مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۶، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۲

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

استراتژی‌های کاهش جذب و تجمع کادمیوم در دانه برنج: یک مطالعه مروری

نوع مقاله: مروری

سجاد شاکرکوهی*[۱]، محمد ربیعی[۲]

۱- کارشناس بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

۲- پژوهشگر بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

sajjadshaker53@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

صفحه ۹۸-۷۵

چکیده

آلودگی کادمیوم در محصولات کشاورزی به‌ویژه در برنج، به‌دلیل اثرات بهداشتی آن به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. بنابراین، توسعه روش‌هایی برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج جهت حفظ ایمنی مواد غذایی امری ضروری است. این مقاله به اثرات عوامل خاکی از جمله پتانسیل ردوکس، میکروب‌ها، مواد آلی و pH خاک بر جذب کادمیوم توسط گیاه برنج می‌پردازد و روش‌های مدیریتی و دیدگاه‌های کاربردی برای کاهش غلظت کادمیوم در دانه برنج را ارائه می‌کند. سمیت و جذب کادمیوم در برنج را می‌توان با استفاده از مواد مغذی ضروری مانند نیتروژن، آهن، روی، سلنیوم و کلسیم کاهش داد. علاوه‌براین، از اصلاح‌کننده‌های معدنی (آهک) و آلی (بیوچار، کمپوست و کود) در خاک برای کاهش جذب کادمیوم توسط برنج استفاده می‌شود. گیاه‌پالایی با استفاده از گیاهان بیش انباشته‌کننده روش دیگری برای اصلاح شالیزارهای آلوده به کادمیوم است. انتخاب ارقام برنج کم انباشته‌کننده کادمیوم، کشت مخلوط، تناوب زراعی، مدیریت آب و کاربرد میکروب‌ها از دیگر اقدامات زراعی موفق برای کاهش غلظت کادمیوم در دانه برنج هستند. این شیوه‌های مدیریتی می‌تواند تحمل گیاه برنج را به تنش کادمیوم افزایش داده و انتقال کادمیوم به زنجیره غذایی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، برنج، زیست‌فراهمی، فلزات سنگین، کادمیوم

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

مقدمه

آلودگی خاک با فلزات سنگین یک مشکل اساسی برای تولید محصولات زراعی در سراسر جهان است (Ali et al. 2015; Rizwan et al. 2016) کادمیوم از آلاینده‌های اصلی و یکی از سمی‌ترین فلزات در محیط‌زیست است. آلودگی محیطی ناشی از کادمیوم از هوازدگی مواد مادری و فعالیت‌های انسانی از جمله کشاورزی، معدن، متالورژی و تولید سرچشمه می‌گیرد (Davidson. 2016; Ahadi et al. 2022). در سال‌های اخیر به‌دلیل استفاده از پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری در آبیاری و استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌ها و کودها، محتوای کادمیوم در خاک‌های کشاورزی به‌طور مداوم افزایش یافته‌است (Mohanty and Das, 2023). آلودگی کادمیوم در زمین‌های کشاورزی نه تنها کیفیت خاک و عملکرد محصول را کاهش می‌دهد، بلکه تهدیدی جدی برای سلامت انسان است (Sizmur and Richardson, 2020).

کادمیوم یک عنصر غیرضروری است که نسبت به سایر عناصر غیرضروری، ضریب انتقال بالاتری از خاک به گیاه دارد (Devi et al. 2018). کادمیوم انباشته شده زمانی برای گیاهان سمی است که غلظت آن بیشتر از ۵ تا ۱۰ میکروگرم در زیست‌توده خشک برگ باشد (White and Brown, 2010). کاهش رشد و نمو، کلروز و نهایتاً مرگ گیاه، بحرانی‌ترین علائم مشاهده شده تحت سمیت کادمیوم است (Amani and Alizadeh-Salteh, 2019). کادمیوم می‌تواند منجر به اختلال در فرآیند اکسایش-کاهش، تحریک تولید گونه‌های اکسیژن فعال و پراکسیداسیون لیپیدی غشاء شود (Zhang et al. 2014a; Chen et al. 2018a). همچنین کادمیوم با مهار جذب یون‌های اساسی مانند آهن و منیزیم، کاهش جذب آب و مواد معدنی و تأثیر بر متابولیسم نیتروژن، هومئوستازی یون‌ها را مختل می‌کند (Afzal et al. 2019). علاوه‌براین، کادمیوم از طریق کاهش فعالیت‌های آنزیمی خاک، فعالیت میکروب‌های مفید خاکزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yu et al. 2021). بر اساس گزارش Khaliq و همکاران، کادمیوم نه تنها بر فعالیت‌های میکروبی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر انتقال، جذب و متابولیسم عناصر ضروری از جمله آهن، روی، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در گیاه برنج مؤثر است (Khaliq et al. 2019).

آلودگی کادمیوم در زنجیره غذایی با انتقال آن به خاک و سپس به گیاه شروع می‌شود. کشت محصولات زراعی در خاک آلوده به کادمیوم می‌تواند سبب تجمع بالای این فلز در دانه این گیاهان شود و ایمنی غذایی و سلامت انسان را تهدید کند (Yu et al. 2018). مصرف طولانی مدت کادمیوم منجر به خطرات مختلف سلامتی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

مانند آسیب کبدی، اختلال در عملکرد کلیه، ادم ریه، فشارخون بالا، کم‌خونی، تغییرات اسکلتی و سرطان می‌شود (Luo et al. 2019; Zhao et al. 2020). برنج به‌دلیل رشد در شرایط غرقابی توانایی بیشتری در جذب کادمیوم و آب از خاک در مقایسه با سایر محصولات دارد (Huang et al. 2016). بیش از ۳/۵ میلیارد نفر در جهان از برنج به‌عنوان غذای اصلی استفاده می‌کنند که ممکن است روزانه ۲۰ تا ۴۰ میکروگرم کادمیوم مصرف کنند (Sebastian and Prasad, 2013; Dabral et al. 2019). بنابراین، بیشتر آلودگی زنجیره غذایی با کادمیوم احتمالاً در نتیجه مصرف برنج است (Adil et al. 2020). از اینرو، توسعه روش‌هایی برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج جهت حفظ ایمنی مواد غذایی امری ضروری است.

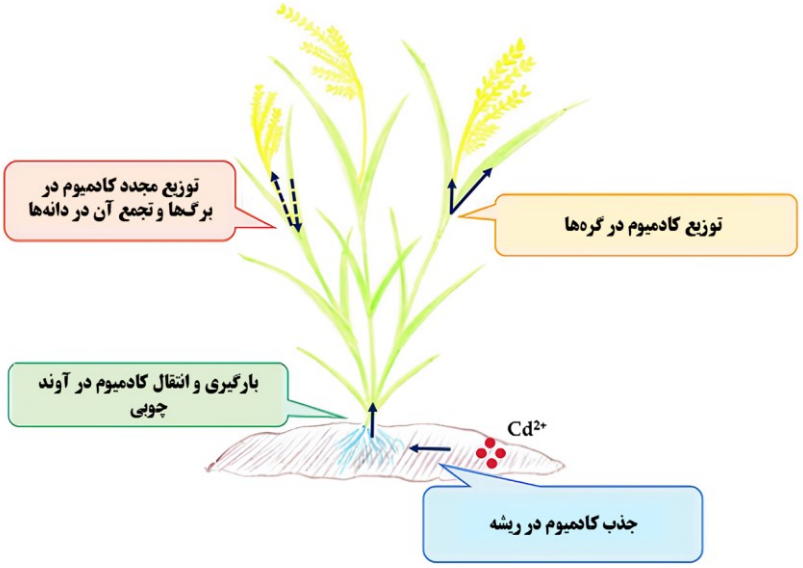
روش‌های فیزیکی و شیمیایی زیادی جهت غلبه بر مشکل سمیت کادمیوم استفاده می‌شوند، اما اغلب این روش‌ها به‌دلیل هزینه بالا و ایجاد آلودگی ثانویه چندان مؤثر و عملی نیستند (Shaheen and Rinklebe, 2015; Pramanik et al. 2018). بااین‌حال، بعضی از گزینه‌ها مانند گیاه پالایی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست هستند (Khan. 2005). استفاده از باکتری‌های محرک رشد (Pramanik et al. 2018) و سایر اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی مانند بیوچار، کمپوست، آهک، کود دامی و زئولیت می‌توانند برای بهبود رشد گیاه و کاهش تجمع کادمیوم در آن مورد استفاده قرار گیرند (Chen et al. 2016; Gu et al. 2019). شیوه‌های مدیریت زراعی مانند استفاده ارقام کم انباشته‌کننده کادمیوم، الگوهای کاشت و تناوب زراعی ممکن است برای کاهش جذب کادمیوم و سمیت آن در گیاهان استفاده شود. استفاده از این اصلاحات می‌تواند خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک را تنظیم کرده و شکل شیمیایی کادمیوم را در خاک تغییر دهد. بنابراین، زیست‌فراهمی کادمیوم در خاک از طریق تثبیت، جذب و رسوب آن کاهش می‌یابد (Bradham et al. 2018; Cambier et al. 2019). این بررسی به‌طور سیستماتیک عوامل مؤثر در انتقال کادمیوم از خاک به ریشه و متعاقباً به دانه‌های برنج را مورد بحث قرار می‌دهد و رویکردهای مدیریتی و تکنیک‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست را جهت کاهش جذب و تجمع کادمیوم در برنج ارائه می‌کند.

مکانیسم‌های تجمع کادمیوم در برنج

تجمع کادمیوم در برنج یک مکانیسم فیزیولوژیکی پیچیده است که شامل عملکردهای یکپارچه چندین سلول، بافت و اندام است (شکل ۱)، که به‌طور عمده شامل چهار فرآیند است: (۱). جذب کادمیوم در ریشه (۲). بارگیری و انتقال کادمیوم در آوند چوبی (۳). توزیع کادمیوم در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

گره‌ها (۴). توزیع کادمیوم در برگ‌ها و تجمع آن در دانه‌ها (Uraguchi and Fujiwara, 2013; Li et al. 2017).



شکل ۱- شماتیک تجمع کادمیوم در برنج (Chen et al. 2023).

عوامل مؤثر بر جذب و انباشت کادمیوم در برنج

pH خاک مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر کادمیوم قابل‌دسترس در نظر گرفته می‌شود (Wei et al. 2023). مکانیسم اولیه‌ای که طی آن pH خاک بر جذب کادمیوم در گیاه تأثیر می‌گذارد از طریق تعدیل اشکال شیمیایی کادمیوم و حلالیت آن در ماتریکس خاک است (Gu et al. 2022). همچنین عواملی از جمله بار الکتریکی خاک و رسوب ترکیباتی مانند $CdCO_3$ و $Cd(OH)_2$ بر این امر موثر هستند (Shaheen et al. 2013). یک رابطه معکوس بین جذب کادمیوم توسط گیاه و pH خاک وجود دارد. به‌طوری‌که pH پایین خاک سبب کاهش جذب یون کادمیوم (Cd^{+2}) روی اجزای خاک و افزایش حلالیت آن در محلول خاک می‌شود و در نتیجه جذب کادمیوم توسط گیاه بیشتر می‌شود (Li et al. 2014). کاهش pH خاک در هر واحد، انحلال‌پذیری کادمیوم را چهار تا پنج برابر افزایش می‌دهد (Rashid et al. 2018). تحقیقات نشان داده است که کادمیوم در خاک‌های با pH پایین‌تر تا خنثی نسبت به خاک‌های با pH بالاتر، قابل دسترس‌تر است (Huang et al. 2021; Wei et al. 2023). اسیدیته خاک می‌تواند دفع کادمیوم از کلوئیدهای خاک را افزایش داده و جذب ریشه را تسهیل کند (Shaheen et al. 2013).

در شرایط غرقابی، pH خاک می‌تواند منجر به بی‌حرکتی کادمیوم در خاک شود. در این شرایط، یون‌های کادمیوم (Cd_{+2}) ممکن است به‌صورت

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

سولفات کادمیوم رسوب کنند و محتوای کادمیوم را در محلول خاک کاهش دهند (Norton et al. 2017). در خاک‌های اسیدی، کادمیوم محلول‌تر است و تمایل دارد در مقادیر بالاتری به صورت کربنات، هیدروکسید و فسفات وجود داشته باشد (El-Naggar et al. 2018). بر اساس نتایج Li و همکاران، با کاهش pH خاک، جذب کادمیوم در گیاه برنج در خاک‌های اسیدی جنوب چین افزایش یافت (Li et al. 2005). در مقابل، افزایش pH خاک از ۴/۵ به ۶/۵ سبب کاهش جذب کادمیوم در دانه‌های برنج از ۲/۳۹ به ۰/۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد (Li et al. 2008). در تحقیقی دیگر نشان داده شد که pH بالای خاک از طریق تشکیل $Cd(OH)_2$ باعث کاهش تحرک کادمیوم و تجمع کمتر آن در دانه‌های برنج می‌شود (Gong et al. 2021). همچنین Chen و همکاران گزارش دادند که افزایش pH خاک از ۵ به ۶/۵ منجر به کاهش ۲/۶ تا ۳ برابری کادمیوم قابل استخراج شد (Chen et al. 2018b).

تنظیمات پتانسیل ردوکس خاک به کنترل حلالیت کادمیوم کمک می‌کند. تغییرات پتانسیل ردوکس بر ترکیبات مواد آلی و معدنی خاک تأثیر می‌گذارد (Gallardo. 2003). پتانسیل ردوکس خاک به‌طور قابل‌توجهی بر جذب کادمیوم توسط گیاه تأثیر می‌گذارد (Chen et al. 2018a). فرآیندهایی مانند چرخه بیوژئوشیمیایی گوگرد و جذب اکسی هیدروکسیدهای آهن و منگنز که بر حلالیت کادمیوم موثر هستند، به شدت تحت تأثیر پتانسیل ردوکس خاک هستند. با کاهش پتانسیل ردوکس از مقادیر مثبت به مقادیر منفی، حلالیت فلزات کمتر می‌شود. در خاک‌هایی با زهکشی مناسب ممکن است پتانسیل ردوکس خاک افزایش یابد. این افزایش می‌تواند سبب حل شدن سولفید کادمیوم نامحلول در آب (CdS) و آزادسازی Cd^{+2} در خاک شود و به ریشه‌های گیاه اجازه دهد تا با تشکیل $CdSO_4$ محلول در آب، کادمیوم را جذب کند (El-Naggar et al. 2018; Han et al. 2018).

اجرای یک دوره غرقابی به‌طور قابل‌توجهی جذب کادمیوم توسط برنج را کاهش می‌دهد. در یک آزمایش مزرعه‌ای که ۸ روز قبل از اجرای آن دوره غرقابی اعمال شده بود، کاهش ۱۶ برابری در غلظت کادمیوم برنج مشاهده شد (Arao et al. 2009). تشکیل سولفید کادمیوم نامحلول در آب (CdS) به‌عنوان دلیل کاهش جذب کادمیوم در این مطالعه نسبت داده شد. سطح کلرید در آب نگرانی دیگری است که سبب افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه از طریق تشکیل کمپلکس کلرید کادمیوم ($CdCl_2$) می‌شود (Smolders and McLaughlin, 1996). همچنین کلر از طریق افزایش غلظت کادمیوم در محلول، منجر به افزایش تحرک و جذب کادمیوم توسط ریشه می‌شود (Guo et al. 2022). از این‌رو، کلرزنی آب

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

آبیاری باید تحت کنترل شدید قرار گیرد تا غلظت کادمیوم در برنج کاهش یابد. همچنین در مصرف کودهای پتاسیم بر پایه کلرید پتاسیم به‌دلیل افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه برنج، باید دقت شود (Sebastian and Prasad, 2013).

ماده آلی یکی از اجزای اصلی خاک است که بر رفتار محیطی فلزات سنگین تأثیر می‌گذارد. ماده آلی ممکن است تحرک فلزات را از طریق جذب و ایجاد ترکیبات پایدار با هوموس، کاهش دهد (Zeng et al. 2011). ماده آلی خاک یک عامل موثر بر زیست‌فراهمی کادمیوم است. تثبیت کادمیوم در خاک از طریق واکنش بین اسیدهای آلی و یون‌های کادمیوم، می‌تواند در دسترس بودن این فلز را برای گیاهان کاهش دهد (Li et al. 2019). ماده آلی شامل چندین گروه عاملی مانند کربوکسیل و هیدروکسید است (Weng et al. 2002). این گروه‌های عاملی به‌عنوان جاذب برای کادمیوم عمل می‌کنند و منجر به محدودیت آن می‌شوند (Guo et al. 2006). پژوهشگران گزارش کردند که ماده آلی سبب کاهش تحرک و در دسترس بودن یون‌های کادمیوم (Cd^{+2}) می‌شود و در نتیجه جذب کادمیوم توسط برنج را کاهش می‌دهد (Hu et al. 2016). با این حال، مقادیر بالای مواد آلی خاک نیز ممکن است تجمع و در دسترس بودن کادمیوم را در برنج افزایش دهد (Zhao et al. 2015).

در آزمایشی کاربرد لئوناردیت به‌طور قابل‌توجهی منجر به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک آلوده به کادمیوم شد و در نتیجه زیست‌فراهمی کادمیوم را برای گیاه برنج کاهش داد. به‌طوری‌که، محتوای کادمیوم در دانه برنج به ۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت که سطحی ایمن برای مصرف انسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین عملکرد دانه برنج را به ۱۲/۲ گرم در بوته افزایش داد (Saengwilai et al. 2020). گزارش شده که کاربرد مواد آلی، جذب کل کادمیوم در اندام هوایی، کاه و دانه برنج را ۳۰ درصد کاهش داد (Kashem and Singh, 2001). همچنین Li و همکاران بیان کردند که افزایش کربن آلی در خاک سبب کاهش جذب کادمیوم توسط گیاه برنج می‌شود (Li et al. 2005).

میکروب‌های خاک از طریق ترشح هورمون‌ها یا تحریک گیاهان برای تولید هورمون‌ها، به مبارزه با عوامل بیماری‌زا، افزایش تحمل در برابر تنش‌ها و رشد گیاه کمک می‌کنند (Zheng et al. 2018). میکروارگانیسم‌ها می‌توانند با تغییر در بیان ژن‌ها و جامعه باکتریایی خاک، جذب کادمیوم را در برنج کاهش دهند (Chen et al. 2019). برخی از میکروارگانیسم‌ها ممکن است سبب کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم در برنج شوند و در عین‌حال رشد برنج را افزایش دهند (Mitra et al. 2018). برخی از میکروب‌ها نه تنها به کاهش

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

محتوای کادمیوم در ریشه، اندام هوایی و دانه برنج کمک می‌کنند، بلکه باعث افزایش غلظت مواد مغذی ضروری به‌ویژه آهن و منگنز می‌شوند که انتقال کادمیوم را از طریق کانال‌های کاتیونی به شیوه‌ای رقابتی محدود می‌کند (Wang et al. 2020).

روش‌های کاهش جذب و تجمع کادمیوم در دانه‌های برنج

استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک

الف) بیوچار

بیوچار محصول جانبی تجزیه حرارتی مواد آلی تحت شرایط محدود اکسیژن در یک محیط کنترل شده است که پتانسیل کنترل زیست‌فراهمی فلزات سنگین مانند کادمیوم در خاک را دارد (Zong et al. 2021).

بیوچار دارای چندین گروه عاملی از جمله گروه‌های کربوکسیلات و هیدروکسیل است. حضور این گروه‌های عاملی در بیوچار تشکیل کمپلکس‌های سطحی قوی، تبادل یونی و برهمکنش الکترواستاتیکی با فلزات سنگین از جمله کادمیوم را ممکن می‌سازد (Ahmad et al. 2019)، که برای تثبیت و افزایش غلظت کادمیوم غیرقابل جذب در خاک بسیار مهم هستند (Van Poucke et al. 2018; Amirahmadi et al. 2020). کاربرد بیوچار سبب کاهش غلظت کادمیوم و افزایش رشد و عملکرد گیاه برنج می‌شود (جدول ۱). پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد بیوچار در خاک آلوده به کادمیوم سبب افزایش عملکرد و کاهش غلظت کادمیوم دانه برنج در مقایسه با تیمار شاهد شد. هنگامی که بیوچار با کود نیتروژن ترکیب شد، نتایج معنی‌دارتر بود (Chen et al. 2014). به‌طور مشابه، کاربرد بیوچار لجن فاضلاب به میزان ۵ و ۱۰ درصد باعث افزایش وزن دانه، ارتفاع بوته و تعداد پنجه در بوته برنج شد درحالی‌که غلظت کادمیوم در برنج را کاهش داد (Khan et al. 2014). بر اساس نتایج Zheng و همکاران، بیوچار حاصل از کاه برنج در مقایسه با بیوچار حاصل از سبوس و پوسته برنج، تأثیر بیشتری بر کاهش غلظت کادمیوم در برنج داشت (Zheng et al. 2012). در آزمایشی دیگر کاهش غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج پس از کاربرد بیوچار (کاه گندم) به‌ویژه در تیمار ۴۰ تن در هکتار گزارش شد. کاهش جذب کادمیوم توسط برنج با کاربرد بیوچار به افزایش pH خاک نسبت داده شد (Bian et al. 2013). کاهش غلظت کادمیوم در قسمت‌های مختلف گیاه برنج با کاربرد بیوچار ممکن است به‌دلیل تغییرات میکروبی در خاک به‌ویژه باکتری‌های دخیل در چرخه نیتروژن (Chen et al. 2015) و افزایش سیلیسیم موجود در خاک و جذب آن توسط برنج باشد (Liu et al. 2014).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

جدول ۱- اثر بیوچار بر جذب کادمیوم توسط برنج.

بیوچار	مقدار استفاده شده	اثرات	منابع
پوسته بادام زمینی و کاه گندم	۰/۵ –۵ درصد	افزایش pH، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک شالیزار و کاهش کادمیوم قابل استخراج.	(Xu et al. 2018)
کاه گندم	۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار	افزایش pH خاک و کاهش غلظت کادمیوم قابل استخراج در خاک و غلظت کادمیوم دانه برنج.	(Chen et al. 2016)
کاه گندم	۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار	افزایش زیست‌توده برنج و کاهش ۳۴ درصدی تجمع زیستی کادمیوم و ۶۱ درصدی جذب کادمیوم.	(Bian et al. 2016)
کاه برنج	۰، ۷/۵ و ۱۵ تن در هکتار	افزایش عملکرد دانه، کاهش محتوای پرولین آزاد و مالون دی آلدئید، افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز و کاهش محتوای کادمیوم در قسمت‌های مختلف گیاه برنج.	(Zhang et al. 2014b)
خاکستر باگاس نیشکر و خاکستر پوسته برنج	۱ درصد	افزایش محتوای کلسیم و منیزیم و کاهش محتوای کادمیوم در دانه برنج.	(Suksabye et al. 2016)

ب) کمپوست

کمپوست‌سازی فرآیند طبیعی پوسیدگی یا تجزیه مواد آلی مانند بقایای گیاهی و حیوانی یا زباله‌های شهری است که یک روش طبیعی برای تثبیت فلزات سنگین به‌شمار می‌رود (Awasthi et al. 2020). کمپوست می‌تواند زیست‌فراهمی فلزات سنگین را توسط میکروب‌ها یا مواد آلی تولید شده از طریق تخریب میکروبی، واکنش‌های ردوکس، رسوب و متیلاسیون کاهش دهد (Ejileugha et al. 2024). کمپوست حاصل از ضایعات سبز (برگ و پوست درختان، چمن، علف‌های هرز و قارچ‌ها) به‌دلیل سطوح کربن و نیتروژن بالا و محتوای کم فلزات سنگین، اصلاح‌کننده ایده‌آل خاک است (Clemente et al. 2006). کمپوست علف‌های هرز جذب سرب، کادمیوم و مس را به ترتیب ۲۲، ۵۵ و ۲۰ درصد در خاک آلوده شالیزار، کاهش داد (van Herwijnen et al. 2007). کاربرد کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد، غلظت کادمیوم در خاک و جذب آن توسط گیاه برنج را کاهش داد (Wu et al. 2011).

در مطالعه‌ای گزارش شده است که کاربرد کمپوست به‌طور قابل‌توجهی سبب کاهش تجمع کادمیوم در برنج کشت شده در خاک‌های با pH پایین و بالا به ترتیب در ۴۵ و ۷۵ روز پس از کاشت شد. کاهش سریع غلظت کادمیوم در خاک با pH پایین ممکن است به‌دلیل شکستن سریع و توزیع مجدد کادمیوم پس از اصلاح با کمپوست در مقایسه با خاک با pH بالا باشد. نتایج نشان داد که نوع خاک بر قابلیت دسترسی کادمیم برای گیاه

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

برنج تأثیر می‌گذارد (Juang et al. 2012). پژوهشگران مشاهده کردند که کاربرد ترکیبی کمپوست با آهک در کاهش غلظت کادمیوم دانه برنج در مقایسه با کاربرد جداگانه این اصلاح‌کننده‌ها، مؤثرتر است. این موضوع نشان داد که ترکیبی از اصلاح‌کننده‌های مختلف ممکن است یک روش مؤثر جهت کاهش سمیت کادمیوم در گیاه برنج باشد. بااین‌حال، هنوز نیاز به پژوهش‌های بیشتری است (Cattani et al. 2008).

ج) کودهای آلی

فضولات حیوانی مانند کود مرغی و گاوی به‌دلیل محتوای فراوان مواد مغذی به‌طور معمول به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده می‌شوند. برخی از فضولات حیوانی در تثبیت فلزات سنگین و بهبود حاصلخیزی خاک نقش دارند (Mubeen et al. 2023). کاربرد کودهای آلی سبب افزایش pH خاک و کاهش دسترسی به کادمیوم می‌شود. کودها می‌توانند از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار با گروه‌های عاملی هیدروکسید یا کربوکسیل، کادمیوم را در خاک تثبیت کنند. علاوه‌براین، کود از طریق افزایش ماده آلی در خاک منجر به کاهش تحرک و سمیت گیاهی کادمیوم می‌شود (Chaudri et al. 2007; Khan et al. 2014). در یک آزمایش گلدانی، کود مرغی و گاوی به‌طور قابل‌توجهی سبب بهبود رشد و عملکرد برنج شد و غلظت کادمیوم را در اندام‌های برنج در مقایسه با تیمار شاهد به حداقل رساند (Ullah et al. 2017). استفاده از بقایای کلزا به‌عنوان کود سبز سبب بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک و کاهش غلظت کادمیوم در گیاه برنج شد (Ok et al. 2011). گزارش شده است که کاربرد کود خوکی در سه خاک مختلف لومی، لوم سیلتی و لومی شنی باعث افزایش عملکرد برنج و کاهش غلظت کادمیوم در دانه، پوسته و کاه برنج شد. بااینحال، پاسخ گیاه برنج به غلظت کادمیوم نسبت به نوع خاک و میزان مصرف کود متفاوت بود (Han et al. 2012).

استفاده از اصلاح‌کننده‌های غیرارگانیک

مواد معدنی مانند گچ و آهک می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی زیست‌فراهمی کادمیوم در خاک و جذب آن توسط گیاهان را کاهش دهند. این اصلاح‌کننده‌ها سبب افزایش pH خاک و مکان‌های اتصال می‌شوند (Xu et al. 2021). کاربرد خاکستر بادی به میزان ۲۰ و ۴۰ گرم در کیلوگرم در یک خاک اسیدی pH خاک را به‌ترتیب از ۴ به ۵/۱ و ۶/۴ افزایش داد که منجر به کاهش جذب فلزات توسط گیاه برنج شد (Gu et al. 2013). گزارش شده است که کاربرد آهک منجر به کاهش غلظت کادمیوم در برنج در حدود ۲۵ درصد نسبت به شاهد شد (Cattani et al. 2008). بر اساس نتایج Li و همکاران، کاربرد سنگ آهک در کاهش جذب و تجمع کادمیوم در گیاه برنج در مقایسه با

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

سایر اصلاح‌کننده‌ها از جمله کلسیم فسفات، سیلیکات کلسیم، کود خوک و ذغال سنگ مؤثرتر بود. بر اساس این نتایج کاهش بیشتر غلظت کادمیوم در گیاه برنج با کاربرد سنگ آهک ممکن است به‌دلیل افزایش بیشتر pH خاک باشد (Li et al. 2008). پژوهشگران بیان کردند که کاربرد ولاستونیت (سیلیکات کلسیم) سبب کاهش ۷۱ درصدی محتوای کادمیوم در دانه برنج شد. بااین حال، کاربرد ترکیبی ولاستونیت و فسفر، محتوای کادمیوم دانه را تنها ۲۹ تا ۳۹ درصد کاهش داد (Mao et al. 2019).

تأثیر نیتروژن کافی بر کاهش سمیت کادمیوم در برنج در چندین مطالعه گزارش شده است (Hassan et al. 2006; Jalloh et al. 2009; Lin et al. 2011). کمبود نیتروژن در محیط رشد سبب کاهش رشد و افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه برنج شد. به‌عبارت‌دیگر، تأمین نیتروژن مناسب سمیت کادمیوم در برنج را کاهش داد. با این‌حال، اشکال نیتروژن از نظر کاهش سمیت کادمیوم در برنج تفاوت داشتند (Hassan et al. 2005). خواص فیزیکی و شیمیایی روی تقریباً شبیه به کادمیوم است. این موضوع احتمال کاهش سمیت کادمیوم در گیاهان را با کاربرد روی افزایش می‌دهد (Hassan et al. 2006). گزارش شده است که غلظت بالای روی در اندام‌هوایی برنج سبب کاهش علائم سمیت کادمیوم در آن شد (Kukier and Chaney, 2002). پژوهشگران مشاهده کردند که کاربرد روی باعث کاهش غلظت کادمیوم در ریشه و افزایش غلظت آن در اندام هوایی برنج شد (Liu et al. 2007a). افزایش رشد و زیست‌توده گیاه برنج و کاهش تنش اکسیداتیو ممکن است به‌دلیل تقسیم کادمیوم در بافت‌های گیاهی از طریق رقابت روی و کادمیوم برای مکان‌های اتصال باشد (Basnet et al. 2014). در پژوهش دیگری کاربرد آهک در هنگام کاشت همراه با کاربرد روی در مرحله پنجه‌زنی سبب کاهش ۷۳ درصدی زیست‌فراهمی کادمیوم و کاهش جذب و تجمع آن در برنج شد (Bozena et al. 2014).

در میان روش‌های مختلف برای کاهش جذب و انتقال کادمیوم در برنج، کاربرد آهن از طریق تشکیل پلاک‌های آهن (IP) در سطح ریشه می‌تواند یک روش مؤثر باشد. تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه برنج تحت هر دو شرایط کنترل شده و مزرعه اثبات شده است (Liu et al. 2007a; Wang et al. 2013a; Zhou et al. 2015). غلظت کادمیوم در ریشه برنج حاوی پلاک آهن به‌طور قابل‌توجهی کمتر از ریشه بدون پلاک آهن بود (Zhou et al. 2015). پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد آهن می‌تواند منجر به کاهش غلظت کادمیوم و افزایش رشد و عملکرد گیاه برنج شود (Sebastian and Prasada, 2015a). بر

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

اساس گزارش Shao و همکاران، کاربرد آهن منجر به افزایش آنزیم پراکسیداز و کاهش غلظت کادمیوم در برگ و ریشه برنج شد، اما فعالیت سوپراکسید دیسموتاز با کاربرد بیشتر آهن (۱۶/۸ میلی گرم در لیتر) کاهش یافت (Shao et al. 2007). کاربرد آهن تحت تنش کادمیوم سبب بازسازی زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی و افزایش تحمل برنج به کادمیوم می‌شود (Sebastian and Prasad, 2015b).

تأثیر مثبت سلنیوم بر کاهش سمیت کادمیوم در برنج توسط پژوهشگران مختلف مشاهده شده است (Lin et al. 2012; Feng et al. 2013; Chen et al. 2014). گزارش شده است که کاربرد سلنیوم به میزان ۳ میکرومولار در سطح ۵۰ میکرومولار کادمیوم در محلول غذایی، سبب افزایش رشد گیاه برنج و کاهش تنش اکسیداتیو و جذب کادمیوم شد (Lin et al. 2012). در آزمایشی دیگر کاربرد سلنیوم باعث بهبود وضعیت مواد مغذی و مهار جذب کادمیوم توسط گیاه برنج تحت سطوح پایین کادمیوم در محلول غذایی شد. درحالی‌که غلظت کادمیوم در برنج را تحت سطوح بالای کادمیوم (۸۹–۱۷۸ میکرومولار)، افزایش داد (Feng et al. 2013). کاهش غلظت کادمیوم در برنج با کاربرد سلنیوم ممکن است به‌دلیل کاهش تحرک کادمیوم در خاک باشد (Hu et al. 2014). به‌طور کلی، اثر سلنیوم بر غلظت کادمیوم در برنج به سطوح سلنیوم و کادمیوم در محیط رشد بستگی دارد (Feng et al. 2013; Ding et al. 2014).

پژوهشگران گزارش کردند که کمبود کلسیم سبب افزایش سمیت کادمیوم در گیاه برنج می‌شود. آن‌ها پیشنهاد کردند که ممکن است کلسیم برای مقابله با سمیت ناشی از کادمیوم در برنج مؤثر باشد (Cho et al. 2012). در آزمایشی کاربرد کلسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و کاهش غلظت کادمیوم در برنج در مقایسه با تیمار شاهد شد (Rahman et al. 2016). گزارش شده است که رقابت بین یون‌های کادمیوم و کلسیم در سطح ریشه برنج، جذب کادمیوم را در ریشه برنج مسدود می‌کند، که نشان‌دهنده اثر محافظتی کلسیم در برابر سمیت کادمیوم است (Kim et al. 2002).

مدیریت آب

مدیریت آب رویکردی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست جهت کاهش جذب و تجمع کادمیوم در گیاه برنج است (Arao et al. 2009; Makino et al. 2010; Pan et al. 2016). پژوهشگران گزارش کردند که شرایط غرقابی در طول رشد سبب کاهش جذب کادمیوم توسط گیاه برنج شد (Makino et al. 2010; Hu et al. 2015). غلظت کادمیوم در پوسته برنج در تیمارهای غرقابی متناوب نسبت به تیمار شاهد کمتر بود. همچنین با افزایش حجم آبیاری از شرایط هوازی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

به غرقابی، غلظت کادمیوم در کاه برنج از ۱/۷۶ به ۰/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت (Hu et al. 2015). شرایط غرقابی به مدت ۳ هفته قبل و بعد از کاشت بیشترین تأثیر را در کاهش غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج داشت (Arao et al. 2009). همچنین کاهش غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج تحت شرایط آبیاری غرقابی در مطالعات دیگر گزارش شده است (Cattani et al. 2008; Sun et al. 2014).

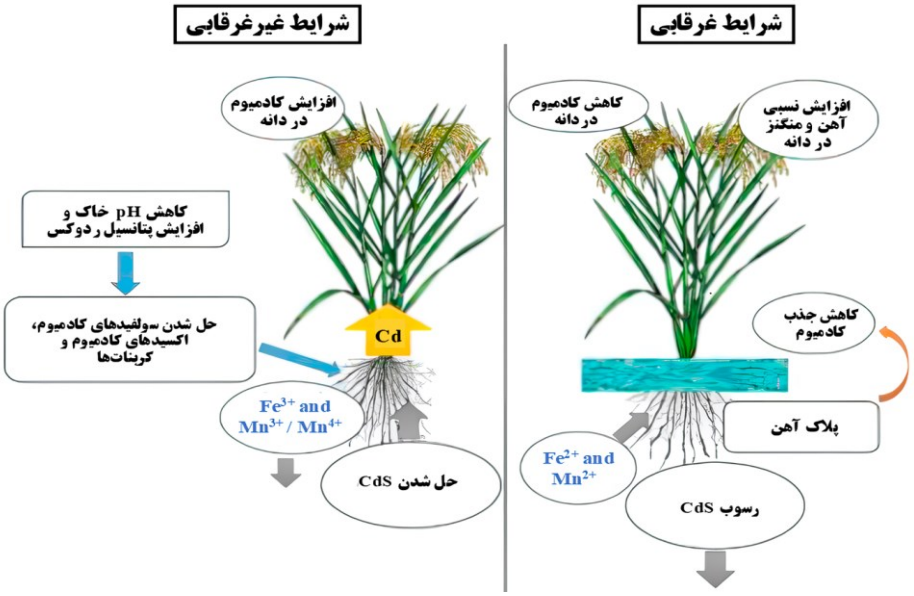
کاهش دردسترس‌بودن کادمیوم در شرایط غرقابی ممکن است به‌دلیل تشکیل کادمیوم نامحلول در خاک باشد (Makino et al. 2010; Fulda et al. 2013). تحت شرایط غرقابی، پتانسیل ردوکس کمتر و pH بالاتر سبب کاهش زیست‌فراهمی کادمیوم در خاک می‌شود. در شرایط پتانسیل ردوکس کمتر، کادمیوم با گوگرد خاک پیوند برقرار کرده و کمپلکس Cd-S را برای حفظ حلالیت پایین کادمیوم تشکیل می‌دهد. درنتیجه تحت شرایط غرقابی به‌دلیل تشکیل ترکیب نامحلول کادمیوم با گوگرد، جذب کادمیوم توسط برنج کاهش می‌یابد (Hu et al. 2015). به همین ترتیب، چندین مطالعه در مزارع برنج تحت رژیم‌های آبی مختلف نشان داد که پتانسیل ردوکس و pH خاک در کاهش جذب کادمیوم توسط برنج نقش دارند (Zhao and Wang, 2020; Tian et al. 2019). علاوه‌براین، از دست دادن اکسیژن شعاعی (ROL) از ریشه باعث تشکیل پلاک آهن در سطوح ریشه تحت شرایط آبیاری غرقابی می‌شود که از طریق تغییر پتانسیل ردوکس و pH خاک در ریزوسفر (Mei et al. 2020; Mei et al. 2014)، بر زیست‌فراهمی و تحرک کادمیوم در خاک تأثیر می‌گذارد (Cheng et al. 2014). مکانیسم‌های تاثیر مدیریت آب بر کاهش جذب و تجمع کادمیوم در دانه برنج در شکل ۲ نشان داده شده است.

انتخاب ارقام برنج با انباشت کم کادمیوم

انتخاب و اصلاح ارقام برنج با انباشت کم کادمیوم می‌تواند روش مناسبی برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج باشد (Ye et al. 2012; Uraguchi and Fujiwara, 2013; Zhan et al. 2013). گزارش شده که تجمع کادمیوم در کاه و دانه برنج به‌طور قابل‌توجهی در بین ارقام مختلف برنج حتی تحت شرایط یکسان، متفاوت است (Li et al. 2012; Cheng et al. 2014; Song et al. 2014). پژوهشگران بیان کردند که غلظت کادمیوم در دانه برنج رقم ایندیکا بیشتر از رقم ژاپنیکا بود. غلظت کادمیوم در دانه با غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ همبستگی معنی‌داری داشت. این موضوع نشان داد که محتوای کادمیوم در دانه با جذب و انتقال مجدد آن از ساقه و برگ به دانه در ارتباط است (Ye et al. 2012). برای ارزیابی ارتباط بین تغییرات ژنوتیپی و تجمع کادمیوم در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

دانه‌های برنج، یک آزمایش مزرعه‌ای با استفاده از ۹ ژنوتیپ برنج در شش مکان مختلف به مدت دو سال متوالی انجام شد. نتایج نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ-محیط تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیوم و سایر فلزات سنگین در دانه‌های برنج دارد (Cheng et al. 2006).



شکل ۲- نقش مدیریت آب بر جذب و تجمع کادمیوم در دانه برنج (Hussain et al. 2021).

میزان انباشت کادمیوم در دانه‌های سه رقم برنج تحت شرایط مزرعه‌ای به مدت دو سال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ارقام برنج با انباشت کم کادمیوم در مقایسه با ارقام بیش انباشته‌کننده، مقدار کمتری از کادمیوم را در دانه‌های خود انباشته کردند. علاوه‌براین، محلول‌پاشی مخلوط حاوی گلوتاتیون، سیلیسیم، روی و سلنیم باعث کاهش محتوای کادمیوم دانه در همه ارقام بدون تأثیر بر عملکرد و کیفیت برنج شد. به‌عبارت‌دیگر، ترکیب ارقام برنج با انباشت کم کادمیوم با تنظیم‌کننده‌های شیمیایی می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش محتوای کادمیوم در دانه برنج باشد (Cao et al. 2014). در یک پژوهش مشاهده شد که ترشحات ریشه‌ای (اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین) در رقم برنج کم انباشته کننده کادمیوم در مقایسه با رقم بیش انباشته‌کننده کمتر بود، که ممکن است یکی از مکانیسم‌های تفاوت انباشت کادمیوم در ارقام برنج باشد (Liu et al. 2007b).

همچنین گزارش شد که رقم HA63 از طریق فعال‌سازی فیتوسیدروفورها و افزایش جذب آهن، انباشت کادمیوم را در مقایسه با سایر ارقام مورد مطالعه کاهش داد (Wang et al. 2013b).

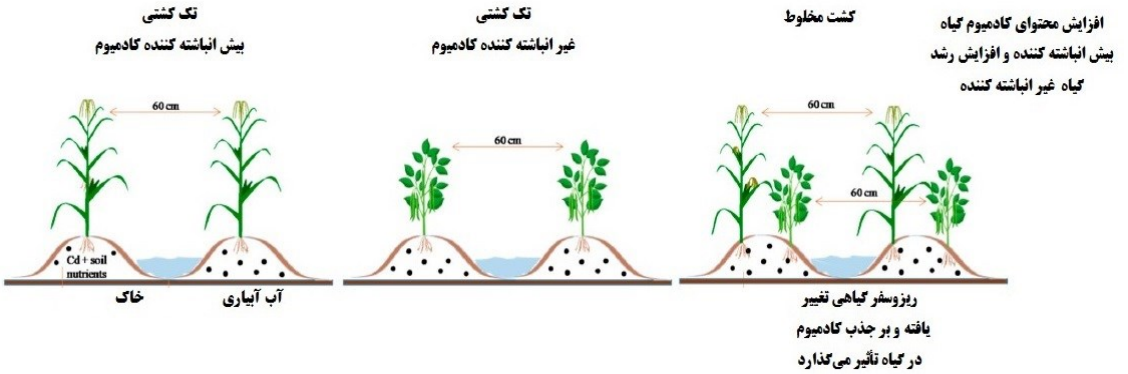
[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

تناوب زراعی و کشت مخلوط

تناوب زراعی یک رویکرد امیدوارکننده برای بهبود حاصلخیزی خاک، عملکرد محصول و تحمل به فلزات سنگین است (Yang et al. 2017). تناوب زراعی با حبوبات نقش مهمی در تعیین سطح کادمیوم قابل دسترس گیاهی دارد. خاک اطراف ریزوسفر حبوبات از طریق فرآیند تثبیت نیتروژن اسیدی شده و منجر به افزایش تحرک و جذب کادمیوم توسط این گیاهان می‌شود. بنابراین حبوبات با تجمع بیشتر، کادمیوم را از مزرعه حذف می‌کنند (Mubeen et al. 2023). در یک سیستم تناوب، استخراج کادمیوم توسط یک رقم برنج بیش انباشته‌کننده به‌طور قابل‌توجهی محتوای کادمیوم در دانه‌های سویا و برنج را کاهش داد (Murakami et al. 2009; Murakami et al. 2008). در آزمایشی اثر کمپوست و تناوب کلزا با برنج بر جذب کادمیوم توسط برنج در شرایط گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. غلظت کادمیوم در دانه برنج با اجرای تناوب حدود ۴۶/۸ درصد کاهش یافت. همچنین کاربرد کمپوست سبب کاهش زیست‌فراهمی و جذب کادمیوم در هر دو گیاه شد (Wu et al. 2011).

سیستم کشت مخلوط با ترکیبی از گیاهان بیش انباشته‌کننده و گیاهان کم انباشته‌کننده فلزات سنگین (شکل ۳)، می‌تواند برای پالایش خاک‌های آلوده به آلاینده‌های فلزی مورد استفاده قرار گیرد (Hu et al. 2013; Tang et al. 2020). کشت مخلوط یک گیاه زراعی با یک گیاه بیش انباشته‌کننده از طریق برهم‌کنش متقابل ریشه‌ای گونه‌ها، باعث بهبود پالایش خاک و درنتیجه کاهش جذب فلزات سنگین توسط محصول اصلی می‌شود (Tang et al. 2017). گزارش شده است که کشت مخلوط برنج با اسفناج آبی منجر به کاهش جذب کادمیوم توسط برنج و افزایش جذب این فلز توسط اسفناج آبی شد. افزایش pH خاک و محتوای پلاک آهن در سطح ریشه برنج ازجمله دلایل کاهش غلظت کادمیوم در این گیاه تحت سیستم مخلوط عنوان شد. همچنین تجمع کادمیوم در دانه برنج در سیستم مخلوط کمتر از آستانه مجاز ایمنی غذایی به‌دست آمد (Kang et al. 2020). در مطالعه‌ای دیگر کشت توأم برنج با آزولا از طریق کاهش پتانسیل ردوکس خاک، منجر به کاهش ۳۷ درصدی غلظت کادمیوم محلول در مقایسه با الگوی تک‌کشتی شد. همچنین کشت توأم با آزولا سبب افزایش متیلوباکتر (*Methylobacter*) و کربن آلی محلول و درنتیجه کاهش دردسترس‌بودن کادمیوم برای برنج شد. با توجه به این اثرات، کشت توأم برنج با آزولا، غلظت کادمیوم در دانه برنج را ۸۰/۳ درصد کاهش داد و سبب افزایش عملکرد محصول به میزان ۱۳/۴ درصد شد (Liu et al. 2021).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]



شکل ۳- شماتیک کشت مخلوط بین گیاه بیش انباشته‌کننده و گیاه غیر انباشته‌کننده کادمیوم (Mubeen et al. 2023).

گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی یک روش درحال‌توسعه است که از گیاهان برای اصلاح، تجزیه، حذف یا استخراج آلاینده‌های فلزی از خاک و آب استفاده می‌کند. این فناوری به‌دلیل کارایی اقتصادی و سازگاری با محیط‌زیست از طریق حفظ حاصلخیزی و ساختار خاک و عدم ایجاد آلودگی ثانویه، به‌طور گسترده جهت پالایش فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ma et al. 2020). رشد علف‌های هرز مانند اویارسلام (*Cyperus rotundus*) و شبدر آبی (*Marselia quadrifolia*) برای اصلاح مزارع برنج آلوده به فلزات سنگین مفید هستند (Sundaramoorthy et al. 2010). گیاهانی مانند سرخس دوپایه (*Pteris vittata*) و *Thlaspi caerulescens* که بیش انباشته‌کننده فلزات سنگین به شمار می‌روند، جهت استخراج کادمیوم در مزارع برنج مناسب هستند (Ma et al. 2001; Milner and Kochian, 2008).

پژوهشگران دریافتند که رشد گیاهان آبزی مانند الاتینه شش پرچمی (*Elatine hexandra*)، *Althenia filiformis* و *Monita rivularis* در مزارع برنج تحت شرایط غرقابی باعث حذف کادمیوم از خاک می‌شود (Robinson et al. 2001). استفاده از زیست‌توده جلبکی در مزارع غرقاب منجر به حذف ۳ برابری کادمیوم در مقایسه با شرایط معمول شد (Reniger. 1977). گیاه‌پالایی همراه با همزیستی میکوریزا روش مناسبی جهت حذف فلزات سنگین است (Prasad et al. 2010).

همزیستی میکوریزا سبب افزایش جذب مواد معدنی ضروری به‌ویژه فسفر می‌شود که توانایی رسوب کادمیوم را دارد. بنابراین، میکوریزا ورود کادمیوم به ریشه را محدود می‌کند و در نتیجه منجر به کاهش غلظت کادمیوم در دانه برنج می‌شود (Wright et al. 1998).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

استفاده از میکروارگانیسم‌ها

بسیاری از میکروارگانیسم‌های خاک در برابر سمیت فلزات سنگین مقاوم هستند. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند اشکال فلزات سمی موجود در خاک را به اشکال کمتر سمی تبدیل کنند و از طریق مکانیسم‌های مختلف زیست‌فراهمی این فلزات را برای گیاهان کاهش دهند (Islam et al. 2014; Singh and Hiranmai, 2021). باکتری‌های مقاوم به فلز با کاهش کادمیوم موجود در خاک، منجر به کاهش تجمع کادمیوم در دانه‌های برنج شدند (Lin et al. 2016). پژوهشگران گزارش کردند که افزودن ۲ درصد از سودوموناس آئروژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*)، باسیلوس سوبتلیس (*Bacillus subtilis*) و *Beauveria bassiana* در خاک سبب کاهش غلظت کادمیوم در دانه‌های برنج شد، اگرچه اثر کاهشی بین سویه‌ها متفاوت بود و بیشترین کاهش با کاربرد *سودوموناس آئروژینوزا* به‌دست آمد (Suksabye et al. 2016).

تلقیح برنج با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (Arbuscular mycorrhizal fungi)، *Funnelifor mismosseae* و *Rhizophagus intraradices* در خاک‌های آلوده، منجر به کاهش قابل‌توجهی در محتوای کادمیوم خاک شد و در نتیجه دسترسی به کادمیوم را برای برنج کاهش داد (Chen et al. 2019).

در آزمایش دیگری برنج کشت شده در خاک تحت تنش کادمیوم (۱۲۰ میلی گرم در کیلوگرم) با *باسیلوس سوبتیلیس* و *باسیلوس سرئوس* (*Bacillus cereus*) تلقیح شد. نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم در ریشه، اندام هوایی و دانه برنج با تلقیح *باسیلوس سوبتیلیس* به میزان قابل‌توجهی کاهش یافت. علاوه‌براین، این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند زیست‌توده خشک برنج را افزایش دهند و از طریق حل کردن فسفات و تولید ایندول-۳-استیک اسید، از این گیاه در برابر تنش کادمیوم محافظت کنند (Treesubsuntorn et al. 2018).

نتیجه‌گیری

آلودگی برنج به فلزات سنگین از جمله کادمیوم می‌تواند منجر به کاهش رشد و عملکرد و اثرات نامطلوب بر سلامت انسان شود. از اینرو، مدیریت و به‌حداقل رساندن کادمیوم در برنج حائز اهمیت است. تحرک کادمیوم در خاک‌های شالیزاری بسیار پیچیده بوده و تحت تأثیر خواص خاک است. پتانسیل ردوکس و pH خاک تأثیر زیادی بر تحرک و زیست‌فراهمی کادمیوم در شالیزارها دارند. استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند بیوچار، کود و کمپوست و اصلاح‌کننده‌های معدنی از جمله آهک سبب افزایش pH و مواد آلی خاک و کاهش جذب و انتقال کادمیوم در اندام‌های برنج می‌شوند. برخی از میکروارگانیسم‌های خاک

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

به‌ویژه باکتری‌ها و قارچ‌ها منجر به کاهش اثرات سمی کادمیوم و افزایش رشد و نمو برنج می‌شوند. علاوه‌براین، میکروب‌ها می‌توانند نقش حیاتی در تثبیت کادمیوم و کاهش جذب آن توسط برنج داشته باشند.

پژوهش‌ها نشان داده که انتخاب و اصلاح ارقام برنج کم انباشته‌کننده کادمیوم روش مناسبی برای کاهش تجمع کادمیوم در دانه‌های برنج است. از روش‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای اصلاح مزارع برنج آلوده به کادمیوم، می‌توان به مدیریت آبیاری اشاره کرد. علاوه‌براین، از فناوری گیاه‌پالایی، تناوب زراعی و کشت مخلوط برنج با گیاهان بیش انباشته‌کننده می‌توان برای کاهش تجمع کادمیوم در دانه برنج و تولید محصول ایمن استفاده کرد. با این‌حال، هنوز مطالعات دقیق‌تری برای درک مکانیسم‌های مختلف کاهش سمیت کادمیوم در برنج مورد نیاز است.

فهرست منابع References

Adil MF, Sehar S, Chen G, Chen ZH, Jilani G, Chaudhry AN, Shamsi IH. 2020. Cadmium-zinc cross-talk delineates toxicity tolerance in rice via differential genes expression and physiological/ultrastructural adjustments. Ecotoxicology and Environmental Safety. 190: 110076.

Afzal M, Yu M, Tang C, Zhang L, Muhammad N, Zhao H, Feng J, Yu L, Xu J. 2019. The negative impact of cadmium on nitrogen transformation processes in a paddy soil is greater under non-flooding than flooding conditions. Environment International. 129: 451-460.

Ahadi S, Rafati M, Farsad F. 2022. Investigating of the Phytoremediation of Lead and Cadmium by Indian Mustard Plant (*Brassica juncea*). Journal of Biosafety. 15(2): 1-18.

Ahmad M, Ahmad M, Usman AR, Al-Faraj AS, Abduljabbar A, Ok YS, Al-Wabel MI. 2019. Date palm waste-derived biochar composites with silica and zeolite: synthesis, characterization and implication for carbon stability and recalcitrant potential. Environ Geochem Health. 41: 1687-1704.

Ali S, Bharwana SA, Rizwan M, Farid M, Kanwal S, Ali Q, Ibrahim M, Gill RA, Khan MD. 2015. Fulvic acid mediates chromium (Cr) tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) through lowering of Cr uptake and improved antioxidant defense system. Environmental Science and Pollution Research. 22: 10601-10609.

Amani M andAlizadeh-Salteh S. 2019. The Effect of Heavy Metal Stress (Cadmium) on Morphological and Physiological Characteristics of Various Medicinal Plants. Journal of Biosafety. 11(4): 49-76.

Amirahmadi E, Mohammad Hojjati S, Kammann C, Ghorbani M, Biparva P. 2020. The potential effectiveness of biochar application to reduce soil Cd bioavailability and encourage oak seedling growth. Applied Sciences. 10(10): 3410.

Arao T, Kawasaki A, Baba K, Mori S, Matsumoto S. 2009. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice. Environmental Science and Technology. 43(24): 9361-9367.

Awasthi MK, Duan YM, Awasthi SK, Liu T, Chen HY, Pandey A, Zhang ZQ, Taherzadeh MJ. 2020. Emerging applications of biochar: Improving pig manure composting and attenuation of heavy metal mobility in mature compost. Journal of Hazardous Materials. 389: 122116.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Basnet P, Amarasiriwardena D, Wu F, Fu Z, Zhang T. 2014. Elemental bioimaging of tissue level trace metal distributions in rice seeds (*Oryza sativa* L.) from a mining area in China. Environmental Pollution. 195: 148-156.

Bian R, Chen D, Liu X, Cui L, Li L, Pan G, Xie D, Zheng X, Zheng J, Chang A. 2013. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: results from a cross-site field experiment. Ecological Engineering. 58: 378-383.

Bian R, Li L, Bao D, Zheng J, Zhang X, Zheng J, Liu X, Cheng K, Pan G. 2016. Cd immobilization in a contaminated rice paddy by inorganic stabilizers of calcium hydroxide and silicon slag and by organic stabilizer of biochar. Environmental Science and Pollution Research. 10: 10028-36.

Bozena G, Zakrzewska D, Szymczycha B. 2018. Sorption of Cr, Pb, Cu, Zn, Cd, Ni, and Co to nano-TiO2 in seawater. Water Science and Technology. 77: 145-158.

Bradham KD, Diamond GL, Nelson CM, Noerpel M, Scheckel KG, Elek B, Chaney RL, Ma Q, Thomas DJ. 2018. Long-term in situ reduction in soil lead bioavailability measured in a mouse model. Environmental Science and Technology. 52: 13908-13913.

Cambier P, Michaud A, Paradelo R, Germain M, Mercier V, Guérin-Lebourg A, Revallier 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, Wang R, Cheng W, Zeng F, Ahmed IM, Hu X, Zhang G, Wu F. 2014. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation. Science of the Total Environment. 496: 275–281.

Cattani I, Romani M, Boccelli R. 2008. Effect of cultivation practices on cadmium concentration in rice grain. Agronomy for Sustainable Development. 28: 265-271.

Chaudri A, McGrath S, Gibbs P, Chambers B, Carlton-Smith C, Godley A, Bacon J, Campbell C, Aitken M. 2007. Cadmium availability to wheat grain in soils treated with sewage sludge or metal salts. Chemosphere. 66: 1415-1423.

Chen D, Guo H, Li R, Li L, Pan G, Chang A, Joseph S. 2016. Low uptake affinity cultivars with biochar to tackle Cd-tainted rice-a field study over four rice seasons in Hunan, China. Science of the Total Environment. 541: 1489-1498.

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 H, Zhang W, Yang X, Wang P, McGrath SP, Zhao FJ. 2018b. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain. Chemosphere. 207: 699-707.

Chen J, Liu X, Li L, Zheng J, Qu J, Zheng J, Qu J, Zhang X, Pan G. 2015. Consistent increase in abundance and diversity but variable change in community composition of bacteria in topsoil of rice paddy under short-term biochar treatment across three sites from South China. Applied Soil Ecology. 91: 68-79.

Chen Q, Lu X, Guo X, Pan Y, Yu B, Tang Z, Guo Q. 2018a. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant Catharanthus roseus. Ecotoxicology and Environmental Safety. 157: 266-275.

Chen S, Xu C, Zhang W, Wu Q. 2014. Combined application of biochar and nitrogen fertilizers reducing heavymetals contents in potted rice planted in contaminated soil. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 30: 189-197.

Chen XW, Wu L, Luo N, Mo CH, Wong MH, Li H. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and the associated bacterial community influence the uptake of cadmium in rice. Geoderma. 337: 749-757.

Cheng H, Wang M, Wong MH, Ye Z. 2014. Does radial oxygen loss and iron plaque formation on roots alter Cd and Pb uptake and distribution in rice plant tissues? Plant and Soil. 375: 137-148.

Cheng W, Zhang GP, Yao HG, Wu W, Xu M. 2006. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, arsenic, nickel, and lead concentrations in rice grains. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B. 7: 565–571.

Cho SC, Chao YY, Kao CH. 2012. Calcium deficiency increases Cd toxicity and Ca is required for heat-shock induced Cd tolerance in rice seedlings. Journal of Plant Physiology. 169: 892-898.

Clemente R, Escolar A, Bernal MP. 2006. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials. Bioresource Technology. 97: 1894-1901.

Dabral S, Yashaswee Varma A, Choudhary DK, Bahuguna RN, Nath M. 2019. Biopriming with Piriformospora indica ameliorates cadmiumstress in rice by lowering oxidative stress and cell death in root cells. Ecotoxicology and Environmental Safety. 186: 109741.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Davidson CM. 2013. Methods for the determination of heavy metals and metalloids in soils. In Heavy Metals in Soils. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 97-140.
Devi U, Bhattacharyya KG. 2018. Mobility and bioavailability of Cd, Co, Cr, Cu, Mn and Zn in surface runoff sediments in the urban catchment area of Guwahati, India. Applied Water Science. 8: 18.
Ding Y, Feng R, Wang R, Guo J, Zheng X. 2014. A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice. Plant and Soil. 375: 289-301.
El-Naggar A, Shaheen SM, Ok YS, Rinklebe J. 2018. Biochar affects the dissolved and colloidal concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and their phytoavailability and potential mobility in a mining soil under dynamic redox-conditions. Science of the Total Environment. 624: 1059-1071.
Ejileugha C, Onyegbule UO, Osuoha JO. 2024. Use of Additives in Composting Promotes Passivation and Reduction in Bioavailability of Heavy Metals (HMs) in Compost. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 262: 2.
Feng R, Wei C, Tu S, Ding Y, Song Z. 2013. A dual role of Se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice. Biological Trace Element Research. 151: 113-121.
Fulda B, Voegelin A, Kretzschmar R. 2013. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper. Environmental Science and Technology. 47: 12775–12783.
Gallardo A. 2003. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in Northwest Spain. Ecosystems. 6: 564–576.
Gong L, Wang J, Abbas T, Zhang Q, Cai M, Tahir M, Wu D, Di H. 2021. Immobilization of exchangeable Cd in soil using mixed amendment and its effect on soil microbial communities under paddy upland rotation system. Chemosphere. 262: 127828.
Gu HH, Li FP, Guan X, Xu YL, Liu YJ, Chen XT, Wang Z. 2013. Effects of fly ash on heavy metal uptake of rice growing on multi-metal contaminated acidic soil. Advanced Materials Research. 680: 94-99.
Gu JF, Zhou H, Tang HL, Yang WT, Zeng M, Liu ZM, Peng PQ, Liao BH. 2019. Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under in situ remediation. Ecotoxicology and Environmental Safety. 171: 451-459.
Gu J, Zou G, Su S, Li S, Liu W, Zhao H, Liu L, Jin L, Tian Y, Zhang X, Wang Y, Zhao T, Du L, Wei D. 2022. Effects of pH on Available Cadmium in Calcareous Soils and Culture Substrates. Eurasian Soil Science. 55: 1714-1719.
Guo X, Zhang S, Shan Xq, Luo L, Pei Z, Zhu YG, Liu T, Xie Yn, Gault A. 2006. Characterization of Pb, Cu, and Cd adsorption on particulate organic matter in soil. Environmental Toxicology and Chemistry. 25: 2366-2373.
Guo J, Chen M, Huang Y, Xie S, Zhang X, Zuo T, Hu C, Wang G. 2022. Chloride application weakens cadmium immobilization by lime in paddy rice soil. Ecotoxicology and Environmental Safety. 241: 113761.
Han C, Wu L, Tan W, Zhong D, Huang Y, Luo Y, Christie P. 2012. Cadmium distribution in rice plants grown in three different soils after application of pig manure with added cadmium. Environmental Geochemistry and Health. 34: 481-492.
Han H, Wang Q, He LY, Sheng XF. 2018. Increased biomass and reduced rapeseed Cd accumulation of oilseed rape in the presence of Cd-immobilizing and polyamine-producing bacteria. Journal of Hazardous Materials. 353: 280-289.
Hassan MJ, 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.
Hassan MJ, Zhu Z, Ahmad B, Mahmood Q. 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspian Journal of Environmental Sciences. 4: 1-8.
Huang CL, Bao LJ, Luo P, Wang ZY, Li SM, Zeng EY. 2016. Potential health risk for residents around a typical e-waste recycling zone via inhalation of size-fractionated particle-bound heavy metals. Journal of Hazardous Materials. 317: 449-456.
Huang H, Zhao D, Wang P. 2021. Biogeochemical control on the mobilization of Cd in soil. Current Pollution Reports. 7: 194-200.
Hu P, Ouyang Y, Wu L, Shen L, Luo Y, Christie P. 2015. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar. Journal of Environmental Sciences. 27: 225-231.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Hu U, Chan PT, Wu F, Wu S, Zhang J, Lin X, Wong MH. 2013. Arbuscular mycorrhizal fungi induce differential Cd and P acquisition by Alfred stonecrop (*Sedum alfredii* Hance) and upland kangkong (*Ipomoea aquatica* Forsk.) in an intercropping system. Applied Soil Ecology. 63: 29-35.
Hu Y, Cheng H, Tao S. 2016. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review. Environment International. 92: 515-532.
Hu Y, Norton GJ, Duan G, Huang Y, Liu Y. 2014. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants. Plant and Soil. 384: 131-140.
Hussain B, Umer MJ, Li J, Ma Y, Abbas Y, Ashraf MN, Tahir N, Ullah A, Gogoi N, Farooq M. 2021. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains. Journal of Cleaner Production. 286: 125557.
Islam F, Yasmeen T, Riaz M, Arif MS, Ali S, Raza SH. 2014. Proteus mirabilis alleviates zinc toxicity by preventing oxidative stress in maize (*Zea mays*) plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 110: 143-152.
Jalloh MA, Chen J, Zhen F, Zhang G. 2009. Effect of different Nfertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress. Journal of Hazardous Materials. 162: 1081-1085.
Juang KW, Ho PC, Yu CH. 2012. Short-term effects of compost amendment on the fractionation of cadmium in soil and cadmium accumulation in rice plants. Environmental Science and Pollution Research. 19: 1696-1708.
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.
Kashem M, Singh B. 2001. Metal availability in contaminated soils: II. Uptake of Cd, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 61: 257-266.
Khaliq MA, James B, Chen YH, Ahmed Saqib HS, Li HH, Jayasuriya P, Guo W. 2019. Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice. Chemosphere. 215: 916-924.
Khan AG. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 18: 355-364.
Khan S, Reid BJ, Li G, Zhu YG. 2014 Application of biochar to soil reduces cancer risk via rice consumption: a case study in Miaoqian village, Longyan, China. Environment International. 68: 154-161.
Kim YY, Yang YY, Lee Y. 2002. Pb and Cd uptake in rice roots. Physiologia Plantarum. 116: 368-372.
Kukier U, Chaney RL. 2002. Growing rice grain with controlled cadmium concentrations. Journal of Plant Nutrition. 25: 1793-1820.
Li B, Wang X, Qi X, Huang L, Ye Z. 2012. Identification of rice cultivars with low brown rice mixed cadmium and lead contents and their interactions with the micronutrients iron, zinc, nickel and manganese. Journal of Environmental Sciences. 24: 1790-1798.
Li H, Luo N, Li YW, Cai QY, Mo CH, Wong MH. 2017. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. Environmental Pollution. 224: 622-630.
Li P, Wang XX, Zhang T, Zhou D, Yuanqiu HE. 2008. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil. Journal of Environmental Sciences. 20: 449-455.
Li Q, Guo J, Zhang X, Yu H, Huang F, Zhang L, Zhang M, Li T .2019 . Changes of non-protein thiols in root and organic acids in xylem sap involved in cadmium translocation of cadmium-safe rice line (*Oryza Sative* L.). Plant and Soil. 439: 475-486.
Li W, Xu B, Song Q, Liu X, Xu J, Brookes PC. 2014. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil–rice systems at a regional scale in eastern China. Science of the Total Environment. 472: 407-420.
Li Z, Li L, Chen GPJ. 2005. Bioavailability of Cd in a soil–rice system in China: soil type versus genotype effects. Plant and Soil. 271: 165-173.
Liu C, Guo B, Li H, Fu Q, Li N, Lin Y, Xu G. 2021. Azolla incorporation under flooding reduces grain cadmium accumulation by decreasing soil redox potential. Scientific Reports. 11: 6325.
Liu H, Hussain S, Peng S, Huang J, Cui K, Nie L. 2014. Potentially toxic elements concentration in milled rice differ among various planting patterns. Field Crops Research. 168: 19-26.
Liu HJ, Zhang JL, Christie P, Zhang FS. 2007a. Influence of external zinc and phosphorus supply on Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings with root surface iron plaque. Plant and Soil. 300: 105-115.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Liu J, Qian M, Cai G, Zhu Q, Wong MH. 2007b. Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake. Environmental Geochemistry and Health. 29: 189-195.
Lin L, Zhou W, Dai H, Cao F, Zhang G, Wu F. 2012. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. Journal of Hazardous Materials. 235: 343-351.
Lin YL, Chao YY, Huang WD, Kao CH. 2011. Effect of nitrogen deficiency on antioxidant status and Cd toxicity in rice seedlings. Plant Growth Regulation. 64: 263-273.
Lin X, Mou R, Cao Z, Xu P, Wu X. 2016. Characterization of cadmium-resistant bacteria and their potential for reducing accumulation of cadmium in rice grains. Science of the Total Environment. 569: 97-104.
Luo LY, Xie LL, Jin DC, Mi BB, Wang DH, Li XF, Dai XZ, Zou XX, Zhang Z, Ma YQ, Liu F. 2019. Bacterial community response to cadmium contamination of agricultural paddy soil. Applied Soil Ecology. 139: 100-106.
Ma L, Wu Y, Wang Q, Feng Y. 2020. The endophytic bacterium relieved healthy risk of pakchoi intercropped with hyperaccumulator in the cadmium polluted greenhouse vegetable field. Environmental Pollution. 264: 114796.
Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature. 409: 579-579.
Makino T, Luo Y, Wu L, Sakurai Y, Maejima Y, Akahane I, Arao T. 2010. Heavy metal pollution of soil and risk alleviation methods based on soil chemistry. Pedologist. 53: 38-49.
Mao P, Zhuang P, Li F, McBride MB, Ren W, Li Y, Li Y, Mo H, Fu H, Li Z, 2019. Phosphate addition diminishes the efficacy of wollastonite in decreasing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in paddy soil. Science of the Total Environment. 687: 441-450.
Mei X, Li Q, Wang H, Fang H, Chen H, Chen X, Yang Y, Rizwan M, Ye Z. 2020. Effects of cultivars, water regimes, and growth stages on cadmium accumulation in rice with different radial oxygen loss. Plant and Soil. 453: 529-543.
Mei XQ, Yang Y, Tam NFY, Wang YW, Li L. 2014. Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater. Water Research. 50: 147-159.
Milner MJ and Kochian LV. 2008. Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. Annals of Botany. 102: 3-13.
Mitra S, Pramanik K, Sarkar A, Ghosh PK, Soren T, Maiti TK. 2018. Bioaccumulation of cadmium by *Enterobacter* sp. and enhancement of rice seedling growth under cadmium stress. Ecotoxicology and Environmental Safety. 156: 183-196.
Mohanty B and Das A. 2023. Heavy metals in agricultural cultivated products irrigated with wastewater in India: a review. AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society. 72(6): 851-867.
Mubeen S, Ni W, He C, Yang Z. 2023. Agricultural strategies to reduce cadmium accumulation in crops for food safety. Agriculture. 13(2): 471.
Murakami M, Ae N, Ishikawa S, Ibaraki T, Ito M. 2008. Phytoextraction by a high-Cd-accumulating rice: Reduction of Cd content of soybean seeds. Environmental Science and Technology. 42: 6167-6172.
Murakami M, Nakagawa F, Ae N, Ito M, Arao T. 2009. Phytoextraction by rice capable of accumulating Cd at high levels: Reduction of Cd content of rice grain. Environmental Science and Technology. 43: 5878-5883.
Norton GJ, Shafaei M, Travis AJ, Deacon CM, Danku J, Pond D, Cochrane N, Lockhart K, Salt D, Zhang H, Dodd IC, Hossain M, Islam R, Price AH. 2017. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production, and grain quality. Field Crops Research. 205: 1-13.
Ok YS, Usman AR, Lee SS, El-Azeem SAA, Choi B, Hashimoto Y, Yang JE. 2011. Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil. Chemosphere. 85: 677-682.
Pan Y, Bonten LT, Koopmans GF, Song J, Luo Y, Temminghoff EJ, Comans RN. 2016. Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage. Geoderma. 261: 59-69.
Pramanik K, Mitra S, Sarkar A, Maiti TK. 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.
Prasad MNV, Freitas H, Fraenzle S, Wuenschmann S, Markert B. 2010. Knowledge explosion in phytotechnologies for environmental solutions. Environmental Pollution. 158(1): 18-23.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Rahman A, Mostofa MG, Nahar K, Hasanuzzaman M, Fujita M. 2016. Exogenous calcium alleviates cadmium-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by regulating the antioxidant defense and glyoxalase systems. Brazilian Journal of Botany. 39: 393-407.
Rashid I, Murtaza G, Zahir ZA, Farooq M. 2018. Effect of humic and fulvic acid transformation on cadmium availability to wheat cultivars in sewage sludge amended soil. Environmental Science and Pollution Research. 25: 16071-16079.
Reniger P. 1977. Concentration of cadmium in aquatic plants and algal mass in flooded rice culture. Environmental Pollution. 14: 297-302.
Rizwan M, Ali S, Adrees M, Rizvi H, Rehman MZ, Hannan F, Qayyum MF, Hafeez F, OK YS. 2016. Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms and management: A critical review. Environmental Science and Pollution Research. 23: 17859-17879.
Robinson B, Russell C, Hedley M, Clothier B. 2001. Cadmium adsorption by rhizobacteria: implications for New Zealand pastureland. Agriculture, Ecosystems & Environment. 87: 315-321.
Saengwilai P, Meeinkuirt W, Phusantisampan T, Pichtel J. 2020. Immobilization of cadmium in contaminated soil using organic amendments and its effects on rice growth performance. Xposure and Health. 12: 295-306.
Sebastian A, Prasad MNV. 2013. Cadmium minimization in rice. A review. Agronomy for Sustainable Development. 34: 155-173.
Sebastian A, Prasad MNV. 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 MNV. 2015b. Iron-and manganese-assisted cadmium tolerance in *Oryza sativa* L.: lowering of rhizotoxicity next to functional photosynthesis. Planta. 241: 1519-1528.
Shaheen SM, Rinklebe J. 2015. Impact of emerging and low-cost alternative amendments on the (im)mobilization and phytoavailability of Cd and Pb in a contaminated floodplain soil. Ecological Engineering. 74: 319-326.
Shaheen SM, Tsadilas CD, Rinklebe J. 2013. A review of the distribution coefficients of trace elements in soils: Influence of sorption system, element characteristics, and soil colloidal properties. Advances in Colloid and Interface Science. 201: 43-56.
Shao G, Chen M, Wang W, Mou R, Zhang G. 2007. Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants. Plant Growth Regulation. 53: 33-42.
Singh S and Hiranmai RY. 2021. Monitoring and molecular characterization of bacterial species in heavy metals contaminated roadside soil of selected region along NH 8A, Gujarat. Heliyon. 7(11): e08284.
Sizmur T and Richardson J. 2020. Earthworms accelerate the biogeochemical cycling of potentially toxic elements: Results of a metaanalysis. Soil Biology and Biochemistry. 148: 107865.
Song WE, Chen L, Chen SB, Song NN, Li N, Liu B. 2014. 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.
Suksabye P, Pimthong A, Dhurakit P, Mekvichitsaeng P, Thiravetyan P. 2016. Effect of biochars andmicroorganisms on cadmium accumulation in rice grains grown in Cd-contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research. 23: 962-973.
Sundaramoorthy P, Chidambaram A, Ganesh KS, Unnikannan P, Baskaran L. 2010. Chromium stress in paddy: (i) nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds. Comptes Rendus Biologies. 333: 597-607.
Sun L, Zheng M, Liu H, Peng S, Huang J, Cui K, Nie L. 2014. Water management practices affect arsenic and cadmium accumulation in rice grains. Scientific World Journal. (4): 596438.
Tang L, Hamid Y, Zehra A, Sahito ZA, He Z, Beri WT, Khan MB, Yang X. 2020. Fava bean intercropping with *Sedum alfredii* inoculated with endophytes enhances phytoremediation of cadmium and lead co-contaminated field. Environmental Pollution. 265: 114861.
Tang Y, He J, Yu X, Xie Y, Lin L, Sun G, Li H, Liao M, Liang D, Xia H, Wang X, Zhang J, Liu Z, Tu L, Liu L. 2017. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from Two Ecoclimatic Regions Promotes Growth and Reduces Cadmium Uptake of Eggplant Seedlings. Pedosphere. 27(3): 638-644.
Tian T, Zhou H, Gu J, Jia R, Li H, Wang Q, Zeng M, Liao B. 2019. Cadmium accumulation and bioavailability in paddy soil under different water regimes for different growth stages of rice (*Oryza sativa* L.). Plant and Soil. 440: 327-339.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

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.
Ullah MA, Shamsuzzaman SM, Islam MR, Samsuri AW, Uddin MK. 2017. Cadmium availability and uptake by rice from lime, cow-dung and poultry manure amended Ca contaminated paddy soil. Bangladesh Journal of Botany. 46: 291-296.
Uraguchi S, Fujiwara T. 2013. Rice breaks ground for cadmium-free cereals. Current Opinion in Plant Biology. 16: 328-334.
Van Herwijnen R, Hutchings TR, Al-Tabbaa A, Moffat AJ, Johns ML, Ouki SK. 2007. Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts. Environmental Pollution. 150: 347-354.
Van Poucke R, Ainsworth J, Maeseele M, Ok YS, Meers E, Tack F. 2018. Chemical stabilization of Cd-contaminated soil using biochar. Applied Geochemistry. 88: 122-130.
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 X, Yao H, Wong MH, Ye Z. 2013a. Dynamic changes in radial oxygen loss and iron plaque formation and their effects on Cd and As accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Geochemistry and Health. 35: 779-788.
Wang X, Zhang ZW, Tu SH, Feng WQ, Xu F, Zhu F, Zhang DW, Du JB, Yuan S, Lin HH. 2013b. Comparative study of four rice cultivars with different levels of cadmium tolerance. Biologia. 68: 74-81.
Wei B, Peng Y, Jeyakumar P, Lin L, Zhang D, Yang M, Zhu J, Ki Lin CS, Wang H, Wang Z, Li C. 2023. Soil pH restricts the ability of biochar to passivate cadmium: A meta-analysis. Environmental Research. 219: 115110.
Weng L, Temminghoff EJ, Lofts S, Tipping E, Van Riemsdijk WH. 2002. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. Environmental Science and Technology. 36(22): 4804-4810.
White PJ, Brown PH. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. Annals of Botany. 105(7): 1073-1080.
Wright DP, Scholes JD, Read DJ. 1998. Effects of VA mycorrhizal colonization on photosynthesis and biomass production of (*Trifolium repens* L.). Plant Cell and Environment. 21(2): 209-216.
Wu F, Lin DY, Su DC. 2011. The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice. Agricultural Sciences in China. 10: 267-274.
Xu L, Xing X, Cui H, Zhou J, Zhou J, Peng J, Bai J, Zheng X, Ji M. 2021. The combination of lime and plant species effects on trace metals (copper and cadmium) in soil exchangeable fractions and runoff in the red soil region of China. Frontiers in Environmental Science. 9: 638324.
Xu Y, Seshadri B, Sarkar B, Wang H, Rumpel C, Sparks D, Farrell M, Hall T, Yang X, Bolan N. 2018. Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. Science of the Total Environment. 621: 148-159.
Yang Y, Zhou X, Tie B, Peng L, Li H, Wang K, Zeng Q. 2017. Comparison of three types of oil crop rotation systems for effective use and remediation of heavy metal contaminated agricultural soil. Chemosphere. 188: 148-156.
Ye X, Ma Y, Sun B. 2012. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety. Journal of Environmental Sciences. 24: 1647-1654.
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, Wan Y, Camara AY, Li H. 2018. Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice. Chemosphere. 196: 303-310.
Zeng F, Ali S, Zhang H, Ouyang Y, Qiu B, Wu F, Zhang G. 2011. The influence of pH and organicmatter content in paddy soil on heavymetal availability and their uptake by rice plants. Environmental Pollution. 159: 84-91.
Zhang XF, Zhang XH, Gao B, Li ZA, Xia HP, Li HF, Li J. 2014a. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum Americanum* × *P. purpureum*). Biomass and Bioenergy. 67: 179-187.
Zhang ZY, Jun M, Shu D, Chen WF. 2014b. Effect of biochar on relieving cadmium stress and reducing accumulation in super japonica rice. Journal of Integrative Agriculture. 13: 547-553.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]

Zhan J, Wei S, Niu R, Li Y, Wang S, Zhu J. 2013. Identification of rice cultivar with exclusive characteristic to Cd using a fieldpolluted soil and its foreground application. Environmental Science and Pollution Research. 20: 2645-2650.
Zhao FJ, Wang P. 2020. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies. Plant and Soil. 446: 1-21.
Zhao H, Huang X, Liu F, Hu X, Zhao X, Wang L, Gao P, Ji P. 2020. A two-year field study of using a new material for remediation of cadmium contaminated paddy soil. Environmental Pollution. 263: 114614.
Zhao K, Fu W, Ye Z, Zhang C. 2015. Contamination and spatial variation of heavy metals in the soil-rice system in Nanxun County, Southeastern China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 12: 1577-1594.
Zheng RL, Cai C, Liang JH, Huang Q, Chen Z, Huang YZ, Sun GX. 2012. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Chemosphere. 89: 856-862.
Zheng W, Zeng S, Bais H, LaManna JM, Hussey DS, Jacobson DL, Jin Y. 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) reduce evaporation and increase soil water retention. Water Resources Research. 54(5): 3673-3687.
Zhou H, Zeng M, Zhou X, Liao BH, Peng PQ, Hu M, Zhu W, Wu YJ, Zou ZJ. 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.
Zong Y, Xiao Q, Malik Z, Su Y, Wang Y, Lu S. 2021. Crop straw-derived biochar alleviated cadmium and copper phytotoxicity by reducing bioavailability and accumulation in a field experiment of rice-rape-corn rotation system. Chemosphere. 280: 130830.

Strategies of Reducing Cadmium Uptake and Accumulation in Rice Grain: A Review

Sajjad Shaker-Kouhi[*1] and Mohammad Rabiee[2]

1- Expert, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran.
2- Researcher, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran.

sajjadshaker53@gmail.com

Abstract

Cadmium (Cd) contamination in agricultural products, especially in rice, has become a global concern due to its health effects. Therefore, it is essential to develop methods for reducing cadmium accumulation in rice to maintain food safety. This article examines the effects of soil factors including redox potential, microbes, organic matter and soil pH on Cd uptake by rice plants, and presents the management practices and applicable perspectives for reducing Cd concentration in rice grains. Toxicity and Cd uptake in rice can be decreased by application of essential nutrients such as nitrogen, iron, zinc, selenium and calcium. In addition, inorganic (Lime) and organic (biochar, compost and manure) amendments have been applied in the soils to reduce Cd uptake in rice. Phytoremediation using hyperaccumulating plants can be used for the remediation of contaminated paddy soils with cadmium. Selection of low Cd accumulating rice cultivars, intercropping, crop rotation, water management and application of microbes are among the other agronomic practices successfully employed for reducing Cd concentration in rice grains. These management practices could enhance rice tolerance to Cd stress and reduce the transfer of Cd to the food chain.

Keywords: Bioavailability, Cadmium, Heavy Metals, Rice, Soil Contamination.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2024-11-21]