نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۰، ص. ۱۳۰۹-۱۲۹۹

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 6, Jan-Feb 2012, p. 1299-1309

جذب و اندوزش همزمان سدیم و سرب یا کادمیم توسط سه گیاه شورپسند در دو خاک آهکی شور-سدیمی و غیرشور-سدیمی

رقیه حمزه‌نژاد تقلیدآباد[۱]- حبیب خداوردی‌لو[۲*]- شهرام منافی[۳]- سالار رضاپور[۴]

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۷
تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۱

چکیده

امروزه آلودگی محیط زیست توسط فلزات سنگین از مسائل مهم دنیا است که برطرف کردن آن نیازمند عملیات اصلاحی موثر می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی توانایی سه گیاه آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*] و سلمه‌تره [*Chenopodium album*] برای جذب و اندوزش همزمان سدیم و کادمیم یا سرب در دو خاک آهکی با ویژگی‌های متفاوت بود. دو نمونه خاک آهکی، یکی شور-سدیمی (S_1) و دیگری غیرشور و غیرسدیمی (S_2) انتخاب گردیدند و غلظت‌های مختلف سرب (۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک) و کادمیم (۰، ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) به خاک افزوده شدند. هر دو خاک هفت ماه تحت تیمار تر و خشک شدن قرار گرفتند. سپس بذور گیاهان ذکر شده در گلدان‌های حاوی خاک‌های آلوده در تیمارهای فوق و همچنین تیمارهای شاهد (بدون آلودگی سرب یا کادمیم) کشت گردیدند. پس از طی دوره رشد، عملکرد گیاهان و غلظت سرب، کادمیم و سدیم خاک و گیاه در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. عملکرد نسبی سالیکورنیا در خاک S_1 و آتریپلکس و سلمه‌تره در خاک S_2 بالاترین بود. در خاک شور- سدیمی، اندوزش زیستی سدیم (BCF_{Na}) برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در غلظت صفر (بدون آلودگی سربی و کادمیمی) به ترتیب ۶۷، ۲۰۲ و ۵۷ بود که مقدار بالای BCF_{Na} برای سالیکورنیا بیانگر توانایی بالای این گیاه در جذب و اندوزش سدیم از خاک است. نتایج نشان داد که سالیکورنیا بالاترین اندوزش کادمیم و سالیکورنیا و آتریپلکس بالاترین انباشت سرب را تحت شرایط نامطلوب خاک‌های شور- سدیمی داشتند. در حالی‌که سلمه‌تره و آتریپلکس بردباری بالایی به کادمیم در خاک معمولی داشتند. این نتایج بیانگر این است که این گیاهان توانایی اصلاح خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم را دارند. در این پژوهش سالیکورنیا با کمترین کاهش عملکرد نسبی، بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی شناخته شد و می‌توان از این گیاه برای پالایش همزمان سرب و کادمیم در خاک‌های شور- سدیمی حتی در غلظت‌های بالای کادمیم و سرب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تجمع زیستی، سدیم (Na)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، گیاهان شورپسند

مقدمه

با گسترش سریع صنعت در دهه‌های اخیر و همچنین افزایش کشاورزی متمرکز در پاسخ به تقاضای جمعیت در حال رشد، استخراج معادن، تولید و دفع بیشتر زباله و فاضلاب، استفاده از لجن فاضلاب و پساب‌ها به عنوان منابعی جهت تغذیه و آبیاری گیاهان و غیره، منجر به ورود و انباشت فلزات سنگین سمی در خاک‌ها شده است. اغلب فلزات سنگین، بر خلاف آلاینده‌های آلی که به طریق بیولوژیکی یا شیمیایی تجزیه می‌شوند، مدت زمان طولانی در خاک اقامت می‌یابند (۱۲). نتیجه مستقیم انباشت فلزات سنگین در خاک، تهدید اکولوژیکی گیاهان و سایر جانداران در خاک‌های آلوده و در پی آن تهدید سلامت انسان از طریق ورود به زنجیره غذایی است (۳۵). بنابراین، آلودگی خاک به فلزات سنگین از نظرتخریب اکوسیستم‌های طبیعی و ایجاد سمیت برای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان اهمیت دارد.

برخی از خاک‌های مسئله‌دار[5]، به‌طور همزمان هم سدیمی بوده و هم به سطوحی از فلزات سنگین آلوده‌اند. افزایش غلظت فلزات سنگین در محلول خاک همراه با افزایش قدرت یونی منجر به فرایندهای زیر می‌گردد: ۱- رقابت یونی برای مکان‌های تبادلی در خاک به دلیل افزایش مقدار کاتیون الکترولیت؛ ۲- کاهش فعالیت

۱،۲،۳و۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیاران گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

5- Problematic soils

Archive of SID
www.SID.ir

اولیه[1] کاتیون‌های فلزی در محلول خاک و ۳- تشکیل جفت‌های یونی بدون بار و تشکیل کمپلکس با لیگاندهای آنیونی الکترولیت. حضور این لیگاندهای کمپلکس شده در محلول خاک عمدتاً تحرّک فلزات را افزایش می‌دهد (۲۲). لیگاندهای معدنی معمول که با فلزات سنگین کمپلکس می‌شوند، SO_4^{2-} ، Cl^-، PO_4^{2-}، NO_3^- و CO_3^{2-} می‌باشند (۳۰). از میان این لیگاندها، کلراید تحرّک بالایی داشته و عاملی مهم در توزیع فلزات سنگین در بین جایگاه‌های مختلف در خاک می‌باشد. بنابراین در بسیاری از مناطق خشک، آبیاری با آب شور حاوی سطوح بالای کلراید ممکن است مشکلات ناشی از آلودگی فلزات سنگین را شدت بخشد و با تشکیل کمپلکس‌های کلراید- فلزات سنگین منجر به افزایش تحرّک فلزات‌سنگین شود (۹).

جذب فلزات توسط گیاهان شورپسند به تحرّک و زیست‌فراهمی فلزات در خاک بستگی دارد که با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله pH، شوری، پتانسیل اکسایش و کاهش، فراوانی مواد آلی و مقدار رس تعیین می‌شود (۲). حلالیت و فراهمی کادمیم بستگی به ظرفیت تبادل کاتیونی و محتوای رس خاک دارد. خاکی با مقادیر بالای رس و CEC، ظرفیت جذب کادمیم بالایی دارد (۹). شوری نیز عاملی موثر در زیست فراهمی و گونه‌بندی[2] فلزات در خاک، به ویژه برای فلزات با تحرک بالا مانند کادمیم به دلیل جانشینی فلزات از مکان‌های تبادلی به ماتریکس خاک توسط کاتیون‌های نمکی و تشکیل کمپلکس‌های کادمیم- کلرید می‌باشد (۱۹). برخی پژوهشگران دریافتند که افزایش غلظت کلراید در خاک، زیست‌فراهمی کادمیم را به‌دلیل تشکیل کمپلکس پایدار Cl-Cd افزایش می‌دهد (۲۵).

کادمیم و سرب از جمله فلزات سنگینی هستند که از منابع گوناگون به زیست‌بوم، پیکره‌ی گیاه و نهایتاً به زنجیره‌ی غذایی انسان‌ها و حیوانات راه می‌یابند و خسارت‌هایی جدّی به بار می‌آورند (۱).

هدف از این مطالعه بررسی جذب و اندوزش همزمان سدیم و کادمیم یا سرب توسط سه گیاه آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*]، سلمه‌تره [*Chenopodium album*] در دو خاک با ویژگی‌های متفاوت و امکان‌سنجی استفاده از این گیاهان در اصلاح همزمان ESP و آلودگی سرب و کادمیم در خاک است.

مواد و روش‌ها

دو نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتیمتری) از استان آذربایجان غربی نمونه‌برداری شدند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها تعیین گردید. توزیع اندازه ذرات در خاک با روش هیدرومتری (۱۱)، کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون (۲۴)، pH خاک در عصاره ۱:۱ خاک- آب مقطر توسط pH متر (۲۱)، ظرفیت تبادلی کاتیونی (CEC) با روش باور (۲۸)، هدایت الکتریکی درعصاره اشباع خاک (EC_e) با استفاده از دستگاه هدایت سنج (۲۴)، کربن آلی با روش والکی و بلک (۲۴)، غلظت کل عناصر میکرو در خاک به روش اکسیداسیون با اسید نیتریک ۴ مولار (۳)، مجموع کلسیم ومنیزیم به روش کمپلکسومتری (۵)، سدیم محلول در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه فلم‌فتومتر (۵) و سدیم قابل تبادل (Na_{exch}) با روش استات آمونیم یک نرمال در pH=7 (۱۶) تعیین گردید. درصد سدیم تبادلی (ESP) خاک نیز با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$ESP = \frac{Na_{exch}}{CEC} \times 100 \qquad (۱)$$

لازم به ذکر است که به دلیل پدیده دفع آنیونی در خاک‌های شور- سدیمی، تصحیح ESP با روش باور و هاتچر با استفاده از فرمول زیر انجام گرفت:

$$Na_{exch} = Na_t - (\frac{Cl_w}{Cl_e \times Na_{soil}}) \qquad (۲)$$

که در آن Na_{exch}: مقدار سدیم تبادلی پس از تصحیح دفع آنیونی، Na_t: سدیم محلول بعلاوه سدیم تبادلی، Na_s: مقدار سدیم محلول خاک بر اساس غلظت در عصاره اشباع، Clw: مقدار کلرید در توده محلول و فاز تبادلی و Cl_e: مقدار کلرید محلول خاک (عصاره اشباع) می‌باشد. تمامی واحدها بر حسب $cmol_c\ kg^{-1}$ است.

در این مطالعه از گیاهان آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*]، سلمه‌تره [*Chenopodium album*] که بردبار به شرایط سدیمی و شوری می‌باشند، برای پالایش‌سبز خاک‌های شور- سدیمی آلوده به سرب و کادمیم استفاده شد. خاک‌های مورد مطالعه با افزودن مقادیر مناسب نمک نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) به غلظت‌های صفر، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک و نیترات کادمیم $Cd(NO_3)_2.\ H_2O$ به غلظت‌های صفر، ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک آلوده شدند. سپس خاک با غلظت‌های یاد شده در ۳ تکرار در گلدان-های ۵ کیلوگرمی ریخته شد. خاک‌های آلوده هفت ماه در پنج دور تا رطوبت اشباع آبیاری و در هوای آزمایشگاه خشک شدند تا حد امکان برهم‌کنش‌های آلاینده و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر باشد. سپس، بذرهای سالیکورنیا، آتریپلکس و سلمه‌تره در گلدان‌های مورد نظر کشت گردید. پس از جوانه زدن بذرها، بوته‌های سالم‌تر و قوی‌تر به تعداد پنج بوته در هر گلدان برای سالیکورنیا، چهار بوته برای آتریپلکس و هفت بوته برای سلمه‌تره تنک گردیدند. مقدار کافی از عناصر غذایی ضروری گیاه ($MgSO_4.7H_2O$، $Ca(NO_3)_2.4H_2O$،

1- Initial activity
2- Speciation

Archive of SID

www.SID.ir

$H3BO_3$ ،$MnSO_4.4H_2O$ ،FeEDTA ،$K_2HPO_4.3H_2O$ ،$(NH_4)_6MO_{24}.4H_2O$ ،$ZnSO_4.7H_2O$ و $CuSO_4.5H_2O$) برای جلوگیری از هر گونه تنش تغذیه‌ای به گلدان‌های مذکور افزوده گردید. همچنین، برای تصحیح اثر سایر عوامل (از جمله آبشویی احتمالی، تاثیر آب آبیاری و غیره) بر ESP خاک، گلدان‌هایی به عنوان شاهد برای هر تیمار تهیه گردید که گیاهی در آنها کشت نگردیده بود. تغییرات ESP خاک در این گلدان‌ها از مقادیر تغییرات ESP در گلدان‌های حاوی گیاهان کسر شد تا تاثیر خالص گیاهان در کاهش ESP خاک به‌دست آید.

چهار ماه پس از کاشت، بخش هوایی گیاهان برداشت شده و با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس، نمونه‌ها در دمای ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک و آسیاب شدند. غلظت سدیم، کادمیم و سرب در گیاه با روش اکسیداسیون تر و غلظت کل کادمیم و سرب در خاک به روش اکسیداسیون با اسید نیتریک ۴ مولار و اندازه‌گیری با دستگاه جذب اتمی به‌دست آمد (۳). ESP خاک نیز پس از برداشت گیاهان اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی تأثیر توأمان تنش آلودگی سرب یا کادمیم خاک و تنش شوری- سدیمی بر رشد گیاهان از شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی (RY) استفاده شد:

$$RY = \frac{Y_c}{Y_o} \times 100 \qquad (۳)$$

که در آن Y_c: عملکرد ماده خشک گیاه در سطح آلودگی c و Y_o: عملکرد ماده خشک گیاه در تیمار شاهد در خاک S_2 است.

برای ارزیابی توانایی گیاهان در جذب سدیم خاک در هر سطح آلودگی خاک به کادمیم یا سرب، ضریب اندوزش زیستی سدیم (BCF_{Na}) از تقسیم "غلظت سدیم کل در گیاه" به "غلظت سدیم کل (تبادلی+ محلول) در خاک" بدست آمد. هر چه مقدار ضریب BCF_{Na} بیشتر از یک باشد، به معنای تجمع بیشتر سدیم خاک توسط گیاه است.

همچنین برای ارزیابی توانایی گیاهان در پالایش سطوح مختلف آلودگی سرب یا کادمیم و تاثیر شوری و سدیم خاک بر این توانایی، در هر سطح آلودگی خاک به کادمیم یا سرب ضریب اندوزش زیستی (BCF) از حاصل تقسیم "غلظت کل فلز در گیاه" به "غلظت کل فلز در خاک" تعیین شد. هرچه این ضریب بیشتر از یک باشد، به معنای تجمع بیشتر آلودگی خاک توسط گیاه است.

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار برای خاک، گیاه و غلظت فلز در خاک انجام شد. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون SNK در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ رده‌بندی خاک‌ها و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۱ دو خاک از نظر درصد سدیم تبادلی و شوری کاملاً با هم متفاوت هستند. به‌طوری‌که خاک S_1، خاکی شور- سدیمی است، در حالی‌که خاک S_2 غیر شور و غیر سدیمی می‌باشد. همچنین مواد آلی، CEC و pH در خاک S_2 بیشتر از خاک S_1 است، حال آنکه خاک S_1 کربنات کلسیم معادل بیشتری دارد. هر دو خاک به‌طور طبیعی حاوی مقداری کادمیم و سرب بودند که مقدار سرب در خاک S_2 بیشتر از خاک S_1 بود، درحالی‌که مقدار کادمیم در هر دو خاک یکسان بود.

جدول ۲ تاثیر همزمان کادمیم و شوری و سدیمی خاک بر شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی گیاهان مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲- الف تولید ماده خشک آتریپلکس در خاک شور- سدیمی با سطوح غلظت صفر تا ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک ۲/۳ تا ۶ برابر بیشتر از ماده خشک تولیدی در خاک غیر شور-سدیمی در همان غلظت‌ها بود. هر چند عملکرد نسبی آتریپلکس در هر دو خاک به ۰/۱۵ درصد در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین تولید ماده خشک سالیکورنیا در تیمار شاهد خاک S_1 (بدون آلودگی کادمیمی)، ۳/۴ برابر بیشتر از تیمار شاهد در خاک S_2 بود. دلیل این امر را می‌توان به شورپسند بودن این گیاه و بردباری بالای سالیکورنیا به شوری نسبت داد. در حالی‌که در آلودگی‌های کادمیمی بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی‌داری ($p<0/05$) در تولید ماده خشک سالیکورنیا در تیمارهای مشابه در بین دو خاک مشاهده نشد. در سطوح آلودگی صفر و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، ماده خشک سلمه‌تره در خاک S_2، ۶ برابر بیشتر از خاک S_1 بود. یاو و همکاران (۳۳) گزارش کردند که سلمه‌تره گیاهی بردبار به نمک است که عمدتاً در مناطق نیمه خشک با شوری کم رشد می‌کند. بنابراین زیست‌توده کم این گیاه در خاک S_1 می‌تواند به‌دلیل تأثیر شوری بالای خاک روی رشد گیاه باشد. برای سلمه‌تره در غلظت ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، رشد ضعیف بود و گیاه چند روز پس از جوانه‌زنی در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هر دو خاک از بین رفت. به‌طور کلی بردباری سالیکورنیا و آتریپلکس به کادمیم در خاک S_1 بیشتر از سلمه‌تره بود. در این پژوهش سالیکورنیا، نسبت به سایر گیاهان مورد مطالعه، به عنوان بردبارترین گیاه نسبت به شوری شناخته شد.

کودو و همکاران (۱۵) در آزمایشی با کشت سالیکورنیا در سه نوع خاک شور، سدیمی و بسیار سدیمی دریافتند که بیشترین عملکرد سالیکورنیا در خاک سدیمی بود. در واقع گیاهان شورپسند Na را برای

Archive of SID

www.SID.ir

تنظیم فشار اسمزی در واکوئل خود می‌اندوزند. سای‌کاچوت و همکاران (۲۹) در پژوهشی دریافتند که آتریپلکس بردباری بالایی به شوری دارد و در شرایط شوری بالا (شوری ۵ تا ۱۰ گرم بر لیتر کلرید سدیم) رشد بهینه دارد.

جدول۱- رده‌بندی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

		خاک S_1	خاک S_2
رده‌بندی خاک		Typic Halaquepts	Typic Endaquepts
(%)شن		۳۷/۶	۳۲/۳
(%)سیلت		۳۰	۴۰/۳
(%)رس		۳۲/۴	۲۷/۴
کلاس بافتی خاک		لوم رسی	لوم
(%)مواد آلی		۱/۸۶	۲/۶۹
CEC ($cmol_c kg^{-1}$)		۲۰/۸	۲۲/۱
EC_e (dSm^{-1})		۱۸/۱	۲/۵
ESP (%)		۴۲/۹	۳
SAR ($mmol\ l^{-1/2}$)		۳۶/۸۶	۲/۱۹
CCE (%)		۳۷	۳۰/۵
pH		۷/۶	۸/۱
سرب کل ($mg\ kg^{-1}$)		۱۰/۱۱	۲۱/۴۲
کادمیم کل ($mg\ kg^{-1}$)		۱/۵۴	۱/۴۷
آهن کل ($mg\ kg^{-1}$)		۱۶۹۴۴	۲۹۵۰۵
روی کل ($mg\ kg^{-1}$)		۱۰۳	۶۲
مس کل ($mg\ kg^{-1}$)		۹/۲۹	۱۴/۱۱
کاتیون‌های غالب در محلول خاک ($mg\ l^{-1}$)	کلسیم	۲۳/۴	۱/۲
	منیزیم	۵/۲	۰/۴
	سدیم	۱۸۷/۰	۲۳/۸
	پتاسیم	۰/۰	۰/۰
آنیون‌های غالب در محلول خاک ($mg\ l^{-1}$)	کربنات	۰/۰	۰/۸
	بی‌کربنات	۱/۴	۵/۶
	کلر	۱۸۱/۰	۱۵/۲
	سولفات	۳۳/۷	۳/۸

EC_e: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ OM: مواد آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ SAR: نسبت جذب سدیم و ESP: درصد سدیم قابل تبادل

جدول ۲- شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی $^{\$}(Y_c/Y_o)$ گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S_1) و خاک غیرشور- سدیمی (S_2)

الف) کادمیم

غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	عملکرد نسبی گیاهان (%) $^{\$}$					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۲۲۶^{a}	۱۰۰^{a}	۳۳۶^{a}	۱۰۰^{a}	۱۶^{a}	۱۰۰^{a}
۱۰	۸۹^{b}	۱۵^{b}	۶۰^{b}	۵۴^{b}	۵^{b}	۲۳^{b}
۳۰	۱۵^{c}	۱۵^{c}	۵۷^{b}	۴۳^{c}	۴^{b}	۱^{c}
۱۰۰	n.g. $^{\#}$	n.g.	۳۲^{c}	۳۸^{d}	n.g.	n.g.

Archive of SID

www.SID.ir

ب) سرب

غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	عملکرد نسبی گیاهان(%) $					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۲۲۶[a]	۱۰۰[a]	۳۳۶[a]	۱۰۰[a]	۱۶[a]	۱۰۰[a]
۲۵۰	۱۶۱[b]	۹۸[b]	۲۶۰[b]	۵۶[b]	۱۲[b]	۹۹[a]
۵۰۰	۱۰۹[c]	۹۹[b]	۲۲۷[c]	۴۲[b]	۱۰[b]	۸۵[a]
۱۰۰۰	۹۱[c]	۹۲[b]	۲۲۲[c]	۶[c]	۷[b]	۴۵[b]

$: نسبت درصد عملکرد ماده خشک گیاه در هر تیمار (Yc) به ماده خشک تیمار شاهد در خاک S_2 (Yo).

#: عدم رشد گیاه به‌دلیل سمیت کادمیم.

*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

همچنین، با توجه به جدول ۲- ب تولید ماده خشک آتریپلکس در خاک شور- سدیمی با سطوح غلظت صفر و ۲۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، ۲/۵ برابر بیشتر از ماده خشک تولیدی در خاک غیرشور-سدیمی در همان غلظت‌ها بود. با این حال تفاوت معنی‌داری در تولید ماده خشک توسط آتریپلکس در آلودگی‌های بیشتر از ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در بین دو خاک مشاهده نشد. همچنین تولید ماده خشک سالیکورنیا در خاک S_1 بدون آلودگی کادمیمی، ۳/۵ برابر و در آلودگی‌های سربی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۲/۵ برابر بیشتر از تیمارهای مشابه در خاک S_2 بود. ماده خشک سلمه‌تره در خاک S_2، ۶ تا ۸ برابر بیشتر از خاک S_1 در همه تیمارها بود. افزون بر این، نرخ کاهش ماده خشک گیاه با افزایش غلظت‌های سرب تحت تاثیر نوع خاک بود. به گونه‌ای که در خاک شور- سدیمی عملکرد سلمه‌تره با افزایش غلظت سرب به شدت کاهش یافت در حالی‌که در خاک S_2 کاهش عملکردی چشم‌گیر با افزایش غلظت سرب مشاهده نشد. ماده خشک سالیکورنیا در خاک S_1 و آتریپلکس و سلمه‌تره در خاک S_2 بالا بود. این نتایج نشان داد که تاثیر آلودگی سربی بر رشد گیاه به‌طور گسترده به ویژگی‌های خاک و نوع گیاه بستگی دارد. در بین گیاهان مورد مطالعه، تنها سالیکورنیا در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رشد کرد. سالیکورنیا با نرخ کاهش کم عملکرد، به عنوان بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی در این پژوهش شناخته شد.

جدول ۳ روند تغییرات غلظت کادمیم و سرب در ماده‌ی خشک شاخ‌ساره گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره را در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی در دو خاک S_1 و S_2 نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳- الف آتریپلکس در خاک غیرشور- سدیمی کادمیم بالایی جذب کرد در حالی‌که در شرایط شور- سدیمی سالیکورنیا بیشترین جذب کادمیم را در شاخ‌سارهای خود داشت. در مورد سلمه‌تره جذب کادمیم در غلظت‌های مختلف کادمیم متفاوت بود. بیشترین جذب کادمیم در غلظت کم (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک S_1 و در غلظت متوسط (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک S_2 بود. گفتنی است که گیاهان آتریپلکس و سلمه‌تره در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک از بین رفتند. گوپتا و ساینها (۱۳) نشان دادند که سلمه‌تره توانایی اندوزش و پالایش مقادیر بالایی از فلزات (Ni، Cr، Pb و Cd) را در بخش‌های هوایی خود دارد. در سطوح کم آلودگی کادمیمی سلمه‌تره و آتریپلکس بالاترین انباشتگی کادمیم را به ترتیب در خاک S_1 و خاکS_2 داشتند. این نتایج بیانگر آن است که حداکثر پتانسیل گیاه برای جذب کادمیم به سطوح آلودگی خاک و همچنین نوع خاک بستگی دارد. در آزمایشی که توسط ندجیمیا و داود (۲۳) انجام گرفت، آتریپلکس بیشترین اندوزش کادمیم را در اندام‌های خود داشت که بیانگر توانایی آن در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم است، با این حال رشد ریشه و اندام‌های هوایی گیاه آتریپلکس با افزایش غلظت کادمیم در خاک کاهش معنی‌داری نشان داد. همچنین انباشت کادمیم در ریشه بیشتر از اندام‌های هوایی بود. علاوه بر این، کمترین انباشتگی کادمیم در غلظت ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک در اندام‌های هوایی مربوط به آتریپلکس در خاک S_1 ($19 mg\ kg^{-1}$) و سالیکورنیا در خاک S_2 ($8 mg\ kg^{-1}$) بود. بسیاری از پژوهشگران گزارش کردند که کادمیم پس از انباشت در اندام‌های هوایی دوباره به ریشه برمی‌گردد (۸). غنایا و همکاران (۱۰) گزارش کردند که Salicornia Europaea و Atriplex halimus به ترتیب توانایی اندوزش۲/۷-۱/۸ و ۷/۱ میکرومول کادمیم در هر گرم ماده خشک را در غلظت ۱۰۰ میکرومول کادمیم دارند.

با توجه به جدول ۳- ب آتریپلکس در خاک غیرشور- سدیمی سرب بالایی جذب کرد در حالی‌که در شرایط شور- سدیمی سالیکورنیا و سلمه‌تره بیشترین جذب سرب را در شاخ‌سارهای خود داشتند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- غلظت کادمیم و سرب در ماده‌ی خشک گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S_1) و خاک غیرشور- سدیمی (S_2)

الف) کادمیم

غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	غلظت کادمیم در ماده‌ی خشک شاخ‌ساره گیاهان ($mg\ kg^{-1}$)					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۰[$]	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۰/۵ ± ۰/۱[a]	۳۹/۴ ± ۱۰/۷[a]	۱۰/۲ ± ۱/۲[a]	۸/۰ ± ۰/۱[a]	۱۸/۹ ± ۰/۴[a]	± ۸/۹ ۰/۲[a]
۳۰	۱۸/۹ ± ۱/۲[b]	۴۶/۴ ± ۵/۸[a]	۳۰/۳ ± ۷/۸[b]	۸/۴ ± ۲/۰[a]	۳۲/۷ ± ۰[b]	۵۹/۵ ± ۱/۹[b]
۱۰۰	n.g.[#]	n.g.	۱۰۲/۸ ± ۳/۹[c]	۵۴/۰ ± ۰[b]	n.g.	n.g.

ب) سرب

غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	غلظت سرب در ماده‌ی خشک شاخ‌ساره گیاهان ($mg\ kg^{-1}$)					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۰[$]	۰	۰	۰	۰	۰
۲۵۰	۱۳/۸ ± ۱/۱[a]	۳۸/۰ ± ۸/۷[a]	۲۱/۷ ± ۲/۸[a]	۲۹/۹ ± ۴/۱[a]	۲۹/۱ ± ۲۹/۹[a]	۴/۹ ± ۲/۸[a]
۵۰۰	۴۵/۰ ± ۲۴/۱[b]	۵۴/۵ ± ۰/۶[b]	۶۱/۹ ± ۲/۳[b]	۳۲/۰ ± ۲/۳[b]	۶۷/۵ ± ۳۰/۳[b]	۳۴/۶ ± ۳/۵[b]
۱۰۰۰	۶۸/۱ ± ۷/۲[c]	۸۵/۹ ± ۵/۷[c]	۷۹/۰ ± ۱/۷[c]	۵۴/۲ ± ۵/۶[c]	۸۵/۸ ± ۱۲/۱[c]	۷۳/۷ ± ۲۸/۶[c]

:عدم رشد گیاه به‌دلیل سمیت کادمیم

$: غلظت کادمیم و سرب در تیمار شاهد به دلیل عدم قرائت توسط دستگاه جذب اتمی صفر در نظر گرفته شد.

*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

ترتیب انباشت سرب در گیاهانی که در خاک غیرشور و غیرسدیمی (خاک S_2) رشد کرده بودند به صورت آتریپلکس > سلمه-تره ≈ سالیکورنیا و در خاک شور- سدیمی (خاک S_1) به‌صورت سالیکورنیا ≈ سلمه‌تره > آتریپلکس بود. این نتایج بیانگر آن است که سالیکورنیا توانایی اندوزش بالای سرب را در شرایط شوری و سدیمی خاک و آتریپلکس در شرایط غیرشور- سدیمی دارد.

ویکرمن و همکاران (۳۱) پتانسیل آتریپلکس برای بهبود و پالایش‌سبز سلنیم از مناطق آلوده را ارزیابی کرده و آتریپلکس را به عنوان یکی از بهترین بیش‌اندوزهای سلنیم در خاک‌های شور معرفی کردند. افزایش شوری منجر به افزایش جذب کادمیم توسط گیاه *Tamarix smyrnensis* می‌شود (۲۰) که دلیل احتمالی این امر تحرّک بالای فلزات در رسوب[1] و یا جذب آب بیشتر (به‌دلیل افزایش انتقال) منجر به جریان[2] بالای فلزات به درون گیاه باشد (۷). گیاهان سرب را در ریشه خود می‌اندوزند و مقادیر اندکی از آن را به شاخ‌سارها و قسمت‌های هوایی خود انتقال می‌دهند (۱۷ و ۳۶). با توجه به جدول ۳- ب با افزایش سطوح آلودگی سربی، اندوزش سرب در گیاهان افزایش یافت و هر سه گیاه بالاترین اندوزش سرب را در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک داشتند. نتایجی مشابه توسط مانوسکی و کالوجراکیس (۱۹) گزارش شده است. این محققان در پژوهشی دریافتند که در گیاه *T. smyrnensis*، شوری کم تأثیر معنی‌داری بر جذب سرب توسط ریشه‌ها نداشت و در شوری‌های بالا، تجمع سرب کاهش یافت. در حالی‌که در برگ‌ها تأثیر شوری برعکس بود. گیاهان سرب بیشتری را در غلظت‌های بالای شوری نسبت به غلظت‌های کم آن اندوختند و علایم سمیت سرب تنها در تیمار شاهد غیر شور مشاهده شد (۱۹). مانوسکی و کالوجراکیس (۱۸) گزارش کردند که افزایش شوری باعث افزایش جذب کادمیم توسط آتریپلکس گردید. شوری تاثیر مثبتی بر جذب کادمیم توسط گیاه داشت و این امر احتمالا به دلیل زیست فراهمی فلزات در خاک ناشی از کاهش جذب کادمیم توسط ذرات خاک است. در حالی‌که در مورد سرب تاثیر آشکاری از حضور نمک بر انباشت سرب در بافت‌های گیاهی مشاهده نشد. زیرا سرب بر خلاف کادمیم که در خاک و در گیاه متحرک است، در pH های نرمال در خاک نامحلول بوده و همچنین انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی به دلیل پیوند آن به

1- Sediment
2- Flux

Archive of SID

www.SID.ir

سطح ریشه و دیواره سلولی محدود است (۱۸). همچنین دلیل این امر را می‌توان به انتقال کم سرب از ریشه به شاخ‌ساره نسبت داد. ریشه‌ها مقادیر زیادی از سرب را نسبت به برگ‌ها می‌اندوزند (۳۲).

جدول ۴ مقادیر میانگین ضریب تغلیظزیستی (BCF) را برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی در دو خاک S_1 و S_2 نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴- الف برای آتریپلکس، مقادیر BCF در غلظت‌های ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۶۰ در خاک S_1 و ۳/۴۴ و ۱/۴۷ در خاک S_2 بود. برای همه غلظت‌های کادمیم، مقادیر BCF در آتریپلکس در خاک S_1 تقریباً یکسان بود در حالی‌که در خاک S_2 از ۰/۳ تا ۰/۷ متغیّر بود. برای سلمه تره، مقادیر BCF در غلظت‌های ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، به ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۰۴ در خاک S_1 و ۰/۷۷ و ۱/۸۹ در خاک S_2 بود. آتریپلکس تمایل بیشتری برای اندوزش کادمیم در خاک شور- سدیمی نشان داد. همان‌طور که در مورد غلظت فلز در گیاه بحث شد، حداکثر پتانسیل گیاه برای جذب کادمیم به سطوح آلودگی خاک و همچنین نوع خاک بستگی داشت. روند تغییرات BCF تا حدی مشابه روند تغییرات غلظت فلز در گیاه بود که در جدول ۳ مورد بحث قرار گرفت. با این حال تفاوت بین گیاهان در جدول ۳ در نظر گرفته نشد و با توجه به نتایج جدول ۴ اختلاف معنی‌داری بین سه گیاه در در هر دو خاک وجود داشت. به‌طوری که سلمه‌تره بیشترین و آتریپلکس کمترین مقدار BCF را در خاک S_1 و آتریپلکس بیشترین و سالیکورنیا کمترین مقدار BCF را در خاک S_2 داشتند. در حالی‌که آتریپلکس با مقادیر BCF برابر ۳/۵-۱/۵ و سلمه‌تره با مقادیر BCF برابر ۲-۰/۸ در شرایط غیرشور- سدیمی و سالیکورنیا با BCF حدود یک در خاک شور- سدیمی می‌توانند به عنوان بیش‌اندوز کادمیم باشد.

زایاد و همکاران (۳۴) اظهار داشتند که BCF شاخص مناسبی برای گروه‌بندی گیاهان بیش‌اندوز است. بر پایه مطالعات قلّاب و عثمان (۹)، تحرّک کادمیم در خاک‌های متاثر از نمک با افزایش شوری افزایش می‌یابد که دلیل این امر تشکیل کمپلکس کادمیم با کلر و افزایش تحرّک‌پذیری و حلالیت کادمیم می‌باشد.

در مورد آتریپلکس و سلمه‌تره مقادیر BCF (به ترتیب ۱/۵ تا ۳/۵ و ۰/۸ تا ۲) در خاک غیرشور- سدیمی با افزایش شوری افزایش یافت که به نظر می‌رسد دلیل این امر تشکیل کمپلکس کادمیم با کلر و افزایش تحرّک‌پذیری کادمیم باشد. همچنین در گیاه سالیکورنیا مقادیر BCF در خاک شور- سدیمی با افزایش غلظت کادمیم تغییر محسوسی نداشت (جدول ۴- الف) که بیانگر توانایی سالیکورنیا در اندوزش کادمیم است. آتریپلکس پتانسیل چشمگیری برای اندوزش کادمیم در خاک غیرشور- سدیمی نشان داد. این نتایج نشان داد که این گیاهان می‌توانند برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم استفاده شوند.

جدول ٤- مقادیر میانگین ضریب تغلیظزیستی(BCF) برای اصلاح آلودگی کادمیمی و سربی برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S_1) و خاک غیرشور- سدیمی (S_2)

الف) کادمیم

غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	BCF$					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۱۰	۰/۰۴ ± ۰/۰۱^{a}	۳/۴۴ ± ۱/۰۷^{a}	۰/۸۸ ± ۰/۱۲^{a}	۰/۶۹ ± ۰/۰۱^{a}	۱/۶۴ ± ۰/۰۴^{a}	۰/ ۷۷ ± ۰/۰۲^{a}
۳۰	۰/۶۰ ± ۰/۰۴^{a}	۱/۴۷ ± ۰/۱۹^{b}	۰/۹۶ ± ۰/۲۶^{a}	۰/۲۷ ± ۰/۰۷^{b}	۱/۰۴ ± ۰/۰۱^{a}	۱/۸۹ ± ۰/۰۶^{b}
۱۰۰	n.g.$^{\#}$	n.g.	۱/۰۱ ± ۰/۰۴^{a}	۰/۵۳ ± ۰/۰۱^{c}	n.g.	n.g.

ب) سرب

غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	BCF$					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۲۵۰	۰/۰۵ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۱۴ ± ۰/۰۳^{a}	۰/۰۹ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۱۱ ± ۰/۰۲^{a}	۰/۱۱ ± ۰/۱۲^{a}	۰/۰۲ ± ۰/۰۱^{a}
۵۰۰	۰/۰۹ ± ۰/۰۵^{a}	۰/۱۱ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۱۲ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۰۶ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۱۳ ± ۰/۰۶^{a}	۰/۰۷ ± ۰/۰۱^{b}
۱۰۰۰	۰/۰۷ ± ۰/۰۱^{a}	۰/ ۰۸ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۰۸ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۰۵ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۰۸ ± ۰/۰۴^{a}	۰/۰۷ ± ۰/۰۳^{b}

$: نسبت کادمیم و سرب کل در ماده خشک گیاه (C_p) در هر تیمار (Y_c) به غلظت کل کادمیم و سرب در خاک (C_s)

\# :عدم رشد گیاه به‌دلیل سمیت کادمیم.

*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

Archive of SID

www.SID.ir

با توجه به جدول ۴- ب مقادیر BCF بـرای آتـریپلکس در همـه غلظت‌های سرب ۰/۰۹≤۰ بود در حالی‌که برای خاک S_2 بین ۰/۱۴- ۰/۰۹ بود که با افزایش غلظت سرب کاهش یافت. مقادیر BCF برای سالیکورنیا ۰/۱۲≤ بود و تفاوت معنی‌دار در هر دو خاک مـشاهده شـد کـه ایـن اخـتلاف معنـی‌دار در خـاک S_1 بیـشتر از خـاک S_2 بـود ($p<0/05$). برای سلمه‌تره، مقادیر BCF در غلظـت‌هـای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۱۳ در خاک S_1 و ۰/۰۲ و ۰/۰۷ در خاک S_2 بود. به‌طور کلی BCF هر دو فلز توسـط گیاهان مورد مطالعه در تیمار شاهد تفـاوت معنـی‌داری ($p<0/05$) بـا سایر تیمارها داشت. با این حـال، مقـدار BCF در بـین غلظـت‌هـای مختلف افزوده شده فلز به خاک تفاوت معنی‌داری ($p<0/05$) نداشتند. سلمه‌تره تمایل نسبتاً بیشتری بـرای انباشـت سـرب در خـاک شـور- سدیمی نشان داد. هر چند با داشتن مقادیر BCF کمتر از ۰/۱۵، هـیچ کدام از گیاهان مورد مطالعه توانایی بالایی در انباشت سرب نداشـتند. بیشترین غلظت سرب در مـاده خـشک گیـاه $85/84\ mg\ kg^{-1}$ بـرای سلمه‌تره در خاک S_1 و $85/92\ mg\ kg^{-1}$ برای آتریپلکس در خاک S_2 بود. نتایجی مشابه توسـط پوربـسکا و استروسـکا (۲۳) گـزارش شـده است. سای‌کاچوت و همکـاران (۲۹) گـزارش کردنـد کـه آتـریپلکس فلزات سنگین را در ریشه انباشته و مقایر اندکی از آن را بـه قـسمت- های بالایی گیاه انتقال می‌دهد. داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که این گیاه در پالایش‌سبز خاک با مقادیر بالای غلظت‌های کادمیم، سرب و روی موثر است. اوزاوا و همکاران (۲۶) بیـان داشـتند که سالیکورنیا توانایی اندوزش مقادیر بالایی از کادمیم نسبت به سـایر بیش‌اندوزهای کادمیم دارد و سالیکورنیا را به عنـوان گیـاهی مناسـب برای پالایش‌سبز خاک‌های شور آلوده به کادمیم معرفی کردند.

جدول ۵ مقادیر میانگین ضریب اندوزش زیستی (BCF_{Na}) بـرای جذب سدیم خاک توسط گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تـره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک S_1 و S_2 را نشان می‌دهد. هرچه این ضریب بیشتر از یک باشد، بـه معنـای اندوزش بیشتر سدیم خاک توسط گیاه است. بـا توجـه بـه جـدول ۵، سالیکورنیا در جذب سدیم خاک در هر دو خاک S_1 و S_2 و آتـریپلکس در خاک غیر شور و غیرسـدیمی (S_2) در آلـودگی سـربی و کـادمیمی تواناتر از سلمه‌تره هستند. با این حال در گیاه سالیکورنیا توانایی جذب سدیم در هر دو خاک S_1 و S_2 بـا افـزایش سـطوح آلـودگی سـربی و کادمیمی خاک کاهش یافت. مقادیر BCF_{Na} در خاک شور- سـدیمی در گیاهان سالیکورنیا و آتریپلکس و سلمه‌تره با افزایش غلظت سـرب و کادمیم کاهش یافت. با این حال مقادیر BCF_{Na} در آلودگی سربی و کادمیمی برای خاک غیرشور و غیرسدیمی (S_2) و خاک شور- سدیمی برای هر سه گیاه روند افزایشی و کاهشی منظمی نداشت.

جدول ۵- مقادیر میانگین ضریب اندوزش زیستی سدیم (BCF_{Na}) توسط گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S_1) و خاک غیرشور- سدیمی (S_2)

الف) کادمیم

غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	$BCF_{(Na)}$ $					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۶۷ ± ۱۵^{a}	۵۱۸ ± ۳۱۳^{a}	۲۰۲ ± ۶۳^{a}	۴۸۶ ± ۲۱^{a}	۵۵ ± ۲/۸۵^{a}	۱۳ ± ۸/۲۷^{a}
۱۰	۶۰± ۴^{a}	۴۱۱ ± ۴۸۴^{b}	۸۵ ± ۱۴^{b}	۸۹۲ ± ۱۰۷^{b}	۲۲ ± ۱۶^{b}	۶۹ ± ۱۰^{b}
۳۰	۲۷± ۰ ۵۳^{b}	۹۵۶ ± ۱۹۲^{c}	۱۲۷ ± ۶۶^{c}	۴۴۶ ± ۴/۳۹^{c}	۲۰ ± ۲/۰۹^{b}	۱۵۱ ± ۶۹^{c}
۱۰۰	n.g. #	n.g.	۱۴۸ ± ۴۴^{c}	۱۹۳ ± ۲۶۶^{d}	n.g.	n.g.

ب) سرب

غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ($mg\ kg^{-1}$)	$BCF_{(Na)}$ $					
	آتریپلکس		سالیکورنیا		سلمه‌تره	
	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2	خاک S_1	خاک S_2
۰	۶۷ ± ۱۵^{a}	۵۱۸ ± ۳۱۳^{a}	۲۰۲ ± ۶۳^{a}	۴۸۶ ± ۲۱^{a}	۵۵ ± ۲۰^{a}	۱۳ ± ۸/۲۷^{a}
۲۵۰	۶۶ ± ۳۲^{a}	۶۳۶ ± ۸۷^{b}	۲۰۲ ± ۶۳^{a}	۶۵۱ ± ۴۵^{b}	۲۵ ± ۱۷^{b}	۲۵ ± ۱۳^{b}
۵۰۰	۶۷ ±۱۶^{a}	۹۱۰ ± ۱۳۹^{c}	۲۲۴ ± ۸۱^{a}	۴۸۸ ± ۲۲^{c}	۲۵ ± ۱۹^{b}	۱۳ ± ۶/۰۵^{c}
۱۰۰۰	۸۰ ± ۰/۴۴^{b}	۵۳۲ ± ۵۹^{d}	۱۷۸ ± ۲۲^{b}	۳۹۰ ± ۲۵۶^{d}	۱۰ ± ۴/۳۴^{c}	۲۶ ± ۸/۱۶^{d}

$: نسبت سدیم کل در ماده خشک گیاه (Cp) در هر تیمار (Yc) به غلظت کل سدیم در خاک (Cs).

:عدم رشد گیاه به‌دلیل سمیت کادمیم.

*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

Archive of SID

www.SID.ir

در غلظت صفر (بدون آلودگی سربی و کادمیمی)، اندوزش زیستی سدیم (BCF_{Na}) برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره به ترتیب ۶۷، ۲۰۲ و ۵۷ در خاک شور- سدیمی بود که مقدار بالای BCF_{Na} برای سالیکورنیا بیانگر توانایی بالای این گیاه در جذب و اندوزش سدیم از خاک است. کریشناپیلای و سری‌رانجان (۱۴) در آزمایشی نشان دادند که آتریپلکس پتانسیل برداشت ۰/۲۵ کیلوگرم کلرید بر مترمربع خاک و ۰/۰۶ کیلوگرم سدیم بر مترمربع از خاک‌های آلوده طی دوره ۱۵۰ روزه دارد. چیسیک و همکاران (۶) در آزمایش مزرعه‌ای کاربرد آتریپلکس را برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی رس در ایتالیا اثبات کردند. همچنین براون و همکاران (۴) نشان دادند که آتریپلکس می‌تواند به عنوان یک صافی زیستی[1] برای برداشت عناصر غذایی از خاک‌های شور استفاده شود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی جذب و اندوزش همزمان سدیم و کادمیم یا سرب توسط سه گیاه آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در دو خاک با ویژگی‌های متفاوت و امکان‌سنجی استفاده از این گیاهان در اصلاح همزمان ESP و آلودگی سربی و کادمیمی خاک انجام گرفت. سالیکورنیا بالاترین اندوزش کادمیم و سالیکورنیا و آتریپلکس بالاترین انباشت سرب را تحت شرایط نامطلوب خاک‌های شور- سدیمی داشتند. در حالی‌که سلمه‌تره و آتریپلکس بردباری بالایی به کادمیم در خاک معمولی داشتند. این نتایج بیانگر این است که این گیاهان توانایی اصلاح خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم را دارند. سالیکورنیا در جذب سدیم خاک در هر دو خاک S_1 و S_2 و آتریپلکس در خاک غیر شور و غیرسدیمی (S_2) در آلودگی سربی و کادمیمی تواناتر از سلمه‌تره بودند. در این پژوهش سالیکورنیا با کمترین کاهش عملکرد نسبی، بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی شناخته شد و می‌توان از این گیاه برای پالایش همزمان سرب و کادمیم در خاک‌های شور- سدیمی حتی در غلظت‌های بالای کادمیم و سرب استفاده کرد.

منابع

1- Alloway B.J. 1990. Heavy metals in soils: Lead. Blackie and Glasgow. Ltd, London, Pp: 177-196.
2- Almeida C.M., Mucha A.P., and Vasconcelos M.T. 2004. Influence of the sea rush Juncus maritimus on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant. Environ. Sci. Technol, 38: 3112-3118.
3- Brooks R.R. 1999. Phytochemistry of hyperaccumulators. In: Plants that hyperaccumulate heavy metals. University Press, Cambridge, pp: 261-289.
4- Brown J.J., Glen E.P., Fitzsimmons K.M., and Smith S. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. Aquaculture, 175: 255-268.
5- Chapman H.D., and Pratt P.F. 1978. Methods of analysis for soils, plants and waters. Division of agricultural sciences. University of California, USA.
6- Chisci G.C., Bazzoffi P., Pagliai M., Papini R., Pellegrini S., and Vignozzi N. 2001. Association of Sulla and Aatriplex shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy. Agr. Ecosys and Environ, 84: 45-53.
7- Fitzgerald E., Caffrey J., Nesaratnam S., and McLoughlin P. 2003. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. Environ. Pollut, 123: 67–74.
8- Gadapati W.R., and Macfie S.M. 2006. Phytochelatinsareonly partially correlated with Cd-stress in two species of Brassica. Plant Sci, 170: 471–480.
9- Ghallab A., and Usman A.R.A. 2007. Effect of Sodium Chloride-induced Salinity on Phyto-availability and Speciation of Cd in Soil Solution Water Air Soil Pollut, 185: 43–51.
10- Ghnaya T., Nouairi I., Slama I., Messedi D., Grignon C., Abdelly C., and Ghorbel M.H. 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: Sesuvium portulacastrum and Mesembryanthemum crystallinum. J. Plant Physiol., 162: 1133-1140.
11- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute (ed.) Methods of soil analysis, part 1. SSSA, pp: 383-411.
12- Guo G.L., Zhou Q.X., Koval P.V., and Belogolova G.A. 2006. Speciation distribution of Pb, Cu and in contaminated phaiozem in north-east China using single and sequential extraction procedures. Aust J. Soil Res, 44: 135-142.
13- Gupta A.K., and Sinha S. 2006. Phytoextraction capacity of the Chenopodium Album L . grown on soil amended with tannery sludge. Bioresource Tec, 98: 442–446.
14- Krishnapillai M., and Sri Ranjan R. 2005. Evaluation the phytoremediation potential of Atriplex Patula on salt

1- biofilter

Archive of SID

www.SID.ir

contaminated soil. The canadin soc. Eng. Agr. food, and biological systems, pp: 05-052.
15- Kudo N., Sugino T., Oka M., and Fujiyama H. 2010. Sodium tolerance of plants in relation to ionic balance and the absorption ability of microelements. Soil Sci and Plant Nutrition, 56: 225–233.
16- Lavkulich L.M. 1981. Methods Manual, Pedology Laboratory. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
17- Malone C., Koeppe D.E., and Miller R.J. 1974. Localization of lead accumulated by corn plants. Plant Physiol, 53: 388–394.
18- Manousaki E., and Kalogerakis N. 2009. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity. Environ Sci Pollut Res. 16: 844–854.
19- Manousaki E., and Kalogerakis N. 2010. Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils. Ind. Eng. Chem. Res., xxx, XXXX: A-D.
20- Manousaki, E., J. Kadukova, N. Papadantonakis and N. Kalogerakis. 2008. Phytoextraction and phytoexcretion of Cd by the leaves of *Tamarix smyrnensis* growing on contaminated non-saline and saline soils. Environ.l Research. 106: 326–332.
21- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A. L. (ed): Methods of soil analysis. Part2. Chemical and microbiological properties. Madison, Wisconsin, USA, P: 199-224.
22- McLean J.E., and Bledsoe B.E. 1992. Behaviour of metals in soils. Ground. Water. Issue. EPA, 540: (S-92-0)18: 25.
23- Nedjimia B., and Daoud Y. 2008. Cadmium accumulationin Atriplex halimus subsp. Schweinfurthii and it sinfluence on growth, proline, roothy draulic conductivity and nutrient uptake. Flora, 204: 316–324.
24- Nelson R.E., and Sommers L.E. 1982. Total carbon. Organic carbon and organic matter. In A. L. Page et al. (ed) Methods of soil analysis. Part2. 2nd. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp: 539-579.
25- Norvell W.A., Wu J., Hopkins D.G., and Welch R.M. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. Soil. Sci. Soc. Am. J. 64: 2162–2168.
26- Ozawa T., Miura M., Fukuda M., and Kakuta S. 2010. Cadmium Tolerance and Accumulation in a Halophyte *Salicornia europaea* as a New Candidate for Phytoremediation of Saline Soils. Sci. Rep. Grad. Sch. Life. & Envi. Sci, 60: 1-8.
27- Porębska G., and Ostrowska A. 1999. Heavy Metal Accumulation in Wild Plants: Implications for Phytoremediation. Polish. J. Environ. Studies, 8(6): 433-442.
28- Rhoados J.D. 1982. Cation exchange capacity. In A. L. Page et al. (ed) Methods of soil analysis. Part2. 2nd. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. P. 149-158.
29- Sai Kachout S., Leclerc J.C., Ben Mansoura A.M., Rejeb N., and Ouerghi Z. 2009. Effects of Heavy Metals on Growth and Bioaccumulation of the Annual Halophytes Atriplex Hortensis and A. Rosea. J. Applied. Sci. Res, 5(7): 746-756.
30- Scheffer F., and Schachtschabel P. 2002. Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
31- Vickerman D.B., Shannon M.C., Banuelos G.S., Grieve C.M., and Trumble J.T. 2002. Evaluation of Atriplex lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. Environ. Pollut, 120: 463-473.
32- Wozny A. 1995. Lead in Plant Cells, Sorus, Poland. 16-25.
33- Yao S., Lan H., and Zhang F. 2010. Variation of seed heteromorphism in Chenopodium album and the effect of salinity stress on the descendants. Annals of Botany, 105 (6): 1015-1025.
34- Zayed A., Gowthaman S., and Terry N. 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. J. Environ. Qual. 646 Odjegba and Fasidi, 27: 715–721.
35- Zhou Q.X., Kong F.X., and Zhu L. 2004. Ecotoxicology (in Chinese).Sci Press Beijing, China.
36- Zimdahl R.L., and Koeppe D.E. 1977. Lead in the Environment. National Sci. Foundation, Washington DC, pp: 99–104.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 6, Jon-Feb 2012, p. 1299-1309

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۰، ص. ۱۳۰۹-۱۲۹۹

Simultaneous Uptake and Accumulation of Sodium and Cadmium or Lead by Three Halophyte Plants in Two Calcareous Soils

R. Hamzenejad Taghlidabad[1] - H. Khodaverdiloo[2*] - Sh. Manafi[3]- S. Rezapour[4]

Received:28-11-2010
Accepted:23-7-2011

Abstract

Nowadays, environmental pollution by heavy metals is one of the most serious threats of the world which needs effective remediation actions. The aim of this study was to investigate the potential use of Atriplex [*Atriplex verucifera*], Salicornia [*Salicornia europaea*] and *Chenopodium Album* in simultaneous uptake and accumulation of Na and Cd or Pb in two calcareous soils with different properties. Two soils, including a saline-sodic-calcareous (S_1) and a calcareous (S_2) soil, were selected. Different concentrations of Pb (0, 250, 500 and 1000 mg Pb kg^{-1} soil) and Cd (0, 10, 30 and 100 mg Cd kg^{-1}) were then added to the soils. . The contaminated soils were incubated under a wetting-drying moisture regime for nearly seven months. The plants seeds were grown in pots containing different treatments of polluted soils and in control treatment (no Cd and Pb contaminations). The plant yields and concentrations of Pb, Cd and Na in the soil and plant samples were measured. Results showed that relative yield of Salicornia was more in soil S_1, whereas those of Atriplex and Chenopodium Album were more in soil S_2. In saline- sodic soil, the values of Na bioconcentration factor (BCE_{Na}) in control treatment were 67, 202 and 57 for Atriplex, Salicornia and chenopodium album respectively. The high value of BCE_{Na} in Salicornia revealed the ability of this plant in absorption and accumulation of Na from soil. A considerable accumulation of soil Cd by Salicornia and Pb accumulation by Atriplex and Salicornia was observed under unsuitable conditions of the saline-sodic soil, whereas, Atriplex and Chenopodium had high capability for Cd in the soil S_2. These results revealed that these plants could be used for remediation of Pb and Cd contaminated soils. In this study, Salicornia with lower rate of yield reduction had the highest tolerance to Cd-stress and it seems that one can use this plant for phytiremediation of Cd and Pb from saline- sodic soil even in high concentrations of Cd and Pb.

Keywords: Bioaccumulation, Sodium (Na), Lead (Pb), Cadmium (Cd), Halophyte plants

Archive of SID

1,2,3,4- MSc Student and Assistant Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Respectively
(*-Corresponding Author Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

www.SID.ir