نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۲، خرداد– تیر ۱۳۹۵، ص. ۵۸۰-۵۶۹

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 2, May.-Jun. 2016, p. 569-580

اثرات زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تغییرات شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آلوده

محسن حمیدپور[1*]- لیلا اکبری[2]- حسین شیرانی[3]- علی اکبر محمدی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲

چکیده

به منظور بررسی اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تثبیت و شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آلوده، آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح فاکتوریل با دو عامل شامل زئولیت در سه سطح صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی، و عامل ورمی‌کمپوست در سه سطح صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی با سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. با کاربرد ورمی‌کمپوست، غلظت شکل محلول + تبادلی روی کاهش معنی‌داری یافت. کمترین غلظت شکل محلول + تبادلی روی در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که نسبت به شاهد، حدود ۵۷ درصد کمتر بود. زئولیت میزان روی پیوند شده با کربنات‌ها را کاهش داد. کمترین غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که نسبت به شاهد حدود ۳۰ درصد کاهش غلظت داشت. در همه سطوح ورمی‌کمپوست، کاربرد زئولیت باعث کاهش غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها و روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز گردید. با کاربرد ورمی‌کمپوست و زئولیت غلظت روی پیوند شده با مواد آلی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین غلظت روی پیوند شده با مواد آلی در تیمار ۵٪ ورمی‌کمپوست مشاهده شد که این تیمار نسبت به شاهد حدود ۴۰ درصد غلظت روی پیوند شده با مواد آلی را افزایش داد. در تمامی سطوح زئولیت، با کاربرد ورمی‌کمپوست روند افزایشی در غلظت روی پیوند شده با ماده‌ی آلی مشاهده شد. به‌طور کلی، کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و زئولیت باعث کاهش شکل‌های قابل دسترس روی در خاک می‌گردد. بنابراین، استفاده از آنها به صورت ترکیبی در تثبیت شیمیایی روی درخاک‌های آلوده پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، تثبیت شیمیایی، فلزات سنگین

مقدمه

ورود و تجمع عناصر سنگین در خاک، به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی، امری تدریجی بوده و غلظت عناصر می‌تواند به حدی برسد که امنیت غذایی بشر را تهدید نماید. در دهه‌های اخیر به پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌منظور جلوگیری از ورود عناصر سنگین به چرخه غذایی و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی توجه زیادی شده است (۱۶). پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین یکی از مهم‌ترین سیاست‌های زیست محیطی در کشورهای صنعتی می‌باشد. هم‌چنین این نگرانی در کشورهای در حال توسعه نیز وجود دارد. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در جهت رفع آلودگی از خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با بکارگیری مجموعه‌ای از تکنیک‌های درجا و غیر درجا انجام شده است. هیچ یک از این روش‌ها راه حل دائمی برای پالایش محیط‌های آلوده نبوده و اغلب ممکن است بیش از یک روش برای بهینه‌سازی پالایش لازم باشد (۱۹). تثبیت شیمیایی یکی از روش‌های در جای پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین است که در آن آلاینده‌ها به شکل غیرمحلول، غیرمتحرک و غیرسمی تبدیل می‌شوند و پتانسیل خطر آنها کاهش می‌یابد (۱۹). در تثبیت شیمیایی واکنش شیمیایی بین آلاینده‌ها و مواد افزودنی صورت می‌گیرد. از جمله مواد به کار رونده در این روش آهک، هیدروکسید منیزیم، کانی‌های رسی و مواد آلی می‌باشند (۸، ۹ و ۱۳).

اودوم و همکاران (۲۰) گزارش نمودند افزودن اصلاح‌کننده‌های آلی به خاک از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار فلز با گروه‌های عامل، فلزات سنگین را در خاک تثبیت می‌کنند و حلالیت، سمیت و قابلیت دسترسی آنها را کاهش می‌دهد. در حالی که نتیجه مطالعه مادرید و همکاران (۱۵) نشان داد کودهای حیوانی تازه و کمپوست‌های نارسیده به‌دلیل مقدار زیاد مواد آلی محلول می‌توانند تحرک فلزات سنگین را در خاک افزایش دهند.

مطالعات نشان داده است که کاربرد همزمان زئولیت و اسید هومیک در پالایش خاک‌های آلوده به سرب نسبت به کاربرد زئولیت تنها،

۱، ۲ و ۳ – به ترتیب دانشیار، دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان
(*- نویسنده مسئول: Email: mohsen_hamidpour@yahoo.com)
۴- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان

کارآیی بیشتری در تثبیت سرب در خاک داشته است (۱۸). نتایج شی و همکاران (۱۸) نشان داد که غلظت سرب در گیاهان رشد یافته در تیمار زئولیت + اسید هومیک به‌طور معنی‌داری کمتر از گیاهان رشد یافته در تیمار زئولیت تنها بود. عباس‌پور و گلچین (۱) گزارش کردند که کاربرد زئولیت و ورمی‌کمپوست در یک خاک آلوده به عناصر سنگین، غلظت کادمیوم، سرب و مس قابل استخراج به‌وسیله DTPA را کاهش داد. هم‌چنین آن‌ها گزارش کردند کاربرد ورمی‌کمپوست غلظت سرب در بخش پیوند شده به ماده‌ی آلی، همراه با اکسیدهای آهن و منگنز و جذب اختصاصی شده را افزایش و غلظت سرب تبادلی را کاهش داد.

نهشته‌های عظیمی از کانی زئولیت در مناطق مختلفی از ایران یافت شده و استفاده‌های زیست محیطی از آن‌ها آغاز شده است. با وجود این‌که تحقیقات فراوانی در مورد جذب برخی از فلزات سنگین به‌وسیله زئولیت‌های ایران از محلول‌های آبی انجام شده است، ولی اطلاعات کمی در مورد کاربرد هم‌زمان زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تثبیت روی در خاک و بر تغییر شکل‌های شیمیایی آن در منابع وجود دارد.

مواد و روش‌ها

ورمی‌کمپوست مورد استفاده در این پژوهش از شرکت کیان کمپوست شیراز تهیه گردید (جدول ۱). نمونه زئولیت مورد استفاده از معدن فیروزکوه تهیه گردید (جدول ۲) و چندین بار با آب مقطر آبشویی شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شد.

جدول ۱- برخی خصوصیات شیمیایی ورمی‌کمپوست

Table 1- Some chemical characteristics of vermicompost

خصوصیت Characteristic	مقدار Quantity
پی‌اچ pH	8.6
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dsm^{-1})	7.8
نیتروژن کل (درصد) Total N (%)	2.8
کربن آلی (درصد) OC (%)	29
مس قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable Cu ($mg\ kg^{-1}$)	3
منگنز قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable Mn ($mg\ kg^{-1}$)	20
آهن قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable Fe ($mg\ kg^{-1}$)	34.6
روی قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable Zn ($mg\ kg^{-1}$)	65
فسفر قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable P ($mg\ kg^{-1}$)	952
پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم) DTPA-extractable K ($mg\ kg^{-1}$)	469

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی زئولیت بر حسب درصد

Table 2- Chemical properties of zeolite

SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	CaO(%)	SO_3(%)	Na_2O(%)	K_2O(%)	Cl^-(%)
67.8	11.6	0.54	0.84	0.2	4.45	4.3	0.98

یک نمونه خاک با بافت لوم، آلوده به روی از مزارع کشاورزی اطراف کارخانه سرب و روی زنجان تهیه شد. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن در گلخانه، از الک دو میلی‌متری عبور داده و به‌منظور تعیین برخی خواص فیزیکی و شیمیایی (جدول ۳) به آزمایشگاه انتقال داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری، پ‌هاش در خمیر اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک، کربن آلی به وسیله

اکسایش با پتاسیم دی کرومات، کربنات کلسیم معادل به وسیله تیتره کردن با اسید و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با روش جانشین‌سازی کاتیون‌ها با استات سدیم مولار با پ هاش برابر ۸/۲ اندازه‌گیری گردید (۲۱). غلظت کل روی با پس از هضم نمونه خاک با آکورژیا (مخلوط اسیدکلریدریک ۳۷ درصد و اسیدنیتریک ۶۵ درصد با نسبت سه به یک) با دستگاه جذب اتمی (GBC Avanta ساخت استرالیا) اندازه‌گیری شد (۲۱).

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه قبل از انجام آزمایش

Table 3- Some physico-chemical characteristics of soil before experiment

ویژگی Characteristic	مقدار Quantity
درصد رس Clay (%)	13.5
درصد سیلت Silt (%)	38.5
درصد شن Sand (%)	48
رطوبت ظرفیت زراعی (٪) FC (%)	17.5
روی کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Zn (mg kg^{-1})	450
سرب کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Pb (mg kg^{-1})	267
کادمیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Cd (mg kg^{-1})	6.8
مواد آلی (درصد) OM (%)	1.72
کربنات کلسیم معادل (درصد) Equivalent $CaCO_3$ (%)	14.2
پ‌اچ pH	8.1
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS m^{-1})	1.4
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم) CEC (cmolc kg^{-1})	36.4

این آزمایش در گلخانه به صورت آزمایش فاکتوریل با دو عامل شامل زئولیت در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ گرم در کیلوگرم خاک یا (صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و عامل ورمی‌کمپوست در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ گرم در کیلوگرم خاک یا (صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) با ۲ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. قبل از ریختن خاک در گلدان‌ها، ابتدا مقادیر معین زئولیت و ورمی‌کمپوست مطابق با طرح آماری مورد نظر به خاک‌ها در کیسه‌های نایلونی افزوده شد. خاک موجود در هر کیسه به خوبی مخلوط و به داخل گلدان‌ها منتقل و به مدت یک ماه تحت شرایط خشک و مرطوب شدن متوالی قرار گرفتند. در هر گلدان یک کیلویی تعداد ۴ عدد بذر ذرت (هیبرید سینگل گراس ۷۰۴) کشت گردید و رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه رسانده شد. پس از گذشت ده روز از استقرار گیاهان در گلدان‌ها، بوته‌های اضافی حذف و در هر گلدان ۳ بوته نگه‌داری شد. آبیاری گلدان‌ها، با آب مقطر به صورت روزانه و بر اساس ۸۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شدند. لازم به ذکر است که گلدان‌ها فاقد زه‌کش بودند. گیاهان پس از ۶۰ روز برداشت شدند و پس از مخلوط نمودن خاک هر گلدان، از خاک گلدان‌ها نمونه‌برداری شد. سپس تغییرات پی‌اچ، قابلیت هدایت الکتریکی و شکل‌های مختلف فلزات سنگین در خاک اندازه‌گیری شد. برای مطالعه شکل‌های شیمیایی مختلف عناصر سنگین از روش سالبو و همکاران (۱۷) استفاده شد. بدین صورت که ابتدا دو گرم نمونه خاک از هر گلدان را توزین نموده و در لوله‌های فالکون ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و طی ۵ مرحله به‌صورت زیر عصاره‌گیری انجام گرفت. عصاره‌های تمامی مراحل، نهایتاً به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و غلظت روی در آن‌ها با دستگاه جذب اتمی (GBC Avanta ساخت استرالیا) اندازه‌گیری شد.

برای استخراج شکل محلول و قابل تبادل، بیست میلی‌لیتر محلول یک مولار استات آمونیوم (pH= ۷) به نمونهٔ توزین شده اضافه و سپس به‌مدت ۲ ساعت در شیکر تکان داده شد و سانتریفیوژ (دور ۳۰۰۰ به‌مدت ۵ دقیقه) گردید و محلول رویی عصاره‌گیری شد. برای تعیین شکل پیوند شده با کربنات‌ها، بیست میلی‌لیتر استات آمونیوم یک مولار که با اسید استیک تنظیم شده (pH= ۵) به نمونه باقی‌مانده از مرحله قبل افزوده و به مدت ۲ ساعت در شیکر تکان داده و سپس سانتریفیوژ گردید و محلول رویی عصاره‌گیری شد. برای استخراج شکل پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز، بیست میلی‌لیتر محلول ۰/۰۴ مولار هیدروکسیل آمید کلرید (NH_3OCl یا NH_2OH-Cl) در اسید استیک ۲۵٪، به‌مدت ۶ ساعت روی حمام بخار در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده و مانند مراحل قبل عصاره‌گیری انجام شد. به منظور تعیین شکل پیوند شده با موادآلی، ابتدا ۱۵ میلی‌لیتر آب‌اکسیژنه ۳۰٪ که با اسید نیتریک pH آن برابر دو تنظیم گردیده بود به نمونه باقی‌مانده از مرحله‌ی قبل اضافه شد و به مدت ۵/۵ ساعت روی حمام بخار در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. بعد از سرد شدن محلول، ۵ میلی‌لیتر استات‌آمونیوم ۳/۲ مولار در اسیدنیتریک ۲۰٪ به آن اضافه و به‌مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شد و پس از سانتریفیوژ، عصاره‌گیری انجام شد. برای تعیین شکل باقی‌مانده روی، یک گرم از خاک مرحله‌ی قبل، بعد از خشک شدن در فلاسک مخروطی (ارلن)، توزین شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۷ مولار به آن اضافه و به‌مدت ۶ ساعت به‌وسیله‌ی صفحهٔ داغ حرارت دید. بعد از تبخیر، ۱ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۲ مولار به آن اضافه و باقی‌مانده بعد از هضم به ۱۰ میلی‌لیتر رقیق گردید.

پردازش داده‌ها

در پایان نتایج داده‌های بدست آمده از این پژوهش توسط نرم افزار SAS.9.1 تجزیه آماری شد و نمودارها و جدول‌های مربوطه با استفاده از برنامه‌های Excel و Word رسم و نتایج تفسیر گردیدند.

نتایج و بحث

برخی خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴) نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای زئولیت و ورمی‌کمپوست و هم‌چنین بر هم‌کنش آنها بر تغییرات پی‌اچ و قابلیت هدایت الکریکی خاک در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. در مورد اثرات تیمارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک فقط اثر زئولیت بر این ویژگی در سطح ۱٪ معنی‌دار گردید، ولی اثر ورمی‌کمپوست و بر هم‌کنش ورمی‌کمپوست و زئولیت معنی‌دار نشد.

پی‌اچ خاک

افزودن ورمی‌کمپوست به خاک اثر معنی‌داری بر پی‌اچ خاک نداشت (جدول ۵). در تمامی سطوح ورمی‌کمپوست، افزودن زئولیت به خاک موجب کاهش معنی‌دار پی‌اچ خاک نسبت به شاهد گردید. کمترین میزان پی‌اچ (۷/۵۶) مربوط به تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست و ۱۰٪ زئولیت می‌باشد که نسبت به سطح شاهد (۷/۸۹)، ۴/۴ درصد پی‌اچ خاک را کاهش داد.

کاهش پی‌اچ خاک ممکن است به‌دلیل فرایند نیتریفیکاسیون، تولید دی‌اکسیدکربن و اسیدهای آلی در نتیجه‌ی تشدید فعالیت میکروبی با افزودن همزمان ورمی‌کمپوست و زئولیت به خاک باشد. گزارش شده است که آب‌های موجود در کانال‌های زئولیت (آب زئولیتی) نقش مهمی در حفظ جمعیت و افزایش فعالیت باکتری‌های نیتروفیکاتور دارد (۱۴).

جدول ٤- تجزیه واریانس pH، EC و CEC تحت تاثیر تیمارهای زئولیت و ورمی‌کمپوست

Table 4- Mean squares from analysis of variance for effects of vermicompost and zeolite on soil EC, pH and CEC

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	EC	pH	CEC
ورمی‌کمپوست Vermicompost	2	0.18**	0.063**	6.35ns
زئولیت Zeolite	2	6.2**	0.115**	130.37**
ورمی‌کمپوست × زئولیت Vermicompost × zeolite	4	0.176**	0.042**	3.087ns
خطا Error	9	0.02	0.0017	14.818
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	-	14.37	0.54	9.19

** و ns: به ترتیب معنی‌دار درسطح ۱٪ آماری و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

** and ns: Significant at P≤ 0.01 and non significant, respectively

جدول ٥- مقایسه میانگین اثر کاربرد زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تغییرات pH خاک

Table 5- Effects of zeolite and vermicompost on changes of soil pH

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)			میانگین Mean
	0	5	10	
0	7.89a	7.82ab	7.82ab	7.84A
5	7.79bc	7.63d	7.73c	7.72B
10	7.77bc	7.61de	7.56e	7.65C
میانگین Mean	7.82A	7.69B	7.7B	

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

قابلیت هدایت الکتریکی خاک

افزودن ورمی‌کمپوست به خاک اثر معنی‌داری بر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک نداشت (جدول ۶). در همه‌ی سطوح ورمی‌کمپوست، افزودن زئولیت به خاک باعث افزایش معنی‌دار این صفت نسبت به شاهد گردید. بیشترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک (۸/۵ دسی‌زیمنس بر متر) مربوط به تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت می‌باشد که نسبت به سطح شاهد (۰/۹۳ دسی‌زیمنس بر متر) حدود ۸ برابر شوری خاک افزایش یافته است. افزایش شوری خاک با افزودن سطوح مختلف زئولیت و ورمی‌کمپوست ممکن است به‌دلیل وجود املاح محلول نسبتاً فراوان در آن‌ها به‌ویژه در زئولیت باشد. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج مطالعه حمیدپور و همکاران (۱۰) در مورد اثر مواد آلی و مطالعه کاپولا و همکاران (۵) در مورد کاربرد هم‌زمان زئولیت و مواد آلی بر افزایش شوری خاک مطابقت دارد.

جدول ٦- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تغییرات EC خاک (بر حسب دسی‌زیمنس بر متر)

Tables 6- Effect of zeolite and vermicompost on changes of soil EC (dS m^{-1})

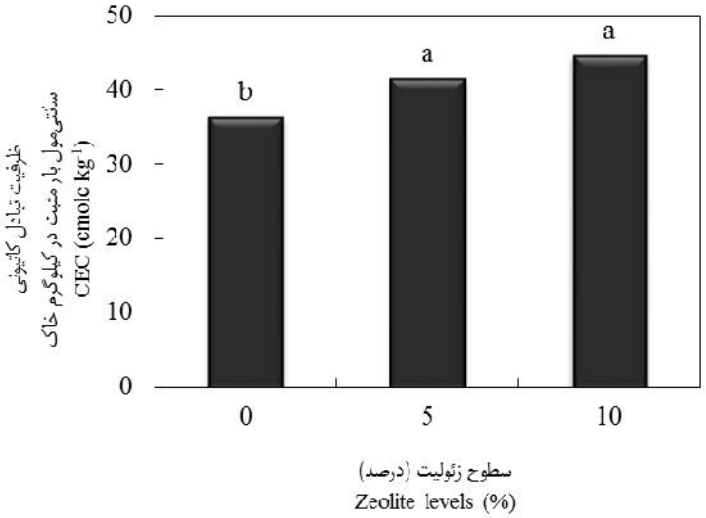
سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)			میانگین Mean
	0	5	10	
0	0.93e	0.91e	1.1e	0.97C
5	4.6d	6.8bc	4.5d	5.3B
10	6.4c	7.5ab	8.5a	7.5A
میانگین Mean	3.97B	5.1A	4.7A	

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

کاربرد ورمی‌کمپوست اثر معنی داری بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نداشت. روند تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در اثر کاربرد زئولیت در شکل ۱ نشان داده شده است. افزودن زئولیت، در هر دو سطح ۵ و ۱۰٪ وزنی موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک گردید. بین دو سطح ۵ و ۱۰٪ زئولیت اختلاف معنی‌داری از نظر آماری مشاهده نشد. میزان افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در سطح ۵٪ وزنی زئولیت ۱۷ درصد و در سطح ۱۰٪ وزنی زئولیت ۲۵ درصد نسبت به سطح صفر آن بود. ظرفیت تبادل کاتیونی کانی زئولیت مورد استفاده در این تحقیق ۹۰ سانتی‌مول بار مثبت در کیلوگرم بود. بنابراین کاربرد آن موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک گردید. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با کاربرد زئولیت در پژوهش‌های متعدد گزارش شده است (۷ و ۱۱).



شکل ۱- اثر زئولیت بر تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

Figure 1- Effect of zeolite on changes of soil CEC

شکل‌های شیمیایی روی

به‌طور کلی الگوی توزیع شکل‌های شیمیایی روی در این خاک آلوده ترتیب زیر بود:

شکل باقی‌مانده (۳۸/۶ درصد) > شکل پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز (۳۱درصد) > شکل پیوند شده با کربنات‌ها (۲۱/۶ درصد) > شکل پیوند شده با مواد آلی (۴/۳ درصد) ≈ شکل محلول و تبادلی (۴/۴ درصد). آچیپا و همکاران (۲) نیز گزارش کردند ۸۰ درصد روی در یک خاک آهکی به شکل باقی‌مانده بود.

گونه‌بندی و شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک به نوع عنصر، غلظت عنصر، نوع خاک و شرایط شیمیایی خاک بستگی دارد. با توجه به این که خاک مورد مطالعه از اطراف کارخانه روی زنجان تهیه شده بود، بنابراین، با توجه به اضافه شدن مداوم روی به خاک، انتظار می‌رود بخش بیشتری از روی به مرور زمان به صورت ساختاری وارد فازهای جامد خاک شده باشد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۷) نشان داد که اثرات اصلی تیمارها (زئولیت و ورمی‌کمپوست) و هم‌چنین بر هم‌کنش آن‌ها بر تغییرات غلظت شکل محلول و تبادلی روی معنی‌دار بود. بر اساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۷) اثر زئولیت و هم‌چنین بر هم‌کنش ورمی‌کمپوست و زئولیت، بر تغییرات غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها و روی همراه با اکسیدهای آهن و منگنز در سطح ۱٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن معنی‌دار می‌باشد. اثر ورمی‌کمپوست بر تغییرات غلظت این دو شکل از نظر آماری معنی‌دار نشد.

اثر ورمی‌کمپوست (در سطح ۱ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن) و هم‌چنین بر هم‌کنش ورمی‌کمپوست و زئولیت بر تغییرات غلظت روی پیوند شده با مواد آلی (در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن) معنی‌دار بود. اثر زئولیت بر تغییرات این صفت معنی‌دار نشد.

غلظت شکل باقیمانده این عنصر، از نظر آماری تحت تأثیر کاربرد زئولیت و ورمی‌کمپوست قرار نگرفت.

شکل محلول و تبادلی

در بین شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک شکل محلول + تبادلی تعیین کننده‌ی خطر واقعی زیست محیطی آن‌ها می‌باشد. بنابراین برای ارزیابی اثر اصلاح‌کننده‌ها در تثبیت عناصر سنگین در خاک، میزان عنصر در این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۲).

اثر کاربرد زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تغییرات غلظت شکل محلول و تبادلی روی در جدول ۸ آورده شده است. با کاربرد ورمی‌کمپوست، غلظت شکل محلول + تبادلی روی کاهش معنی‌داری یافت. میزان کاهش غلظت شکل محلول و تبادلی روی در سطح ۵٪ وزنی ورمی‌کمپوست، حدود ۱۱ درصد و در سطح ۱۰٪ ورمی‌کمپوست، ۳۴ درصد نسبت به سطح صفر آن بود. کاهش شکل محلول و تبادلی با کاربرد ورمی‌کمپوست ممکن است به‌دلیل تشکیل کمپلکس‌های سطحی درون–کره‌ای با گروه‌های عامل مواد آلی باشد. مواد هیومیک به دلیل داشتن گروه‌های عامل OH–، NH_2- و – COOH عناصر سنگین را به صورت کووالانسی جذب سطحی می‌کنند (۱۹).

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر تیمارهای ورمی‌کمپوست و زئولیت بر توزیع شکل‌های شیمیایی روی

Table 7- Mean squares from analysis of variance for the effects of vermicompost and zeolite on chemical fractions of Zn

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی DF	محلول و تبادلی Soluble and exchangeable	پیوند شده با کربناتها Carbonates-bound	پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز Fe and Mn oxides bound	پیوند شده با مواد آلی Organic-bound	باقیمانده Residual
ورمی‌کمپوست Vermicompost	2	140.46**	58.38ns	63.24ns	74.47**	816.33ns
زئولیت Zeolite	2	77.23**	1201**	598.16**	22.06ns	263.19ns
ورمی‌کمپوست × زئولیت Zeolite×Vermicompost	4	20.41*	205.89**	124.6*	37.89*	1567.5ns
خطا Error	9	4.05	29.49	0.008	8.16	1065.9
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	-	8.58	4.71	10.56	12.46	15.89

**، * و ns: به ترتیب درسطح ۱٪ و ۵٪ آماری معنی‌دار و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

**,* and ns: Significant at P≤ 0.01, P≤ 0.05 and non significant, respectively

اگرچه کاربرد زئولیت به تنهایی اثر معنی‌داری بر شکل محلول + تبادلی روی نداشت ولی کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و زئولیت غلظت شکل محلول + تبادلی روی را نسبت به شاهد کاهش داد. (جدول ۸). کمترین غلظت شکل محلول + تبادلی روی (۱۱/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که نسبت به شاهد، حدود ۵۷ درصد کمتر بود. این موضوع ممکن است به‌دلیل توزیع مجدد روی و انتقال آن به شکل‌های کمتر قابل دسترس به‌ویژه شکل پیوند شده با مواد آلی با کاربرد ورمی‌کمپوست باشد (۱۰).

جدول ۸- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر غلظت روی محلول و تبادلی (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

Table 8- Effect of zeolite and vermicompost on soluble and exchangeable fractions of Zn (mg kg^{-1})

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)		
	0	5	10
0	27.1a	23.7bc	21.0c
5	28.4a	25.2ab	21.9c
10	27.4a	20.1c	11.6d

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

شکل پیوند شده با کربنات‌ها

همان‌طور که جدول ۹ نشان می‌دهد، با افزایش زئولیت در هر دو سطح ۵ و ۱۰٪، میزان روی پیوند شده با کربنات‌ها کاهش یافت. کاهش غلظت شکل پیوند شده با کربنات‌ها نسبت به شاهد حدود ۲۰ درصد بود. بین دو سطح ۵ و ۱۰٪ زئولیت از نظر آماری اختلاف معنی‌دار مشاهده نگردید. کاهش این شکل شیمیای روی با کاربرد زئولیت ممکن است به دلیل افزایش حلالیت کربنات‌ها در نتیجه‌ی کاهش پی‌اچ باشد. با کاهش یک واحدی پی‌اچ محلول خاک، حلالیت روی صد برابر افزایش می‌یابد (۴).

در همه سطوح ورمی‌کمپوست، کاربرد زئولیت باعث کاهش غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها گردید (جدول ۹). این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که کاربرد همزمان زئولیت و ورمی‌کمپوست منجر به کاهش شکل قابل دسترس روی در خاک‌های آلوده می‌گردد. نتایج پژوهش هی و همکاران (۱۱) نشان داد کاربرد لجن فاضلاب و کمپوست باعث کاهش غلظت شکل کربناتی روی گردید.

کمترین غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها (۹۳/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم)، در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که نسبت به شاهد حدود ۳۰ درصد کاهش غلظت داشت. شکل پیوند شده عناصر با کربنات‌ها به عنوان شکل نسبتا قابل دسترس شناخته می‌شود (۱۰). زیرا تحت تاثیر پی اچ ممکن است حل شود و فراهمی زیستی آن افزایش یابد. کاهش غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها و روی محلول + تبادلی با کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و زئولیت نشان دهنده این است که این تیمارها احتمالا توانسته‌اند روی را به شکلهای کمتر قابل دسترس منتقل نمایند.

جدول ۹- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر غلظت روی پیوند شده با کربنات‌ها (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

Table 9- Effect of zeolite and vermicompost on carbonates-bound fraction of Zn (mg kg^{-1})

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)		
	0	5	10
0	132.1a	136.3a	126.3ab
5	105.9cd	99.15d	115.35bc
10	115.0bc	113.5bc	93.6d

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

شکل همراه با اکسیدهای آهن و منگنز

با افزایش زئولیت در هر دو سطح ۵ و ۱۰٪ وزنی، غلظت روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۱۰) و این کاهش نسبت به شاهد حدود ۱۰ درصد بود.

در همه سطوح ورمی‌کمپوست با کاربرد زئولیت غلظت روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز روند کاهشی نشان داد. در سطح صفر ورمی‌کمپوست، کاربرد ۵ درصد زئولیت، غلظت این شکل روی را کاهش داد. کمترین مقدار روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز (۱۵۲/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم)، در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که این تیمار غلظت روی در این شکل را نسبت به شاهد حدود ۱۰ درصد کاهش داد. کاهش غلظت شکل روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز پس از افزودن همزمان زئولیت و ورمی‌کمپوست نشان دهنده‌ی این است که روی به سایر شکل‌ها

(مانند پیوند شده با مواد آلی و باقی‌مانده) تبدیل شده است. تغییرات جزئی در پی‌اچ و پتانسیل احیای خاک ممکن است باعث انحلال شکل‌های پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز شود. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج عباس‌پور و گلچین (۱) مغایرت دارد.

جدول ۱۰- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر غلظت روی پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

Table 10- Effect of zeolite and vermicompost on Fe and Mn oxides-bound fraction of Zn (mg kg^{-1})

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)		
	0	5	10
0	170.5bc	184.5a	172.0ab
5	153.9d	159.6bcd	172.2ab
10	158.5bcd	157.6cd	152.7d

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

روی پیوند شده با مواد آلی

با افزایش ورمی‌کمپوست غلظت روی پیوند شده با مواد آلی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۱۱). میزان افزایش این صفت با افزودن ورمی‌کمپوست ۳۵ درصد، نسبت به شاهد بود. بین دو سطح ۵ و ۱۰٪ ورمی‌کمپوست اختلاف معنی‌داری از نظر آماری مشاهده نشد. افزایش غلظت روی پیوند شده با مواد آلی با کاربرد ورمی‌کمپوست نشان دهنده‌ی آن است که روی از شکل‌های بیشتر قابل دسترس (مانند شکل تبادلی و کربناتی) به شکل کمتر قابل دسترس (شکل آلی) منتقل شده است. نتایج اثر ورمی‌کمپوست بر شکل تبادلی و کربناتی روی تأیید کننده‌ی این موضوع می‌باشد. نتایج این بخش تحقیق با نتیجه‌ی پژوهش عباس‌پور و گلچین (۱) مطابقت داشت.

با کاربرد زئولیت غلظت روی پیوند شده با مواد آلی به‌طور غیر معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۱۱). در تمامی سطوح زئولیت، با کاربرد ورمی‌کمپوست روند افزایشی در غلظت روی پیوند شده با ماده‌ی آلی مشاهده شد (به استثنای تیمار ۵٪ ورمی‌کمپوست × ۵٪ زئولیت). در سطح ۵ درصد زئولیت، کاربرد ورمی‌کمپوست اثر معنی‌داری بر غلظت روی پیوند شده با مواد آلی نداشت. تغییرات غلظت روی پیوند شده با مواد آلی نسبت به شاهد در سطح صفر زئولیت، برای هر دو سطح ۵ و ۱۰ درصد ورمی‌کمپوست، معنی‌دار بود. استفاده از زئولیت، میزان روی پیوند شده با مواد آلی را افزایش داد. در سطح ۱۰ درصد زئولیت، استفاده از ورمی‌کمپوست در هر دو سطح خود، موجب افزایش معنی‌دار غلظت این شکل روی نسبت به شاهد گردید. افزودن اصلاح‌کننده‌های آلی به خاک از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار فلز با گروه‌های عامل سطحی آن‌ها، فلزات سنگین را در خاک تثبیت می‌کنند و حلالیت، سمیت و قابلیت دسترسی آنها را کاهش می‌دهد (۲۰). اگرچه برخی مواد آلی مانند کودهای حیوانی تازه و کمپوست‌های نارسیده به‌دلیل مقدار زیاد مواد آلی محلول می‌توانند تحرک فلزات سنگین را در خاک افزایش دهند (۱۵).

بیشترین غلظت روی پیوند شده با مواد آلی (۲۸/۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم)، در تیمار ۵٪ ورمی‌کمپوست مشاهده شد که این تیمار نسبت به شاهد حدود ۴۰ درصد غلظت این شکل شیمیایی روی را افزایش داد.

جدول ۱۱- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر غلظت روی پیوند شده با مواد آلی (حسب میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

Table 11- Effect of zeolite and vermicompost on organic-bound fraction of Zn (mg kg^{-1})

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)		
	0	5	10
0	17.25c	28.65a	25.8ab
5	19.65bc	16.3c	26.2ab
10	20.0bc	27.4a	25.1ab

اعداد با حروف مشترک در هر ستون و ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.01) نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.01)

فاکتور تحرک

تحرک فلزات سنگین در خاک بر اساس نسبت مجموع مقادیر غلظت عنصر در شکل‌های شیمیای قابل دسترس (محلول، تبادلی و کربناتی) به مجموع غلظت کل شکل‌های شیمیایی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۱۰).

جدول ۱۲- اثر زئولیت و ورمی‌کمپوست بر تغییرات فاکتور تحرک روی

Table 12- Effect of zeolite and vermicompost on Zn mobility factor

سطوح زئولیت (درصد) Zeolite levels (%)	سطوح ورمی‌کمپوست (درصد) Vermicompost levels (%)		
	0	5	10
0	27.9	26.3	29.4
5	26.3	24.7	24.5
10	27.6	25.6	21.7

کاربرد زئولیت و ورمی‌کمپوست به تنهایی اثر معنی داری بر فاکتور تحرک روی در خاک نداشت (جدول ۱۲)، ولی کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و زئولیت به طور معنی‌داری پتانسیل تحرک روی را

نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. کمترین مقدار فاکتور تحرک روی (۲۱/۷ درصد)، در تیمار ترکیبی ۱۰٪ ورمی‌کمپوست × ۱۰٪ زئولیت مشاهده شد که این تیمار پتانسیل تحرک روی را نسبت به شاهد حدود ۲۹ درصد کاهش داد. هر چه مقدار این فاکتور کمتر باشد، نشان دهنده کمتر بودن فراهمی زیستی و تحرک عنصر در خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با افزودن همزمان زئولیت و ورمی‌کمپوست به خاک، غلظت شکل محلول + تبادلی روی کاهش یافت. این موضوع نشان دهنده این است که این تیمارها احتمالا توانسته‌اند روی را به شکل‌های کمتر قابل دسترس منتقل نمایند. نتایج غلظت روی پیوند شده با مواد آلی تایید کننده این موضوع بود زیرا با افزودن همزمان زئولیت و ورمی‌کمپوست به خاک غلظت روی پیوند شده با مواد آلی به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت بنابراین توزیع مجدد روی و انتقال آن به شکل‌های شیمیایی کمتر قابل دسترس به‌ویژه شکل پیوند شده با مواد آلی یکی از مکانیزم‌های تثبیت روی در خاک آلوده با کاربرد تیمارهای ترکیبی زئولیت و ورمی‌کمپوست می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد که اثر مقادیر کمتر این اصلاح کننده‌ها بر تثبیت فلزات سنگین در خاک‌های آلوده نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

1- Abbaspour A., and Golchin A. 2011. Immobilization of heavy metals in a contaminated soil in Iran using di-ammonium phosphate, vermicompost and zeolite. Environmental Earth Sciences, 63: 935-943.
2- Achiba W.B., Gabteni N., Lakhdar A., Laing G. D., Verloo M., Jedidi N., and Gallali T. 2009. Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. Agriculture Ecosystems and Environment, 130: 156–163.
3- Alison L.E., and Moodie C.D. 1965. Soil chemical analysis, advance course. University Wisconsin. Collage Agriculture, Department Soils, Madison, USA.
4- Alloway B.J. 1995. Heavy metal in soils. 2nd ed., Blackie Academic and Professional Publisher, London.
5- Coppola E., Battaglia G., Bucci M., Ceglie D., Colella A., Langella A., Buondonno A., and Colella C. 2003. Remediation of Cd- and Pb-polluted soil by treatment with organo-zeolite conditioner. Clay and Clay Minerals, 51: 609-615.
6- Edwards C.A., and Burrows I. 1988. The potential of earthworm composts as plant growth media. p. 211–219. In C.A. Edwards and E.F. Neuhauser (eds.). Earthworms in waste and environmental management. SPB Academic Publ. Co., The Hague, The Netherlands.
7- Gholamhoseini M., Aghaalikhani M., Khodaei-Joghan A., Zakikhani H., and Dolatabadian A. 2012. How zeolite controls nitrate leaching and modifies canola grain yield and quality. Agricultural Research and Reviews, 1: 113 - 126.
8- Gupta S.K., Vollmer M.K., and Krebs R. 1996. The importance of mobile, mobilisable and pseudototal heavy metal fractions in soil for three-level risk assessmentand risk management. Science Total Environment, 178: 11-20.
9- Hamidpour M., Afyuni M., Kalbasi M., Khoshgoftarmanesh A.H., and Inglezakis V.J. 2010. Mobility and plant-availability of Cd(II) and Pb(II) adsorbed on zeolite and bentonite. Applied Clay Science, 48: 342-348.
10- Hamidpour M., Afyuni M., Khadivi E., Zorpas A., and Inglezakis V. 2012. Composted municipal waste effect on chosen properties of calcareous soil. International Agrophysics Journal, 26: 365-374.
11- He M.M., Tian G.M., Liang X.Q., Yu Y.T., Wu J.Y., and Zhou G.D. 2007. Effects of two sludge application on fractionation and phytotoxicity of zinc and copper in soil. Journal of Environmental Sciences, 19: 1482–1490.
12- He Z.L., Calvert D.V., Alva A.K., Li Y.C., and Banks D.J. 2002. Clinoptilolite zeolite and cellulose amendments to reduce ammonia volatilization in a calcareous sandy soil. Journal of Plant and Soil, 247: 253-260.
13- Ijagbemi C.O., Tbeak M., and Kim D. 2009. Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, 166: 538-546.
14- Leggo P.J., Ledesert B., and Christie G. 2006. The role of clinoptilolite in organo-zeolitic-soil systems used for Phytoremediation. Science of the Total Environment, 363: 1– 10.
15- Madrid F., Lopez R., and Cabrera F. 2007. Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming conditions. Agricultural Ecosystem Environment, 199: 249–256.
16- Puschenreiter M., Horak O., Friesl W., and Hartl W. 2005. Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain: a review. Journal of Plant Soil and Environment, 51: 1-11.
17- Salbu B., Krekling T., and Oughton D.H. 1998. Characterization of radioactive particles in the environment Analyst, 123: 843-849.
18- Shi W.Y., Shao H.B., Li H., Shao M.A., and Du S. 2009. Co-remediation of the lead-polluted garden soil by exogenous natural zeolite and humic acids. Journal of Hazardous Materials, 167: 136–140.
19- Sparks D.L. 2003. Environmental soil chemistry. Academic Press, San Diego.
20- Udom B.E., Mbagwu J.S.C., Adesodun J.K., and Agbim N.N. 2004. Distributions of zinc, copper, cadmium and

lead in tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge. Environment International, 30: 467–470.
21- Westerman R.L. (ed.) 1990. Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI, USA.
22- Zhang M., and Pu J. 2011. Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils. Journal of Environmental Sciences, 23: 607–615.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 2, May.-Jun. 2016, p. 569-580

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۵، ص. ۵۸۰- ۵۶۹

Effects of Zeolite and Vermicompost on Changes of Zn Chemical Fractionation in a Polluted Soil

M. Hamidpour[1*]- L. Akbari[2]- H. Shirani[3]- A. Mohammadi[4]

Received: 14-01-2015
Accepted: 22-10-2016

Introduction: Soil contamination by heavy metals is a major concern throughout the world, due to persistence of metals in the environment and their toxicity and threat to all living organisms. Several strategies have been used to immobilize heavy metal ions in soils. Immobilization can be achieved by adding natural and synthetic amendments such as zeolites and organic materials. Because of large specific surface area, high cation exchange capacity (CEC), low cost and wide spread availability, zeolites are probably the most promising materials interacting with many heavy metal ions in contaminated soils and water. Organic amendments such as vermicompost contains a high proportion of humified organic matter (OM), may decrease the bioavailability of heavy metals in soil by adsorption and by forming stable complexes with surface functional groups, thus permitting the re-establishment of vegetation on contaminated sites. Recent studies showed that the co-application of zeolite and humic acids could be effective in reducing the available fraction of Pb in a garden polluted soil. Fractionation of heavy metals cations in amended polluted-soils is needed to predict elemental mobility in soil and phyto-availability to plants. Therefore, the objective of this study was to investigate the effects of co-application of zeolite and vermicompost on Zn redistribution in a contaminated soil.

Material and Methods: A contaminated soil was collected from the top 20 cm in the vicinity of zinc mine in Zanjan province, western north of Iran. The soil sample was air-dried, passed through 2-mm sieve and stored at room temperature. The soil sample was thoroughly mixed to ensure uniformity. Sub-samples were then digested using the hot-block digestion procedure for total Zn concentration. The experiment was conducted under greenhouse condition. The polluted soil was put in polyethylene pots and mixed well vermicompost and zeolite at the rate of 0, 50 and 100 g kg^{-1} soil. The treatments were evaluated in a 3 × 3 factorial design and were arranged in a randomized block design with three replications. After incubation for 45 days, five seeds of corn were sown in each pot. After germination the seedlings were thinned to 3 per pot. Plants were grown for 2 months under control conditions. After the corn had been harvested, soil samples were air-dried, and analyzed for pH, cation exchange capacity (CEC), and electrical conductivity (EC). Chemical fractionations of Zn in soils collected after the pot trial were investigated using the procedure of Salbu *et al*. (1998). This procedure subdivides the heavy-metal distribution into an water-extractable+exchangeable fraction, a form bound to carbonates, a form bound to Fe and Mn oxides, a form bound to organics, and a residual form. An analysis of variance was used to test significance ($P\leq0.05$) of treatment effects and Duncan multiple range test ($P\leq0.05$) was used to compare the means (SAS, 2002).

Results and Discussion: Soil pH gradually decreased with application of both vermicompost and zeolite amendments. This may be due to degradation of organic matter and releasing of organic and inorganic acids such as carbonic, citric and malic acids as well as H^+ produced from mineralization of nitrogen in the organic matter. Electrical conductivity (EC) of soils increased with increasing amounts of vermicompost and zeolite applications. The highest EC was observed in pots containing 10% w/w zeolite and 10% w/w vermicompost. Addition of zeolite significantly increased soil CEC. The overall distribution of Zn in different fractions was in the sequence residual (38.6%)> Fe and Mn oxides bound (31.0 %) > carbonated (21.6%)> organic (4.3%)≈exchangeable +water soluble (4.4 %). The application of vermicompost significantly decreased concentration of Zn in water+exchangeable fraction as compared to the control soil. Although singly zeolite amendment had not significant effect on water+exchangeable Zn concentration, this form decreased significantly with co-application of vermicompost and zeolite. This may be due to redistribution of Zn from this form to less available forms (e.g. organic and residual fractions). The addition of vermicompost had not significant effect on the carbonated fraction of Zn, whereas co-application of zeolite and vermicompost significantly decreased concentration of Zn bound in carbonates. Singly zeolite and co-application of amendments decreased the concentration of Zn in Fe and Mn oxides bound. Although singly compost and zeolite amendments increased concentration of Zn bound to organics, this form decreased furthest with co-application of them. Zeolite and

1, 2 and 3- Associate Professor, M.Sc. Graduated and Associate Professor, Department of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Respectively
(*- Corresponding Author Email: mohsen_hamidpour@yahoo.com)
4- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan

vermicompost alone had not significant effect on mobility factor (MF) of Zn over the un-amended soil. Co-application of vermicompost and zeolite to polluted soil resulted in a significant decrease in MF values of Zn compared to control.

Conclusion: Co-application of vermicompost and zeolite to polluted soil resulted in redistribution of Zn from available forms (exchangeable +water soluble) to less available form (e.g. organic), thus may be useful for the immobilization of Zn from polluted sites.

Keywords: Chemical Immobilization, Contaminated Soil, Heavy Metals