

黄土掺混下pH、有机质与南方农业土壤重金属含量的相关性分析

陈东毅, 王平*, 李冬梅, 张瑞浩, 高丙英, 刘淑英

甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年5月30日; 录用日期: 2023年10月26日; 发布日期: 2023年11月1日

摘要

为能更好的了解北方黄土掺混下对南方农业土壤重金属污染的消减情况, 本试验拟以甘肃省定西市自然黄土与湖南省长沙市芙蓉区重金属污染土壤为研究对象, 设置两种土壤不同质量比例, 分别测定土壤pH、有机质含量与重金属Cd、Hg、Pb、Cr和As元素的全量及有效态含量, 对土壤污染情况进行分析评估并探讨三者与有效态含量间的相关性。研究结果显示: (1) 湖南芙蓉区农业土壤重金属污染情况为: 主要受到镉、铅和汞重金属元素的污染, 其中以铅超标最为严重, 三种重金属已经超过了对环境的要求, 须采取必要管控措施。(2) 土壤pH值、有机质含量与重金属有效态含量之间的关系: pH与有效态Cd、Pb含量呈极显著负相关, 与有效态Hg、Cr和As之间无明显相关性。SOM与有效态Cd、Pb和As含量呈明显的正相关, 与有效态Hg和Cr间相关性不明显。(3) 土壤重金属Cd、Pb全量与其有效量间呈极显著正相关关系, Hg全量与其有效量间呈显著正相关, 而Cr、As全量与其有效量的相关性为不显著。利用北方黄土掺混消减超标重金属的修复方法可为今后开展重金属污染修复工作提供基础的科学依据。

关键词

黄土, 重金属, 相关性分析

Correlation Analysis between pH and Organic Matter and Heavy Metal Content in Southern Agricultural Soil

Dongyi Chen, Ping Wang*, Dongmei Li, Ruihao Zhang, Bingying Gao, Shuying Liu

College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

Received: May 30th, 2023; accepted: Oct. 26th, 2023; published: Nov. 1st, 2023

*通讯作者。

文章引用: 陈东毅, 王平, 李冬梅, 张瑞浩, 高丙英, 刘淑英. 黄土掺混下 pH、有机质与南方农业土壤重金属含量的相关性分析[J]. 分析化学进展, 2023, 13(4): 410-417. DOI: 10.12677/aac.2023.134044

Abstract

In order to better understand the reduction of heavy metal pollution in agricultural soil in southern China under the mixing of northern loess, this experiment intends to take the natural loess in Dingxi City, Gansu Province and the heavy metal-polluted soil in Furong District, Changsha City, Hunan Province as the research object, sets up different mass ratios of the two soils, determines the soil pH, organic matter content and the full and effective state content of heavy metals Cd, Hg, Pb, Cr and As elements, analyzes and evaluates the soil pollution and explores the correlation between the three and the effective state content. The results of the study show that: (1) The heavy metal pollution of agricultural soil in Furong District, Hunan Province is mainly contaminated by cadmium, lead and mercury heavy metal elements, of which lead exceeds the standard is the most serious, and the three heavy metals have exceeded the environmental requirements, and necessary control measures must be taken. (2) Relationship among soil pH value, organic matter content and heavy metal effective state content: pH is negatively correlated with effective Cd and Pb content, and there is no obvious correlation between pH and effective Hg, Cr and As. SOM was positively correlated with the effective states Cd, Pb and As, but not with the effective Hg and Cr. (3) There was a significant positive correlation between the total amount of soil heavy metals Cd and Pb and their effective amount, the correlation between the total amount of Hg and its effective amount was significantly positive, while the correlation between the total amount of Cr and As and their effective quantity was not significant. The remediation method of using northern loess mixing to reduce excessive heavy metals can provide a basic scientific basis for the future remediation of heavy metal pollution.

Keywords

Loess, Heavy Metal, Correlation Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤重金属污染是当前农业社会极为关注的热点问题。土壤是农业生产中一种重要的自然资源,它既是环境和生态系统的重要组成部分,也是人类和陆生动植物赖以生存的物质基础[1]。土壤中的重金属不仅会使土壤的生产力下降,还会对植物的生长产生危害,还会造成地下水和农作物的污染,对土壤圈生态系统以及人体健康都会产生很大的潜在风险[2] [3] [4]。重金属指密度在 4.5 g/cm^3 以上,相对原子质量大于 55 的金属元素,常见的重金属元素有镉、汞、银、铜和铅等元素[1]。土壤重金属污染指由于人类的日常生产活动将重金属元素带入到土壤,致使土壤中重金属含量远远超过土壤元素背景值,造成生态环境质量极度恶化的现象[5],重金属超标污染的特征具体表现为:隐蔽性、富集性和持久性等[6]。

土壤 pH 值作为土壤化学性质的综合反映,它的动态变化不仅对植物养分供应有控制作用,从而对土壤质量产生影响,并且 pH 的变化还对土壤中重金属元素的存在形态和转化迁移过程产生一定的影响,它是重金属存在形态与转化迁移的重要限制因子[7]。有机质是指土壤中的动植物残留物以及由其分解而形成的各种有机碳源,有机物表面丰富的官能团以及它们分解产生的氨基酸等有机小分子化合物,可以

和重金属元素发生络合或吸附作用，减少了土壤溶液中重金属的含量，进而导致重金属的植物有效性降低[8]。目前，主要采用添加重金属钝化剂的方式来降低其对土壤的影响，但是，这些钝化剂的添加也会对土壤产生不同程度的污染。

因此，为了提高土壤的 pH 值，有效的降低重金属在土壤中的活化度，本项试验拟以甘肃省定西市自然黄土与湖南重金属污染土壤为对象，采用实验室基础理化性质测定、重金属含量测定等试验手段，系统分析不同组分比例下土壤 pH 值、有机质等指标与土壤中重金属有效量的相关关系，从而为湖南土壤重金属污染治理提供理论基础和借鉴。

2. 材料与方法

2.1. 供试土壤概况

供试土壤为定西黄土和湖南重金属污染土。黄土为黄土母质直接耕种而形成的幼年土壤，属于砂壤土[9]，采自定西市安定区南山，重金属污染土采自湖南省长沙市芙蓉区。实验用土采集完成后及时运输至实验室并去除土样中的残留根系和石块，经自然风干、磨细、去杂、过筛处理，过 0.25 mm 与 1 mm 筛以备化学分析与重金属含量测定。

2.2. 试验设计及方法

试验共设置 6 个处理：黄土与污染土质量比例分别为 0:10 (CK)、2:8 (T1)、4:6 (T2)、6:4 (T3)、8:2 (T4)、10:0 (T5)。每个处理设置 3 个重复。测定各处理的土壤 pH 值、土壤有机质与重金属全量、有效态含量。土壤 pH 测定采用电位法，土液质量比为 1:2.5；土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法[10]；土壤重金属全量采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HCl-HClO}_4$ 体系微波消解法[11]；土壤重金属有效态含量测定采用 DTPA-TEA- CaCl_2 复合体系浸提法[12]。重金属测定样品消解过滤完毕后，使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定各重金属元素含量。

2.3. 数据处理

采用 Excel2019 和 IBM SPSS 26.0 软件对不同处理之间 pH 值、土壤有机质、重金属全量与有效态含量测定值进行初步处理和回归分析。

3. 结果与分析

3.1. 土壤理化性质与重金属污染分析评估

3.1.1. 土壤 pH 值、有机质、重金属全量与有效态含量

供试土壤的 pH 值、有机质含量、重金属 Cd、Pb、Hg、Cr、As 元素全量及 Cd、Pb、Hg、Cr、As 元素有效态含量结果见表 1。从表 1 可看出，各处理组 pH 值随黄土添入比例的增加而逐渐升高，大小为： $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$ ，T5 最高为 8.20，较 CK 升高 1.84，SOM、重金属全量(Cd、Cr、Pb、Hg、As)随黄土添入比例增加，呈降低趋势，分别较 CK 降低了 $13.64\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.01\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $568.60\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $7.02\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.02\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $37.70\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 pH 值越大，土壤对重金属元素的吸附固定作用越强，致使重金属含量越低[13]。

3.1.2. 重金属污染情况分析评估

根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)，土壤污染风险筛选值与管制值见表 2、表 3。

Table 1. Soil pH, organic matter, total heavy metal and effective state content**表 1.** 土壤 pH 值、有机质、重金属全量及有效态含量

处理	pH 值	SOM/(g·kg ⁻¹)	重金属全量/(mg·kg ⁻¹)					有效态含量/(mg·kg ⁻¹)				
			Cd	Pb	Hg	Cr	As	Cd	Pb	Hg	Cr	As
CK	6.36	22.65	2.2000	650.0000	7.1203	0.0780	65.5000	1.3869	322.4640	0.0012	0.0027	0.0090
T1	7.34	22.48	1.7980	536.2833	5.7163	0.0746	57.9600	0.7462	240.5193	0.0012	0.1448	0.0160
T2	7.36	21.60	1.3960	422.5567	4.3117	0.0712	50.4200	0.6866	179.3397	0.0011	0.0094	0.0141
T3	7.81	17.91	0.9940	308.8433	2.9080	0.0678	42.8833	0.4660	108.7523	0.0011	0.0062	0.0130
T4	8.03	15.71	0.5920	195.1167	1.5043	0.0644	35.3433	0.3063	58.8833	0.0011	0.0673	0.0079
T5	8.20	9.01	0.1900	81.3967	0.1000	0.0610	27.8033	0.0156	3.6593	0.0011	0.0123	0.0010

Table 2. Screening values of soil pollution risk in agricultural land**表 2.** 农用地土壤污染风险筛选值

土壤 pH	土壤环境质量标准/(mg·kg ⁻¹)				
	镉	汞	砷	铅	铬
5.5 < pH ≤ 6.5	0.3	1.8	40	90	150
6.5 < pH ≤ 7.5	0.3	2.4	30	120	200
pH > 7.5	0.6	3.4	25	170	250

注：重金属与类金属砷按元素总量计。

Table 3. Soil pollution risk control values of agricultural land**表 3.** 农用地土壤污染风险管制值

土壤 pH	土壤环境质量标准/(mg·kg ⁻¹)				
	镉	汞	砷	铅	铬
5.5 < pH ≤ 6.5	2	2.5	150	500	850
6.5 < pH ≤ 7.5	3	4	120	700	1000
pH > 7.5	4	6	100	1000	1300

由表 1 中重金属全量与表 2、表 3 可以得出，污染土壤(CK)采集区域的土壤中镉、铅和汞等元素的全量全部严重超标，三种重金属全量分别超标了 1.10 倍、1.30 倍和 2.85 倍，土壤污染风险高，其中以汞全量超标最为严重，高达 185%，表明土壤采集区域及附近农田受汞污染最为严重；该区域类金属砷全量也有超标，可能存在土壤污染风险；铬全量相对于其他重金属元素含量较低，不存在污染风险。黄土采集区域的土壤中除类金属砷总量超标外，其余四种元素镉、汞、铅、铬全量都在污染风险阈值内，表明北方黄土重金属污染程度较小。

3.2. 土壤 pH 值与重金属有效态含量的相关性

供试土壤重金属有效态含量与 pH 值的关系结果见表 4。如表 4 中分析结果所示，土壤 pH 值与 Cd、Pb 元素有效量整体表现为极显著负相关关系($P < 0.01$)，也就是说 Cd、Pb 元素的生物有效性会随着土壤 pH 的增大而降低，这说明在一定的 pH 范围内，土壤中的镉络合离子与铅络合离子被固定率会显著提高。

章杰[14]等人的试验结果表明, 试验组土壤 pH 值与有效态 As、Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量呈负相关关系, 而对照组土壤 pH 值却与有效态 As、Cd、Pb 和 Zn 之间呈正相关关系, 可以得到土壤重金属有效量同时也存在土壤性质和特定水淹栽培方式的影响。相关分析表示 Hg、Cr 和 As 元素的有效态含量与土壤 pH 值的相关性为不显著($P < 0.05$), 即在一定的 pH 范围内, pH 值的变化对 Hg、Cr 和 As 有效态含量影响不大。

Table 4. Correlation coefficient between soil pH value and effective content of heavy metals

表 4. 土壤 pH 值与重金属有效态含量的相关系数

指标	R	相关系数
Cd	0.99	-0.696**
Pb	0.962	-171.457**
Hg	0.777	-21.399
Cr	0.078	0.007
As	0.381	-0.003

注: **代表在 $P < 0.01$ 水平相关性。

3.3. 土壤有机质与重金属有效态含量的相关性

土壤重金属有效态含量与有机质含量的相关分析结果如表 5 所示。

Table 5. Correlation coefficient of soil organic matter and heavy metals

表 5. 土壤有机质含量与重金属有效态含量的相关系数

指标	R	相关系数
Cd	0.852	0.075*
Pb	0.904	20.711*
Hg	0.634	10.796
Cr	0.250	0.003
As	0.848	0.001*

注: *代表在 $P < 0.05$ 水平相关性。

如表 5 相关分析显示, 供试土壤的土壤有机质含量与五种重金属有效量的相关关系均为正相关关系, 其中有机质含量与 Cd、Pb、As 元素有效量呈显著的正相关关系, 而与 Hg 和 Cr 元素有效量的相关性为不显著。李忠义等[15]的研究中显示, 土壤有效态 Cd、Pb 与土壤有机质之间存在着非常明显的正向关系, 这可能是因为土壤中的金属元素还受到其它性质, 如 pH 和土壤栽培方式的影响。

3.4. 土壤重金属全量与有效态含量的相关性

通过对上述 5 种重金属的全量与有效态含量进行相关回归分析后可得出两者之间的回归关系(如表 6 所示)。

从表 6 可以得出, 供试土壤中的 Cd、Pb 元素全量与其有效量之间呈极显著的正相关关系($P < 0.01$), 这与万红友[16]等人研究中的土壤中 Cu、Pb 元素全量与其有效量之间的关系结果相一致; Hg 元素的全

量与其有效量间为显著的正相关关系($P < 0.05$), 而供试土壤的 Cr、As 元素全量与其有效量的相关性不显著($P > 0.05$), 这同一些重金属全量与有效态含量不一定相关的研究结果[16] [17]相类似, 土壤中 Cr 全量与其有效态之间的相关性不显著, 可能是因为湖南农业土壤存在着耕作和排灌水等人为情况, 进而对二者关系会产生一定影响[14]。

Table 6. Correlation coefficient of total heavy metals in soil
表 6. 土壤重金属全量与有效态含量的相关系数

指标	R	相关系数
Cd	0.960	0.597**
Pb	0.997	157.038**
Hg	0.828	10.456*
Cr	0.178	0.013
As	0.642	0.005

4. 讨论

土壤 pH 值是决定土壤生物化学性质的重要因子[18] [19]。研究表明, pH 值越大, 土壤对重金属元素的吸附固定作用越强, 致使重金属有效态的含量越低[13]。本研究发现湖南地区的重金属污染土壤, 在添加了甘肃定西黄土后, 其 pH 值明显上升。土壤中重金属的活性与 pH 值密切相关, pH 值会显著影响其在土壤中的迁移转化、形态及有效性。pH 的改变会对土壤中的重金属离子活性产生影响, 在土壤 pH 值为 8 的时候, 土壤对重金属离子的吸附能力更强, 使其有效态的含量降低。纪艺凝等[20]研究, 将鱼骨粉施用到镉污染的土壤中, 会使土壤 pH 值升高, 而 pH 值与土壤中的 Cd 有效态含量之间存在着明显的负相关关系。王昆艳等人[21]在三七连作土壤上施加生物炭可以使得土壤 pH 值明显提升, 可以明显的使土壤中重金属的有效态含量降低到一定范围, 这与本试验研究结果较为一致。也有研究表明, 当土壤 pH 低于 6 时, 随着 pH 的提高, Cd 的生物可利用性提高, 但高于 6 时, Cd 的生物可利用性下降[22], 这是因为土壤 pH 值变化对重金属可利用性的影响可能不是单一的线性关系[23]。

有机质含量能够对土壤肥力、养分情况进行表征, 还能为作物提供养分, 同时还能对土壤的物理性状进行改善, 它也是土壤的重要属性之一[24]。此外, 土壤有机质拥有大量的吸附位点, 它能够对土壤中的重金属进行高效地吸附。但是, 伴随着土壤有机质的含量越来越高, 溶解性有机质也可能会随之增多, 它能够通过络合和螯合作用, 提升重金属的生物可利用性[25] [26] [27] [28]。在本研究结果中, 随着土壤有机质的降低, 土壤中 Cd、Pb、Hg 等重金属的有效赋存形式也显著降低, 表明土壤有机质对重金属具有较强的吸附与钝化作用, 有机质含量与重金属有效态含量呈正相关。Yin 等[29]的研究显示, 使用菜籽饼粕等有机物质, 可以减少土壤中的可溶性重金属含量和水稻中的重金属含量; 韦小了等[30]研究发现, 使用像鸡粪便这样的有机质也能减少稻米中的重金属含量, 与本研究结果较一致。但是, Zhao 等人[31]从 96 对土壤和稻米中研究发现, 土壤有机质含量和重金属有效性之间存在正向关系, 增加有机质含量有利于农作物对重金属的吸收, 与 Zeng 等[32]研究结果一致。因此, 通过调节土壤 pH 向弱碱的转变, 并科学、合理地利用土壤有机质, 可有效降低重金属在土壤中的赋存状态, 降低其对环境质量的影响。

5. 结论

通过对北方黄土与湖南重金属污染农田土壤两种原始土壤与混合土壤中镉、铬、砷、汞和铅重金属全量及其有效态含量、土壤 pH 值、有机质含量等的研究, 得到如下几方面结论:

1) 湖南芙蓉区农业土壤重金属污染情况为: 主要受到镉、铅和汞重金属元素的污染, 其中以铅超标最为严重, 三种重金属已经超过了对环境的要求, 须采取必要管控措施。

2) 土壤 pH 值、有机质含量与重金属有效态含量之间的关系: pH 与有效态 Cd、Pb 含量呈极显著负相关, 与有效态 Hg、Cr 和 As 之间无明显相关性。SOM 与有效态 Cd、Pb 和 As 含量呈明显的正相关, 与有效态 Hg 和 Cr 间相关性不明显。

3) 土壤重金属 Cd、Pb 全量与其有效量间呈极显著正相关关系, Hg 全量与其有效量间呈显著正相关, 而 Cr、As 全量与其有效量的相关性为不显著。

参考文献

- [1] 熊燕. 土壤质量和土壤重金属污染评价方法综述[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2021, 16(3): 92-95.
- [2] 高太忠. 土壤金属污染研究与治理现状[J]. 土壤与环境, 1999, 8(2): 12-16.
- [3] 陈怀满. 土壤-植物系统中重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [4] 成杰民, 潘根兴, 郑金伟. 太湖地区水稻土 pH 及重金属元素有效态含量变化影响因素初探[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 141-144.
- [5] 屈璐. 基于废弃蛋壳的矿区农田土壤重金属及酸化污染控制研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [6] 彭天玥, 王洁玲. 农田重金属污染现状、风险与管控对策研究[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 北京: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2021: 336-345+395.
- [7] 杨希, 岳晓岚, 李靖, 朱丹, 陈菊. pH 值对土壤重金属污染的影响及其准确测定[J]. 贵州地质, 2021, 38(4): 466-471.
- [8] 陈雪. 土壤中重金属的植物有效性研究综述[J]. 广东化工, 2022, 49(9): 86-88+91.
- [9] 王金晓, 胡斐南, 许晨阳, 赵世伟, 刘婧芳, 涂坤, 宋松松. 基于流变学法研究容重和含水率对土壤结构力学稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 147-155.
- [10] 鲍士旦, 杨超光, 徐国华, 等. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 33-91.
- [11] 田小利, 郑洋. 电热板-石墨消解-ICP 光谱法测定土壤中的铜[J]. 广东化工, 2017, 44(9): 256-257+236.
- [12] 谢飞, 谷子欣, 严妍. 二乙三胺五乙酸-三乙醇胺-硝酸钙体系浸取土壤中 8 种重金属有效态[J]. 冶金分析, 2020, 40(2): 12-17.
- [13] Kirkham, M.B. (2006) Cadmium in Plants on Polluted Soils: Effects of Soil Factors, Hyper Accumulation, and Amendments. *Geoderma*, **137**, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.024>
- [14] 章杰, 文勇立, 王永, 等. 种养结合循环利用模式下土壤重金属全量与有效态含量的相关分析[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2010, 36(6): 970-974.
- [15] 李忠义, 张超兰, 邓超冰, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1772-1776.
- [16] 万红友, 周生路, 陈杰, 等. 苏南经济快速发展区几种土壤重金属有效态含量影响因素: 以昆山市为例[J]. 农业科学与技术, 2009, 3(11): 28-32.
- [17] Mclaughlin, M.J., Zarcinas, B.A., Stevens, D.P., et al. (2000) Soil Testing for Heavy Metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**, 1661-1700. <https://doi.org/10.1080/00103620009370531>
- [18] Cambier, P., Michaud, A., Paradelo, R., et al. (2019) Trace Metal Availability in Soil Horizons Amended with Various Urban Waste Composts during 17 Years Monitoring and Modelling. *Science of the Total Environment*, **651**, 2961-2974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.013>
- [19] Harter, R.D. (1983) Effect of Soil pH on Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Nickel. *Soil Science Society of America Journal*, **47**, 47-51. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010009x>
- [20] 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.
- [21] 王昆艳, 王豪吉, 李双丽, 等. 施加生物炭对三七连作土壤铅有效态含量的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科

- 学版), 2019, 39(5): 53-57.
- [22] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999(1): 3-5.
- [23] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重, 等. 土壤中重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤, 2000, 32(6): 294-300, 314.
- [24] Hou, S., Zheng, N., Tang, L., *et al.* (2019) Effect of Soil pH and Organic Matter Content on Heavy Metals Availability in Maize (*Zea mays* L.) Rhizospheric Soil of Nonferrous Metals Smelting Area. *Environmental Monitoring and Assessment*, **191**, Article No. 634. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7793-5>
- [25] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学(自然科学学报), 2011, 34(4): 82-87.
- [26] 杜明阳, 赵秀兰. 土壤有机质与重金属迁移转化关系文献综述[J]. 南方农业, 2016, 10(17): 92-94.
- [27] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 183-186.
- [28] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004(6): 1083-1087.
- [29] Yin, B., Zhou, L., Yin, B., *et al.* (2016) Effects of Organic Amendments on Rice (*Oryza sativa* L.) Growth and Uptake of Heavy Metals in Contaminated Soil. *Journal of Soil and Sediments*, **16**, 537-546. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1181-8>
- [30] 韦小了, 牟力, 付天岭, 等. 不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累 Cd 及产量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 883-894.
- [31] Zhao, K., Liu, X., Xu, J. and Selim, H.M. (2010) Heavy Metal Contaminations in a Soil Rice System: Identification of Spatial Dependence in Relation to Soil Properties of Paddy Fields. *Journal of Hazardous Materials*, **181**, 778-787. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.081>
- [32] Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., *et al.* (2011) The Influence of pH and Organic Matter Content in Paddy Soil on Heavy Metal Availability and Their Uptake by Rice Plants. *Environmental Pollution*, **159**, 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.019>