dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

اثر بخشی کلات DTPA بر قابلیت دسترسی کادمیم در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب

پگاه هوشیار[1]، امیرحسین بقائی[2]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
۲- استادیار گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
(نویسنده مسئول) a-baghaie@iau-arak.ac.ir

(دریافت ۹٤/۱۱/۲ پذیرش ۹۵/٤/۲)

چکیده

استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود در اراضی کشاورزی در بسیاری کشورها رایج است که می‌تواند نقش مؤثری بر عملکرد گیاه داشته باشد. البته این افزودنی‌های آلی می‌توانند باعث افزایش فلزات سنگین در خاک شوند. این پژوهش با هدف بررسی اثربخشی کلات DTPA بر قابلیت دسترسی کادمیم در گیاه ذرت در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب در شهرستان اراک صورت پذیرفت. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد لجن فاضلاب (۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار) آلوده شده با کادمیم در مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و کاربرد کلات DTPA به مقدار ۰ و ۱/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک بود. بعد از گذشت ٦۰ روز از کاشت ذرت، ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و غلظت کادمیم در خاک و گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. کاربرد ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA در خاک آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیم، باعث افزایش معنی‌دار میزان کادمیم قابل دسترس خاک شد. افزودن کلات DTPA به خاک حاوی ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیم به ترتیب باعث افزایش۱۷ و ۲۵ درصدی در میزان کادمیم در ریشه و ساقه گیاه ذرت شد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که همزمان با افزایش کاربرد لجن فاضلاب اثربخشی استفاده از کلات جهت گیاه‌پالایی کادمیم کاهش یافته است، به‌طوری که کمترین اثر بخشی گیاه‌پالایی مربوط به تیماری بوده که بیشترین سطح لجن فاضلاب (۳۰ تن در هکتار) با کمترین سطح آلودگی (۵ میلی گرم کادمیم) را داشته است.

واژه‌های کلیدی: اثربخشی، لجن فاضلاب، کلات، کادمیم، گیاه پالایی

۱- مقدمه

مقدار ماده آلی خاک‌های مناطق خشک که بیش از ۶۰ درصد زمین‌های کشاورزی ایران را شامل می‌شوند، پایین و اغلب کمتر از یک درصد است. از طرف دیگر در خاک‌های آهکی به‌دلیل pH بالا، مشکلات تغذیه‌ای عناصر کم‌مصرف از جمله آهن، مس، منگنز و روی وجود دارد (Wei et al. 2006). استفاده از کودهای شیمیایی، به‌دلیل تأثیر منفی که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند، در بسیاری موارد در دراز مدت کاهش عملکرد را به دنبال داشته است (Zhao et al. 2016). در مقابل افزایش مواد آلی به‌خاک به‌علت اثرات سازنده‌ای که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد، به‌عنوان یکی از ارکان مهم باروری خاک مورد توجه است (Xin et al. 2016).

سالانه بیش از ۳۰ میلیون تن لجن فاضلاب در جهان تولید می‌شود که حدود ۷۰ درصد آن به‌عنوان کود در اراضی کشاورزی استفاده می‌شود (Vafa et al. 2016; Alvarenga et al. 2015). اگر چه ترکیب لجن فاضلاب بستگی به منبع تولید، فصل، فرهنگ مصرف و توسعه فناوری کشور متغیر است، اما همواره مقادیر نسبتاً زیادی از فلزات سنگین در آن وجود دارد که استفاده بی‌رویه از لجن در زمین‌های کشاورزی را محدود می‌کند (Li et al. 2012). با وجود تأثیرات مثبتی که استفاده از مواد آلی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد، استفاده بی‌رویه لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی پیامدهایی از قبیل آلودگی خاک و آبهای زیرزمینی را درپی داشته و در دراز مدت اثرات منفی بر حاصلخیزی خاک می‌گذارد (Dede & Ozdemir 2016; Huang & Yuan 2016). لذا باید به دنبال راهکاری مناسب برای پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بود. امروزه روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی به‌منظور پالایش فلزات سنگین پیشنهاد شده است، ولی کارایی هر کدام از روش‌ها بسته به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، شرایط

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

آب و هوایی هر منطقه، نوع کشت و غیره متفاوت است و شناسایی هر کدام از روش‌ها در هر منطقه می‌تواند موجب اثربخشی پاکسازی در آن منطقه شود (Calderan & Fullana 2015; Rosestolato et al. 2015; Yang et al. 2016; Yin & Zhu 2016).

امروزه استفاده از کلات‌ها به‌عنوان یکی از راه‌های بالا بردن کارایی روش گیاه‌پالایی پیشنهاد شده است (Mehmood et al. 2013; Wiszniewska et al. 2016).

محمود و همکاران در تحقیقی کاربرد اثر کلات بر حلالیت کادمیم را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که کاربرد کلات DTPA باعث افزایش کادمیم قابل دسترس در خاک شده است، هر چند که این افزایش قابل دسترس نتوانسته تغییر محسوسی در جذب بیشتر کادمیم توسط گیاه کاهو ایجاد کند (Mehmood et al. 2013).

موفقیت در روش‌های گیاه پالایی بستگی به مقدار زیست توده، بخش قابل دسترسی عناصر سنگین در محیط ریشه و غلظت فلزات سنگین در محیط ریشه دارد و راه‌های افزایش تجمع فلز در گیاهان با عملکرد بالا بهترین و کاربردی‌ترین راهبرد در توسعه این روش می‌باشد (Mohammad et al. 2010; Cheng et al. 2016). احسان و همکاران در تحقیقی اثر کاربرد کلات سیتریک اسید را بر روی گونه براسیکا[1] مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که کاربرد این کلات با کم کردن اثرات کادمیم باعث جذب بیشتر کادمیم در گیاه و بالا بردن اثر بخشی گیاه پالایی شده و شرایط آب و هوایی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را عامل مؤثری در تغییر اثر بخشی گیاه پالایی دانستند (Ehsan et al. 2014).

در شهرستان اراک نیز لجن فاضلاب به‌عنوان کود آلی در اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند که استفاده از این نوع افزودنی آلی باعث افزایش درصد ماده آلی خاک می‌شود ولی احتمالاً تبعاتی از جمله افزایش میزان فلزات سنگین از جمله کادمیم را در پی دارد (Dede & Ozdemir 2016; Huang & Yuan 2016; Balkhir & Ashraf 2016).

با توجه به اینکه استفاده از این ترکیبات امروزه به‌عنوان یک جزء لاینفک در زمین‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود، لذا باید به‌دنبال راهی بود تا آلودگی خاک‌های منطقه به فلزات سنگین را کاهش داد. هر چند که تحقیقات نشان داده بخش‌های آلی و معدنی موجود در این ترکیبات تا حدودی فلزات سنگین را می‌توانند به خود جذب کنند ولی تا زمانی که این ترکیبات در خاک تجزیه شود، مجدداً فلزات به خاک باز می‌گردند (Baghaie et al. 2011; Sharifi et al. 2010).

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، تاکنون تحقیقاتی در مورد اثر مثبت کلات‌ها بر افزایش اثر بخشی گیاه پالایی صورت پذیرفته است (Lee & Sung 2014; Ylivainio 2010). ولی از آنجایی که میزان درصد موفقیت این اثربخشی بستگی به شرایط آب و هوایی، نوع کشت و کار موجود در منطقه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و میزان زیست توده گیاه دارد، برای کاربردی شدن پژوهش باید میزان اثربخشی گیاه پالایی در هر منطقه جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در شهرستان اراک تاکنون فقط گزارش‌هایی از وجود آلاینده‌ها در خاک ذکر شده لیکن میزان این آلاینده‌ها و راهکارهای افزایش اثربخشی پاکسازی در خاک در منطقه مورد بررسی قرار نگرفته است (Solgi et al. 2012). این تحقیق با هدف اثربخشی کلات DTPA بر قابلیت دسترسی کادمیم در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌صورت یک آزمایش گلدانی با هدف بررسی اثر بخشی کاربرد کلات DTPA بر قابلیت دسترسی کادمیم در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب صورت پذیرفت. محل اجرای تحقیق در روستای علی‌آباد واقع در سی و پنج کیلومتری شمال شرقی شهر اراک بود. نحوه اجرای این پژوهش به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد ۰(S_0)، ۱۵ (S_{15}) و ۳۰ (S_{30}) تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده شده با کادمیم در مقادیر ۰ (Cd_0)، ۵ (Cd_5)، ۱۰ (Cd_{10}) و۱۵ (Cd_{15}) میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم لجن فاضلاب و کاربرد کلات DTPA به مقدار ۰ (E_0) و ۱/۵ ($E_{1.5}$) میلی‌مول بر کیلوگرم خاک بود.

به‌منظور بررسی نقش کلات DTPA بر میزان آزادسازی کادمیم از لجن فاضلاب، خاکی غیر آلوده به فلز سنگین با درصد آهک کم و کربن آلی نسبتاً پایین انتخاب شد. خاک مورد آزمایش به‌مدت دو هفته در دمای ۲۵-۲۳ درجه سلسیوس خوابانیده شد و رطوبت آن با آب مقطر در حد ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. بخشی از نمونه خاک نیز در آزمایشگاه برای تعیین برخی

[1] Brassica napus L.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انتخاب شد. کادمیم اولیه موجود در خاک عصاره‌گیری و توسط دستگاه جذب اتمی پرکین المر مدل ۳۰۳۰ اندازه‌گیری شد (Lee et al. 2015).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ و همچنین ویژگی لجن استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ ذکر شده است. به‌منظور غنی‌سازی لجن فاضلاب، ابتدا مقدار کادمیم برای تهیه غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیم از منبع نمک نیترات کادمیم محاسبه و محلول‌سازی شد. از سویی دیگر لجن مورد نظر ابتدا با کمک آسیاب برقی پودر و بر روی پلاستیک پهن شده و به‌صورت اسپری با محلول نیترات کادمیم غنی‌سازی شد. در طول این مدت نمونه‌های لجن فاضلاب مرتباً تر و خشک شدند و رطوبت آن در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه نگهداری شد تا نمونه‌های لجن با کادمیم اضافه شده به تعادل برسند.

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1. Physico-chemical characteristics of the soil used in this study

Variable	Unit	Amount
pH	---	7.04
EC	dS m^{-1}	1.12
OC	%	0.1
Silit	%	40
Sand	%	40
Clay	%	20
Calcium carbonate	%	5
Total Cd	mg kg^{-1}	1
P	mg kg^{-1}	18
CEC	Cmol (+)kg^{-1} soil	10.8

جدول۲- ویژگی‌های لجن فاضلاب

Table 2. Characteristics of the waste sludge used in this study

Variable	Unit	Amount
pH	---	6.4
EC	dS m^{-1}	13
OC	%	19
Total N	%	1.7
P	%	1
Total Cd	mg kg^{-1}	3
Total Pb	mg kg^{-1}	2
Total Zn	mg kg^{-1}	12

بعد از گذشت دو هفته نمونه‌های لجن فاضلاب آلوده شده با کادمیم هوا خشک شده، سپس آسیاب و در نسبت‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار با خاک مخلوط شد و به‌مدت یک ماه نمونه‌ها انکوبه شد تا به تعادل برسد و در طول این مدت رطوبت نمونه‌ها در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه نگهداری شد. سپس به‌منظور کاشت بذر گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) گلدان‌های حدوداً چهار کیلوگرمی انتخاب و با اسید کلریدریک یک دهم نرمال شسته شدند. در کف هر گلدان مقداری شن برای زهکشی ریخته، سپس هر گلدان با حدود چهار کیلوگرم از نمونه خاک تیمار شده و یک نمونه خاک شاهد هم پر شد. عملیات سله شکنی با کاردک برای جلوگیری از سله بستن خاک و ایجاد مشکلات احتمالی انجام شد. سپس بذر گیاه ذرت سینگل کراس ۷۰۴ کاشته شد. در طول رشد گیاه، عملیات آبیاری و وجین علفهای هرز با دست انجام پذیرفت. آبیاری گلدان‌ها هر ۲ روز یک بار به‌طور یکنواخت انجام شد و در طول مدت آزمایش گیاهان در شرایط محیطی(نور و گرما) یکسان قرار گرفتند.

برداشت بوته‌های گیاه ذرت ۶۰ روز پس از کاشت انجام شد. پس از برداشت، نمونه‌های گیاهی ابتدا با آب معمولی و سپس با آب دو بار تقطیر شده شسته شدند. ریشه و اندام هوایی از محل طوقه جدا شد، کاملاً شستشو داده شد و هر کدام جداگانه وزن و به داخل پاکت کاغذی منتقل شد. نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شد، سپس نمونه‌ها توسط آسیاب برقی به پودر تبدیل شده و در ظروف پلاستیکی نگهداری شد. نمونه‌ها در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس خاکستر و غلظت فلزات سنگین بعد از عصاره‌گیری نمونه‌ها با اسید کلریدریک ۲ نرمال با استفاده از دستگاه جذب اتمی پرکین المر[1] مدل ۳۰۳۰ قرائت شد (Lee et al. 2015). همزمان با برداشت گیاه، از خاک گلدان‌های تحت کشت گیاه ذرت نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک، پس از هوا خشک شدن و کوبیدن، از الک ۲ میلی‌متری گذرانده و به‌منظور تجزیه مورد نظر به آزمایشگاه منتقل شدند.

به‌منظور اندازه‌گیری مقدار کربن آلی خاک، از روش اکسیداسیون تر استفاده شد (Nelson & Sommers 1982). قابلیت هدایت الکتریکی و pH نمونه‌های خاک و کود در عصاره اشباع (با در نظر گرفتن درصد اشباع نمونه)اندازه‌گیری‌شد (McLean 1982) ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش کلرید باریم اندازه‌گیری شد (Rhoades 1982). شکل قابل جذب کادمیم در نمونه‌های خاک

[1] Perkin Elmer

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

به‌وسیله محلول DTPA ۰/۰۰۵ مولار در pH برابر ۷/۲ اندازه‌گیری شد (Lee et al. 2015). همچنین میزان اثربخشی جذب فلز با استفاده از فاکتور غلظت زیستی (BCF) سنجیده شده که حاصل میانگین غلظت در بافت گیاهی به غلظت عنصر اضافه شده به خاک بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Singh et al. 2010).

فسفر قابل دسترس موجود در نمونه‌های خاک به روش اولسن[1] عصاره‌گیری و سپس غلظت فسفر در عصاره بر اساس روش مرفی[2] و رالی[3] اندازه‌گیری شد (Olsen & Sommers 1982; Murphy & Riley 1962).

مقدار آهک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون اسید اضافی با سود تعیین شد (Nelson 1982). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون آماری LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر لجن فاضلاب بر ویژگی‌هایی شیمیایی خاک

افزودن لجن فاضلاب در سطح ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار pH خاک (۰/۳ واحدی) نسبت به خاک فاقد لجن فاضلاب در طی دوره رشد گیاه شد که این کاهش معنی‌دار احتمالاً می‌تواند بر قابلیت دسترسی کادمیم در خاک مؤثر باشد، هرچند که تفاوت معنی‌داری بین تیمار ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب خاک مشاهده نشد. کرمی و همکاران در تحقیقی گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب به‌دلیل کاهش اسیدیته خاک باعث افزایش قابلیت دسترسی فلزات سنگین از جمله کادمیم در خاک شده است (Karami et al. 2009). بقائی و همکاران اثر کاربرد لجن فاضلاب را بر قابلیت دسترسی سرب مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که کاهش اسیدیته خاک با افزایش قابلیت دسترسی فلز سنگین باعث محدودیت رشد گیاه شده است (Baghaie et al. 2010).

بیشترین مقدار گنجایش تبادل کاتیونی خاک در تیمار ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب مشاهده شد و کمترین گنجایش تبادل کاتیونی نیز مربوط به تیمار فاقد لجن فاضلاب بود که دلیل احتمالی این امر را می‌توان مقدار بالای کربن آلی موجود در کودهای آلی دانست (Yuan et al. 2016; Zhao et al. 2016). کاربرد ۱۵ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث شد گنجایش تبادل کاتیونی خاک از ۱۰/۸ در خاک بدون لجن فاضلاب به ۱۲/۸ سانتی مول بار بر کیلوگرم خاک افزایش یابد. همچنین افزودن ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب گنجایش تبادل کاتیونی خاک را از۱۰/۸ در خاک شاهد به ۱۴/۳سانتی مول بر کیلوگرم خاک افزایش داد. یکی از اثرات لجن فاضلاب، افزایش ماده آلی خاک است که نقش‌های مهمی از جمله تأمین مواد آلی، اثر بر غلظت عناصر ریز مغذی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و اصلاح ساختمان خاک دارد که همه این عوامل بر حاصلخیزی می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد. افزایش ماده آلی خاک می‌تواند ضمن تأمین مواد مغذی گیاه از جمله نیتروژن کمک به رشد گیاه و در نتیجه بالا بردن اثر بخشی گیاه پالایی در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین کند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار نیتروژن خاک شده است که می‌تواند مستقیم روی رشد رویشی گیاه اثر داشته باشد.

با توجه به اینکه به‌طور معمول لجن فاضلاب به طور دوره‌ای به‌عنوان کود و به منظور بالا بردن درصد ماده آلی خاک در اراضی کشاورزی اراک استفاده می‌شود، باید به دنبال راهی بود که بتوان آلودگی فلزات سنگین در خاک ناشی از افزودنی‌های آلی را با بالا بردن اثر بخشی گیاه پالایی کاهش داد. بسیاری از تحقیقاتی که تاکنون صورت پذیرفته، در مورد استفاده از کلات‌ها در خاک‌هایی بوده که درصد ماده آلی خاک در نظر گرفته نشده است (Lee & Sung 2014; Ylivainio 2010).

نکته قابل توجه این است که علاوه بر اینکه کلات‌ها در اثر بخشی گیاه پالایی به نوع گیاه، شرایط آب و و هوایی هر منطقه بستگی دارد، وجود ماده آلی در خاک نیز می‌تواند بر اثربخشی کاربرد کلات‌ها در تغییر قابلیت دسترسی فلزات سنگین مؤثر باشد، لذا در این تحقیق اثر کاربرد DTPA بر اثر بخشی گیاه پالایی در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و تحت کشت ذرت مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲- میزان کادمیم قابل دسترس خاک

بیشترین میزان کادمیم در تیمار $S_0E_{1.5}Cd_{15}$ مشاهده شد که فاقد لجن فاضلاب و حاوی ۱/۵ میلی مول کلات و ۱۵ میلی‌گرم

[1] Olsen
[2] Murphy
[3] Riley

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

کادمیم بوده و کمترین میزان کادمیم قابل دسترس خاک در خاکی یافت شد که حاوی بالاترین سطح دریافت لجن فاضلاب (۳۰ تن در هکتار) بود (جدول ۳). با افزایش کاربرد ترکیبات آلی در خاک در هر سطح مشخص کادمیم، میزان کادمیم قابل دسترس در خاک کاهش یافت، به نحوی که در این تحقیق در خاک تیمار شده با ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب (آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیم) و فاقد کاربرد کلات DTPA کاهش معنی‌دار ۵۱ درصدی در مقدار کادمیم قابل دسترس خاک نسبت به خاک تیمار شده با ۱۵ تن در هکتار لجن فاضلاب مشاهده شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش بخش آلی و معدنی لجن فاضلاب در تثبیت کادمیم نسبت داد (Tang et al. 2015).

جدول۳- اثر سه گانه کاربرد لجن فاضلاب ،کلات DTPA و نیترات کادمیم بر میزان کادمیم قابل دسترس خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 3. Triple impact of sewage sludge, Chelate DTPA, and cadmium nitrate application on the soil available cadmium (mg/kg)

Treatment	Cd_0	Cd_5	Cd_{10}	Cd_{15}
$S_0E_{1.5}$	ND*	14.15 ^{i}	9.15 ^{d}	13.93 ^{a}
S_0E_0	ND*	3.86 ^{k}	8.56 ^{e}	12.26 ^{b}
$S_{15}E_{1.5}$	ND*	2.84 ^{m}	6.93 ^{f}	9.88 ^{c}
$S_{15}E_0$	ND*	2.55 ^{n}	6.24 ^{g}	9.13 ^{d}
$S_{30}E_{1.5}$	ND*	1.83 ^{o}	3.75 ^{k}	4.64 ^{h}
$S_{30}E_0$	ND*	1.45 ^{p}	3.04 ^{l}	4.04 ^{i}

هر چند که در دید اول کمترین مقدار کادمیم قابل دسترس در خاک (که دلیل احتمالی آن نقش بخش معدنی و آلی موجود در لجن فاضلاب در غیر قابل دسترس کردن کادمیم در خاک می‌باشد)یک نکته مثبت زیست محیطی به حساب می‌آید، اما همزمان با تجزیه این ترکیبات آلی در خاک مجدداً پیوند فلزات سنگین با این ترکیبات آلی شکسته شده و در خاک رها می‌شوند، لذا باید دنبال راه حلی بود که هم بتوان از نقش مثبت ترکیبات آلی از جمله لجن فاضلاب در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاهان استفاده کرد و هم بتوان با افزایش اثربخشی DTPA به پاکسازی خاک‌ها کمک کرد (Kolodziej et al. 2015). نتایج این تحقیق حاکی از آن است که استفاده از کلات تا حدودی زیادی به این مسئله می‌تواند کمک کند، به نحوی که کاربرد ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار و آلوده به ۵ میلی گرم کادمیم به ترتیب افزایش ۱۱ و ۲۰ درصدی در مقدار کادمیم قابل دسترس خاک ایجاد کرده که این احتمالاً می‌تواند باعث افزایش غلظت کادمیم در ریشه و گیاه ذرت و در نتیجه کمک به پاکسازی خاک شود. نتایج مشابهی در مورد سایر سطوح آلودگی کادمیم هم مشاهده شد به نحوی که کاربرد ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با ۱۵ تن در هکتار لجن فاضلاب (در سطوح آلودگی ۱۰ و ۱۵ میلی گرم کادمیم) به‌ترتیب باعث افزایش ۱۰ و۸ درصدی در میزان کادمیم قابل دسترس خاک شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کلات DTPA در تشکیل پیوند قوی با فلز کادمیم دانست.

۳-۳- غلظت کادمیم ریشه و شاخساره گیاه

بیشترین میزان کادمیم ریشه گیاه در تیمار $S_0E_{1.5}Cd_{15}$ مشاهده شد که فاقد لجن فاضلاب و حاوی ۱/۵ میلی‌مول کلات و ۱۵ میلی‌گرم در کیلو گرم کادمیم بود (جدول ۴). نتایج مشابهی نیز در مقدار کادمیم قابل دسترس خاک مشاهده شد و در صورتی که بتوان اثربخشی قابلیت آزادسازی کادمیم در خاک مخصوصاً خاک‌های حاوی ماده آلی را افزایش داد، احتمالاً می‌توان باعث افزایش راندمان گیاه پالایی شد.

جدول ۴- اثر سه گانه کاربرد لجن فاضلاب، کلات ونیترات کادمیم بر میزان کادمیم در ریشه گیاه ذرت(میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 4. Triple impact of sewage sludge, Chelate, and cadmium nitrate application on the cadmium content of corn root (mg/kg)

Treatment	Cd_0	Cd_5	Cd_{10}	Cd_{15}
S_0E_1	ND*	5.02 ^{j}	9.86 ^{e}	18.82 ^{a}
S_0E_0	ND*	4.83 ^{j}	9.52 ^{f}	14.35 ^{b}
$S_{15}E_0$	ND*	3.04 ^{m}	7.09 ^{h}	12.26 ^{d}
$S_{15}E_1$	ND*	3.84 ^{l}	7.47 ^{g}	12.65 ^{c}
$S_{30}E_0$	ND*	2.03 ^{o}	4.11 ^{k}	6.46 ^{i}
$S_{30}E_1$	ND*	2.35 ^{n}	4.95 ^{j}	7.22 ^{h}

کاربرد ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب شهری (آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیم) به‌ترتیب باعث افزایش ۵ و ۱۷ درصدی در غلظت کادمیم ریشه گیاه شد، این در حالی است که مقدار کادمیم قابل دسترس خاک نیز همزمان با کاربرد تیمار فوق به‌ترتیب ۱۰ و ۱۹ درصد افزایش یافت. نکته قابل توجه این است که افزایش غلظت کادمیم در ریشه گیاه ذرت را احتمالاً می‌توان تحت تأثیر دو عامل دانست، ابتدا اینکه کاربرد کلات مذکور باعث شکسته شدن پیوند بخش معدنی و آلی لجن فاضلاب با فلز کادمیم و در نتیجه قابل دسترس

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

درآمدن آن در خاک و به دنبال آن افزایش غلظت کادمیم در ریشه گیاه شده و از سویی دیگر افزایش غلظت کادمیم در ریشه گیاه را می‌توان به‌دلیل نقش عناصر مغذی موجود در لجن فاضلاب در بهبود رشد گیاه و توانایی بیشتر گیاه در جذب فلز سنگین و در واقع افزایش اثر بخشی گیاه‌پالایی دانست، هر چند که نقش فیزیولوژی گیاه را در توانایی جذب فلز سنگین نمی‌توان نادیده گرفت.

بیشترین میزان کادمیم شاخساره گیاه در تیمار $S_0E_{1.5}Cd_{15}$ مشاهده شد که فاقد لجن فاضلاب و حاوی ۱/۵ میلی‌مول کلات و ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیم بود (جدول ۵). کاربرد ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب شهری آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیم به‌ترتیب باعث افزایش ۹ و ۱۳ درصدی در غلظت کادمیم شاخساره گیاه شد، این در حالی است که مقدار کادمیم ریشه گیاه نیز همزمان با کاربرد تیمار فوق به ترتیب ۴ و ۱۱ درصد افزایش یافت.

جدول ۵- اثر سه گانه کاربرد لجن فاضلاب، کلات و نیترات کادمیم بر غلظت کادمیم در شاخساره گیاه ذرت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 5. Triple impact of sewage sludge, Chelate, and cadmium nitrate application on cadmium content of corn branches (mg/kg)

Treatment	Cd_0	Cd_5	Cd_{10}	Cd_{15}
$S_0E_{1.5}$	ND*	2.47 ^{g}	5.65 ^{C}	7.52^{a}
S_0E_0	ND*	2.05 ^{h}	5.04 ^{d}	6.39^{b}
$S_{15}E_0$	ND*	1.38 ^{J}	3.14 ^{f}	5.25 ^{d}
$S_{15}E_{1.5}$	ND*	1.75 ^{i}	3.86 ^{e}	5.73^{c}
$S_{30}E_0$	ND*	0.46 ^{l}	1.24 ^{J}	2.04 ^{h}
$S_{30}E_{1.5}$	ND*	0.88 ^{k}	1.66 ^{i}	2.34 ^{g}

این افزایش را احتمالاً می‌توان به‌دلیل نقش کلات DTPA در افزایش کادمیم قابل دسترس خاک و ریشه گیاه و به دنبال آن جذب کادمیم بیشتر توسط شاخساره گیاه دانست. نتایج مشابهی نیز در مورد اثر کاربرد کلات DTPA بر افزایش غلظت کادمیم در شاخساره گیاه ذرت در سایر سطوح کادمیم مشاهده شد، به نحوی که کاربرد ۱/۵ میلی مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب شهری آلوده به ۵ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم به‌ترتیب باعث افزایش ۴۷ و ۲۵ درصدی در غلظت کادمیم شاخساره گیاه شد. نتایج این بخش حاکی از آن است که استفاده از لجن فاضلاب به‌منظور تأمین شرایط تغذیه‌ای گیاه توانسته است باعث رشد بهتر گیاه و کاهش استرس کادمیم شده و استفاده از کلات DTPA احتمالاً با شکستن پیوندهای بخش معدنی و آلی فلز لجن فاضلاب با کادمیم ابتدا باعث افزایش قابلیت دسترسی کادمیم در خاک و به دنبال آن جذب بیشتر کادمیم توسط گیاه ذرت شده است، اگر چه در این میان نقش فیزیولوژی گیاه در جذب کادمیم، شرایط آب و هوایی منطقه و اثر بر رشد گیاه و ویژگی های فیزیکو شیمیایی خاک را نمی‌توان نادیده گرفت.

۳-۴- فاکتور غلظت زیستی (BCF)

هر چند که نتایج این پژوهش تا حدودی حاکی از افزایش قابلیت دسترس کادمیم خاک و غلظت کادمیم ریشه و شاخساره گیاه در اثر کاربرد ۱/۵ مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با مقادیر مختلف لجن فاضلاب بوده است، اما به‌منظور بررسی دقیق‌تر و تعیین درصد اثر بخشی گیاه پالایی فلز کادمیم در این پژوهش از فاکتور غلظت زیستی (BCF) کمک گرفته شد (Charg et al. 2014). بر اساس نتایج جدول ۶ بیشترین اثربخشی گیاه‌پالایی مربوط به تیماری بوده که فاقد کاربرد لجن فاضلاب و حاوی ۱/۵ میلی‌مول کلات DTPA ($S_0E_{1.5}Cd_{10}$)می‌باشد، به نحوی که ۵۶ درصد کادمیم موجود جذب شاخساره شده است، این در حالی است که در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیم ($S_0E_{1.5}Cd_{15}$)تنها ۵۰ درصد کادمیم جذب شاخساره شده است. کاهش ۶ درصدی جذب کادمیم شاخساره در خاک حاوی ۱۵ میلی‌گرم کادمیم ($S_0E_{1.5}Cd_{15}$) نسبت به ۱۰ میلی‌گرم کادمیم و فاقد کاربرد لجن فاضلاب ($S_0E_{1.5}Cd_{10}$) را احتمالاً بتوان تا حدودی به اثر سمیت کادمیم بر رشد گیاه و کاهش جذب کادمیم مربوط دانست. این در حالی است که در خاک فاقد کاربرد کلات DTPA و لجن فاضلاب نیز شرایط مشابهی یافت شد، به نحوی که کاربرد تیمار $S_0E_0Cd_{15}$ نسبت به $S_0E_0Cd_{10}$موجب کاهش ۸ درصدی در اثربخشی جذب کادمیم

جدول ۶- اثر سه گانه کاربرد لجن فاضلاب، کلات و نیترات کادمیم بر فاکتور غلظت زیستی

Table 6. Triple impact of sewage sludge, Chelate, and cadmium nitrate application on bio-concentration

Treatment	Cd_0	Cd_5	Cd_{10}	Cd_{15}
$S_0E_{1.5}$	----	0.49^{b}	0.56^{a}	0.50^{b}
S_0E_0	----	0.41^{c}	0.50^{b}	0.42^{c}
$S_{15}E_{1.5}$	----	0.35^{e}	0.38^{d}	0.38^{d}
$S_{15}E_0$	----	0.27^{g}	0.31^{f}	0.34^{e}
$S_{30}E_{1.5}$	----	0.17^{h}	0.16^{h}	0.15^{hi}
$S_{30}E_0$	----	0.09^{k}	0.12^{J}	0.13^{JI}

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45320

توسط شاخساره گیاه شد.

کاربرد تیمار $S_0E_{1.5}Cd_{15}$ نسبت به $S_0E_0Cd_{15}$ توانست باعث افزایش ۸ درصدی اثربخشی جذب کادمیم شود. استفاده از کلات DTPA در تیمار حاوی ۱۵ تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیم ($S_{15}E_{1.5}Cd_{15}$) تنها باعث افزایش ۴ درصدی اثر بخشی جذب کادمیم شده است که دلیل کاهش این اثر بخشی نسبت به دو تیمار قبلی (فاقد کاربرد لجن فاضلاب) را احتمالاً می‌توان به نقش رقابت بخش معدنی و آلی لجن و کلات در آزاد سازی کادمیم دانست، این در حالی است که در خاک حاوی ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب ($S_{30}E_{1.5}Cd_{15}$)کاربرد DTPA تنها باعث افزایش دو درصدی اثر بخشی گیاه‌پالایی نسبت به تیمار ($S_{30}E_0Cd_{15}$) شده است. از مطالب ذکر شده چنین می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی کاربرد DTPA باعث افزایش اثربخشی گیاه‌پالایی شده است ولی با افزایش کاربرد لجن فاضلاب این اثر بخشی کاهش یافته است. قابل ذکر است که این اثربخشی به غلظت کادمیم موجود در لجن نیز بستگی دارد، به‌صورتی که استفاده از کلات DTPA در تیمار حاوی ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیم ($S_{15}E_{1.5}Cd_{10}$ و $S_{30}E_{1.5}Cd_{10}$) به‌ترتیب باعث افزایش ۷ و ۴ درصدی اثربخشی گیاه‌پالایی نسبت به تیمارهای مشابهی بدون کاربرد کلات شده است. نتایج مشاهده شده حاکی از کاهش اثر بخشی استفاده از کلات DTPA جهت گیاه‌پالایی کادمیم همزمان با افزایش میزان کاربرد لجن فاضلاب می‌باشد. کمترین اثربخشی گیاه‌پالایی مربوط به تیماری بوده که بیشترین سطح لجن فاضلاب را دریافت نموده و کمترین سطح آلودگی (۵ میلی‌گرم کادمیم) را داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به پایین بودن درصد ماده آلی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک و تغییر رویکرد کاربرد کودهای شیمیایی به سمت کودهای آلی، استفاده از کودهای آلی نظیر لجن فاضلاب در سال‌های اخیر رواج پیدا کرده است. در این میان استفاده از کودهای آلی در بسیاری مواقع به‌دلیل بالا بودن فلزات سنگین در آنها باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و به دنبال آن در گیاه شده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاربرد کودهای آلی با افزایش ویژگی‌های جذبی خاک نظیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک احتمالاً تا حدودی باعث کاهش قابلیت دسترسی فلز کادمیم در خاک و به دنبال آن در گیاه شده است. استفاده از کلات DTPA در این پژوهش توانست باعث افزایش اثربخشی گیاه‌پالایی در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب شود که این اثربخشی بستگی به غلظت کادمیم و میزان افزودنی آلی داشت. همزمان با افزایش میزان کاربرد لجن فاضلاب اثربخشی کاربرد استفاده از کلات DTPA به‌منظور گیاه‌پالایی کاهش یافت که دلیل احتمالی آن را می‌توان به رقابت بخش معدنی و آلی موجود در لجن فاضلاب با کلات DTPA در آزاد سازی کادمیم نسبت داد. نتایج کلی این تحقیق حاکی از آن است که هر چند تاکنون تحقیقات نشان از افزایش اثربخشی گیاه‌پالایی در نتیجه کاربرد کلات‌ها داشته است، ولی شرایط رشد گیاه در هر منطقه، غلظت، نوع منبع آلودگی و میزان کاربرد افزودنی آلی در هر منطقه نیز باید درنظر گرفته شود. همچنین با توجه به اینکه نوع ترکیبات افزودنی‌های آلی بسته به فصل و شرایط آب و هوایی هر منطه فرق می‌کند، اثربخشی گیاه‌پالایی در هر منطقه و شرایط آب و هوایی باید به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

References

Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., et al., 2015, "Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors", *Waste Manage*., 40, 44-52.

Baghaie, A., Khoshgoftarmanesh, A. & Afyuni, M., 2010, "Crop effects on lead fractionation in a soil treated with lead organic and inorganic sources", *Journal of Residuals Sciences and Techology*, 7, 131-138.

Baghaie, A., Khoshgoftarmanesh, A.H., Afyuni, M. & Schulin, R., 2011, "The role of organic and inorganic fractions of cow manure and biosolids on lead sorption", *Soil Sci. Plant Nutr*., 57, 11-18.

Balkhair, K.S. & Ashraf, M.A., 2016, "Field accumulation risks of heavy metals in soil and vegetable crop irrigated with sewage water in western region of Saudi Arabia", *Saudi Journal Biological Scicences*, 23, S32-S44.

Calderon, B. & Fullana, A., 2015, "Heavy metal release due to aging effect during zero valent iron nanoparticles remediation", *Water Researh*, 83, 1-9.

Chang, C., Yu, H., Chen, J., Li, F., Zhang, H. & Liu, C., 2014, "Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China", *Environ. Monit. Assess*., 186, 1547-1560.

Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-C. & Chen, K.-L., 2015, "Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land—An in situ study and benefit assessment", *Ecotox. Environ. Safe*., 111, 72-77.

Dede, G. & Ozdemir, S., 2016, "Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge", *Journal of Environmental Management*, 166, 103-108.

Ehsan, S., Ali, S., Noureen, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W., et al., 2014, "Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by Brassica napus L", *Ecotox. Environ. Safe*., 106, 164-172.

Huang, H.-J. & Yuan, X.-Z., 2016, "The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge", *Bioresource Technology*, 200, 991-998.

Karami, M., Afyuni, M., Rezainejad, Y. & Schulin, R., 2009, "Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil", *Nutr. Cycl. Agroecosys*., 83, 51-61.

Kołodziej, B., Antonkiewicz, J., Stachyra, M., Bielińska, E.J., Wiśniewski, J., Luchowska, K., et al., 2015, "Use of sewage sludge in bioenergy production- A case study on the effects on sorghum biomass production", *Europen Journal of Agron*., 69, 63-74.

Lee, J. & Sung, K., 2014, "Effects of chelates on soil microbial properties, plant growth and heavy metal accumulation in plants", *Ecological Engineering*, 73, 386-394.

Lee, P.-K., Choi, B.-Y. & Kang, M.-J., 2015, "Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk", *Chemosphere*, 119, 1411-1421.

Li, Q., Guo, X.-Y., Xu, X.-H., Zuo, Y.-B., Wei, D.-P. & Ma, Y.-B., 2012, "Phytoavailability of copper, zinc and cadmium in sewage sludge-amended calcareous soils", *Pedosphere*, 22, 254-262.

McLean, E.O., 1982, "Soil pH and lime requirement", Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Mehmood, F., Rashid, A., Mahmood, T. & Dawson, L., 2013, "Effect of DTPA on Cd solubility in soil – accumulation and subsequent toxicity to lettuce", *Chemosphere*, 90, 1805-1810.

Mohammadi, M., Habibi, D., Ardakani, M. & Asgharzade, A., 2010, "Investigation of Cd adsorption and accumulation from contaminated soil in annual Alfalfa (medicago scutellata)", *Journal of Crops Ecophysiology*, 2(3), 247-260 (in persian).

Murphy, J. & Riley, J.P., 1962, "A modified single solution method for determination of phosphates in natural waters", *Anal. Chim. Acta*, 27, 31-36.

Nelson, D.W. & Sommers, L.E., 1982, "Total carbon, organic carbon and organic matter", Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical Methods*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Nelson, R.E., 1982, "Carbonate and gypsum", Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Olsen, S.R. & Sommers, L.E., 1982, "Phosphorus", Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Rhoades, J.D., 1982, "Cation exchange capacity", Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Rosestolato, D., Bagatin, R. & Ferro, S., 2015, "Electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals (mercury in particular)", *Journal of Chemical Engineering*, 264, 16-23.

Sharifi, M., Afyuni, M. & Khoshgoftarmanesh, A., 2010, "Effects of sewage sludge, animal manure, compost and cadmium chloride on cadmium accumulation in corn and alfalfa", *Journal of Residuals Sciences and Technology*, 7, 219-225.

Singh, A., Agrawal, M. & Marshall, F.M., 2010, "The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater-irrigated area", *Ecological Engineering*, 36, 1733-1740.

Solgi, E., Esmaili-Sari, A., Riyahi-Bakhtiari, A. & Hadipour, M., 2012, "Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran", *B. Environ. Contam. Tox*., 88, 634-638.

Tang, X., Li, X., Liu, X., Hashmi, M.Z., Xu, J. & Brookes, P.C., 2015, "Effects of inorganic and organic amendments on the uptake of lead and trace elements by Brassica chinensis grown in an acidic red soil", *Chemosphere*, 119, 177-183.

Vafa, H.J., Raiesi, F. & Hosseinpur, A., 2016, "Sewage sludge application strongly modifies earthworm impact on microbial and biochemical attributes in a semi-arid calcareous soil from Iran", *Applied Soil Ecol*., 100, 45-56.

Wei, X., Hao, M., Shao, M. & Gale, W.J., 2006, "Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization", *Soil Till. Res*., 91, 120-130.

Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., MuszyŃSka, E. & Ciarkowska, K., 2016, "Natural organic amendments for improved phytoremediation of polluted soils: A review of recent progress", *Pedosphere*, 26, 1-12.

Xin, X., Zhang, J., Zhu, A. & Zhang, C., 2016, "Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain", *Soil Till. Res*., 156, 166-172.

Yang, Z., Zhang, Z., Chai, L., Wang, Y., Liu, Y. & Xiao, R., 2016, "Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using Burkholderia sp. Z-90", *Journal of Hazardous Materials*, 301, 145-152.

Yin, H. & Zhu, J., 2016, "In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment", *Journal of Chemical Engineering*, 285, 112-120.

Ylivainio, K., 2010, "Effects of iron (III) chelates on the solubility of heavy metals in calcareous soils", *Environm. Pollut*., 158, 3194-3200.

Yuan, H., Lu, T., Wang, Y., Chen, Y. & Lei, T., 2016, "Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients", *Geoderma*, 267, 17-23.

Zhao, J., Ni, T., Li, J., Lu, Q., Fang, Z., Huang, Q., et al., 2016, "Effects of organic–inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice–wheat cropping system", *Applied Soil Ecol*., 99, 1-12.

Zhao, X.-L., Li, B.-Q., Ni, J.-P. & Xie, D.-T., 2016, "Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting", *Journal of Integr. Agric*., 15, 232-240.