نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۱۷۳-۱۶۱

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 1, Mar-Apr 2011, p. 161-173

نقش کمپوست در تعدیل اثرات کادمیم بر تنفس و بیوماس میکروبی، و فعالیت فسفاتازهای خاک

لیلا دیانی[۱] – فایز رئیسی[۲*]

تاریخ دریافت:۸۹/۲/۱۸
تاریخ پذیرش:۸۹/۸/۲

چکیده

کادمیم یکی از فلزات سنگین است که به خاطر اثرات سمی بالقوه آن بر فعالیت و ترکیب موجودات زنده خاک در چند دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. گر چه اثرات بازدارندگی این فلز بر فعالیت میکروبی کاملا محرز و مشخص است، اما شدت این اثرات به شرایط و وضعیت خاک، به ویژه میزان ماده آلی، بستگی دارد. از این رو، هدف مطالعه حاضر بررسی اثر کادمیم بر فعالیت های میکروبی خاک و نقش ماده آلی بر کاهش اثرات آن بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل ۵ × ۲ شامل دو فاکتور کادمیم در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) و کمپوست در دوسطح (صفر و ۲/۵ تن در هکتار کمپوست در عمق ۳۰ سانتی متر) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در شرایط آزمایشگاهی اجرا گردید. عکس العمل شاخص های میکروبیولوژیک خاک شامل تنفس و کربن بیوماس میکروبی، فعالیت آنزیم های فسفاتاز اسیدی و قلیائی به تیمار های کادمیم و ماده آلی طی ۱۰ هفته انکوباسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش کادمیم بر تمامی شاخص های میکروبیولوژیکی اثر منفی و معنی دار داشت. مقدار کربن تجمعی معدنی شده طی ۷۲ روز با افزایش سطح کادمیم کاهش یافت در حالی که افزودن کمپوست باعث کاهش اثرات کادمیم شد. تقریبا برای تمامی شاخص های مورد بررسی، افزودن مواد آلی به خاک سبب شد تا از اثرات منفی و بازدارندگی کادمیم بر جمعیت میکروبی کاسته شود. نتایج نشان دادند که کل مقدار کادمیم اضافه شده در ابتدای آزمایش در پایان قابل استخراج نبود هر چند ضریب همبستگی بین این دو بسیار بالا بود (r=۰/۹۶). اندازه‌گیری کادمیم قابل جذب خاک به وسیله DTPA مبین این حقیقت بود که جزء قابل جذب کادمیم همبستگی منفی و قوی‌تری با اغلب شاخص های میکروبیولوژیکی اندازه گیری شده داشت (۰/۴۱<r<۰/۸۴). به طور خلاصه، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کادمیم با غلظت حتی ۵۰ میلی گرم نقش سمی و بازدارنده بر رشد و فعالیت های میکروبی خاک دارد و افزودن مواد آلی می تواند کادمیم را برای ریزجانداران خاک به صورت غیر قابل جذب درآورد و از اثرات بازدارندگی آن تا حدی بکاهد.

واژه های کلیدی: کادمیم، فعالیت های میکروبی، پویائی کربن خاک، کمپوست، آنزیم های خاک

مقدمه

معدنی شدن کربن آلی خاک به CO_2 یا تنفس میکروبی به عنوان یک شاخص مهم از فعالیت کل میکروفلور خاک محسوب می گردد (۴). تنفس میکروبی نه تنها مشخص کننده وضعیت و فعالیت میکروب های خاک می باشد، بلکه مشخص کننده روند، تعادل و چگونگی تجزیه ماده آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی عناصر غذایی خاک نیز خواهد بود (۲۶). تنفس و بیوماس میکروبی، و فعالیت آنزیمی خاک غالب ترین پارامترهای مورد مطالعه هنگام بررسی اثرات سمی عناصر سنگین بر رشد و فعالیت های میکروبی هستند (۷). با این حال تنفس خاک رفتار متابولیکی ریزجاندارانی را نشان می‌دهد که به یک اندازه و به طور مساوی به آلاینده ها حساس نبوده و آزمایش‌هائی که تنها بر این پارامتر استوار باشند، همواره معتبر نیستند (۳۷). زیرا همیشه رابطه و روند واضح و مشخص بین اثر آلاینده ها و تنفس میکروبی در خاک های کشاورزی وجود ندارد (۱۵) در حالی که اثر منفی آن همواره در خاک های جنگلی گزارش شده است (۷).

کادمیم یکی از عناصر سنگین و سمی برای انواع موجودات زنده، بویژه میکروب های خاک، است (۲۲). این عنصر به روش های گوناگون شامل لجن و پساب های صنعتی و خانگی، کود های

۱و۲– دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(*– نویسنده مسئول: Email:f_raiesi@yahoo.com)

شیمیایی مانند فسفردار، صنایع ذوب فلزات، وارد خاک می گردد (۲۳). مقدار کادمیم در پوسته کره زمین و خاک معمولاً به ترتیب ۰/۱ و ۱ میلی گرم در کیلوگرم است (۳ و ۳۶). غلظت های بالای کادمیم اغلب باعث کاهش رشد و فعالیت میکروبی و کاهش سرعت واکنش های بیوشیمیایی خاک می گردد (۷). نتایج مطالعات قبلی نشان می دهند که عکس العمل رشد و فعالیت های میکروبی به کادمیم به عوامل متعدد از جمله pH، بافت، نوع کانی های رسی، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان و درجه تجزیه مواد آلی، سایر عوامل محیطی بستگی دارد (۱۶ و ۳۳). علاوه بر آن، نوع نمک کادمیمی نیز بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال، اضافه کردن کادمیم به صورت اشکال نامحلول آن (مانند کربنات و اکسید) اثر سمی کمتری بر تجزیه سلولز نسبت به اشکال محلول آن (کلرید و سولفات) داشت (۱۹ و ۳۶). عناصر سمی با ایجاد کمپلکس با سوبسترای مورد نیاز آنزیم ها و خارج نمودن سوبسترا از دسترس ریزجانداران و یا با کشتن و از بین بردن ریزجانداران تجزیه کننده مواد آلی باعث کاهش تنفس خاک و فعالیت های میکروبی می‌گردند (۲۴). فعالیت آنزیمی در خاک نیز به عنوان یک شاخص حساس به حضور عناصر سنگین در خاک به شمار می‌رود (۱۵). عناصر سمی با تغییر شکل و اختلال در ایجاد کمپلکس آنزیم- سوبسترا، تغییر شکل پروتئین آنزیمی و با تأثیر بر ساخت آنزیم در درون موجود زنده باعث کاهش فعالیت آنزیم های خاک می شوند (۲۸). اما الکساندر (۲) کاهش در فعالیت آنزیم های خاک آلوده به کادمیم را به تغییر در ترکیب میکروبی خاک نسبت می دهد. وی همچنین بیان کرد که شایدکاهش فعالیت آنزیم های درگیر در چرخه های N، P و S به علت کاهش در جمعیت اکتینوباکترها باشد. آندرسون و دامچ (۵ و ۶) ضریب متابولیکی (qCO_2) را به عنوان یک پارامتر اکوفیزیولوژیکی برای مطالعه تأثیر استرس ناشی از آلودگی های گوناگون بر نیاز انرژی ریزجانداران خاک ارائه کردند. ضریب متابولیکی عبارت است از میزان تنفس خاک (یا کربن تجزیه شده برای تولید انرژی) به ازای هر واحد بیوماس میکروبی (کربن مصرف شده برای رشد و تشکیل سلول های جدید) در واحد زمان (۵). این شاخص در خاکهای آلوده در مقایسه با خاکهای غیر آلوده بیشتر است که نشان می دهد در خاکهای آلوده به عناصر سمی فعالیت متابولیکی و راندمان مصرف کربن توسط ریزجانداران تغییر می کند (۷). بدین صورت که ریزجانداران در شرایط استرس به ازای هر واحد سوبسترای آلی اضافه شده، کربن کمتری را صرف تشکیل بیوماس جدید (Growth) می کنند (۹) و اغلب برای تأمین انرژی لازم برای ادامه حیات (Maintenance) به کمک تنفس مصرف می کنند. از این رو، چنین می توان گفت که در خاکهای آلوده کارآیی متابولیکی در تبدیل سوبسترای آلی به بیوماس کاهش می یابد و قسمت اعظم کربن برای تولید انرژی مصرف می گردد. اضافه کردن عناصر سمی به خاک سبب از بین رفتن بخش زیادی از میکروبهای خاک می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تنفس ناشی از تجزیه سلولهای میکروبی کشته شده توسط ریزجانداران باقیمانده می شود (۲۴). گاهی بیوماس میکروبی نیز به عنوان یک شاخص حساس به غلظت زیاد آلاینده ها به شمار می رود (۱۳). بیوماس میکروبی که اغلب به روش تدخین- عصاره گیری و یا تدخین-انکوباسیون در آزمایشگاه اندازه گیری می شود، حتی در غلظت های زیاد کادمیم $mg\ kg^{-1}$ ۱۰۰۰-۵۰۰ هم تحت تأثیر قرار نگرفت (۱۳). با این وجود، عکس العمل این شاخص به افزایش عناصر سمی روند مشخصی را نشان نمی دهد.

مانند سایر فلزات دیگر، کادمیم در خاک تحت تأثیر تجزیه شیمیایی یا میکروبی قرار نمی گیرد و سالهای طولانی پس از ورود به خاک در آن باقی می ماند اما با گذشت زمان از قابلیت دسترسی بیولوژیکی فلزات و در نتیجه سمیت آنها بر بیوتای خاک کاسته می شود (۳۴). تحرک و انتقال فلزات سنگین در خاک را می توان با اضافه کردن مواد اصلاحی معدنی و آلی از جمله آهک، فسفات و کمپوست قلیایی مواد زائد به خاک کاهش داد (۱۲،۱ و ۱۸).

اضافه کردن مواد آلی به خاک جهت رفع سمیت کادمیم یکی از روشهای اصولی و مطمئن است زیرا مواد آلی، کربن محلول در خاک (DOC) را افزایش می دهند (۱۸ و ۳۳). این امر به این علت است که خود مواد آلی به عنوان منبع DOC عمل می کنند. کربن آلی محلول با فلزات کمپلکس فلز-DOC را تشکیل می دهد که از قابلیت جذب آن توسط ریز جانداران و حتی گیاهان می‌کاهد (۱۷). عموماً یکی از علل افزایش فعالیت آنزیم ها در خاک آلوده به عناصر سنگین بر اثر افزودن مواد آلی، افزایش کربن آلی کل و کربن آلی محلول است که سبب افزایش فعالیت متابولیکی میکروب ها می‌شوند (۲۸ و ۳۳). با این وجود، گاهی افزودن مواد آلی جامد مانند کمپوست شهری، لجن فاضلاب و پساب سبب افزایش غلظت برخی عناصر سنگین در خاک می گردد که به طور بالقوه بر فعالیت آنزیم های خاک در دراز مدت اثر منفی دارند (۲۰) که در این حالت افزودن این گونه مواد آلی عملکرد منفی به همراه خواهد داشت. به هر ترتیب، تاکنون در مورد اثر مواد آلی برای کاهش یا افزایش زیست فراهمی کادمیم بین محققان اتفاق نظر حاصل نشده است. عده ای از محققان بر این اعتقادند که افزایش مواد آلی باعث افزایش CEC و تشکیل کمپلکس با کادمیم و در نتیجه کاهش فراهمی آن می‌شود (۱۸،۱۶ و ۳۳) و اغلب موثرتر از دیگر مواد اصلاحی خاک مانند آهک و دیگر مواد قلیا زا هستند. از این رو، هدف این تحقیق بررسی اثرات سوء کادمیم بر شاخص های میکروبیولوژیک خاک و استفاده از مواد آلی (مانندکمپوست) به منظور کاهش اثرات این عنصر سمی بر رشد و فعالیت میکروبی خاک و رفع سمیت کادمیم بود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیائی خاک و کمپوست مورد استفاده در آزمایش

خصوصیت	خاک	ماده آلی
شن (٪)	۱۰	–
سیلت (٪)	۳۷	–
رس (٪)	۵۳	–
بافت	رسی	–
آهک (٪)	۵	–
واکنش خاک	۶/۹۵	۹/۱
شوری (دسی زیمنس / متر)	۰/۳۱	۷/۵
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بار مثبت / کیلوگرم)	۴۲/۲	۷۰/۲
نیتروژن کل (درصد)	۰/۱۰	۱/۵۴
فسفر قابل جذب یا کل (میلی گرم /کیلوگرم)	۱۲۰/۸	۱۴۳۰
پتاسیم قابل جذب یا کل (میلی گرم /کیلوگرم)	۳۵۰	۱۱۵۱
کربن آلی (درصد)	۰/۵۰	۹/۲
کربن / نیتروژن	۵	۵/۹۵
کادمیم کل (میلی گرم / کیلوگرم)	۱/۵	–
کادمیم قابل جذب (میلی گرم / کیلوگرم)	۰/۱۲	–

مواد و روش ها

یک خاک مرتعی واقع در منطقه دوآب صمصامی بخش چلگرد (استان چهارمحال و بختیاری) با کربنات کلسیم معادل (آهک) حدود ۵ درصد جهت نمونه برداری انتخاب گردید. دلیل اصلی انتخاب این نوع خاک حصول اطمینان از عدم وجود کادمیم و سایر عناصر سمی ناشی از مصرف ترکیبات آلاینده (پساب و لجن فاضلاب، کمپوست شهری و غیره) وکودهای شیمیائی فسفردار بود. در منطقه مورد مطالعه میانگین درجه حرارت سالانه ۹/۱° C و متوسط بارندگی سالانه ۱۴۳۴ میلی متر گزارش شده است. خاک مورد مطالعه Pachic Haploxerolls طبقه بندی شده است.

آزمایش ها شامل اندازه گیری pH، شوری، کربن آلی (روش اکسایش تر)، نیتروژن کل (روش کجلدال)، فسفر قابل جذب (روش اولسن)، پتاسیم قابل جذب (روش عصاره گیری با استات آمونیم، مقدارکربنات کلسیم معادل (روش تیتراسیون) و بافت خاک (روش هیدرومتری) بودند (۸). نتایج ویژه‌گی های شیمیائی و فیزیکی خاک و کمپوست (ماده آلی) مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است.

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، بافت خاک مورد آزمایش رسی (میانگین رس حدود ۵۳ درصد) و میزان کادمیم کل و قابل جذب خاک به ترتیب ۱/۵ و ۰/۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم است. خاک از شوری اندک ($EC=0/31\ dS\ m^{-1}$) برخوردار است، درصد کربن آلی آن قابل توجه نیست (٪ $OC=0/5$) اما ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به علت درصد رس زیاد، نسبتاً بالا ($c\ mol\ (+)\ kg^{-1}$ $CEC=42/4$) است. درصد کربن آلی کمپوست اضافه شده به خاک حدود ۹/۲ درصد، مقدار کادمیم کل و قابل جذب اندازه گیری شده در حدود صفر، CEC و EC آن به ترتیب $cmol(+)\ kg^{-1}$ ۷۰/۲ و dS m^{-1} ۷/۵ است. برای ارزیابی اثر مواد آلی بر کاهش تأثیرات سوءکادمیم بر فعالیت های میکروبی خاک آزمایش به صورت فاکتوریل ۲*۵ در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی (ده تیمار) با سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل کادمیم در ۵ سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰،۱۵۰و ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) و ماده آلی در دو سطح (بدون ماده آلی و با ماده آلی) در سه تکرار بودند که در مجموع ۳۰ واحد آزمایشی را شامل می‌شود.

۱۰۰ گرم خاک هوا خشک توزین و به داخل ظروف پلاستیکی (جار) یک لیتری منتقل گردید. تیمارهای مختلف کادمیم با استفاده از نمک سولفات کادمیم به صورت محلول به خاک ها اضافه و یک ماه در آزمایشگاه (دمای معمولی محیط) برای رسیدن به حالت تعادل نگه‌داری شدند. در هفته سوم تیمار۲۵ تن در هکتار کمپوست اعمال گردید. سپس ظروف جهت انجام آزمایش های میکروبیولوژیکی زیر در انکوباتور در دمای ۲۵ ±۱° C درجه سانتیگراد قرار داده شدند.

اندازه گیری معدنی شدن کربن آلی (Cmin)

برای اندازه گیری میزان کربن معدنی شده (تنفس میکروبی)، به هر کدام از جارهای تنفسی حاوی خاک تیمار شده معادل ۱۵ سی سی آب مقطر اضافه شد تا رطوبت خاک به حدود ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه برسد. سپس جارها در انکوباتور در دمای ۲۵±۱° C قرار داده شدند. میزان تولید CO_2 طی بازه‌ی زمانی ۷۲ روز اندازه‌گیری و پایش

گردید. دی اکسید کربن ناشی از تنفس میکروبی (تجزیه کربن آلی خاک و کمپوست) در سود ۱ نرمال جمع آوری شد. برای این کار مقدار ۱۰ سی‌سی سود ۱ نرمال در یک وایل پلاستیکی ۲۰ میلی‌لیتری ریخته شد و روی سطح خاک درون جار قرار داده شد. تیتراسیون در ۲ هفته اول هر ۳ روز یک بار و در هفته های بعد هر ۷ روز یک بار انجام گرفت. قبل از تیتراسیون ۵ سی‌سی کلرید باریم اشباع (۱۰ درصد) اضافه شد تا CO_3^{-2} به صورت $BaCO_3$ رسوب کند و NaOH باقیمانده با اسید ۰/۵ نرمال تیتر گردید. ظروف بدون خاک ولی حاوی NaOH به عنوان شاهد نیز در این آزمایش لحاظ گردید. سرعت معدنی شدن کربن (CMR) با تقسیم کل کربن معدنی شدن طی ۷۲ روز به مدت زمان انکوباسیون بر حسب میلی گرم کربن در کیلوگرم خاک در روز برای هر تیمار محاسبه گردید.

تنفس ناشی از سوبسترا (SIR)

جهت اندازه گیری این پارامتر در هفته آخر آزمایش معدنی شدن کربن، ۲ سی‌سی محلول گلوکز ۱ درصد به عنوان سوبسترا به هر کدام از ظروف اضافه شد و بلافاصله یک وایل حاوی ۱۰ سی‌سی سود ۰/۱ نرمال روی سطح خاک درون هر جار قرار داده شد و پس از ۸ ساعت مقدار CO_2 متصاعد شده به روش تیتراسیون (ارائه شده در قسمت بالا) محاسبه شد.

کربن بیوماس میکروبی (MBC)

برای اندازه‌گیری کربن بیوماس میکروبی از روش تدخین با کلروفرم- انکوباسیون استفاده شد. به این صورت که کربن بیوماس میکروبی از اختلاف بین کربن معدنی خاک در نمونه های تدخین نشده و تدخین شده طی ۱۰ روز انکوباسیون بدست آمد (۳۰). اختلاف بین CO_2-C متصاعد شده از نمونه های تدخین شده و تدخین نشده به عنوان بیوماس کربن تعیین گردید:

$$MBC = \frac{(F_C - uF_C)}{k_c} \qquad (۱)$$

که در آن:

MBCکربن بیوماس میکروبی (میلی گرم در کیلوگرم)، Fc کربن معدنی شده یا CO_2 متصاعد شده در نمونه های تدخین شده با کلروفرم (میلی گرم در کیلوگرم)، uFc کربن معدنی شده یا CO_2 متصاعد شده در نمونه های تدخین نشده (میلی گرم در کیلوگرم) و k_c ضریب بازیافت که معادل ۰/۴۵ است (۲۱). برای محاسبه ضریب یا کسر متابولیکی (qCO_2) از میزان تنفس پایه (BR) یا متوسط متصاعد شده از خاک تدخین نشده طی ۱۰ روز و کربن بیوماس میکروبی (MBC) استفاده شد:

$$qCO_2 = \frac{BR}{MBC} \qquad (۳)$$

که در آن qCO_2 ضریب متابولیکی ($\mu g\ CO_2\text{-}C\ mg^{-1}\ MBC\ day^{-1}$) و BR تنفس پایه ($mg\ CO_2\text{-}C\ \ kg^{-1}\ soil\ day^{-1}$) و MBC کربن بیوماس میکروبی ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil$) است.

سنجش فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی

چهار میلی لیتر محلول اصلاحی MUB و یک میلی لیتر محلول پی- نیترو فنیل فسفات به یک گرم خاک اضافه شد و مقدار جذب پی- نیترو فنل توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV7500 در طول موج ۴۰۰ نانومتر قرائت گردید (۱۱ و ۳۲). فعالیت فسفاتازها بر حسب $\mu g\ PNP\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$ مورد سنجش قرار گرفت.

پس از اتمام آزمایش های میکروبیولوژیکی، pH، EC، کادمیم کل و کادمیم قابل جذب در تمام نمونه‌ها مجدداً اندازه گیری شدند (۲۵). کلیه پارامترها بر اساس وزن آون خشک خاک در دمای ۱۰۵ ° C بیان شدند. نتایج به صورت میانگین (n=۳) هر تیمار گزارش شدند.

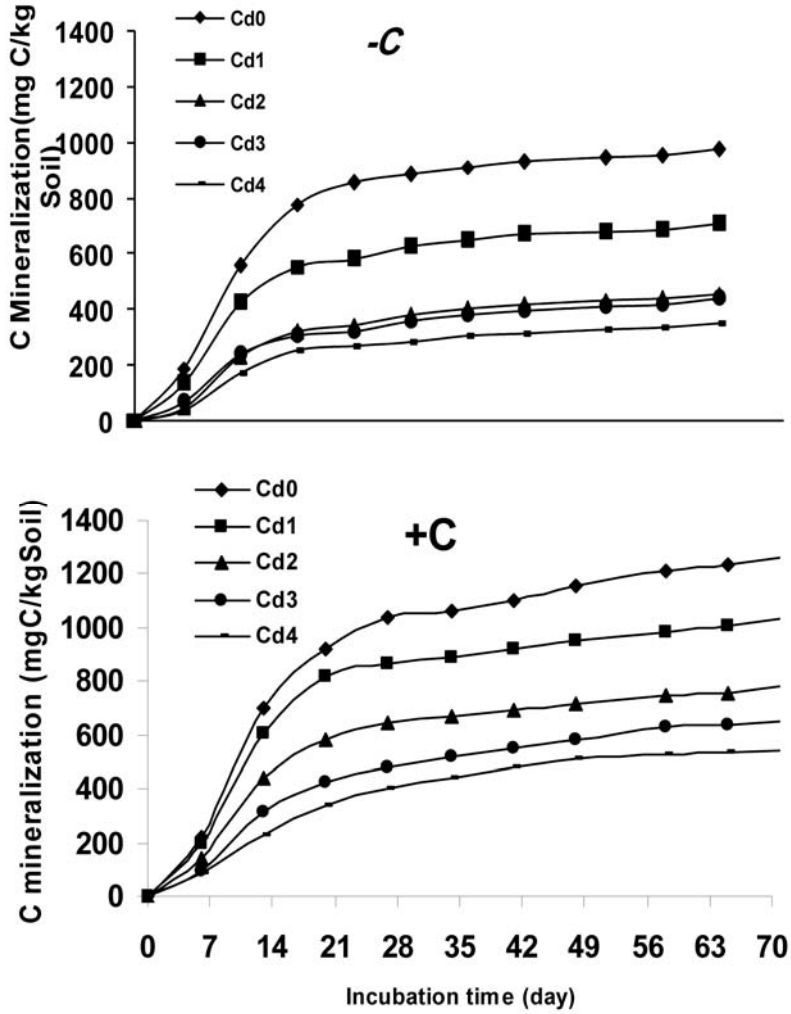
تجزیه و تحلیل آماری داده

آنالیز داده ها به کمک جدول تجزیه واریانس (ANOVA) برای پی بردن به منابع تغییرات (اثرات ساده کمپوست و کادمیم و نیز اثرات متقابل کمپوست و کادمیم) با استفاده از نرم افزار Statistics انجام گرفت. برای مقایسه میانگین ها از روش LSD فیشر در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. نمودارها با نرم افزار Excel ترسیم شدند و جهت بدست آوردن همبستگی بین پارامترها از نرم افزار آماری SAS استفاده گردید. داده های خام و باقیمانده آنها برای رعایت پیش فرض های تجزیه واریانس (نرمال بودن و همگنی واریانس تیمارها) نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

اثرکادمیم بر شاخص های میکروبی و بیوشیمیایی خاک

شکل ۱ اثر سطوح مختلف کادمیم را بر تنفس (معدنی شدن) تجمعی خاک طی ۷۲ روز انکوباسیون در تیمارهای بدون کمپوست (C-) و با کمپوست (C+) نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در خاکهای تیمار شده و یا تیمار نشده با کمپوست، در طول دوره انکوباسیون بیشترین تنفس تجمعی در خاک شاهد (سطح صفر کادمیم) و کمترین آن در سطح $mg\ kg^{-1}$ ۲۰۰ کادمیم مشاهده می‌شود.



شکل۱- اثر سطوح مختلف کادمیم بر روند معدنی شدن تجمعی کربن در خاک های تیمار شده (C+) و تیمار نشده (C-) با کمپوست

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس تمامی پارامترهای مورد بررسی را نشان می دهد. کادمیم اثر معنی دار بر کل کربن معدنی شده خاک داشت. در هر دو خاک تیمار شده و تیمار نشده با کمپوست، افزایش غلظت این عنصر کاهش تنفس میکروبی را به همراه داشت (جدول ۳). دای و همکاران (۱۰) نشان نیز دادند در خاکهای آلوده به عناصر سنگین مانند کادمیم، میزان کربن معدنی شده با افزایش غلظت فلز کاهش یافت. اگر چه سرعت تولید CO_2 در خلال ۲ روز اول افزایش یافت ولی پس از آن کاهش معنی دار داشت. آنها گزارش کردند که تنفس خاک با کادمیم کل و کادمیم قابل جذب همبستگی منفی و معنی دار دارد. در مطالعه حاضر نیز همین رابطه مشاهده شد (جدول ۴).

کادمیم اثر کاملاً معنی دار (P <۰/۰۰۱) بر سرعت معدنی شدن کربن داشت (جدول۲) و باعث کاهش سرعت تجزیه کربن خاک گردید (جدول ۳). سرعت معدنی شدن کربن نیز یکی از شاخص های میکروبیولوژیک حساس به حضور عناصر سنگین است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است و نشان دهنده میزان کربن معدنی شده در یک دوره زمانی مشخص است. این پارامتر به میزان فراهمی سوبسترا بستگی دارد وکادمیم این سوبسترا را از دسترس ریز جانداران تجزیه کننده خارج می سازد. لذا این پارامتر با افزایش سطوح کادمیم کاهش می یابد. این اثرات کادمیم توسط دای و همکاران (۱۰) و بروکس (۹) نیز مشاهده شد. افزایش کادمیم به خاک تنفس ناشی از سوبسترا را کاهش داد (جدول ۳). لندی و همکاران (۲۴) با اضافه کردن L و D– گلوتامیک اسید به خاکهای آلوده به کادمیم و اندازه گیری تنفس خاک پس از ۶ ساعت (SIR) دریافتند که مقدارCO_2-C در خاک آلوده به کادمیم تفاوت معنی دار با خاک شاهد داشت و این روند در سطوح بسیار بالای کادمیم کاملاً مشهودتر بود.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیم و ماده آلی و اثرات متقابل آنها برشاخص های پویائی کربن (اعداد آماره F هستند)

پارامتر	منابع تغییرات		
	کادمیم	کمپوست	کادمیم × کمپوست
درجه آزادی (df)	۴	۱	۴
($mg\ C\ kg^{-1}$) C_{min}	۲۱۹/۷***	۴۶۶/۲۵***	۴/۹۷**
($mg\ C\ kg^{-1}\ d^{-1}$) CMR	۱۳۸/۵***	۴۹۷/۷***	۱/۵۶n.s
($mg\ C\ kg^{-1}$) SIR	۸۹۰/۵۷***	۳۱۶/۶۸***	۴/۷۷**
($mg\ C\ kg^{-1}$) MBC	۱۱۹۷/۶۵***	۲۱۰/۷***	۲۰۳/۱۶***
($mg\ C\ kg^{-1}\ d^{-1}$) BR	۵۴/۸۴***	۷/۳۷**	۵/۱۸*
($\mu g\ CO_2\text{-}C\ mg^{-1}\ MBC\ d^{-1}$) qCO_2	۷۵/۹۱***	۰/۱۴۲n.s	۰/۶۱۴n.s
(%) MBC/OC	۱۳۹/۹***	۲۹۶/۷۴***	۸۵/۶۸***
(%) Cmin/OC	۱۹۴/۴***	۱۱۴۰/۴***	۱۶۳/۲***
($\mu g\ PNP g^{-1} h^{-1}$) ACP	۱۷۲/۳۷***	۲۱/۴۵***	۱/۰۸n.s
($\mu g\ PNP g^{-1} h^{-1}$) ALP	۳۴۶/۵***	۱/۲n.s	۱۴/۲۶**

*$P<$۰/۰۵ ، **$P<$۰/۰۱ ، ***$P<$۰/۰۰۱ ، ns -غیر معنی دار

Cmin: گرم کل کربن معدنی شده در کیلوگرم خاک طی ۷۲ روز، CMR: سرعت معدنی شدن کربن ،SIR: تنفس ناشی از سوبسترا، MBC: کربن بیوماس میکروبی، BR: تنفس پایه، qCO_2، ضریب متابولیکی، MBC/OC و Cmin/OC : به ترتیب نسبت کربن بیوماس میکروبی و کربن معدنی شده به کربن آلی خاک، ACP و ALP به ترتیب فعالیت آنزیم های فسفاتاز اسیدی و قلیائی

در حقیقت افزایش سطح کادمیم باعث کاهش تنفس ناشی از سوبسترا در این خاک گردید. هاتوری (۱۹) نیز دریافت که تنفس ناشی از سوبسترا به حضور عناصر سنگین بسیار حساس است و این عناصر، سرعت معدنی شدن کربن سوبسترا را تحت تأثیر قرار می دهند. در حقیقت پس از اضافه کردن سوبسترای سهل الوصول برای ریز جانداران، عناصر سمی باعث ایجاد تأخیر در رشد نمائی ریز جانداران فعال می‌شوند. همان طور که در جدول ۲ آمده است کادمیم اثر معنی دار بر کربن بیوماس خاک داشته است. با این حال در مطالعه لندی (۲۴) بیوماس کربن نسبت به سطوح سمی کادمیم پاسخ معنی دار نداد. کربن بیوماس که ۴-۱ درصد کل کربن خاک را شامل می شود یکی از شاخص های حساس به حضور عناصر سمی است و کاهش آن با افزایش غلظت کادمیم شاید به این علت است که اندازه جمعیت های میکروبی خاک در حضور کادمیم کاهش می‌یابد (۲۳). کاهش همزمان تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) و بیوماس میکروبی (جدول ۳) نشان می دهد که سهم میکروب‌های فعال از بیوماس کل بر اثر اضافه شدن کادمیم به خاک کاهش چشمگیر می یابد، زیرا تنفس ناشی از سوبسترا نشان دهنده جمعیت و بیوماس فعال میکروبی از لحاظ متابولیکی می باشد (۲۴). به عبارت ساده تر، میکروب های جوان خاک به دلیل حساسیت بیشتر در غلظت های بالای کادمیم زودتر از بین می‌روند.

نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که کادمیم اثر معنی دار بر فعالیت آنزیم های فسفاتاز قلیایی و اسیدی داشته است (جدول ۱). افزایش غلظت کادمیم به بیش از ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک فعالیت هر دو آنزیم را به طور محسوس کاهش (۸۶ تا ۹۸ درصد) داد که مقدار این کاهش به سطح کادمیم بستگی دارد (جدول ۳). فسفاتازهای اسیدی و قلیایی جزء آنزیم های برون سلولی بوده و هیدرولیز ترکیبات فسفره آلی را به ترکیبات معدنی و محلول و قابل استفاده برای گیاهان بر عهده دارند و تحت تاثیر عناصر سمی، تغییر شکل یافته و قادر به ادامه فعالیت نیستند (۱۱). یکی از منابع مهم تولید فسفاتاز اسیدی ریشه گیاهان است، اما فسفاتاز قلیایی تنها توسط باکتریها و قارچ ها در خاک تولید می‌شود (۱۱). رنلا و همکاران (۳۱) دریافتند که کادمیم اثر سمی و منفی بر فعالیت هر دو آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی دارد. همچنین ژیگر و همکاران (۱۴) مشاهده کردند که اثر بازدارندگی فلزات بر فعالیت آنزیم ها بستگی به pH خاک دارد به طوری که در خاکهای اسیدی، فسفاتاز قلیایی حساسیت بیشتری به حضور فلزات سمی دارد و در خاکهای قلیایی، فسفاتاز اسیدی حساس تر است. پس چنین می توان استنباط نمود نتایج بررسی حاضر نیز همین مکانیسم را نشان می دهد چرا که فعالیت فسفاتاز قلیائی در خاکهای با pH بالا، چندان تحت تاثیر حضور فلزات سمی قرار نمی گیرد. ضریب ویژه تنفسی یا ضریب متابولیکی (qCO_2) از جمله پارامترهای محاسبه شده در این تحقیق بود که نتایج تجزیه واریانس آن در جدول ۲ نشان داده شده است. اثر کادمیم بر این پارامتر معنی دار ($P<$۰/۰۰۱) بود، اما این اثر روند مشخص نداشت به طوری که درتیمارهای $mg\ kg^{-1}$ ۱۵۰ و۵۰ ضریب متابولیکی افزایش و در تیمارهای $mg\ kg^{-1}$ ۲۰۰ و ۱۰۰ کاهش داشت. در حقیقت هنوز بین محققان در مورد اثر کادمیم بر این پارامتر اتفاق نظر حاصل نشده

است (۲۴). هاتوری (۱۹) کاهش مقادیر qCO_2 در خاکهای آلوده را این گونه توضیح داد که ریز جانداران در خاکهای آلوده از سوبستراهای مختلف استفاده می کنند که این باعث افزایش کربن بیوماس میکروبی می شود. لندی و همکاران (۲۴) با اضافه کردن صفر، ۵۰ و ۵۰۰ میکروگرم کادمیم به خاک روند مشخص برای qCO_2 بدست نیاورند به طوری که در دو روز اول انکوباسیون qCO_2 کاهش یافت و پس از آن روندی مشاهده نشد و علت آن را کاهش تنفس در دو روز اول گزارش کردند چرا که MBC در این دو روز تغییر محسوسی نشان نداد.

اثر کمپوست بر شاخص های میکروبی و بیوشیمیایی خاک

اغلب شاخص های اندازه‌گیری شده و یا محاسبه شده در این پژوهش با افزودن کمپوست به خاک‌های غیر آلوده و آلوده به کادمیم افزایش معنی دار نشان دادند (جدول های ۲ و ۳). به عنوان نمونه، معدنی شدن کربن و تنفس و بیوماس میکروبی بر اثر مصرف کمپوست افزایش قابل توجه داشتند (جدول ۳). احتمالاً میزان بالای کربن معدنی شده در تیمار حاوی مواد آلی (کمپوست) به علت تحریک و افزایش فعالیت میکروبی است که آن هم به دلیل افزایش منبع انرژی و کربن سهل الوصول و سهل التجزیه برای میکروبهاست. تحریک و بهبود رشد و فعالیت میکروبی بر اثر مصرف مواد آلی مختلف (از جمله کمپوست) در خاک های مختلف توسط پژوهشگران زیادی مشاهده شد. برای مثال پاسکال (۲۹) علت این افزایش را به مقدار بالای کربن محلول در آب نسبت داد.

اثر متقابل کمپوست و کادمیم بر شاخص های میکروبی خاک

جدول شماره ۲ نشان می دهد که اثر متقابل کادمیم و مواد آلی بر تمامی شاخص های پویایی کربن (به استثناء مقدار qCO_2، فعالیت فسفاتاز اسیدی و سرعت معدنی شدن کربن) معنی دار ($P <$ ۰/۰۰۱) بود. درصد کربن آلی خاک در حدود ۰/۵ درصد است (جدول۱) و اضافه شدن مواد آلی خاک با کربن آلی حدود ۱۰ درصد، میزان کربن آلی خاک را بالا برده و این باعث افزایش تنفس خاک در این تیمار شده است. در تمام سطوح کادمیم اضافه شده به خاک، مقدار کربن معدنی شده بین تیمارهای با کمپوست و بدون کمپوست اختلاف معنی دار ($P <$ ۰/۰۰۱) با یکدیگر دارند. افزودن مواد آلی به خاک معدنی شدن کربن خاک را در سطوح مختلف کادمیم افزایش داده است. با این حال، معدنی شدن کربن بین سطوح بالای کادمیم در تیمار فاقد کمپوست اختلاف معنی دار مشاهده نمی‌شود که چنین روندی کم و بیش در مورد سایر شاخص ها نیز صادق است. شاید علت آن یکسان بودن تأثیر سطح کادمیم در مقادیر زیاد باشد. نکته قابل توجه در مورد سرعت تنفس این است که اضافه کردن کمپوست در سطح ۲۰۰ میلی گرم کادمیم توانسته است اثر این سطح را تا حد ۵۰ میلی گرم کاهش دهد و این تیمارها اختلاف معنی دار با هم نداشته اند. دلایل متعددی برای این اثر ارائه گردیده است. مواد آلی با کمپلکس کردن کادمیم آن را از جزء (فرکشن) محلول و قابل جذب توسط ریز جانداران به جزء آلی تغییر داده و این باعث شده تا جمعیت و فعالیت ریز جانداران در تیمارهای حاوی مواد آلی افزایش و تا حدودی بتواند بر اثرات سمی کادمیم غلبه کند (۱۸،۱۲ و ۳۳). هر چند با افزایش سطح کادمیم، تنفس خاک کاهش یافته است اما این کاهش در تیمار C+ کمتر بوده است. به طور کلی تحقیقات نشان می دهند کادمیم نسبت به سایر فلزات در خاک از قابلیت جذب و تحرک بیشتری برخوردار است (۳۳) و اینکه اضافه کردن موادی (مواد آلی و آهک) که از تحرک و قابلیت جذب آن بکاهد امری لازم و اجتناب ناپذیر است. یکی دیگر از علل کاهش قابلیت جذب کادمیم بر اثر اضافه شدن مواد آلی، افزایش pH است که اجزاء قابل جذب کادمیم (محلول در آب و تبادلی) را کاهش و در مقابل، جزء های با قابلیت جذب کمتر را افزایش می دهد (۳۵).

بیشترین مقدار اغلب شاخص ها در سطح صفر کادمیم و جائی که کمپوست اضافه شده و کمترین میزان آنها در سطح ۲۰۰ میلی گرم کادمیم و بدون کمپوست مشاهده شد. نکته مشترک در مورد تمامی شاخص ها اثر مثبت اضافه کردن کمپوست است که باعث افزایش مقدار شاخص در تیمار حاوی کمپوست نسبت به تیمار فاقد آن شده است، اما در تیمار حاوی کمپوست اکثراً بین سطوح مختلف کادمیم اختلاف معنی داری مشاهده نمی شود.

اثر متقابل کادمیم و کمپوست بر فعالیت فسفاتاز قلیائی معنی دار بود و بیانگر اثر مثبت کمپوست در خاک های آلوده به کادمیم است. نتایج مشابهی توسط مادجان (۲۷) گزارش شده است. وی با افزودن مواد آلی به خاک های آلوده به عناصر سنگین مشاهده نمود که فعالیت آنزیم های اوره آز، فسفاتاز و بتا گلوکوزیداز افزایش یافت و علت این افزایش را رشد جمعیت میکروبی مقاوم به عناصر سمی بر اثر افزودن مواد آلی عنوان کرد. از این رو، می توان نتیجه گرفت علاوه بر افزایش در تنوع جمعیت میکروبی که توسط مواد آلی در خاکهای آلوده به کادمیم ایجاد می شود، این مواد میل ترکیبی کادمیم را با گروه سولفیدریل آنزیم به وسیله ایجاد کمپلکس های کم محلول با آن کم کرده و باعث افزایش سنتز آنزیم توسط میکروبها از طریق افزایش جمعیت آنها می شود.

جدول۳- اثرسطوح مختلف کادمیم و اصلاح خاک با کمپوست بر شاخص های پویائی کربن و فعالیت آنزیم های خاک. اعداد میانگین (n=۳) هستند

کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	Cmin ($mg\ C\ kg^{-1}$)	CMR ($mg\ C\ kg^{-1}\ d^{-1}$)	SIR ($mg\ C\ kg^{-1}$)	MBC ($mg\ C\ kg^{-1}$)	BR ($mg\ C\ kg^{-1}\ d^{-1}$)	qCO_2 ($\mu g\ C\ mg^{-1}\ MBC\ d^{-1}$)	MBC/OC (%)	Cmin/OC (%)	ACP ($\mu g PNP g^{-1} h^{-1}$)	ALP ($\mu g PNP g^{-1} h^{-1}$)
					بدون کمپوست (+C)					
۰	۹۵۴ B	۱۲/۴۵BC	۲۸/۸B	۱۲۱/۶B	۲/۳۴B	۰/۷۹D	۲/۴ A	۱۹/۰۸ A	۲۲/۴ AB	۶۱۵/۱ B
۵۰	۶۴۸CD	۸/۶۷D	۱۷/۳ E	۲۳/۴۶CD	۲/۰۱BC	۳/۸ A	۰/۴۷B	۱۲/۹ B	۱۶/۵C	۴۸۷/۱C
۱۰۰	۳۸۲E	۶/۵E	۱۲/۷ F	۱۹/۲E	۱/۴۴DE	۳/۱۳ AB	۰/۳۸ B	۷/۶ C	۹/۳DE	۲۹۰/۹E
۱۵۰	۴۰۴/۶E	۷/۵DE	۳/۸۴I	۱۹/۲E	۱/۷CD	۳/۷ A	۰/۳۸ B	۰/۰۲E	۶/۷EF	۹۱/۴FG
۲۰۰	۲۹۵/۱E	۴/۶F	۲/۸I	۶/۴E	۰/۲۸G	۱/۸۷C	۰/۱۲CD	۵/۹ D	۳/۲F	۴/۹H
میانگین	**۵۳۷**	**۷/۸۵**	**۱۳/۰۱**	**۳۷/۹۷**	**۱/۵۴**	**۲/۶۵**	**۰/۷۶**	**۹/۱۲**	**۱۱/۶**	**۲۹۶/۹۱**
					با کمپوست (-C)					
۰	۱۴۱۴/۸A	۱۹/۲A	۳۴/۵۶A	۱۶۸/۸A	۳/۴۶A	۰/۵۳ D	۰/۲۷ BC	۱/۴۵E	۲۵/۶ A	۷۴۸/۱ A
۵۰	۱۰۴۲/۷B	۱۴/۰۵B	۲۳/۰۴C	۲۵/۶C	۲/۴B	۳/۹A	۰/۰۲ CD	۱/۰۷E	۲۰/۶۱ B	۳۹۰/۶۸D
۱۰۰	۷۵۱/۹۵C	۱۲/۲۱C	۲۰/۱۶D	۱۴/۹۳CDE	۱/۱۲EF	۳/۱۲ AB	۰/۰۱ D	۰/۷۷E	۱۰/۶۳D	۱۴۱/۳F
۱۵۰	۶۳۹/۵D	۱۳/۲۷BC	۱۰/۵۶G	۱۸/۱۳CDE	۱/۵۸CDE	۳/۷A	۰/۰۱ D	۰/۷۵E	۹/۶۴DE	۱۰۸/۰۶F
۲۰۰	۷۲۷/۲۵CD	۹/۰۸D	۶/۱۴H	۱۱/۹۴DE	۰/۶۵B	۲/۲۷ BC	۰/۰۱ D	۰/۶۶E	۴/۴DE	۲۴/۹۳GH
میانگین	**۹۱۵/۲۵**	**۱۳/۵۸**	**۱۸/۹**	**۶۷/۸۸**	**۱/۸۴**	**۲/۷**	**۰/۰۶۹**	**۰/۹۴**	**۱۴/۱۸**	**۲۸۲/۶۲**
$LSD_{(0.05)}$	۸۱/۸	۱/۲	۱/۵۲	۹/۶	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۱۹	۱/۳	۲/۶	۶۰/۵

در هر ستون، میانگین های هر تیمار با حروف مشابه بر اساس آزمون LSD فیشر فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشند. (در زیرنویس جدول ۲ علامت پارامترها تعریف و مشخص شده اند)

رابطه بین انواع اجزاء کادمیم و شاخص های مورد بررسی

جدول ۴ ضرایب همبستگی بین اجزاء مختلف کادمیم و شاخص های مورد بررسی را نشان می دهد. به طوری که مشاهده می شود به استثناء qCO_2 سایر پارامترها همبستگی قوی و معنی دار با انواع اجزاء کادمیم نشان می‌دهند. همبستگی شاخص ها با pH بیشتر از همبستگی آنها با EC بوده است. فعالیت آنزیم های مورد بررسی با هر سه شکل کادمیم، pH و EC ارتباط منفی و کاملاً معنی‌دار داشت. به استثناء فسفاتاز قلیائی که با pH همبستگی مثبت و معنی دار نشان داد. ضریب همبستگی بین کادمیم کل در پایان آزمایش و کادمیم اضافه شده در ابتدای آزمایش ** ۰/۹۶ به دست آمده است. به طوری که مشاهده می شود تمامی کادمیم اضافه شده (به طور کامل) در ابتدای آزمایش در پایان آن قابل عصاره گیری نبوده است. به نظر می رسد اضافه کردن مواد آلی به خاک باعث شده است که کادمیم در جزء هایی قرار بگیرد که در پایان آزمایش تمامی آن قابل استخراج با روش دو اسیدی نبوده است.

همبستگی بین شاخص های میکروبی و بیوشیمیایی مورد بررسی

جدول ۵ نشان می دهد که همبستگی بین تنفس خاک، سرعت تنفس، تنفس ناشی از سوبسترا و تنفس پایه مثبت و کاملاً معنی دار بوده است. همچنین بین شاخص های فوق و فعالیت آنزیم های فسفاتاز اسیدی و قلیائی نیز همستگی مثبت و معنی دار وجود دارد. qCO_2 با شاخص های کربن بیوماس، تنفس ناشی از سوبسترا، فسفاتاز قلیائی و نسبت بیوماس به کربن آلی همبستگی معنی دار داشته است.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه بر تاثیر منفی و معنی دار عنصر کادمیم اضافه شده بر تمامی شاخص های میکروبیولوژیک خاک دلالت دارد، هر چند محققان زیادی با تحقیق پیرامون این مسئله به نتایج مختلف دست یافته اند، اما اثر منفی آن به ویژه بر پویایی کربن خاک حاکی از آن است که این عنصر می تواند تا حد زیادی رشد و فعالیت ریز جانداران را با اختلال مواجه کند و در نتیجه عملکرد (functions) موجودات خاکزی را کاهش چشمگیر دهد. با عنایت به این موضوع، که فعالیت و عملکرد میکروبی خاک برای باروری آن در دراز مدت لازم و ضروری است، بنابراین آلودگی خاک به کادمیم می تواند حاصل خیزی خاک و در نتیجه رشد گیاه را تحت الشعاع قرار دهد و یا از طریق جذب به وسیله گیاه و ورود به زنجیره غذائی انسان، باعث بروز خطرات جدی برای سلامت انسان و حیوانات گردد.

جدول ٤- ضرائب همبستگی (r) بین انواع جزء های کادمیم و شاخص های مورد بررسی (n= ۳۰)

پارامتر مورد بررسی	Cd add.	Cd tot.	DTPA Cd	pH	EC
Cd add. (mg kg^{-1})	۱/۰۰				
Cd tot. (mg kg^{-1})	۰/۹۶***	۱/۰۰			
DTPA Cd (mg kg^{-1})	۰/۷***	۰/۶۵***	۱/۰۰		
pH	۰/۴۵***	۰/۵۲***	۰/۴۱*	۱/۰۰	
EC (dS m^{-1})	۰/۰۶$^{n.s}$	۰/۰۸$^{n.s}$	-۰/۴۶*	-۰/۱۲$^{n.s}$	۱/۰۰
Cmin (mg C kg^{-1})	-۰/۷۲***	-۰/۷۰***	-۰/۸۴***	-۰/۴۸***	۰/۵۳***
CMR (mg C kg^{-1} d^{-1})	-۰/۶۵***	-۰/۵۸***	-۰/۸۴***	-۰/۲۳$^{n.s}$	۰/۵۷***
SIR (mg C kg^{-1})	-۰/۹۳***	۰/۹۰***	-۰/۸۳***	-۰/۴۸***	۰/۲۴$^{n.s}$
MBC (mg C kg^{-1})	-۰/۶۸***	-۰/۶۷***	-۰/۵۰***	-۰/۴۷***	۰/۳۸$^{n.s}$
BR (mg C kg^{-1} d^{-1})	-۰/۸۵***	-۰/۸۰***	-۰/۶۱***	-۰/۲۶$^{n.s}$	۰/۱$^{n.s}$
qCO_2 (µg C mg^{-1} MBC d^{-1})	۰/۳۰$^{n.s}$	۰/۳۵$^{n.s}$	۰/۲۲$^{n.s}$	۰/۶۶***	-۰/۳۵$^{n.s}$
MBC/OC (%)	-۰/۵۳**	-۰/۵۸***	-۰/۲۶$^{n.s}$	-۰/۶۲***	-۰/۲۹$^{n.s}$
Cmin/OC (%)	-۰/۴۷***	-۰/۴۸***	-۰/۱۴$^{n.s}$	-۰/۵۲***	-۰/۴۲*
ACP (µg*PNP* $g^{-1}h^{-1}$)	-۰/۹۵***	-۰/۹۰***	-۰/۷۵***	-۰/۴۷***	۰/۱۳$^{n.s}$
ALP (µg*PNP* $g^{-1}h^{-1}$)	-۰/۹۵***	-۰/۹۲***	-۰/۶۴***	۰/۵۲***	۰/۰۲$^{n.s}$

*- P <۰/۰۵ ، **- P <۰/۰۱ ، ***- P <۰/۰۰۱ ، ns -غیر معنی دار (در زیرنویس جدول ۲ علامت پارامترها تعریف و مشخص شده اند)

جدول ۵ - ضریب همبستگی (r) بین شاخص های مورد بررسی در این آزمایش (n= ۳۰)

پارامتر مورد بررسی	Cmin	CMR	SIR	MBC	BR	qCO_2	MBC/OC	Cmin/O.C	ACP	ALP
(mg C kg^{-1}) Cmin	۱/۰۰									
(mg C kg^{-1} d^{-1}) CMR	۰/۹۳***	۱/۰۰								
(mg C kg^{-1}) SIR	۰/۸۷***	۰/۸۱***	۱/۰۰							
(mg C kg^{-1}) MBC	۰/۷۹***	۰/۷۳***	۰/۷۷***	۱/۰۰						
(mg C kg^{-1} d^{-1}) BR	۰/۷۷***	۰/۷۷***	۰/۸***	۰/۷۷***	۱/۰۰					
(µg C mg^{-1} MBC d^{-1}) qCO_2	-۰/ ۴۴$^{n.s}$	-۰/۳$^{n.s}$	-۰/۴۵*	-۰/۷۴***	-۰/۲۴$^{n.s}$	۱/۰۰				
(%) MBC/OC	۰/۱۸$^{n.s}$	۰/۰۷$^{n.s}$	۰/۴۱*	۰/۳۳$^{n.s}$	۰/۳۱$^{n.s}$	-۰/۵***	۱/۰۰			
(%) Cmin/OC	-۰/۰۲$^{n.s}$	-۰/۱۷$^{n.s}$	۰/۲۹$^{n.s}$	۰/۱۲$^{n.s}$	۰/۱۴$^{n.s}$	-۰/۳۱$^{n.s}$	۰/۸۳***	۱/۰۰		
(µg*PNP*g^{-1} h^{-1}) ACP	۰/۸۴***	۰/۷۷***	۰/۹۴***	۰/۷۴***	۰/۸۸***	-۰/۳۵$^{n.s}$	۰/۴۴*	۰/۳۴$^{n.s}$	۱/۰۰	
(µg*PNP*g^{-1} h^{-1}) ALP	۰/۷۵***	۰/۶۴***	۰/۹***	۰/۸***	۰/۸۷***	-۰/۴۷*	۰/۵۲***	۰/۴۸*	۰/۹۳***	۱/۰۰

*- $P<۰/۰۵$ ، **- $P<۰/۰۱$ ، ***- $P<۰/۰۰۱$ ، ns -غیر معنی دار (در زیرنویس جدول ۲ علامت پارامترها تعریف و مشخص شده اند)

به نظر می رسد افزودن ترکیبات آلی غنی از کربن به خاک تا حد زیادی به کاهش اثرات سؤ این عنصر کمک کند. افزودن مواد آلی بـه خاک احتمالاً با تغییر pH و رسوب کادمیم، تشکیل کلات پایـدار و در نتیجه کاهش تحرک آن، بهبود جذب سطحی کادمیم ناشی از افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک باعث تقلیل زیست فراهمی این عنـصر و در نتیجه جذب آن توسط ریزجانداران خاکزی می گردد.

سپاسگزاری

از دانشگاه شهرکرد به خـاطر حمایـت هـای مـالی ایـن تحقیـق قدردانی و تشکر می شود.

منابع

1- Adriano D.C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd ed. Springer-Verlag, New York, NY. 866 p.
2- Alexander M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. John Wiley & Sons, New York, NY. 467 p.
3- Anderson M.K., Refsgaard A., Raulund-Rasmussen K., Strobel B.W. and Hansen H.C.B. 2002. Content, distribution and solubility of cadmium in arable and forest soils. Soil Science Society of America Journal, 66:1824-1835.
4- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. In: Page. A. L., Miller, R. H. (Eds.). Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. Madison. WI. pp. 831-871.
5- Anderson T.H. and Domsch K.H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomass from soils of different cropping histories. Soil Biology and Biochemistry, 22:251-255.
6- Anderson T.H. and Domsch K.H. 1993. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 25:393-395.
7- Baath E. 1989. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations (a review). Water, Air and Soil Pollution, 47:335-379.
8- Black C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E. and Clark, F.E. 1965. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 1st Edition, Agronomy, 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
9- Brookes P.C. 1995. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. Biology and Fertility of Soils, 19:269-275.
10- Dai J., Becquer T., Rouiller J.H., Reversat G., Bernhard-Reversat F. and Lavelle P. 2004. Influence of heavy metals on C and N mineralization and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. Applied Soil Ecology, 25:99-109.
11- Eivazi F. and Tabatabai M.A. 1977. Phosphatases in soils. Soil Biology and Biochemistry, 9:167-172.
12- Farrell M. and Jones D.L. 2010. Use of composts in the remediation of heavy metal contaminated soil. Journal of Hazardous Materials, 175:575-582.
13- Fritze H., Perkiomaki J. and Saarela U. 2000. Effects of Cd-containing wood ash on the microflora of coniferous forest humus. FEMS Microbiology Ecology, 32:43-51.
14- Geiger G., Brandl H., Furrer G. and Schulin R. 1998. The effect of copper on the activity of cellulase and ß-glucosidase in the presence of montmorillonite or Al-montmorillonite. Soil Biology and Biochemistry, 30:1537-1544.
15- Giller K.E., Witter F. and McGrath S.P. 1998. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils, a review. Soil Biology and Biochemistry, 30:1389-1414.
16- Haghiri F. 1974. Plant uptake of Cd as influenced by CEC, organic matter, Zn and soil temperature. Journal of Environmental Quality, 3:180-182.
17- Han D.H. and Lee J.H. 1996. Effects of liming on uptake of lead and cadmium by *Raphanus sativa*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 31:488-493.
18- Hanc A.P., Tlustos J. and Szakova J. 2009. Changes in cadmium mobility during composting and after soil application. Waste Management, 29:2282–2288.
19- Hattori H. 1992. Influence of heavy metals on soil microbial activities. Soil Science and Plant Nutrition, 38:93-100.
20- Illera V., Walter I., Souza P. and Cala V. 2000. Short-Term effects of biosolid and municipal solid waste applications on heavy metals distribution in a degraded soil under a semi-arid environment. The Science of the Total Environment, 255:29-44.
21- Jenkinson D.S. and Ladd J.N. 1981. Microbial biomass in soil measurement and turnover, In: Paul E.A., Ladd, J.N. (Eds). Soil Biochemistry, Marcel Dekker, Inc., NY. pp.415-471.
22- Kanderler E., Kampichler C., and Horak O. 1996. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. Biology and Fertility of Soils, 23:299-30.
23- Kizilkaya R. and Askin T. 2002. Influence of cadmium fractions of microbiological properties in bafra plain soils.

Arch Acker Boden, 48:263-272.
24- Landi L., RenellaG., Moreno J.L., Falchini L. and Nannipieri P. 2000. Influence of cadmium on the metabolic quotient, l -:D -glutamic acid respiration ratio and enzyme activity: microbial biomass ratio under laboratory conditions. Biology and Fertility of Soils, 32:8-16.
25- Lindsay W.L. and Norwell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42:421-428.
26- Luo Y.Q. and Zhou X. 2006. Soil Respiration and the Environment. Academic Press, Elsevier, 334 p.
27- Madejon E., Burgos P., Lopez R. and Cabrera F. 2001. Soil enzymatic response to addition of heavy metals with organic residues. Biology and Fertility of Soils, 34:144-150.
28- Nannipieri P. 1994. The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. In: Pankhurst, C.E., Doube. B.M., Gupta, V.V.S.R., Grace. P.R. (Eds). Soil Biota: Management in Sustainable Farming Systems. CSIRO Publications, Melbourne, Australia. pp. 238-244.
29- Pascual J.A., Garcia C. and Hernandez T. 1999. Lasting microbiological and biochemical effects of the addition of municipal solid waste to an arid soil. Biology and Fertility of Soils, 30:1-6.
30- Raiesi F. 2004. Soil properties and N application effects on microbial activities in two winter wheat cropping system. Biology and Fertility of Soils, 40: 88-92.
31- Renella G., Ortigoza A.L.R., Landi L. and Nannipieri P. 2003. Additive effects of copper and zinc on cadmium toxicity on phosphates activities and ATP content of soil as estimated by the ecological does (ED_{50}). Soil Biology and Biochemistry, 35:1203-1210.
32- Tabatabai M.A. and Bremner J.M. 1969. Use of P-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. Soil Biology and Biochemistry, 1:301-307.
33- Tejada M. 2009. Application of different organic wastes in a soil polluted by cadmium: Effects on soil biological properties. Geoderma, 153:254-268.
34- Vig K., Megharaj M., Sethunathan N. and Naidu R. 2003. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. Advances in Environmental Research, 8:121-135.
35- Walter I. and Cuevas G. 1999. Chemical fractionation of heavy metals in a soil amended with repeated sewage sludge application. The Science of the Total Environment, 226:113-119.
36- WHO. 2000. Regional Office for Europe, Cadmium, Copenhagen, Denmark.
37- Vallaeys T., Courde, L. and Chaussod, R. 1997. Assessing side effects of micropollutants on soil microflora. Analusis Magazine, 25:60-66.

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 1, Mar-Apr 2011, p. 161-173

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۱۷۳-۱۶۱

The Role of Compost in Alleviating Cadmium Effects on Microbial Respiration and Biomass, and Phosphatase Activity in Soil

L. Dayani[1]- F. Raiesi[2*]
Received:8-5-2010
Accepted:24-10-2010

Abstract

Cadmium is one of the heavy metals with a considerable importance for its potential toxic effects on soil microbial activities and composition. Although, the toxic effect of cadmium on soil microbial activities is somewhat well-known, but the extent to which Cd affects soil biota depends largely on soil properties and conditions, particularly soil organic matter contents. Thus, the aim of this research was to study the effect of increasing cadmium levels on soil microbial biomass and activities, and to examine the role of compost materials in the alleviation of Cd effects. A 2×5 factorial experiment consisting of two levels of compost (0 and 2.5 t ha^{-1}) and five levels of cadmium (0, 50, 100, 150 and 200 mg Cd kg^{-1}) arranged in a completely randomized design with three replicates was carried out under laboratory conditions. The responses of soil microbiological properties consisting of C mineralization, microbial biomass C; and acid and alkaline phosphatase activities to cadmium and compost additions were evaluated during 10 weeks of laboratory soil incubation. Results show that cadmium additions had a significant, negative effect on all the measured microbiological properties. The accumulated C mineralization reduced with increasing cadmium concentrations. Nonetheless, compost addition lowered the detrimental and inhibiting effect of cadmium on soil microbial activities. Results demonstrate that in spite of a significant correlation (r=0.96) between the two Cd fractions, the added Cd at the beginning of soil incubation was not reflected totally in the total Cd concentrations determined at the end of soil incubation. Data also indicated that the fraction of available Cd had a stronger negative (cor)relation with soil microbial activities than the other fractions had. In summary, the results of the current study illustrate that even a lower concentration of Cd (50 mg kg^{-1}) may inhibit soil microbial activities due to it toxicity in the studied soil, and that the addition of organic materials could be effective in reducing the toxicity of cadmium via lessening its bioavailability to soil biota.

Keywords: Cadmium, Soil microbial activity, Soil C dynamics, Compost, Soil enzymes

1,2- Former MSc Student and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University
(*-Corresponding Author Email: f_raiesi@yahoo.com)