

凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响

陶玲, 张倩, 张雪彬, 周雅琦, 孙梦洁, 任珺

引用本文:

陶玲, 张倩, 张雪彬, 等. 凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1512-1520.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1417>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用凹凸棒石对Cd污染农田土壤养分的影响

赵廷伟, 李洪达, 周薇, 代允超, 吕家珑

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2313-2318 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0783>

不同钝化剂对猪粪中重金属Cu Zn Mn钝化效果的研究

李文姣, 张丽, 刘东方, 黄文力, 魏孝承, 王振东

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1262-1269 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1433>

不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究

殷飞, 王海娟, 李燕燕, 李勤椿, 和淑娟, 王宏镔

农业环境科学学报. 2015(3): 438-448 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.005>

全生育期淹水联合钝化材料对重度Cd污染下水稻生长和镉富集的影响

曹雲清, 徐晓燕, 韩磊, 王瑞刚, 冯人伟, 徐应明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2498-2506 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0348>

不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响

安梅, 董丽, 张磊, 孙崇海, 夏培玉

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 892-898 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1388>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶玲, 张倩, 张雪彬, 等. 凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1512–1520.

TAO Ling, ZHANG Qian, ZHANG Xue-bin, et al. Influence of biochar prepared by co-pyrolysis with attapulgite and sludge on maize growth and heavy metal accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1512–1520.



开放科学 OSID

凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响

陶玲^{1,2,3}, 张倩¹, 张雪彬¹, 周雅琦¹, 孙梦洁¹, 任珺^{1,2,3*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院环境生态研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃瀚兴环保科技有限公司, 兰州 730070; 3. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 利用凹凸棒石和污泥制备7种不同比例(0、5%、10%、15%、20%、25%、30%)的凹凸棒石-污泥共热解生物炭。通过盆栽试验调查凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米生长和土壤中重金属(Cu、Zn、Pb、Ni、Cd)富集的影响。结果表明:凹凸棒石添加量为15%的凹凸棒石-污泥共热解生物炭显著促进了玉米的出苗率和株高,分别增加了55.87%和24.35%,凹凸棒石添加量为20%时,根长、鲜质量和干质量分别增加了65.57%、79.85%和76.84%。凹凸棒石-污泥共热解生物炭对重金属的富集有显著抑制作用,凹凸棒石添加量为15%时,显著抑制了玉米对Cu、Zn、Ni、Cd的富集,分别减少了55.01%、49.27%、54.87%、41.99%,凹凸棒石添加量为20%时,使重金属Pb的富集量减少了34.01%。凹凸棒石的添加增强了污泥生物炭的钝化功能,为污泥安全利用提供了一种新方法。

关键词: 凹凸棒石; 污泥生物炭; 重金属; 钝化; 富集

中图分类号: X53; S513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1512-09 doi:10.11654/jaes.2019-1417

Influence of biochar prepared by co-pyrolysis with attapulgite and sludge on maize growth and heavy metal accumulation

TAO Ling^{1,2,3}, ZHANG Qian¹, ZHANG Xue-bin¹, ZHOU Ya-qi¹, SUN Meng-jie¹, REN Jun^{1,2,3*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Hanxing Environmental Protection Co. Ltd, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Seven kinds of biochar were prepared by co-pyrolysis with sludge and different amounts of attapulgite (0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) and were applied to maize seedlings in pot experiments in order to stabilize heavy metals (Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) and affect growth. The results suggested that adding 15% attapulgite to biochar significantly increased maize germination rate and plant height, which increased by 55.87% and 24.35%, respectively. When the amount of attapulgite added was 20%, root length, fresh weight, and dry weight increased by 65.57%, 79.85%, and 76.84%, respectively. Biochar prepared by co-pyrolysis with attapulgite and sludge significantly inhibited the enrichment of heavy metals. The addition of 15% attapulgite significantly inhibited the accumulation of Cu, Zn, Ni, and Cd in maize, reducing accumulation by 55.01%, 49.27%, 54.87%, 41.99%, respectively. Furthermore, the addition of 20% attapulgite reduced the accumulation of Pb by 34.01%. The addition of attapulgite enhances the passivation function of sludge biochar and provides a new method for the safe use of sludge.

Keywords: attapulgite; sludge biochar; heavy metal; stabilization; accumulation

收稿日期: 2019-12-14 录用日期: 2020-05-18

作者简介: 陶玲(1970—), 女, 甘肃靖远人, 博士, 教授, 从事污染环境生态修复理论与技术研究。E-mail: taoling@mail.lzjtu.cn

*通信作者: 任珺 E-mail: renjun@mail.lzjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668034); 甘肃省大学生创新创业训练计划项目(201910732022)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (51668034); Gansu Provincial College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (201910732022)

土壤是农业生产活动的物质基础,也是人类宝贵的自然资源^[1]。但随着工业化的发展和城镇化建设等人类活动对土壤环境造成的污染日益严重,土壤环境质量状况整体不容乐观。全国约有20%的农田耕地受重金属污染,其主要来源于重污染工业废弃物排放、污灌、大气沉降等,调查显示有超过36.3%重污染企业周边土壤污染物超标,使用污水灌溉的区域重金属显著高于周边重金属背景值^[2]。

随着城市扩张与工业的发展,污水处理量急剧增大,城市污水污泥的处置和利用的问题日益突出,已被确定为“未来的垃圾问题”^[3]。钝化修复技术因其具有修复速率快、操作简单、效果好等优点,适用于大面积中轻度重金属污染农田修复治理^[4-8]。生物炭主要来源于生物质原料,因具有较大的比表面积、发达的孔隙结构、容重轻、离子交换量大、表面官能团丰富、偏碱性、富含有机碳和矿质营养元素等特点,被用于修复土壤污染、改善土壤环境、提升土壤肥力、大气减排等环境科学领域^[9-11]。Jiang等^[12]将污泥生物炭施加到土壤后,酸溶态的Cu和Pb含量随生物炭施加量的增加分别降低了19.7%和18.8%,Cd降低了5.6%。Huang等^[13]使用污泥与稻草和锯末共热解生产生物炭,加入稻草和锯末明显降低了生物炭产品中重金属的总含量,特别是Cu、Zn和Ni含量降低。凹凸棒石是一种具有土和石特性的非金属矿质资源。它是一种包含层、链结构的纤维状晶体,有较强的离子交换能力和良好的吸附性、缓释性、悬浮性^[14]。谭科艳等^[15]用凹凸棒石修复Cu、Zn、Cd污染土壤,能使Cu、Zn、Cd的平均修复率分别达到31.5%、26.15%、

34.92%。王建乐等^[16]比较了黏土矿物和生物炭不同组合的修复材料对农田土壤中Cd的修复效果,结果表明含生物炭的修复材料在修复Cd污染农田土壤中有明显优势。添加凹凸棒石到污泥中制备生物炭,能够固化土壤中的重金属,降低污泥中重金属的活性,为污泥的安全利用探索可行途径。本项研究从探讨可行的污泥安全资源化利用技术出发,采用凹凸棒石-污泥共热解技术实现污泥热解固态产物在土壤改良中的资源化利用,为污泥安全处理处置与资源化利用提出了一条可能的发展路线,对于降低污泥中重金属造成的环境风险具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自甘肃省白银市白银公司第三冶炼厂沿东大沟方向8 km附近的种植3 a玉米的农田,每处采集地点按梅花形五点取样法,对多处采集的土壤分拣去除碎石和生物残体等杂质,过10目筛备用。此地区为污水灌溉农田,供试土壤受污染,基本理化性质见表1。

本研究采用的土壤重金属钝化材料为凹凸棒石-污泥共热解生物炭。其中污泥取自兰州市七里河-安宁生活污水处理厂的污泥,基本理化性质见表2。

凹凸棒石取自甘肃省临泽县板桥镇阳台洼滩矿点,基本理化性质见表3。供试作物为在西北地区广泛栽种的玉米,品种为沈单16(*Zea mays* var. shendan-16)。

1.2 试验方法

将取回的生活污泥样品分拣去除碎石、砂砾及植

表1 土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

pH	有机质 Organic matter/%	CEC/ cmol·kg ⁻¹	全N TN/g·kg ⁻¹	有效P Avaliable P/mg·kg ⁻¹	Cd/ mg·kg ⁻¹	Zn/ mg·kg ⁻¹	Cu/ mg·kg ⁻¹	Ni/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹
7.74	4.96	5.72	7.19	12.67	11.79	784.4	20.35	37.10	123.39

表2 污泥的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of sludge

pH	有机质 Organic matter/%	含水率 Moisture/%	总N Total N/%	有效P Avaliable P/mg·kg ⁻¹	Cd/ mg·kg ⁻¹	Zn/ mg·kg ⁻¹	Cu/ mg·kg ⁻¹	Ni/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹
7.03	12.85	82.46	3.43	227.74	1.85	296.03	96.23	19.61	40.49

表3 凹凸棒的基本理化性质

Table 3 Basic physical and chemical properties of attapulgite

pH	含水率 Moisture/%	CEC/mmol·kg ⁻¹	比表面积 BET/m ² ·g ⁻¹	总N TN/g·kg ⁻¹	总K Total K/g·kg ⁻¹
8.47	10.80	178.64	64.62	0.32	23.26

物残体等杂质,再自然通风7~9 d,自然风干。将处理好的污泥样品用粉碎机粉碎,并过10目筛。将过筛后样品充分混匀,用玛瑙钵进一步细磨,再过100目筛。将凹凸棒石与污泥按照0:100、5:95、10:90、15:85、20:80、25:75、30:70(干质量)的比例混合,通入氮气,将凹凸棒石-污泥混合样品放入350℃热解炉内热解2.5 h,经冷却后取出生物炭样品,制备7种80目凹凸棒石-污泥共热解生物炭,过200目筛备用,分别记作SA0、SA5、SA10、SA15、SA20、SA25和SA30。

称取3 kg土壤置于花盆(15 cm×15 cm)中,添加10%(以土质量计)凹凸棒石-污泥共热解生物炭粉末于土壤中并充分混匀。每种比例的生物炭钝化剂为一种处理,不添加钝化剂的作为对照(CK),共8种处理,每种处理3次重复。在室温下保持田间持水量钝化30 d,开始盆栽试验。以玉米为供试植物,每个花盆播种10粒种子,播种深度为2 cm,播种后始终保持土壤湿润,每日观察玉米生长状况,并记录种子的出苗率,直至不再出苗。

盆栽试验种植30 d后,将玉米苗取出,用去离子水洗净,沥水风干,测定盆中每株玉米的地上部分、地下部分鲜质量,并用千分尺测定玉米的株高和根长,算出平均值。将测定过鲜质量的玉米植株在105℃烘箱内杀青30 min,于75℃下烘干至恒质量,测定玉米植株地上与地下部分的干质量,最后研磨至100目用于测定重金属(Cd、Zn、Cu、Ni、Cr)含量。

1.3 测定方法

称量0.500 g玉米地上、地下部分干样,在聚四氟乙烯坩埚中加入8 mL硝酸与2 mL高氯酸,放置过夜,然后在电热板上加热,直至棕色烟雾消失,继续升温,直至冒浓白烟,冷却至室温,过滤定容至50 mL容量瓶中,利用原子吸收分光光度计测定溶液中的重金属含量^[17-19]。

1.4 数据处理

试验数据为3次重复的平均值和标准偏差,采用Statistic 7.0软件进行数据分析,Origin 8.0作图。

富集系数(BCF)=植物体内重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤中重金属含量(mg·kg⁻¹)

转运系数(TF)=植物茎叶中重金属含量(mg·kg⁻¹)/植物根中重金属含量(mg·kg⁻¹)

2 结果与分析

2.1 植物生长

污泥生物炭能够减轻重金属污染土壤对玉米种

子萌发和生长的抑制作用。玉米根长、株高均显著高于对照组。SA15的出苗率最高,为88.33%,生物炭SA10、SA15、SA20处理下的出苗率显著高于CK和SA0处理;添加凹凸棒石-污泥共热解生物炭SA0至SA30比CK的株高分别提高了9.91%、11.72%、13.26%、24.35%、24.12%、20.14%、8.19%;玉米幼苗根长在9.41 cm到15.58 cm之间变化,生物炭SA15、SA20处理下的玉米幼苗根长差异显著,并显著高于其他处理(表4)。可能是因为随着凹凸棒石的增加,钝化土壤碱性增加以及对重金属的吸附性增强,使重金属含量降低,从而减轻了对玉米生长的毒害作用,但凹凸棒石含量增加到一定程度时,会使土壤养分降低,影响玉米的生长。

表4 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米的生长特性

Table 4 Growth characteristics of maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

处理 Treatments	出苗率 Emergence rate/%	株高 Plant height/ cm	根长 Root length/ cm
CK	56.67±0.08e	22.09±0.77d	9.41±0.78d
SA0	68.33±0.08d	24.28±0.76c	11.24±0.78c
SA5	73.33±0.03cd	24.68±0.61c	11.70±0.61c
SA10	80.00±0.05abc	25.02±0.86bc	11.47±0.86c
SA15	88.33±0.03a	27.47±0.97a	13.48±0.97b
SA20	85.00±0.01ab	27.42±0.98a	15.58±0.98a
SA25	78.33±0.07abc	26.54±1.10ab	12.08±1.20bc
SA30	75.00±0.09bc	23.90±1.31d	11.33±1.30c
F-值	9.273 47***	14.087 44***	10.765 83***

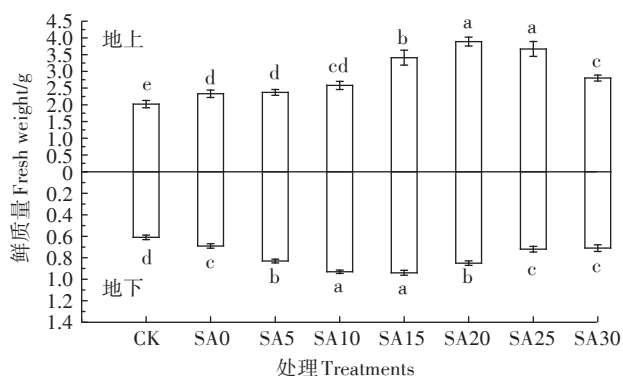
注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上极显著相关,***表示在0.001水平上极显著相关。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at 0.05 level. *indicates a significant correlation at the 0.05 level, **indicates a significant correlation at the 0.01 level, ***indicates a significant correlation at the 0.001 level. The same below.

凹凸棒石-污泥共热解生物炭的添加显著增加了玉米地上、地下部分鲜质量,玉米幼苗地上、地下部分鲜质量之间存在极显著差异。各生物炭处理下玉米地上、地下部分鲜质量均高于对照组且随凹凸棒石添加比例的加大呈现先增大后减小的趋势。生物炭SA20、SA25处理下的玉米地上鲜质量没有显著差异,但显著高于其他处理;生物炭SA10、SA15处理下的玉米地下鲜质量没有显著差异,但显著高于其他处理;添加SA20后的地上部分鲜质量最大,较未添加凹凸棒石-污泥共热解生物炭的空白样品增加了

92.70%,凹凸棒石比例为15%的污泥生物炭处理下地下部分鲜质量最大(图1)。

施加凹凸棒石-污泥共热解生物炭显著增加了玉米地上、地下部分干质量。添加SA0~SA30凹凸棒石-污泥共热解生物炭较对照组样品的地上部分干质量分别增加了14.73%、22.08%、42.25%、68.25%、80.65%、59.27%、71.69%,污泥生物炭SA15、SA25处理下的玉米地上干质量没有明显差异,但显著高于SA0、SA5、SA10处理,显著低于SA20处理下的玉米地上部分干质量。污泥生物炭SA10、SA15处理下的玉米地下干质量没有明显差异,但对地下部分干质量的增加最为明显,较对照组分别增加了98.50%、86.44%(图2)。



不同字母表示处理间差异显著。下同

Different letters indicate significant differences among treatments. The same below

The same below

图1 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米地上、地下部分的鲜质量

Figure 1 Fresh weight of above-ground and underground parts of maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

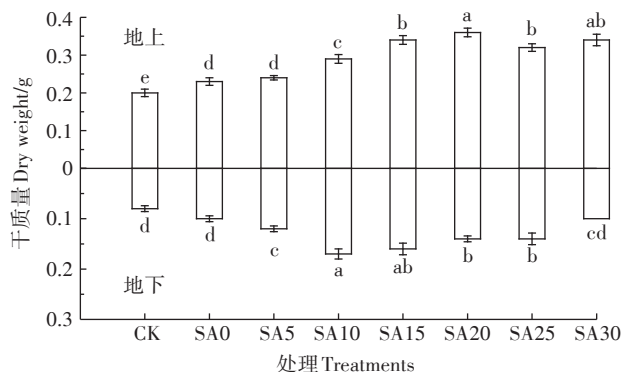


图2 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米地上、地下部分的干质量

Figure 2 Dry weight of above-ground and underground parts of maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

2.2 重金属富集

添加污泥生物炭SA0~SA30显著减少玉米地上和地下部分对Cu的富集含量,较对照组分别减少了30.31%、39.67%、57.32%、58.23%、54.85%、54.36%、50.37%和21.92%、35.34%、38.95%、52.92%、54.21%、50.23%、46.41%。不同污泥生物炭处理显著影响玉米植株的地上、地下部分Cu富集含量($P<0.001$),污泥生物炭SA10、SA15处理下的玉米地上部分Cu的富集含量没有明显差异,但显著低于其他处理,SA5处理下的玉米地上部分Cu的富集含量显著高于SA20、SA25、SA30处理,显著低于SA0处理;污泥生物炭SA15、SA20、SA25处理下的玉米地下部分Cu的富集含量没有明显差异,但显著低于其他处理(图3)。

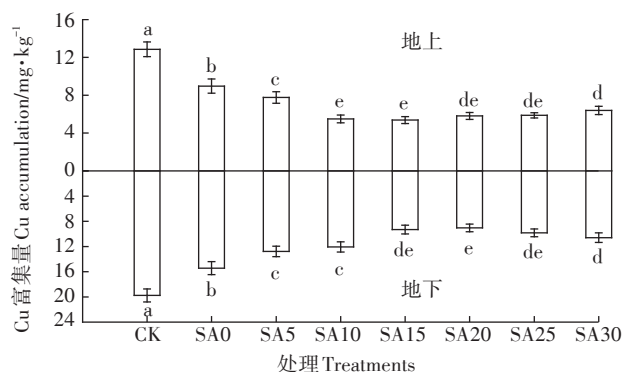


图3 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米对Cu的富集量

Figure 3 Cu accumulation in maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

与对照相比,添加污泥生物炭SA0~SA30显著减少玉米地上、地下部分对Zn的富集含量,分别减少了40.70%、43.64%、47.90%、60.45%、57.00%、51.49%、48.60%和18.90%、26.04%、31.47%、38.45%、37.67%、32.74%、29.72%。不同处理极显著影响玉米地上、地下部分Zn富集含量($P<0.001$),SA15、SA20处理下玉米地上、地下部分Zn富集含量之间没有差异性,但极显著低于其他处理。玉米幼苗的Zn富集含量随凹凸棒石添加比例的加大呈现先减小后增大的趋势,对于重金属Zn而言,凹凸棒石添加为15%的处理对玉米Zn富集的抑制作用最显著(图4)。

玉米地上部分对重金属Pb的富集含量高于地下部分,SA0~SA30显著减少玉米地上、地下部分对Pb的富集含量,较对照组分别减少了22.11%、30.96%、35.23%、48.89%、53.48%、55.72%、44.35%和19.47%、20.19%、29.15%、34.63%、43.46%、39.10%、34.27%。

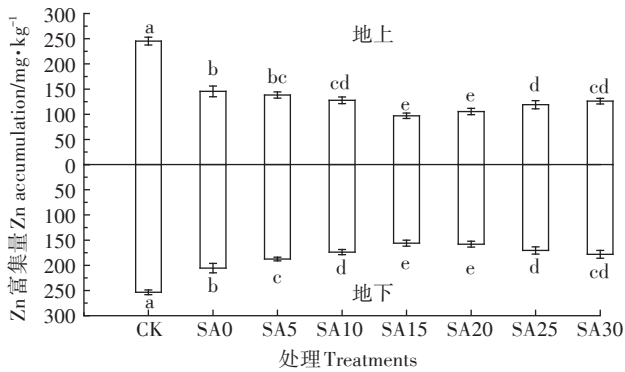


图4 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米对Zn的富集量

Figure 4 Zn accumulation in maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

不同处理极显著影响玉米地上、地下部分Pb富集含量 ($P<0.001$), SA20、SA25处理下玉米地上部分Pb富集含量极显著低于其他处理; SA15、SA30处理下玉米地下部分Pb富集含量极显著低于SA0、SA5, 显著高于SA20。对于重金属Pb而言, 凹凸棒石添加为25%的SA25对玉米地上部分Pb富集的抑制作用显著, SA20处理下对玉米根部Pb富集的抑制作用显著(图5)。

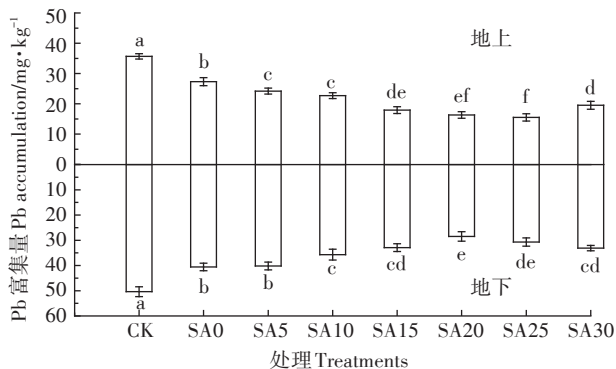


图5 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米对Pb的富集量

Figure 5 Pb accumulation in maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

SA0~SA30显著减少玉米地上、地下部分对Ni的富集含量, 较对照组分别减少了34.99%、36.66%、40.27%、45.77%、50.62%、36.31%、24.91%和41.86%、55.16%、56.51%、60.88%、49.23%、43.91%、37.05%。SA0、SA30处理下玉米地上部分Ni富集含量极显著高于SA15、SA20处理; SA20处理下玉米地上部分Ni富集含量极显著低于其他处理; SA5、SA10、SA15处理下玉米地下部分Ni富集含量之间没有差异性, 但极显著低于除SA20外的其他处理。对于重金属Ni

而言, 凹凸棒石添加20%的生物炭SA20处理对玉米地上部分Ni富集的抑制作用最显著, SA15对玉米根部Ni富集的抑制作用最显著(图6)。

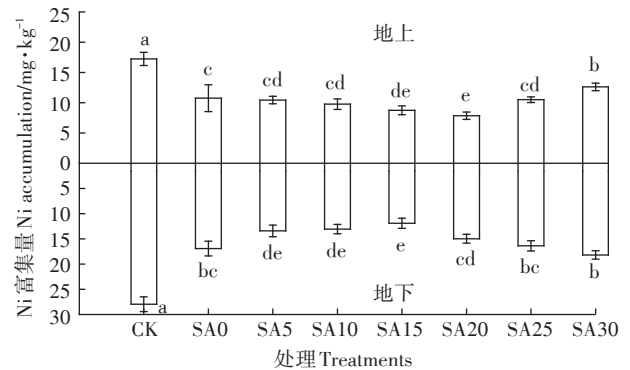


图6 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米对Ni的富集量

Figure 6 Ni accumulation in maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

与对照相比, 添加污泥生物炭SA0~SA30显著减少玉米地上、地下部分对Cd的富集含量, 分别减少了17.35%、24.55%、26.98%、47.94%、40.42%、35.56%、31.11%和14.82%、23.81%、33.40%、36.26%、39.10%、31.13%、23.99%。不同处理极显著影响玉米地上、地下部分Cd富集含量 ($P<0.001$), SA15、SA20处理下玉米地上Cd富集含量极显著低于除SA25以外的其他处理; SA0、SA5、SA10处理下玉米地上部分Cd富集含量极显著高于其他处理; SA10、SA15、SA20处理下玉米地下部分Cd富集含量极显著低于除SA25以外的其他处理。对于重金属Cd而言, SA15处理对玉米地上部分Cd富集的抑制作用最显著, SA20对玉米根部Cd富集的抑制作用最显著(图7)。

2.3 重金属富集系数

与对照相比, 在施加7种凹凸棒石-污泥混合生物炭处理下玉米对重金属的富集系数均显著减小。5种重金属中玉米对Cd的富集系数最大。Cu在混合生物炭SA10、SA15、SA20、SA25处理下的玉米地上富集系数没有显著差异, SA15、SA20、SA25处理下的玉米地下富集系数没有显著差异, 但显著低于SA0和SA5处理; Zn在混合生物炭SA15、SA20处理下的玉米地上富集系数没有显著差异, 但显著低于除SA25外的其他处理, 混合生物炭SA5、SA10、SA30处理下的玉米地下富集系数没有显著差异, 但显著低于SA0处理; Pb在混合生物炭SA15、SA20、SA25处理下的玉米地上富集系数没有显著差异, 但显著低于SA0和SA5处理, 混合生物炭SA15、SA30处理下的玉米地下

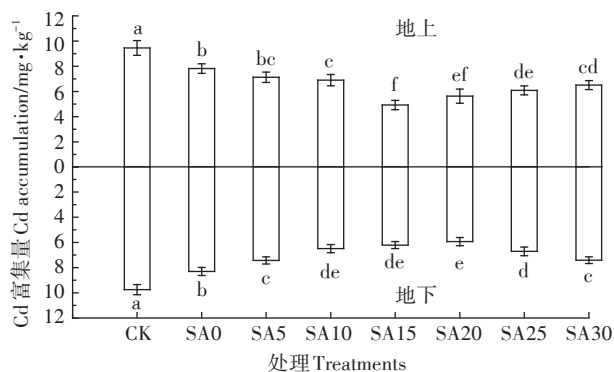


图7 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米对Cd的富集量

Figure 7 Cd accumulation in maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

富集系数没有显著差异,但显著低于SA0、SA5处理,显著高于SA20处理;Ni在混合生物炭SA15、SA20处理下的玉米地上富集系数没有显著差异,但显著低于SA0处理,混合生物炭SA5处理下的玉米地下富集系数显著低于SA0、SA25、SA30处理;Cd在混合生物炭SA5、SA10、SA20、SA30处理下的玉米地上和地下富集系数没有显著差异,但显著低于SA0处理(表5)。

2.4 重金属转运系数

玉米中Cu、Zn、Pb、Ni和Cd含量通常为茎叶低于根系,即转运系数小于1,重金属转运系数越小,说明重金属越易于在根系中富集,而只有少部分转运到茎

叶中,从而阻隔重金属进入食物链。Cu在SA10处理下的转运系数显著低于其他处理,CK处理下的转运系数显著高于SA0、SA10和SA15处理;Zn在SA25处理下的转运系数显著低于除SA20和SA25以外的其他处理,CK处理下的转运系数显著高于其他处理;Pb在SA25处理下的转运系数显著低于除SA15以外的其他处理,SA10、SA20处理下的转运系数显著低于CK处理;Ni在SA20处理下的转运系数显著低于除SA5以外的其他处理,SA10、SA15处理下的转运系数显著低于SA30处理;SA15处理下Cd的转运系数显著低于除SA20以外的其他处理(表6)。

3 讨论

种子萌发和幼苗早期生长的生物测定是评价生物炭改良剂对作物生长影响的一个简单、常用的生态毒理学评价方法^[17-19]。与对照相比,添加凹凸棒石-污泥混合生物炭对玉米种子的萌发促进作用明显,并显著提高了玉米幼苗的株高和根长,玉米植株的地上、地下部分鲜质量、干质量也显著高于对照组。这可能是因为凹凸棒石和生物炭的比表面积较大,晶体表面含活性中心和Si-OH基,能够产生物理吸附和化学吸附,且在热解过程中,凹凸棒石脱去吸附水和沸石水,增加了凹凸棒的孔隙容积、比表面积和活性中心,凹凸棒石与污泥的有机官能团之间还会发生复杂

表5 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米重金属富集系数

Table 5 Heavy metals accumulation coefficient of maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

部位 Parts	处理 Treatments	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd
地上	CK	0.63 ±0.04a	0.31±0.01a	0.29±0.04a	0.50±0.02a	0.90±0.06a
	SA0	0.38 ±0.05b	0.19±0.01b	0.25±0.02b	0.32±0.05bc	0.67±0.06b
	SA5	0.33 ±0.04bc	0.17±0.01bc	0.21±0.01b	0.31±0.00bcd	0.55±0.09c
	SA10	0.22 ±0.03de	0.16±0.01cd	0.20±0.05bc	0.28±0.00cd	0.57±0.03c
	SA15	0.23 ±0.02de	0.12±0.01f	0.15±0.03cd	0.26±0.04d	0.43±0.01d
	SA20	0.21 ±0.02e	0.13±0.01ef	0.14±0.01cd	0.23±0.01d	0.53±0.07c
	SA25	0.25 ±0.03de	0.15±0.01de	0.13±0.02d	0.28±0.01cd	0.51±0.02cd
	SA30	0.28 ±0.04cd	0.16±0.01cd	0.17±0.01c	0.34±0.04b	0.56±0.03c
	F-值	47.179 3***	100.709 4***	78.305 9***	24.075 4***	28.591 2***
地下	CK	0.84 ±0.05a	0.32±0.01a	0.42±0.06a	0.76±0.07a	0.93±0.04a
	SA0	0.65 ±0.01b	0.26±0.01b	0.37±0.02ab	0.43±0.06b	0.71±0.07b
	SA5	0.55 ±0.06c	0.23±0.01c	0.35±0.01b	0.33±0.28cd	0.57±0.08c
	SA10	0.48±0.06cd	0.22±0.00c	0.32±0.04bc	0.29±0.04d	0.54±0.02c
	SA15	0.40 ±0.04de	0.19±0.01e	0.28±0.01c	0.28±0.04d	0.54±0.03c
	SA20	0.32 ±0.03e	0.20±0.01de	0.25±0.01d	0.35±0.03bcd	0.56±0.06c
	SA25	0.41 ±0.07de	0.21±0.01cd	0.26±0.01cd	0.37±0.01bc	0.56±0.05c
	SA30	0.47 ±0.07cd	0.23±0.01c	0.29±0.02c	0.43±0.06b	0.63±0.03bc
	F-值	44.583 5***	61.374 7***	73.591 3***	35.978 2***	27.282 4***

表6 凹凸棒石-污泥共热解生物炭钝化土壤重金属后玉米重金属转运系数

Table 6 Heavy metal transport coefficients of maize after addition of biochar made by co-pyrolysis with attapulgite and sludge

处理 Treatments	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd
CK	0.65±0.01a	0.97±0.05a	0.71±0.04a	0.84±0.04a	0.97±0.02a
SA0	0.58±0.09b	0.71±0.03b	0.67±0.01ab	0.75±0.08bc	0.94±0.08a
SA5	0.61±0.01ab	0.74±0.02b	0.60±0.05cd	0.65±0.04cd	0.86±0.04b
SA10	0.45±0.01c	0.74±0.06b	0.64±0.02bc	0.71±0.02c	0.83±0.04bc
SA15	0.58±0.00b	0.62±0.05c	0.55±0.06de	0.73±0.04c	0.77±0.04d
SA20	0.64±0.01ab	0.67±0.02bc	0.57±0.01cd	0.62±0.08d	0.81±0.13cd
SA25	0.60±0.02ab	0.70±0.07bc	0.51±0.03e	0.75±0.02bc	0.85±0.06b
SA30	0.60±0.01ab	0.71±0.02b	0.59±0.04cd	0.79±0.01ab	0.88±0.08b
F-值	9.512 92***	17.747 12***	10.460 21***	17.865 65***	3.181 03*

的化学反应,形成凹凸棒石-污泥生物炭钝化机制,增加了对重金属的吸附能力,从而去除土壤中的重金属,显著降低土壤中重金属浓度,减轻对玉米的胁迫作用^[20-25]。重金属阳离子极易与生物炭中可溶性的碳酸盐和磷酸盐发生沉淀作用而生成难溶性的重金属沉淀,从而降低重金属的生物有效性,且污泥生物炭富含土壤营养元素N、P、K、Ca、Mg及微量元素,能改善土壤的一些物理、化学和生物性质,有助于农作物的产量增加^[26-28]。Khanmohammadi等^[29]以萝卜、玉米和青菜为研究对象,研究了污泥基生物炭对这3种农作物和土壤中重金属的影响,污泥基生物炭的适当施用可以提高作物的生长并降低土壤中重金属的含量,但污泥基生物炭添加过多则会抑制作物的生长。

生物炭添加不仅能够促进植物种子的萌发和改善植物生长状况,还能够降低植物体内的重金属富集量^[30-33]。与对照相比,添加凹凸棒石-污泥混合生物炭降低了植物地上、地下部分中的重金属含量,且随着凹凸棒石含量的增加,玉米地上、地下部分的重金属含量均呈现下降趋势,但在凹凸棒石含量增加到15%和20%后,玉米中重金属含量略有增加。这可能是因为污泥中本身含有大量重金属,而凹凸棒石中重金属含量较少,随着凹凸棒石的增加,使得生物炭本身重金属含量也减少,且凹凸棒石的碱性和吸附能力也使土壤中重金属的活性降低,减少了玉米地上、地下部分对重金属的吸收,使得玉米中重金属含量降低。富集系数和转运系数主要用来表征植物对土壤中重金属的富集能力和植物地下器官往地上器官转运重金属的能力^[34-36]。玉米的富集系数和转运系数均小于1,且地下部分重金属富集系数大于地上部分,说明玉米根部对重金属的吸附能力较强且玉米的转运能力较低。这可能是因为植物根具有庞大的根

系和巨大的表面积,可通过吸收、沉淀及富集等作用使重金属在植物根部大量积累,可以有效降低重金属的迁移性,根系还可以通过释放分泌物将重金属以磷酸盐的形式沉淀,可以使重金属在根部的细胞壁上与呼吸作用产生的CO₂形成不可溶碳酸盐,使玉米根部的重金属含量多于地上部分的重金属含量^[37-40]。

4 结论

(1)凹凸棒石-污泥共热解生物炭可以促进玉米种子的萌发,并显著提高了玉米幼苗的株高和根长,也显著增加了玉米植株的地上、地下部分鲜质量和干质量。

(2)凹凸棒石-污泥共热解生物炭可以抑制玉米对土壤重金属的富集和转运,且随着凹凸棒石添加比例的增加,植物对重金属的富集量呈现先增大后减小的趋势。

(3)凹凸棒石添加15%时,制备的污泥生物炭对土壤中Cu、Zn和Pb的富集抑制作用明显,凹凸棒石添加20%时,制备的污泥生物炭对土壤中Ni和Cd的富集抑制作用显著。

参考文献:

- [1] Yue Y, Cui L, Lin Q, et al. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth[J]. *Chemosphere*, 2017, 173:551-556.
- [2] 王忠科, 李刚, 王格格, 等. 污泥-锯末共热解生物炭的制备及土壤应用[J]. *现代化工*, 2017, 37(1):147-152.
WANG Zhong-ke, LI Gang, WANG Ge-ge, et al. Preparation of biochar from co-pyrolysis of sludge-sawdust and its application in soil[J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, 37(1):147-152.
- [3] 张翔, 余真, 张耿峻, 等. 污泥生物炭基堆肥对锰污染土壤性质及其修复的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7):1277-1286.
ZHANG Xiang, YU Zhen, ZHANG Geng-leng, et al. Effects of sludge

- biochar based compost on properties and remediation of soil contaminated by manganese[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1277-1286.
- [4] 翟世民, 柳荣展, 郭雪松, 等. 污水处理厂污泥制备生物炭及应用的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(增刊2):363-368.
- ZHAI Shi-min, LIU Rong-zhan, GUO Xue-song, et al. Researches progress and application development of sewage sludge biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(Suppl 2):363-368.
- [5] 范世锁, 李雪, 胡凯, 等. 污泥基生物炭吸附重金属Cd的动力学和热力学[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10):5971-5977.
- FAN Shi-suo, LI Xue, HU Kai, et al. Kinetics and thermodynamic adsorption of cadmium by biochar derived from sewage sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10):5971-5977.
- [6] Zhang J, Wu S C, Xu Z T, et al. The role of sewage sludge biochar in methylmercury formation and accumulation in rice[J]. *Chemosphere*, 2019, 218: 527-533.
- [7] 郑凯琪, 王俊超, 刘姝彤, 等. 不同热解温度污泥生物炭对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12):7277-7282.
- ZHENG Kai-qi, WANG Jun-chao, LIU Shu-tong, et al. Adsorption characteristic of Pb^{2+} and Cd^{2+} with sludge biochars derived at different pyrolysis temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(12):7277-7282.
- [8] 王君, 陈娴, 桂丕, 等. 污泥炭化温度和时间对重金属形态及作物累积的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5):54-60.
- WANG Jun, CHEN Xian, GUI Pi, et al. Effects of pyrolysis temperature and time on the speciation and bioaccumulation of heavy metals derived from sludge[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(5):54-60.
- [9] Barrow C J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture[J]. *Applied Geography*, 2012, 34:21-28.
- [10] 范世锁, 汤婕, 程燕, 等. 污泥基生物炭中重金属的形态分布及潜在生态风险研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10):1739-1744.
- FAN Shi-suo, TANG Jie, CHENG Yan, et al. Investigation of the speciation of heavy metals in sludge-derived biochar and its potential ecological risk[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10):1739-1744.
- [11] 鲁涛, 袁浩然, 王亚琢, 等. 热解温度对污泥生物炭稳定性及养分淋溶特性影响[J]. 化工学报, 2015, 66(7):2664-2669.
- LU Tao, YUAN Hao-ran, WANG Ya-zhuo, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar stability and leaching properties of nutrients contained in biochar[J]. *Chemical Journal*, 2015, 66(7):2664-2669.
- [12] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, et al. Immobilization of $Cu(II)$, $Pb(II)$ and $Cd(II)$ by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted ultisol[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229/230: 145-150.
- [13] Huang H J, Yang T, Lai F Y, et al. Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, 125:61-68.
- [14] 卢欢亮, 叶向东, 汪永红, 等. 热解温度对污泥生物炭的表面特性及重金属安全性的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3):1433-1439.
- LU Huan-liang, YE Xiang-dong, WANG Yong-hong, et al. Effects of pyrolysis temperature on surface properties and heavy metal safety of sludge-derived biochar[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(3):1433-1439.
- [15] 谭科艳, 刘晓端, 刘久臣, 等. 凹凸棒石用于修复铜锌镉重金属污染土壤的研究[J]. 岩矿测试, 2011, 30(4):451-456.
- TAN Ke-yan, LIU Xiao-duan, LIU Jiu-chen, et al. Remediation experiments of attapulgite clay to heavy metal contaminated soil[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(4):451-456.
- [16] 王建乐, 谢仕斌, 涂国权, 等. 多种材料对铅镉污染农田土壤原位修复效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):325-332.
- WANG Jian-le, XIE Shi-bin, TU Guo-quan, et al. Comparison of several amendments for in-situ remediation of lead- and cadmium-contaminated farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2):325-332.
- [17] Li F, Bade R, Oh S, et al. Immobilization of heavy metals in a contaminated soil using organic sludge char and other binders[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2012, 29(10):1362-1372.
- [18] 程国淡, 黄青, 张凯松. 热解温度和时间对生物干化污泥生物炭性质的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3):1133-1138.
- CHENG Guo-dan, HUANG Qing, ZHANG Kai-song. Effect of temperature and duration of pyrolysis on properties of bio-dried sludge biochar[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(3):1133-1138.
- [19] 卢再亮, 李九玉, 姜军, 等. 生活污水污泥制备的生物质炭对土壤酸度的改良效果及其环境风险[J]. 环境科学, 2012, 33(10):3585-3591.
- LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, et al. Amelioration effects of wastewater sludge biochars on red soil acidity and their environmental risk[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10):3585-3591.
- [20] 马涛, 宋元红, 李贵桐, 等. 市政污泥生物炭重金属含量及其形态特征[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2):189-194.
- MA Tao, SONG Yuan-hong, LI Gui-tong, et al. Characteristics of the form and concentration of heavy metals in the biochar made from municipal sewage sludge[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2):189-194.
- [21] Méndez A, Gómez A, Paz-Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1354-1359.
- [22] Poma I, Venezia G, Sarno M, et al. Effects of cropping systems and irrigation on the bio-agronomic and quality response of industrial tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. *Acta Horticulturae*, 2012, 936: 145-154.
- [23] Sardar K, Cai C, Muhammad W, et al. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15):8624-8632.
- [24] Monika M H, Krzysztof G, Agnieszka K P, et al. Sewage sludge biochars management: Ecotoxicity, mobility of heavy metals, and soil microbial biomass[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2018, 37

- (4):1197-1207.
- [25] Zhao Y H, Zhao L, Mei Y Y, et al. Release of nutrients and heavy metals from biochar-amended soil under environmentally relevant conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2517-2527.
- [26] Fathianpour A, Taheriyoun M, Soleimani M. Lead and zinc stabilization of soil using sewage sludge biochar: Optimization through response surface methodology[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2018:1700429.
- [27] Faria W M, Cícero C F, Coser T R, et al. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(4):505-519.
- [28] Dan Z, Dan L, Fengxiang G, et al. Effects of biochar-derived sewage sludge on heavy metal adsorption and immobilization in soils[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(7):681.
- [29] Khanmohammadi Z, Afyuni M, Mosaddeghi M R. Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 63(2):198-212.
- [30] Fang S, Tsang D C W, Zhou F, et al. Stabilization of cationic and anionic metal species in contaminated soils using sludge-derived biochar[J]. *Chemosphere*, 2016, 149:263-271.
- [31] Cao X, Ma L Q, Singh S P, et al. Phosphate-induced lead immobilization from different lead minerals in soils under varying pH conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1):184-192.
- [32] Galan E. Properties and applications of palygorskite-sepioliteclays[J]. *Clay Minerals*, 1996, 31(4):443-453.
- [33] Haoran Y, Lu T, Wang Y Z, et al. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients[J]. *Geoderma*, 2016, 267: 17-23.
- [34] Zhang Y, Chen T, Liao Y, et al. Modest amendment of sewage sludge biochar to reduce the accumulation of cadmium into rice (*Oryza sativa* L.): A field study[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:819-825.
- [35] Gwenzi W, Muzava M, Mapanda F, et al. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(6):1395-1406.
- [36] Mustafa K H, Vladimir S, Lester M, et al. Wastewater sludge and sludge biochar addition to soils for biomass production from *Hyparrhenia* [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:345-348.
- [37] Mustafa K H, Vladimir S, Peter F N. Comparative assessment of the effect of wastewater sludge biochar on growth, yield and metal bioaccumulation of cherry tomato[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5):680-685.
- [38] Méndez A, Paz-Ferreiro J, Araujo F, et al. Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 107:46-52.
- [39] Song X D, Xue X Y, Chen D Z, et al. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation[J]. *Chemosphere*, 2014, 109: 213-220.
- [40] Claoston N, Samsuri A W, Ahmad Husni M H, et al. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars[J]. *Waste Management & Research*, 2014, 32:331-339.