

复合土壤修复剂对镉砷污染稻田的影响研究

袁海伟, 唐守寅, 熊琪, 田一君, 胡露* (环保桥(湖南)生态环境工程股份有限公司, 湖南长沙 410205)

摘要 为治理镉砷复合污染农田土壤, 选取了湖南省某矿区附近的镉砷复合污染稻田, 以小区对比试验研究了复合土壤修复剂(亚硒酸钠+钙镁硅肥+聚合硫酸铁+膨润土+硫磺+氯化钙)对土壤中镉(Cd)、砷(As)有效态、土壤pH, 稻谷中Cd、As含量及稻谷产量等指标的影响。结果表明, 在2 700 kg/hm²施用水平, 施用土壤修复剂能提高土壤pH 0.4单位, 土壤CEC增加9.23 cmol/kg, 有机质增加14.32 g/kg; 施用土壤修复剂土壤有效态镉、有效态砷含量分别降低41.93%、64.34%, 稻米中镉、无机砷含量分别降低81.25%、77.92%, 达到国家食品污染物限量标准; 同时, 施用土壤修复剂能在一定程度上提高稻谷的长势及产量, 稻谷产量增加6.82%。

关键词 复合土壤修复剂; 镉砷; 有效态; 土壤; 稻谷

中图分类号 X53 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)17-0067-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.17.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Effects of Compound Soil Restoration Agents on Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic

YUAN Hai-wei, TANG Shou-yin, XIONG Qi et al (Climate Bridge (Hunan) Eco-Environmental Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205)

Abstract In order to remediate soil contaminated by cadmium-arsenic, paddy soil near a mining area in Hunan Province was selected. It was investigated for remediation effect of the composite soil repairing agent (sodium nitrite+ calcium and magnesium silicon fertilize+ polyferric sulfate+ bentonite+ brim stone+ calcium chloride) on bioavailable cadmium and arsenic in soil, soil pH, cadmium and arsenic contents in rice, rice yield and other indexes. The results showed that, under 2 700 kg/hm² restoration agents, soil pH values increased by 0.4 units, soil CEC increased by 9.23 cmol/kg, organic matter increased by 14.32 g/kg, the contents of available cadmium and available arsenic in soil decreased by 41.93% and 64.34%. The content of arsenic and inorganic arsenic in rice grain decreased by 81.25% and 77.92%, respectively, which achieved the national food pollutant limit standard; at the same time, the application of soil restoration agent can improve rice growth and yield to a certain extent, and the rice yield increased by 6.82%.

Key words Composite soil repairing agent; Cadmium and arsenic; Availability; Soil; Rice

《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤总超标率达16.1%, 耕地土壤点位超标率19.4%, 其中在8种无机污染物中, 镉(Cd)、砷(As)的点位超标率分别达到7.0%、2.7%^[1]。Cd、As均为极具生物毒性的环境污染元素, 具有隐蔽性、长期性、不可逆性的特点, 其在耕地土壤中的累积不仅影响耕地土壤的生态功能, 还可通过耕地土壤-植物系统危害作物生长以及通过食物链途径最终危害人类健康^[2-5]。而多数情况下, 重金属污染往往是2种或者多种重金属元素的复合污染, 它具有普遍性、复杂性等特点, 而Cd和As在性质以及土壤中存在形态的差异, 治理Cd污染土壤的方法与材料通常不适于As污染的治理^[6], 因此研发出能同时治理Cd、As污染土壤的技术或产品成为了亟待解决的问题。

研究发现, 施加聚合磷酸铁能释放出游离铁离子, 土壤中砷能与游离铁离子反应, 将土壤中水溶性砷和吸附态砷向难溶性的铁结合态砷转化, 从而固定土壤中砷^[7]。膨润土具有较丰富的孔隙结构和较大的比表面积, 有较好的吸附和离子交换能力, 且成本低廉, 是一种性价比优越的重金属吸附材料^[8], 白菜种植地中施加膨润土后, 土壤中Cd、As的含量得到有效降低, 同时白菜的生长和生物量、根表面积都得到了较大的提高^[9]。生物质炭能够提高砂土、壤土、黏土等不

同质地土壤pH, 并能有效地降低土壤中有效镉含量^[10]。钙镁磷肥、硅肥能显著促进小白菜的生长, 显著抑制Cd、Pb、Zn对小白菜的毒害及向地上部的迁移, 对N、K、Cu、Mn的吸收也有显著抑制作用^[11]; 镉污染水田中, 施加一定量的钙镁磷肥后, 可显著提高土壤pH, 使土壤中有效态镉含量大幅度下降, 从而大大减少水稻体内镉的含量^[12]。施用生石灰可使稻谷产量提高20~760 kg/hm², 显著提高土壤pH, 并能降低土壤中镉的植物有效性, 减少稻米对镉的积累^[13]。碳酸钙或氯化钙中的钙作为一种中微量元素及营养元素, 能显著提高土壤pH并降低Cd的有效性^[14]。

基于前人的研究成果, 环保桥公司研发团队自主研发了一种由亚硒酸钠、钙镁硅肥、聚合硫酸铁、膨润土、硫磺、氯化钙等按一定比例组成的复合修复剂, 用于修复Cd-As污染土壤。将该修复剂施用于Cd-As污染的稻田土壤中, 通过小区试验, 研究修复剂对土壤中Cd和As有效性含量以及对水稻中Cd和As含量的影响。

1 材料与方法

1.1 土壤修复剂的制备 修复剂由环保桥公司自主研发, 由亚硒酸钠、钙镁硅肥、聚合硫酸铁、膨润土、硫磺、氯化钙等组成。其中亚硒酸钠为粉剂, 纯度95%以上; 钙镁磷肥由湖北省钟祥沃丰肥业有限公司提供, 其可溶性硅(以SiO₂计)含量不小于20%, 碱分(以CaO计)的含量不小于45%, 粉剂(过200目筛); 聚合硫酸铁由长沙六福环保科技有限公司提供, 纯度不小于95%, 全铁含量不小于20%, 粉剂; 膨润土为钠质膨润土粉剂(过200目筛), 由湖南省宁乡市某矿石粉厂提供; 硫磺为工业用硫磺, 由武汉欣永青化工有限公司提供,

基金项目 农业部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金课题; 长沙市科技计划项目(kh1801224)。

作者简介 袁海伟(1983—), 男, 河南开封人, 助理研究员, 硕士, 从事重金属污染修复研究。*通信作者, 硕士, 从事重金属污染修复研究。

收稿日期 2019-04-08

纯度 98% 以上。

将 0.05 份亚硒酸钠加入 20 份钙镁磷肥中,混合均匀,混匀后的物料经加料槽转至圆盘中,用圆盘造粒法制备出粒径为 1 mm 的颗粒,然后在 300 °C 条件下烘 15 分钟;利用 20 份硫磺作为包衣材料,通过加热流化床喷涂膜法将硫磺均匀包涂在上述烘干后的颗粒表面,硫磺膜厚度 1 mm,制备出

粒径为 2 mm 的作物修复颗粒。将 30 份聚合硫酸铁、5 份氯化钙和 10 份膨润土混合均匀,经加料槽转至圆盘中,用圆盘造粒法制备出粒径为 2 mm 的颗粒,然后在 300 °C 条件下烘 15 min 得到土壤修复颗粒。最后将以上得到的作物修复颗粒和土壤修复颗粒混合均匀,得到治理镉-砷复合污染农田的土壤修复剂,其原料以及成品的各项技术指标见表 1。

表 1 土壤修复剂原料的各项技术指标

Table 1 Technical indicators of soil remediation materials

序号 No.	材料类型 Material type	pH	可溶性硅 (以 SiO ₂ 计) Soluble silicon (calculated as SiO ₂)/%	碱分 (以 CaO 计) Alkali (calculated as CaO)/%	总 Cd Total Cd mg/kg	总 As Total As %
1	亚硒酸钠	6.1	0	0	0.001	1.56
2	钙镁磷肥	11.4	0	26.4	0.005	2.12
3	硫磺	5.6	0	0	0.001	2.30
4	聚合硫酸铁	2.8	0	0	0.001	2.42
5	氯化钙	5.75	0	36.2	0.001	3.12
6	膨润土	9.2	62.4	2.1	0.050	2.54
7	土壤修复剂	9.5	8.91	21.0	0.002	2.46

1.2 试验设计

1.2.1 试验场地。选取湖南省郴州市柿竹园铅锌矿区附近的 Cd-As 复合污染稻田内开展水稻(株两优 505)小区修复试验,水稻购自湖南亚华种子有限公司。供试土壤 pH 为 5.78,土壤总 Cd 为 1.92 mg/kg,为土壤环境质量 II 级标准的 3.8 倍,有效态镉为 0.85 mg/kg,总 As 为 75.7 mg/kg,为土壤环境质量 II 级标准的 1.5 倍,有效态砷为 2.95 mg/kg,属于轻度复合污染土壤。

1.2.2 试验方法。小区面积为 4 m×5 m (20 m²),用高 30 cm、宽 30 cm 的田埂分隔,田埂上敷农膜,小区单排单灌,防止互相串水、串肥。设置 2 个处理。处理一作为对照组,按照当地习惯方法种植,不施任何修复剂;处理二作为处理组,在当地习惯方法种植情况下施用环保桥公司自主研发的土壤修复剂。每个处理设置 3 个重复,共 6 个小区。其中土壤修复剂的使用方法如下:在水稻移栽前 5 d,将土壤修复剂按照 2 700 kg/hm²,均匀撒施到处理组的农田土壤表面,利用旋耕机将修复剂与土壤搅拌均匀,灌水至淹水状态,淹水厚度 5 cm,熟化,然后进行水稻移栽,施肥水平与其他田间管理措施与对照组完全一致。

(1)样品的采集与分析。土壤、植株样品于收获前 1~3 d 采集,样品采集采用五点取样法。每个分点植株鲜样重量不少于 0.4 kg,5 分点植株混合成不少于 2.0 kg,装入网袋中保存,并编号。同时原位采集土壤样品 2.5 kg。采集的水稻植株样品带回实验室风干处理后将水稻籽粒分离出来,70 °C 烘至恒质量,粉碎过 100 目筛备用。土壤样品风干后过 2 mm 尼龙筛,然后装入塑料袋备用。

(2)土壤基本理化性质测定。土壤常规理化性质参照《土壤农化分析》一书中提到的方法测定^[15]。土壤 pH 采用 1:2.5 的土水比,用酸度计进行测定;土壤有机质采用 H₂SO₄-K₂CrO₇ 外加热法测定;土壤镉有效态含量根据《土壤质量

有效态铅和镉的测定》(GB/T 23739—2009)测定;稻谷中镉含量采用微波消解,原子吸收光谱仪石墨炉测定;土壤砷有效态含量参照张传琦^[16]的方法测定;稻谷中无机砷含量根据液相色谱-电感耦合等离子质谱法(LC-ICP/MS)法测定。

1.3 数据分析 采用 Microsoft Office Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行统计数据分析。

2 结果与分析

2.1 土壤修复剂对土壤理化性质的影响 由表 2 可知,土壤修复剂添加后能对土壤 pH、CEC 和有机质含量产生影响。与对照相比,土壤 pH 升高 0.4,土壤 CEC 增加 9.23 cmol/kg,有机质增加 14.32 g/kg。

表 2 土壤修复剂添加后土壤理化性质

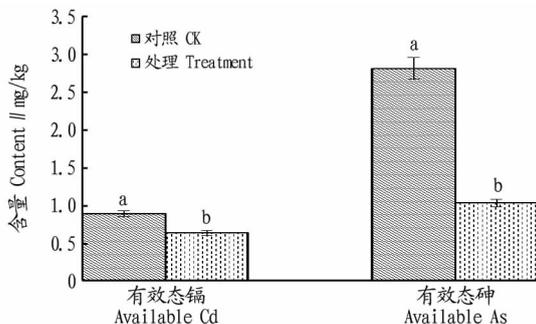
Table 2 Soil physical and chemical properties after soil remediation

施用量 Application rate kg/hm ²	pH	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	有机质 OM (g/kg)
0	5.82	20.12	32.18
2 700	6.22	29.35	46.52

2.2 土壤修复剂对水稻土壤中有有效态镉、有效态砷含量的影响 处理中经过处理的水稻土壤与对照中未经处理的水稻土壤有效态重金属含量对比如图 1 所示。从图 1 可以看出,对照的土壤有效态镉、有效态砷含量分别为 0.88、2.8 mg/kg,处理的土壤有效态镉、有效态砷含量分别为 0.62、1.02 mg/kg,较对照分别降低 41.93%、64.34%,且存在显著差异(P<0.05)。这说明土壤修复剂可以同时有效降低土壤中镉和砷的有效性。

2.3 土壤修复剂对稻米中镉、砷含量的影响 处理与对照的稻米中重金属含量对比见图 2。从图 2 可以看出,对照的稻米中镉含量为 0.96 mg/kg,超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中限制值 3.8 倍;处理的稻

米中镉含量为 0.18 mg/kg,较对照的稻米降低 81.25%,并达到国家标准要求。对照的稻米中无机砷含量为 0.77 mg/kg,超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中限制值 2.85 倍;处理的稻米中无机砷含量为 0.17 mg/kg,较对照的稻米降低 77.92%,并达到国家标准要求。这说明施用修复剂可以同时有效降低稻米中镉和砷的含量。

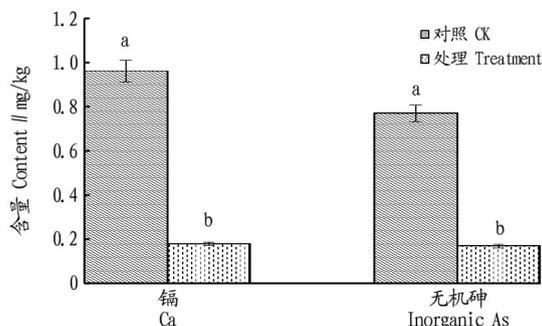


注:不同字母表示 Duncan 检验多重比较处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: The different letters indicate that the Duncan test has significant difference between the multiple

图 1 水稻土壤中有效态镉、有效态砷含量

Fig. 1 Available cadmium and available arsenic in rice soil



注:不同字母表示 Duncan 检验多重比较处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: The different letters indicate that the Duncan test has significant difference between the multiple

图 2 稻米中镉和砷含量

Fig. 2 Cadmium and arsenic in rice

2.4 土壤修复剂对水稻产量的影响 土壤修复剂的施用对水稻的产量产生了一定的影响。试验结果表明,相对于未使用土壤修复剂稻田,在施用土壤修复剂后水稻的产量有所增加,增产平均值约 0.9 kg/小区,增产幅度为 6.82%,如表 3。且水稻长势也要优于对照组。

3 讨论

植物对 Cd、As 的吸收受诸多因素影响,例如 pH、CEC、有机质以及离子间的作用等^[17-20]。通常情况下农作物只吸收土壤中的有效态重金属,不可能吸收全量重金属,而土壤 pH 是影响土壤重金属有效性的重要因素之一。因为 pH 提高了土壤胶体对带正电荷的重金属离子吸附能力,也使得土壤中的铁(Fe)和锰(Mn)等离子与 OH⁻ 结合形成大量羟基化合物,为重金属离子提供了更多的吸附位。一般来说,土壤

表 3 不同处理对水稻产量的影响

Table 3 Effect of different treatments on rice yield

施用量 Application rate kg/hm ²	小区产量 Community output/kg/小区				与对照组比较增产 Increase production compared with the control group	
	I	II	III	平均 Mean	增产 Increase production kg/小区	增产幅度 Increasing production ratio/%
0	12.9	13.3	13.5	13.2	—	—
2 700	13.5	14.1	14.8	14.1	0.9	6.82

pH 越高,Cd 的有效性越弱。主要原因是 pH 升高可促进 Cd 由有效态向络合态与残渣态转化^[21-23],但是 As 和 Cd 存在一定的差异,pH 太高,As 的活性会增强,所以需要将 pH 控制在一个较好的水平才能同时降低 Cr、As 的活性,该试验中,添加的土壤修复剂原料中含有钙镁硅肥及氯化钙等碱性物质,起到了调节 pH 的作用,将 pH 提高 0.4 单位,达到了同时降低 Cr、As 含量的效果。

修复剂在施入土壤并加水熟化后,其中的土壤修复颗粒所含的硫酸铁会很快释放,在土壤溶液中形成大量的 [Fe(H₂O)₆]³⁺、[Fe₂(OH)₃]³⁺、[Fe₃(OH)₂]⁴⁺ 等络离子,易水解形成多核络合物^[24],这些络合物能够强烈吸附土壤溶液中的胶体微粒,通过吸附、架桥、交联等作用促使胶体微粒相互碰撞,形成絮状混凝沉淀;同时 AsO₃³⁻、AsO₄⁵⁻ 会与 Fe(OH)₃ 发生反应生成 FeAsO₃ 和 FeAsO₄,生成的 FeAsO₃、FeAsO₄ 沉淀被修复剂水解产物卷扫,一起沉积下来。在硫酸铁释放的同时,由于具有巨大的比表面积,膨润土会强烈吸附土壤溶液中残余的砷酸根离子、亚砷酸根离子、镉离子^[25],对农作物而言,钙离子可以和镉离子形成竞争吸收关系,土壤修复颗粒中的钙离子会进入到土壤溶液中,从而抑制农作物对镉的吸收。

对于水稻而言,分蘖盛期至灌浆期是水稻吸收镉、砷最为旺盛的阶段,随着农作物的生长,作物修复颗粒表层的包衣会逐渐分解,其中的可溶性硅和亚硒酸钠也会缓慢释放,在分蘖盛期达到最大速率,而硅和三价砷共享作物根系的吸收通道,硅与三价砷形成竞争吸收关系;硅还可以增加水稻细胞壁厚度,降低细胞膜透性,阻碍镉在水稻植株内向籽粒的转移。同时,硅作为水稻重要的营养元素,有利于增加水稻的光合作用,提高水稻抗倒伏和根系氧化能力,增加水稻产量、提高水稻的品质^[26];硒对于镉、砷在水稻植株内向上的转移均有一定的阻碍作用;作物修复颗粒的包衣为硫磺,而硫是农作物的必需中量元素,被水稻吸收后还可以促进巯基的形成,从而将更多的镉固定在水稻细胞壁中,达到对镉-砷复合污染农田进行修复的目的。

因此该研究中,土壤修复剂能有效地降低土壤中有有效态 Cd、As 及稻谷中 Cd、无机 As 的含量,并能一定程度的提高水稻产量。

4 结论

施用土壤修复剂能提高土壤 pH 0.4 单位,土壤 CEC 增

加 9.23 cmol/kg, 有机质增加 14.32 g/kg。施用土壤修复剂土壤有效态镉、有效态砷含量分别降低 41.93%、64.34%, 稻米中镉、无机砷含量分别降低 81.25%、77.92%, 达到国家食品污染物限量标准。施用土壤修复剂还能在一定程度上提高稻谷的长势及产量, 稻谷产量增加 6.82%。因此该土壤修复剂在有效降低农田土壤中镉和砷活性的基础上, 可同时显著降低农产品中重金属镉和砷的含量, 并能一定程度上提高水稻的产量, 在农田重金属修复过程中, 可以施用适量的该土壤修复剂治理污染土壤。

参考文献

- [1] 环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报正式公布[J]. 中国环境管理, 2014, 6(2): 26.
- [2] 陈英旭. 环境学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 113-114.
- [3] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. Biometals, 2004, 17(5): 549-553.
- [4] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 403-408.
- [5] 陈朗, 宋玉芳, 张薇, 等. 土壤镉污染毒性效应的多指标综合评价[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2606-2612.
- [6] 陈同斌. 土壤溶液中的砷及其与水稻生长效应的关系[J]. 生态学报, 1996, 16(2): 147-153.
- [7] 唐彬, 邱亚群, 胡立琼, 等. 含铁材料修复砷污染土壤的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12): 3692-3695, 3729.
- [8] VAN VLIET O P R, FAAIJ A P C, TURKENBURG W C. Fischer-Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis[J]. Energy conversion and management, 2009, 50(6): 855-876.
- [9] 林海, 靳晓娜, 董颖博, 等. 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 945-952.
- [10] 蔡瑞, 李玉奇. 生物质炭对不同质地镉污染土壤性质及有效镉的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(3): 70-72.
- [11] 陈晓婷, 王果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(1): 109-112.
- [12] 张海勃, 李相奎, 白瑞琴, 等. 硅肥和钙镁磷肥对作物吸收重金属镉的抑制作用研究[J]. 内蒙古农业科技, 2013(4): 54-55.
- [13] 刘大镗, 郭明选, 高汉清, 等. 施用生石灰对镉污染酸性土壤中水稻镉积累的影响[J]. 湖南农业环境科学, 2016(12): 24-26.
- [14] 蓝兰, 涂仕华. 不同中微量及有益元素对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 四川农业科技, 2018(3): 43-47.
- [15] 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, 1999.
- [16] 张传琦, 程丽娅, 黄勤, 等. ICP-MS 法测定土壤中有效态砷的研究[J]. 分析试验室, 2011, 30(7): 83-86.
- [17] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1011-1018.
- [18] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 692-697.
- [19] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2093-2098.
- [20] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 847-851.
- [21] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 土壤调理剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 890-897.
- [22] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 314-320.
- [23] 陈杰, 宋靖琦, 张晶, 等. 不同钝化剂对铜污染土壤原位钝化修复[J]. 土壤, 2016, 48(4): 742-747.
- [24] 谢洪珍. 某金矿含砷铅碱性工业废水的处理试验研究[J]. 湿法冶金, 2011, 30(4): 336-339.
- [25] 蒋茂林, 彭润土及其复合材料脱除模拟废水中砷(V)的试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [26] 任海, 付立东, 王宇, 等. 硅肥与基本苗配置对水稻生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 108-116.
- [11] 张侠, 张成, 尚国珩. 石家庄市土地利用分区研究[J]. 中国国土资源经济, 2015, 28(7): 53-57.
- [12] 马瑞明, 马仁会, 韩冬梅, 等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 249-257.
- [13] 文虎, 易正炳, 王新军, 等. 基于 GIS 的农用地定级研究: 以新疆五家渠垦区为例[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 186-192.
- [14] SHEREKAR V, TATIKONDA M, STUDENT M E. Impact of factor affecting on labour productivity in construction projects by AHP method[J]. Int J Eng Sci Comput, 2016, 6(6): 6771-6775.
- [15] 张慧, 王洋. 中国耕地压力的空间分异及社会经济因素影响: 基于 342 个地级行政区的面板数据[J]. 地理研究, 2017, 36(4): 731-742.
- [16] 杨子, 刘尧光, 宁静, 等. 典型黑土垄作区耕地沟蚀对土壤养分的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(2): 379-385.
- [17] 张立新, 朱道林, 谢保鹏, 等. 中国粮食主产区耕地利用效率时空格局演变及影响因素: 基于 180 个地级市的实证研究[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 608-619.
- [18] 匡雨花, 叶英聪, 赵小敏, 等. 基于农用地分等修正的土地整治项目对耕地质量的影响评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 198-205.

(上接第 66 页)

- [3] 徐畅, 高明, 谢德体, 等. 土地整理年限对紫色丘陵区土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 242-248.
- [4] 张正峰, 杨红, 谷晓坤. 土地整治对平原区及丘陵区田块利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 1-8.
- [5] 赵京, 杨钢桥, 汪文雄. 农地整理对农户土地利用效率的影响研究[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2271-2276.
- [6] FEZZI C, HARWOOD A R, LOVETT A A, et al. The environmental impact of climate change adaptation on land use and water quality[J]. Nature climate change, 2015, 5: 255-260.
- [7] 牛海鹏. 河南省土地开发整理耕地质量综合指数测算[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2006, 25(4): 301-305.
- [8] 邓燕红, 黄炎和, 涂凯, 等. 土地整理项目区耕地质量评价方法研究: 以福建省长泰县为例[J]. 福建农业学报, 2015, 30(6): 599-604.
- [9] 余建新, 魏巍, 廖晓虹, 等. 土地整治项目区农用地质量分等方法的修正[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 234-240.
- [10] 全国国土资源标准化技术委员会. 农用地质量分等规程: GB/T 28407—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.