Archive of SID

نشریه زیست‌شناسی خاک / جلد 3 / شماره 2 / 1394

بررسی تأثیر مایه‌زنی میکروبی در خصوصیات کمی و کیفی گیاه گل‌گندم (*Centaurea cyanus*) در یک خاک آلوده به کادمیم

محسن برین[1]، میرحسن رسولی صدقیانی و حبیب خداوردیلو

استادیار دانشگاه ارومیه؛ m.barin@urmia.ac.ir

دانشیار دانشگاه ارومیه؛ m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

دانشیار دانشگاه ارومیه؛ h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

دریافت: 94/2/15 و پذیرش: 94/11/28

چکید

در سال‌های اخیر استفاده از توانایی ریزسازواره‌های ریزوسفری به‌ویژه قارچ‌ریشه‌آربوسکولار (AMF) و باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) در افزایش بردباری گیاهان به فلزات سنگین مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش نقش برخی گونه‌های PGPR و AMF بر جذب برخی عناصر و همچنین برخی شاخص‌های فیزیولوژیک، به وسیله گیاه گل‌گندم (*Centaurea cyanus*) در خاک آلوده به کادمیم بررسی شد. این مطالعه در شرایط گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل با دو فاکتور غلظت کادمیم در چهار سطح (صفر، 10، 30 و 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم) و تیمار تلقیح میکروبی در سه سطح (شاهد، گونه‌های PGPR (ترکیبی از گونه‌های Pseudomonas شامل سویه‌های *P. fluorescens* ، *P.putida* و *P. aeruginosa*) و AMF (ترکیبی از گونه‌هایGlomus و Rhizophagus شامل *G. G. mosseae* *fasciculatum* و *R. intraradices*))، در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم در خاک رشد گیاه، غلظت آهن، روی و مس در شاخساره، مقادیرکلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها، ارتفاع، تنفس میکروبی کاهش و مقادیر غلظت کادمیم در شاخساره و ریشه گیاه به‌طور معنی‌داری (P≤0/05) افزایش یافت. در میانگین کلروفیل کل در تیمارهای AMF و PGPR به ترتیب بیش از 2/2 و 1/3 و کاروتنوئید به‌ترتیب بیش از 2/4 و 2 برابر تیمارهای مشابه شاهد بدست آمد. همچنین تیمارهای میکروبی در جذب عناصر ریزمغذی نیز بهتر از شاهد عمل کردند به‌طوری‌که غلظت آهن، روی و مس در تیمارهای میکروبی بیش از 1/5 برابر تیمار شاهد بود. چنین نتیجه‌گیری می‌گردد که تلقیح میکروبی سبب بهبود رشد و افزایش تحمل گیاه به شرایط سمیت کادمیم می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد گیاه، سمیت کادمیم، شاخص‌های فیزیولوژیکی، فلزات سنگین، قارچ‌ریشه آربوسکولار

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

فلزات سنگین در خاک از عوامل محدودکننده رشد گیاهان بوده و می‌تواند منجر به کاهش کمی و کیفی محصولات کشاورزی و در حالت‌های شدید نابودی تنوع گیاهی در مناطق آلوده گردند (خان، 2005). این فلزات به طور بیولوژیکی تجزیه ناپذیر بوده و مدت زمانی طولانی در خاک باقی می‌مانند (کرمی و ذولکیفلی، 2010). کادمیم به عنوان یک فلز سنگین و غیرضروری، یکی از سمّی-ترین آلاینده‌های موجود در مناطق صنعتی و نیز مناطق تحت کشت مطرح است چرا که علاوه بر فعالیت‌های صنعتی از قبیل ریخته‌گری، تصفیه و ذوب فلزات، معدن-کاوی، صنایع رنگ و پلاستیک، مصرف غیراصولی کودهای کشاورزی به‌خصوص کودهای فسفره و استفاده از لجن فاضلاب نیز، منجربه ورود این آلاینده به محیط-زیست و متعاقباً زنجیره‌های غذایی خواهد شد (داس و همکاران، 1997؛ سانیتیا و همکاران، 1999).

در بین فلزات سنگین کادمیم اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا ریشه گیاه به راحتی آن را جذب می‌کند و نیز سمیت آن بیش از بیست برابر سایر فلزات سنگین است (بیرو و همکاران، 1995). نتایج برخی مطالعات نشان داده که سمیت کادمیم در گیاهان موجب کلروزه شدن برگ‌ها، لوله شدن برگ‌ها، کاهش فتوسنتز، کاهش تولید کلروفیل، ممانعت از فعالیت آنزیم احیا کننده آهن (III) و در نهایت کاهش رشد و عملکرد می‌گردد (داس و همکاران، 1997). همچنین افزایش غلظت کادمیم سبب کاهش غلظت بسیاری از عناصر کم مصرف می‌گردد (کاظم علیلو و رسولی صدقیانی، 1391). در سال‌های اخیر استفاده از پتانسیل ریزجانداران خاک به‌ویژه قارچ‌ریشه‌های آربوسکولار (AMF[1]) و باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR[2]) در افزایش بردباری گیاهان به فلزات سنگین مورد توجه قرار گرفته است. AMF از مهمترین ریزجانداران خاک بوده که در همزیستی با گیاهان، رشد و سلامتی آن‌ها را بوسیله‌ی افزایش در جذب آب و عناصر غذایی به ویژه عناصر کم تحرک مانند فسفر و یا افزایش بردباری به تنشهای محیطی بهبود می‌بخشند (کلارک و زیتو، 2000؛ کریمی و همکاران، 2011). همچنین این قارچ‌ها با تولید هورمون‌هایی مانند اکسین، سیتوکینین و اسید آبسیزیک در تحریک رشد گیاه نقش مهمی ایفا می‌کنند (آووتوی و همکاران، 2009). قارچ‌ریشه‌های آربوسکولار با گذشت زمان به تنش فلزات سنگین سازگاری یافته و گونه‌های سازگار شده می‌توانند ابزار بیوتکنولوژی مناسبی برای گیاهان در اکوسیستم‌های آلوده باشند (سیکوارا و همکاران، 1989). نوع قارچ‌ریشه می‌تواند تأثیرات متفاوتی در جذب و پالایش فلزات سنگین داشته باشد برای مثال آووتوی و همکاران (2009) گزارش کردند که قارچ‌ریشه *R. intraradices* در جذب سرب و کادمیم توسط گیاه آفتابگردان کارایی بیش‌تری از قارچ‌ریشه *G. mosseae* دارا می‌باشد.

PGPR گروه دیگری از ریزجانداران مفید خاک می‌باشند که در شرایط مختلف از جمله آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین می‌توانند از طریق راهکارهای گوناگون از جمله تولید انواع ویتامین ها، اسیدهای آمینه، تولید آنزیم ACC دآمیناز، انحلال فسفاتهای نامحلول و تشکیل کمپلکس سیدروفور-آهن رشد و عملکرد گیاهان را بهبود ببخشند (ارشد و همکاران، 2007، ما و همکاران، 2011). هم‌چنین این باکتری‌ها موادی بنام تنظیم‌کننده‌های رشد تولید می‌کنند که به عنوان متابولیت‌های ثانویه، تأثیر مستقیم و غیر مستقیم بر مراحل فیزیولوژیک گیاهان دارند (علیپور و ملکوتی، 1382). داری و همکاران (2010) گزارش کردند که مایه زنی گیاه لوبیا با *Pseudomonas sp.* سبب افزایش زیست توده این گیاه در خاک های آلوده به سرب شد.

تحقیقات مختلفی در دنیا تأثیر مایه زنی میکروبی در افزایش جذب فلزات سنگین در گیاهان مختلف بررسی شده است اما در زمینه تأثیر مایه زنی میکروبی (PGPR و AMF به‌صورت توام) در ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهان، مخصوصاً گیاه گل‌گندم (*Centaurea cyanus*)، در خاک‌های آلوده به فلز کادمیم مطالعات چندانی انجام نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مایه‌زنی میکروبی شامل PGPR و AMF در جذب کادمیم، جذب آهن و روی، ارتفاع، عملکرد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه گل‌گندم در یک خاک آلوده به کادمیم در شرایط گلخانه بود.

مواد و روش‌ها

آماده سازی خاک مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق یک نمونه خاک از دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه نمونه‌برداری گردید. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، به دو بخش تقسیم شدند. یک بخش بعد از عبور از الک 2میلی‌متر، برخی ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (کارتر و کرگوریچ، 2008). بخش دیگر نمونه‌های خاک پس از عبور از الک 5 میلی‌متری، به گلخانه پژوهشی گروه علوم- خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، انتقال یافت.

---

1. Arbuscular Mycorrhizal Fungi
2. Plant Growth Promoting Rhizobacteria

www.SID.ir

Archive of SID

آلوده کردن خاک مورد مطالعه

برای آلوده کردن خاک، غلظت آلاینده با توجه به حدود غلظت مجاز کادمیم در خاک انتخاب شد. بنابراین، غلظت‌های کادمیم صفر، 10، 30 و 100میلی‌گرم در کیلوگرم خاک انتخاب گردید. ابتدا مقدار لازم نیترات کادمیم $Cd(NO_3)_2$ جهت آلوده کردن جرم مشخصی از خاک محاسبه شد. سپس، جرم محاسبه شده‌ی نمک به یک کیلوگرم از خاک افزوده شد و کاملاً با آن مخلوط گردید تا پیش ماده‌ای همگن بدست آید. این پیش ماده‌ی آلوده سپس به طور کامل با توده خاک مخلوط گردید. سپس خاک‌های آلوده در جعبه‌های پلاستیکی بدون زهکش در معرض دوره‌های متناوب تر و خشک شدن قرار گرفتند. در هر چرخه، خاک از آب اشباع گردید و سپس تا هوا-خشک شدن در دمای اتاق ماند. خاک‌ها در چهار چرخه به همین روش تر و خشک شدند که هر چرخه حدود 40 روز به درازا انجامید که تا حد امکان بر همکنش‌های آلاینده و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر باشد. سپس، خاک‌های آلوده با غلظت‌های یاد شده در 3 تکرار برای هر غلظت در گلدان‌هایی با ارتفاع 30 سانتی‌متر (عمق ریشه‌دوانی گیاه) ریخته شد (خداوردیلو و همکاران، 2012).

تیمارهای میکروبی

نمونه‌های خاک آلوده شده در اتوکلاو در دو نوبت در دمای 121 درجه سانتیگراد و فشار 1/5 بار در داخل کیسه‌های کنفی استریل شدند. گلدان‌ها نیز با الکل استریل سطحی شدند. خاک‌های استریل در گلدان‌هایی با ظرفیت تقریبی 2/5 کیلوگرم ریخته شدند. برای اعمال تیمارهای میکروبی، در تیمارهای مربوط به قارچ‌ریشه آربوسکولار قبل از کشت، در زیر بذرها مقدار 70 گرم از زاد مایه بصورت لایه‌ای به ضخامت تقریبی 2 سانتی‌متر اضافه شد. تیمار قارچ‌ریشه‌ای شامل ترکیبی از زاد مایه قارچ‌ریشه‌های جنس گلوموس *Glomus* و Rhizophagus از گونه‌های*G. mosseae*، *R. intraradices* و *G. fasciculatum* بودند. تعداد کل اسپورهای قارچی زادمایه، 250 اسپور در هر 50 گرم زادمایه بود. برای تیمار باکتریایی مقدار 15 میلی‌لیتر از محیط کشت مایع Nutrient Broth حاوی باکتری‌ها به گلدان‌ها تلقیح گردید. تیمار باکتریایی شامل ترکیبی از باکتری‌های جنس سودوموناس فلورسنت از سه گونه پوتیدا (*P. putida*)، فلورسنس (*P. fluorescens*) و آئروژینوزا (*P. aeruginosa*) بود که به مدت 48 ساعت در دمای 28 درجه سانتیگراد درانکوباتور در محیط کشت مایع Nutrient Broth رشد کرده بودند. جمعیت این باکتری‌ها حدود ($CFU\ ml^{-1}$) $2/6 \times 10^8$ بود. پس از اعمال تیمارها کشت گیاهان انجام شد.

کشت گیاهان و مراحل داشت

پس از رساندن رطوبت گلدان‌ها به ظرفیت زراعی و اعمال تیمارها در هر گلدان 6 تا 8 بذر (ضد عفونی سطحی شده) گیاه گل‌گندم با فواصل منظم در گلدان‌های مورد نظر کشت گردید. پس از جوانه زدن بذرها، 2-3 تا از بوته‌های سالم‌تر و قوی‌تر نگه‌داری شدند. پس از آبیاری گلدان‌ها تا حد ظرفیت زراعی، وزن هر گلدان بر روی آن یادداشت شد تا در مراحل بعدی از هر گونه تنش رطوبتی جلوگیری گردد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه با دمای حداقل 15 و حداکثر 30 درجه سانتی-گراد نگه‌داری شدند.

برداشت گیاهان و اندازه‌گیری ویژگی‌ها

در پایان ماه پنجم رشد، بخش هوایی گیاهان از رویه خاک بریده شدند. شاخساره‌های گیاهان پس از شستشو با آب مقطر، به مدت 72 ساعت در آون و در دمای 65 درجه سانتی گراد خشک شدند. سپس، نمونه‌ها برای تعیین عملکرد ماده خشک توزین و با آسیاب پودر شدند. ریشه‌های گیاهان نیز به آرامی از خاک گلدان‌ها جدا شده و پس از شستشو با آب مقطر و خشک کردن، به درون پاکت‌های کاغذی منتقل شدند. برای ارزیابی اثرات آلودگی کادمیمی خاک و مایه‌زنی میکروبی، ماده خشک گیاه، عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره آن نیز به صورت زیر محاسبه شد:

(1)

$$RY = \frac{Y_i}{Y_0}$$

که در آن RY عملکرد نسبی گیاه ، Yi عملکرد ماده خشک گیاه در هر تیمار و Y_0 عملکرد ماده خشک گیاه در شرایط بدون کادمیم و در تیمارشاهد (بدون مایه‌زنی با میکروب‌ها) (خداوردیلو و همکاران، 2011).

در این پژوهش از روش اکسیداسیون تر برای عصاره‌گیری کادمیم، آهن، مس و روی کل از گیاه استفاده شد (گیوپتا، 2000) و سپس غلظت سرب، آهن و روی با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری(Shimadzu6300 AA) اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی تأثیر تنش کادمیم در گیاه و هم چنین تأثیر PGPR وAMF در این زمینه مقادیر ویژگی‌های فیزیولوژیکی اندازه گیری‌شد. برای اندازه‌گیری مقادیر کلروفیل ها و کاروتنوئیدها (کاروتن و گزانتوفیل) از روش لیچن تالر و ولبرن (1985) استفاده شد .هم چنین برای اندازه‌گیری میزان نسبی آب برگ (RWC)، از روش

www.SID.ir

Archive of SID

یانوملو و همکاران (2003) استفاده شد و با استفاده از رابطه 2 برای محاسبه درصد RWC استفاده شد:

$$\%RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} * 100 \qquad (2)$$

که در آن FW، DW و TW به ترتیب وزن برگ تازه، وزن برگ خشک و وزن برگ پس از تورژسانس می‌باشند. (یانوملو 2003).

تجزیه آماری داده‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو فاکتور غلظت کادمیم (در چهار سطح) و تیمار میکروبی (در سه سطح) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول 1 را نشان می‌دهد. این خاک دارای بافتی متوسط pH آن در محدوده خاک‌های آهکی، کمی شور و غیرسدیمی بود. خاک مورد مطالعه با توجه به حدود مجاز گزارش شده در منابع (کارینی، 1995) غیرآلوده به فلزات سنگین بود.

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک مورد مطالعه

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
شن ($g\ kg^{-1}$)	323	سدیم محلول ($mg\ L^{-1}$)	23/8
سیلت ($g\ kg^{-1}$)	403	پتاسیم محلول ($mg\ L^{-1}$)	0/0
رس ($g\ kg^{-1}$)	274	منیزیم محلول ($mg\ L^{-1}$)	0/4
کلاس بافتی خاک	لوم	بی‌کربنات محلول ($mg\ L^{-1}$)	5/6
مواد آلی ($g\ kg^{-1}$)	26/9	کلر محلول ($mg\ L^{-1}$)	15/2
CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	22/1	سولفات محلول ($mg\ L^{-1}$)	3/8
ECe ($dS\ m^{-1}$)	2/5	کل سرب ($mg\ kg^{-1}$)	21/42
ESP (%)	3	کل کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	1/47
CCE (%)	30/5	کل آهن ($mg\ kg^{-1}$)	295/5
pH	8/1	کل روی ($mg\ kg^{-1}$)	62
کلسیم محلول ($mg\ L^{-1}$)	1/2	کل مس ($mg\ kg^{-1}$)	14/11

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ ECe: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک؛ ESP: درصد سدیم تبادلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل.

علائم ظاهری سمیت کادمیم

پس ازگذشت15روز از کاشت گیاهان، در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی درخاک، گیاه گل‌گندم درهمه تیمارها جوانه زدند. 3 هفته پس ازجوانه‌زنی بذرها علایم سمیت کادمیم در تیمار شاهد در هردو گیاه در غلظت‌های بالا (10، 30 و 100) به‌صورت کلروز و نکروزه شدن برگ‌ها به‌تدریج مشاهده شد. در تیمار PGPR، علایم سمیت به‌صورت کلروزه شدن برگ‌ها در غلظت‌های30 و 100 مشاهده شد. در تیمار AMF نیز علایم ظاهری سمیت کادمیم تنها در غلظت 100 به صورت زردی برگ‌ها مشاهده شد.

عملکرد و عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره

مقایسه میانگین مربوط به عملکرد و عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم در خاک، عملکرد و عملکرد نسبی شاخساره در تمامی تیمارها به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) کاهش یافت (جدول 2). در هر سطح از غلظت کادمیم در خاک، عملکرد و عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره در تیمارهای AMF بیش‌تر از تیمار شاهد بود ($P\leq0/05$) و

www.SID.ir

Archive of SID

میانگین عملکرد و عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره در تیمارهای AMF 2/1 برابر بیش از تیمار شاهد بود. همچنین در تمام سطوح غلظت کادمیم در خاک، مقادیر ماده خشک شاخساره در تیمار AMF بیش‌تر از تیمار PGPR بود. در سطوح بالای آلودگی کادمیم (30 و 100 میلی‌گرم در کیلوگرم) عملکرد و عملکرد نسبی ماده خشک شاخساره در تیمار PGPR به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) بیش‌تر از تیمار شاهد بدست آمد به‌طوری که در تیمار 100 میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیم عملکرد شاخساره در تیمار PGPR، 2/7 برابر تیمار شاهد بود. کاهش عملکرد با افزایش کادمیم حاکی از آن است که سمیت کادمیم سبب توقف رشد و کلروزه شدن برگ‌های، کاهش فتوسنتز و تکثیر سلولی، کاهش و توقف رشد ریشه، افزایش تولید اتیلن در گیاه و به ویژه اندوزش آن در ریشه، چوب پنبه‌ای شدن و صدمه به ساختمان خارجی و داخلی ریشه، کاهش هدایت هیدرولیکی آب در ریشه می‌شود (ملکوتی و همایی، 1383؛ وارما و همکاران، 2004). قارچ ریشه‌های آربوسکولار احتمالاً به دلیل داشتن شبکه‌ای از هیف‌ها می‌توانند جذب عناصر غذایی به ویژه فسفر را توسط گیاه افزایش دهند که در نتیجه آن با بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه، وزن خشک اندام‌های هوایی و برخی از پارامترهای رشد افزایش می‌یابد (شریفی و همکاران، 1390). همچنین PGPR می‌توانند عملکرد گیاهان را در خاک‌های آلوده به عنصر سنگین از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، تولید هورمون‌های افزاینده رشد گیاه و تأثیر بر ترشحات ریشه بیافزایند (ویواس و همکاران، 2003).

ارتفاع گیاه

با افزایش غلظت کادمیم در خاک، ارتفاع گیاه در همه تیمارها به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) کاهش یافت (جدول 2). ارتفاع گیاه در تیمارهای AMF و PGPR بطور معنی‌داری ($P\leq0/05$) بیش‌تر از تیمار شاهد بود (AMF> PGPR > شاهد). به‌عبارت دیگر کاهش طول ساقه در اثر سمیت کادمیم در گیاهان میکوریزایی و باکتریایی کمتر از گیاهان شاهد بود (جدول 2). به‌طوری که ارتفاع گیاهان در تیمار AMF، 1/8 برابر تیمار شاهد بود بنابراین می‌توان رشد بهتر گیاهان میکوریزایی را مربوط به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و دسترسی عناصر غذایی دانست، چون فسفر موجب رشد بیشتر گیاه میزبان می‌گردد (خلیقی و خارا، 1387؛ سلیسپور، 1382). افزایش فسفر احتمالاً زیست توده گیاه را افزایش داده و ممکن است اثرات سمی فلز را با رقیق کردن، ته نشین کردن یا جذب سطحی فلز روی گرانول‌های پلی فسفات کاهش دهد (وگل میکوس و همکاران، 2005). همچنین باکتری‌های حاوی آنزیم تجزیه کننده پیش ساز اتیلن (ACC)، با مصرف این ماده تولید اتیلن را کاهش داده و از این طریق رشد گیاه را می‌افزایند. استفاده از باکتری‌های محرک رشد که قابلیت تولید آنزیم ACC دآمیناز دارند مانند سودوموناس‌ها، با تأثیری که بر کاهش سطح اتیلن ناشی از تنش فلزات سنگین در گیاه می‌گذارند و همچنین با تولید سیدروفورهای میکروبی و ترکیبات متابولیت، می‌توانند در رشدگیاه بسیار مفید باشند (ابوشنب و همکاران، 2006).

تنفس پایه میکروبی

با افزایش غلظت کادمیم در خاک تنفس میکروبی پایه در ریزوسفر گیاه به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) کاهش یافت (جدول 2). میانگین تنفس پایه میکروبی در تیمارهای PGPR و AMF به ترتیب 1/8 و 1/7 برابر بیش از تیمار شاهد بود. همچنین تنفس میکروبی در تمامی سطوح کادمیم، بین تیمار AMF و PGPR اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. گیاهان تلقیح باکتریایی و میکوریزی به طور مؤثر و معنی‌داری میانگین تنفس پایه را افزایش دادند که علت آن را می‌توان به فعالیت بیشتر ریز جانداران خاک نسبت داد (جدول 4-4). لی و بنکس (1993) گزارش کردند فراوانی جمعیت میکروبی در حضور ریشه‌های گیاه، بیشتر از شرایط بدون حضورریشه می‌باشد که نشان می‌دهد در خاک‌های آلوده ریشه گیاه با ترشحات خود (کربوهیدرات‌ها، آمینو اسیدها، ویتامین‌های ضروری و غیره) جمعیت میکروبی را افزایش می‌دهد.

مقادیر کلروفیل‌ها و کاروتنوئید

مقادیر کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید در گیاهان تلقیحی و غیر تلقیحی با افزایش غلظت کادمیم در خاک، کاهش معنی‌داری داشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم در خاک، در همه تیمارها مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) کاهش یافت (جدول 3). از جمله دلایل این کاهش ممکن است به دلیل جایگزین شدن یون منیزیم مرکزی کلروفیل بوسیله فلزات سنگین باشد که باعث جلوگیری از به دام انداختن نور فتوسنتزی و در نتیجه از بین رفتن کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌شود (پراساد و استرازالکا، 1999). باکر و پروکتور (1990) نشان دادند که مقدار کلروفیل تابعی از غلظت کادمیم در بافت‌های گیاهی است لذا از غلظت کلروفیل به عنوان شاخصی جهت تعیین حد سمیت کادمیم در گیاهان استفاده می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 2- مقایسه میانگین ارتفاع، عملکرد و عملکرد نسبی شاخساره و تنفس پایه در سطوح مختلف در سطوح مختلف کادمیم در خاک در تیمارهای شاهد، PGPR و AMF

کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	شاهد	PGPR	AMF
	عملکرد شاخساره($g\ pot^{-1}$)		
0	0/87±0/19^{b,a}	1/35±0/29^{a,a}	1/45±0/50^{a,a}
10	0/52±0/09^{b,b}	0/32±0/03^{c,b}	0/99±0/05^{a,ab}
30	0/16±0/03^{b,c}	0/25±0/02^{b,b}	0/59±0/07^{a,bc}
100	0/09±0/01^{c,c}	0/25±0/04^{b,b}	0/40±0/04^{a,c}
	عملکرد نسبی شاخساره گیاه (g pot-1)		
0	1/00±0/00^{b,a}	1/55±0/08^{a,a}	1/64±0/19^{a,a}
10	0/62±0/19^{b,b}	0/39±0/11^{b,b}	1/18±0/27^{a,b}
30	0/19±0/06^{b,c}	0/30±0/06^{b,b}	0/70±0/20^{a,c}
100	0/10±0/03^{c,c}	0/29±0/06^{b,b}	0/47±0/06^{a,c}
	ارتفاع (سانتیمتر)		
0	10/7±2/3^{a,a}	12/8±0/8^{a,a}	13/8±0/3^{a,a}
10	7/3±2/1^{c,a}	10/2±0/3^{b,b}	13/3±0/6^{a,a}
30	3/5±0/5^{b,b}	5/00±1/5^{b,c}	9/8±0/8^{a,b}
100	3/7±0/6^{b,b}	3/50±0/9^{b,c}	9/7±0/6^{a,b}
	میانگین تنفس پایه (mgCO2 day-1/kg soil)		
0	158/2±3^{a,a}	176/8±2^{a,a}	165/5±7^{a,a}
10	94/3±8^{b,b}	160±12^{a,b}	149±11^{a,b}
30	38/4±3^{b,c}	128 ±6^{a,c}	124/5±4^{a,c}
100	22 ±3^{b,d}	88±1^{a,d}	84±3^{a,d}

حروف بالانویس اول و دوم بر روی هر عدد به ترتیب نشان دهنده اختلاف آماری در سطح احتمال 5 درصد در هر ردیف و هر ستون می‌باشند. میانگین های دارای حروف مشترک براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری آماری در سطح احتمال 5 درصد ندارند. اعداد مقابل داده‌ها انحراف معیار داده‌ها در 3 تکرار را نشان می‌دهند.

همچنین حقیری (1973) گزارش کرد که غلظت زیاد کادمیم در محیط رشد جذب آهن توسط گیاه را مختل و سمیت کادمیم بر فرآیندهای اصلی گیاه نظیر فتوسنتز، تکثیر سلولی و جذب آب توسط ریشه‌های گیاهان اثر می‌گذارد. مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی در تمامی غلظت‌های کادمیم بدین ترتیب بود: AMF>PGPR> شاهد. مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی در تیمارهای AMF و PGPR در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری ($P\leq 0/05$) بیش‌تر بود. به‌طوری‌که میانگین کلروفیل کل در تیمارهای AMF و PGPR به ترتیب 2/2 و 1/3 برابر بیش از تیمار شاهد و کاروتنوئید در تیمارهای AMF و PGPR به ترتیب 2/4 و 2 برابر بیش از تیمار شاهد بدست آمد. کاهش مقدار کاروتنوئیدها در مقایسه با تیمار شاهد احتمالاً به دلیل فروپاشی ساختار آن ها در اثر سمیت کادمیم بود (پراساد و استرازالکا، 1999، شارما و دیوبی، 2005). از طرف دیگر بیش تر بودن کلروفیل ها و کاروتنوئیدها در تیمارهای AMF و PGPR نسبت به تیمار شاهد، احتمالاً به دلیل افزایش جذب عناصر غذایی مؤثر در فتوسنتز و تولید کلروفیل به ویژه فسفر و در نتیجه فراهم نمودن فسفر به عنوان حامل انرژی در فتوسنتز و هم چنین افزایش جذب منیزیم و آهن باشد (دمیر، 2004). همچنین دمیر (2004) بیان داشتند که محتوای کلروفیل گیاهان فلفل همزیست با قارچ *R .intraradices* در مقایسه با گیاهان کنترل غیر میکوریزای بالاتر بود همچنین در گیاهان میکوریزایی، هیف‌های قارچی قادرند با نگهداری فلز در خود و عدم انتقال آن به سیستم گیاه باعث کاهش سمیت فلز سنگین شوند (هورست، 2004). سمیت کادمیم به طور کلی شامل اختلال در متابولیسم عناصر کم مصرف، نسبت دی اکسید کربن و تعرق، کاهش مقاومت در مقابل بیماری‌ها، کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

جذب عناصر غذایی توسط گیاه، کاهش تعرق، کاهش راندمان آب مصرفی، ممانعت از فتوسنتز و کاهش نفوذ پذیری دیواره سلولی می‌شود (کاباتا پندیاس، 1993). نتایج مشابهی توسط خداوردیلو و همکاران (1392) در یک خاک آلوده به سرب به همراه تیمار میکروبی بر گیاه گل‌گندم بدست آمد. همچنین گرگر و همکاران (1991) کاهش میزان کلروفیل و نیز فتوسنتز در اثر افزایش غلظت کادمیم در گیاه چغندر قند را گزارش کردند.

شاخص محتوای نسبی آب برگ

با افزایش غلظت کادمیم مقدار RWC در گیاه در همه تیمارها کاهش یافت. هرچند این کاهش در تیمارهای AMF و PGPR معنی‌دار ($P\leq0/05$) نبود (جدول 3) که دلیل آن را می‌توان به غلظت بیش‌ترکادمیم و در نتیجه سمیت ناشی از آن نسبت داد. در سطح بالای کادمیم اضافه شده (100 میلی‌گرم بر کیلوگرم) مقدار RWC در تیمارهای AMF و PGPR نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) بیش‌تر بود. گزارشاتی مبنی بر ایجاد اختلال در جذب آب توسط کادمیم وجود دارد که نتیجه آن کاهش فشار تورگر است. این کاهش همراه با کاهش قابلیت ارتجاعی دیواره سلول باعث کوچک شدن سلول‌ها و کاهش فضای بین سلولی در گیاهان تحت تنش با کادمیم می‌باشد (واسیلو و یوردانو، 1997). نتایج مطالعات نشان داده که PGPR وAMF می توانند با کاهش مقدار اتیلن و توسعه سیستم ریشه ای گیاه، جذب آب و ظرفیت نگه داری آب توسط گیاه را در خاک های آلوده به عناصر سنگین بیافزایند (ژانگ و همکاران،2010).

مقدار RWC در تیمارهای AMF و PGPR با افزایش غلظت کادمیم کاهش معنی‌داری ($P\leq0/05$) پیدا نکرد این در حالی است که مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی در این شرایط کاهش معنی‌داری ($P\leq0/05$) داشت. این نتایج نشان می‌دهد در شرایط آلودگی کادمیم در خاک، مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه بیش‌تر از مقدار آب برگ‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر در مورد افزایش محتوای نسبی آب برگ به کمک قارچ‌ریشه آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد در شرایط شور گزارش شده است (شیر مردی و همکاران، 1389).

غلظت کادمیم

با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت کادمیم در شاخساره گیاه گل‌گندم به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) افزایش یافت (جدول 4). غلظت کادمیم در شاخساره گیاه گل‌گندم در غلظت 10 میلی‌گرم کادمیم در تیمارهای مختلف بدین‌ترتیب بود: AMF<PGPR<شاهد. ولی در غلظت 30 میلی‌گرم کادمیم به صورت PGPR< شاهد <AMF بود. نوع جمعیت میکروبی (قارچ‌ریشه‌ها و PGPRها) می‌توانند تاثیراتی متفاوت بر جذب و انتقال فلزات سنگین داشته باشد (کالدروف و همکاران، 1999). تلقیح میکوریزی جذب فلزات سنگین توسط گیاه میزبان را تحت تأثیر قرار می‌دهد ولی نتایج متناقض هستند (لیوال و همکاران، 1997). غلظت فلزات در خاک نیز می‌تواند تأثیراتی متفاوت بر جذب و انتقال فلزات سنگین داشته باشد (دییاز و همکاران، 1996). نوع گیاه نیز می‌تواند تأثیراتی متفاوت بر جذب و انتقال فلزات سنگین داشته باشد (مالکووا و همکاران، 2003). هوانگ و همکاران (2005) با بررسی تأثیر قارچ میکوریز آربوسکولار بر جذب فلزات سنگین توسط ذرت بیان داشتند که قارچ‌ریشه‌ها می‌توانند از گیاهان عالی در مقابل سمیت و غلظت بیش از حد فلز سنگین به کمک تغییر شکل دادن آن‌ها از فرم قابل دسترس به فرم غیر قابل دسترس محافظت کنند.

در سطوح بالای آلودگی فلزات سنگینی با وظایف فیزیولوژیکی ناشناخته مانند کادمیم، کروم و یا سرب، تلقیح قارچ‌ریشه‌ای سبب کاهش غلظت فلزات سنگین (کالپرت و وان اسچی، 1987، یو و همکاران، 2005) در بافت‌های گیاهی گزارش شده است. برخی محققان معتقدند که گونه‌های قارچ‌ریشه هم در این زمینه ممکن است اثرات متفاوتی داشته باشند به‌عنوان مثال خان و همکاران (2000) گزارش کردند که در غلظت‌های کمتر فلزات سنگین در خاک، گیاهان دارای قارچ‌ریشه‌ها دارای غلظت بیشتر از گیاهان فاقد قارچ‌ریشه‌ها بودند، اما در غلظت‌های بالاتر، غلظت فلزات در گیاهان تلقیح شده با *Glomus mosseae* پایین‌تر از گیاهان شاهد بود، در حالی که گیاهان تلقیح شده با *Glomus macrocarpam* سطوح برابر یا حتی بالاتر از شاهد داشتند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 3- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه در سطوح مختلف کادمیم در خاک در تیمارهای شاهد، PGPR و AMF

کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	شاهد	PGPR	AMF
	کلروفیل a (mg g-1FW)		
0	3/08±0/75^{a,a}	3/35±0/75^{a,a}	3/86±0/45^{a,a}
10	1/70±0/23^{b,b}	2/29±0/17^{ab,b}	2/76±0/34^{a,b}
30	0/88±0/08^{c,bc}	2/09±0/04^{b,b}	3/03±0/56^{a,ab}
100	0/62±0/04^{c,c}	1/93±0/07^{b,b}	2/61±0/23^{a,c}
	کلروفیلb ($mg\ g^{-1}FW$)		
0	2/19±0/31^{b,a}	2/29±0/60^{b,a}	3/19±0/56^{a,a}
10	1/65±0/34^{b,b}	1/76±0/14^{b,ab}	3/38±0/16^{a,a}
30	0/83±0/05^{b,c}	1/12±0/03^{b,bc}	3/16±0/31^{a,a}
100	0/52±0/04^{b,c}	0/64±0/15^{b,c}	2/95±0/04^{a,a}
	کلروفیل کل ($mg\ g^{-1}FW$)		
0	5/27±0/54^{a,a}	5/64±1/23^{a,a}	7/05±0/97^{a,a}
10	3/35±0/51^{b,b}	4/05±0/30^{b,b}	6/14±0/26^{a,ab}
30	1/71±0/11^{c,c}	3/20±0/07^{b,bc}	6/19±0/37^{a,ab}
100	1/14±0/07^{c,c}	2/57±0/17^{b,c}	5/56±0/23^{a,b}
	کاروتنوئید ($mg\ g^{-1}FW$)		
0	0/74±0/06^{a,a}	1/19±0/44^{a,a}	1/33±0/28^{a,a}
10	0/55±0/27^{b,ab}	1/04±0/18^{a,a}	1/14±0/20^{a,a}
30	0/34±0/04^{c,b}	0/76±0/21^{b,a}	1/12±0/10^{a,a}
100	0/29±0/03^{c,b}	0/87±0/06^{b,a}	1/11±0/02^{a,a}
	RWC (درصد)		
0	79/0±7/3^{a,a}	79/3±4/2^{a,a}	81/6±7/6^{a,a}
10	78/0±4/6^{a,ab}	75/0±13/9^{a,a}	85/7±7/0^{a,a}
30	69/0±3/4^{a,ab}	66/0±8/6^{a,a}	79/0±3/6^{a,a}
100	63/5±4/7^{a,b}	80/0±4/2^{a,a}	81/0±7/2^{a,a}

حروف بالانویس اول و دوم بر روی هر عدد به‌ترتیب نشان دهنده اختلاف آماری در سطح احتمال 5 درصد در هر ردیف و هر ستون می‌باشند. میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی-داری آماری در سطح احتمال 5درصد ندارند. اعداد مقابل داده‌ها انحراف معیار داده‌ها در 3 تکرار را نشان می‌دهند.

باکتری‌های محرک رشد با ترشح انواعی از آنتی بیوتیک‌ها، حل‌کننده‌های فسفات، هیدرو سیانیک، ایندول استیک اسید، سیدروفور، آمینو سیکلوپروپان کربوکسیلیک اسید دآمیناز زیست فراهمی و ظرفیت جذب ریشه‌ای فلزاتی مانند آهن (کروولی و همکاران، 1991)، منگنز (باربر و لی، 1974) و فلزاتی غیر ضروری مانند کادمیم (سالت و همکاران، 1995) را افزایش می‌دهند. بلیموو و همکاران (2002) بیان کردند که تلقیح باکتری‌های محرک رشد گیاه به محیط رشد گیاه کلم روغنی موجب تحریک رشد گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی در خاک آلوده به کادمیم می‌شود و گیاهان تلقیح یافته دارای میزان کادمیم بیشتری در بافت‌های خود نسبت به گیاهان شاهد بودند. با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت کادمیم در ریشه گیاه گل‌گندم در همه‌ی تیمارها به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) افزایش یافت (جدول 4). غلظت کادمیم در ریشه گل‌گندم در تمامی سطوح کادمیم در خاک، در تیمارهای AMF و PGPR به‌طور معنی‌داری ($P\leq0/05$) بیش‌تر از تیمار شاهد بود. غلظت کادمیم در ریشه نیز در تیمارهای مختلف به‌صورت AMF<PGPR> شاهد بود.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 4- مقایسه میانگین غلظت کادمیم شاخساره، ریشه و غلظت آهن، روی و مس در شاخساره در سطوح مختلف کادمیم در خاک در تیمارهای شاهد، PGPR و AMF

کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	شاهد	PGPR	AMF
	غلظت کادمیم شاخساره ($mg\ kg^{-1}$)		
0	50/4±1^{a,b,c}	56/4±1^{a,d}	42/6±4^{b,c}
10	485/0±78^{b,b}	765/5±198^{a,c}	717/9±48^{a,b}
30	923/1±89^{a,a}	1325/0±177^{a,b}	805/7±66^{a,b}
100	-	1636/9±47^{a,a}	1047/3±187^{b,a}
	غلظت کادمیم در ریشه ($mg\ kg^{-1}$)		
0	1/70±0/2^{a,c}	1/52±0/01^{a,d}	0/83±0/1^{b,d}
10	57/00±7^{a,b}	87/14±8^{a,c}	72/55±4^{b,c}
30	98/76±7^{b,a}	123/46±5^{a,b}	115/60±4^{c,b}
100	134/56±10	265/48±8^{a,a}	188/05±3^{b,a}
	غلظت آهن شاخساره ($mg\ kg^{-1}$)		
0	113/0±19/7^{b,a}	197/5±18/9^{a,a}	194/0±4/6^{a,a}
10	76/2±11/3^{b,b}	118/1±11/9^{a,b}	91/6±5/1^{ab,b}
30	40/5±7/2^{b,c}	90/9±7/0^{a,bc}	85/9±12/2^{a,b}
100	24/4±13/6^{b,c}	81/5±3/5^{a,c}	86/8±2/3^{a,b}
	غلظت روی شاخساره ($mg\ kg^{-1}$)		
0	26/3±2/0^{b,a}	34/0±2/6^{a,a}	34/0±3/1^{a,a}
10	24/0±0/8^{b,a}	31/2±4/3^{ab,ab}	32/8±4/3^{a,a}
30	18/1±4/5^{b,a}	30/6±2/8^{a,ab}	27/3±6/6^{a,a}
100	2/2±0/3^{b,b}	24/9±2/2^{a,b}	26/7±7/0^{a,a}
	غلظت مس شاخساره (mg kg-1)		
0	6/1±0/6^{a,a}	8/4±0/9^{a,a}	8/3±4/7^{a,a}
10	4/4±0/6^{b,ab}	7/1±0/7^{ab,ab}	8/6±1/2^{a,a}
30	3/9±0/6^{a,b}	5/0±0/9^{a,b}	6/0±0/8^{a,ab}
100	0/8±0/1^{a,c}	2/0±1/1^{a,c}	2/6±0/5^{a,b}

حروف بالانویس اول و دوم بر روی هر عدد به‌ترتیب نشان دهنده اختلاف آماری در سطح احتمال 5 درصد در هر ردیف و هر ستون می‌باشند. میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون چنددامنه‌ی دانکن اختلاف معنی‌داری آماری در سطح احتمال 5 درصد ندارند. اعداد مقابل داده‌ها انحراف معیار داده‌ها در 3 تکرار را نشان می‌دهند.

دلیل بیش‌تر بودن غلظت کادمیم در ریشه‌های گیاهان در تیمار PGPR نسبت به تیمارهای AMF و شاهد، احتمالاً مربوط به بیش‌تر بودن زیست‌فراهمی کادمیم در تیمار PGPR باشد. معلوم شده است گیاهان پاپیروس تلقیح یافته با باکتری‌های محرک رشد در خاک آلوده به سلنیوم، 80-70% سلنیوم در ریشه و 60-40% سلنیوم در اندام‌های هوایی خود تجمع می‌دهند (دسوزا و همکاران، 1999). همچنین گزارش شده است حجم زیادی از فلزات در اسپورها و ساختمان قارچ‌ریشه و باکتری‌های محرک رشد گیاه انباشته می‌شود. برای مثال غلظت بیش از 1200 میلی‌گرم بر کیلوگرم از فلز روی در بافت‌های قارچ‌ریشه *G.mosseae* و بیش از 600 میلی‌گرم بر کیلوگرم در بافت‌های قارچ‌ریشه *G.versiforme* گزارش شده است (چن و همکاران، 2006). تورنائو و همکاران نیز گزارش کردند که حجم بسیار زیادی از کادمیم در ساختمان قارچی نسبت به سلول‌های گیاه میزبان تجمع می‌یابد (تورنائو و همکاران، 1993).

غلظت روی، آهن و مس

با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت آهن، روی و مس در شاخساره‌ی گیاه کاهش معنی‌داری ($P\leq0/05$) نشان داد (جدول 4). میانگین غلظت آهن در تیمارهای AMF و PGPR به ترتیب 1/8 و 1/9 برابر بیش از تیمار شاهد بود در حالی‌که میانگین غلظت روی در هر دو تیمار میکروبی تقریباً برابر و حدود 1/7 برابر بیش از

www.SID.ir

Archive of SID

تیمار شاهد و میانگین غلظت مس در تیمارهای AMF و PGPR به ترتیب 1/7 و 1/5 برابر بیش از تیمار شاهد بدست آمد. اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای PGPR و AMF در غلظت این عناصر در شاخساره گیاه، در هیچ یک از سطوح تیمارهای کادمیم وجود نداشت. غلظت‌های بالای کادمیم سبب اختلال در فرآیندهای فتوسنتز، تنفس، متابولیسم، تعادل آبی گیاه به دلیل کاهش اندازه و تعداد آوندهای چوبی و کاهش جذب عناصر غذایی ضروری همانند آهن، مس و روی می‌شود (گوگورسنا و همکاران، 2002؛ لارسون و همکاران، 1998). باکتری‌های محرک رشد با ترشح انواعی از آنتی بیوتیک‌ها، حل‌کننده‌های فسفات، هیدرو سیانیک، اسید ایندول استیک، سیدروفور، آمینو سیکلوپروپان کربوکسیلیک اسید دآمیناز زیست فراهمی و ظرفیت جذب ریشه‌ای عناصر کم‌مصرف را افزایش می‌دهند (کروولی و همکاران، 1991؛ باربر و لی، 1974). بلیموو و همکاران (2002) بیان کردند که تلقیح باکتری‌های محرک رشد گیاه به محیط رشد گیاه کلم روغنی موجب تحریک رشد گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی در خاک آلوده به کادمیم گردید. قارچ‌های میکوریزی هم با تولید هورمون‌های رشد مثل اکسین، سیتوکینین و ترشح سیدروفورها، افزایش سطح جذب و کلاته کردن عناصر، می‌توانند جذب و انتقال عناصر به گیاهان را افزایش دهند. پایین بودن میزان مس در خاک و همچنین ضریب پخشیدگی کم این عنصر سبب شده تا گیاهان میکوریزی بتوانند با مکانیسم‌های خاص خود (اشاره شده در بالا) در رقابت بهتر عمل کنند و میزان مس در این گیاهان بالاتر باشد (مارشنر و دل 1994).

فهرست منابع:

1. خلیقی، ا. و خارا، ج. 1387. تأثیر قارچ میکوریزای آربوسکولار بر روی تنش اکسیداتیو و برخی پارامترهای رشدی و فیزیولوژی در گیاه گندم رقم آذر 2 تحت سمیت کادمیم. مجله زیست‌شناسی ایران 21: 216-230.
2. خداوردی لو، ح. رسولی صدقیانی، م.ح. و کریمی، ا. 1392. تأثیر مایه زنی میکروبی یک خاک آلوده به سرب بر رشد، برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و جذب و انتقال سرب، آهن و روی توسط گل گندم (*Centaurea cyanus*). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار 3: 75- 93.
3. سلیسپور، م. 1382. مطالعه مزرعه‌ای اثر بخشی کودهای میکروبی فسفاته حاوی میکروارگانیزم‌های حل کننده فسفات بر عملکرد کمی و کیفی ذرت. سومین همایش ملی توسعه کاربرد مواد بیولوژیک و استفاده از کود و سم در کشاورزی، 4-2 اسفند، تهران.
4. شریفی، م. سادات محتشمیان، م. ریاحی، ح. و علوی، س .م. 1390. اثر قارچ اندومیکوریزایی *Glomus etunicatum* بر برخی شاخص‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه ریحان .فصلنامه گیاهان دارویی 10: 85 -94.
5. شیر مردی، م. ثواقبی، غ. خاوازی، ک. فرحبخش، م. رجالی، ف. و سادات، ع. 1389. بررسی برهمکنش قارچ میکوریز و باکتری سودوموناس بر پتانسیل آب برگ و عملکرد دو رقم آفتابگردان در یک خاک شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران 41: 221-228.
6. کاظم علیلو، س. و رسولی صدقیانی، م.ح. 1391. اثر آلودگی کادمیمی خاک بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه بنگدانه (*Hyoscyamus niger* L) در حضور و عدم حضور ریزجانداران محرک رشد گیاه. مجله دانش آب و خاک 22: 30-17.
7. علیپور، ز. و ملکوتی، م. 1382. نقش باکتری‌های محرک رشد در رشد و سلامت گیاه. نشریه فنی شماره 309، موسسه تحقیقات آب و خاک، 12 صفحه.
8. ملکوتی، م.ج. و همایی، م. 1383. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک با بازنگری کامل. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. تهران. ایران.
9. Abou-Shanab, R.A. Angle, J.S. and Ghaney, R.L. 2006. Bacterial inoculants affecting nickel uptake by Alyssum murale from low, moderate and high Ni soils. Soil Biology and Biochemistry 38: 2886-2889.
10. Arshad, M. Saleem, M. and Hussain, S. 2007. Perspectives of bacterial ACC deaminase inphytoremediation. Trends Biotechnology 25: 356–362.

www.SID.ir

Archive of SID

11. Awotoye, O.O. Adewole, M.B. Salami, A.O. and Ohiembor, M.O. 2009. Arbuscular mycorrhiza contribution to the growth performance and heavy metal uptake of Helianthusannuus LINN in pot culture. African Journal Environment Science and Technology 3: 157-163.
12. Baker, A.J. and Proctor, J. 1990. The influence of cadmium, copper lead and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in the British Isles. Plant Systematics and Evolution 173:91-108.
13. Barber, S.A. and Lee, R.B. 1974.The effect of microorganisms on the absorption of manganese by plants. New Phytologist 73(1): 97-106.
14. Belimov, A.A. Sarfronova, V.I. and Mimura, T. 2002. Response of spring rape to inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria containing 1-aminocyclipropane-1-carboxylate deaminase depends on nutrient status of the plant, Canadian Journal of Microbiology 48(3):189-99.
15. Biro, B. Bayoumi, H. E. Balazsy, S. and Kecskes, M. 1995, Metal sensitivity of some symbiotic N2-fixing bacteria and Pseudomonas strains. Acta Biology Hungria 46:9-16.
16. Cariny, T. 1995. The Reuse of Contaminated Land.JohnWiley and Sons Ltd. Publisher, Pp: 219.
17. Carter, M.R. and Gregorich, E.G. 2008. Soil Sampling and Methods of Analysis (2nd ed). CRC Press.Boca Raton, FL. P.1204.
18. Chen, Y. Zhu, G. and Smith, F.A. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on uranium and arsenic accumulation by Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) from a uranium mining-impacted soil. Chemosphere 62:1464-1473.
19. Clark, R.B. and Zeto, S.K. 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. Journal Plant Nutrition 23: 867-902.
20. Colpaert, J.V. and van Assche, J.A. 1987. Heavy metal resistance in some ectomycorrhizal fungi. Functional Ecology 1: 415-421.
21. Crowley, D.E. Wang, Y.C. Reid, C.P.P. and Szansiszlo, P.J. 1991. Mechanism of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants.Plant and Soil 130 (1-2): 179-198.
22. Dary, M. Chamber-Pérez, M.A. Palomares, A.J. and Pajuelo, E. 2010. In situ phytostabilisation of heavy metal polluted soils using Lupinus luteus inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria. Journal of Hazardous Materials 177: 323-330.
23. Das, P. Samantaray, S. and Routm, G. R. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. Environmental Pollution 98: 29–36.
24. De Souza, M.P. Huang, C.P. Chee, N. and Terry, N. 1999. Rhizosphere bacteria enhance the accumulation of selenium and mercury in wetland plants. Planta 209 (2): 259-263.
25. Demir, S. 2004. Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. Turkish Journal of Biology 28: 85-90.
26. Diaz, G. Azcon-Aguilar, C. and Honrubia, M. 1996. Influence of arbuscular mycorrihza on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of Lygedum spartum and Anthyllis cytisoides. Plant and Soil 180: 241-249.
27. Gogorcena, Y. Lucena, J.J. and Abadia, J. 2002. Effects of Cd and Pb in sugar beets plants grown in nutrient solution: Induced Fe deficiency and growth inhibition**.** Functional Plant Biology 29: 1453-1464.
28. Greger, M. and Ogren, E.1991. Direct and indirect effects of Cd on photosynthesis in sugar beet (Beta vulgaris).Physiologia Plantarum 83: 129-135.
29. Gupta, R.K. 2000.Soil, plant, water and fertilizer analysis.Agrobios, New Delhi, India. Pp: 438.
30. Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. Journal of Environmental Quality 2: 93-96.

www.SID.ir

Archive of SID

31. Horst, V. 2004. Further root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in already mycorrhizal plants in suppressed after a critical level of root colonization. Journal of Plant Physiology 161: 339-341.
32. Huang, Y. tao, S.A. 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: 276-280.
33. Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 1993. Biogeochemistry of trace elements. Wyd, Warszawa: 363. (In polish).
34. Kaldorf, M. Kuhn, A.J. Schröder, W.H. Hildebrandt, U. and Bothe, H. 1999. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. Journal Plant Physiology 154: 718-728.
35. Karami, A. and Zulkifli, H.S.H. 2010. Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods. African Journal of Biotechnology 9: 3689-3698.
36. Karimi, A. Khodaverdiloo, H. Sepehri, M., and Rasouli Sadaghiani, M.H. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal contaminated soils. African Journal of Microbiology Research 5: 1571-1576.
37. Khan, A.G. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace element contaminated soils in phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 18: 355-364.
38. Khan, A. G., Kuek, C. Chaudhry, T. M. Khoo, C. S. and Hayes, W. J. 2000. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. Chemosphere 41:197–207.
39. Khodaverdiloo, H. Rahmanian, M. Rezapour, S. Ghorbani Dashtaki, S.h. Hadi, H. and Han, F.X. 2012. Effect of wetting-drying cycles on redistribution of lead in some semi-arid zone soils spiked with a lead salt. Pedosphere 22: 304–313.
40. Khodaverdiloo, H.S. Ghorbani, h. Dashtaki, S.h. and Rezapour, S. 2011. Lead and cadmium accumulation potential and toxicity threshold determined for land cress (*Barbarea verna*) and spinach (*Spinacia oleracea* L.). International Journal of Plant Production 5: 275-281.
41. Larsson, E.H. Bornman, J.F. and ASP, H.1998. Influence of UV-B radiation and cadmium on chlorophyll flurescence Brassica napus.Journal of experimental Botany 49: 1031-1039.
42. Lee, E. and Banks, M.K. 1993. Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation: A microbial study, Journal of Environmental Science and Health 28: 2187.
43. Leyval, C. Turnau, K.and Haselwandter, R. 1997. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. Mycorrhiza 7: 139-153.
44. Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R.1985. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf in different solvents. Biology Society Trans 11: 591-592.
45. Ma, Y. Prasad, M.N.V. Rajkumar, M. and Freitas, H. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. Biotechnology Advances 29: 248–258.
46. Malcová, R. Rydlová, J. and Vosátka, M. 2003. Metal-free cultivation of *Glomus sp*. BEG 140 isolated from Mn-contaminated soil reduces tolerance to Mn. Mycorrhiza 13: 151-157.
47. Marschner, H. and Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis.Plant and Soil 159: 89-102.
48. Prasad, M. and Strazalka, K. 1999. Impact of heavy metals on phytosyntesis. Journal of Experimental Botany 41: 314-320.
49. Salt, D.E. Blaylock, M.N. Kumar, P.B.A. Dushenkov, V. Ensley, B.D. Chet, I. and Raskin I. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Nature Biotechnology 13: 468 – 474.

www.SID.ir

Archive of SID

50. Sanita, D.I. Toppi, L. and Gabbrielli, R. 1999. Response to cadmium in higher plants: A review. Environ. Experimental Botany 4: 105–130.
51. Sharma, P. and Dubey, R.S. 2005. Lead Toxicity in plants. Plant Physiology.17: 35-52.
52. Siqueira, J.O. Colozzi-Filho, A. and Oliverira, E. 1989. Occurencia de micorrizas vesiculo arbusculares emagro ecossistemas naturais do estado de minas gerais. Pasquisa Agropecuaria Brasileira 24: 1499-1506.
53. Turnau, K. Kottke, I. and Oberwinkler, F.1993. Element localization in mycorrhizal roots of *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn collected from experimental plots treated with cadmium dust. New Phytologist 123: 313-324.
54. Vassilev, A. and Yordanov, I. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmiumtreated plants–review.Plant Physiology 23: 114-133.
55. Verma, P. George K.V. Singh, H.V. and Singh, R.N. 2004. Modeling cadmium accumulation in radish, carrot, spinach and cabbage. National Geophysical Research Institute, Uppal Road, Hydrabad, India.1652-1661.
56. Verma, S. and Dubey, R. S. 2001. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. Biology Plant 44: 117-123.
57. Vivas, A. Biro, B. Campos, E. Barea, J. M. and Azcon, R. 2003. Symbiotic efficiency of autochthonous arbuscular mycorrhizal fungus (*G. mosseae*) and Brevibacillussp. isolated from cadmium polluted soil under increasing cadmium levels. Environmental Pollution 126:179-189.
58. Vogel-Mikus, K. Drobne, D. and Regvar, M. 2005. Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonization of pennycress (*Thlaspi praecox*) from the vicinity of a lead mine and smelter Slovenia. Environmental Pollution 133: 233-242.
59. Yano-Melo, A.M. Saggin, O.J. and Maia, L.C. 2003. Tolerance of mycorrhized banana (*Musa sp*. cv. Pacovan) plant lets to saline stress. Agriculture, Ecosystems and Environment 95: 343–348.
60. Yu, X. Cheng, J. and Wong, M.H. 2005. Earthworm-mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass.Soil Biology Biochemestery 37: 195-201.
61. Zhang, H.H. Tang, M. and Zheng, C. 2010. Effect of inoculation with AM fungi on lead uptake, translocation and stress alleviation of *Zea mays* L. seedlings planting in soil with increasing lead concentrations. European Journal of Soil Biology 46: 306-311.

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir