

生物质炭与有机物对水稻 Cd 积累的影响*

潘 婷 孙星星 张嘉伟 魏 泓 许 健 徐轶群[#]

(扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225100)

摘要 通过盆栽试验,研究了传统水分管理条件下,生物质炭及牛粪有机肥的不同施用方式对土壤理化性质以及 Cd 在水稻中积累的影响。结果表明,各处理组土壤氧化还原电位(Eh)随淹水时间增加整体呈下降趋势,pH 则波动变化趋近于中性。与对照组相比,有机物的施用能不同程度降低土壤中有效态 Cd 含量。生物质炭的施用显著降低了糙米中的 Cd 含量,且后期施用生物质炭降低效果更为显著。施用有机物能有效抑制水稻中 Cd 的积累,水稻根部、糙米、稻壳中 Cd 的含量随有机物施加量的升高而降低。有机物与生物质炭同时施用,低含量有机物与后期施用生物质炭同时作用的处理组中的糙米 Cd 含量降低最为显著。

关键词 水稻 有机物 生物质炭 淹水 Cd 积累

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.03.012

Effects of biochar and organic matter on Cd accumulation in rice PAN Ting, SUN Xingxing, ZHANG Jiawei, WEI Hong, XU Jian, XU Yiqun. (School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225100)

Abstract: Through pot experiments, the effects of different application methods of biochar and cow dung organic matter on the physical and chemical properties of soil and the accumulation of Cd in rice were studied under traditional water management conditions. The results indicated that the soil Eh of each treatment group showed a downward trend with flooding time increasing, and the pH fluctuated with flooding time increasing then tended to be neutral. Compared with the control group, the application of organic matter reduced the content of available Cd in the soil to varying degrees. The application of biochar significantly reduced Cd content in brown rice, and adding biochar later had better reduction effect. The accumulation of Cd in rice was effectively inhibited by organic matter, and the Cd content in rice roots, brown rice and rice husks decreased with the increase of organic matter application. When the organic matter and biochar were applied to the soil at the same time, the Cd content of brown rice decreased most significantly in the low organic matter and later biochar treatment groups than other groups.

Keywords: rice; organic matter; biochar; flooding; Cd accumulation

近年来,我国水稻 Cd 超标严重,引起了社会广泛关注,人们把水稻 Cd 超标归因于我国严重的土壤污染。根据《全国土壤污染状况调查公报》,我国土壤重金属污染现状严峻,其中 Cd 点位超标率高达 7.0%,是污染最为严重的重金属之一^[1-2]。水稻是我国和其他一些亚洲国家最重要的粮食作物,易积累 Cd,是人体摄入 Cd 的最主要来源,过量 Cd 的摄取将对人体健康带来严重影响^[3]。为了降低 Cd 在水稻中的积累,科研工作者在工程技术和农艺措施等方面进行了大量的研究,其中运用水分管理阻控水稻 Cd 积累的研究得到了广泛关注,成为了一个新的研究热点。而水分管理阻控水稻 Cd 积累的核心是在水稻成长至抽穗期前后淹水,这和我 国水稻传统灌溉方式基本一致。

近几十年来,为了提高我国水稻产量,化肥被大量使用,造成土壤退化(如酸化和板结),土壤的酸化加剧了我国水稻中 Cd 的积累,因此有必要改变施肥方式来改善这类状况。有机肥富含大量营养物质,可作为无机化肥的替代物,改善土壤状况。生物质炭是生物质高温裂解产生的固态物质^[4-5],具有较大的比表面积和较强的污染物吸附能力^[6-7]。因此,有机肥和生物质炭常被用来改善土壤结构,促进植物生长^[8]。研究表明土壤有机物对土壤 Cd 生物有效性具有抑制和激活的双重作用^[9]。另外,生物质炭可通过影响土壤 Cd 的生物有效性降低水稻各部位 Cd 含量^[10]。然而传统水分管理下,有机肥和生物质炭共同施用在改良土壤状况的同时,能否降低水稻 Cd 含量,目前国内外相关报道较少;特别是有机

第一作者:潘 婷,女,1995 年生,硕士研究生,主要从事重金属在土壤中的迁移转化研究。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.31372133、No.41472034);扬州大学科技创新培育基金资助项目(No.2017CXJ054)。

肥的施用量和生物质炭施用时期的不同将会对水稻 Cd 积累产生怎样的影响,有待进一步研究。

基于此,本研究利用盆栽试验,在传统水管理下,研究 Cd 污染土壤水稻种植过程中,不同生长时期施用生物质炭及不同含量有机物对水稻不同部位 Cd 积累的影响,为我国农业施肥及粮食安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

水稻品种为江苏省江阴市农科所培育的“淮稻 5 号”;选用水稻田的耕层土壤作为试验盆栽土壤,风干研磨后过筛用于盆栽试验,土壤的 pH 为 7.13,有机质为 41.19 g/kg,速效磷为 0.32 g/kg,速效钾为 0.31 g/kg,碱性氮为 0.21 g/kg,全 Cd 为 2.23 mg/kg,有效态 Cd 为 0.48 mg/kg。前期向土壤添加外源 Cd 溶液,将土壤与外源 Cd 溶液充分混合均匀后,使试验土壤 Cd 约为 10 mg/kg,常温固化稳定两个月后作为污染土壤。外源有机物选用牛粪有机肥,取自于扬州大学农牧场,有机质为 286.65 g/kg。生物质炭购于溧阳市某炭业公司,为木屑源,pH 为 8.79。

1.2 试验设计

盆栽试验采用聚丙烯塑料盆(高 24 cm,内径 22 cm),每盆装土 5.5 kg(以干质量计),并施入定量基肥(1.10 g $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 、1.05 g KH_2PO_4 、0.30 g KCl)。按表 1 中的外源有机物添加量(质量分数),将过筛后的外源有机物与土壤充分混合;参照生物质炭在重金属污染土壤中施用的有关研究^[11-12],在保证水稻正常生长的前提下,试验中生物质炭按照质量分数为 5%的剂量施加,采取两种施用方式,分别为秧苗移栽前(前期)和分蘖期末(后期)施用;采用农业传统灌溉方式,根据水稻不同生长时期采用不同水量控制;水稻秧苗于 6 月统一移栽。

表 1 试验处理设置
Table 1 Treatments of the experiment

不同试验处理条件	编号
无外源有机物+前期施用生物质炭	CWQ
无外源有机物+后期施用生物质炭	CWH
无外源有机物+不施用生物质炭	CWW
0.5%外源有机物+前期施用生物质炭	CDQ
0.5%外源有机物+后期施用生物质炭	CDH
0.5%外源有机物+不施用生物质炭	CDW
4.0%外源有机物+前期施用生物质炭	CGQ
4.0%外源有机物+后期施用生物质炭	CGH
4.0%外源有机物+不施用生物质炭	CGW

1.3 样品采集与分析

水稻成熟后,将水稻连同根一起取出,去除杂土清洗干净,再用去离子水清洗 3~4 次,105 °C 杀青 2 h 后,65 °C 烘干至恒重。在分蘖期和成熟期采集土壤,风干后研磨过 10 目筛,采用二乙三胺五乙酸(DTPA)提取法提取土壤有效态 Cd,原子吸收分光光度计(AAS, Solaar MK2-M6)测定。利用万能粉碎机(FW100)将水稻各部位粉碎,过 100 目筛,干灰化法消解后,电感耦合等离子体质谱仪(Elan DRC-e)测定样品 Cd 含量。

利用标准物质 GBW 10043(GSB-22)控制糙米样品 Cd 总量的准确度;采用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析(显著性水平为 0.05)。

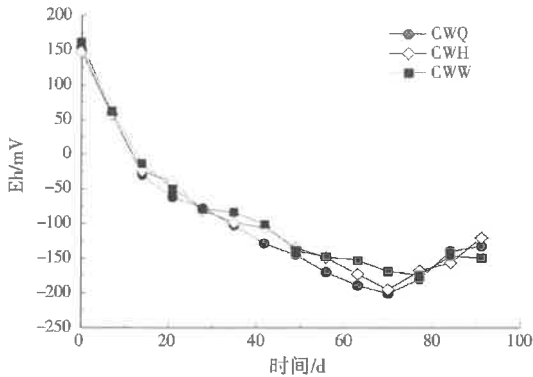
2 结果与分析

2.1 生物质炭与有机物对土壤氧化还原电位(Eh)、pH 和有效态 Cd 的影响

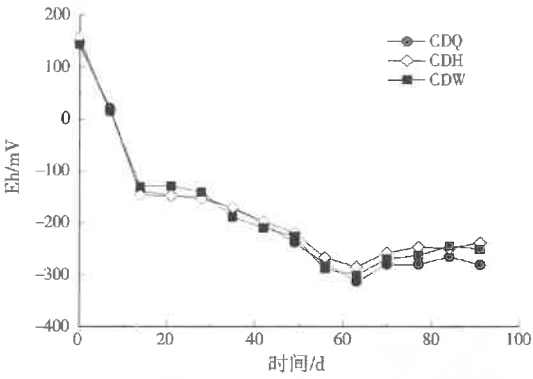
土壤 Eh 变化见图 1。各处理组土壤 Eh 整体呈下降趋势。总体来说,生物质炭的施用对土壤 Eh 没有产生显著影响,如图 1(a)所示,不添加有机物时,只施用生物质炭的处理组和对照组(CWW)相似,Eh 在第 70 天左右达到最低值(约 -200 mV),而后上升。图 1(b)和图 1(c)中,低含量有机物处理组及高含量有机物处理组无论是否添加生物质炭,Eh 在前期均随淹水时间增加而急剧下降,且均在第 63 天左右出现最低值,最低值处于 -300~-250 mV,而后稍有上升。总体来说,相较于无有机物处理组,添加有机物的处理组 Eh 降低更为明显。

图 2 为各处理组的 pH 变化趋势。各处理组 pH 波动较大,随淹水时间增加 pH 趋近中性(pH=7)。这是因为生物质炭属于碱性物质,粒子表面带有大量官能团,可以与土壤中的酸性物质结合^[13]。研究表明,无论是碱性土还是酸性土,土壤淹水后,由于微生物的活动消耗 O_2 ,产生厌氧和还原条件,Eh 降低,而 pH 朝中性变化^[14],与其他研究结果^[15-16]相似。

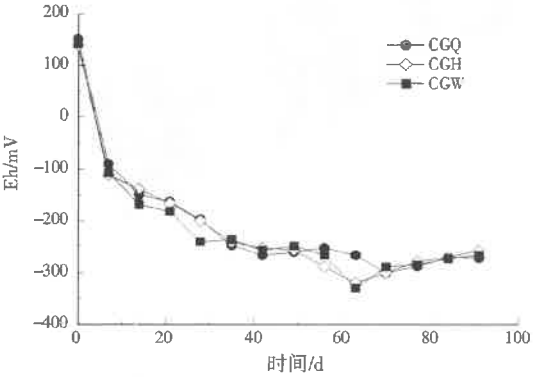
水稻不同生长阶段土壤有效态 Cd 变化见表 2。淹水后,土壤有效态 Cd 含量在水稻不同生长阶段均有不同程度降低,且成熟期低于分蘖期。土壤 Cd 的形态受有机物影响较大,在相同的生长期,有机物含量相同时,各处理组间(如 CDH、CDQ 和 CDW)无显著差异,但土壤有效态 Cd 含量随有机物含量升高而降低,有机物添加组和不添加组相比有显著差异。



(a) 不同时期添加生物质炭对土壤Eh的影响



(b) 低含量有机物与生物质炭对土壤Eh的影响



(c) 高含量有机物与生物质炭对土壤Eh的影响

图 1 各处理组的土壤 Eh

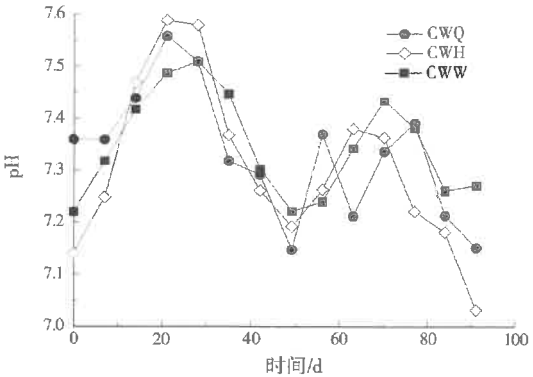
Fig.1 Eh of soil in different treatments

在水稻分蘖期,生物质炭无论前期还是后期施用,和对照组(不施用生物质炭)相比,土壤有效态 Cd 含量稍有下降但无显著差异。在水稻成熟期,有机物添加相同的处理组,生物质炭无论前期施用还是后期施用,和不施用生物质炭相比,土壤有效态 Cd 含量无显著差异。

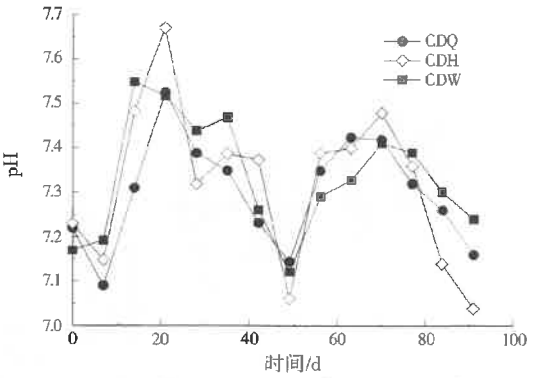
2.2 有机物与生物质炭对水稻 Cd 积累的影响

2.2.1 生物质炭的添加时期对水稻积累 Cd 的影响

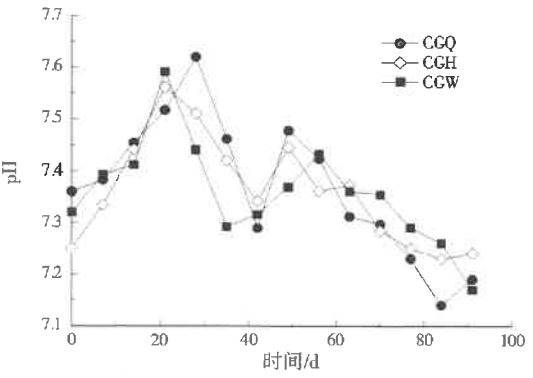
由图 3 可知,生物质炭的施用可显著降低糙米 Cd 的含量,生物质炭单独作用时,后期施用较前期施用对糙米 Cd 的积累抑制更为显著,和对照组相



(a) 不同时期添加生物质炭对土壤pH的影响



(b) 低含量有机物与生物质炭对土壤pH的影响



(c) 高含量有机物与生物质炭对土壤pH的影响

图 2 各处理组的土壤 pH

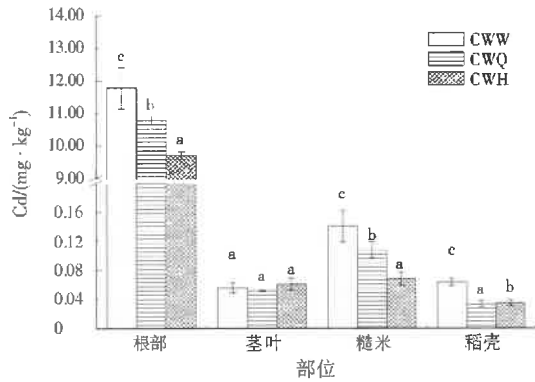
Fig.2 pH of soil in different treatments

表 2 水稻不同生长阶段土壤有效态 Cd¹⁾

Table 2 Available Cd in soil at different growth stages of rice

处理组	分蘖期有效态 Cd /(mg·kg ⁻¹)	成熟期有效态 Cd /(mg·kg ⁻¹)
CWQ	9.573±0.421b	8.935±0.165c
CWH	9.619±0.360b	8.933±0.084c
CWW	9.654±0.053b	8.906±0.088c
CDQ	9.308±0.367a	8.582±0.061b
CDH	9.325±0.034a	8.607±0.209b
CDW	9.380±0.237a	8.575±0.086b
CGQ	9.233±0.351a	8.202±0.282a
CGH	9.272±0.643a	8.171±0.766a
CGW	9.288±0.164a	8.143±0.012a

注:¹⁾ 同列数据后小写字母不同表示具有显著差异(P<0.05),表 3 同。



注:小写字母不同表示具有显著差异($P<0.05$),图4同。

图3 不同时期施加生物炭处理下水稻各部位的 Cd
Fig.3 Cd in various parts of rice under biochar application at different periods

比,糙米 Cd 分别降低了 21.4%(前期施用)和 51.4%(后期施用)。水稻根部 Cd 的积累量远高于其他部位,且各处理组间差异显著;不同处理组中茎叶部位 Cd 无显著差异;其他处理组稻壳 Cd 含量显著低于对照组,前期和后期施用处理组较之对照组分别降低了 47.9%和 46.0%。

2.2.2 不同含量有机物对水稻积累 Cd 的影响

不同含量有机物处理下水稻各部位 Cd 见图 4。除了茎叶外,有机物的添加显著降低了水稻糙米、根部和稻壳 Cd 的含量,且糙米、根部和稻壳 Cd 的含量随有机物含量的升高而降低,差异显著。刘高云^[12]研究发现,添加 3 种有机物料后,水稻的根部、茎叶和糙米部位中的 Cd 含量均有显著降低,这与本研究结果相似。

2.2.3 有机物与生物质炭联合作用对水稻 Cd 积累的影响

生物质炭和有机物联合施用于淹水土壤后,水稻各部位 Cd 见表 3。可以看出,和对照组相比,有机物与生物质炭联合作用的各处理组均能显著降低糙米 Cd 的积累量,其中 CDH、CDQ 和 CGH 效果更为显著。根部 Cd 的含量,高含量有机物与生物质炭联合作用显著低于其他处理组,而茎叶除了 CDH 的 Cd 含量较高外,其他处理组无显著差异。

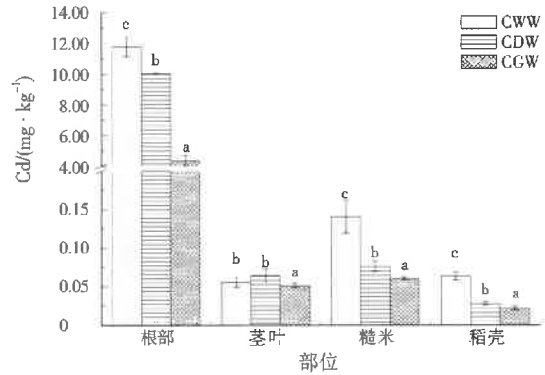


图4 不同有机物添加量处理下水稻各部位的 Cd
Fig.4 Cd in various parts of rice in different organic dosage treatments

稻壳 Cd 含量各处理组低于对照组,且各处理组间存在显著差异。

本研究中,有机物和生物质炭联合施用于水稻田时,在一定程度上可以降低糙米 Cd 的含量,低含量有机物与生物质炭联合作用的处理组(CDH、CDQ)和高含量有机物后期施用生物质炭的处理组(CGH)较其他处理组糙米 Cd 含量较低,但和有机物、生物质炭单独施用相比,糙米 Cd 的降低效果不如高含量有机物处理组(CGW)和后期施用生物质炭处理组(CWH)。

3 讨论

本研究中生物质炭的施用可显著降低糙米 Cd 的含量,生物质炭作为土壤改良剂在改善土壤理化性质的同时还可以利用自身疏松多孔的结构及表面丰富的含氧官能团吸附土壤中的金属污染物,改变重金属在土壤中的赋存形态和迁移性,从而降低水稻糙米中 Cd 的含量。添加生物质炭能降低水稻根部、糙米等器官中 Cd 的累积,并且相应地影响了水稻地上部分 Cd 的分配。生物质炭降低 Cd 在水稻糙米中的积累主要基于生物质炭的“pH 效应”^[18]。此外,生物质炭还能提高土壤中 pH 和有机碳含量,促使土壤中酸溶态 Cd 转化为可还原态,从而降低了土壤中 Cd 的生物有效性,进而降低糙米 Cd 含量^[19]。本研究中,在水稻分蘖期添加生物质炭,土

表3 有机物与生物质炭联合作用下水稻不同部位 Cd

Table 3 Cd in different parts of rice under the combined treatment of organic matter and biochar

处理组	糙米 Cd/(mg·kg ⁻¹)	根部 Cd/(mg·kg ⁻¹)	茎叶 Cd/(mg·kg ⁻¹)	稻壳 Cd/(mg·kg ⁻¹)
CWW	0.141±0.022c	11.785±0.629b	0.055±0.006a	0.063±0.005e
CDQ	0.075±0.005a	11.175±0.309b	0.053±0.007a	0.022±0.003b
CDH	0.067±0.006a	10.888±0.484b	0.071±0.007b	0.031±0.005d
CGQ	0.098±0.011b	4.540±0.211a	0.051±0.008a	0.013±0.002a
CGH	0.082±0.006a	5.231±0.098a	0.054±0.006a	0.026±0.004c

壤有效态 Cd 稍有下降,因为生物质炭属于碱性物质,粒子表面带有大量官能团,土壤中有有效态 Cd 主要受 Eh 控制。水稻能吸收的 Cd 形态主要为 Cd^{2+} ,在还原条件下,Eh 降低,Cd 主要以 CdS 的形态存在,Cd 的吸收被抑制^[20]。

试验中,同等淹水的情况下,土壤 Eh 的降低主要受制于土壤有机物的含量,有机物含量会影响 Cd 的活性,因此,施用有机物可以促使 Cd 转化形态,抑制作物吸收,进而降低水稻地表部分的 Cd 积累量。KASHEM 等^[21]通过向污染的土壤添加不同的有机物,发现淹水情况下有机物能大幅降低土壤 Eh,并显著降低土壤 Cd 活性。本研究中,有机物的施用在一定程度上降低了土壤有效态 Cd 的含量,而糙米、根部和稻壳中 Cd 的含量随有机物施加量的升高而降低。一方面,有机物有较大的比表面积,并携带大量的官能团,能和土壤 Cd 形成螯合物,通过相互作用减少了 Cd 移动性,从而导致植物对 Cd 吸收的减少^[22]。另一方面,本研究中,和对照组相比,随着有机物的添加,土壤 Eh 显著降低,Cd 的生物有效性降低,进而降低水稻对 Cd 的吸收积累。

有机物和生物质炭联合施用于水稻土壤时,在一定程度上亦可以降低水稻糙米 Cd 的含量。有机物和生物质炭对水稻积累 Cd 的联合作用影响较为复杂,可能的原因是生物质炭和有机物阻控水稻吸收积累 Cd 的机制不同。生物质炭主要是通过其巨大的比表面积和“pH 效应”对水稻土壤 Cd 迁移转化产生影响,而无论是溶解性有机物还是固态有机物,都有很大的比表面积,可以提供高负电荷,是重金属的强力吸附剂^[23]。然而生物质炭和有机物共同作用时,外源有机物可能吸附包埋部分生物质炭,使各自对重金属的影响效应不能充分发挥,具体原因还需进一步验证。

4 结论与建议

通过研究生物质炭和有机物对污染土壤种植水稻 Cd 积累的影响发现,传统水分管理条件下,Eh 随有机物的添加而降低,各处理组 pH 随淹水时间增加而波动变化最近趋近于中性。土壤有效态 Cd 在水稻不同生长阶段均有不同程度降低,且成熟期低于分蘖期,土壤有效态 Cd 随有机物含量升高而

降低。水稻植株根部 Cd 含量远高于的其他部位的 Cd 含量。

单独施用,生物质炭的施用可显著降低糙米 Cd 的含量,且后期施用较前期施用对水稻 Cd 的积累抑制效果更好。有机物的添加能显著降低水稻糙米、根部和稻壳 Cd 的含量,且糙米、根部和稻壳中 Cd 含量随有机物含量的升高而降低。有机物和生物质炭联合施用于水稻田时,可一定程度上降低水稻糙米 Cd 的含量,不同处理组之间,低有机物生物质炭组(CDH、CDQ)和高有机物后期施用生物质炭组(CGH)施用效果较好,但和有机物、生物质炭单独施用组相比,糙米 Cd 含量的降低效果不如高含量有机物处理组(CGW)和后期施用生物质炭处理组(CWH)。从有机物与生物质炭联合施用对水稻 Cd 的积累影响结果看,农业生产过程中可以通过施用生物质炭或高含量有机物来最大程度降低水稻 Cd 的积累;考虑改善土壤质量,兼顾水稻产量和品质,建议采用前期施用高含量有机物和后期施用生物质炭的联合施用方式。

参考文献:

- [1] 徐琪,王振兴,董伟强,等.水分管理对碱性 Cd 污染土壤中水稻 Cd 吸收的阻控研究[J].环境污染与防治,2018,40(9):983-987.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL].[2019-11-13]. <http://www.gov.cn/foot/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>
- [3] DU Y, HU X F, WU X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, Central South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(12): 9843-9856.
- [4] LENG L J, XU X W, WEI L, et al. Biochar stability assessment by incubation and modelling: methods, drawbacks and recommendations[J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 11-13.
- [5] O'CONNOR D, PENG T, ZHANG J, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 815-826.
- [6] LI J, DAI J, LIU G, et al. Biochar from microwave pyrolysis of biomass: a review[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 94: 228-244.
- [7] 熊静,王蓓丽,刘渊文,等.生物炭去除土壤重金属的研究进展[J].环境工程,2019,37(9):182-187.
- [8] SCHWEIZER S A, BENJAMIN S, VAN DER HEIJDEN M G

- A, et al. Impact of organic and conventional farming systems on wheat grain uptake and soil bioavailability of zinc and cadmium [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 608-616.
- [9] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 514-519.
- [10] CHEN D, GUO H, LI R Y, et al. Low uptake affinity cultivars with biochar to tackle Cd-tainted rice - a field study over four rice seasons in Hunan, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 1489-1498.
- [11] 陈昱, 钱云, 梁媛, 等. 生物炭对 Cd 污染土壤的修复效果与机理[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2528-2534.
- [12] 段桂兰, 王芳, 岑况, 等. 秸秆及生物炭添加对猪粪沼渣施肥水稻重金属积累的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4287-4295.
- [13] KASTNER J R, MILLER J, DAS K C. Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 1420-1427.
- [14] MCBRIDE M B. Environmental chemistry of soils[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [15] PAN Y, KOOPMANS G F, BONTEN I T, et al. Temporal variability in trace metal solubility in a paddy soil not reflected in uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2016, 38(6): 1355-1372.
- [16] ZHU Q H, HUANG D Y, LIU S L, et al. Flooding-enhanced immobilization effect of sepiolite on cadmium in paddy soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(2): 169-177.
- [17] 刘高云. 有机物料对紫色土溶解性有机质及水稻镉累积的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [18] BIAN R, CHEN D, LIU X, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: results from a cross-site field experiment[J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 378-383.
- [19] 刘巍, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭对土壤-水稻系统中 Cd 迁移累积的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 323-327.
- [20] URAGUCHI S, FUJIWARA T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice, 2012, 5(1): 5.
- [21] KASHEM M A, SINGH B R. Metal availability in contaminated soils: I. effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 61(3): 247-255.
- [22] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(2): 47-49.
- [23] GUSTAFSSON J P, PECHOVÁ P, BERGGREN D. Modeling metal binding to soils: the role of natural organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(12): 2767-2774.
- 编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2020-06-15)
- +++++
- (上接第 331 页)
- [4] 孟凡生, 聂兰玉, 薛浩, 等. 高锰酸钾氧化-电动强化修复 Cr(Ⅲ) 污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1125-1131.
- [5] 徐文迪, 郭书海, 李刚, 等. 电芬顿-生物泥浆法联合修复芫污土壤[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4247-4253.
- [6] LOMINCHAR M A, SANTOS A, MIGUEL E D, et al. Remediation of aged diesel contaminated soil by alkaline activated persulfate[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 41-48.
- [7] 刘红梅, 褚华强, 陈家斌, 等. 过硫酸盐在地下水和土壤修复中的应用[J]. 现代化工, 2015, 35(4): 42-46.
- [8] CHOWDHURY A I A, GERHARD J I, REVNOLDS D, et al. Low permeability zone remediation via oxidant delivered by electrokinetics and activated by electrical resistance heating: proof of concept[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(22): 13295-13303.
- [9] 马建伟, 王慧, 罗启仕, 等. 利用电动技术强化有机污染土壤原位修复研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(7): 119-124.
- [10] 冯凯. 活化过硫酸钠高级氧化环境修复技术综述[J]. 环境科技, 2017, 30(5): 75-78.
- [11] 宋萌萌, 罗泽娇, 秦佳. 电动力学-过硫酸钠氧化联用修复二氯苯污染土壤的研究[J]. 环境工程, 2016, 34(7): 176-180.
- [12] LIANG C, HUANG C, MOHANTY N, et al. A rapid spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO[J]. Chemosphere, 2008, 73(9): 1540-1543.
- [13] ACAR Y B, ALSHAWABKEH A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(13): 2638-2647.
- [14] ZHOU D M, DENG C F, CANG L. Electrokinetic remediation of a Cu contaminated red soil by conditioning catholyte pH with different enhancing chemical reagents[J]. Chemosphere, 2004, 56(3).
- [15] SAICHEK R E, REDDY K R. Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil[J]. Chemosphere, 2003, 51(4): 273-287.
- [16] KIM K J, KIM D H, YOO J C, et al. Electrokinetic extraction of heavy metals from dredged marine sediment[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 79(2): 164-169.
- [17] YANG G C, YE H C. Enhanced nano-Fe₃O₄/S₂O₈²⁻ oxidation of trichloroethylene in a clayey soil by electrokinetics[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 79(2): 264-271.
- [18] FANG G, CHEN X, WU W, et al. Mechanisms of interaction between persulfate and soil constituents: activation, free radical formation, conversion, and identification[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(24): 14352-14361.
- [19] CHEN F, LI X, MA J, et al. Remediation of soil co-contaminated with decabromodiphenyl ether (BDE-209) and copper by enhanced electrokinetics-persulfate process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369: 448-455.
- [20] ROACH N, REDDY K R. Electrokinetic delivery of permanganate into low-permeability soils[J]. International Journal of Environment and Waste Management, 2006, 1(1): 4-19.
- 编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2020-03-04)