



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201906066

中图分类号 X53

文献标识码 A

徐浩然, 肖广全, 陈玉成, 等. 水旱轮作原位钝化削减技术修复土壤镉污染[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 789-798.

XU Haoran, XIAO Guangquan, CHEN Yucheng, et al. Remediation of cadmium pollution in soil by in-situ passivation reduction technology of water and drought rotation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 789-798.

水旱轮作原位钝化削减技术修复土壤镉污染

徐浩然¹, 肖广全^{1,2,*}, 陈玉成^{1,2}, 陈庆华¹, 邓华健¹

1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2. 农村清洁工程重庆市工程研究中心, 重庆 400715

第一作者: 徐浩然(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 土壤重金属污染修复。E-mail: 654804937@qq.com

*通信作者: 肖广全(1971—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 水污染控制等。E-mail: xiaogq@swu.edu.cn

摘要 为筛选适用于西南地区水旱轮作土壤 Cd 污染的修复技术, 采用水稻-油菜轮作模式和原位钝化实验相结合的方式, 比较了施用石灰、生物炭和羟基磷灰石 (HAP) 3 种常见修复剂对土壤基本理化性质、作物产量及籽粒吸收积累镉的影响。结果表明: 3 种处理均能显著提高土壤 pH, 与 CK 相比, 使用石灰、生物炭和 HAP 后, 水稻收获期土壤 pH 分别提高了 1.18、0.51 和 0.91 个单位, 油菜收获期土壤 pH 分别提升了 0.29、0.81 和 0.63 个单位, 但在油菜收获期施用石灰和 HAP 处理的土壤 pH 出现明显回落, 降幅为 0.91 个和 0.30 个单位, 施用生物炭处理的土壤 pH 则进一步提高了 0.28 个单位; 3 种处理在水稻收获期均能提高土壤有机质含量, 其中生物炭效果最佳; 3 种处理均能显著降低水稻收获期土壤有效 Cd 含量, 与 CK 处理相比, 分别降低了 21.84%、34.08% 和 20.12%, 但在油菜收获期施用石灰和 HAP 处理的土壤有效 Cd 含量较相同处理在水稻收获期时有所回升, 而生物炭则进一步降低了 41.76%; 石灰、生物炭和 HAP 处理对作物产量影响不大, 但与 CK 处理相比, 稻米中 Cd 含量分别降低了 30.00%、43.33% 和 38.00%, 油菜籽中 Cd 含量分别降低了 21.00%、53.57% 和 55.90%, 施用生物炭和 HAP 处理效果更佳。综上所述, 生物炭修复水旱轮作模式下农田 Cd 污染效果最佳。

关键词 水旱轮作; Cd 污染修复; 原位钝化; 籽粒; 土壤

我国传统水稻种植多采用冬闲连作模式, 连作模式会引起土壤有害物质积累, 田间病虫害频发^[1], 种植过程中存在过量使用农药化肥, 且肥料利用率低^[2]的情况, 同时冬闲田面积不断增加, 将会威胁到我国的粮食安全和农业生态环境^[3]。而水旱轮作是一种新型生态农作模式, 能较好地应对传统水稻种植模式存在的弊端^[4-5], 同时还可以提高水稻产量^[6-7], 降低农作物发病率^[8], 调节土壤理化性质, 遏制土壤酸化^[9], 提高土壤养分含量^[6], 增加土壤微生物丰富度和活性, 强化土壤呼吸作用^[10], 已在我国大面积推广。

土壤及稻米 Cd 污染日益严重, 为此, 许多学者研究了不同钝化剂对 Cd 污染土壤的修复效果。近年来, 研究石灰、生物炭和羟基磷灰石 (hydroxyapatite, HAP) 施加到土壤后重金属生物有效性的变化及其对重金属污染土壤的修复效果成为热门。大量研究^[11-16]指出, 石灰、生物炭和 HAP 都能提高土壤 pH, 而 pH 的提高能增加土壤胶体对 Cd 的吸附量^[17]。张子叶等^[18]发现, 石灰能提高水稻茎秆中 Ca 的含量, 抑制 Cd 通过茎秆转移, 从而抑制 Cd 在稻米中的积累; 同时石灰还能

收稿日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801004); 西南大学博士基金资助项目 (SWU115070)

促进水稻的生长^[19]。生物炭则可以通过表面静电吸附、阳离子交换和吸附沉淀等机制吸附重金属^[20],降低其生物有效性;还可以促进水稻对营养元素的吸收^[21],并减少Cd在稻米中的积累。添加HAP能显著提高土壤对重金属的固定能力^[16],减少土壤中交换态Cd的含量,HAP对Cd的固定主要依赖吸附机制^[22-23],包括HAP表面上Ca²⁺与Cd²⁺的离子交换以及HAP晶格对Cd的吸附;此外,左清青^[24]还发现,施加HAP后,土壤微生物种群数量和多样性均有显著提高,且微生物与HAP能产生协同效应,达到改善土壤生态的目的。

目前,水旱轮作的研究主要关注对作物生长及温室气体排放的影响,农田原位钝化修复技术的研究集中于单一种植模式下对土壤Cd短时间的固化效果,而将两者结合起来研究钝化剂对水旱轮作土壤和作物重金属含量的文献相对较少。本研究以降低土壤有效Cd和作物籽粒中的Cd含量为目标,研究了在水旱轮作模式下施加修复剂对土壤理化性质、土壤有效Cd含量、稻米和油菜籽中Cd积累的影响,并分析了其造成影响的原因。

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验于2017年4月—2018年6月在重庆市某废弃煤矿的矿井水受Cd污染的农地内进行。实验地属于亚热带季风性湿润气候区,年平均降水量约为1100 mm,平均气温为0~37℃,地下矿产资源丰富。经调查,实验地上游存在已经关停的煤矿,现场遗留大量煤矸石矿渣,且未采取保护措施;主井口有赭色泥浆涌水,水量约为12 m³·h⁻¹,雨期用水量可达到20 m³·h⁻¹,涌水经过灌溉沟渠流向农田,少量流向实验地低洼处。灌溉水经沟渠内沉积物全Cd含量为2.75 mg·kg⁻¹。供试土壤理化性质:pH为6.02,有机质含量为67.82 g·kg⁻¹,全Cd含量为0.510 mg·kg⁻¹,有效Cd含量为0.163 mg·kg⁻¹。

实验种植水稻为当地常见水稻品种万优66,其为籼型三系杂交水稻品种,种植的油菜同为当地广泛种植品种。实验用修复剂包括石灰、生物炭和HAP。石灰由重庆市万植巨丰生态肥业有限公司提供,为干燥生石灰,全Cd含量为0.112 mg·kg⁻¹;生物炭由西南大学资源环境学院制备,采用稻壳烧制,后经研磨和过60目筛制得,全Cd含量为0.240 mg·kg⁻¹;HAP由武汉远成共创科技有限公司提供,全Cd含量为0.184 mg·kg⁻¹。

1.2 实验设计

在水旱轮作(水稻-油菜轮作)的农艺手段下,使用不同的修复剂对污染土壤进行修复。设置4个处理,根据文献中的方法^[12,14,24],综合考虑修复剂施加量(处理方法及修复剂用量见表1)。每个处理设置6次重复,实验小区共24个,每个小区面积为5 m×4 m=20 m²,统一编号并随机排列(小区布置见图1)。

表1 处理方法及修复剂用量
Table 1 Treatment methods and dosage of remediation agents

处理编号	修复剂种类	修复剂用量 / (kg·hm ⁻²)	每个小区修复剂用量 / kg
1	无修复剂	—	—
2	石灰	1 200	2.52
3	生物炭	4 005	8.41
4	羟基磷灰石	5 655	11.86

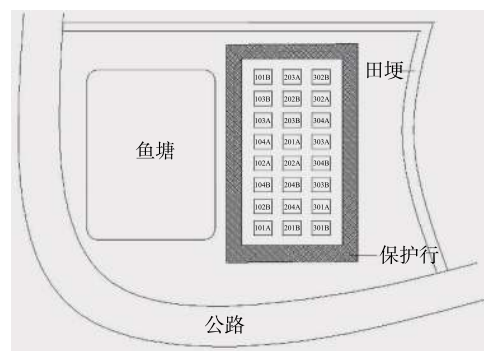


图1 实验区布置图
Fig. 1 Layout of test area

实验小区之间起垄或用木板隔离,并以塑料薄膜覆盖,防止小区之间串水、串肥。小区施入修复剂,经翻耕1周后种植水稻,水稻种植量为7行×30列,共210株。在水稻成熟收割后,放干田中水分,翻耕后种植油菜,每个小区内油菜种植密度为90株。实验全过程对农事活动进行统一管理,以尽量消除实验误差,提高实验结果的可比性。

1.3 样品采集与分析

样品采集时段主要在水稻种植前、水稻收获期和油菜收获期3个时期进行。水稻种植前,采集实验田内混合表层土样3个;水稻和油菜收获期,运用“五点采样法”采集每个实验小区中表层土样1个,每个小区作物收获后,抽取采集充分混合后的稻米或油菜籽0.5 kg作为样品。采集的土壤和油菜籽样品于自然条件下风干,经研磨过筛后备用,稻米样品于75℃烘干,最后研磨备用。

土壤pH采用PB-10型pH测试仪检测,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法^[25]检测;有效Cd含量采用DTPA浸提-石墨炉原子吸收分光光度法^[26]测定,土壤样品采用王水-高氯酸法消解,籽粒样品采用硝酸-高氯酸法^[25]消解,Cd含量由原子吸收光谱仪(Z3300)测定。

样品测定以土壤成分分析标准物质GBW07428(GSS-14)、土壤有效态标准物质GBW07460(ASA-9)、生物成分分析标准物质——四川大米GBW10044(GSB-22)作为对照组,同时设置空白组、平行组及加标回收等方法对土壤Cd全量、土壤Cd有效量和稻米、油菜籽Cd含量进行质量控制。土壤样品Cd回收率为95.6%~105.1%,籽粒样品Cd回收率为97.7%~102.1%。

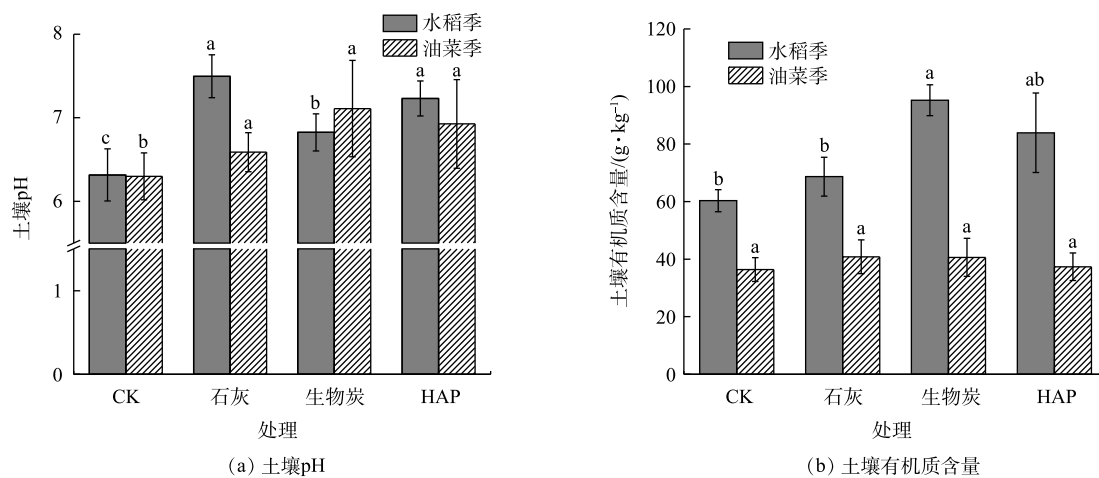
所有数据均采用Microsoft Excel 2010和SPSS 19.0进行图形统计分析,图表中不同字母表示数据间差异显著($P<0.05$),采用OriginPro 8.5处理。

2 结果与讨论

2.1 3种修复剂对土壤pH及有机质含量的影响

图2(a)反映了石灰、生物炭和HAP处理后土壤pH的变化。由此可见,采用3种处理后,水稻季和油菜季土壤pH均有明显升高。分别与两季对照相比,施加石灰、生物炭和HAP后,水稻收获期土壤pH提升了1.18、0.51和0.91个单位,而在油菜收获期,土壤pH提升了0.29、0.81和0.63个单位,3种处理在水旱轮作条件下,与相应CK之间均存在显著差异($P<0.05$)。但分别对比3种处理土壤pH在轮作前后的变化可以发现,石灰和HAP处理后的土壤pH出现回落,降幅为0.91个和0.30个单位,而生物炭处理后,土壤pH较水稻收获期则进一步提高0.28个单位。由此可见,石灰和HAP在短时间内提升土壤pH的效果均较好,但两者的长效性和稳定性不及生物炭。这是因为石灰施加到土壤中后,水解可产生大量 OH^- ;而HAP水解后,会释放出 PO_4^{3-} ,其经过一级和二级水解后,可生成 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- ,该过程产生大量 OH^- ^[27],所以二者均可在短时间内使土壤pH升高;轮作后,一方面由于土壤通氧量提高,加速土壤有机质分解^[28];另一方面石灰处理因其自身水解完全,失去缓冲能力,土壤pH逐渐回落;而HAP处理后,作物在生长过程中会吸收大量磷酸盐离子^[29],导致HAP处理后土壤pH在油菜季出现回落,实验结果与邢金峰等^[22]和CUI等^[30]研究结果相似;生物炭处理使得土壤pH长久稳定的原因可能为:生物炭含有大量矿物灰分,其表面富含能与 H^+ 结合的有机酸根($\text{COO}-$)和 $-O-$ 等碱性基团^[31];另外,当生物炭施加到土壤中后,灰分中丰富的盐基离子能持续释放,与土壤中的 H^+ 、 Al^{3+} 发生交换反应^[32],从而提高土壤对酸的缓冲能力,保证在水旱轮作模式下,土壤pH能保持稳定。

图2(b)反映了不同处理后土壤有机质含量的变化。可见施加石灰、生物炭和HAP后,水稻季土壤有机质含量均有提高,含量达到68.66~95.23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。生物炭处理土壤有机质含量与CK之间存在显著差异($P<0.05$),增幅达57.89%。油菜季各处理的土壤有机质与CK相比,变化不大。生物炭对土壤有机质提升明显,这可能是由于所用生物炭原料为稻壳,本身有机碳含量较高。



注：不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 3种处理后土壤pH及有机质含量的变化

Fig. 2 Changes in pH and organic matter content of soil after three treatments

2.2 3种修复剂对土壤全Cd及有效Cd的影响

图3反映了3种处理对土壤Cd含量的影响。图3(a)反映了石灰、生物炭和HAP3种处理后2季收获期土壤全Cd含量的变化。可见3种处理对两季土壤全Cd含量有明显影响。石灰和生物炭处理后，2季收获期土壤全Cd含量均高于CK处理。水稻收获期分别提高了5.22%和12.97%，油菜收获期分别提高了11.24%和41.21%；HAP处理后，2季收获期土壤全Cd含量均降低，分别降低29.10%和9.71%。生物炭处理后2季土壤全Cd含量与相应对照CK之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。本实验及周边农田所用灌溉水均为矿井涌水，其沉积物中Cd浓度较高，达到 $2.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而石灰和生物炭处理后可能会增强土壤对灌溉水中Cd的吸附，使得土壤全Cd含量较CK处理有所上升，其中生物炭较强的吸附能力使得这种效果更为明显。图4反映了3种处理后整株作物的Cd浓度。可以看出，3种处理均能降低作物对Cd的吸收，从而使得土壤中留存的全Cd含量高于CK处理。HAP处理使得土壤全Cd含量降低，原因可能为Cd离子与HAP晶格中的二价金属离子发生离子交换^[22]以及被固定在HAP微晶腔内^[33]，使得后续消解过程不能完全释放Cd离子。

图3(b)反映了石灰、生物炭和HAP3种处理后2季收获期土壤有效Cd含量的变化。可见在水稻收获期，3种处理均能降低土壤有效Cd的含量，与对照CK相比，石灰、生物炭和HAP处理

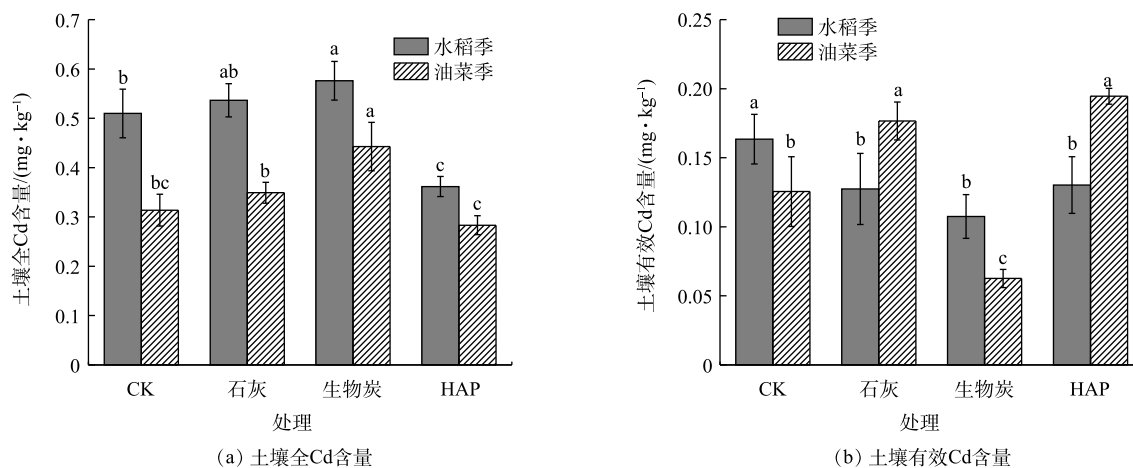


图3 3种处理对土壤Cd含量的影响

Fig. 3 Effects of three treatments on soil Cd content

后,水稻收获期土壤有效Cd分别降低了21.84%、34.08%和20.12%,差异显著($P<0.05$)。在油菜收获期,3种处理后土壤有效Cd含量的变化有所不同:与相同处理在水稻收获期时土壤有效Cd含量相比,石灰和HAP处理后分别提高了38.64%和49.40%,而生物炭处理后进一步下降41.76%。石灰、生物炭和HAP3种处理水旱2季收获期土壤有效Cd含量与相应对照CK之间存在显著差异($P<0.05$)。水稻收获期,3种处理后土壤有效Cd含量显著降低,原因是3种处理后土壤pH均得到提高,而pH的提高能降低Cd的生物有效性^[11,14,34]。另外,石灰

能提高土壤胶体表面的负电荷容量^[35],增强土壤对Cd的吸附能力;生物炭可以通过静电吸附、离子交换和吸附沉淀等机制吸附Cd离子^[20];而HAP通过表面点位吸附和离子交换降低Cd的有效性^[36]。在油菜收获期,石灰和HAP处理后的土壤有效Cd含量较相同处理在水稻收获期时有大幅度回升,且高于对照CK,而生物炭处理后,土壤有效Cd含量则进一步下降。这与石灰和HAP处理一段时间后,土壤pH会重新回落有关,而土壤pH是影响土壤中Cd有效性的的重要因素之一^[37];同时HAP主要靠吸附机制固定Cd,该机制不同于溶解沉淀机制^[22],其自身在土壤水分变化大时的不稳定性导致Cd重新解吸,这也可能是土壤有效Cd含量重新上升的原因之一,实验结果与邢金峰等^[22]的研究结果相似;而生物炭由于表面高度芳香化,具有 π 电子结构,能与金属离子发生 π - π 电子作用^[38],形成较为稳定的结构。此外,尹带霞^[32]的研究还发现,在长期酸雨淋溶条件下,生物炭能有效降低土壤Cd浸出量,这也证明了生物炭能长久降低土壤有效Cd的含量。

2.3 3种修复剂对作物产量及籽粒中Cd含量的影响

表2反映了石灰、生物炭和HAP处理后稻米和油菜籽的产量情况。可见3种处理对稻米和油菜籽的产量影响不大。与对照CK相比,石灰、生物炭和HAP处理后,稻米和油菜籽产量与相应CK之间不存在显著差异($P>0.05$),说明3种处理不会影响作物产量,达到了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中对于超过风险筛选值,但低于风险管制值的农用地安全利用的要求。

图5反映了石灰、生物炭和HAP处理后稻米和油菜籽中Cd的积累情况。可见3种处理均能降低稻米及油菜籽中Cd的含量。与CK相比,施加石灰、生物炭和HAP后,稻米中Cd含量分别降低了30.00%、43.33%和38.00%,油菜籽中Cd含量分别降低了21.00%、53.57%和55.90%。生物炭和HAP处理后,稻米和油菜籽中Cd含量与相应CK之间存在显著差距($P<0.05$)。3种处理均能不同程度降低稻米和油菜籽中Cd的积累,且处理后稻米中Cd含量达到食品安全国家标准,其原因主要为:石灰通过提高土壤pH,降低土壤Cd的生物有效性,从而减少作物籽粒中Cd的积累;生物炭能够持久维持土壤有效Cd含量的低水平,同时还能增加水稻Cd库的相对容量^[39],降低Cd向籽粒中转移;另外,由于本研究中使用的生物炭是由稻壳烧制而成的,其中富含活性Si^[40],Si能与Cd形成复合物并沉积于根部细胞壁中^[41],从而进一步降低Cd在

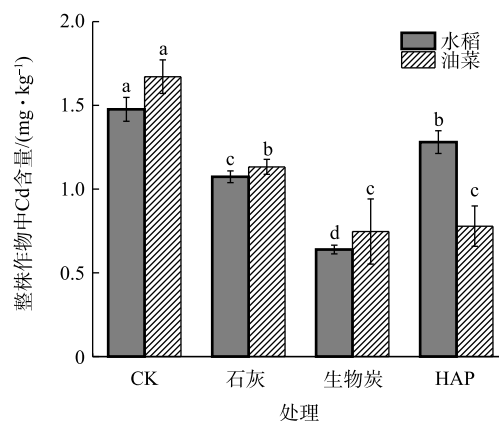


图4 3种处理后整株作物中Cd的含量

Fig. 4 Cd content in the whole plant after three treatments

表2 3种处理后作物产量
Table 2 Crop yields after three treatments $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理	稻米产量	油菜籽产量(干质量)
CK	12 379±1.40a	2 985±0.41a
石灰	11 534±2.00a	2 982±0.61a
生物炭	11 679±2.18a	2 617±0.94a
HAP	11 923±0.69a	2 801±0.59a

作物籽粒中的积累。HAP处理虽然土壤有效Cd含量在油菜季有回升,但仍能减少油菜籽对Cd的积累,原因可能是:HAP的施加显著提高土壤中微生物种群数量和多样性,类似枯草芽孢杆菌等微生物的表面结构能吸附Cd^[24];同时,微生物在生长过程中产生的次生代谢产物也能够与Cd发生反应或是螯合作用^[42],从而将Cd固定在土壤中,阻碍油菜根系对Cd的吸收,最终减少油菜籽中Cd的积累。

3 结论

1) 石灰、生物炭和HAP处理后,土壤pH较CK均有显著提高,且石灰和HAP处理的短时效果优于生物炭处理;但轮作后,石灰和HAP处理的土壤pH明显有所回落,其长久效果不及生物炭处理。

2) 石灰、生物炭和HAP处理均能提高水稻季土壤有机质含量,其中生物炭效果最佳。

3) 石灰、生物炭和HAP处理均能显著降低水稻季土壤有效Cd含量,但轮作后,石灰和HAP处理的土壤有效Cd含量明显回升,而生物炭处理的长久钝化效果最佳。

4) 施加石灰、生物炭和HAP,对稻米和油菜籽的产量无显著影响,施用生物炭和HAP可有效降低稻米和油菜籽中Cd含量。

参 考 文 献

- [1] 张晓红,张娟娟,王明兆. 江阴市水旱轮作的实践与思考[J]. *上海农业科技*, 2011(5): 150-151.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 金姝兰,侯立春,徐磊. 长江中下游地区耕地复种指数变化与国家粮食安全[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(17): 208-212.
- [4] 徐宁,黄国勤. 稻田轮作对水稻病、虫、草害的影响[J]. *生物灾害科学*, 2013(1): 26-30.
- [5] 孙丹平. 稻田水旱复种轮作对作物生长、资源利用和土壤生态环境的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [6] 王飞,李清华,林诚,等. 冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1469-1476.
- [7] 王子芳,高明,秦建成,等. 稻田长期水旱轮作对土壤肥力的影响研究[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 25(6): 514-521.
- [8] 王海霞,殷俊,凌须美,等. 水旱轮作对设施番茄生长影响的初探[J]. *农业装备技术*, 2011, 37(4): 43-44.
- [9] 常新刚,黄国勤,熊云明,等. 双季稻与黑麦草水旱轮作的产量和土壤理化性状分析[J]. *耕作与栽培*, 2005(4): 16-17.
- [10] 张立成,邵继海,林毅青,等. 稻-稻-油菜轮作对土壤微生物活性和多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 204-210.
- [11] 谢运河,纪雄辉,田发祥,等. 不同Cd污染特征稻田施用钝化剂对水稻吸收积累Cd的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2):

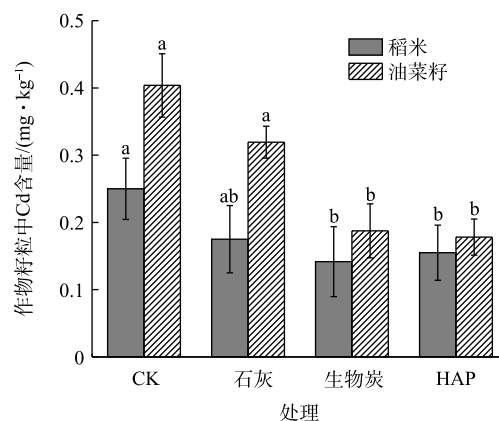


图5 3种处理后作物籽粒中Cd含量

Fig. 5 Cd content in crop seeds after three treatments

1242-1250.

- [12] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10): 1867-1872.
- [13] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 696-704.
- [14] 张燕, 铁柏清, 刘孝利, 等. 玉米秸秆生物炭对稻田土壤砷、镉形态的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 38(2): 715-721.
- [15] CUI H B, ZHOU J, ZHAO Q G, et al. Fractions of Cu, Cd, and enzyme activities in a contaminated soil as affected by applications of micro- and nanohydroxyapatite[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 4(13): 742-752.
- [16] 陈杰华, 王玉军, 王汉卫, 等. 基于TCLP法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4): 645-648.
- [17] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 438-448.
- [18] 张子叶, 谢运河, 黄伯军, 等. 镉污染稻田水粉调控与石灰耦合的季节性休耕修复效应[J]. *湖南农业科学*, 2017, 12(12): 47-51.
- [19] 杨静, 谭永锋, 肖志强, 等. 不同剂量石灰对酸化稻田土壤养分含量及水稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(36): 175-176.
- [20] JIANG T Y, JIANG J, XU R K, et al. Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(3): 249-56.
- [21] REGMI P, GARCIA M J L, KUMAR S, et al. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switch grass biochar produced via hydrothermal carbonization process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109(17): 61-69.
- [22] 邢金峰, 仓龙, 葛礼强, 等. 纳米羟基磷灰石钝化修复重金属污染土壤的稳定性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1271-1277.
- [23] ZHANG Z Z, LI M Y, CHEN W, et al. Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hydroxy-apatite[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 514-519.
- [24] 左青青. 纳米羟基磷灰石对污染土壤镉钝化效应研究[D]. 保定: 河北大学, 2017.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

- [26] 孙鸣镝. AB-DTPA浸提土壤多元素的适用性分析及其测定四种土壤污染元素环境质量标准初探[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [27] BOISSON J, RUTTENS A, MENCH M. Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils: Part1. Influence of hydroxyapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104(2): 225-233.
- [28] HAO R J, ZHONG-PE L I, CHE Y P. Differences in organic mineralization between aerobic and submerged conditions in paddy soils of southern Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2011, 10(9): 1410-1418.
- [29] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1615-1621.
- [30] CUI L Q, LI L Q, ZHANG A F, et al. Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment[J]. *BioResources*, 2011, 6(3): 2605-2618.
- [31] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [32] 尹带霞. 生物炭对稻田土壤重金属生物有效性的影响与作用机制[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.
- [33] 钱翌, 褚兴飞. 纳米羟基磷灰石修复镉铅污染土壤的效果评价[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(11): 176-179.
- [34] 胥焕岩, 彭明生, 刘羽. pH值对羟基磷灰石除镉行为的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(4): 305-308.
- [35] 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.
- [36] ANGE N, PATRICK S. Role of phosphate in the remediation and reuse of heavy metal polluted wastes and sites[J]. *Waste Biomass Valor*, 2010, 1(1): 163-174.
- [37] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2005, 14(2): 282-286.
- [38] 周婷, 周根娣, 和苗苗. 生物炭对土壤重金属吸附机理研究进展[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 17(4): 404-410.
- [39] 张振宇. 生物炭对稻田土壤镉生物有效性的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [40] 方放, 周建斌, 杨继亮. 稻壳炭提取SiO₂及制备活性炭联产工艺[J]. *农业工程学报*, 2013, 28(23): 184-191.
- [41] CHEN Z, TIE B, LEI M, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental*

Science, 2014, 35(7): 2762-2770.

[42] LIU J X, WANG F, SHEN J X, et al. Study of nano-hydroxyapatite adsorption in heavy metals[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 777: 15-18.

(本文编辑：曲娜，郑晓梅，张利田)

Remediation of cadmium pollution in soil by in-situ passivation reduction technology of water and drought rotation

XU Haoran¹, XIAO Guangquan^{1,2,*}, CHEN Yucheng^{1,2}, CHEN Qinghua¹, DENG Huajian¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Chongqing Engineering Research Center of Rural Cleaning Engineering, Chongqing 400715, China

*Corresponding author, E-mail: xiaogq@swu.edu.cn

Abstract The combination of rice-canola rotation model and in-situ passivation experiment was used to screen the Cd pollution remediation technologies in the water and drought rotation soil and crop of the southwest region. This study compared the effects of three common remediation agents: lime, biochar and hydroxyapatite (HAP) on soil basic physical and chemical properties, crop yield, cadmium absorption and accumulation in seed. The results showed that the three treatments with these agents could significantly improve the soil pH. Compared with CK, after the addition of lime, biochar or HAP, the pHs of the remediated soil at rice harvest time raised by 1.18, 0.51 or 0.91 units, respectively. The remediated soil pHs at rape harvest time raised by 0.29, 0.81 or 0.63 units, respectively. However, the pHs of the soil treated with lime and HAP during the rapeseed harvest period showed a significant drops by 0.91 and 0.30 units, respectively, and the pH of the soil treated with biochar further raised by 0.28 units. The three treatments could improve the soil organic matter content at rice harvest time, and the biochar had the best effect. While these treatments could significantly reduce the effective Cd content in the soil at rice harvest time by 21.84%, 34.08% and 20.12%, respectively. Compared with the same treatments during rice harvest period, the effective Cd content in soil treated with lime and HAP during the rapeseed harvest period increased, while the effective Cd content in soil treated with biochar further decreased by 41.76%. Lime, biochar or HAP treatment had slight effect on crop yield, but compared with CK treatment, the Cd contents in rice decreased by 30.00%, 43.33% or 38.00%, and in rapeseed decreased by 21.00%, 53.57% or 55.90%, respectively. The treatment effects of biochar and HAP was better. In summary, biochar treatment had the best effect on Cd pollution remediation in farmland with water and drought rotation mode.

Keywords water and drought rotation; cadmium pollution remediation; in situ passivation; seed; soil