نشریه زیست‌شناسی خاک / جلد 7 / شماره 1 / 1398
Archive of SID

10.22092/sbj.2019.115720.119

اثر مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه و سطوح رطوبتی مختلف بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت

شهرزاد کرمی[1] و جعفر یثربی

دانشجوی دکتری بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ sh.k624@gmail.com

استادیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ j_yasrebi@yahoo.com

دریافت: 96/9/4 و پذیرش: 97/7/18

چکیده

کادمیم به عنوان یکی از خطرناکترین عناصر برای جانداران شناخته می‌شود و به دلیل قابلیت دسترسی آسان برای گیاه، یک تهدید بزرگ برای چرخه غذایی محسوب می‌شود. بمنظور بررسی اثر افزودن کودهای بیولوژیک همچون باکتری محرک رشد گیاه *میکروکوکوس یونانیسیس* بر شکل‌های شیمیایی این فلز سنگین در خاک، آزمایشی گلخانه‌ای بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل دو سطح باکتری (با و بدون مایه‌زنی باکتری)، چهار سطح کادمیم (شاهد، 10، 20، و40 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، و سه سطح رطوبتی مختلف (100، 80، و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه) بود. پس از برداشت ذرت، شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح کادمیم کاربردی، مقادیر شکل‌های شیمیایی مختلف کادمیم نیز افزایش یافت. مایه‌زنی باکتری سبب کاهش شکل‌های تبادلی، کربناتی، آلی، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز شد اما شکل باقیمانده با مایه‌زنی باکتری افزایش یافت و کادمیم به شکل کم محلول‌تر تبدیل شد. با کاهش رطوبت خاک، در شرایط بدون مایه‌زنی شکل‌های آلی و متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل کاهش و در شرایط مایه‌زنی شده شکل‌های متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل و منگنز افزایش یافت. بیشترین مقدار نسبی کادمیم مربوط به شکل کربناتی و سپس به ترتیب شکل‌های باقیمانده > متصل به اکسیدهای منگنز > متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل > آلی > تبادلی بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، کادمیم، عصاره‌گیری دنباله‌ای

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: شیراز، باجگاه، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، بخش علوم خاک

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

امروزه زمین‌های کشاورزی افزایش قابل توجهی در مقدار فلزات سنگین نشان می‌دهند که علت آن فعالیت‌های صنعتی انسان و استفاده از پساب‌های کارخانجات، لجن فاضلاب، کودهای شیمیایی است (اولاخ و همکاران، 2009). در میان فلزات سنگین کادمیم تنها فلزی است که با نیمه عمر زیستی 17 الی 30 سال به عنوان خطرناکترین عنصر برای ریز جانداران، گیاهان، حیوانات، و انسان‌ها شناخته می‌شود و همچنین به دلیل قابلیت دسترسی آسان برای گیاه، یک تهدید بزرگ برای چرخه غذایی محسوب می‌شود (خورانا و کانسال، 2014).

مطالعه اجزای شیمیایی مختلف عناصر سنگین در خاک، بسیار اهمیت دارد زیرا سایر روش‌ها صرفاً به بررسی مقدار کل فلز در خاک پرداخته و تفاوتی بین بخش‌های قابل تبادل (پر خطرتر) و غیر قابل تبادل (به مراتب کم خطر تر) قائل نمی‌شوند (اولانیران و همکاران، 2013). رفتار فلزات در خاک به شکل شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. بررسی شکل‌های شیمیایی معمولاً به مشخص کردن رفتار فلز در خاک کمک کرده و اطلاعات پایه‌ای را برای مدیریت خاک ایجاد می‌کند که تا حد امکان اثر منفی فلزات سنگین را در اکوسیستم‌ها محدود خواهد کرد (گلیزس و همکاران، 2002).

وان در هیجدن (2010) بیان کرد که گیاهان و ریزجانداران می‌توانند با ترشح ترکیبات آلی سبب تغییر پ‌هاش ریزوسفر و تأثیر بر تحرک و فراهمی عناصر سنگین و تغییر در شکل‌های شیمیایی آن‌ها شوند. باکتری‌های محرک رشد گیاه همچنین می‌توانند از طریق تولید سیدروفورها، تغییر پ‌هاش خاک و انحلال یا تشکیل ترکیبات فسفاته با فلز، قابلیت دسترسی آن را تغییر دهند (شنگ و زیا، 2006؛ بولان و همکاران، 2014). تغییر در شکل شیمیایی می‌تواند بر جذب گیاهی و کاهش یا افزایش سمیت فلز تأثیرگذار باشد (هوانگ و همکاران، 2004).

نتایج متفاوتی در ارتباط با اثر ریزجانداران بر تحرک فلزات سنگین گزارش شده است. برخی از گزارشات بیانگر کاهش تحرک و برخی دیگر حاکی از افزایش فراهمی این فلزات به‌وسیله ریزجانداران هستند. برای مثال محمدزاده کرکرق و همکاران (1393) بیان کردند که فلزات سنگین به صورت شیمیایی یا زیستی تجزیه نمی‌شوند اما می‌توانند با مواد آلی و یا کودهای آلی و میکروبی تشکیل کمپلکس دهند. آنان همچنین بیان کردند که باکتری‌ها با داشتن گروه‌های عاملی حاوی بار منفی در سطح سلول، موضع مناسبی برای جذب سطحی کاتیون‌های فلزی (منجمله کادمیم) به نظر می‌رسند و سبب کاهش فراهمی فلزات در خاک می‌گردند. هوانگ و همکاران (2005) بیان کردند که اکثر ریزجانداران نسبت سطح به حجم زیادی دارند و سطح تماس زیادی را برای برهمکنش با فلزات ایجاد می‌کنند. تن زاده و همکاران (1395) بیان نمودند که ریزجانداران عمل کاهش تحرک فلزات سنگین را به دو صورت فعال (تجمع زیستی)[1] و یا غیرفعال (جذب سطحی)[2] انجام می‌دهند. در نقطه مقابل نتایج گزارش شده، هوانگ و همکاران (2004) بیان نمودند که ریزجانداران خاک به عنوان کلوئیدهای آلی فعال می‌توانند ترکیبات آلی مختلفی از جمله اسیدهای آلی را ترشح کرده و سبب تغییر یک تا دو واحدی پ‌هاش ریزوسفر نسبت به پ‌هاش کل توده خاک شوند. گادد (2004) بیان کرد که با کاهش پ‌هاش به‌وسیله ریزجانداران، حلالیت کادمیم افزایش یافته و رسوب آن بر روی هیدروکسیدها، فسفات‌ها، کربنات‌ها و سیلیکات‌ها در پ‌هاش‌های کمی اسیدی تا قلیایی کاهش می‌یابد. میشرا و همکاران (2010) نیز بیان کردند که لیگاندهای آلی تولید شده به‌وسیله ریزجانداران می‌توانند تحرک فلزات را در خاک افزایش داده و با کمپلکس کردن آن‌ها مانع از جذب سطحی برخی فلزات سنگین به‌وسیله کانی‌های خاک شوند.

گوپتا و همکاران (2015) به نقل از (ویوروس و همکاران، 2010) بیان کردند که باکتری‌های محرک رشد گیاه به دو دسته ePGPR[3] و iPGPR[4] تقسیم‌بندی می‌شوند. باکتری‌های محرک رشد ePGPR در ریزوسفر یا روی ناحیه ریشه یا در فضای بین سلول‌های ریشه قرار دارند در حالیکه باکتری‌های محرک رشد iPGPR بطور کلی درون ساختارهای گره مانند سلول‌های ریشه قرار دارند. باکتری مورد استفاده در این پژوهش، از گونه میکروکوکوس بوده که در دسته ePGPR قرار دارد و در ناحیه ریزوسفر ریشه تمرکز می‌یابد (احمد و کیبرت، 2014). این باکتری در تحقیق قوامی (1392) خالص‌سازی و شناسایی شده و دارای ویژگی حل کنندگی فسفات، توان تولید سیدروفور بالا و محرک رشد گیاه است. قره داغی شیره جینی و همکاران (1395) بیان کردند که تأثیر باکتری‌های حل کننده فسفات بر حلالیت

---

1. Active (Bio accumulation)
2. Passive (Adsorption)
3. extracellular Plant Growth Promoting Rhizobacteria (ePGPR)
4. intracellular Plant Growth Promoting Rhizobacteria (iPGPR)

www.SID.ir

Archive of SID

فسفر می‌تواند در جهت افزایش رهاسازی کادمیم همراه با کانی‌های فسفره یا تشکیل کانی‌های فسفره جدید با کادمیم محلول در خاک، سبب تغییر در شکل‌های شیمیایی این عنصر شود.

فلزاتی که در شکل‌های محلول در آب و تبادلی وجود دارند، قابلیت دسترسی بیشتری نسبت به سایر شکل‌ها دارند لذا مقدار رطوبت خاک می‌تواند بر قابلیت دسترسی این شکل‌ها تأثیر گذار باشد (وانا و اوکیمن، 2011). از آنجا که میزان رطوبت بر شکل‌های شیمیایی فلزات در خاک و همچنین عملکرد ریزجانداران تأثیر گذارند، مطالعه شکل‌های شیمیایی کادمیم در شرایط رطوبتی مختلف ضروری بنظر می‌رسد.

طی تحقیقاتی که به‌وسیله نویسندگان صورت پذیرفت مشاهده شد که کاربرد باکتری مورد مطالعه سبب کاهش انتقال کادمیم به اندام هوایی ذرت گردیده است (کرمی و همکاران، 1394). پس از بررسی ریشه دیده شد که مقدار قابل توجهی از کادمیم اعمال شده در خاک باقیمانده که نهایتاً توجه نویسندگان را به بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری بر کاهش تحرک کادمیم در خاک معطوف نمود و پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری محرک رشد *میکروکوکوس یونانیسیس* و سطوح رطوبتی مختلف بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش در گلخانه تحقیقاتی بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز و بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل دو سطح PGPR [1] (با و بدون باکتری)، چهار سطح کادمیم (شاهد، 10، 20، و40 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، و سه سطح رطوبتی (100، 80، و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه) بود. مقدار کافی خاک به عمق 30 سانتی‌متر از سری کوی اساتید ایستگاه زراعی باجگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع آوری و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک (جی و باودر، 1986)، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی (رودز، 1996)، پ‌هاش (توماس، 1996)، ماده آلی (نلسون و سامرز، 1996) اندازه‌گیری شد. مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک اولیه به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (مدل Analytik Jena Nova AA350) اندازه‌گیری شد. سه کیلوگرم خاک به ازای هر گلدان در کیسه‌های پلاستیکی ریخته شد و با توجه به آزمون خاک و برای جلوگیری از بروز هرگونه کمبود، عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، روی، آهن، مس، و منگنز به صورت محلول تا رسیدن به حد بهینه، به آن‌ها افزوده شد. سپس تیمارهای کادمیم از منبع سولفات کادمیم و در سطوح شاهد، 10، 20 و 40 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به خاک درون کیسه‌ها اعمال شد. پس از گذشت سه روز، خاک کیسه‌ها بخوبی مخلوط و به درون گلدان منتقل شد. بذرهای ذرت (رقم HIDO، تهیه شده از آزمایشگاه بذر و غلات بخش زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز) را روی سطح خاک قرار داده و دو میلی‌لیتر محیط کشت حاوی 1×10^8 CFU mL^{-1} باکتری *میکروکوکوس یونانیسیس* (تهیه شده از آزمایشگاه بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک دانشگاه تهران) به ازای هر بذر مایه‌زنی و سپس بذرها با خاک پوشانده شدند. به منظور اطمینان از عدم حضور ذاتی باکتری، قبل از شروع آزمایش خاک استریل گردید.

تیمار شاهد بدون باکتری با افزودن دو میلی‌لیتر محیط کشت فاقد باکتری اعمال گردید. پس از دو هفته تعداد گیاهان به سه عدد در هر گلدان تقلیل داده شد. سپس سطوح رطوبتی مختلف با وزن کردن روزانه گلدان‌ها و افزودن آب مقطر تا رسیدن به وزن از پیش تعیین شده اعمال شد. پس از طی هشت هفته گیاهان از طوقه جدا شد و خاک هر گلدان از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و جهت تعیین شکل‌های شیمیایی کادمیم به آزمایشگاه منتقل شد. عصاره‌گیری دنباله‌ای با روش سینگ و همکاران (1988) انجام شد. برای تعیین کادمیم کل از عصاره‌گیر روش اسپوزیتو و همکاران (1982) استفاده شد که مراحل آن در جدول 1 آورده شده است. مقدار کادمیم در هر مرحله به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (مدل Analytik Jena Nova AA350) اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل داده‌ها با آزمون دانکن و با کمک نرم افزار آماری SAS انجام شد. از نرم افزار Excel به منظور ترسیم نمودارها استفاده شد.

نتایج و بحث

بافت خاک مورد مطالعه لوم رسی و مقدار قابلیت هدایت الکتریکی، پ‌هاش و ماده آلی آن به ترتیب 0/35 دسی‌زیمنس بر متر، 7/7 و 1/3 درصد بود. مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA به ازای هر کیلوگرم از خاک اولیه ناچیز (0/2 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. این خاک به‌عنوان خاک شاهد مورد کشت گیاه قرار گرفت.

[1] Plant Growth Promoting Rhizobacteria

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 1- مراحل مختلف عصاره‌گیری دنباله‌ای

شکل شیمیایی	نسبت خاک به عصاره‌گیر	محلول عصاره‌گیر	مدت زمان رسیدن به تعادل (ساعت)	دما (درجه سلسیوس)
تبادلی	2/5:10	1 M $Mg(NO_3)_2$	2	20
کربناتی	2/5:10	1 M NaOAc (pH= 5)	5	20
آلی*	2/5:5	0.7 M NaOCl (pH= 8.5)	0/5	100
متصل به اکسیدهای منگنز	2/5:25	0.1 M $NH_2OH.HCl$ (pH= 2)	0/5	100
متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل	2/5:25	0.25 M $NH_2OH.HCl$ + 0.25 M HCl	0/5	50
متصل به اکسیدهای آهن بلورین	2/5:25	0.2 M $(NH_4)_2C_2O_4$ + 0.2 M $H_2C_2O_4$ + 0.1 M $C_6H_8O_6$	0/5	100
باقیمانده	…	(مجموع سایر شکل‌ها) -کل	…	…
کل	2:25	4 M HNO_3	16	80

* دو مرتبه عصاره‌گیری و سانتریفیوژ انجام شود.

نتایج تجزیه واریانس اثر باکتری، سطوح رطوبتی و کادمیم بر شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم در جدول 2 آورده شده است. تمامی اثرات سه تایی باکتری، سطوح رطوبتی و سطوح کادمیم بر غلظت کادمیم در شکل‌های مختلف در سطح 1 درصد آزمون دانکن معنی‌دار بود.

جدول 2- تجزیه واریانس اثر باکتری، سطوح رطوبتی و کادمیم بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		تبادلی	کربناتی	آلی	متصل به اکسیدهای منگنز	متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل	باقیمانده
باکتری	1	0/209**	15/9**	0/674**	1/58**	0/013 ns	43/9**
کادمیم	3	0/208**	1649**	11/4**	31/2**	25/7**	127**
سطح رطوبتی	2	0/0004 ns	1/74**	0/275**	0/019 ns	0/028 ns	1/45*
باکتری × کادمیم	3	0/004**	13/0**	0/378**	0/141*	0/043 ns	19/0**
باکتری × سطح رطوبتی	2	0/010**	2/84**	0/841**	0/408**	0/866**	13/8**
کادمیم × سطح رطوبتی	6	0/017**	3/09**	0/238**	0/060 ns	0/032 ns	5/17**
باکتری × کادمیم × سطح رطوبتی	6	0/015**	6/35**	0/328**	0/245**	0/331**	16/0**
خطا	48	0/0007	0/322	0/044	0/034	0/029	0/362
کل	71	…	…	…	…	…	…

* و ** به ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار بوده و ns معنی‌دار نمی‌باشد.

غلظت کادمیم تبادلی و محلول

در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری، با افزایش سطوح کادمیم کاربردی، غلظت کادمیم تبادلی نیز افزایش یافت (جدول 3). در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری با افزایش کادمیم تا سطح 10 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، اثر معنی‌داری بر غلظت کادمیم تبادلی نسبت به سطح شاهد مشاهده نشد اما در سطوح 20 و 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک سبب افزایش معنی‌دار کادمیم تبادلی گردید (جدول 3). در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری، افزودن باکتری سبب کاهش کادمیم تبادلی در کلیه سطوح کادمیم کاربردی گردیده است (جدول 3). با کاهش سطح رطوبت خاک در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری، تنها در سطح 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه افزایش معنی‌داری (16 درصد) نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (شاهد) مشاهده

www.SID.ir

Archive of SID

شد (جدول 4). در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری، در سطح 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه کاهش معنی‌داری (22 درصد) نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه مشاهده شد و سطح رطوبتی 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه در شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده تفاوت معنی‌داری با سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (شاهد) نداشتند (جدول 4). غلظت کادمیم در بخش تبادلی ناچیز بوده و با تغییر رطوبت روند مشخصی را دنبال نمی‌کند و تغییرات زیادی دارد اما آنچه واضح است این است که مایه‌زنی باکتری در کلیه سطوح رطوبتی سبب کاهش معنی‌دار شکل تبادلی کادمیم در مقایسه با شرایط بدون مایه‌زنی باکتری شده است (جدول 4). مایه‌زنی باکتری سبب کاهش معنی‌دار (40/7 درصد) غلظت کادمیم تبادلی شده بطوری که غلظت کادمیم تبادلی از 0/27 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک به 0/16 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک کاهش یافت (جدول 5). کمترین غلظت کادمیم تبادلی مربوط به تیمارهای مایه‌زنی شده با باکتری و سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و 10 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود که نشان می‌دهد کاربرد باکتری سبب تبدیل شکل محلول و تبادلی به سایر شکل‌ها گردیده است. چلویی (1390) با کاربرد باکتری‌های *باسیلوس مگاتریوم* و *سودوموناس پوتیدا* نشان داد که با افزودن باکتری به خاک، مقدار کادمیم قابل تبادل کاهش اما مقدار سایر شکل‌ها افزایش یافت. قره داغی شیره جینی و همکاران (1395) و همچنین بولان و همکاران (2003) نیز نشان دادند که کاربرد باکتری سبب کاهش کادمیم محلول و تبادلی شد. بولان و همکاران (2003) بیان کردند که باکتری‌های حل کننده فسفات (مانند باکتری استفاده شده در این پژوهش) از طریق فعالیت آنزیم فسفاتاز و تولید اسیدهای آلی سبب افزایش انحلال فسفر و تغییر در شکل‌های شیمیایی کادمیم می‌شوند. آنان بیان کردند که فسفر آزاد شده می‌تواند با عنصر سنگین ایجاد کمپلکس کرده و در نتیجه فعالیت فلز را در خاک محدود کند. از سوی دیگر در خاک‌هایی که ترکیبات فسفره کادمیم وجود دارند، باکتری‌های حل کننده فسفات تأثیر متفاوتی داشته و با حل کردن این ترکیبات سبب آزاد سازی این فلز و افزایش تحرک آن می‌شود.

غلظت کادمیم کربناتی

بیشترین غلظت کادمیم استخراج شده، به بخش کربناتی اختصاص داشت. با توجه به نتایج جدول 3، با افزایش سطح کادمیم غلظت کادمیم کربناتی نیز در همه تیمارها افزایش یافت که البته در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده تنها در سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، مایه‌زنی باکتری سبب کاهش معنادار 13/9 درصدی در مقدار کادمیم کربناتی شده است بطوریکه غلظت کادمیم کربناتی از 25 به 21/5 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک کاهش یافت. قره داغی شیره جینی و همکاران (1395) نیز نشان دادند که کاربرد باکتری پسودوموناس سبب تغییر شکل‌های شیمیایی کادمیم شد و بیشترین غلظت کادمیم استخراج شده در بخش کربناتی قرار داشت.

نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت خاک در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری و در سطح رطوبتی 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه کاهش معنی‌دار (5/2 درصد) در مقدار کادمیم کربناتی نسبت به شرایط کاربرد 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (شاهد) مشاهده شد اما در شرایط مایه‌زنی شده در سطوح 80 و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه به ترتیب افزایش 8/8 و 9/6 درصدی در مقدار کادمیم کربناتی نسبت به شرایط بدون تنش رطوبتی (8/6 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید که البته تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده، مایه‌زنی باکتری در شرایط آبیاری به میزان 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و سطح رطوبتی 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب کاهش معنی‌دار و به ترتیب 15/3 و 10/3 درصدی در غلظت کادمیم کربناتی گردید اما در شرایط تنش رطوبتی 65 درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 3- اثرات دوتایی مایه‌زنی باکتری و سطوح کادمیم بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم

شکل های شیمیایی	سطوح باکتری	سطوح کادمیم کاربردی ($mg.kg^{-1}$)			
		شاهد	10	20	40
تبادلی	B_0*	0/16 d**	0/20 c	0/26 b	0/43 a
	B_1	0/07 e	0/09 e	0/18 cd	0/29 b
کربناتی	B_0	2/09 e	3/97 d	9/22 c	25/0 a
	B_1	2/18 e	3/85 d	8/97 c	21/5 b
آلی	B_0	0/30 e	0/88 c	1/02 c	2/44 a
	B_1	0/35 de	0/53 d	1/07 c	1/91 b
متصل به اکسیدهای منگنز	B_0	0/65 g	1/09 e	2/22 c	3/76 a
	B_1	0/54 g	0/91 f	1/74 d	3/35 b
متصل به اکسید های آهن بی‌شکل	B_0	0/99 d	1/40 c	2/29 b	3/75 a
	B_1	1/15 d	1/34 c	2/35 b	3/71 a
باقیمانده	B_0	0/32 f	1/89 e	4/41 c	4/06 c
	B_1	0/32 f	2/84 d	5/13 b	8/64 a

* B_0 نشان دهنده تیمار بدون مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه و B_1 تیمار مایه‌زنی شده با باکتری می‌باشد.

** میانگین‌های دارای حروف انگلیسی مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد از آزمون دانکن می‌باشند.

جدول 4- اثرات دوتایی مایه‌زنی باکتری و سطوح رطوبتی بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم

شکل های شیمیایی	سطوح باکتری	سطوح رطوبتی		
		FC	0/8 FC	0/65 FC
تبادلی	B_0*	0/25 b**	0/29 a	0/26 b
	B_1	0/18 c	0/14 d	0/16 cd
کربناتی	B_0	10/2 a	10/4 a	9/62 b
	B_1	8/60 c	9/36 b	9/43 b
آلی	B_0	1/47 a	1/05 b	0/95 bc
	B_1	0/85 c	1/12 b	0/94 bc
متصل به اکسیدهای منگنز	B_0	1/95 ab	2/03 a	1/82 b
	B_1	1/58 c	1/51 c	1/81 b
متصل به اکسید های آهن بی‌شکل	B_0	2/21 b	2/20 b	1/93 c
	B_1	1/97 c	2/05 c	2/39 a
باقیمانده	B_0	2/12 d	2/20 d	3/69 bc
	B_1	4/98 a	4/14 b	3/58 c

* B_0 نشان دهنده تیمار بدون مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه و B_1 تیمار مایه‌زنی شده با باکتری می‌باشد و FC نشان دهنده رطوبت ظرفیت مزرعه است.

** میانگین‌های دارای حروف انگلیسی مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد از آزمون دانکن می‌باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 5- میانگین اثر مایه‌زنی باکتری بر شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم

شکل های شیمیایی	سطوح باکتری	میانگین اثر مایه‌زنی باکتری
تبادلی	B_0*	0/27 A**
	B_1	0/16 B
کربناتی	B_0	10/1 A
	B_1	9/13 B
آلی	B_0	1/16 A
	B_1	0/97 B
متصل به اکسیدهای منگنز	B_0	1/93 A
	B_1	1/64 B
متصل به اکسید های آهن بی‌شکل	B_0	2/11 A
	B_1	2/14 A
باقیمانده	B_0	2/67 B
	B_1	4/20 A

* B_0 نشان دهنده تیمار بدون مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه و B_1 تیمار مایه‌زنی شده با باکتری می‌باشد.

** میانگین‌های دارای حروف انگلیسی مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد از آزمون دانکن می‌باشند.

نتایج جدول 5 نشان داد که به طور کلی مایه‌زنی باکتری سبب کاهش معنی‌دار (9/3 درصد) غلظت کادمیم کربناتی شده بطوریکه غلظت کادمیم کربناتی از 10/1 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری به 9/13 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در شرایط مایه‌زنی شده کاهش یافت. در اینجا نیز با توجه به کاهش مقدار شکل کربناتی با مایه‌زنی باکتری می‌توان بیان کرد که کادمیم از شکل با دسترسی بیشتر خارج شده و به شکل‌های با قابلیت استفاده کمتر در آمده است. بیشترین غلظت کادمیم کربناتی مربوط به سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و شرایط بدون مایه‌زنی باکتری (26/6 میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین غلظت کادمیم کربناتی مربوط به سطح شاهد کادمیم و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و شرایط مایه‌زنی شده با باکتری (1/76 میلی‌گرم در کیلوگرم) بود.

از آنجا که کنترل کننده اصلی حلالیت کادمیم در خاک‌های آهکی کربنات کلسیم می‌باشد (رجایی و همکاران، 2006)، تنها بخش بسیار جزئی از کادمیم خاک به شکل قابل استفاده بوده و بیشتر آن در شکل باقیمانده و کربناتی قرار دارد (رنلا و همکاران، 2004). احمد زاده سروستانی و چرم (1395) با بررسی اثر کاربرد لجن فاضلاب و باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در طول زمان، بیان کردند قسمت اعظم کادمیم در تیمارهای مایه زنی شده با باکتری در فاز باقیمانده و کربناتی بوده و دلیل این توزیع را پ‌هاش زیاد خاک و زیاد بودن فاز کربناتی و تمایل کادمیم به پیوستن به این فاز دانسته‌اند اما در پژوهش حاضر احتمالاً به دلیل انحلال فسفر توسط باکتری و ایجاد ترکیبات فسفاته با کادمیم، ترکیب آن با کربنات کاهش یافته و شکل کربناتی کادمیم کاهش یافته است (شنگ و زیا، 2006؛ بولان و همکاران، 2014).

غلظت کادمیم آلی

نتایج جدول 3 نشان می‌دهد که در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری بطور کلی با افزایش سطوح کادمیم، غلظت کادمیم آلی نیز نسبت به سطح شاهد افزایش می‌یابد اما در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری، این افزایش تا سطح 10 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک نسبت به شاهد معنی‌دار نبود و در سطوح 20 و 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم آلی نسبت به سطح شاهد کادمیم مشاهده شد. در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری، مایه‌زنی در سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی‌دار و 21/7 درصدی کادمیم آلی شد.

در شرایط بدون مایه‌زنی کاهش سطح رطوبت خاک سبب کاهش معنی‌دار غلظت کادمیم آلی در سطوح

www.SID.ir

Archive of SID

80 و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (1/47 میلی‌گرم در کیلوگرم) شد و در شرایط مایه‌زنی شده و سطح رطوبتی 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب افزایش کادمیم آلی نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (0/85 میلی‌گرم در کیلوگرم) گردید (جدول 4). در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری، مایه‌زنی تنها در شرایط بدون تنش رطوبتی سبب کاهش 42/2 درصدی در غلظت کادمیم آلی شد بطوری که غلظت کادمیم آلی از 1/47 در شرایط بدون مایه‌زنی و بدون تنش رطوبتی به 0/85 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری و بدون تنش رطوبتی کاهش یافت (جدول 4).

بطور کلی کاربرد باکتری سبب کاهش معنی‌دار (16/4 درصد) غلظت کادمیم آلی شد بطوری که غلظت کادمیم آلی از 1/16 به 0/97 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک کاهش یافت (جدول 5). بیشترین غلظت کادمیم آلی مربوط به سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و شرایط آبیاری به میزان 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و بدون مایه‌زنی باکتری (2/89 میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین غلظت کادمیم آلی مربوط به سطح شاهد کادمیم و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و شرایط بدون مایه‌زنی باکتری (0/25 میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. فیلگویراس و همکاران (2002) گزارش کردند که عنصر پیوند یافته با مواد آلی قابلیت استفاده زیادی برای گیاه ندارد زیرا اجزای مواد آلی با وزن مولکولی زیاد مقدار کمی از عنصر را با سرعت کم آزاد می‌کنند. احمدزاده سروستانی و چرم (1395) نشان دادند که در خاک مایه‌زنی شده با باکتری *تیوباسیلوس تیواکسیدانس* درصد کادمیم در بخش کربناتی و آلی کاهش و در سایر بخش‌ها افزایش یافت. آنان همچنین بیان کردند که تجزیه و تشکیل کمپلکس‌های مواد آلی با فلز بوسیله‌ی باکتری می‌تواند در ترکیب و یا رهاسازی فلز در خاک و در نتیجه بر مقدار نسبی سایر شکل‌ها اثر بگذارد. هوانگ و همکاران (2004) بیان کردند که این اثرات می‌تواند ناشی از تغییرات پ‌هاش در اثر ترشح متابولیت‌های تولید شده به‌وسیله باکتری باشد. زاهدی فر (2017) و جلالی و لطیفی (2018) نشان دادند حضور سایر لیگاندهای آلی سبب می‌شود تا فلز سنگین بجای جذب سطحی شدن روی اجزای آلی خاک، با این لیگاندها ایجاد کمپلکس کرده و قابلیت دسترسی آن افزایش یابد. با توجه به اثر باکتری مورد استفاده در این پژوهش بر قابلیت دسترسی کادمیم، می‌توان نتیجه گرفت که باکتری از جذب سطحی کادمیم بر روی سطوح مواد آلی جلوگیری کرده و سبب انتقال کادمیم به بخش‌های محلول‌تر و با قابلیت دسترسی بیشتر شده است.

غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز

داده‌های جدول 3 نشان می‌دهد که با افزایش سطوح کادمیم کاربردی در تمامی تیمارها غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز نیز نسبت به سطح شاهد کادمیم افزایش معنی‌داری یافت. در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری مشاهده می‌شود که مایه‌زنی باکتری در سطوح 10، 20، و 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی‌دار میانگین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی شد اما در سطح شاهد کادمیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

در شرایط مایه‌زنی شده با کاهش رطوبت تا سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه تفاوت معنی‌داری نسبت به شرایط بدون تنش رطوبتی مشاهده نشد اما در سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب افزایش (14/5 درصد) معنی‌دار غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز نسبت به شاهد (بدون تنش رطوبتی) شد (جدول 4). در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری مشاهده می‌شود که مایه‌زنی باکتری در سطوح 100 و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب کاهش به ترتیب 19 و 25/6 درصدی در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی باکتری شد.

نتایج جدول 5 نشان می‌دهد که بطور کلی مایه‌زنی باکتری سبب کاهش 15 درصدی در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز شد بطوریکه غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز از 1/93 به 1/64 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک کاهش یافت. بیشترین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز مربوط به سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و سطح رطوبتی 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و بدون مایه‌زنی باکتری (4/19 میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز مربوط به سطح شاهد کادمیم و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و شرایط مایه‌زنی شده با باکتری (0/41 میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. هی و همکاران (2005) بیان کردند که اجزای پیوند یافته با کربنات‌ها و اکسیدها نیز می‌توانند برای گیاهان قابل استفاده باشند. هوانگ و همکاران (2004) نیز نشان دادند که کاربرد باکتری ریزوبیوم فردی سبب کاهش مقدار کادمیم در بخش متصل به اکسیدهای منگنز شده است. آنان بیان کردند که این اثر به دلیل

www.SID.ir

Archive of SID

تغییرات پ‌هاش در اثر ترشح متابولیت‌های ترشح شده به‌وسیله باکتری بوده است.

غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل

با افزایش سطوح کادمیم در همه تیمارها، افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل نسبت به سطح شاهد مشاهده شد اما بطورکلی مایه‌زنی باکتری اثر معنی‌داری بر غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل نداشته است (جداول 2 و 4).

نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که در شرایط بدون مایه‌زنی تا سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه تفاوت معنی‌داری در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل مشاهده نشد اما در سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه کاهش معنی‌داری (12/7 درصد) نسبت به سطح بدون تنش رطوبتی (2/21 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد. در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری نیز تا سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه تفاوت معنی‌داری در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل مشاهده نشد اما در سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه افزایش معنی‌دار 21/3 درصدی در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (1/97 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد که می‌تواند به دلیل کاهش تحرک کادمیم و تمایل آن به رسوب کردن به دلیل عدم حضور آب کافی در خاک باشد.

در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری، با مایه‌زنی باکتری در سطوح 100 و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه کاهش معنی‌دار و به ترتیب به میزان 10/8 و 6/8 درصد در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی باکتری مشاهده شد اما در سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، مایه‌زنی باکتری سبب افزایش 23/8 درصدی در غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل شد بطوریکه میانگین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل از 1/93 به 2/39 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول 4). کاهش مقدار کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل در حضور باکتری (نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی باکتری) می‌تواند به دلیل جذب سطحی کادمیم به‌وسیله باکتری باشد و افزایش مقدار کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل در رطوبت 65 درصد ظرفیت مزرعه و در حضور باکتری (نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی باکتری) می‌تواند به دلیل کاهش کارایی باکتری و کاهش تأثیر آن در این تنش باشد. بیشترین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل مربوط به سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و شرایط تنش رطوبتی 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و مایه‌زنی شده با باکتری (4/38 میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل مربوط به سطح شاهد کادمیم و 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه و شرایط بدون مایه‌زنی باکتری (0/88 میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. احمد زاده سروستانی و چرم (1395) بیان کردند که عناصر فلزی همچون کادمیم پس از افزوده شدن به خاک بیشترین حلالیت را دارند اما با گذشت زمان و ایجاد تعادل بین خاک و فلزات و در اثر واکنش‌هایی همچون جذب سطحی، رسوب، واکنش با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز به شکل‌های کمتر محلول تبدیل می‌شوند. نتایج نشان داد که کاهش رطوبت در خاک و مایه‌زنی باکتری می‌توانند سبب کاهش فراهمی کادمیم و افزایش مقدار رسوب این فلز گردد. وانا و اوکیمن (2011) نیز بیان کردند از آنجا که کادمیم حلالیت زیادی در آب دارد، کاهش میزان رطوبت خاک تأثیر بسزایی در کاهش تحرک این فلز خواهد داشت. آنان همچنین بیان کردند که رطوبت خاک بر فعالیت ریزجانداران نیز اثر گذار است، لذا کاربرد ریزجانداران در شرایط رطوبتی نامطلوب اثر چندانی بر تحرک فلز نخواهد داشت.

غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن بلورین

اعداد قرائت شده به‌وسیله دستگاه جذب اتمی در بخش متصل به اکسیدهای آهن بلورین هر دو تیمارهای مایه‌زنی شده و بدون مایه‌زنی باکتری کمتر از حد خطای دستگاه (0/03 میلی‌گرم در لیتر) بود که به نظر می‌رسد به این دلیل باشد که اکسیدهای آهن بلورین در خاک‌های مورد آزمایش کم است.

غلظت کادمیم باقیمانده

داده‌های جدول 3 نشان می‌دهد که در همه تیمارها با افزایش سطوح کادمیم، افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم باقیمانده نسبت به سطح شاهد مشاهده شد. در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده با باکتری، مایه‌زنی تنها در سطوح 10، 20، و 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک سبب افزایش معنی‌دار کادمیم باقیمانده شد. فلزاتی که در شکل باقیمانده هستند، بصورت باندهای مستحکمی وجود دارند که در شرایط طبیعی آزاد نمی‌شوند (احمد زاده سروستانی و چرم، 1395).

در شرایط بدون مایه‌زنی کاهش رطوبت خاک تا سطح 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم باقیمانده نداشت اما در سطح

www.SID.ir

Archive of SID

65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب افزایش معنی‌دار 74 درصدی غلظت کادمیم باقیمانده نسبت به سطح 100 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (2/12 میلی‌گرم در کیلوگرم) شد (جدول 4). در شرایط مایه‌زنی شده با باکتری با کاهش رطوبت خاک، کاهش معنی‌داری در غلظت کادمیم باقیمانده نسبت به سطح بدون تنش رطوبتی (4/98 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد (جدول 4). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش سطح رطوبتی خاک، به تنهایی سبب کاهش تحرک کادمیم می‌شود (به سبب حلالیت کادمیم در آب) اما از سوی دیگر تأثیر منفی بر فعالیت ریزجانداران دارد. نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که بطورکلی در مقایسه شرایط بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی شده، مایه‌زنی باکتری در سطوح رطوبتی 100 و 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه سبب افزایش به ترتیب 135 و 88/2 درصدی در غلظت کادمیم باقیمانده شد اما در تنش رطوبتی 65 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه اثر معنی‌داری نداشت.

مایه‌زنی باکتری سبب افزایش 57/3 درصدی در غلظت کادمیم باقیمانده شد بطوریکه غلظت کادمیم باقیمانده از 2/67 به 4/2 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول 5) و در واقع کاربرد باکتری سبب کاهش قابلیت استفاده کادمیم و کاهش آلودگی شد. بیشترین غلظت کادمیم باقیمانده مربوط به سطح 40 میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و شرایط بدون تنش رطوبتی و مایه‌زنی شده با باکتری (12/7 میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. چلویی (1390) نیز نشان داد که مایه‌زنی باکتری‌های *باسیلوس مگاتریوم* و *سودوموناس پوتیدا* سبب افزایش مقدار کادمیم باقیمانده در خاک شد. احمد زاده سروستانی و چرم (1395) با بررسی اثر کاربرد لجن فاضلاب و باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در طول زمان، نشان دادند که کادمیم بیشتر در شکل باقیمانده و سپس کربناتی بوده و مقدار کادمیم مرتبط با بخش کربناتی و باقیمانده در حضور و عدم حضور باکتری بیشتر از سایر بخش‌ها بوده است. اولانیران و همکاران (2013) بیان کردند که در شرایط خاک‌های اسیدی به علت حضور یون پروتون (H^+)، مکان‌های خالی برای جذب فلز سنگین به‌وسیله این یون اشغال گردیده و فلزات در این حالت تمایل کمتری به رسوب و اتصال با اجزای خاک دارند و ترکیبات فسفاته بصورت پروتونه شده وجود دارند اما در خاک‌های آهکی تمایل فلزات نسبت به رسوب و اتصال به اجزای خاک بیشتر است.

نتیجه‌گیری کلی

کاهش رطوبت خاک، سبب کاهش شکل‌های محلول و تبادلی کادمیم در خاک شد اما از طرفی بر فعالیت باکتری نیز اثر منفی برجای گذاشت. بیشترین میزان کاهش در تحرک فلز به‌وسیله ریزجاندار، در شرایط بدون تنش رطوبتی صورت گرفت. نظر به آهکی بودن خاک منطقه، بیشتر کادمیم در شکل کربناتی قرار داشت. مایه‌زنی باکتری سبب کاهش درصد کادمیم تبادلی و سایر شکل‌ها و تبدیل آنها به شکل باقیمانده شد. نتایج پژوهش نشان داد که باکتری *میکروکوکوس یونانیسیس* می‌تواند سبب رسوب و کاهش فراهمی این فلز در خاک شود. این عملکرد باکتری را می‌توان به فرایندهای تجمع زیستی، جذب سطحی کادمیم به‌وسیله باکتری و یا تشکیل ترکیبات فسفاته جدید با کادمیم (به دلیل ویژگی حل‌کنندگی فسفات در باکتری) نسبت داد. در نتیجه استفاده از این باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاه می‌تواند نقش موثری در کاهش فراهمی و ورود این فلز به زنجیره غذایی داشته باشد.

فهرست منابع:

1. احمدزاده سروستانی، س. و چرم، م.، 1395. اثر لجن فاضلاب، باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس و زمان بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک آهکی. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد 30، شماره 4، صفحه‌های 475 تا 486.
2. تن زاده، ج.، شارقی فر، م. و پناهنده، م.، 1395. استفاده از میکروارگانیسم‌ها در پاکسازی زیستی فلزات سنگین موجود در خاک. مجله پژوهش و فناوری محیط زیست، دوره اول، شماره اول، صفحه‌های 1 تا 6.

www.SID.ir

Archive of SID

3. چلویی، م.، 1390. اثرات لجن فاضلاب و ازدیاد فعالیت میکروبی بر غلظت و توزیع گونه‌های شیمیایی عناصر روی و کادمیم در خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
4. قره داغی شیره جینی، ع.، خانمیرزایی فرد، ع. و رضایی، ش. 1395. اثر باکتری حل کننده ی فسفات پسودوموناس بر تحرک مجدد کادمیم در دو خاک با بافت متفاوت. کنگره بین المللی جامع محیط زیست ایران.
5. قوامی، ن.، 1392. بررسی نقش برخی از انواع سیدروفورهای باکتریایی در تغذیه آهن گیاهان کلزا و ذرت (گیاهان استراتژی I و II). پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران.
6. کرمی، ش.، یثربی، ج. و زارعی، م. 1394. اثر باکتری محرک رشد گیاه بر گیاه پالایی یک خاک آهکی غنی شده با کادمیم به وسیله ذرت تحت تنش خشکی. چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران، 16-18 شهریور. دانشگاه ولیعصر رفسنجان. صفحه‌های 293 تا 297.
7. محمدزاده کرکرق، ر.، چرم، م.، معتمدی، ح. و محبت، ع.، 1393. جذب زیستی و تجمع زیستی کادمیم و نیکل در محلول رقابتی توسط سه جدایه باکتری از خاک آلوده به لجن فاضلاب. مجله دنیای میکروب‌ها، سال هفتم، شماره سوم، صفحه‌های 241 تا 251.
8. Ahemad, M. and Kibret, M. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. Journal of King Saud University - Science 26: 1-20.
9. Aulakh, M.S., Khurana, M.P.S. and Dhanwinder, S. 2009. Water pollution related to agricultural, industrial, and urban activities, and its effects on the food Chain: Case studies from Punjab. Journal of New Seeds 10:112–137.
10. Bolan, N.D., Adriano, D.C. and Naidu, R. 2003. Role of phosphorus in (im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 177: 1-44.
11. Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Kumpiene, J., Park, J., Makino, T., Kirkham, M.B. and Scheckel, K. 2014. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – to mobilize or to immobilize? Journal of Hazardous Materials 266: 141–166.
12. Filgueiras, A.V., Lavilla, I. and Bendicho, C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. Journal of Environmental Monitoring 4: 823-857.
13. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, hydrometer method. p. 383- 411. In: Sparks, D.L. et al. (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 1, 3rd ed. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
14. Gleyzes, C., Tellier, S. and Astrue, M. 2002. Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: A review of sequential extraction procedures. Trends in Analytical Chemistry 21:451-467.
15. Godd, G.M. 2004. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation. Geoderma 122: 109-119.
16. Gupta, G., Parihar, S.S., Ahirwar, N.K., Snehi, S.K. and Singh, V. 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. Journal of Microbial and Biochemical Technology 7(2): 96-102.
17. He, Z.L., Yang, X.E. and Stoffella, P.J. 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 19: 125-140.
18. Huang, Q., Chen, W. and Guo, X. 2004. Chemical fractionation of copper, zinc, and cadmium in two chinese soils as influenced by rhizobia. Communications in Soil Science and Plant Analysis 35: 947-960.

www.SID.ir

Archive of SID

19. Huang, Y., Tao, Sh. and Chen, Y.J. 2005. The role of arbuscular mycorrhiza on change of heavy metal speciation in rhizosphere of maize in wastewater irrigated agriculture soil, Journal of Environmental Sciences 17(2):276-280.
20. Jalali, M. and Latifi, Z. 2018. Measuring and simulating effect of organic residues on the transport of cadmium, nickel, and zinc in a calcareous soil, Journal of Geochemical Exploration 184: 372-380.
21. Khurana, M.P.S. and Kansal, B.D. 2014. Effect of farm yard manure on chemical fractionation of cadmium and its bio-availability to maize crop grown on sewage irrigated coarse textured soil. Journal of Environmental Biology 35: 431-437.
22. Mishra, B., Haack, E.A., Maurice, P.A. and Bunker, B.A. 2010. A spectroscopic study of the effects of a microbial siderophore on Pb adsorption to kaolinite. Chemical Geology 275: 199-207.
23. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. P. 961–1010. In: Sparks, D.L. et al. (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 3, 3rd ed. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
24. Olaniran, A.O., Balgobind, A. and Pillay, B. 2013. Bioavailability of heavy metals in soil: impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. International Journal of Molecular Sciences 14: 10197- 10228.
25. Rajaie, M., Karimian, N., Maftoun, M., Yasrebi, J. and Assad, M.T. 2006. Chemical forms of cadmium in two calcareous soil textural classes as affected by application of cadmium enriched compost and incubation time. Geoderma 136:533–541.
26. Renella, G., Adamo, P., Bianco, M.R., Landi, L., Violante, P. and Nannipieri, P. 2004. Availability and speciation of cadmium added to a calcareous soil under various managements. European Journal of Soil Science 55: 123–133.
27. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P. 417-436. In: Sparks, D.L. et al. (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 3, 3rd ed. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
28. Sheng, X.F. and Xia, J.J. 2006. Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria. Chemosphere 64: 1036–1042.
29. Sing, J.P., Karwasra, P.S. and Sing, M. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils of India. Soil Science 146:359-366.
30. Sposito, G., LeVesque, C.S., LeClaire, J.P. and Chang, A.C. 1982. Trace elements chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: III. Effect of the time on the extraction of trace metals. Soil Science Society of America Journal 47: 898-902.
31. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475- 490. In: Sparks, D.L. et al. (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 3, 3rd ed. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
32. Van der Heijden, M.G.A. 2010. Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems. Ecology 91: 1163-1171.
33. Viveros O.M., Jorquera, M.A., Crowley, D.E., Gajardo, G. and Mora, M.L. 2010. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 10: 293-319.
34. Wuana, R.A. and Okieimen, F.E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Network (ISRN) Ecology 2011: 1-20.
35. Zahedifar, M. 2017. Sequential extraction of zinc in the soils of different land use types as influenced by wheat straw derived biochar. Journal of Geochemical Exploration 182: 22-31.

www.SID.ir

Archive of SID

Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Different Moisture Levels on Chemical forms of Cadmium in the Soil After Corn Harvesting

S. Karami[1] and J. Yasrebi

Ph.D. student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: sh.k624@gmail.com.

Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: j_yasrebi@yahoo.com.

Received: November, 2017 & Accepted: October, 2018

Abstract

Cadmium (Cd) is known as one of the most dangerous elements for living organisms, and because of its easy availability for plant, is a major threat for the human food chain. In order to evaluate the effect of adding bio-fertilizers and inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) such as *Micrococcus yunnanensis* on chemical forms of soil cadmium, a greenhouse experiment was conducted with a factorial arranged in a completely randomized design with three replications. Treatments consisted of two levels of bacteria (with and without inoculation), four levels of Cd (control, 10, 20, and 40 mg kg^{-1}), and three moisture levels (100, 80, and 65% of field capacity). After corn harvesting, amount of chemical forms of Cd were evaluated. Results indicate that increasing Cd levels significantly increased amount of all chemical forms of Cd. Application of bacteria decreased exchangeable (Ex), carbonate-bound (Car), organic-bound (Om), amorphous iron oxides-bound (AFe-ox) and manganese oxides-bound (Mn-ox) fractions but increased residual (Res) fraction. Reduction of soil moisture decreased Om and AFe-ox bound fractions in not inoculated treatments, but increased AFe-ox and Mn-ox fractions in inoculated soils. Highest contents of Cd were associated with Car-bound fraction, with the order being: Res > Mn ox-bound > AFe-ox- bound > Om -bound > Ex fractions.

Keywords: Cadmium, Contamination, Sequential extraction.

[1]. Corresponding author: Shiraz, Bajgah, Shiraz University Faculty of Agricultural, Soil Science Department

www.SID.ir