به صورت هوازی نسبت به بی هوازی به دلیل افزایش محتوای Cd محلول در آب است که با افزایش پتانسیل اکسیداسیون و کاهش در شرایط هوازی خشک مرتبط است (Liu et al., 2014). Deng et al., (2023) در مطالعه‌ای اثر کشت متناوب برنج و کاسنی را در تولید دانه‌های سالم و گیاه‌پالایی شالیزار آلوده به کادمیوم در یک آزمایش چهار ساله مزرعه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد کشت متناوب کاسنی خطر آلودگی کادمیوم را در دانه‌های بعدی برنج کاهش داد. همچنین تکرار برداشت کاسنی، کارایی استخراج گیاهی کادمیوم را افزایش داد و این کارایی در سال‌های متوالی تناوب به ۲۰٪ رسید.

استفاده از روش‌های زیستی

اضافه کردن کمپوست و کودهای آلی

به طور کلی، اصلاح کننده‌های آلی به روش‌های مختلف در خاک‌های آلوده به فلزات استفاده می‌شوند تا جذب فلزات توسط گیاهان را کاهش دهند (Juan et al., 2012; Hussain et al., 2021). مواد آلی خاک با تشکیل همتافت‌های آلی-فلزی، نقش مهمی در زیست‌فراهمی عناصر سنگین ایفا می‌کنند. گروه‌های COO^- در هر دو گروه مواد آلی جامد و محلول، توانایی تشکیل همتافت‌های پایدار با فلزات را دارند که بر حسب نوع عنصر، این پایداری متفاوت خواهد بود. اگر گیاهان یک ژنوتیپ، در دامنه‌ای از خاک‌ها رشد یابند، سطوح کادمیوم مربوط به خصوصیات خاک خواهد بود. در خاک‌هایی که حاوی مقادیر زیاد مواد آلی هستند مانند خاک‌های چراگاه‌ها و یا خاک‌های تیمار شده با کودهای دامی، میزان زیادی از کادمیوم محلول خاک به صورت ترکیب با کربن آلی محلول و فراهم برای گیاه وجود دارد (Bolan & Duraisamy, 2003). نقش کربن آلی محلول در افزایش حلالیت کادمیوم در pH‌های بالای خاک در پژوهش‌های دیگران نیز ثابت شده است (Strobel et al., 2005). کاربرد کمپوست باعث کاهش کادمیوم قابل دسترس در خاک و جذب آن توسط برنج در مقایسه با تیمار شاهد شده است (Hussain et al., 2021; Juan et al., 2012). گزارش شده است که کاربرد کمپوست به طور قابل توجهی تجمع کادمیوم را در برنجی که در خاک‌های با pH پایین و بالا رشد می‌کند، کاهش داده است. نویسندگان بیان کردند که کاهش سریع غلظت کادمیوم در خاک‌های با pH پایین ممکن است به دلیل تفکیک و توزیع سریع کادمیوم پس از اصلاح با کمپوست نسبت به خاک‌های با pH بالا باشد. نتایج نشان داد نوع خاک، بر دسترسی کادمیوم به گیاهان تأثیر می‌گذارد. (Sebastian & Prasad, 2013) گزارش دادند که اصلاح خاک با ورمی‌کمپوست باعث افزایش غلظت کادمیوم در واریته‌های برنج هندی MO 16 و MTU 7029 و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی شد. نویسندگان پیشنهاد کردند که افزایش رشد ریشه با کاربرد ورمی‌کمپوست ممکن است دلیلی برای تجمع بیشتر کادمیوم توسط گیاهان برنج باشد. با افزودن کودهای آلی یا کمپوست، می‌توان کادمیوم فعال خاک را به کادمیوم پیوند شده به ماده آلی تبدیل کرد (Yin et al., 2016). پس از ورود این مواد به خاک، غلظت مواد آلی محلول افزایش می‌یابد و غلظت کادمیوم در حالت محلول در خاک و همچنین در برنج قهوه‌ای کاهش خواهد یافت (Hussain et al., 2021). (Chen et al., 2021) با افزودن ۳٪ کود کرم ابریشم به خاک، کاهش حداکثر ۴۰/۹۰٪ در کادمیوم در فاز مؤثر و تبدیل آن به سایر فرکشن‌ها را مشاهده کردند. Saengwilai & Meeinkuirt, (2021) با موفقیت گونه‌های مختلفی از برنج را کشت کردند و غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج Khao Dok Mali 105 با افزودن اصلاح کننده‌های آلی به زیر ۰/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم رسید. (Huang et al., 2020b) مقدار مشخصی از کود مرغی را به خاک اضافه کردند که منجر به کاهش ۷۷/۸٪ کادمیوم در فاز قابل تبادل شد و محتوای کادمیوم در برنج قهوه‌ای نیز کمتر از استاندارد ایمنی ملی (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. (Yang et al., 2020) گزارش کردند که با افزودن ۵/۷ تا ۲۳ تن در هکتار از باقیمانده کلزا، مقدار ماده آلی (OM) تا ۷۰/۱٪ افزایش یافت و کادمیوم قابل استخراج از ۰/۶۹ به ۰/۴۴ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. در مطالعه دیگری نتایج کاربرد ترکیب کمپوست کود مرغی و قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بر رشد گیاه برنج (۹۰ روز) در شرایط آلودگی کادمیوم نشان داد، برنج کشت شده با این تیمار، بیشترین مقادیر ارتفاع گیاه، طول ریشه، کلروفیل و ظرفیت تبادل کاتیونی را نسبت به سایر تیمارها داشت (Vallejos-Torres et al., 2023).

تأثیر بقایای گیاهی

همچنین اثبات شده است که افزودن کاه محصولات در خاک‌ها بر دسترسی فلزات به گیاهان تأثیر می‌گذارد (Bai et al., 2013; Yin et al., 2016). گزارش شده است که اضافه کردن کاه گندم (۰/۲۵ تا ۱ درصد وزنی/وزنی) به خاک‌های آلوده، رشد گیاه برنج و pH خاک را کاهش داد؛ در حالی که غلظت کادمیوم در بافت‌های گیاهی و کادمیوم محلول در محلول‌های خاک را افزایش داد (Bai et al., 2013). (Yang et al., 2023) در پژوهشی تأثیر بقایای کلزا بر سمیت کادمیوم در خاک و جذب و انتقال آن توسط برنج را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد کاربرد ۷/۵ تا ۳۰ گرم بر کیلوگرم بقایای کلزا در خاک، باعث افزایش pH، ماده آلی، کربن زیست‌توده میکروبی، نیتروژن، فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، فسفاتاز اسیدی و اوره‌آز به ترتیب به مقدار ۰/۰۱ تا ۰/۵۵ واحد، ۷/۸ تا ۲۵٪، ۰ تا ۸۹/۷٪، ۰ تا ۴۷/۵٪، ۱۴/۳ تا ۳۴۴٪، ۰ تا ۱۲۷/۱٪ و ۳/۵ تا ۱۴/۳٪ شد. همچنین در گیاه برنج، مقدار عناصر کادمیوم، آهن، پتاسیم، منیزیم، فسفر و روی در بافت گیاه افزایش یافت اما غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج به اندازه ۳/۱ تا ۳۱/۳ درصد کاهش یافت. مطالعات فوق گزارش دادند که کاربرد کمپوست و کودهای دامی در خاک‌ها بسته به نوع کمپوست و کود، مدت زمان کاربرد و نوع خاک، غلظت کادمیوم در

دانه‌های برنج را کاهش و یا افزایش داده است. با این حال، هنوز نیاز به مطالعات بیشتری برای بررسی پایداری طولانی مدت کادمیوم با کاربرد اصلاحات آلی مختلف وجود دارد.

بیوجار

به‌طور گسترده، گزارش شده است که کاربرد بیوجار می‌تواند جذب فلزات را در گیاهان مختلف کاهش دهد (Khan et al., 2015; Rizwan et al., 2016; Suksabye et al., 2016). بیوجار دارای ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد و گروه‌های عملکردی فعال متعدد (کربوکسیل، هیدروکسیل و کربونیل) است که این عوامل باعث محدود شدن حرکت یون‌های فلزات سنگین می‌شوند (Lima et al., 2013b; Zhang et al., 2014). چندین مطالعه میدانی کاربرد بیوجار در خاک‌های شالیزاری آلوده به کادمیوم و اثرات آن بر جذب و تجمع کادمیوم در گیاهان برنج را مورد بررسی قرار دادند (Cui et al., 2011; Xu et al., 2024b). بیوجار حاصل از کاه برنج، فعالیت کادمیوم در سیستم‌های خاک-برنج را عمدتاً از طریق جذب، کاهش می‌دهد. به همین ترتیب، کاربرد بیوجار، غلظت کادمیوم را در برنج کاهش داده و رشد و عملکرد برنج را افزایش می‌دهد (Rizwan et al., 2018; Xu et al., 2024b). گزارش شده است که کاربرد بیوجار کاه برنج، باعث کاهش غلظت کادمیوم در وارپته برنج ژاپونیکا و پرولین آزاد، MDA و فعالیت‌های SOD، POD و CAT در برگ‌های پرچم برنج تحت استرس کادمیوم شده است (Zhang et al., 2014). Cui et al., (2011) گزارش کردند، کاربرد بیوجار به مقدار ۱۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار، غلظت کادمیوم را در دانه‌های برنج به ترتیب ۱۶/۸، ۳۷/۱ و ۴۵ درصد در سال اول و ۴۲/۷، ۳۹/۹ و ۶۱/۹ درصد در سال دوم کاهش داد. همچنین Zhang et al., (2015) گزارش دادند که کاربرد بیوجار در شرایط میدانی، غلظت کادمیوم را در ریشه‌ها، ساقه‌ها و دانه‌های برنج کاهش داد. کاهش غلظت کادمیوم در خاک کشاورزی ممکن است به دلیل تغییرات میکروبی در خاک، به ویژه باکتری‌های درگیر در چرخه نیتروژن باشد (Chen et al., 2015). علاوه بر این، کاهش جذب کادمیوم ناشی از بیوجار توسط گیاهان برنج، ممکن است به دلیل افزایش سلیسیوم محلول خاک و جذب آن توسط گیاهان برنج باشد (Liu et al., 2013b). به‌طور گسترده گزارش شده است که کاربرد سلیسیوم جذب کادمیوم و سایر فلزات را توسط گیاهان کاهش می‌دهد (Adrees et al., 2015; Keller et al., 2016). نتایج کلی نشان داد که بیوجار می‌تواند برای تولید دانه‌های برنج با غلظت کادمیوم کم استفاده شود. کاهش جذب کادمیوم توسط گیاهان برنج ناشی از بیوجار، عمدتاً به دلیل افزایش pH خاک و یا جذب کادمیوم روی بیوجار می‌باشد. با این حال، اثرات بلندمدت بیوجار بر تثبیت کادمیوم در خاک به‌خوبی مطالعه نشده است (Li et al., 2023a). همچنین در مطالعه‌ای تأثیر مثبت بیوجار ساقه ذرت در کاهش جذب کادمیوم در ارقام ساتیوا و ایندیکا برنج به اثبات رسید (Xu et al., 2024b). دانشمندان این تحقیق همچنین، بیان کردند که بیوجار از طریق اثرات آهکی و اثرناپذیرسازی^۱ باعث کاهش فراهمی زیستی کادمیوم می‌شود. در پژوهش دیگری، اثر بیوجار و هیدروچار فعال مشتق شده از جلبک کلرلا و لگاریس^۲ بر شکل‌های مختلف کادمیوم در خاک بررسی شد (صوفیان و همکاران، ۱۴۰۳). شکل‌های مختلف کادمیوم در خاک شامل قابل تبادل، پیوند خورده مواد آلی، کربناتی و متصل به اکسید آهن و منگنز اندازه‌گیری شد. نتایج مثبتی در آزمایشات حاصل شد به‌طوری که، در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم، افزودن ۱ درصد بیوجار باعث کاهش ۲/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم (تیمار شاهد) قابل تبادل شد. این مطالعه نشان داد که استفاده از بیوجار و هیدروچار فعال تولید شده از جلبک کلرلا و لگاریس با افزایش شکل‌های زیستی کم محلول کادمیوم، می‌تواند گام مهمی در مسیر کشاورزی پایدار باشد.

استفاده از میکروارگانیسم‌ها

میکروارگانیسم‌های خاک جزء حیات اکوسیستم خاک هستند که بر کیفیت خاک و رشد گیاه تأثیر می‌گذارند (Chen et al., 2019). نقش میکروارگانیسم‌ها برای درک حلالیت کادمیوم و کاهش سمیت آن حیاتی است (Meng et al., 2019). از میکروارگانیسم‌ها می‌توان برای تثبیت کادمیوم به شکل غیرسمی استفاده کرد. آن‌ها می‌توانند با تغییر بیان نسبی ژن‌ها و جامعه باکتریایی خاک، جذب کادمیوم را در برنج کاهش دهند (Chen et al., 2019). برخی از گونه‌ها توانایی تحمل چند متالوئید هستند که رشد نهال برنج را در حضور کادمیوم بهبود می‌بخشد و با کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم در برنج، منجر به افزایش رشد گیاه می‌شوند. همچنین میکروارگانیسم‌های خاک می‌توانند به طور قابل توجهی به کاهش تجمع کادمیوم و تنش اتیلن در گیاهچه‌های برنج کمک کنند (Mitra et al., 2018). میکروب‌ها نه تنها به کاهش غلظت کادمیوم در ریشه و دانه برنج کمک می‌کنند، بلکه باعث افزایش غلظت مواد غذایی ضروری، به ویژه آهن و منگنز می‌شوند که انتقال کادمیوم را از طریق کانال‌های کاتیونی به شیوه‌ای رقابتی محدود می‌کند (Wang et al., 2020). توانایی

1 Passivation

2 *Chlorella vulgaris*

میکروارگانیسیم‌های مختلف در کاهش مقدار کادمیوم به اثبات رسیده است (جدول ۱). در مطالعه‌ای، توانایی *Lactobacillus plantarum* در حذف کادمیوم در برنج مورد بررسی قرار گرفت. *L. plantarum* به طور قابل توجهی مقدار کادمیوم را در برنج نسبت به شاهد کاهش داد و کمترین میزان کادمیوم در برنج پس از تخمیر توسط *L. plantarum* CCFM8610 (۰/۰۸۹ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم برنج خشک) ثبت شد (Zhai et al., 2019). علاوه بر این، افزودن میکروب‌های بی‌هوازی مانند *Anaerolineaceae* در زیست‌پالایی کادمیوم یکی دیگر از روش‌های بالقوه است زیرا این امر باعث تعدیل شکل‌دهی جامعه میکروبی و تنظیم حلالیت کادمیوم می‌شود (Hussain et al., 2021). در پژوهشی دیگر، برنج کشت شده در خاک تحت تنش کادمیوم (۱۲۰ میلی گرم در کیلوگرم) با *Bacillus subtilis* و *cereus* و تعدادی از میکروارگانیسیم‌های تجاری مؤثر تلقیح شد. نتایج نشان داد، غلظت کادمیوم در ریشه، اندام هوایی و دانه با تلقیح *B. subtilis* به میزان زیادی کاهش یافت. علاوه بر این، این باکتری‌ها با انحلال فسفات، تولید ایندول استیک اسید و ACC دآمیناز که مسئول کنترل اتیلن است، زیست‌توده خشک گیاه را افزایش داده و از آن در برابر سمیت کادمیوم محافظت می‌کند (Treesubsuntorn et al., 2018). Kong & Lu, (2022). مخلوطی از مدفوع کرم ابریشم و سوسپانسیون باکتریایی متشکل از باکتری‌های *Bacillus subtilis*، *Bacillus coagulans*، *Bacillus licheniformis*، باکتری لاکتیک اسید و مخمر را در کاهش کادمیوم گیاه برنج در شالیزار استفاده کردند. نتایج استفاده از این کود میکروبی حکایت از کاهش جذب کادمیوم و افزایش عملکرد برنج داشت. همچنین، کود مورد نظر فراوانی باکتری‌های اکسیدکننده آهن و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و اسید فسفاتاز را افزایش داد. دانشمندان پیشنهاد کردند که استفاده بیش از ۴/۵ تن در هکتار از این کود مخلوط می‌تواند سلامت تولید برنج در خاک‌های با آلودگی بالای کادمیوم را تضمین کند.

جدول ۱. برخی از میکروارگانیسیم‌های جداسازی شده مقاوم به کادمیوم

نوع میکروارگانیزم	سویه	محل جداسازی	منبع
	<i>Aeromonas caviae</i>	منابع آب زیرزمینی قابل شرب	Aryal, (2021)
	<i>Aeromonas amylolyticus</i>	آب کشاورزی	
	<i>Bacillus cereus</i> RC-1	خاک شالیزاری آلوده به کادمیوم	
	<i>Bacillus thuringiensis</i> OSM29	خاک آلوده به پساب صنعتی	
	<i>Brevundimonas</i> sp. ZF12	چشمه آب گرم	
	<i>Geobacillus therantarcticus</i>	آب زیرزمینی	
	<i>Ochrobactrum anthropi</i>	لجن فعال	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> B237	معدن روی	Zhou et al., (2020)
	<i>Enterobacter tabaci</i> R3-2.	دانه‌های برنج	
	<i>Enterobacter tabaci</i> R2-7		
	<i>Pantoea agglomerans</i> R3-3		
	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> R5-5		
<i>Sphingomonas sanguinis</i> R7-3			
Raj et al., (2016)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> JP-11	رسوبات ساحلی	
Yu et al., (2021)	<i>Burkholderia</i> ha-1	خاک آلوده به کادمیوم	
	<i>Burkholderia</i> hj-2		
	<i>Burkholderia</i> ho-3		
Shi et al., (2021)	<i>Comamonas</i> sp. XL8	خاک آلوده به کادمیوم	
Wu et al., (2022)	<i>Pseudomonas</i> sp. B7	خاک کشاورزی آلوده به کادمیوم	
Limcharoensuk et al., (2015)	<i>Tsukamurella paurometabola</i> A155	خاک معدن روی	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> B237		
	<i>Cupriavidus taiwanensis</i> E 324		
Xie et al., (2021)	<i>Penicillium janthinellum</i> ZZ-2	خاک آلوده به کادمیوم	
Chen et al., (2019)	<i>rhizophagus intraradices</i>	—	
	<i>Funneliformis mosseae</i>	—	
Talukdar et al., (2020)	<i>Aspergillus fumigatus</i>	تصفیه خانه فاضلاب	
Shadmani et al., (2021)	<i>Alternaria alternata</i>	ریشه‌های گیاه جو	
	<i>Microdochium bolleyi</i>		
	<i>Bipolaris zeicola</i>		
	<i>Alternaria</i> sp.		
	<i>Pleosporales</i> sp.		
	<i>Fusarium redolens</i>		
	<i>Fusarium tricinctum</i>		
	<i>Fusarium moniliforme</i>		
	<i>Clonostachys rosea</i>		
<i>Epicoccum nigrum</i>			

باکتری به‌عنوان جاذب زیستی

یکی از روش‌های مؤثر برای پالایش خاک‌های آلوده را می‌توان تصفیه زیستی با باکتری‌ها و به طور کلی میکروارگانیسم‌ها نام برد. بسیاری از میکروب‌ها به فلزات متعدد مقاومت پیدا کرده‌اند و قادر به جذب درون، یا برون‌سلولی آن‌ها هستند و البته تأثیر این فلزات و آلاینده‌ها بر میکروارگانیسم‌ها، تابع غلظت آن‌ها در محیط است. از این رو سعی می‌شود تا از طریق این میکروب‌ها، آلودگی فلزات را در محیط کاهش داد. باکتری‌های مقاوم به کادمیوم از طریق جذب سطحی و ترسیب سلولی کادمیوم، طولانی کردن فاز تأخیری، تغییر شکل کادمیوم به اشکال با سمیت کمتر، سیستم جریان فعال و تشکیل کمپلکس با مولکول‌های حاوی thiol و ... در برابر سمیت کادمیوم مقاومت کرده و می‌توانند گیاه را در برابر اثر سمیت فلزات سنگین حفاظت نمایند (Khan et al., 2022; Zhang et al., 2024c; Sharma et al., 2024; Adhikary et al., 2024). گونه‌های سیتروباکتر و *Burkholderia* می‌توانند با تولید کمپلکس‌های نامحلول کادمیوم-فسفات در برابر سمیت کادمیوم مقاومت کنند (Liu et al., 2023). برخی باکتری‌های مقاوم به کادمیوم و کاهنده سولفات مانند *P. aeruginosa*, *Salmonella typhimurium* و *Treponema denticola*، تولید هیدروژن سولفید کرده و کادمیوم کلراید را رسوب می‌دهند که بسیار پایدار و نامحلول است (Wang et al., 2001; Zhou et al., 2024). عوامل پیوندی که فلزات را از طریق ترسیب، (Sequestration) سمیت‌زدایی می‌کنند، در ایجاد مقاومت در برابر یون‌های فلزات سنگین در بعضی از باکتری‌ها نقش دارند. این عوامل پیوندی شامل پروتئین‌های پیوندی بین سلولی (متالوتیونین باکتریایی و متالوچاپرون‌ها) و اجزای دیواره سلولی (اگزوپلی ساکاریدها) می‌باشد. متالوتیونین‌های باکتریایی، پروتئین‌های غنی از سیستئین پیوند شونده با کادمیوم و روی هستند (Roy et al., 2024). بسیاری از باکتری‌ها در برابر غلظت بالای کادمیوم مقاوم هستند، اگرچه این عنصر معمولاً موجب کاهش رشد، طولانی شدن فاز سکون، حجم کمتر سلول و حتی مرگ باکتری می‌شود؛ اما میکروارگانیسم‌ها مکانیسم‌های مختلفی را نظیر طولانی کردن فاز تأخیری، برای سازش با یون‌های فلز سنگین استفاده می‌کنند. نمونه آن باکتری مقاوم به عناصر سنگین *Bacillus circulans* EB1 می‌باشد که الگوی رشد تأخیری در حضور ۱۰۰۰ میکرومولار کادمیوم کلرید، زمانی که در محیط کشت مایع در شرایط هوازی رشد داده شد در آن دیده شد (Xu et al., 2024a).

جذب زیستی روشی ساده و کم‌هزینه است که طی واکنش‌های تعادلی و از طریق جذب فلزات روی گروه‌های عاملی سطح سلول، فلزات از محلول‌های آبی استخراج می‌شوند (Priya et al., 2022). محققین بیان کردند، فلزات و ترکیبات آن‌ها با میکروب‌ها به روش‌های مختلف بسته به نوع فلز، ارگانیسم و محیط زیست، فعل و انفعال دارند؛ در حالی که اجزای ساختاری و فعالیت متابولیک بر روی گونه فلز، حلالیت، تحرک، زیست‌فراهمی و سمیت آن‌ها تأثیر می‌گذارند (Gadd, 2010). دیوار سلولی میکروب‌ها از پلی ساکاریدها، لیپیدها و پروتئین‌ها تشکیل شده است که گروه‌های کربوکسیلات، هیدروکسیل، آمینو و فسفات را فراهم می‌کنند که می‌توانند کادمیوم (Cd) را در دیواره سلولی تثبیت کنند (Xin, 2024). بسیاری از میکروارگانیسم‌های خاک با تولید اسیدهای آلی توانایی انحلال فرم‌های غیر قابل دسترس فلزات سنگین در کانی‌ها را دارند. علاوه بر این، بسیاری از باکتری‌ها توانایی تحمل فلزات سنگین را دارند و نقش مهمی را در تحرک این عناصر بازی می‌کنند (Khan et al., 2022). کریمی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش کردند از بین ۴۰ جدایه جداسازی شده از خاک‌های آلوده به نفت و فلزات سنگین، فقط سه سویه *Ochrobactrum lupini* strain SH23، *Ochrobactrum lupine* strain SH24 و *Bacillus subtilis* subsp. *Inaquaosorum* SH34 توانایی تحمل و رشد در حضور همه فلزات سنگین را داشتند. Rajkumar et al., (2012) بیان کردند میکروارگانیسم‌های مرتبط (همیار) با ریشه گیاه می‌توانند تولید بیوماس در منطقه آلوده به فلزات سنگین را افزایش دهند، بر تحرک فلزات در خاک تأثیر گذاشته و از گیاه میزبان در برابر سمیت فلزات سنگین محافظت کنند. در بین باکتری‌ها گونه‌های *باسیلوس* به‌عنوان گونه‌های با پتانسیل بالای سکوستره کردن (کمپلکس و ذخیره سازی یون فلزی داخل سلول باکتری) فلزات انتخاب شده‌اند و در برنامه‌های جذب زیستی تجاری استفاده می‌شوند. در کنار آن گزارش‌هایی درباره‌ی جذب فلزات با استفاده از گونه‌های *سودوموناس* و گونه‌های *استریتومایسز* وجود دارد (Sahmoune, 2018; Xu et al., 2020). محققین چندین باکتری محرک رشد گیاه و اندوفیت را به‌عنوان کاهش دهنده سمیت فلزات سنگین در گونه‌های مختلف گیاهی شناسایی و معرفی کرده‌اند (Ma et al., 2016; Liu et al., 2024). در چند سال گذشته، تعدادی مطالعات نشان داد که بعضی از باکتری‌های لاکتیک اسید، شامل *Lactobacillus* *Bifidobacterium lactis*، *Bifidobacterium breve* و *Lactobacillus rhamnosus plantarum* می‌توانند در محیط آزمایشگاهی به فلزات سنگین مانند کادمیوم و سرب متصل شده و آن‌ها را حذف کنند (Xie et al., 2023; Xu et al., 2024c). شواهد قابل توجهی

وجود دارد که باکتری‌های لاکتیک اسید پروبیوتیک دارای خصوصیات آن‌تیاکسیدانتی هستند که می‌تواند بر علیه تنش اکسیداتیو القا شده توسط کادمیوم مؤثر باشند (Beheshtian et al., 2024). باکتری *Alishewanella* sp. WH16-1-MT مهندسی ژنتیک شده که دارای متالوتیونین بود هم باعث افزایش کارایی حذف کادمیوم در برنج شد (Yu et al., 2022).

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کاربرد باکتری‌های مقاوم به کادمیوم در کشت برنج

چندین باکتری محرک رشد گیاه و اندوفیت مانند *Exiguobacterium indicum*, *Enterobacter ludwigii*, *Pseudomonas* sp. و *Mesorhizobium loti* به‌عنوان کاهش دهنده سمیت فلزات سنگین در گونه‌های مختلف گیاهی شناخته شده‌اند (Ma et al., 2016; Singh et al., 2019; Li et al., 2023b; Zhou et al., 2022).

Siripornadulsil & Siripornadulsil, (2013) از خاک مزارع برنج آلوده به کادمیوم، ۲۴ جدایه باکتریایی مقاوم به غلظت ۲۵۰۰ میکرومولار $CdCl_2$ جداسازی کردند. آزمایش‌ها نشان داد که این باکتری‌ها ظرفیت بالایی برای پیوند با کادمیوم دارند (بین ۶/۳۸ تا ۹/۳۸ اتم کادمیوم به ازای هر سلول)، که بیشتر آن در داخل سلول تجمع می‌یابد. درصد کادمیوم تجمع‌یافته داخل سلول بین ۵۵ تا ۹۷/۳ درصد بود. در حضور $CdCl_2$ ، همه سویه‌ها میزان تولید ترکیبات تیول‌دار (حاوی گروه SH) و سولفیدهای معدنی را افزایش دادند. این ترکیبات با اتصال به یون‌های کادمیوم به کاهش سمیت آن کمک می‌کردند. سویه KKU2500-3 بهترین عملکرد را در رسوب کادمیوم و رشد بوته‌های برنج نشان داد، تجمع کادمیوم در گیاه را تا ۷۱ درصد کاهش داد و بیشترین ریشه‌های فیبری را تولید کرد.

Nath et al., (2014) باکتری‌های مقاوم به کادمیوم و سرب (*P. aeruginosa*) را از زمین‌های زراعی آلوده نزدیک مکان‌های صنعتی، گاراج و پمپ‌های بنزین منطقه آسام هند جداسازی کردند. بعد از ۲۰ روز تلقیح بذر در خاک تیمار شده با کادمیوم و کاربرد باکتری *P. aeruginosa* SN₁ مشاهده شد ۱۰/۱ (در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم) و ۱۸/۶ درصد (در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم) رشد ساقه گیاه (*Orayza Satvia* L.) نسبت به نبود باکتری افزایش یافت. رشد گیاهچه در تیمار *P. aeruginosa* SN₁ در هر دو سطح ۲۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم به طور معنی داری (۵ درصد) بیشتر از نمونه تلقیح نشده بود. در مطالعه‌ای، Liu et al., (2018) موفق به جداسازی سویه قدرتمند تجمع‌کننده کادمیوم *Delftia* sp. B9 از خاک آلوده به کادمیوم شدند. نتایج آزمون گلدانی نشان داد غلظت کادمیوم در دانه برنج، کمتر از حد استاندارد امنیت غذایی بود و این باکتری قادر به تثبیت کادمیوم و تجمع آن در داخل سلول بود. در پژوهش دیگری، Zhou et al., (2021) یک باکتری (*Bacillus koreensis* 181-22) اندوفیت مقاوم به کادمیوم با ظرفیت تجمع بالا (۹۰/۸ درصد) از ریشه گیاه برنج رشد کرده در خاک آلوده به کادمیوم، جداسازی کردند. نتایج تلقیح سویه جدا شده نشان داد این باکتری باعث افزایش معنی‌دار وزن تر ریشه و اندام هوایی (به ترتیب ۴۴/۴ و ۴۲/۷ درصد)، وزن خشک ریشه و اندام هوایی (به ترتیب ۷۱/۳ و ۳۹/۹ درصد) و کاهش مقدار کادمیوم در ریشه (۱۲/۸ درصد)، اندام هوایی (۳۴/۳ درصد) و دانه (۳۹/۱ درصد) برنج در شرایط تنش کادمیوم در مقایسه با گیاه تلقیح نشده، شد. همچنین سویه فوق با افزایش مقدار پروتئین و رنگدانه گیاه، تنظیم آنزیم‌های مؤثر در تنش اکسیداتیو مثل سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز و کاهش مالون‌دی‌آلدئید، باعث افزایش مقاومت برنج به کادمیوم شد. Cai et al., (2023) گزارش کردند، ترکیب باکتری اورئولیتیک (*Sporosarcina pasteurii*) و کاه و کلش برنج بر غیرمحرک‌سازی کادمیوم در یک خاک آلوده شالیزاری، باعث کاهش دسترسی زیستی کادمیوم و افزایش فعالیت آنزیمی خاک شد. همچنین ترکیب فوق، با افزایش فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک به ترتیب به مقادیر ۱۳/۶ و ۶۰ درصد، حاصلخیزی خاک را بهبود بخشید.

در مطالعه‌ای Zhang et al., (2024a) بیان کردند استفاده از مخلوطی از سویه‌های اتوتروف و هتروتروف، منجر به حذف ۵۲ درصد کادمیوم کل، ۳۹ درصد کادمیوم در دسترس و ۶۰ درصد از کادمیوم قابل تبادل و کربناته از خاک شالیزار شد. Yan et al., (2024b) دو سویه مقاوم به کادمیوم و محرک رشد گیاه (*Burkholderia* sp. 1-22 و *Bacillus* sp. 6-6) را از خاک ریزوسفر گیاه برنج جدا و خالص‌سازی کردند. سویه‌ها مقاومت خوبی در برابر کادمیوم تا غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از خود نشان دادند و با تنظیم pH خاک و افزایش جذب باکتریایی، باعث کاهش سمیت کادمیوم شدند. تجزیه و تحلیل FTIR^۲ نشان داد که گروه‌های عاملی سطحی موجود روی باکتری‌ها، مانند گروه‌های کربوکسیل و آمینو، نقش مهمی در جذب کادمیوم دارند. همچنین آزمایش‌های گلدانی نشان داد که این سویه‌ها به طور قابل توجهی ماده آلی و فعالیت آنزیمی (مانند اوره آز، سوکراز، پراکسیداز) را در خاک ریزوسفر در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. در مطالعه Xu et al., (2024c)، دانشمندان باکتری *Lysinibacillus* sp. OR-15 را جداسازی و شناسایی کردند که توانایی مؤثری در

1 Ureolytic

2 Fourier-transform infrared spectroscopy

حذف کادمیوم و کاهش کروم از محیط کشت داشت. آنالیزهای پروتئومیک و آزمون‌های بیان ناهمسان نشان دادند که آنزیم QueF، مقاومت باکتری به این فلزات سنگین را افزایش داده و ظرفیت حذف آن‌ها را بهبود می‌بخشد. پودر خشک شده این باکتری، توانست سطوح کادمیوم و کروم را در دانه‌های برنج کاهش دهد و در خاک به مدت ۶۰ روز پس از یک بار استفاده، تراکم 10^5 سلول در هر گرم را حفظ کند. همچنین، این باکتری باعث تشکیل پلاک آهن بر ریشه‌های برنج شد که به عنوان مانعی برای انتقال فلزات سنگین عمل می‌کند. در پژوهش دیگری، باکتری اندوفیت مقاوم به کادمیوم *Ralstonia* sp. YDR با توانایی تحمل ۸۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، توانست مقدار قابل توجهی کادمیوم را از طریق جذب زیستی و جذب درون سلولی حذف کند. *Ralstonia* sp. YDR دارای توانایی قلیایی‌سازی قوی و ویژگی‌های محرک رشد گیاه بود. آزمایش هیدروپونیک نشان داد که تلقیح با این باکتری، رشد برنج را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده و میزان کادمیوم را $14/4$ تا $41/3$ درصد کاهش داد. همچنین، این باکتری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش فعالیت مالون‌آلدئید را بهبود بخشید و موجب کاهش ورود Cd^{2+} و خروج H^+ از ریشه‌ها شد (Yin et al., 2024).

نتیجه‌گیری

ورود کادمیوم به شالیزارها و گیاه برنج، علاوه بر کاهش کیفیت و عملکرد گیاه موجب به خطر افتادن امنیت غذایی و سلامت انسان می‌شود. مطالعات در سطح کشور نیز نشان داده مقدار کادمیوم در خاک و گیاه برنج (دانه و بخش‌های مختلف) در برخی از نقاط کشور به ترتیب بیشتر از حد مجاز در خاک‌های کشاورزی و استاندارد ملی ایران بوده است. گیاه برنج از طریق ترسیب کادمیوم در ریشه و کاهش انتقال آن به ساقه، تحریک سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانتی، اتصال کادمیوم به دیواره‌های سلولی و واکوئل‌ها و ترکیب با مواد مختلف، تولید بیش از حد مولکول‌های سیگنال دهنده، تنظیم اسمزی، و هموستازی یون در برابر سمیت کادمیوم مقاومت می‌کند. روش‌های کاهش جذب و تنش گیاه برنج در مقابل کادمیوم را می‌توان به روش‌های غیر زیستی و زیستی تقسیم کرد. انتخاب واریته مناسب برنج، تناوب و اصلاح الگوی کشت و pH خاک و مدیریت مصرف آب در کنار استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی، استفاده از مواد سیگنال دهنده و مواد محرک رشد گیاه، از روش‌های غیر زیستی کاهنده تنش گیاه در برابر کادمیوم می‌باشند. نتایج استفاده از اصلاح‌کننده‌های زیستی مثل کمپوست نشان داد که کاربرد کمپوست و کودهای دامی در خاک‌ها بسته به نوع کمپوست و کود، ماده اولیه استفاده شده در تولید کمپوست، مدت زمان کاربرد و نوع خاک، غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج را کاهش و یا افزایش داده است، ولی در مورد بیوجار نتایج اکثر پژوهش‌ها نشان داد که اضافه کردن آن به خاک، میزان کادمیوم قابل دسترس خاک و جذب شده در گیاه و دانه برنج را کاهش داد. استفاده از روش‌های زیستی به‌ویژه تلقیح خاک و بذر با میکروارگانیسم‌ها و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (با انحلال فسفات، تولید ایندول استیک اسید و ACC-دآمیناز) و مقاوم در برابر کادمیوم که باعث افزایش رشد و مقاومت گیاه تحت تنش کادمیوم می‌شوند، از گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه می‌باشند که با محیط‌زیست سازگار بوده و مشکل هزینه بالا و ایجاد آلودگی ثانویه روش‌های فیزیکوشیمیایی را ندارند. برخی از میکروارگانیسم‌های مقاوم به کادمیوم از جنس‌های *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Aeromonas* و *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium* و ... بوده که از طیف وسیعی از مناطق و اکوسیستم‌ها شامل خاک آلوده، تصفیه خانه فاضلاب، رسوبات ساحلی، چشمه آب گرم، پساب صنعتی و ... جداسازی شده‌اند. باکتری‌های مقاوم به کادمیوم از طریق جذب سطحی و ترسیب سلولی کادمیوم، طولانی کردن فاز تأخیری، تغییر شکل کادمیوم به اشکال با سمیت کمتر، سیستم جریان فعال و تشکیل کمپلکس با مولکول‌های حاوی thiol و ... در برابر سمیت کادمیوم مقاومت کرده و می‌توانند گیاه را در برابر اثر سمیت فلزات سنگین حفاظت نمایند. دیوار سلولی میکروب‌ها از پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و پروتئین‌ها تشکیل شده است که گروه‌های کربوکسیلات، هیدروکسیل، آمینو و فسفات را فراهم می‌کنند که می‌توانند کادمیوم را در دیواره سلولی تثبیت کنند. همچنین بسیاری از میکروارگانیسم‌های خاک با تولید اسیدهای آلی توانایی انحلال فرم‌های غیر قابل دسترس فلزات سنگین در کانی‌ها را دارند. با توجه به این مکانیسم‌ها، باکتری‌های موثر می‌توانند فراهمی زیستی کادمیوم را کاهش داده و ورود این عنصر به ریشه، ساقه و دانه گیاه برنج را محدود کنند، در نتیجه موجب افزایش کیفیت برنج مصرفی شده و نقش بسیار مهمی در تأمین امنیت غذایی انسان خواهند داشت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

پیرزاده، مهناز، افیونی، مجید، و خوشگفتارمنش، امیرحسین. (۱۳۹۱). وضعیت روی و کادمیوم در خاک‌های شالیزاری و برنج استان‌های اصفهان، فارس



و خوزستان و تاثیر آنها بر امنیت غذایی. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۶(۶۰)، ۸۱-۹۳.

حسینعلی علیخانی، شایان شریعتی، حسن اعتصامی، علیرضا فلاح نصرت آباد. (۱۴۰۱). ازتوباکتر به عنوان یک کود زیستی محرک رشد گیاه برنج (*Oryza sativa* L.). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۳)، ۶۳۳-۶۴۱.

رحمانی، حمیدرضا، و خان محمدی، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی فلزات سنگین در خاک برخی از شالیزارهای اطراف اصفهان و تاثیر کادمیوم بر امنیت غذایی، تحقیقات آب و خاک ایران. (انتشار آنلاین).

رحیمی، قاسم، چرخ‌آبی، امین. (۱۳۹۳). ارزیابی برخی فلزات سنگین در خاک‌های شالیزاری و تجمع آنها در اندام‌های برنج در منطقه لنجان استان اصفهان، نشریه دانش آب و خاک، ۲۴(۲)، ۱۰۷-۱۲۰.

رضائیان عطار، فرناز، حصار، جواد. (۱۳۹۲). بررسی آلودگی برنج‌های وارداتی پر مصرف در شهر تبریز به آلاینده‌های فلزی کادمیوم، سرب و آرسنیک. *پژوهش‌های صنایع غذایی*، ۲۳(۴)، ۵۸۱-۵۹۴.

شادبورستان، امیر، خاکسار، الهه، شکرزاده، محمد، تقوی، محمود. (۱۳۹۰). بررسی غلظت کادمیوم، کروم و سرب در برنج چمپا شهرستان مبارکه در سال ۱۳۸۸. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، ۲۱(۲)، ۱۲۷-۱۲۲.

صوفیان، جعفر، بابااکبری، محمد، آوانس، آرمن، و مرادی، صلاح‌الدین. (۱۴۰۳). بررسی اثر بیوجار و هیدروچار جلبک کلرلا ولگاریس فعال شده بر توزیع شکل‌ها و زیست‌فراهمی کادمیوم در خاک، تحقیقات آب و خاک ایران. (انتشار آنلاین).

فلاح، علیرضا، آرمنده، مصطفی، شریعتی، شایان، حسینی، مریم، قلی‌زاده، عبدالطیف. (۱۴۰۱). اهمیت سنگ فسفات در کشاورزی پایدار (اهمیت، ذخایر و کاربرد آن در کشت برنج). *موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی*. ۲۴۳ ص. شماره شابک: ۷-۴۸۰-۹۷۸-۶۲۲-۲۷۶.

قریب، حسین. (۱۳۹۱). چشم‌انداز امنیت غذایی در جمهوری اسلامی ایران *فصلنامه علمی راهبرد*، ۲۱(۴).

کریمی، سحر، شریعتی، شایان، پوربابائی، احمدعلی، علیخانی، حسینعلی، کلامی، ریحانه. (۱۴۰۲). تعیین حساسیت به فلزات سنگین در باکتری‌های مولد سورفکتانت و کارایی آنها در حذف هیدروکربن‌های نفتی کل، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۱۰)، ۱۵۷۹-۱۵۶۵.

محمدیان، محمد، آستارایی، علی رضا، لکزیان، امیر، امامی، حجت و کاوسی، مسعود. (۱۳۹۹). بررسی و مقایسه اثر منابع و روش‌های مختلف کاربرد نیتروژن بر راندمان مصرف نیتروژن برنج رقم هاشمی. *پژوهش‌های خاک*، ۳۴(۱)، ۱-۱۶.

REFERENCES

- Adhikary, S., Saha, J., Dutta, P., & Pal, A. (2024). Bacterial Homeostasis and Tolerance to Potentially Toxic Metals and Metalloids through Diverse Transporters: Metal-Specific Insights. *Geomicrobiology Journal*, 1-23.
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., ... & Bharwana, S. A. (2015). The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 8148-8162.
- Akram, M., Ullah, S., Ikram, K., Zaheer, M. S., Mansha, M. Z., Ali, H. H., ... & Khan, N. (2024). Effect of cadmium toxicity on Zn, Mn, Cd, Fe concentration and translocation, bioaccumulation, uptake of Cd in root and shoot of different rice varieties. *Pak. J. Bot*, 56 (1), 55-63.
- Ali, U., Zhong, M., Shar, T., Fiaz, S., Xie, L., Jiao, G., ... & Hu, P. (2020). The influence of pH on cadmium accumulation in seedlings of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of plant growth regulation*, 39, 930-940.
- Alikhani, H. A., Shariati, S., Etesami, H., & Fallah Nosrat Abad, A. (2022). *Azotobacter* as a Rice Plant (*Oryza sativa* L.) Growth Promoting Biofertilizer. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(3), 633-661. (In Persian).
- Anwen, X., Danting, C., Chin, L. W., & Zhihong, Y. (2021). Root morphology and anatomy affect cadmium translocation and accumulation in rice. *Rice Science*, 28(6), 594-604.
- Aryal, M. (2021). A comprehensive study on the bacterial biosorption of heavy metals: materials, performances, mechanisms, and mathematical modellings. *Reviews in Chemical Engineering*, 37(6), 715-754.
- Asgher, M., Khan, M. I. R., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Minimising toxicity of cadmium in plants—role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 252, 399-413.
- Bai, Y., Gu, C., Tao, T., Chen, G., & Shan, Y. (2013). Straw incorporation increases solubility and uptake of cadmium by rice plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 63(3), 193-199.
- Beheshtian, N., Karimi, E., Oskoueian, E., Shokryazdan, P., & Jahromi, M. F. (2024). Lactic Acid Bacteria

- Supplementation: A Bioprotective Approach to Mitigating Cadmium-Induced Toxicity and Modulating Gene Expression in Murine Models. *Food and Chemical Toxicology*, 115043.
- Bolan, N. S., & Duraisamy, V. P. (2003). Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: a review involving specific case studies. *Soil Research*, 41(3), 533-555.
- Bradham, K. D., Diamond, G. L., Nelson, C. M., Noerpel, M., Scheckel, K. G., Elek, B., ... & Thomas, D. J. (2018). Long-term in situ reduction in soil lead bioavailability measured in a mouse model. *Environmental science & technology*, 52(23), 13908-13913.
- Cai, Q., Xu, M., Ma, J., Zhang, X., Yang, G., Long, L., ... & Xiao, Y. (2023). Improvement of cadmium immobilization in contaminated paddy soil by using ureolytic bacteria and rice straw. *Science of the Total Environment*, 874, 162594.
- Cai, Y., Cao, F., Cheng, W., Zhang, G., & Wu, F. (2011a). Modulation of exogenous glutathione in phytochelatins and photosynthetic performance against Cd stress in the two rice genotypes differing in Cd tolerance. *Biological Trace Element Research*, 143, 1159-1173.
- Cambier, P., Michaud, A., Paradelo, R., Germain, M., Mercier, V., Guérin-Lebourg, A., ... & Houot, S. (2019). Trace metal availability in soil horizons amended with various urban waste composts during 17 years—Monitoring and modelling. *Science of the total environment*, 651, 2961-2974.
- Cao, F., Cai, Y., Liu, L., Zhang, M., He, X., Zhang, G., & Wu, F. (2015). Differences in photosynthesis, yield and grain cadmium accumulation as affected by exogenous cadmium and glutathione in the two rice genotypes. *Plant growth regulation*, 75, 715-723.
- Chang, J. D., Huang, S., Wiseno, I., Sui, F. Q., Feng, F., Zheng, L., ... & Zhao, F. J. (2023). Dissecting the promotional effect of zinc on cadmium translocation from roots to shoots in rice. *Journal of experimental botany*, 74(21), 6790-6803.
- Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Nikliński, J. (2023). Cadmium toxicity and health effects—a brief summary. *Molecules*, 28(18), 6620.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the total environment*, 533, 205-214.
- Chen, G., Du, R., & Wang, X. (2023). Genetic regulation mechanism of cadmium accumulation and its utilization in rice breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 24 (2), 1247.
- Chen, J., Bian, P., Huang, H., Zhong, K., Huang, D., Nong, X., ... & Zhang, C. (2022). The mechanism of silkworm excrement organic fertilizer to reduce the Cd availability in paddy soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 31 (1), 1-14.
- Chen, X. W., Wu, L., Luo, N., Mo, C. H., Wong, M. H., & Li, H. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and the associated bacterial community influence the uptake of cadmium in rice. *Geoderma*, 337, 749-757.
- Cui, L., Li, L., Zhang, A., Pan, G., Bao, D., & Chang, A. (2011). Biochar amendment greatly reduces rice cd uptake in a contaminated paddy soil: a two-year field experiment. *Bioresources*, 6 (3).
- Dai, Z. H., Guan, D. X., Bundschuh, J., & Ma, L. Q. (2023). Roles of phytohormones in mitigating abiotic stress in plants induced by metal (loid) s As, Cd, Cr, Hg, and Pb. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53 (13), 1310-1330.
- Deng, X., Wu, S., Yang, Y., Qin, Y., Huang, Q., Wu, W., ... & Zeng, Q. (2023). A rice–chicory rotation pattern ensures safe grain production and phytoremediation of cadmium-contaminated paddy fields: A four-year field experiment in southern China. *Chemosphere*, 322, 138192.
- Du, Y., Hu, X. F., Wu, X. H., Shu, Y., Jiang, Y., & Yan, X. J. (2013). Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 9843-9856.
- El Rasafi, T., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E. E., Bolan, N., ... & Rinklebe, J. (2022). Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52 (5), 675-726.
- Fallah, A., Armandeh, M., Shariati, S., Hosseini, M., & Gholizadeh, A. (2022). The importance of rock phosphate in sustainable agriculture (its importance, reserves and application in rice cultivation). Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO). 244p. (In Persian).
- Farooq H, Asghar HN, Khan MY, Saleem M, Zahir ZA (2015) Auxinmediated growth of rice in cadmium-contaminated soil. *Turk J Agric For*, 39, 272–276
- Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609-643.



- Gao, Y., Duan, Z., Zhang, L., Sun, D., & Li, X. (2022). The status and research progress of cadmium pollution in rice-(*Oryza sativa* L.) and wheat-(*Triticum aestivum* L.) cropping systems in China: A critical review. *Toxics*, 10(12), 794.
- Gharib, H. (2013). Current Situation of Food Security in Iran and Future Outlook. *Strategy*, 21(4). (In Persian).
- Gu, J. F., Zhou, H., Tang, H. L., Yang, W. T., Zeng, M., Liu, Z. M., ... & Liao, B. H. (2019). Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under in situ remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 451-459.
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., ... & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and environmental safety*, 211, 111887.
- Hassan, M. J., Shafi, M., Zhang, G., Zhu, Z., & Qaisar, M. (2008). The growth and some physiological responses of rice to Cd toxicity as affected by nitrogen form. *Plant growth regulation*, 54, 125-132.
- Hassan, M. J., Wang, F., Ali, S., & Zhang, G. (2005). Toxic effect of cadmium on rice as affected by nitrogen fertilizer form. *Plant and Soil*, 277, 359-365.
- He, J., Ren, Y., Chen, X., & Chen, H. (2014). Protective roles of nitric oxide on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress. *Ecotoxicology and environmental safety*, 108, 114-119.
- Hu, J., Tao, R., Cao, C., Xie, J., Gao, Y., Hu, H., ... & Ma, Y. (2023). Effect of leaf surface regulation of zinc fertilizer on absorption of cadmium, plumbum and zinc in rice (*Oryza sativa* L.). *Sustainability*, 15(3), 1877.
- Hu, L., McBride, M. B., Cheng, H., Wu, J., Shi, J., Xu, J., & Wu, L. (2011). Root-induced changes to cadmium speciation in the rhizosphere of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Environmental Research*, 111(3), 356-361.
- Huang, F., Gao, L. Y., Wu, R. R., Wang, H., & Xiao, R. B. (2020a). Qualitative and quantitative characterization of adsorption mechanisms for Cd²⁺ by silicon-rich biochar. *Science of the Total Environment*, 731, 139163.
- Huang, Q., Wan, Y., Luo, Z., Qiao, Y., Su, D., & Li, H. (2020b). The effects of chicken manure on the immobilization and bioavailability of cadmium in the soil-rice system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1753-1764.
- Hussain, B., Ashraf, M. N., Abbas, A., Li, J., & Farooq, M. (2021). Cadmium stress in paddy fields: effects of soil conditions and remediation strategies. *Science of The Total Environment*, 754, 142188.
- Jalloh, M. A., Chen, J., Zhen, F., & Zhang, G. (2009). Effect of different N fertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress. *Journal of Hazardous Materials*, 162 (2-3), 1081-1085.
- Jiang, M., Jiang, J., Li, S., Li, M., Tan, Y., Song, S., ... & Huang, J. (2020). Glutamate alleviates cadmium toxicity in rice via suppressing cadmium uptake and translocation. *Journal of hazardous materials*, 384, 121319.
- Jing, H., Yang, W., Chen, Y., Yang, L., Zhou, H., Yang, Y., ... & Zia-ur-Rehman, M. (2023). Exploring the mechanism of Cd uptake and translocation in rice: Future perspectives of rice safety. *Science of the Total Environment*, 165369.
- Kang, Z., Gong, M., Li, Y., Chen, W., Yang, Y., Qin, J., & Li, H. (2021). Low Cd-accumulating rice intercropping with *Sesbania cannabina* L. reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 800, 149600.
- Kang, Z., Zhang, W., Qin, J., Li, S., Yang, X., Wei, X., & Li, H. (2020). Yield advantage and cadmium decreasing of rice in intercropping with water spinach under moisture management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110102.
- Karimi, S., Shariati, S., pourbabaei, A. A., Alikhani, H. A. & Kalami, R. (2023). Determining sensitivity to heavy metals in surfactant-producing bacteria and their efficiency in removing Total petroleum hydrocarbons. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (10), 1565-1579. (In Persian).
- Khan, Z., Elahi, A., Bukhari, D. A., & Rehman, A. (2022). Cadmium sources, toxicity, resistance and removal by microorganisms-A potential strategy for cadmium eradication. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(6), 101569.
- Khavari-Nejad, R. A., Najafi, F., & Rezaei, M. (2014). The influence of cadmium toxicity on some physiological parameters as affected by iron in rice (*Oryza Sativa* L.) plant. *Journal of Plant Nutrition*, 37(8), 1202-1213.
- Kicińska, A., Pomykała, R., & Izquierdo-Diaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in

- contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13203.
- Kong, F., & Lu, S. (2022). Effects of microbial organic fertilizer (MOF) application on cadmium uptake of rice in acidic paddy soil: Regulation of the iron oxides driven by the soil microorganisms. *Environmental Pollution*, 307, 119447.
- Kouchaki-Penchah, H., Alizadeh, M. R., & Aghamolki, M. T. K. (2023). Measuring eco-efficiency of rice cropping systems in Iran: An integrated economic and environmental approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103281.
- Kulsum, P. G. P. S., Khanam, R., Das, S., Nayak, A. K., Tack, F. M., Meers, E., ... & Biswas, J. K. (2023). A state-of-the-art review on cadmium uptake, toxicity, and tolerance in rice: From physiological response to remediation process. *Environmental Research*, 220, 115098.
- Lee, H. J., Abdula, S. E., Jang, D. W., Park, S. H., Yoon, U. H., Jung, Y. J., ... & Cho, Y. G. (2013). Overexpression of the glutamine synthetase gene modulates oxidative stress response in rice after exposure to cadmium stress. *Plant cell reports*, 32, 1521-1529.
- Lee, K., Bae, D. W., Kim, S. H., Han, H. J., Liu, X., Park, H. C., ... & Chung, W. S. (2010). Comparative proteomic analysis of the short-term responses of rice roots and leaves to cadmium. *Journal of Plant Physiology*, 167(3), 161-168.
- Li, H., Liu, Y., Jiao, X., Li, J., Liu, K., Wu, T., ... & Luo, D. (2023). Response of soil nutrients retention and rice growth to biochar in straw returning paddy fields. *Chemosphere*, 312, 137244.
- Li, H., Zhang, H., Yang, Y., Fu, G., Tao, L., & Xiong, J. (2022a). Effects and oxygen-regulated mechanisms of water management on cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*). *Science of the Total Environment*, 846, 157484.
- Li, Y., Dong, S., Qiao, J., Liang, S., Wu, X., Wang, M., ... & Liu, W. (2020). Impact of nanominerals on the migration and distribution of cadmium on soil aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121355.
- Li, Y., Rahman, S. U., Qiu, Z., Shahzad, S. M., Nawaz, M. F., Huang, J., ... & Cheng, H. (2023a). Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review. *Environmental Pollution*, 325, 121433.
- Li, Y., Wei, S., Chen, X., Dong, Y., Zeng, M., Yan, C., ... & Jiao, R. (2023b). Isolation of cadmium-resistance and siderophore-producing endophytic bacteria and their potential use for soil cadmium remediation. *Heliyon*, 9(7).
- Li, Y., Zhang, S., Bao, Q., Chu, Y., Sun, H., & Huang, Y. (2022b). Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity through regulating the antioxidant response and enhancing the chelation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*, 304, 119178.
- Lima, I. M., Boykin, D. L., Klasson, K. T., & Uchimiya, M. (2014). Influence of post-treatment strategies on the properties of activated chars from broiler manure. *Chemosphere*, 95, 96-104.
- Limcharoensuk, T., Sooksawat, N., Sumarnrote, A., Awutpet, T., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Auesukaree, C. (2015). Bioaccumulation and biosorption of Cd^{2+} and Zn^{2+} by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. *Ecotoxicology and environmental safety*, 122, 322-330.
- Lin, H. C., Hao, W. M., & Chu, P. H. (2021). Cadmium and cardiovascular disease: An overview of pathophysiology, epidemiology, therapy, and predictive value. *Revista Portuguesa de Cardiologia (English Edition)*, 40(8), 611-617.
- Liu, D., Zhang, C., Chen, X., Yang, Y., Wang, S., Li, Y., ... & Cheng, W. (2013a). Effects of pH, Fe, and Cd on the uptake of Fe^{2+} and Cd^{2+} by rice. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 8947-8954.
- Liu, J., Ma, J., He, C., Li, X., Zhang, W., Xu, F., ... & Wang, L. (2013b). Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon. *New Phytologist*, 200(3), 691-699.
- Liu, L., Quan, S., Li, L., Lei, G., Li, S., Gong, T., ... & Yang, W. (2024). Endophytic Bacteria Improve Bio- and Phytoremediation of Heavy Metals. *Microorganisms*, 12(11), 2137.
- Liu, R., & Lian, B. (2019). Immobilisation of Cd (II) on biogenic and abiotic calcium carbonate. *Journal of hazardous materials*, 378, 120707.
- Liu, H., Hussain, S., Zheng, M., Sun, L., Fahad, S., Huang, J., ... & Nie, L. (2014). Progress and constraints of dry direct-seeded rice in China. *J. Food Agric. Environ*, 12(2), 465-472.
- Liu, Y., Tie, B., Li, Y., Lei, M., Wei, X., Liu, X., & Du, H. (2018). Inoculation of soil with cadmium-resistant bacterium *Delftia* sp. B9 reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 223-229.
- Liu, Z., Wang, Q. Q., Huang, S. Y., Kong, L. X., Zhuang, Z., Wang, Q., ... & Wan, Y. N. (2022). The risks of sulfur addition on cadmium accumulation in paddy rice under different water-management conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 118, 101-111.



- Ma, X., Sharifan, H., Dou, F., & Sun, W. (2020). Simultaneous reduction of arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123802.
- Mahar, A., Ping, W. A. N. G., Ronghua, L. I., & Zhang, Z. (2015). Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review. *Pedosphere*, 25(4), 555-568.
- Meng, D., Li, J., Liu, T., Liu, Y., Yan, M., Hu, J., ... & Yin, H. (2019). Effects of redox potential on soil cadmium solubility: insight into microbial community. *Journal of Environmental Sciences*, 75, 224-232.
- Meng, Y., Jing, H., Huang, J., Shen, R., & Zhu, X. (2022). The role of nitric oxide signaling in plant responses to cadmium stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), 6901.
- Mitra, S., Pramanik, K., Sarkar, A., Ghosh, P. K., Soren, T., & Maiti, T. K. (2018). Bioaccumulation of cadmium by *Enterobacter* sp. and enhancement of rice seedling growth under cadmium stress. *Ecotoxicology and environmental safety*, 156, 183-196.
- Mohammadian, M., astaraei, A., Lakzian, A., Emami, H. & Kavooosi, M. (2020). Evaluation and Comparison of the Effects of Different Application Methods and Sources of Nitrogen on Nitrogen Use Efficiency of Hashemi Rice Variety. *Iranian Journal of Soil Research*. 34(1), 1-16. (In Persian).
- Mostofa, M. G., Rahman, A., Ansary, M. M. U., Watanabe, A., Fujita, M., & Tran, L. S. P. (2015). Hydrogen sulfide modulates cadmium-induced physiological and biochemical responses to alleviate cadmium toxicity in rice. *Scientific reports*, 5(1), 14078.
- Mubeen, S., Ni, W., He, C., & Yang, Z. (2023). Agricultural strategies to reduce cadmium accumulation in crops for food safety. *Agriculture*, 13(2), 471.
- Nagaraju, R., Kalahasthi, R., Balachandar, R., & Bagepally, B. S. (2022). Cadmium exposure and DNA damage (genotoxicity): a systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Toxicology*, 52(10), 786-798.
- Najafabadi, M. M., Sabouni, M., Azadi, H., & Taki, M. (2022). Rice production energy efficiency evaluation in north of Iran; application of Robust Data Envelopment Analysis. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100356.
- Nath, S., Deb, B., Sharma, I., & Pandey, P. (2014). Role of cadmium and lead tolerant *pseudomonas aeruginosa* in seedling germination of rice (*Oryza sativa* L.). *J Environ Anal Toxicol*, 4(221), 2161-0525.
- Navarro, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Vidal, J., Tovar, P. J., & Bech, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: a case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical exploration*, 96(2-3), 183-193.
- Niknejad, H., Bandpei, B. E., Sarvestani, R. A., Mohseni-Bandpei, A., Saeedi, R., Abtahi, M., & Gholami-Borujeni, F. (2024). Probabilistic health risk assessment of heavy metals in rice produced in Mazandaran province, Iran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 106068.
- Nogawa, K., & Kido, T. (2023). Itai-Itai disease and health effects of cadmium. In *Toxicology of Metals, Volume I* (pp. 353-369). CRC press.
- OECD-FAO Agricultural Outlook, 2022. [Data set].
- Olvera, D. A. C., & Avelizapa, N. G. R. (2022). Environmental pollution and current bioremediation strategies for cadmium containing residues. In *Biotechnology for treatment of residual wastes containing metals* (pp. 157-171). River Publishers.
- Palansooriya, K. N., Shaheen, S. M., Chen, S. S., Tsang, D. C., Hashimoto, Y., Hou, D., ... & Ok, Y. S. (2020). Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment international*, 134, 105046.
- Patil, A., Chakraborty, S., Yadav, Y., Sharma, B., Singh, S., & Arya, M. (2024). Bioremediation strategies and mechanisms of bacteria for resistance against heavy metals: a review. *Bioremediation Journal*, 1-33.
- Paul, S., Guha, T., Dey, S., Paul, S., & Kundu, R. (2022). Amelioration of cadmium toxicity by enhancing nitrogen assimilation and photosynthetic activity by two different nitrogen supplements in rice (*Oryza sativa* L.) cv. Lalat. *Plant Stress*, 4, 100082.
- Peng, H., Chen, Y., Weng, L., Ma, J., Ma, Y., Li, Y., & Islam, M. S. (2019). Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review. *Science of the Total Environment*, 660, 776-786.
- Pirzadeh, M., Afyuni, M., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2012). Status of Zinc and Cadmium in Paddy Soils and Rice in Isfahan, Fars and Khuzestan Provinces and their Effect on Food Security. *Journal of Water and Soil Science*, 16 (60), 81-93. (In Persian).
- Pramanik, K., Mitra, S., Sarkar, A., & Maiti, T. K. (2018). Alleviation of phytotoxic effects of cadmium on rice seedlings by cadmium resistant PGPR strain *Enterobacter aerogenes* MCC 3092. *Journal of hazardous materials*, 351, 317-329.

- Priya, A. K., Gnanasekaran, L., Dutta, K., Rajendran, S., Balakrishnan, D., & Soto-Moscoco, M. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307, 135957.
- Rahimi, G. & Charkhabi, A. (2014). Assessment of Some Heavy Metals in Paddy Soils and their Accumulation in the Organs of Rice in the Lenjan Area of Isfahan Province. *Water and Soil Science*, 24(2), 107-120. (In Persian).
- Rahmani, H. R. & Khanmohammadi, Z. (2024). Investigation of heavy metals in the soil of some paddy fields around Isfahan and the effect of cadmium on food security. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), 1845-1861. (In Persian).
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment international*, 125, 365-385.
- Raj, R., Dalei, K., Chakraborty, J., & Das, S. (2016). Extracellular polymeric substances of a marine bacterium mediated synthesis of CdS nanoparticles for removal of cadmium from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 462, 166-175.
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology advances*, 30(6), 1562-1574.
- Rastmanesh, F., Ghazalizadeh, S., Shalbaf, F., & Zarasvandi, A. (2023). Micronutrients and heavy metals in rice farms: the case of Ahvaz and Bawie Counties, Khuzestan Province, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 173.
- Rehman, M. Z. U., Rizwan, M., Ghafoor, A., Naeem, A., Ali, S., Sabir, M., & Qayyum, M. F. (2015). Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soils and its phyto-availability to wheat and rice under rotation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 16897-16906.
- Rezaei, L., Alipour, V., Sharafi, P., Ghaffari, H., Nematollahi, A., Pesarakloo, V., & Fakhri, Y. (2021). Concentration of cadmium, arsenic, and lead in rice (*Oryza sativa*) and probabilistic health risk assessment: a case study in Hormozgan province, Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 8(2), 67-75.
- Rezaian, F., & Hesari, J. (2014). Study on contamination of white rice by cadmium, lead and arsenic in Tabriz. *Food Research Journal*, 23(4), 581-594. (In Persian).
- Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Rehman, M. Z. U., & Al-Wabel, M. I. (2018). Residual impact of biochar on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) grown in Cd-contaminated soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-8.
- Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Rizvi, H., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., ... & Ok, Y. S. (2016). Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 17859-17879.
- Roy, B., Maitra, D., Sarkar, S., Podder, R., Das, T., Ghosh, J., & Mitra, A. K. (2024). Biofilm and metallothioneins: A dual approach to bioremediate the heavy metal menace. *Environmental Quality Management*, 33(4), 659-676.
- Roychoudhury, A., Basu, S., & Sengupta, D. N. (2012). Antioxidants and stress-related metabolites in the seedlings of two indica rice varieties exposed to cadmium chloride toxicity. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 835-847.
- Saengwilai, P., & Meeinkuirt, W. (2021). Cadmium (Cd) and zinc (Zn) accumulation by Thai rice varieties and health risk assessment in a Cd-Zn co-contaminated paddy field: Effect of soil amendments. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-16.
- Sahmoune, M. N. (2018). Performance of *Streptomyces rimosus* biomass in biosorption of heavy metals from aqueous solutions. *Microchemical Journal*, 141, 87-95.
- Sasaki, A., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2014). Overexpression of OsHMA3 enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in rice. *Journal of experimental botany*, 65(20), 6013-6021.
- Satarug, S., Đorđević, A. B., Yimthiang, S., Vesey, D. A., & Gobe, G. C. (2022). The NOAEL equivalent of environmental cadmium exposure associated with GFR reduction and chronic kidney disease. *Toxics*, 10(10), 614.
- Sebastian, A., & Prasad, M. N. V. (2013). Cadmium accumulation retard activity of functional components of photo assimilation and growth of rice cultivars amended with vermicompost. *International Journal of Phytoremediation*, 15(10), 965-978.
- Sebastian, A., & Prasad, M. N. V. (2015a). Operative photo assimilation associated proteome modulations are critical for iron-dependent cadmium tolerance in *Oryza sativa* L. *Protoplasma*, 252, 1375-1386.



- Sebastian, A., & Prasad, M. N. V. (2015b). Iron-and manganese-assisted cadmium tolerance in *Oryza sativa* L.: lowering of rhizotoxicity next to functional photosynthesis. *Planta*, 241, 1519-1528.
- Senila, M., & Kovacs, E. (2024). Use of diffusive gradients in thin-film technique to predict the mobility and transfer of nutrients and toxic elements from agricultural soil to crops—an overview of recent studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22.
- Shadborestan, A., Khaksar, E., Shokrzadeh, M., & Taghavi, M. (2012). Cadmium, Lead and Chromium contents in rice (champa) produced in the Mobarakeh County in 2009. *J Mazandaran Univ Med Sci*, 21 (2), 122-127. (In Persian).
- Shadmani, L., Jamali, S., & Fatemi, A. (2021). Isolation, identification, and characterization of cadmium-tolerant endophytic fungi isolated from barley (*Hordeum vulgare* L.) roots and their role in enhancing phytoremediation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52, 1097-1106.
- Shah, K., & Nahakpam, S. (2012). Heat exposure alters the expression of SOD, POD, APX and CAT isozymes and mitigates low cadmium toxicity in seedlings of sensitive and tolerant rice cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 57, 106-113.
- Shariati, S., Pourbabaee, A. A., Alikhani, H. A., & Rezaei, K. A. (2019). Investigation of heavy metal contamination in the surface sediments of Anzali wetland in North of Iran. *Pollution*, 5(1), 211-224.
- Sharma, M., Sharma, S., Paavan, Gupta, M., Goyal, S., Talukder, D., ... & Baskoutas, S. (2024). Mechanisms of microbial resistance against cadmium—a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 22(1), 13-30.
- Shehzad, M. T., Sabir, M., Saifullah, Siddique, A. B., Rahman, M. M., & Naidu, R. (2022). Impact of water regimes on minimizing the accumulation of Arsenic in rice (*Oryza sativa* L.). *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(9), 383.
- Shen, B., Wang, X., Zhang, Y., Zhang, M., Wang, K., Xie, P., & Ji, H. (2020). The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application. *Science of the Total Environment*, 711, 135229.
- Shi, T., Ma, J., Wu, X., Ju, T., Lin, X., Zhang, Y., ... & Wu, F. (2018). Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 164, 118-124.
- Shi, Z., Qi, X., Zeng, X. A., Lu, Y., Zhou, J., Cui, K., & Zhang, L. (2021). A newly isolated bacterium *Comamonas* sp. XL8 alleviates the toxicity of cadmium exposure in rice seedlings by accumulating cadmium. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123824.
- Siddique, A. B., Rahman, M. M., Islam, M. R., & Naidu, R. (2022). Influences of soil pH, iron application and rice variety on cadmium distribution in rice plant tissues. *Science of the Total Environment*, 810, 152296.
- Singh, I., & Shah, K. (2014a). Evidences for structural basis of altered ascorbate peroxidase activity in cadmium-stressed rice plants exposed to jasmonate. *Biometals*, 27, 247-263.
- Singh, I., & Shah, K. (2014b). Exogenous application of methyl jasmonate lowers the effect of cadmium-induced oxidative injury in rice seedlings. *Phytochemistry*, 108, 57-66.
- Singh, I., & Shah, K. (2015). Evidences for suppression of cadmium induced oxidative stress in presence of sulphosalicylic acid in rice seedlings. *Plant growth regulation*, 76, 99-110.
- Singh, P., & Shah, K. (2014c). Evidences for reduced metal-uptake and membrane injury upon application of nitric oxide donor in cadmium stressed rice seedlings. *Plant physiology and biochemistry*, 83, 180-184.
- Singh, S. K., Singh, P. P., Gupta, A., Singh, A. K., & Keshri, J. (2019). Tolerance of heavy metal toxicity using PGPR strains of *Pseudomonas* species. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 239-252). Woodhead Publishing.
- Siripornadulsil, S., & Siripornadulsil, W. (2013). Cadmium-tolerant bacteria reduce the uptake of cadmium in rice: potential for microbial bioremediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 94, 94-103.
- Song, J., Song, Q., Wang, D., & Liu, Y. (2023). Mitigation strategies for excessive cadmium in rice. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 3847-3869.
- Song, W. E., Chen, S. B., Liu, J. F., Li, C. H. E. N., Song, N. N., Ning, L. I., & Bin, L. I. U. (2015). Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(9), 1845-1854.
- Song, X. Q., Liu, L. F., Jiang, Y. J., Zhang, B. C., Gao, Y. P., Liu, X. L., ... & Zhou, Y. H. (2013). Disruption of secondary wall cellulose biosynthesis alters cadmium translocation and tolerance in rice plants. *Molecular plant*, 6(3), 768-780.
- Song, Y., Jin, L., & Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133-141.
- Soubasakou, G., Cavoura, O., & Damikouka, I. (2022). Phytoremediation of cadmium-contaminated soils: A

- review of new cadmium hyperaccumulators and factors affecting their efficiency. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(5), 783-787.
- Srivastava, R. K., Pandey, P., Rajpoot, R., Rani, A., Gautam, A., & Dubey, R. (2015). Exogenous application of calcium and silica alleviates cadmium toxicity by suppressing oxidative damage in rice seedlings. *Protoplasma*, 252, 959-975.
- Sterckeman, T., Goderniaux, M., Sirguey, C., Cornu, J. Y., & Nguyen, C. (2015). Do roots or shoots control cadmium accumulation in the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*?. *Plant and Soil*, 392, 87-99.
- Strobel, B. W., Borggaard, O. K., Hansen, H. C. B., Andersen, M. K., & Raulund-Rasmussen, K. (2005). Dissolved organic carbon and decreasing pH mobilize cadmium and copper in soil. *European Journal of Soil Science*, 56(2), 189-196.
- Sufian, J., babaakbari, M., Avanes, A. and Moradi, S. (2025). Investigating the Effect of Activated Chlorella vulgaris Algae Biochar and Hydrochar on the Distribution and Bioavailability of Cadmium in Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(11), 2191-2208. (In Persian).
- Suksabye, P., Pimthong, A., Dhurakit, P., Mekvichitsaeng, P., & Thiravetyan, P. (2016). Effect of biochars and microorganisms on cadmium accumulation in rice grains grown in Cd-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 962-973.
- Sun, L., Song, K., Shi, L., Duan, D., Zhang, H., Sun, Y., ... & Xue, Y. (2021). Influence of elemental sulfur on cadmium bioavailability, microbial community in paddy soil and Cd accumulation in rice plants. *Scientific Reports*, 11(1), 11468.
- Talukdar, D., Sharma, R., Jaglan, S., Vats, R., Kumar, R., Mahnashi, M. H., & Umar, A. (2020). Identification and characterization of cadmium resistant fungus isolated from contaminated site and its potential for bioremediation. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100604.
- Tarviji, H., Shekoohiyan, S., Moussavi, G., & Heidari, M. (2023). Comparison of contamination levels and health risks of toxic metals in raw and home-cooked rice; a field study on some rural households of Northern Iran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 122, 105461.
- Tran, T.A., Popova, L.P., 2013. Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects. *Tur. J. Bot.* 37, 1–13
- Treesubsuntorn, C., Dhurakit, P., Khaksar, G., & Thiravetyan, P. (2018). Effect of microorganisms on reducing cadmium uptake and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 25690-25701.
- Uraguchi, S., Kamiya, T., Clemens, S., & Fujiwara, T. (2014). Characterization of OsLCT1, a cadmium transporter from indica rice (*Oryza sativa*). *Physiologia Plantarum*, 151(3), 339-347.
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Ordoñez-Sánchez, L., Lozano, C., Arevalo, A. A., Lozano, A., ... & Marín, C. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, poultry manure compost, and cadmium on plant growth and nutrient absorption of *Oryza sativa*. *Chilean journal of agricultural research*, 83(6), 656-665.
- Volpe, M. G., Nazzaro, M., Di Stasio, M., Siano, F., Coppola, R., & De Marco, A. (2015). Content of micronutrients, mineral and trace elements in some Mediterranean spontaneous edible herbs. *Chemistry Central Journal*, 9, 1-9.
- Waalkes, M. P., & Misra, R. R. (2023). Cadmium carcinogenicity and genotoxicity. In *Toxicology of Metals, Volume I* (pp. 231-243). CRC Press.
- Wang MY, Chen AK, Wong MH, Qiu RL, Cheng H, Ye ZH (2011) Cadmium accumulation in and tolerance of rice *Oryza sativa* L. varieties with different rates of radial oxygen loss. *Environ Pollut* 159:1730–1736.
- Wang X, Zhang ZW, Tu SH, Feng WQ, Xu F, Zhu F, Zhang DW, Du JB, Yuan S, Lin HH (2013) Comparative study of four rice cultivars with different levels of cadmium tolerance. *Biologia* 68,74–81
- Wang Y, Jiang X, Li K, Wu M, Zhang R, Zhang L, Chen G (2014) Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses. *BioMetals* 27:389–401
- Wang, C., Lum, A., Ozuna, S., Clark, D., & Keasling, J. (2001). Aerobic sulfide production and cadmium precipitation by *Escherichia coli* expressing the *Treponema denticola* cysteine desulfhydrase gene. *Applied microbiology and biotechnology*, 56, 425-430.
- Wang, K., Yu, H., Zhang, X., Ye, D., Huang, H., Wang, Y., ... & Li, T. (2022a). Hydrogen peroxide contributes to cadmium binding on root cell wall pectin of cadmium-safe rice line (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology and environmental safety*, 237, 113526.
- Wang, M., Chen, S., Zheng, H., Li, S., Chen, L., & Wang, D. (2020). The responses of cadmium phytotoxicity in rice and the microbial community in contaminated paddy soils for the application of different long-



- term N fertilizers. *Chemosphere*, 238, 124700.
- Wang, Y., Shang, S., Li, X., Chen, S., Li, R., Jia, W., & Deng, H. (2022b). Effect of iron plaque on gaseous elemental mercury uptake, translocation, and volatilization by paddy rice. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(6), 1155-1161.
- Wang, Y., Sun, Y., Chen, L., Shao, H., Zeng, Y., Zeng, Y., ... & Huang, S. (2023). Interactive effects of water management and liming on CH₄ emissions and rice cadmium uptake in an acid paddy soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), 13551-13559.
- World Food Summit 1996, Rome Declaration on World Food Security.
- Wu, S., Zhou, Z., Zhu, L., Zhong, L., Dong, Y., Wang, G., & Shi, K. (2022). Cd immobilization mechanisms in a *Pseudomonas* strain and its application in soil Cd remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 127919.
- Wu, Z., Jiang, Q., Yan, T., Zhang, X., Xu, S., Shi, H., ... & Wang, F. (2020). Ammonium nutrition mitigates cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) through improving antioxidant system and the glutathione-ascorbate cycle efficiency. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110010.
- Wu, Z., Zhang, C., Yan, J., Yue, Q., & Ge, Y. (2015). Effects of sulfur supply and hydrogen peroxide pretreatment on the responses by rice under cadmium stress. *Plant growth regulation*, 77, 299-306.
- Xie, Y., Bu, H., Feng, Q., Wassie, M., Ameer, M., Jiang, Y., ... & Chen, L. (2021). Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass. *Environmental Research*, 200, 111730.
- Xie, Z., Wang, D., Ben Fekih, I., Yu, Y., Li, Y., Alwathnani, H., ... & Rensing, C. (2023). Whole genome sequence analysis of *Cupriavidus necator* C39, a multiple heavy metal (loid) and antibiotic resistant bacterium isolated from a gold/copper mine. *Microorganisms*, 11(6), 1518.
- Xin, J. (2024). Enhancing soil Health to minimize Cadmium accumulation in agro-products: The role of microorganisms, organic amendments, and nutrients. *Environmental Pollution*, 123890.
- Xu, B., & Yu, S. (2013). Root iron plaque formation and characteristics under N₂ flushing and its effects on translocation of Zn and Cd in paddy rice seedlings (*Oryza sativa*). *Annals of Botany*, 111(6), 1189-1195.
- Xu, C., Zhao, X., Duan, H., Gu, W., Zhang, D., Wang, R., & Lu, X. (2024a). Synergistic enzymatic mechanism of lepidolite leaching enhanced by a mixture of *Bacillus mucilaginosus* and *Bacillus circulans*. *Science of The Total Environment*, 947, 174711.
- Xu, M., Ren, M., Yao, Y., Liu, Q., Che, J., Wang, X., & Xu, Q. (2024b). Biochar decreases cadmium uptake in indica and japonica rice (*Oryza sativa* L.): Roles of soil properties, iron plaque, cadmium transporter genes and rhizobacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135402.
- Xu, S., Xing, Y., Liu, S., Hao, X., Chen, W., & Huang, Q. (2020). Characterization of Cd²⁺ biosorption by *Pseudomonas* sp. strain 375, a novel biosorbent isolated from soil polluted with heavy metals in Southern China. *Chemosphere*, 240, 124893.
- Xu, Y., Feng, J., & Li, H. (2021). How intercropping and mixed systems reduce cadmium concentration in rice grains and improve grain yields. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123762.
- Xu, Y., Shu, G., Liu, Z., Wang, Z., Lei, H., Zheng, Q., ... & Chen, L. (2024c). Preliminary Study on Screening and Genetic Characterization of Lactic Acid Bacteria Strains with Cadmium, Lead, and Chromium Removal Potentials. *Fermentation*, 10(1), 41.
- Yan, H., Jiao, X., Chen, Y., Liang, H., Liang, W., & Liu, C. (2024a). Knockout of OsHMA3 in an indica rice increases cadmium sensitivity and inhibits plant growth. *Plant Growth Regulation*, 1-12.
- Yan, Z. X., Li, Y., Peng, S. Y., Wei, L., Zhang, B., Deng, X. Y., ... & Cheng, X. (2024b). Cadmium biosorption and mechanism investigation using two cadmium-tolerant microorganisms isolated from rhizosphere soil of rice. *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134134.
- Yang, W., Chen, Y., Yang, L., Xu, M., Jing, H., Wu, P., & Wang, P. (2022). Spatial distribution, food chain translocation, human health risks, and environmental thresholds of heavy metals in a maize cultivation field in the heart of China's karst region. *Journal of Soils and Sediments*, 22(10), 2654-2670.
- Yang, W., Jing, H., Yang, L., Li, X., Chen, M., Xu, M., ... & Wang, P. (2023). Effects of rapeseed residue organic fertilizer on cadmium toxicity in soil and its uptake and transfer by rice plants (*Oryza sativa* L.). *Land Degradation & Development*, 34(10), 2791-2802.
- Yang, W., Zhou, H., Gu, J., Liao, B., Zhang, J., & Wu, P. (2020). Application of rapeseed residue increases soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activity and mitigates cadmium pollution risk in paddy fields. *Environmental Pollution*, 264, 114681.
- Yang, Y., Li, Y., Wang, M., Chen, W., & Dai, Y. (2021). Limestone dosage response of cadmium phytoavailability minimization in rice: A trade-off relationship between soil pH and amorphous

- manganese content. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123664.
- Yang, Y., Xiong, J., Chen, R., Fu, G., Chen, T., & Tao, L. (2016). Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of OsIRT1 in rice (*Oryza sativa*). *Environmental and Experimental Botany*, 122, 141-149.
- Yin, B., Zhou, L., Yin, B., & Chen, L. (2016). Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil. *Journal of soils and sediments*, 16, 537-546.
- Yin, D. X., Niu, L. L., Liu, J., Yang, R., Han, B., Liu, Z. Y., ... & Zhao, X. L. (2024). Cadmium-resistant bacterium *Ralstonia* sp. YDR alleviated Cd toxicity in rice seedlings by enhancing antioxidant defense and inhibiting Cd²⁺ influx and H⁺ efflux. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103614.
- Yu, F., Liu, K., Li, M., Zhou, Z., Deng, H., & Chen, B. (2013). Effects of cadmium on enzymatic and non-enzymatic antioxidative defences of rice (*Oryza sativa* L.). *International journal of phytoremediation*, 15(6), 513-521.
- Yu, L., Zhu, J., Huang, Q., Su, D., Jiang, R., & Li, H. (2014). Application of a rotation system to oilseed rape and rice fields in Cd-contaminated agricultural land to ensure food safety. *Ecotoxicology and environmental safety*, 108, 287-293.
- Yu, X., Zhao, J., Liu, X., Sun, L., Tian, J., & Wu, N. (2021). Cadmium pollution impact on the bacterial community structure of arable soil and the isolation of the cadmium resistant bacteria. *Frontiers in microbiology*, 12, 698834.
- Yu, Y., Shi, K., Li, X., Luo, X., Wang, M., Li, L., ... & Li, M. (2022). Reducing cadmium in rice using metallothionein surface-engineered bacteria WH16-1-MT. *Environmental Research*, 203, 111801.
- Zhai, Q., Yin, R., Yu, L., Wang, G., Tian, F., Yu, R., ... & Chen, W. (2015). Screening of lactic acid bacteria with potential protective effects against cadmium toxicity. *Food Control*, 54, 23-30.
- Zhai, Q., Guo, Y., Tang, X., Tian, F., Zhao, J., Zhang, H., & Chen, W. (2019). Removal of cadmium from rice by *Lactobacillus plantarum* fermentation. *Food Control*, 96, 357-364.
- Zhang, C. H., & Ying, G. E. (2008). Response of glutathione and glutathione S-transferase in rice seedlings exposed to cadmium stress. *Rice Science*, 15(1), 73-76.
- Zhang, C., Yin, X., Gao, K., Ge, Y., & Cheng, W. (2013a). Non-protein thiols and glutathione S-transferase alleviate Cd stress and reduce root-to-shoot translocation of Cd in rice. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(4), 626-633.
- Zhang, F., Deng, Y., Peng, R., Jiang, H., & Bai, L. (2024a). Bioremediation of paddy soil with amphitropic mixture markedly attenuates rice cadmium: Effect of soil cadmium removal and Fe/S-cycling bacteria in rhizosphere. *Science of The Total Environment*, 915, 169876.
- Zhang, H., Wang, K., Liu, X., Yao, L., Chen, Z., & Han, H. (2024b). Exopolysaccharide-Producing Bacteria Regulate Soil Aggregates and Bacterial Communities to Inhibit the Uptake of Cadmium and Lead by Lettuce. *Microorganisms*, 12(11), 2112.
- Zhang, J., Sun, W., Li, Z., Liang, Y., & Song, A. (2009). Cadmium fate and tolerance in rice cultivars. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 483-490.
- Zhang, S., Song, M., Zhang, J., & Wang, H. (2024c). Cysteine and thiosulfate promoted cadmium immobilization in strain G303 by the formation of extracellular CdS. *Science of The Total Environment*, 923, 171457.
- Zhang, X., Zhang, X., Lv, S., Shi, L., & Wang, R. (2020). Migration and transformation of cadmium in rice-soil under different nitrogen sources in polymetallic sulfide mining areas. *Scientific Reports*, 10(1), 2418.
- Zhang, Z. Y., Jun, M. E. N. G., Shu, D. A. N. G., & Chen, W. F. (2014). Effect of biochar on relieving cadmium stress and reducing accumulation in super japonica rice. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 547-553.
- Zhang, Z., Solaiman, Z. M., Meney, K., Murphy, D. V., & Rengel, Z. (2013b). Biochars immobilize soil cadmium, but do not improve growth of emergent wetland species *Juncus subsecundus* in cadmium-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 140-151.
- Zhao, H., Wu, Y., Lan, X., Yang, Y., Wu, X., & Du, L. (2022). Comprehensive assessment of harmful heavy metals in contaminated soil in order to score pollution level. *Scientific Reports*, 12 (1), 3552.
- Zhao, S., Zhang, Q., Xiao, W., Chen, D., Hu, J., Gao, N., ... & Ye, X. (2023a). Comparative transcriptomic analysis reveals the important process in two rice cultivars with differences in cadmium accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, 114629.
- Zhao, Y., Wang, J., Huang, W., Zhang, D., Wu, J., Li, B., ... & Yan, M. (2023b). Absciscic-acid-regulated responses to alleviate cadmium toxicity in plants. *Plants*, 12(5), 1023.
- Zhou, H., Zeng, M., Zhou, X., Liao, B. H., Peng, P. Q., Hu, M., ... & Zou, Z. J. (2015). Heavy metal



- translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant and soil*, 386, 317-329.
- Zhou, J., Li, P., Meng, D., Gu, Y., Zheng, Z., Yin, H., ... & Li, J. (2020). Isolation, characterization and inoculation of Cd tolerant rice endophytes and their impacts on rice under Cd contaminated environment. *Environmental pollution*, 260, 113990.
- Zhou, P., Zhang, P., He, M., Cao, Y., Adeel, M., Shakoor, N., ... & Lynch, I. (2023). Iron-based nanomaterials reduce cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by modulating phytohormones, phytochelatin, cadmium transport genes and iron plaque formation. *Environmental Pollution*, 320, 121063.
- Zhou, X., Liu, X., Zhao, J., Guan, F., Yao, D., Wu, N., & Tian, J. (2021). The endophytic bacterium *Bacillus koreensis* 181–22 promotes rice growth and alleviates cadmium stress under cadmium exposure. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 8517-8529.
- Zhou, X., Zhang, X., Ma, C., Wu, F., Jin, X., Dini-Andreote, F., & Wei, Z. (2022). Biochar amendment reduces cadmium uptake by stimulating cadmium-resistant PGPR in tomato rhizosphere. *Chemosphere*, 307, 136138.
- Zhou, Y., Zhu, X., Li, S., Zhang, M., & Yan, X. (2024). Bioremediation of Cd contamination at smelting sites by sulphate-reducing bacteria (SRB). In *2023 9th International Conference on Advances in Energy Resources and Environment Engineering (ICAEESEE 2023)* (pp. 631-639). Atlantis Press.
- Zou, M., Zhou, S., Zhou, Y., Jia, Z., Guo, T., & Wang, J. (2021). Cadmium pollution of soil-rice ecosystems in rice cultivation dominated regions in China: A review. *Environmental Pollution*, 280, 116965.