نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹٤
http://ejsms.gau.ac.ir

تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری و کادمیم خاک در جذب کادمیم توسط گندم و سورگوم

گلاره خانبلوکی[۱]، *حسین میرسید حسینی[۲] و بابک متشرع‌زاده[۲]
[۱]دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، [۲]دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۱

چکیده

سابقه و هدف: یکی از عواقب رشد و توسعه صنعتی، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری از حدود ۲۸۰ میکرولیتر در لیتر به ۳۶۷ میکرولیتر در لیتر در پایان قرن بیستم بوده است. مطالعات زیادی تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر گیاهان را بررسی نموده‌اند. بالا رفتن سطوح دی‌اکسیدکربن اتمسفری و افزایش غلظت فلزات سنگین در اراضی کشاورزی علاوه بر تأثیر بر رشد و توسعه گیاهان می‌تواند از طریق زنجیره غذایی نیز اثرات سوء‌ی بر سلامت انسان داشته باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف دی‌اکسیدکربن و کادمیم در جذب کادمیم و رشد گندم و سورگوم اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح اسپلیت فاکتوریل با استفاده از گلدان‌هایی حاوی ۳/۵ کیلوگرم خاک اجرا شد. تیمارها شامل ۴ سطح کادمیم (۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) (از نمک نیترات کادمیم) و ۲ سطح دی‌اکسیدکربن (۹۰۰ و ۴۰۰ میکرولیتر در لیتر) بود. میزان جذب کادمیم در اندام‌های هوایی و ریشه دو گیاه گندم و سورگوم، همچنین شاخص‌های مختلف گیاه‌پالایی برای دو گیاه محاسبه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد در تیمارهای مختلف کادمیم، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گندم حداکثر ۲۶ و ۱۷ درصد افزایش یافت. در مورد سورگوم این افزایش حداکثر ۱۸ و ۱۳ درصد بود. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تأثیری بر جذب کادمیم در گندم نداشت ولی در سورگوم موجب افزایش ۳۷ تا ۴۴ درصد جذب در اندام هوایی و ۲۶ تا ۳۷ درصد در ریشه شد. با توجه به اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر ماده خشک گیاهی و غلظت کادمیم در گیاه، شاخص‌های گیاه‌پالایی محاسبه شد. اگرچه فاکتور غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال کم‌تر از یک بودند اما با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن این شاخص‌ها و نسبت پالایش در سورگوم افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: از آن‌جا که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن سبب افزایش جذب کادمیم و نسبت پالایش در گیاه سورگوم شد این گیاه نسبت به گندم پتانسیل بالاتری برای خروج کادمیم از خاک‌های آلوده و به‌ویژه در مناطقی که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن مطرح است دارد. این مسأله می‌تواند در مناطق صنعتی و اراضی کشاورزی نزدیک آن مورد توجه قرار گیرد. برهمکنش میان کادمیم خاک و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری با توجه به مسأله تغییر اقلیم و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری نیاز به پژوهش‌های گسترده دارد تا بتوان اثرات آن را در گیاهان مختلف بررسی نمود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، تغییر اقلیم، ماده خشک، شاخص گیاه‌پالایی

* مسئول مکاتبه: mirseyed@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه صنعتی شدن و احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری از حدود ۲۸۰ میکرولیتر در لیتر در آغاز قرن نوزدهم به ۳۶۷ میکرولیتر در لیتر در پایان قرن بیستم شده است. انتظار می‌رود این روند افزایش، تا پایان قرن حاضر ادامه نیز داشته باشد (۳). تاکنون مطالعات زیادی در مورد تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر روی گیاهان در خاک‌های غیرآلوده صورت گرفته است. نتایج مطالعات انجام شده نشان داده‌اند، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از طریق افزایش راندمان استفاده از آب و عناصر غذایی، فتوسنتز و بهبود ویژگی‌های میکرواکولوژیکی ریزوسفر سبب افزایش رشد گیاه و زیست‌توده گیاهی می‌گردد (۱۳، ۱۷، ۲۰). پورتر (۱۹۹۳) با بررسی نتایج حاصل از مطالعه ۱۵۶ گونه گیاهی دریافت با دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری رشد گیاهان C_4 به‌طور میانگین ۲۲ درصد افزایش می‌یابد (۲۹). چنگ و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۳۸۰ به ۶۸۰ میکرولیتر در لیتر و افزایش دمای شبانه تا ۳۲ درجه سلسیوس، موجب افزایش وزن خشک کل و عملکرد برنج شد (۶). بر اساس نتایج پراساد و همکاران (۲۰۰۹) افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا ۷۰۰ میکرولیتر در لیتر و دمای روزانه و شبانه به‌ترتیب ۳۶ و ۲۶ درجه سلسیوس سبب افزایش وزن خشک کل سورگوم دانه‌ای گردید. همچنین، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش زیست‌توده گیاهان C_3 شد (۳۰). کافی و ملکوتی (۲۰۰۱) در بررسی اثرات متقابل غنی‌سازی دی‌اکسیدکربن، نیتروژن و آهن بر شاخص‌های کمی و کیفی گل بریده میخک نشان دادند تعداد گل تولید شده در بوته در تیمار اثر متقابل دی‌اکسیدکربن و نیتروژن به‌میزان ۶۰ درصد افزایش یافت (۱۶). در پژوهش دیگری با افزایش سطوح دی‌اکسیدکربن، کاهش ۱۵ درصدی تبخیر و تعرق، افزایش رشد و عملکرد گیاه لوبیا و افزایش ۲۰ درصدی عملکرد دانه مشاهده گردید (۳۴).

تنش‌های محیطی می‌توانند، پاسخ گیاهان به دی‌اکسیدکربن را تحت‌تأثیر قرار دهند. از آغاز انقلاب صنعتی، آلودگی خاک به‌وسیله فلزات سمی و سنگین افزایش یافته؛ به‌طوری‌که امروزه این موضوع به یکی از بزرگ‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی بشر تبدیل شده است. در میان فلزات سنگین، کادمیم به‌علت حلالیت بالاتر و اثرات سمی بیش‌تر نسبت به سایر فلزات، بسیار مورد اهمیت قرار گرفته است (۳۲). کادمیم نه تنها یک عنصر غیرضروری برای متابولیسم گیاه است، بلکه یک عنصر سمی به‌شمار رفته و ازدیاد آن باعث مرگ گیاه می‌شود (۲۶).

بالا رفتن سطوح دی‌اکسیدکربن اتمسفری و افزایش غلظت فلزات سنگین در اراضی کشاورزی علاوه بر تأثیر بر رشد و توسعه گیاهان می‌تواند از طریق زنجیره غذایی نیز اثرات سوءی بر سلامت انسان داشته باشد. بر اساس نتایج تانگ و همکاران (۲۰۰۳)، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن منجر به افزایش رشد خردل هندی و آفتابگردان و همچنین تجمع مس در هر دو گیاه شد (۳۶). با توجه به مطالعات انجام شده، غلظت بالای دی‌اکسیدکربن نه تنها منجر به افزایش زیست‌توده قسمت‌های هوایی گونه‌های سورگوم و یونجه شد بلکه سبب تجمع بسیار زیاد سزیوم در هر دو گونه نیز گردید (۳۹). کیم و کنگ (۲۰۱۱) افزایش رشد و تجمع سرب را در کاج در اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن گزارش نمودند (۱۸). در تعدادی از مطالعات انجام شده، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش غلظت کادمیم در گیاهان را به دنبال داشت (۱۴، ۲۱). جیا و

Archive of SID

www.SID.ir

همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، زیست‌توده اندام هوایی افزایش و غلظت کادمیم بافت‌ها کاهش یافت (۱۵).

در رابطه با تأثیر دی‌اکسیدکربن بر جذب فلزات سنگین اطلاعات کمی در دسترس است. گیاهان C_3 و C_4 دارای دو سیستم فتوسنتزی مختلف هستند. در فرایند فتوسنتز، زمانی‌که اولین محصول پایدار یک اسید سه‌کربنی به نام ۳- فسفو گلیسیریک از چرخه کالوین باشد، گیاه را C_3 و اگر اولین محصول، یک اسید چهار کربنی دی‌کربوکسیلیک اسید باشد، گیاه را C_4 می‌گویند. به نظر می‌رسد تغییر در عرضه سطوح مختلف دی‌اکسیدکربن منجر به تغییر در عملکرد، فعالیت ریشه و میزان جذب فلزات سنگین می‌شود (۳۱). گندم گیاهی C_3 و مهم‌ترین محصول کشاورزی و منبع غذایی اصلی در ایران و بسیاری از کشورهای دنیا است. سورگوم نیز گیاهی C_4 و با شدت فتوسنتز زیاد بوده و از نظر اهمیت غذایی پنجمین غله دنیا پس از گندم، ذرت، برنج و جو محسوب می‌شود. از این‌رو این پژوهش با اهداف بررسی پاسخ گیاهان رشد کرده در خاک‌های آلوده و سطوح بالای دی‌اکسیدکربن و همچنین بررسی اثر دی‌اکسیدکربن اتمسفری بر جذب کادمیم در شرایط گلخانه‌ای اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خاک و رشد گیاه: یک نمونه خاک غیرآلوده از اطراف کرج تهیه شد. خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هواخشک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن شامل قابلیت هدایت الکتریکی، پ هاش، بافت خاک (۵)، درصد ماده آلی (۲۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (۳۵)، نیتروژن کل (۴)، فسفر قابل‌جذب گیاه (۲۸) و پتاسیم (۱۱) تعیین گردید. غلظت قابل‌جذب کادمیم و عناصر آهن، مس و روی نیز به روش عصاره‌گیری با DTPA اندازه‌گیری شدند (۲۴). نتایج در جدول ۱ آمده است. به‌منظور انجام آزمایش‌های گلدانی، خاک‌ها از الک ۴ میلی‌متر عبور داده شد و ۳/۵ کیلوگرم خاک داخل هر یک از گلدان‌ها ریخته شد. جهت آلوده نمودن نمونه‌های خاک، از نمک نیترات کادمیم استفاده شد و غلظت‌های ۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک از طریق افشانش و مخلوط نمودن یکنواخت لایه‌های خاک حاصل گردید. پس از آلوده شدن، خاک‌ها به‌مدت چهار ماه در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سلسیوس گرماگذاری شدند تا تعادل میان عناصر و قسمت‌های مختلف خاک صورت پذیرد (۲۱). در این مدت نمونه‌ها به‌طور متوالی خشک و مرطوب شدند تا زمان رسیدن به تعادل کاهش یابد. بدین‌ترتیب که هر زمان که خاک گلدان‌ها به‌طور طبیعی و از طریق تبخیر خشک می‌شد، مقدار آب لازم برای رسیدن به رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت زراعی از روش وزنی به آن اضافه می‌شد. پس از پایان دوره گرماگذاری، مجدداً از خاک گلدان‌ها نمونه‌برداری انجام شد و مقدار کادمیم قابل‌جذب آن‌ها با استفاده از DTPA تعیین گردید (جدول ۲).

برای انتخاب ارقام مورد استفاده، قبل از آزمایش اصلی چندین رقم گندم و سورگوم به‌مدت ۶۰ روز کشت شدند و از بین آن‌ها رقمی که در شرایط خاک آلوده بیش‌ترین وزن خشک را تولید نمود و از نظر ظاهری کم‌تر دچار تنش شده بود، انتخاب گردید. با توجه به نتایج از رقم مرودشت برای گندم و رقم کیمیا برای سورگوم استفاده شد. بذر ارقام گیاهی از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. قبل از کشت، بذرها با محلول اتانول و هیپوکلریت سدیم ضدعفونی و چندین بار با آب مقطر شسته شدند. سپس به‌منظور جوانه‌دار شدن، به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۸ درجه سلسیوس درون پتری‌دیش قرار گرفتند (۲). تعداد ۱۰ جوانه گندم و سورگوم که از نظر ظاهری کاملاً مشابه بودند در گلدان‌های مجزا

Archive of SID

www.SID.ir

کاشته شدند. برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد. در مرحله دو برگی تعداد گیاهچه‌ها در هر گلدان به ۵ گیاهچه کاهش یافت. پس از کشت، گلدان‌ها در دو اتاقک رشد قرار گرفتند. غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در سال ۲۰۰۹ به ۳۸۷ میکرولیتر در لیتر افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌گردد تا پایان قرن حاضر غلظت آن دو برابر گردد (۳). بنابراین، غلظت دی‌اکسیدکربن در یکی از اتاقک‌ها ۵۰±۴۰۰ µL/L (به‌عنوان شاهد) و در دیگری ۵۰ ±۹۰۰ µL/L (به‌عنوان غلظت افزایش یافته دی‌اکسیدکربن) تنظیم شد. سعی بر این شد تا غلظت افزایش یافته تقریباً دو برابر غلظت شاهد و یا کمی بیش‌تر باشد. ورود دی‌اکسیدکربن به داخل اتاقک دوم به‌وسیله سیلندر تعبیه شده در کنار اتاقک و تنظیم آن به‌طور خودکار صورت گرفت. گیاهان از مرحله دو برگی و در ساعات روشنایی در معرض دی‌اکسیدکربن قرار گرفتند. در دوره آزمایش درجه حرارت روزانه و شبانه به‌ترتیب ۲۶ و ۲۰ درجه سلسیوس، فتوپریود ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی و رطوبت نسبی ۶۰ درصد در نظر گرفته شد. نور، دما و رطوبت در هر دو اتاقک رشد کاملاً یکسان بود و تنها از نظر غلظت دی‌اکسیدکربن تفاوت داشتند.

پس از ۶۰ روز و کامل شدن دوره رشد رویشی گیاهان برداشت شدند. اندام هوایی و ریشه از هم جدا شده، سپس ریشه‌ها با آب معمولی و پس از آن با آب مقطر شسته و با کاغذ صافی خشک شدند. پس از تعیین وزن تر نمونه‌ها، هر قسمت در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار گرفت و سپس وزن خشک آن‌ها تعیین گردید. نمونه‌های خشک‌شده در مخلوطی از HNO_3، $HClO_4$ و H_2SO_4 با نسبت ۱:۴:۱۰ در دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد هضم (۳۳) و غلظت کادمیم آن‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی shimadzu مدل ۶۷۰ قرائت شد.

محاسبه ضریب تجمع زیستی[1] (BAC)، فاکتور غلظت زیستی[2] (BCF)، فاکتور انتقال[3] (TF)، شاخص تحمل[4] (Ti) و نسبت پالایش[5] (RR): برای محاسبه ضریب تجمع زیستی از رابطه ۱ و فاکتور غلظت زیستی که نشان‌دهنده توانایی گیاه برای تجمع کادمیم در گیاه می‌باشد از رابطه ۲ استفاده‌گردید (۱۹، ۳۶). فاکتور انتقال، توانایی گیاه برای انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی را نشان می‌دهد و از طریق رابطه ۳ تعیین گردید (۸). رابطه ۴ نحوه محاسبه شاخص تحمل گیاه را نشان می‌دهد (۱۴). برای تعیین نسبت پالایش که درصد فلز خارج شده از خاک را توسط اندام هوایی نشان می‌دهد و شاخصی برای کارایی گیاه‌پالایی می‌باشد، از رابطه ۵ استفاده شد (۳۷).

$$BAC = C_{Cd,Sh}/C_{Cd,s} \quad (1)$$

$$BCF = C_{Cd,r}/C_{Cd,s} \quad (2)$$

$$TF = C_{Cd,sh} / C_{Cd,r} \quad (3)$$

$$TI = DW_{C.s}/ DW_{b.s} \quad (4)$$

$$RR = [(C_{Cd,sh} \times SDW) / (C_{Cd,S} \times W_S)] \times 100 \quad (5)$$

که در آن، $C_{Cd,r}$ غلظت کادمیم در ریشه ($mg\ kg^{-1}$)، $C_{Cd,sh}$ غلظت کادمیم در اندام هوایی ($mg\ kg^{-1}$)، $C_{Cd,s}$ غلظت کادمیم خاک ($mgkg^{-1}$)، $DW_{C.s}$ وزن خشک گیاه در خاک آلوده، $DW_{b.s}$ وزن خشک گیاه در خاک شاهد، SDW وزن خشک اندام هوایی (g) و W_S وزن خاک گلدان (g) می‌باشد. مقدار جذب کادمیم نیز از حاصل‌ضرب غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه در وزن خشک همان قسمت به‌دست آمد (۱۵).

1- Biological Accumulation Coefficient
2- Bio Concentration Factor
3- Translocation Factor
4- Tolerance Index
5- Remediation Ratio

Archive of SID

www.SID.ir

تجزیه و تحلیل‌های آماری: این پژوهش در قالب طرح اسپلیت فاکتوریل با ۴ سطح کادمیم، ۲ سطح دی‌اکسیدکربن، دو گونه گیاهی و ۳ تکرار در اتاقک‌های رشد گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران اجرا شد. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد انجام شد.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در این آزمایش.

Table 1. Some physical and chemical properties of soil used in the experiment.

مقدار (amount)	خصوصیت خاک (Soil properties)	مقدار (amount)	خصوصیت خاک (Soil properties)
14.67	ظرفیت تبادل کاتیونی $(cmol_c\ kg^{-1})$ CEC	44.4	شن (٪) sand
0.14	نیتروژن کل (٪) Total N	33.6	سیلت (٪) silt
2.34	فسفر قابل‌جذب $(mgkg^{-1})$ Available P	22	رس (٪) clay
271.2	پتاسیم قابل‌جذب $(mgkg^{-1})$ Available K	لوم loam	بافت خاک Soil Texture
2.02	کادمیوم قابل استخراج با اسید نیتریک $(mg\ kg^{-1})$ Cd extracted with HNO_3	8	پ هاش عصاره اشباع pH (saturated extract)
0.05	کادمیوم قابل‌جذب $(mg\ kg^{-1})$ Available Cd	0.79	هدایت الکتریکی عصاره اشباع EC (saturated extract) (dSm^{-1})
		1.79	ماده آلی (٪) OM

جدول ۲- غلظت کادمیم قابل‌جذب پس از اتمام دوره گرماگذاری.

Table 2. Concentration of available Cd after incubation.

کادمیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) Available Cd ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم اضافه شده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) Cd added to soil ($mg\ kg^{-1}$)
0.03	0
6.64	10
10.76	20
19.43	40

نتایج و بحث

با توجه به جدول ۱، خاک مورد آزمایش دارای بافت متوسط بوده و از نظر شوری و قلیائیت در حد قابل‌قبول می‌باشد. همچنین با توجه به میزان و حد مجاز کادمیم کل و کادمیم قابل‌جذب (۱)، مشکلی از نظر سمیت کادمیم در خاک وجود ندارد.

Archive of SID

www.SID.ir

شاخص‌های رشد گیاه: وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه به‌عنوان شاخص‌های رشد در نظر گرفته شدند. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثرات متقابل دی‌اکسیدکربن و کادمیم بر وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه گیاه معنی‌دار بود. دو گیاه در پاسخ به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تنها در وزن خشک اندام هوایی تفاوت معنی‌دار داشتند، در حالی‌که در پاسخ به کادمیم در هر دو شاخص وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۱) وجود داشت (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر دی‌اکسیدکربن، کادمیم و گیاه بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه بر اساس میانگین مربعات.

Table 3. Variance analysis of the effect of CO_2, Cd and plant on shoot and root dry weight based on mean square.

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	وزن خشک اندام هوایی (گرم بر گلدان) Shoot dry weight (gr pot^{-1})	وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان) Root dry weight (gr pot^{-1})
دی‌اکسیدکربن (CO_2)	1	4.19**	0.52**
کادمیم (Cd)	3	22.22**	2.27**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم (CO_2×Plant)	3	0.22**	0.01**
گیاه (Plant)	1	7.51**	5.39**
دی‌اکسیدکربن × گیاه (CO_2×Plant)	1	0.02**	0.001^{ns}
کادمیم × گیاه (Cd×Plant)	3	2.21**	0.42**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم × گیاه (CO_2×Cd×Plant)	3	0.007^{ns}	0.01**
ضریب تغییرات (cv)		11.64	11.70

** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، * معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ns غیرمعنی‌دار.

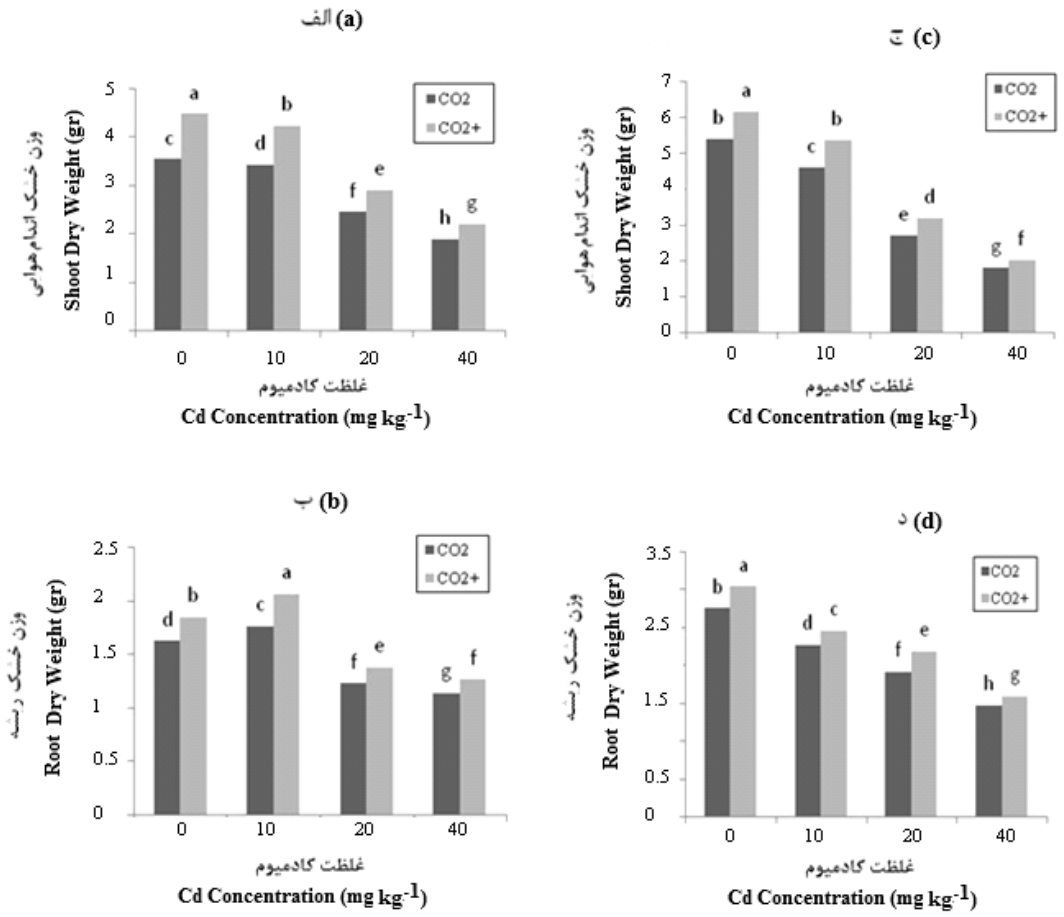
** Significant at P<0.05, * Significant at P<0.01, ns Non Significant.

در هر دو گیاه صرف‌نظر از اثر دی‌اکسیدکربن، با افزایش غلظت کادمیم خاک، وزن خشک اندام هوایی و ریشه به‌طور معنی‌دار (P<۰/۰۱) کاهش یافت (شکل ۱). دی‌اکسیدکربن اثر مثبتی بر رشد دو گیاه داشت؛ به‌طوری‌که بدون در نظر گرفتن تنش ناشی از کادمیم، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در مقایسه با شاهد سبب افزایش معنی‌دار (P<۰/۰۱) وزن خشک در همه غلظت‌های کادمیم شد.

برای گندم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نسبت به غلظت شاهد، موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی به‌میزان ۱۷ تا ۲۶/۳ درصد در تیمارهای مختلف کادمیم خاک شد. این افزایش در مورد وزن خشک ریشه ۱۱/۵ تا ۱۷ درصد بود. در مورد سورگوم تأثیر دی‌اکسیدکربن کم‌تر و در اندام هوایی ۱۰/۹ تا ۱۸/۴ درصد و در ریشه ۸/۲ تا ۱۳/۱ درصد بود.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر وزن خشک اندام هوایی (الف) و ریشه (ب) گندم و اندام هوایی(ج) و ریشه (د) سورگوم. CO_2 غلظت شاهد یا طبیعی و CO_2^+ غلظت افزایش یافته دی‌اکسیدکربن است.

Figure 1. The effect of increasing CO_2 concentration on shoot (a) and root (b) dry weight of wheat and shoot (c) and root (d) dry weight of sorghum. CO_2 and CO_2^+ are natural and elevated concentration of CO_2, respectively.

Archive

در این پژوهش، با افزایش غلظت کادمیم خاک، وزن خشک هر دو گیاه گندم و سورگوم کاهش یافت. کاهش وزن خشک گیاه می‌تواند به‌دلیل کاهش ماده خشک ناشی از کاهش فتوسنتز و یا جذب کم عناصر غذایی ضروری گیاه باشد. در سایر مطالعات نیز به این مطلب اشاره شده است (۹، ۱۰). غلظت‌های بالای کادمیم با ایجاد اختلال در فعالیت‌های حیاتی گیاه مانند تنفس، فتوسنتز و انتقال عناصر غذایی، موجب کاهش رشد گیاه می‌شود (۲۶). به‌رغم تنش ناشی از کادمیم، دی‌اکسیدکربن سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک گندم و سورگوم و به‌عبارت دیگر تحریک رشد هر دو گیاه شد. با توجه به متفاوت بودن میزان رشد گندم و سورگوم در این پژوهش می‌توان انتظار داشت که تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر سرعت رشد گیاهان مختلف، متفاوت باشد. جذب بیش‌تر دی‌اکسیدکربن توسط گیاهان سبب افزایش فتوسنتز و تولید بیش‌تر ماده خشک می‌گردد (۷، ۱۲). علاوه بر این افزایش رشد را می‌توان به‌دلیل راندمان بالاتر استفاده از آب دانست (۲۵). پورتر (۱۹۹۳) میانگین افزایش وزن خشک را برای گیاهان C_3 و C_4

www.SID.ir

به‌ترتیب ۲۲ و ۱۵ درصد گزارش کرد. بنابراین تأثیر دی‌اکسیدکربن بر رشد گیاهان C_3 بیش‌تر از C_4 می‌باشد (۲۹). وو و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند با دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن، وزن خشک اندام هوایی گیاهان C_3 و C_4 به‌ترتیب ۵۴ و۴۴ درصد افزایش یافت (۳۹). بر اساس نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نیز اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد گندم بیش‌تر از سورگوم بود.

غلظت و جذب کادمیم در گیاه: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس، هر دو تیمار دی‌اکسیدکربن و کادمیم تأثیر معنی‌داری بر غلظت و جذب کادمیم گیاه داشتند ($P<۰/۰۱$). گیاهان نیز پاسخ متفاوت و معنی‌داری به سطوح مختلف دی‌اکسیدکربن و کادمیم نشان دادند (جدول ۴).

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر دی‌اکسیدکربن، کادمیم و گیاه بر غلظت و جذب کادمیم در اندام هوایی و ریشه بر اساس میانگین مربعات.

Table 4. Variance analysis of the effect of CO_2, Cd and plant on shoot and root Cd concentration and Cd uptake based on mean square.

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	غلظت کادمیم اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم) Shoot Cd Concentration ($mg\ kg^{-1}$)	غلظت کادمیم ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم) Root Cd Concentration ($mg\ kg^{-1}$)	جذب کادمیم در اندام هوایی (میکروگرم) Shoot Cd uptake (µg)	جذب کادمیم در ریشه (میکروگرم) Root Cd uptake (µg)
دی‌اکسیدکربن (CO_2)	1	3.10**	1.12**	354.84**	141.60**
کادمیم (Cd)	3	139.91**	523.47**	9.09**	552.44**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم ($CO_2 \times Plant$)	3	0.79**	0.20**	0.75^{ns}	5.21**
گیاه (Plant)	1	183.81**	1.08**	2975.73**	761.41**
دی‌اکسیدکربن × گیاه ($CO_2 \times Plant$)	1	26.15**	42.24**	333.41**	146.45**
کادمیم × گیاه (Cd × Plant)	3	15.56**	0.91**	15.73**	55.86**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم × گیاه ($CO_2 \times Cd \times Plant$)	3	1.71**	2.89**	0.77^{ns}	7.01**
ضریب تغییرات (cv)		11.37	10.82	12.88	12.10

** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، * معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ns غیرمعنی‌دار.

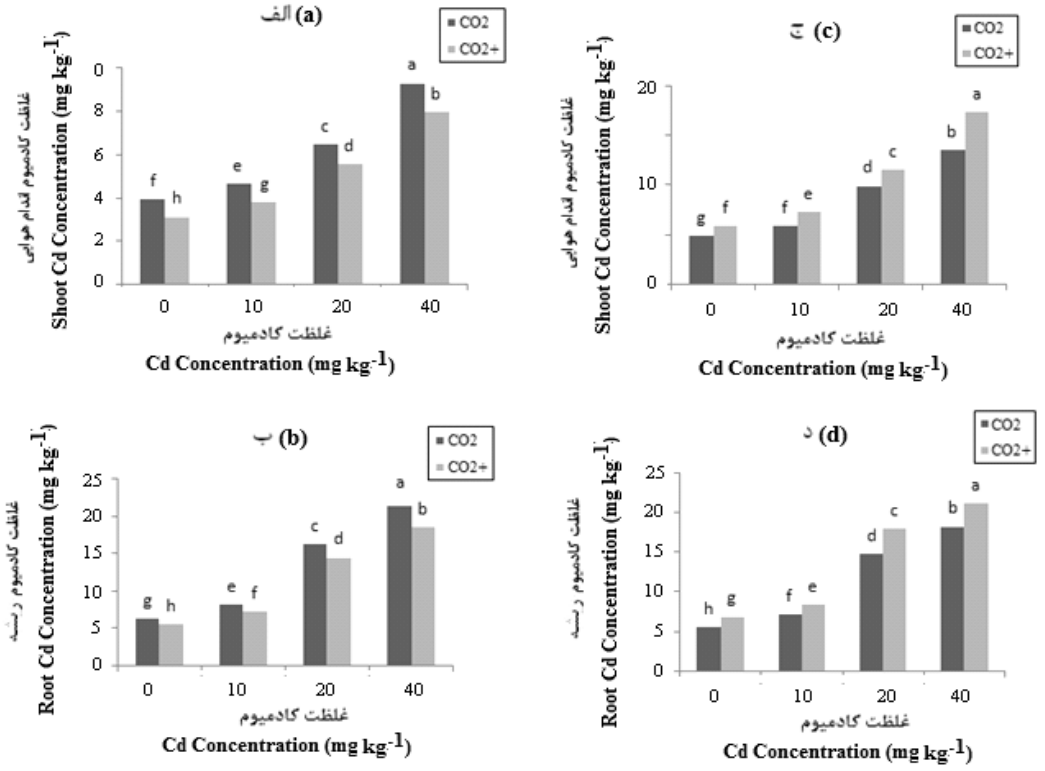
** Significant at P<0.05, * Significant at P<0.01, ns Non Significant.

شکل ۲ افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر غلظت کادمیم در دو گیاه را در سطوح مختلف کادمیم خاک نشان می‌دهد. با افزایش غلظت کادمیم خاک در هر دو تیمار دی‌اکسیدکربن، غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه هر دو گیاه گندم و سورگوم به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. در هر دو گیاه غلظت کادمیم در ریشه بیش‌تر از اندام هوایی بود.

Archive of SID

www.SID.ir

دی‌اکسیدکربن اثر متفاوتی بر روی گیاهان رشد کرده در خاک‌های آلوده داشت. با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، غلظت کادمیم در گندم کاهش معنی‌داری یافت. کاهش غلظت در تیمارهای محتلف کادمیم و در اندام هوایی و ریشه متفاوت بود. در تیمارهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک در اندام هوایی به‌ترتیب ۲۰/۴، ۱۸/۴، ۱۳/۸ و ۱۴/۳ درصد کاهش غلظت مشاهده شد. در ریشه کاهش به‌صورت ۱۰/۵، ۱۱/۸، ۱۱/۴ و ۱۳/۱ درصد بود. بیش‌ترین کاهش غلظت در اندام هوایی در تیمار صفر و در ریشه در تیمار ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک حاصل شد. به‌طورکلی کاهش غلظت کادمیم در اندام هوایی بیش‌تر از ریشه بود. برای سورگوم عکس این نتیجه به‌دست آمد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در گیاه را به‌دنبال داشت. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن منجر به افزایش غلظت ۲۱/۴، ۲۴/۴، ۱۶/۵ و ۲۸/۶ درصد در اندام هوایی گردید. در ریشه ۲۳/۴، ۱۷/۴، ۲۱/۵ و ۱۶/۴ افزایش غلظت کادمیم مشاهده شد. بیش‌ترین افزایش غلظت کادمیم در اندام هوایی در تیمار ۴۰ و در ریشه در تیمار صفر میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. افزایش غلظت کادمیم در اندام هوایی بیش‌تر از ریشه بود. در هر دو گیاه اثرات متقابل دی‌اکسیدکربن و کادمیم بر غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه معنی‌دار بود.

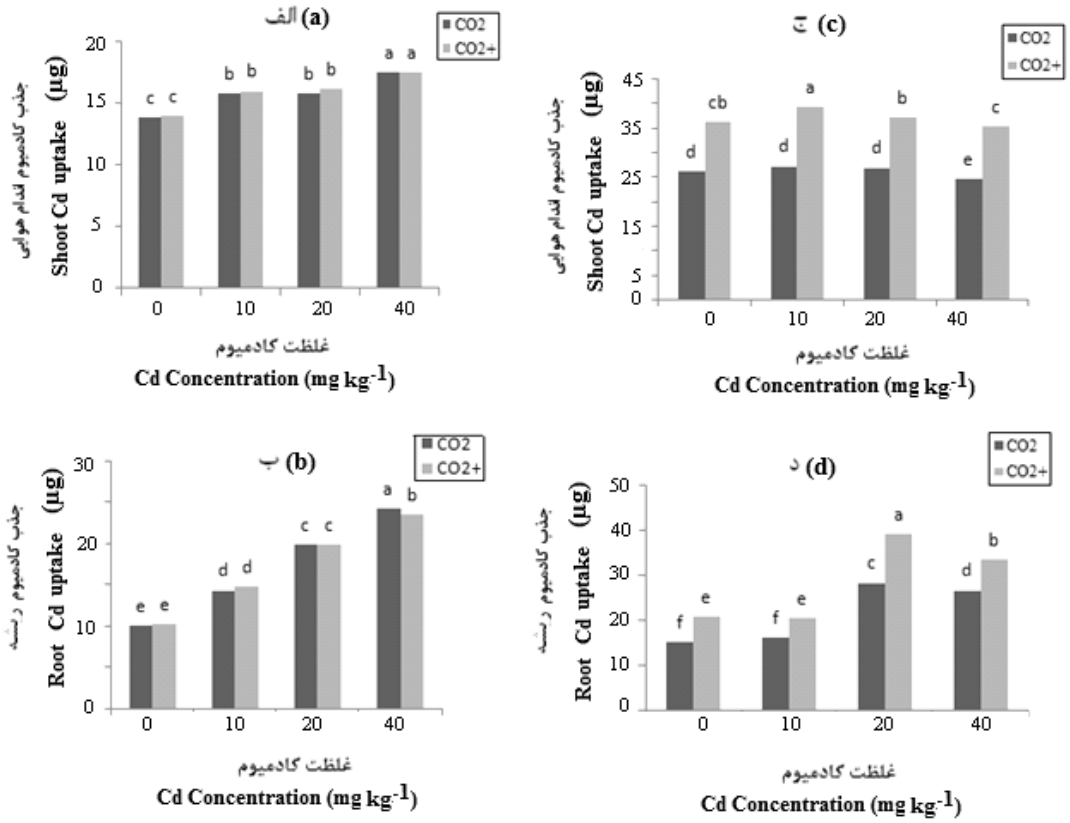


شکل ۲- اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر غلظت کادمیم اندام هوایی (الف) و ریشه (ب) گندم و اندام هوایی(ج) و ریشه (د) سورگوم. CO_2 غلظت شاهد یا طبیعی و CO_2^+ غلظت افزایش یافته دی‌اکسیدکربن است.

Figure 2. The effect of increasing CO_2 concentration on shoot (a) and root (b) Cd concentration of wheat and shoot (c) and root (d) Cd concentration of sorghum. CO_2 and CO_2^+ are natural and elevated concentration of CO_2, respectively.

www.SID.ir

برای گندم دی‌اکسیدکربن تنها در جذب کادمیم ریشه در تیمار ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک تأثیر معنی‌دار داشت اما در مورد سورگوم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب افزایش معنی‌دار جذب در اندام هوایی (۴۴-۳۷ درصد) و ریشه (۳۷-۲۶ درصد) نسبت به شاهد شد ($P<0/01$) (شکل ۳).



شکل ۳- اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر جذب کادمیم اندام هوایی (الف) و ریشه (ب) گندم و اندام هوایی (ج) و ریشه (د) سورگوم. CO_2 غلظت شاهد یا طبیعی و CO_2^+ غلظت افزایش یافته دی‌اکسیدکربن است.

Figure 3. The effect of increasing CO_2 concentration on shoot (a) and root (b) Cd uptake of wheat and shoot (c) and root (d) Cd uptake of sorghum. CO_2 and CO_2^+ are natural and elevated concentration of CO_2, respectively.

با افزایش غلظت کادمیم خاک، غلظت کادمیم در گندم و سورگوم افزایش پیدا کرد. اما اثر دی‌اکسیدکربن بر غلظت کادمیم دو گیاه متفاوت بود. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب کاهش معنی‌دار غلظت کادمیم در گندم و افزایش معنی‌دار آن در سورگوم شد. کاهش غلظت کادمیم در گندم احتمالاً به‌دلیل اثر رقت ناشی از افزایش رشد گیاه می‌باشد. بر اساس نظریه لیفرینگ و همکاران (۲۰۰۴) اگر اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر تولید زیست‌توده ریشه بیش‌تر از اندام هوایی باشد ممکن است عنصر بیش‌تری توسط ریشه جذب شده و به اندام هوایی نیز انتقال یابد. بدین ترتیب غلظت عنصر در اندام هوایی نیز افزایش می‌یابد (۲۳). در این پژوهش وزن خشک اندام هوایی بیش‌تر از ریشه تحت‌تأثیر دی‌اکسیدکربن قرار گرفت که می‌تواند دلیلی برای وقوع اثر رقت باشد.

www.SID.ir

بر خلاف گندم، در سورگوم با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش غلظت کادمیم در گیاه مشاهده شد. از آن‌جا که بستر کشت گندم و سورگوم کاملاً مشابه بود بنابراین می‌توان تفاوت در جذب کادمیم را به خصوصیات گیاه نسبت داد. احتمالاً ریشه سورگوم با تغییراتی که در محیط ریزوسفر ایجاد می‌کند سبب افزایش جذب کادمیم می‌شود. اگرچه گندم نیز توانایی خاص خود را در ایجاد تغییر دارد اما از طرف دیگر اثر دی‌اکسیدکربن بر وزن خشک گندم بیش‌تر از سورگوم بوده و شاید همین عامل موجب کاهش غلظت در گندم و افزایش آن در سورگوم شده است. بر اساس گزارش‌های ارائه شده افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن همراه با تنش کادمیم سبب تولید ریشه‌های ریز بیش‌تر (۱۵)، افزایش ترشحات ریشه‌ای، افزایش مواد آلی محلول (۱۸)، تغییر در نوع و جمعیت میکروبی و فعالیت میکروارگانیسم‌های ریزوسفر، افزایش ترشحات میکروبی، تجزیه مواد آلی، تغییرات pH و در نتیجه افزایش قابلیت دسترسی فلزات برای گیاهان می‌شود (۲۱). وو و همکاران (۲۰۰۹) افزایش غلظت سزیوم را در سورگوم و یونجه گزارش کردند. آن‌ها در بررسی اثر دی‌اکسیدکربن کاهش pH را مشاهده و آن را عاملی مهم برای جذب دانستند. با کاهش pH بار منفی مواد آلی و کانی‌های رسی خاک کاهش یافته در نتیجه فلزات سنگین به‌میزان بیش‌تری در محلول خاک آزاد می‌شوند (۳۹). در مطالعات انجام شده کاهش و افزایش غلظت فلزات در اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در گیاهان مختلف مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، جیا و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند غلظت ۸۱۰ میکرولیتر در لیتر دی‌اکسیدکربن در خاک‌های آلوده به کادمیم سبب کاهش غلظت کادمیم در دو گونه *Lolium* شد. این امر می‌تواند عاملی برای افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش باشد (۱۴). در مطالعه دیگر افزایش رشد اندام هوایی و در نتیجه اثر رقت و کاهش غلظت کادمیم در برنج تحت‌تأثیر دی‌اکسیدکربن گزارش شد (۲۲). تیان و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند غلظت ۱۲۰۰ میکرولیتر در لیتر دی‌اکسیدکربن موجب کاهش غلظت مس در گندم شد (۳۷). مطالعات دیگر نشان دادند با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، آفتابگردان و خردل هندی مقدار مس بیش‌تری را در خاک آلوده جذب می‌کنند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و سایر گزارش‌ها می‌توان گفت برهمکنش دی‌اکسید کربن و غلظت فلز در گیاه به نوع گیاه بستگی دارد. برای سورگوم، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن سبب گردید وزن خشک و همچنین غلظت کادمیم در گیاه افزایش یابد. با توجه به این‌که جذب از حاصل‌ضرب وزن خشک در غلظت عنصر به‌دست می‌آید، بنابراین، جذب کادمیم از خاک افزایش معنی‌دار یافت. اما برای گندم با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن افزایش وزن خشک و کاهش غلظت کادمیم در گیاه مشاهده گردید. بدین‌ترتیب در گندم جذب در مقایسه با غلظت طبیعی دی‌اکسیدکربن، تغییر معنی‌داری نداشت. از آن‌جا که جذب نشان‌دهنده توانایی گیاه برای خروج کادمیم از خاک می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت در اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، کادمیم بیش‌تری در ریشه و اندام هوایی سورگوم تجمع‌یافته است. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت کادمیم بیش‌تری از خاک به اندام هوایی گیاه انتقال یافته است. این نتایج با یافته‌های سایر پژوهشگران نیز مطابقت دارد (۳۶، ۳۷).

Archive of SID

www.SID.ir

فاکتور غلظت زیستی (BCF)، ضریب تجمع زیستی (BAC)، فاکتور انتقال (TF)، شاخص تحمل (TI) و نسبت پالایش (RR): بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس دو گیاه واکنش متفاوت و معنی‌داری نسبت به غلظت‌های کادمیم و دی‌اکسیدکربن نشان دادند (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر دی‌اکسیدکربن، کادمیم و گیاه بر BCF، BAC، TF، TI وRR بر اساس میانگین مربعات.

Table 5. Variance analysis of the effect of CO_2, Cd and plant on BCF, BAC, TF, TI and RR based on mean square.

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	ضریب غلظت زیستی BAC	ضریب تجمع زیستی BCF	فاکتور انتقال TF	شاخص تحمل TI	نسبت پالایش RR
دی‌اکسیدکربن (CO_2)	1	0.01**	0.031**	0.0005^{ns}	0.0006*	0.006**
کادمیم (Cd)	3	10.02**	17.07**	0.11**	0.71**	0.24**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم (CO_2 × Plant)	3	0.001^{ns}	0.017**	0.03**	0.0003*	0.003**
گیاه (Plant)	1	1.62**	0.04**	1.02**	0.14**	0.073**
دی‌اکسیدکربن × گیاه (CO_2 × Plant)	1	0.34**	0.43**	0.008**	0.001**	0.005**
کادمیم × گیاه (Cd × Plant)	3	0.38**	0.02**	0.005**	0.017**	0.037**
دی‌اکسیدکربن × کادمیم × گیاه (CO_2 × Cd × Plant)	3	0.11**	0.14**	0.002**	0.0003*	0.003**

** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، * معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ^{ns} غیرمعنی‌دار.

** Significant at P<0.05, * Significant at P<0.01, ^{ns} Non Significant.

اثر متقابل دی‌اکسیدکربن و کادمیم نیز موجب تغییرات معنی‌دار در فاکتور غلظت زیستی، فاکتور انتقال و نسبت پالایش شد اما در مورد ضریب تجمع زیستی این‌گونه نبود (جدول ۵). جدول ۶ تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن را بر فاکتور غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی، فاکتور انتقال، شاخص تحمل و نسبت پالایش نشان می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٦- تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر فاکتورهای گیاه‌پالایی.

Table 6. The effect of CO_2 concentration increasing on phyto-remediation factors.

گیاه plant	غلظت دی‌اکسیدکربن (میکرولیتر در لیتر) CO_2 Concentration ($\mu L\ L^{-1}$)	غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) Cd Concentration ($mg\ kg^{-1}$)	ضریب تجمع زیستی Biological Accumulation Coefficient	فاکتور غلظت زیستی Bio Concentration Factor	فاکتور انتقال Translocation Factor	شاخص تحمل Tolerance Index	نسبت پالایش Remediation Ratio (%)
گندم (Wheat)	400	0	1.94 C	3.06 B	0.63 F	1 A	0.19 C
		10	0.39 H	0.68 F	0.57 G	1.006 A	0.04 G
		20	0.29 I	0.74 E	0.40 J	0.70 C	0.02 H
		40	0.22 KJ	0.51 H	0.43 I	0.58 E	0.01 I
	900	0	1.54 D	2.74 C	0.56 G	1 A	0.20 C
		10	0.31 I	0.60 G	0.53 H	0.99 A	0.04 G
		20	0.25 J	0.66 F	0.39 J	0.67 D	0.02 H
		40	0.19 K	0.44 I	0.43 I	0.55 G	0.01 I
سورگوم (Sorghum)	400	0	2.39 B	2.75 C	0.87 A	1 A	0.37 B
		10	0.49 GF	0.59 G	0.83 BC	0.84 B	0.067 E
		20	0.45 G	0.67 F	0.67 E	0.56 F	0.033 G
		40	0.32 I	0.43 I	0.74 D	0.40 H	0.02 H
	900	0	2.90 A	3.40 A	0.85 BA	1 A	0.51 A
		10	0.61 E	0.69 FE	0.87 A	0.85 B	0.09 D
		20	0.52 F	0.82 D	0.64 F	0.58 E	0.05 F
		40	0.41 H	0.51 H	0.82 C	0.39 H	0.02 H

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال پنج درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

Within each column, values followed by the same letter are not significant in $P<0.05$.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد در هر دو گیاه و در هر دو تیمار دی‌اکسیدکربن با افزایش غلظت کادمیم خاک، ضریب تجمع زیستی به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. در مورد فاکتور غلظت زیستی نیز به استثنای تیمار ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، همین روند کاهشی وجود داشت. در گندم، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب کاهش معنی‌دار فاکتور غلظت زیستی و ضریب تجمع زیستی شد، ولی در سورگوم عکس این نتیجه به‌دست آمد و هر دو فاکتور افزایش یافت. با افزایش غلظت کادمیم خاک تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فاکتور انتقال کاهش و در تیمار ۴۰، به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. در گندم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در تیمارهای ۰ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، کم شدن معنی‌دار فاکتور انتقال را به‌دنبال داشت.

در سورگوم در تیمار ۱۰ و ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک این افزایش معنی‌دار بود. با توجه به ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال می‌توان نتیجه گرفت سورگوم نسبت به گندم توانایی بیش‌تری برای انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی را دارد. شاخص تحمل توانایی گیاهان را برای زنده ماندن در خاک‌های آلوده به کادمیم در غلظت بالای دی‌اکسیدکربن نسبت

Archive of SID

www.SID.ir

به غلظت طبیعی آن نشان می‌دهد. در گندم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن سبب کاهش معنی‌دار شاخص تحمل در تیمارهای ۲۰ و ۴۰ کادمیم شد. برای سورگوم افزایش معنی‌دار این شاخص در غلظت ۲۰ کادمیم مشاهده شد. بنابراین غلظت‌های بالاتر دی‌اکسیدکربن سبب رشد بیش‌تر سورگوم در خاک آلوده می‌شود.

افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تأثیری بر نسبت گیاه‌پالایی گندم نداشت ولی موجب افزایش معنی‌دار آن در سورگوم شد. شاید بتوان دلیل آن را افزایش وزن خشک و غلظت کادمیم اندام هوایی در غلظت بالای دی‌اکسیدکربن دانست. از فاکتور غلظت زیستی و فاکتور انتقال می‌توان برای ارزیابی جذب کادمیم از خاک استفاده کرد. کاهش فاکتور غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال در گندم می‌تواند به‌دلیل اثر رقت، توانایی کم گیاه برای تجمع کادمیم و کاهش انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی باشد. این نتایج با یافته‌های جیا و همکاران (۲۰۱۱) نیز مطابقت دارد (۱۵). بر اساس نظریه وازکوئز و همکاران (۲۰۰۹) کادمیم معمولاً در ریشه گیاهان و توسط دیواره سلولی غیرمتحرک شده و بخش کمی از آن به اندام هوایی منتقل می‌شود (۳۸). در این مطالعه نیز غلظت بالاتر کادمیم در ریشه نسبت به اندام هوایی (شکل ۳) و فاکتور انتقال کم (جدول ۶) این پدیده را نشان می‌دهد. افزایش فاکتور غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال در سورگوم به‌ویژه در غلظت ۴۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و تحت‌تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در عین حال که می‌تواند در مناطق آلوده به فلزات سنگین عامل مؤثری برای افزایش جذب آلاینده‌ها در خاک‌های آلوده به کادمیم باشد اما با توجه به زنجیره غذایی می‌تواند یک عامل مضر از نظر امنیت غذایی نیز محسوب شود.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داد افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری سبب افزایش ماده خشک هر دو گیاه گندم و سورگوم شد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اثر یکسانی بر غلظت کادمیم گیاهان نداشت. بدین‌ترتیب که غلظت بالای دی‌اکسیدکربن موجب کاهش غلظت کادمیم در گندم و افزایش آن در سورگوم شد. با توجه به اثر دی‌اکسیدکربن بر ماده خشک و غلظت کادمیم در گیاهان، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، میزان کادمیم جذب شده در سورگوم افزایش یافت؛ در حالی‌که میزان کادمیم جذب شده در گندم، تغییر معنی‌داری را نشان نداد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری سبب افزایش شاخص تحمل در هر دو گیاه گردید. بدین‌ترتیب افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن می‌تواند موجب افزایش توانایی گیاهان برای رشد در خاک‌های آلوده شود. علاوه‌بر این، نسبت پالایش نیز در سورگوم افزایش یافت. از آن‌جا که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن سبب افزایش جذب کادمیم و نسبت پالایش در گیاه سورگوم شد می‌توان نتیجه گرفت در این شرایط، سورگوم نسبت به گندم پتانسیل بالاتری برای خروج کادمیم از خاک‌های آلوده دارد. این مسأله می‌تواند در مناطق صنعتی و اراضی کشاورزی نزدیک این مناطق که علاوه بر بالا بودن سطح دی‌اکسیدکربن، احتمال آلودگی فلزات سنگین نیز وجود دارد مورد توجه قرار گیرد. در مطالعه انجام شده، نتایجی درباره برهمکنش میان کادمیم خاک و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری به‌دست آمد. اما با توجه به مسأله تغییر اقلیم و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری پژوهش‌های گسترده در این زمینه ضروری می‌باشد. همچنین برای آگاهی بیش‌تر از سازوکارهای موجود و امکان استفاده عملی از این یافته‌ها برای دستیابی به امنیت غذایی و اهداف گیاه‌پالایی، مطالعات بیش‌تری در دامنه وسیعی از گیاهان و آلاینده‌های خاک لازم به‌نظر می‌رسد.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

1.Alloway, B.J. 1990. Heavy metals in soils. P339. John Wiley & Sons, Inc. New York. USA.

2.Amani, A.L. 2008. Cadmium Induced Changes in Pigment Content, Ion Uptake, Proline Content and Phosphoenolpyruvate Carboxylase Activity in *Triticum Aestivum* Seedlings. AJBAS. 2: 1. 57-62.

3.IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, Pp: 1-21.

4.Brennan, R.F., Armour, J.D., and Reuter, D.J. 1993. Diagnosis of zinc deficiency, P 167-181. In: A.D. Robson (Ed.), Zinc in Soils and Plants, P206. Springer, Netherlands.

5.Bouyoucos, C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soil. J. Agron. 54: 464-465.

6.Cheng, W., Sakai, H., Yagi, K., and Hasegawa, T. 2009. Interaction of elevated CO_2 and night temperature on rice growth and yield.Agri. Forest. Meteorol. 149: 51-58.

7.Deepak, S.S., and Agrawal, M. 1999. Growth and yield responses of wheat plants to elevated levels of CO_2 and S_2, singly and in combination. Environ Pollut. 104: 411-419.

8.Ghosh, M., and Singh, S.P. 2005. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. Environ. Pollut. 133: 2. 365-371.

9.Ci, D., Jiang, D., Wollenweber, B., Dai, T., Jing, Q., and Cao, W. 2010. Cadmium stress in wheat seedlings: growth, cadmium accumulation and photosynthesis. ActaPhysiol Plant. 32: 365-373.

10.Liu, D., Hu, K., Ma, J., Qiu, W., Wang, X., and Zhang, S. 2011. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sorghum plants. Afr. J. Biotechnol. 10: 70. 15770-15776.

11.Helmek, P.A., and abdSparks, D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium, P 551-575. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods Soil Science Society ofAmerica, Madison.

12.Högy, P., and Fangmeier, A. 2009. Atmospheric CO_2 enrichment affects potatoes: 1. aboveground biomass production and tuber yield. Eur. J. Agron. 30: 2. 78-84.

13.Jia, H.X., Guo, H.Y., Yin, Y., Wang, Q., Sun, Q., Wang, X.R., and Zhu, J.G. 2007. Responses of rice growth to copper stress under free-air CO_2 enrichment (FACE). Chin. Sci. Bull. 52: 19. 2636-2641.

14.Jia, Y., Tang, S., Wang, R., Ju, X., Ding, Y., Tu, S., and Smith, D.L. 2010. Effects of elevated CO_2 on growth, photosynthesis, elemental composition, antioxidant level and phytochelatin concentration in *Loliummutiforum* and *Loliumperenne* under Cd stress. J. Hazard. Mater. 180: 384-394.

15.Jia, Y., Tang, S., Ju, X., and Shu, L. 2011. Effects of elevated CO_2 levels on root morphological traits and Cd uptakes of two *Lolium* species under Cd stress. Biomed & Biotechnol. 12: 4. 313-325.

16.Kaafi, M., and Malakooti, M.J. 2001. Effect of carbon dioxide enrichment, nitrogen and iron on quantitative and qualitative indicators of clove. Soil research. 14: 1. 1-13.

17.Kimball, B.A., Kobayashi, K., and Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO_2 enrichment. Adv Agron. 77: 293-368.

18.Kim, S., and Kang, H. 2011. Effect of elevated CO2 and Pb on phytoextraction and enzyme activity. Water Air Soil Pollut. 219: 365-375.

19.Li, M.S., Luo, Y.P., and Su, Z.Y. 2007. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. Environ. Pollut. 147: 168-175.

20.Li, T., Yang, X., Lu, L., Islam, E., and He, Z. 2009. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyper accumulating species under hydroponic conditions. J. Hazard. Mater. 169: 1-3. 734-741.

Archive of SID

www.SID.ir

21.Li, T., Di, Z., Han, X., and Yang, X. 2011. Elevated CO_2 improves root growth and cadmium accumulation in the hyper accumulator *Sedum alfredii*. Plant Soil.DOI 10.1007/s11104-011-1068-4.
22.Li, Z., Tang, S., Deng, X., Wang, R., and Song, Z. 2010. Contrasting effects of elevated CO_2 on Cu and Cd uptake by different rice varieties grown on contaminated soils with two levels of metals: Implication for phytoextraction and food safety. J. Hazard. Mater. 177: 352-361.
23.Lieffering, M., Kim, H.K., Kobayashi, K., and Okada, M. 2004. The impact of elevated CO_2 on the elemental concentrations of field-grown rice grains. Field Crops Res. 88: 2-3. 279-286.
24.Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zn, Fe, Mn, and Cu. SSSAJ. 42: 421-428.
25.Loladze, I. 2002. Rising atmospheric CO_2 and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry? Trends Ecol. Evol. 17: 457-461.
26.Maria, S.D., Puschenreiter, M., and Rivelli**,** A.R. 2013. Cadmium accumulation and physiological response of sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle. Plant Soil Environ. 59: 254-261.
27.Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, P 539-580. In: A.L. Page (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2. 2nd ed. Chemical and microbiological properties. Agronomy monograph no.9. SSSA and ASA, Madison, WI. USA. 1982.
28.Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus, P 403-430. In: A.L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd edn, Agron. Monogr. 9. ASA and ASSA, Madison WI.
29.Poorter, H. 1993. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated CO_2cocentration.Vegetation.104/105: 77-97.
30.Prasad, P.V., Vu, J.C.V., Boote, K.J., and Allen, H. 2009. Enhancement in leaf photosynthesis and upregulation of Robisco in the C_4 sorghum plant at elevated growth carbon dioxide and temperature occur at early stages of leaf ontogeny. Func. Plant. Bio. 36: 761-769.
31.Rogers, H., Runion, H., and Rupa, G.B.K. 1994. Plant responses to atmospheric CO_2 enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environ. Pollut. 83: 155-189.
32.Romero-Puertas, M.C., Rodríguez-Serrano, M., Corpas, F.J., and del Río, L.A. 2004. Cadmium-induced subcellular accumulation of O_2- and H_2O_2 in *pea* leaves. Plant Cell Environ. 27: 9. 1122-1134.
33.Ryan, J., Estefan, G., and Adbul Rashid, A. 2001. Soil and plant Analysis Laboratory Manual. ICARDA, Aleppo, Syria, 172p.
34.Shams, S.H., Haghighi, N., and Parsa Zand, S.H. 2012. Effect of carbon dioxide concentration and irrigation level on evapotranspiration and yield of red bean.EJGCST. 2: 8. 1-10.
35.Sumner, M.E., and Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity, and exchange coefficients P 1201-1231. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis. P1320. Part 2: Chemical properties, (3rd ed.) ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.
36.Tang, S., Xi, L., Zheng, J.M., and Li, H. 2003. Response to elevated CO_2 of *Indian mustard* and *sunflower* growing on copper contaminated soil. Bull. Environ. Contam. Toxico. 71: 988-997.
37.Tian, S., Jia, Y., Ding, Y., Wang, R., Feng, R., Song, Z., Guo, J., and Zhou, L. 2014. Elevated atmospheric CO_2 enhances copper uptake in crops and pasture species grown in copper-contaminated soils in a micro-plot study. Clean. 42: 347-354.
38.Vazquez, S., Goldsbrough, P., and Carpena, R.O. 2009. Comparative analysis of the contribution of phytochelatins to cadmium and arsenic tolerance in soybean and white lupen. Plant Physiol. Biochem. 47: 63-67.
39.Wu, H.B., Tang, S.R., Zhang, X.M., Guo, J.K., Song, Z.G., Tian, S.A., and Smith, D.L. 2009. Using elevated CO_2 to increase the biomass of a Sorghum vulgare × Sorghum vulgare var. sudanense hybrid and *Trifoliumpratense* L. and to trigger hyperaccumulation of cesium. J. Hazard. Mater. 170: 861-870.

Archive of SID
www.SID.ir

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 5(4), 2016
http://ejsms.gau.ac.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effect of elevated atmospheric CO_2 on cadmium uptake by wheat and sorghum

G. Khanboluki[1], *H. Mirseyed Hosseini[2] and B. Motesharezadeh[2]
[1]Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran,
[2]Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran
Received: 09/29/2014; Accepted: 04/21/2015

Abstract

Background and Objectives: One of the outcomes of the industrial development has been the increase in CO_2 levels in the atmosphere from 280 to 367 Microliter per liter by the end of 20th century. Many studies have investigated the effects of increasing CO_2 levels on plant. Increase in atmospheric CO_2 levels and increasing concentration of heavy metals in agricultural lands can effect plant growth, production and have negative impact on human health through food chain. This study was aimed to investigate the effects of different levels of CO_2 and cadmium on growth and cadmium uptake by wheat and sorghum.

Materials and Methods: A greenhouse experiment was carried out with pots containing 3.5 kg soils and in split factorial design. Treatments included four levels of cadmium (0, 10, 20 and 40 mg $_{Cd}$ kg$^{-1}{}_{soil}$) (from Cd $(NO_3)_2$) and two levels of CO_2 (400 and 900 µL L^{-1}). Cadmium uptake by plants roots and shoots and phytoremediation indices were calculated for both plants.

Results: The results indicated that increasing CO_2 levels, enhanced maximum shoot and root dry weight by 26% and 17% for wheat and 18% and 13% for sorghum, respectively. Increasing CO_2 levels did not have any effect on Cd uptake by wheat but increased Cd uptake by 37-44% in shoot and 26-37% in root for sorghum. Phytoremediation indices were calculated based on the effect of increasing CO_2 level on plant dry matter and Cd uptake. Although, Bio Concentration Factor, Biological Accumulation Coefficient and Tolerance Index were all less than unit, but with increase in CO_2 levels these indexes and Remediation Ratio increased for sorghum.

Conclusion: Since the increase on CO_2 concentration increased cadmium uptake and remediation ratio in sorghum, this plant has a higher potential for extracting cadmium from polluted soils, specially in areas where increase in CO_2 levels are an issue. This can be important in industrial areas and the agricultural lands around them. The interactions between soil cadmium and increasing CO_2 levels in the atmosphere with respect to climate change requires further research to study its effect on various plants.

Keywords: Soil pollution, Climate change, Dry matter, Phytoremediation indices

* Corresponding Authors; Email: mirseyed@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir