

## 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 徐敏, 伍钧

### 引用本文:

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 徐敏, 伍钧. 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1966-1974.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1501>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应

张新帅, 张红宇, 黄凯, 施翠仙, 陈建军, 李元, 湛方栋

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 481-491 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0704>

#### 秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响

杨定清, 李霞, 周娅, 罗丽卉, 谢永红, 王棚, 李旭毅

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1150-1158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1137>

#### 施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 韩晓增, 邹文秀, 董本春, 严君

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 568-574 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0169>

#### 玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的Meta分析

吕春玲, 陈延华, 何文天, 张思宇, 姜娜, 樊代佳, 杨华薇, 杨殿林, 邹国元

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2011-2022 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0015>

#### 基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合评价

李义纯, 王艳红, 陈勇, 唐明灯, 李奇, 李林峰, 林晓扬, 尹贻龙, 艾绍英

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1219-1228 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1397>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 等. 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1966-1974.

XIAO H, HUANG B H, SUN K, et al. Grey relational analysis for evaluating the effects of lime combined with organic fertilizer on a cadmium-contaminated soil-plant system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1966-1974.

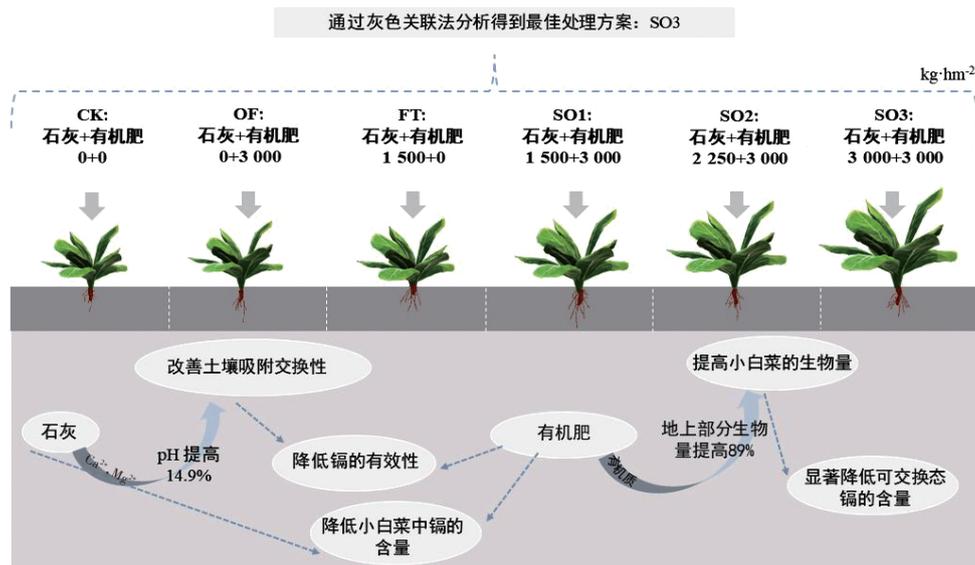


开放科学 OSID

# 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 徐敏\*, 伍钧

(四川农业大学环境学院, 成都 611130)



**摘要:**为缓解长期单施石灰对土壤的破坏,本研究以石灰配施有机肥为修复手段,采用盆栽试验,以无处理(CK)、单施有机肥(OF: 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>)及单施石灰(FT: 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)为对照,设置3个石灰+有机肥配施处理(SO1: 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>、SO2: 2 250 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>、SO3: 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>),探究不同有机肥及石灰配施量对镉(Cd)污染土壤的修复效果,并采用灰色关联法(Grey relational analysis, GRA)对其修复效益进行综合性评价。结果表明:石灰和有机肥均能有效提高土壤pH,且土壤pH随着石灰配施量的增加而增加,其中SO3处理下pH较CK提高了14.9%。与CK相比,各处理中土壤残渣态镉含量增加,可交换态镉含量降低;且随着石灰施用量的增加,残渣态镉含量呈递增趋势,可交换态镉含量呈递减趋势。SO3处理下小白菜地上部生物量最高,与CK相比提高了87.9%。与CK相比,石灰与有机肥均能降低小白菜中镉的含量,降低效果为SO3>SO2>SO1>FT>OF。基于灰色关联法对土壤-植物系统综合效益进行分析可知:石灰和有机肥配施量均为3 000 kg·hm<sup>-2</sup>的SO3处理的灰色关联度最大,土壤修复效果最佳。

**关键词:**土壤肥力;钝化;镉污染土壤;土壤修复

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)09-1966-09 doi:10.11654/jaes.2021-1501

收稿日期: 2021-12-29 录用日期: 2022-04-15

作者简介: 肖豪(1996—),男,四川南充人,硕士研究生,从事土壤污染治理研究。E-mail: 18113225505@163.com

\*通信作者: 徐敏 E-mail: xumin\_xyz@126.com

基金项目: 成都市科技项目(2020-YF09-00023-SN)

Project supported: The Key Program of Chengdu Science and Technology Bureau(2020-YF09-00023-SN)

## Grey relational analysis for evaluating the effects of lime combined with organic fertilizer on a cadmium-contaminated soil-plant system

XIAO Hao, HUANG Bohao, SUN Kai, XU Min\*, WU Jun

(College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** In this study, a soil-based pot experiment was conducted with the combined application of lime and organic matter to explore a suitable way to alleviate soil damage caused by long-term lime application. There were six treatments including control (CK), organic fertilizer (OF: 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>), lime (FT: 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>), and the combined application of lime and organic fertilizer at three application ratios: SO1 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>), SO2 (2 250 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>), and SO3 (3 000 kg·hm<sup>-2</sup>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>). Grey relational analysis (GRA) was used to comprehensively evaluate the effect of different treatments on soil-plant systems to select the most suitable application ratio. The results showed that soil pH increased with increasing lime addition rate, and compared with CK, SO3 increased the pH by 14.9%, indicating that the combination of lime and organic matter improved soil pH. Soil residual Cd content increased and soil exchangeable Cd content decreased in all treatments compared with those in CK. With an increase in lime application rate, the proportion of residual Cd increased and exchangeable Cd decreased. SO3 had the highest shoot biomass, and the shoot of pakchoi under SO3 treatment increased by 87.9% compared with that under CK. Compared with CK, both lime and organic fertilizer reduced the content of Cd in pakchoi, and the reduction effect in different treatments was SO3>SO2>SO1>FT>OF. Based on GRA, the data showed that SO3 was the most suitable path for soil remediation, with the highest grey relational degree.

**Keywords:** soil fertility; passivation; Cd-contaminated soil; soil remediation

土壤在人类的生存和发展过程中扮演着重要角色,土壤质量及其健康与人类生存发展密切相关。随着经济的发展,工业活动、污水灌溉、工业大气沉降等导致的“三废”乱排,使我国土壤重金属污染问题日益加剧<sup>[1-2]</sup>。镉(Cd)在土壤中具有较高的迁移性,在植物中容易被吸收、运输,从而导致其在食物链中大量积累<sup>[3-4]</sup>。土壤镉含量超标,不仅会造成土壤质量下降,而且会降低农作物的品质和产量,镉还可通过食物链进入人体,威胁人类的生命健康与安全<sup>[5-7]</sup>。因此,治理土壤镉污染刻不容缓。

常见的土壤修复技术包括生物修复技术、化学修复技术、物理修复技术等。原位钝化修复因具有操作简单、经济、快速等优点而在土壤修复中得到了广泛应用<sup>[8-9]</sup>。原位钝化修复主要通过降低镉在土壤中的迁移性,从而降低镉在植物中的富集。石灰是最常见的钝化剂,石灰施用不仅可降低土壤中镉的有效性,还可以有效改善酸性土壤的基本理化性质<sup>[10]</sup>。然而,石灰的长期规模化施用容易破坏土壤团粒结构,使土壤板结。有机肥料是指天然有机质经微生物分解或发酵而成的一类肥料。施用有机肥不仅可以提高作物品质和产量,而且可以在改善土壤理化性质的同时有效吸附土壤重金属,从而减少植物根系对重金属离子的吸收<sup>[11-13]</sup>。有机肥配施石灰可有效缓解长期施用石灰带来的破坏,达到在修复土壤的同时提高农田产出的目的,是一种有效的修复手段。例如,马红艳等<sup>[14]</sup>研究发现石灰处理土壤配施生物有机肥可以使

韭菜产量增加14.8%,并且可改善韭菜品质;李光辉<sup>[15]</sup>研究发现石灰配施有机物料可有效降低稻田土壤中镉的有效性,同时使水稻的百粒质量提高9.17%。

目前,针对土壤重金属修复效益的传统评价方法有内梅罗指数评价法、地累积指数法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法和富集因子法,但这些方法仅关注了重金属的修复效果。然而,针对农田土壤修复效益除了需要关注重金属的修复效果,还需要关注土壤肥力提升、作物生长等多项内容。

灰色关联法(Grey relational analysis, GRA)是以灰色系统为基础,将一些不易定量且边界不清的因素量化后进行综合评价,以克服传统分析方法的相关缺点和局限性<sup>[16]</sup>。该方法是利用灰色关联度度量各个影响因子之间近似程度的统计方法,用于分析给定系统中的部分已知信息与部分未知信息的不确定关系。根据不同因素之间序列所构成几何曲线的相似程度来判断联系的紧密程度,曲线越相似,说明相应序列之间的关系越贴切,关联度越高<sup>[17]</sup>。灰色关联法可用于综合评价样本小、信息少的复杂系统。因此,灰色关联分析被广泛用于解决医药、工学、环境等领域中序列复杂的相互关系。土壤-植物体系是一个复杂的体系,影响整个系统的因素较多,是典型的灰色系统,因此可以采用灰色关联法对整个系统进行综合评价。例如, XU等<sup>[18]</sup>在研究酒糟生物炭对多金属污染植物-土壤系统的影响时,利用灰色关联法有效评估了不同生物炭用量对相关系统的影响。然而,目

前采用灰色关联法综合评价有机肥-石灰配施对镉污染土壤修复效益的研究还鲜见报道。

基于此,本研究利用盆栽试验,研究石灰和有机肥不同配施处理对小白菜品质、镉积累量、土壤基本理化性质、土壤镉有效性的影响,采用灰色关联法对不同处理下的综合效益进行评价,以不同石灰与有机肥配施处理下土壤与植物各个指标的变化为因素,并将其作为样本序列进行评价<sup>[19-20]</sup>,以筛选出最优的配施方案,为镉污染土壤修复提供数据支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试作物为春秋大叶小白菜(成都市成华区富星种籽经营部);供试石灰为生石灰(氧化钙 $\geq 95\%$ ,成都市科隆化学有限公司);供试有机肥为菌渣生物有机肥(中农润泽生物科技有限公司),其基本理化性质见表1。

表1 供试有机肥基本理化性质

Table 1 The properties of tested organic fertilizers

项目 Item	含量 Content	项目 Item	含量 Content	项目 Item	含量 Content
pH	6.32	Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	413	Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	132
N/%	2.15	Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	35.4	Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	28.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	1.58	Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	395	Ni/(mg·kg <sup>-1</sup> )	23.1
K <sub>2</sub> O/%	1.22	Ca/(g·kg <sup>-1</sup> )	59.0	As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.37
有机质/%	48.5	Mg/(g·kg <sup>-1</sup> )	12.3	Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.453
Fe/(g·kg <sup>-1</sup> )	14.8	Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.445		

土壤采自成都平原某工业区附近中轻度镉污染农田土壤,土壤类型为水稻土。采集的土壤剔除杂物,经自然风干后,捣碎研磨过2 mm尼龙筛备用。土样基本理化性质为pH 5.98、有机质(Soil organic matter, SOM) 19.3 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 1.39 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 0.236 g·kg<sup>-1</sup>、全钾 1.61 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 68.8 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 20.1 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 188 mg·kg<sup>-1</sup>、阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC) 4.08 cmol·kg<sup>-1</sup>、总镉 1.41 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

称取5 kg风干土壤放入陶瓷花盆(顶部直径17 cm、底部直径14 cm、高25 cm)中,随后分别加入石灰及有机肥。其中,石灰添加量参考相关文献<sup>[21]</sup>设置,有机肥添加量根据商品使用建议设置,其具体配施方案见表2,共计6个处理,每个处理重复3次。各处理均加入普钙2 g、硫酸钾2 g、尿素3 g作为基肥,充

分混匀。定期添加蒸馏水,使土壤含水量保持在田间持水量的65%。土壤培养2周后点播小白菜,选择颗粒大小一致的小白菜种子,每盆播种20颗,出苗初期间苗,每盆保留2株长势一致的幼苗,经过相同的种植、管理,45 d后收获。

表2 不同施用量试验设计(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Experiment design of different application dosage (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	石灰 Lime	有机肥 Organic fertilizer
CK	0	0
OF	0	3 000
FT	1 500	0
SO1	1 500	3 000
SO2	2 250	3 000
SO3	3 000	3 000

### 1.3 样品的采集与测定

在小白菜成熟期采用OK-Y104型便携式叶绿素仪测定叶片叶绿素(Spad值)。随后将小白菜整体拔出,分为茎叶、根系两部分,用去离子水洗净后,杀青、烘干、粉碎、装袋备用。植株样品消煮后,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定地上部及地下部镉含量。在小白菜收获后,采集土样。土壤样品经自然风干后,研磨、过筛、装袋备用。土壤pH采用电位法测定;SOM采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤CEC采用1 mol·L<sup>-1</sup>中性醋酸铵淋洗法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用NaOH熔融-火焰光度计法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用1 mol·L<sup>-1</sup>醋酸铵浸提-火焰光度计法测定;机械组成按照我国土壤质地分类分为黏粒、粉粒、砂粒,并采用马尔文MS200激光粒度仪测定;土壤镉形态采用BCR分级连续提取,电感耦合等离子体发射光谱仪测定,包括可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态;土壤中镉总量经8 h消煮后,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

### 1.4 灰色关联法

#### 1.4.1 选定评价指标

根据土壤-植物系统综合效益常用评价指标选取土壤基本理化性质、土壤镉含量、土壤镉形态、小白菜生物量及生长状况、小白菜镉含量等17个指标用于评价,各指标分别用 $X(k)$ ( $k=1, 2, 3, \dots, 17$ )表示,详见表3。

表3 灰色关联法评价指标

Table 3 Indicators for grey correlation analysis

指标 Parameter	标记 Label	指标 Parameter	标记 Label
茎叶鲜质量/g	X1	土壤碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X10
根系鲜质量/g	X2	土壤有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X11
叶绿素Spad值/%	X3	土壤速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X12
茎叶镉含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X4	土壤可交换态镉/%	X13
根系镉含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X5	土壤可还原态镉/%	X14
土壤有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	X6	土壤可氧化态镉/%	X15
阳离子交换量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	X7	土壤残渣态镉/%	X16
土壤全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	X8	土壤镉总量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	X17
土壤全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	X9		

### 1.4.2 原始数据标准化

为了消除灰色关联法中不同影响因素量纲不同带来的影响,需要对指标进行标准化,使原始数据的数值无量纲化到[0,1]的区间。如果所选指标数值越大,影响越有利,则这种指标称为积极指标;若指标数值越小,影响越有利,则这种指标称为消极指标。指标计算公式如下<sup>[22]</sup>:

积极指标计算公式:

$$X_i(k) = \frac{X(k) - X_i(k)_{\min}}{X_i(k)_{\max} - X_i(k)_{\min}} \quad (1)$$

消极指标计算公式:

$$X_i(k) = \frac{X_i(k)_{\max} - X(k)}{X_i(k)_{\max} - X_i(k)_{\min}} \quad (2)$$

式中: $X_i(k)$ 为标准化结果,即灰色关联值; $X(k)$ 为原始数据; $X_i(k)_{\min}$ 为该指标原始数据最小值; $X_i(k)_{\max}$ 为该指标原始数据最大值。

### 1.4.3 灰色关联绝对偏差序列计算

绝对偏差序列计算公式如下:

$$\Delta_{\min} = |X_0(k) - X_i(k)|_{\min_i, \min_k} = 0 \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = |X_0(k) - X_i(k)|_{\max_i, \max_k} = 1 \quad (4)$$

式中: $\Delta_{\min}$ 为最小离散偏差; $\Delta_{\max}$ 为最大离散偏差; $X_i(k)$ 为标准化结果; $X_0(k)$ 为该评价指标的理想值。

### 1.4.4 灰色关联系数计算

关联系数 $\eta_i(k)$ 反映了各个序列在某一因素处的关联程度,其计算公式如下:

$$\eta_i(k) = \frac{|X_0(k) - X_i(k)|_{\min_i, \min_k} + \rho |X_0(k) - X_i(k)|_{\max_i, \max_k}}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho |X_0(k) - X_i(k)|_{\max_i, \max_k}} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为分辨系数,取值介于0~1之间,取值越大,则分辨能力越强。在本研究中, $\rho$ 取0.5。

### 1.4.5 灰色关联度计算

灰色关联法得出结果的评判标准是灰色关联度值的大小,关联度值越大,综合效益越好,施用效果越佳。灰色关联度计算公式如下<sup>[23]</sup>:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i(k) \quad (6)$$

## 1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据,利用 IBM SPSS Statistics 27.0 分析多重差异显著性,采用 Origin 2019 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 石灰和有机肥配施对土壤性质的影响

由表4可知,与CK相比,SO2和SO3处理可显著

表4 土壤基本理化性质

Table 4 Physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	pH	有机质SOM/ (g·kg <sup>-1</sup> )	阳离子 交换量CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	全氮TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷TP/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾TK/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydro N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	6.12±0.63cd	19.87±2.08a	4.55±0.40a	0.84±0.02b	0.23±0.13a	2.46±0.13a	51.92±6.60a	2.46±0.78a	190.67±6.43a
OF	5.82±0.19d	20.88±1.68a	4.48±0.47a	0.83±0.02b	0.26±0.16a	2.15±0.15a	52.18±4.60a	2.00±0.22a	156.33±17.9b
FT	6.34±0.33bcd	19.33±0.50a	4.62±0.48a	0.76±0.01c	0.30±0.03a	1.60±0.86a	51.05±2.90a	1.76±0.33a	86.33±6.66d
SO1	6.70±0.07abc	21.40±0.91a	4.91±0.35a	0.90±0.02a	0.29±0.17a	1.62±0.22a	60.88±10.10a	2.62±0.55a	122.00±3.61c
SO2	6.82±0.27ab	22.07±2.52a	5.15±0.66a	0.80±0.06bc	0.30±0.17a	2.57±0.57a	66.34±9.18a	2.18±0.14a	110.33±22.30c
SO3	7.03±0.12a	21.60±0.01a	5.30±0.14a	0.82±0.03b	0.37±0.02a	2.03±0.08a	60.74±9.85a	2.48±0.85a	172.67±8.96ab
均值	6.47	20.85	4.83	0.82	0.29	2.07	57.19	2.25	139.72
F值	5.935	1.378	1.708	6.521	1.191	2.585	2.015	1.081	28.870
P值	0.005	0.299	0.207	0.004	0.370	0.082	0.148	0.419	<0.001

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ . The same below.

提高土壤pH( $P<0.05$ ),且SO3处理土壤pH最高,其与CK相比提高了14.9%。不同处理对土壤全氮的影响有所差异,其中SO1处理全氮含量最高,为 $0.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与CK相比显著提高了7.14%( $P<0.05$ )。与SO1、SO2相比,SO3处理显著提高了土壤速效钾含量( $P<0.05$ ),且SO1、SO2处理下土壤速效钾含量均显著低于CK。石灰和有机肥配施对SOM、CEC、全磷、全钾、碱解氮、有效磷影响不显著。

如图1所示,不同处理下土壤黏粒含量存在一定差异,且在SO3处理下达到最大值。在石灰和有机肥配施处理中,与SO1、SO2处理相比,SO3处理下土壤砂粒占比显著增加;与OF处理相比,SO3处理下土壤砂粒占比增加了9.1%。与CK相比,FT、SO3处理均降低了土壤粉粒含量;在石灰和有机肥配施处理中,与SO1、SO2相比,SO3处理下土壤粉粒表现出降低的趋势。

### 2.2 石灰和有机肥配施对土壤镉形态及镉含量的影响

整体而言,土壤中可交换态镉占比最高,可氧化态镉占比最低(图2)。与CK相比,所有处理均能降低土壤中可交换态镉的含量。在石灰和有机肥配施处理中,随着石灰用量的增加,可交换态镉所占比例显著降低( $P<0.05$ )。与CK相比,土壤残渣态镉占比在所有处理下均有所增加;在石灰和有机肥配施处理中,随着石灰施用量的增加,残渣态镉所占比例显著增加( $P<0.05$ )。土壤可氧化态镉占比在不同处理中为2.77%~3.32%,各处理间差异不显著( $P>0.05$ )。

不同处理土壤总镉含量如图3所示,各处理间土壤总镉含量差异不显著( $P>0.05$ )。与CK相比,OF、FT处理可使土壤镉含量降低9%~10%。在石灰和有机肥配施处理中,与SO1处理相比,SO2和SO3处理

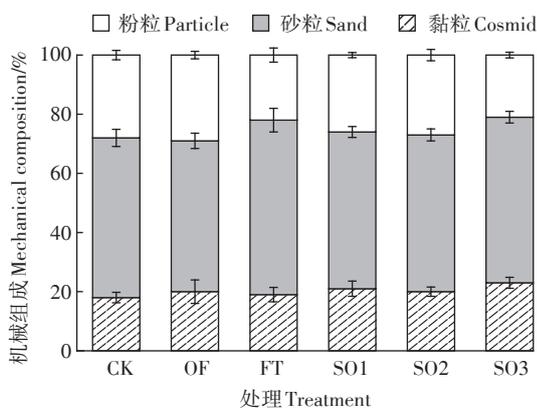


图1 土壤机械组成

Figure 1 The mechanical compositions of soil

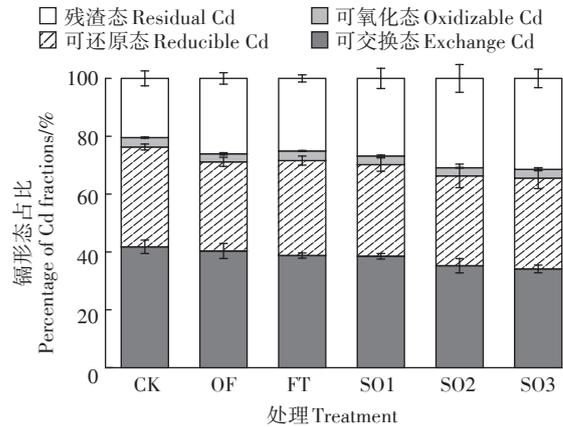
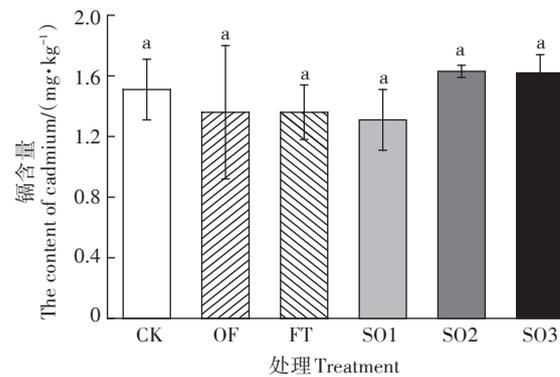


图2 不同处理下的土壤镉形态

Figure 2 The fractions of cadmium in soils under different treatments



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ . The same below

图3 不同处理下土壤总镉含量

Figure 3 Total cadmium content of soil under different treatments

土壤总镉含量表现出增加的趋势。SO1处理时土壤总镉含量最小,为 $1.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相比CK降低了13.2%。

### 2.3 石灰和有机肥配施对小白菜生长的影响

如表5所示,与CK相比,SO2和SO3处理可显著提高小白菜茎叶鲜质量( $P<0.05$ ),而各处理间根系鲜质量差异不显著( $P>0.05$ )。其中,SO3处理茎叶鲜质量最高,较CK提高了87.9%;SO1处理根系鲜质量达到最大。与CK相比,SO1、SO3处理能显著提高小白菜叶绿素含量( $P<0.05$ ),而OF与FT处理对小白菜叶绿素含量无显著影响。

### 2.4 石灰和有机肥配施对小白菜镉含量的影响

不同处理下小白菜茎叶及根系镉含量如图4所示,各处理中小白菜茎叶、根系镉含量存在差异。在SO2处理下茎叶镉含量最低,与CK相比,降低了

表5 不同处理下的小白菜生物量

Table 5 Biomass of pakchoi under different treatments

处理 Treatment	茎叶鲜质量 Shoot fresh weight/g	根系鲜质量 Root fresh weight/g	叶绿素 Spad/%
CK	14.14±3.00c	0.37±0.08a	18.20±1.00b
OF	16.34±3.84bc	0.39±0.10a	19.53±2.20b
FT	18.42±3.26abc	0.45±0.17a	20.00±1.47b
SO1	18.98±4.43abc	0.65±0.23a	23.27±1.65a
SO2	19.66±0.49ab	0.39±0.15a	19.67±0.50b
SO3	26.57±2.03a	0.44±0.03a	23.17±2.40a
平均值	19.42	0.45	20.64
F值	3.48	1.70	4.69
P值	0.035	0.208	0.013

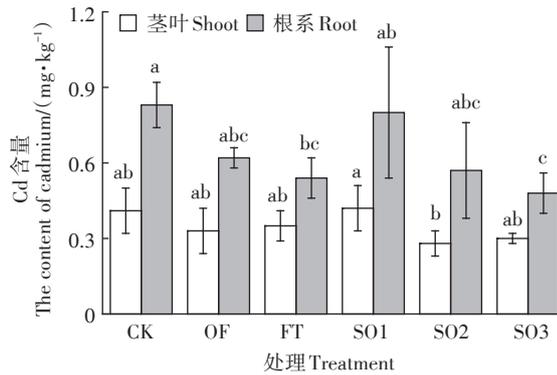


图4 不同处理下的小白菜镉含量

Figure 4 Cadmium concentrations in Pakchoi shoot and root under different treatments

31.7%;根系镉含量在SO3处理下最低,与CK相比降低了42.2%。在石灰和有机肥配施处理中,随着石灰用量的增加,小白菜茎叶和根系镉含量呈下降趋势。

与CK相比,OF和FT处理对小白菜茎叶镉含量无显著影响,但二者配施(SO2和SO3处理)可以降低小白菜茎叶对镉的积累量。

### 2.5 基于灰色关联法的石灰和有机肥配施效益评价

本研究中17个指标的标准化结果、关联系数分别如表6和表7所示。

按照灰色关联法的分析原则,关联系数越大,则处理效果越好,由各个指标所对应的关联系数所求出的关联度能够综合性地评价出最优的施肥方案。如表7所示,相比其他处理,SO3处理的关联系数最高。如图5所示,石灰和有机肥的配施能够影响土壤-植物系统的关联度,与CK相比,SO3处理能够显著提高土壤-植物系统的关联度,考虑综合效益得出,SO3为最佳的施肥方案。

## 3 讨论

石灰作为碱性钝化材料,在南方酸性土壤改良中被广泛使用,且取得了显著成果<sup>[24]</sup>。石灰进入土壤后,可以使土壤中交换性Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量提高,从而改善土壤吸附交换性<sup>[25]</sup>。因此,将石灰作为土壤镉污染治理的钝化材料越来越常见<sup>[26]</sup>。如潘香玉<sup>[27]</sup>的研究表明,施用石灰可显著提高土壤pH,从而降低土壤中镉的有效性。石灰配施有机肥能显著改善长期石灰施用带来的负面效果。如罗玲等<sup>[28]</sup>的研究发现,单独施用石灰会使土壤板结,单独施用有机肥对酸性土壤的改良效果不明显,相比之下,石灰与有机肥配施的综合效果最好,这与本研究结果一致。石灰与有机肥配施不仅能增加土壤pH,还可以提高土壤肥力。本

表6 标准化结果

Table 6 Standardization processing results

处理 Treatment	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
CK	0.14±0.17	0.15±0.12	0.12±0.12	0.39±0.30	0.27±0.15	0.27±0.34	0.28±0.21	0.51±0.13	0.38±0.34
OF	0.26±0.22	0.18±0.15	0.28±0.27	0.66±0.30	0.62±0.07	0.43±0.27	0.24±0.25	0.45±0.10	0.47±0.41
FT	0.48±0.30	0.27±0.25	0.34±0.18	0.58±0.20	0.76±0.13	0.18±0.08	0.31±0.26	0.07±0.08	0.56±0.09
SO1	0.56±0.44	0.59±0.36	0.73±0.20	0.34±0.30	0.32±0.43	0.51±0.15	0.47±0.19	0.87±0.13	0.55±0.44
SO2	0.34±0.12	0.18±0.22	0.30±0.06	0.82±0.19	0.70±0.31	0.62±0.41	0.60±0.35	0.29±0.32	0.55±0.44
SO3	0.84±0.11	0.27±0.05	0.72±0.29	0.75±0.08	0.86±0.13	0.55±0.01	0.68±0.08	0.42±0.19	0.74±0.06
处理 Treatment	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	
CK	0.18±0.23	0.50±0.40	0.94±0.06	0.14±0.22	0.13±0.12	0.23±0.19	0.13±0.14	0.22±0.24	
OF	0.19±0.16	0.27±0.11	0.64±0.15	0.28±0.24	0.57±0.19	0.63±0.34	0.44±0.11	0.41±0.52	
FT	0.15±0.10	0.14±0.17	0.04±0.06	0.42±0.08	0.33±0.19	0.16±0.15	0.39±0.07	0.40±0.22	
SO1	0.49±0.35	0.59±0.28	0.34±0.03	0.45±0.09	0.47±0.28	0.45±0.27	0.48±0.19	0.45±0.24	
SO2	0.68±0.31	0.36±0.07	0.24±0.19	0.75±0.23	0.55±0.48	0.59±0.10	0.70±0.27	0.08±0.04	
SO3	0.48±0.34	0.51±0.43	0.78±0.08	0.86±0.13	0.51±0.43	0.41±0.40	0.74±0.18	0.10±0.14	

表7 关联系数的计算结果

Table 7 Summary of grey relational coefficients

处理 Treatment	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
CK	0.37±0.05	0.37±0.03	0.36±0.03	0.47±0.14	0.41±0.05	0.43±0.14	0.42±0.07	0.51±0.07	0.47±0.14
OF	0.41±0.08	0.38±0.05	0.42±0.09	0.65±0.23	0.57±0.05	0.49±0.13	0.41±0.09	0.48±0.05	0.54±0.19
FT	0.52±0.15	0.42±0.10	0.44±0.06	0.56±0.14	0.69±0.12	0.38±0.02	0.44±0.10	0.35±0.02	0.53±0.05
SO1	0.63±0.33	0.63±0.32	0.68±0.20	0.45±0.10	0.48±0.22	0.51±0.07	0.50±0.10	0.81±0.17	0.60±0.24
SO2	0.44±0.05	0.39±0.07	0.42±0.02	0.77±0.22	0.69±0.25	0.66±0.31	0.64±0.32	0.44±0.13	0.63±0.33
SO3	0.77±0.13	0.41±0.02	0.71±0.27	0.68±0.08	0.81±0.18	0.53±0.01	0.61±0.06	0.47±0.09	0.66±0.05
处理 Treatment	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	
CK	0.39±0.07	0.58±0.30	0.89±0.09	0.37±0.07	0.37±0.03	0.40±0.06	0.37±0.04	0.74±0.25	
OF	0.39±0.04	0.41±0.04	0.06±0.12	0.42±0.09	0.55±0.11	0.65±0.30	0.47±0.05	0.66±0.28	
FT	0.37±0.03	0.37±0.05	0.34±0.01	0.47±0.04	0.44±0.07	0.38±0.04	0.45±0.03	0.58±0.12	
SO1	0.55±0.23	0.59±0.22	0.43±0.01	0.48±0.04	0.51±0.13	0.50±0.15	0.50±0.09	0.55±0.13	
SO2	0.68±0.29	0.44±0.03	0.41±0.07	0.71±0.21	0.61±0.27	0.55±0.06	0.69±0.27	0.87±0.06	
SO3	0.54±0.21	0.60±0.34	0.70±0.08	0.80±0.17	0.60±0.35	0.51±0.19	0.68±0.17	0.86±0.18	

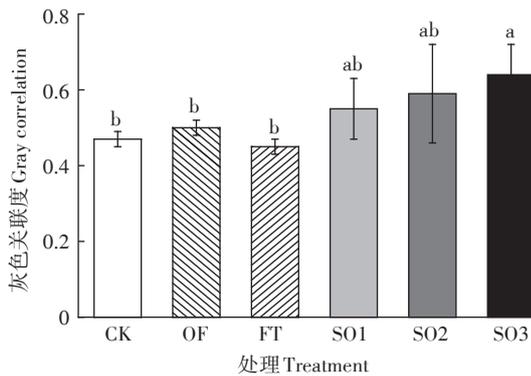


图5 不同处理下土壤-植物系统的灰色关联度

Figure 5 Grey correlation degrees of soil-plant system under different treatments

研究中SO2、SO3处理能显著提高土壤pH,降低镉的有效性。

土壤有机质作为土壤的重要组成部分,对土壤肥力有重要影响。本研究发现,SO2处理的有机质含量最高,且石灰与有机肥配施处理的有机质含量均高于CK、OF、FT处理,可能是因为石灰与有机肥配施可增加土壤黏粒含量,从而抑制微生物对有机质的降解;与FT处理相比,有机肥配施能增加土壤有机质含量,对土壤肥力具有一定的提升效果。与CK相比,SO1处理下土壤全氮含量显著提高,可能与有机质的增加有关;而SO2、SO3处理下全氮含量无显著变化,可能是施肥不均匀所导致。此外,与CK相比,SO1、SO2处理下土壤速效钾含量显著降低,可能是因为植物消耗所致;但与SO1、SO2相比,SO3处理下速效钾含量显著增加,表明随着石灰用量的增加,速效钾表现出增加的趋势,这主要是因为石灰施用量增加,提高了土

壤胶体的吸附能力,从而降低了钾的流失。

与CK相比,各处理均能降低土壤中可交换态镉含量,增加残渣态镉含量。可见,无论是石灰、有机肥的单独施用还是二者配施,均能显著改变土壤中可交换态镉和残渣态镉的含量。单施石灰可显著提高土壤pH,从而降低镉有效性;单施有机肥可显著增加土壤胶体对镉的吸附能力,从而降低镉的有效性,减少其向植物的迁移。与OF、FT处理相比,有机肥和石灰配施更能显著降低可交换态镉含量,增加残渣态镉含量,说明石灰和有机肥配施有利于土壤可交换态镉转化为残渣态镉。此外,本研究还发现在配施处理中随着石灰配比用量的增加,可交换态镉含量逐渐降低,而残渣态镉占比逐渐增加,这与张迪等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。土壤中可氧化态镉含量无明显变化,表明可氧化态镉对石灰和有机肥的施用不敏感,郝金才等<sup>[30]</sup>和骆文轩等<sup>[31]</sup>在其研究中也得出了相同结论。在石灰和有机肥配施处理中,SO2和SO3两组处理下土壤总镉含量均大于CK,但差异不显著,这可能是由于生产有机肥时,原料自身带有一定量的镉,镉经堆肥并不能完全去除,且会随有机肥施用被带入土壤。有机肥配施可能会略增加土壤重金属污染的风险,因此必须合理施用<sup>[32]</sup>。

与CK相比,SO2、SO3处理可显著提高小白菜茎叶生物量,且SO1、SO3处理可显著提高小白菜叶绿素含量。与CK相比,OF和FT处理对小白菜茎叶镉的积累量无显著影响,二者配施可以降低小白菜对镉的积累量,且随着石灰配施量的增加小白菜中的镉呈现逐渐降低的趋势,这主要是因为施用石灰能够提高

土壤pH,降低镉的有效性,从而抑制小白菜对镉的吸收,这与前人的研究结果一致<sup>[32]</sup>。如杨林等<sup>[33]</sup>研究发现施用石灰和有机肥不仅可以有效缓解小白菜受重金属毒害所产生的生物学性状,而且可以显著降低植物体内Cd、Pb、Cu等重金属的含量。然而,本研究各处理中小白菜地上部镉的含量均高于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中的安全限值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[34]</sup>,因此还需要进一步探究更为安全的施用措施。

土壤-植物系统是一个复杂且开放的系统,石灰和有机肥配施对土壤-植物系统的影响复杂且不明确,故可视为一个典型的灰色系统。本研究以不同石灰与有机肥配施处理下土壤与植物各个指标的变化为因素,并将其作为样本序列,进行修复效益的综合性评价。本研究对土壤基本理化性质、镉含量、小白菜生物量、小白菜镉含量等17个指标进行综合评价,结果发现SO<sub>3</sub>处理能够显著提高土壤-植物系统的灰色关联度,表明其能显著提高土壤-植物体系的综合效益,具有较好的施用效果。

#### 4 结论

(1)石灰与有机肥配施可以增加小白菜生物量、提高小白菜叶绿素含量,降低小白菜中镉的含量。

(2)石灰和有机肥配施能改善土壤环境,促进土壤中可交换态镉向残渣态镉的转化,降低土壤中镉的有效性。

(3)通过灰色关联法对土壤-植物系统综合效益进行分析可得:当石灰和有机肥配施量为 $3\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 3\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,灰色关联度最大,土壤修复效果最佳。

#### 参考文献:

[1] 潘芳慧, 张晓玮, 王友保. 施磷对吊兰修复镉污染土壤及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 346-351. PAN F H, ZHANG X W, WANG Y B. Effects of phosphate fertilizer on phytoremediation of chlorophytum comosum and soil enzyme activity in Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 346-351.

[2] SHI L, GUO Z H, PENG C, et al. Immobilization of cadmium and improvement of bacterial community in contaminated soil following a continuous amendment with lime mixed with fertilizers: A four-season field experiment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 425-434.

[3] HAJEH P, SLOTH J J, SHAKIBAZADEH S, et al. Toxic elements in food: Occurrence, binding, and reduction approaches[J]. *Comprehensive*

*Reviews in Food Science & Food Safety*, 2014, 13(4): 457-472.

[4] 刘巍, 陈效民, 景峰, 等. 生物有机肥对土壤-水稻系统中Cd形态及迁移特征的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 78-84. LIU W, CHEN X M, JING F, et al. Effects of applying bioorganic fertilizer on chemical form and transport characteristics of Cd in soil-rice system[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1): 78-84.

[5] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 258-261. GAO Y D, LIANG C H, PEI Z J, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 258-261.

[6] 纪艺凝, 徐应明, 王农, 等. 鱼骨粉对土壤Cd污染钝化修复效应及其理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 312-319. JI Y N, XU Y M, WANG N, et al. Effect of fish bone meal on immobilization remediation of cadmium contaminated soil and its physiochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 312-319.

[7] 胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 等. 施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1635-1643. HU Y M, LÜ J S, SUN W B, et al. Effects of manganese application on the growth, cadmium uptake and cadmium distribution of maize in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1635-1643.

[8] 徐婧婧, 赵科理, 叶正钱. 重金属污染土壤原位钝化修复材料的最新研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7): 852-855. XU J J, ZHAO K L, YE Z Q. The latest research progress of *in-situ* passivation remediation materials for heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(7): 852-855.

[9] KEDE M L F M, CORREIA F V, CONCEIÇÃO P F, et al. Evaluation of mobility, bioavailability and toxicity of Pb and Cd in contaminated soil using TCLP, BCR and earthworms[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(11): 11528-11540.

[10] MEHRAZ A, SHARIFAH M, ISMAIL Y, et al. Immobilization of Pb, Cd, and Zn in a contaminated soil using eggshell and banana stem amendments: Metal leachability and a sequential extraction study[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(1): 223-230.

[11] 邵乐, 郭晓方, 史学峰, 等. 石灰及其后效对玉米吸收重金属影响的田间实例研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1986-1991. SHAO L, GUO X F, SHI X F, et al. Effect of lime on heavy metals uptake by *Zea mays* and the persistence of the liming effect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1986-1991.

[12] XUE W J, YANG Y X, WANG G W, et al. Effect of different organic fertilizers on soil nutrients and nutrient accumulation in winter wheat with straw returning[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 390-395.

[13] LI R, TAO R, LING N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 30-38.

[14] 马红艳, 何志学, 颜建明, 等. 石灰氮处理土壤及缓释肥配施生物

- 有机肥对韭菜生长和产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2021(8):73-79. MA H Y, HE Z X, XIE J M, et al. Effects of treating soil by lime nitrogen and slow-release fertilizer combined with bio-organic fertilizer application on growth and yield of Chinese chive[J]. *China Vegetables*, 2021(8):73-79.
- [15] 李光辉. 石灰配施有机物料修复酸性Cd污染土壤及生物效应[D]. 重庆:西南大学, 2021. LI G H. Remediation of acidic soil with Cd contaminated by combined application of lime and organic matters with its bio-effect[D]. Chongqing:Southwest University, 2021.
- [16] KADIER A, ABDESHAHIAN P, SIMAYI Y, et al. Grey relational analysis for comparative assessment of different cathode materials in microbial electrolysis cells[J]. *Energy*, 2015, 90:1556-1562.
- [17] YE J H, YU T, LIU H Y, et al. Distribution and probabilistic integrated ecological risk assessment of heavy metals in the surface water of Poyang Lake, China[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(11):29-34.
- [18] XU M, ZHU Q H, WU J, et al. Grey relational analysis for evaluating the effects of different rates of wine lees-derived biochar application on a plant-soil system with multi-metal contamination[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(7):6990-7001.
- [19] 王浩. 不同水分条件下生物炭对土壤特性和高粱生长的影响[D]. 太原:山西大学, 2015. WANG H. Effects of biochar on soil properties and sorghum growth under different levels of water[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2015.
- [20] 温丽华. 灰色系统理论及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2003. WEN L H. Grey system theory and application[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003.
- [21] 肖亨. 连施石灰对镉污染耕地土壤质量及稻麦吸收镉的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2018. XIAO H. Effects of long-term lime on Cd-contaminated soil quality and cadmium accumulation in rice and wheat issues[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2018.
- [22] FANG F, JIANG H, WANG J, et al. Identifying the influential priority of the factors governing PHB production by activated sludge with integration of uniform design and grey relational analysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 136:111-114.
- [23] WANG Y, ZHANG C, JIANG G. Priority-sequence of mineral resources development and utilization based on grey relational analysis method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(3):395-400.
- [24] 黄柏豪, 吴秦慧姿, 肖亨, 等. 连施石灰对Cd污染土壤Cd形态及稻麦吸收Cd的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3):138-143. HUANG B H, WU Q H Z, XIAO H, et al. Effects of continuous application of lime for three years on cadmium concentration and uptake by wheat and rice in Cd contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3):138-143.
- [25] 易琼, 杨少海, 黄巧义, 等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1):176-183. YI Q, YANG S H, HUANG Q Y, et al. Effects of soil ameliorants on soil properties and rice yield of acid sulfate paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1):176-183.
- [26] 戴思睿, 李莲芳, 秦普丰, 等. 生物炭/石灰混施对重金属复合污染土壤的稳定化效应[J]. 中国农业气象, 2021, 42(4):272-286. DAI S R, LI L F, QIN P F, et al. Immobilization effect of biochar and lime on arsenic, cadmium and lead in soils[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2021, 42(4):272-286.
- [27] 潘香玉. 施用石灰对稻田土壤pH值、水稻产量和重金属积累的影响[J]. 农业工程技术, 2020, 40(35):15-18. PAN X Y. Effects of lime application on soil pH, rice yield and heavy metal accumulation in paddy fields[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(35):15-18.
- [28] 罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):169-177. LUO L, PAN H B, ZHONG Q, et al. Effects of lime and organic fertilizer on acid soil of mango plantation and mango quality[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):169-177.
- [29] 张迪, 吴晓霞, 丁爱芳, 等. 生物炭和熟石灰对土壤镉铅生物有效性和微生物活性的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(11):2526-2534. ZHANG D, WU X X, DING A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(11):2526-2534.
- [30] 郝金才, 李柱, 吴龙华, 等. 铅镉高污染土壤的钝化材料筛选及其修复效果初探[J]. 土壤, 2019, 51(4):752-759. HAO J C, LI Z, WU L H, et al. Preliminary study on cadmium and lead stabilization in soil highly polluted with heavy metals using different stabilizing agents[J]. *Soils*, 2019, 51(4):752-759.
- [31] 骆文轩, 宋肖琴, 陈国安, 等. 田间施用石灰和有机肥对水稻吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):232-237. LUO W X, SONG X Q, CHEN G A, et al. Effects of applying lime and organic fertilizer on cadmium uptake by rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3):232-237.
- [32] 李顺奇. 几种有机肥对紫色土壤中铅和镉有效性的调控效应[D]. 重庆:西南大学, 2018. LI S Q. Effects of several organic manures on bioavailability of lead and cadmium in gray-purple soil[D]. Chongqing:Southwest University, 2018.
- [33] 杨林, 陈志明, 刘元鹏, 等. 石灰、活性炭对铬污染土壤的修复效果研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3):518-525. YANG L, CHEN Z M, LIU Y P, et al. Effects of lime and activated carbon on remedying chromium contaminated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3):518-525.
- [34] 汪毅, 王华静, 郑沈, 等. 3种钝化剂及其组合对小白菜镉含量的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12):151-158. WANG Y, WANG H J, ZHENG S, et al. Effects of different soil amendments on the uptake and accumulation of cadmium and lead in pakchoi (*Brassica chinensis*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(12):151-158.

(责任编辑:李丹)