



治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响

谷雨, 蒋平, 李明德, 吴海勇, 唐珍琦, 周峻宇, 李志明, 刘琼峰

引用本文:

谷雨, 蒋平, 李明德, 等. 治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 393–400.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AMF对铅锌矿区农田土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量的影响

张金秀, 湛方栋, 王灿, 李博, 李明锐, 何永美, 李元

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 727–735 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0186>

不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响

李顺江, 李鹏, 李新荣, 赵丽平, 马茂亭, 赵同科

农业资源与环境学报. 2015(3): 235–241 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0291>

施用腐植酸和生物肥对草莓品质、产量及土壤农化性状的影响

刘继培, 刘唯一, 周婕, 李桐, 赵跃, 张蒙

农业资源与环境学报. 2015(1): 56–61 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0205>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

潮土区菜田土壤肥力现状评价

王倩姿, 王书聪, 张书贵, 张静芝, 孙志梅, 马文奇, 薛澄

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 645–653 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0233>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谷雨, 蒋平, 李明德, 等. 治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 393-400.

GU Yu, JIANG Ping, LI Ming-de, et al. Effect of managed fallow on soil physicochemical properties and cadmium content in cadmium-contaminated paddy fields in “Changzhutan”[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 393-400.



开放科学 OSID

# 治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响

谷雨<sup>1</sup>, 蒋平<sup>2</sup>, 李明德<sup>1\*</sup>, 吴海勇<sup>1</sup>, 唐珍琦<sup>2</sup>, 周峻宇<sup>1</sup>, 李志明<sup>2</sup>, 刘琼峰<sup>1</sup>

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410126; 2. 湖南省土壤肥料工作站, 长沙 410006)

**摘要:**为探索治理式休耕对镉污染稻田的治理效果,在湖南“长株潭”镉污染稻田区域设置29个监测点,探讨对照(正常耕种)、一般休耕和治理式休耕对土壤理化性质、土壤养分状况、总镉及有效态镉含量的影响。结果表明:治理式休耕较不休耕对照土壤有效镉含量显著降低了20.60%,而不休耕对照和一般休耕处理间差异不显著。治理式休耕较不休耕对照土壤pH值显著提高了0.31个单位,并显著提高土壤交换性钙、镁含量15.34%和14.46%;治理式休耕还分别提高了土壤有机质、有效硫和有效硅含量15.45%、15.28%和10.44%。相关性分析表明,土壤有效态镉含量与土壤有机质含量和土壤pH值存在显著负相关关系。研究表明,治理式休耕可以有效治理酸性稻田镉污染,并能显著改善土壤酸化,调节土壤肥力,达到改土培肥的效果。

**关键词:**治理式休耕;镉污染;稻田;土壤理化性质;土壤肥力

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)03-0393-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0253

## Effect of managed fallow on soil physicochemical properties and cadmium content in cadmium-contaminated paddy fields in “Changzhutan”

GU Yu<sup>1</sup>, JIANG Ping<sup>2</sup>, LI Ming-de<sup>1\*</sup>, WU Hai-yong<sup>1</sup>, TANG Zhen-qi<sup>2</sup>, ZHOU Jun-yu<sup>1</sup>, LI Zhi-ming<sup>2</sup>, LIU Qiong-feng<sup>1</sup>

(1. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410126, China; 2. Hunan Soil and Fertilizer Station, Changsha 410006, China)

**Abstract:** This study aimed to explore the effect of control fallow on cadmium-contaminated paddy fields. Therefore, 29 monitoring points were set up in a cadmium-contaminated paddy area of “Changzhutan” in Hunan Province to explore the effects of normal cultivation (CD), general fallow (CS), and managed fallow (CV) conditions on the physicochemical properties of soil, its nutrient status, and whole and effective state cadmium content. The results showed that the soil effective cadmium content of CV decreased significantly by 20.60% compared with that of CD, but there was no significant difference between CD and CS. CV significantly increased the soil pH value by 0.31 units compared with CD; while the soil exchangeable calcium and magnesium contents were significantly increased by 15.34% and 14.46%. The managed fallow also increased the soil organic matter, effective sulfur, and effective silicon content by 15.45%, 15.28%, and 10.44%, respectively. Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between active state cadmium content in the soil, soil organic matter content, and soil pH. In summary, managed fallow can effectively control cadmium pollution in acidic rice fields and significantly alleviate soil acidification by adjusting soil fertility to achieve the required effect.

**Keywords:** managed fallow; cadmium pollution; paddy field; soil physicochemical properties; soil fertility

收稿日期: 2020-05-15 录用日期: 2020-06-23

作者简介: 谷雨(1986—), 女, 湖南长沙人, 硕士, 助理研究员, 从事土壤资源利用和农业生态环境研究。E-mail: 121328087@qq.com

\*通信作者: 李明德 E-mail: limingde460@sohu.com

基金项目: 湖南省财政资助项目(湘财农指[2017]153号, 湘财农指[2018]83号)

Project supported: Hunan Provincial Financial Project(Xiangcainong Index[2017]No.153, Xiangcainong Index[2018]No.83)

随着近代农业生产技术的革新和化肥的大量使用,农田遭到过度开发和超负荷耕种,这一方面提高了农业生产水平、增加了粮食产量,实现了我国粮食产量“十二”连增<sup>[1]</sup>;另一方面也造成了土壤肥力下降、土壤酸化及耕作层变浅等一系列土壤退化问题,严重制约我国农业的可持续发展。此外,农田土壤污染也是危害农业健康发展的严重障碍。目前,农田土壤镉污染已经成为全球性问题:①欧洲有数百万公顷的土地已遭受镉、汞、砷等重金属污染<sup>[2]</sup>;②日本约有7 000 hm<sup>2</sup>的农田遭到镉、铜等重金属的污染<sup>[3]</sup>;③我国现阶段受到镉、锰、汞等重金属污染的土地约有2×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,直接造成约10<sup>7</sup> t的粮食损失,经济损失高达2×10<sup>11</sup>元<sup>[4]</sup>。因此,治理农田土壤退化、控制农田土壤镉污染已迫在眉睫。

休耕作为一种使耕地休养生息的耕作制度,可以有效地调节土壤理化性质、改善土壤肥力<sup>[5-7]</sup>。国外学者 Eduardo 等<sup>[8]</sup>将休耕措施应用于坚果林,从而有效提高了坚果的生产力。Papatheodorou 等<sup>[9]</sup>则发现休耕措施改善了土壤微生物状况。而随着农业环境污染的加剧和现代农业发展的需要,休耕的内容和形式不断丰富,已有国外学者开始将农田重金属污染的治理措施和培肥措施与休耕相结合<sup>[10-11]</sup>。Baudh 等<sup>[12]</sup>通过休耕种植蓖麻有效治理了土壤重金属污染。近年来,我国也开始了对轮作、休耕制度及模式的探索:国务院2016年发布的《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》明确了我国轮作、休耕制度的工作试点,探索将治理式休耕应用于重金属污染区域的农田治理中。同时,诸多学者也对轮作休耕的补偿机制<sup>[13]</sup>、内涵意义<sup>[14]</sup>以及轮作休耕模式<sup>[14]</sup>开展了研究。当前,已有研究证明在稻田休耕期间,通过对耕地进行合理的养护和治理,可有效地调节土壤酸碱度和土壤物理特性,达到土壤保水保肥的效果<sup>[15]</sup>。但治理式休耕对污染稻田土壤镉含量及其生物有效性的影响,以及治理式休耕的治理机制和作用规律尚不明晰。

因此,本研究选取湖南省“长株潭”地区镉污染的农田作为研究对象,布设29个试验监测点,设置对照(正常耕种)、一般式休耕(仅休耕处理)和治理式休耕(休耕+治理措施)三组处理,通过土壤取样分析研究三种处理对土壤理化性质、土壤全镉含量及土壤有效态镉含量的影响,以为治理式休耕在镉污染农田的推广应用提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验在宁乡市、攸县、醴陵市、湘潭县、湘乡市六个县(市)共设置29个监测点,监测点详情见表1。上述6个县(市)均位于“长株潭”地区,该地区属亚热带季风性气候,温暖潮湿,是多种农产品和经济作物的生产地。

### 1.2 试验设计

试验始于2018年,于3月春耕前设置各监测点,每个监测点面积不低于1 000 m<sup>2</sup>,将各监测点平均划分成3个小区,重新做田埂分隔,田埂高、宽均在30 cm以上,覆盖包裹双层塑料薄膜并插入田面以下40 cm。3个小区分别为:对照处理(CD),按当地习惯种植双季稻,并按当地习惯进行常规管理;一般式休耕处理(CS),无治理措施休耕;治理式休耕处理(CV),休耕+施石灰+春季深翻耕+淹水管理+旋耕+种植绿肥,即春季在绿肥翻压时施石灰750~1 125 kg·hm<sup>-2</sup>并进行深翻耕,5—9月进行淹水管理,秋冬季旋耕后种植绿肥。试验期间其他田间操作一致,均按当地习惯方式进行。

### 1.3 土壤样品的采集与分析

本试验于晚稻收割后,按“S”取样法采集各监测点的混合土壤样品,将采集的土壤样品用样品袋密封保存,记录采集时间和地点后带回实验室。将土壤样品去除异物后自然风干,并分成三份分别研磨过10、60目和100目尼龙筛,制成待测样品备用。在采集样品的同时,于采样点使用环刀进行土壤容重样品采集,将样品带回室内测定质量后记录结果(测定标准为NY/T 1121.4—2006)。

土壤总镉测定采用王水提取-电感耦合等离子体质谱法测定(HJ 803—2016);土壤有效态镉采用DTPA浸提,火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T 23739—2009);土壤有效态铁、锰、铜、锌均采用DTPA浸提,原子吸收分光光度计测定(NY/T 890—2004);土壤有效硅、有效硫分别采用柠檬酸、磷酸盐-乙酸浸提,分光光度计测定(NY/T 1121.15—2006, NY/T 1121.14—2006);土壤交换性钙、镁均采用乙酸铵浸提,原子吸收分光光度计测定(NY/T 1121.13—2006)。土壤pH、土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾均按《土壤农化分析》方法进行测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据分析

试验数据使用Excel 2010进行统计与数据处理,

表1 “长株潭”地区休耕监测点基本信息

Table 1 Basic information of fallow monitoring points in “Changzhutan” area

点位编码 Number	监测点名称 Sample point name	经度 Longitude	纬度 Latitude	土类 Soil species
1	湖南省长沙市宁乡月塘村	111°55'49"E	28°01'00"N	河沙泥
2	湖南省株洲市攸县排山村	113°38'09"E	27°16'25"N	河沙泥
3	湖南省湘潭市湘乡市翻江镇南郑村	112°12'36"E	27°54'04"N	河沙泥
4	湖南省株洲市醴陵市玉皇阁村	113°17'04"E	27°38'47"N	黑黄泥田
5	湖南省株洲市攸县芷陂村	113°18'18"E	26°52'25"N	红黄泥
6	湖南省株洲市醴陵市森冲村	113°36'58"E	27°39'25"N	红沙泥
7	湖南省株洲市攸县东院	113°38'28"E	27°09'08"N	灰黄泥
8	湖南省株洲市攸县老漕	113°47'46"E	27°13'00"N	灰黄泥
9	湖南省株洲市醴陵市寨下村	113°27'05"E	27°44'11"N	灰黄泥
10	湖南省湘潭市湘乡市桂元村	112°10'09"E	27°54'45"N	冷浸沙田
11	湖南省株洲市攸县华裕村	113°17'39"E	27°18'39"N	麻沙泥
12	湖南省株洲市醴陵市李洲村	113°38'40"E	27°45'34"N	青隔红黄泥
13	湖南省湘潭市湘潭县双阳村	112°54'09"E	27°24'52"N	青隔黄泥
14	湖南省湘潭市湘潭县天石村	112°44'56"E	27°25'07"N	青隔黄泥
15	湖南省湘潭市湘乡市浏湾村	112°10'09"E	27°52'40"N	青隔黄泥
16	湖南省株洲市醴陵市彰仙村	113°26'26"E	27°47'24"N	青泥田
17	湖南省株洲市醴陵市清潭村	113°34'39"E	27°42'14"N	青紫泥
18	湖南省株洲市攸县潘塘村	113°18'38"E	26°55'29"N	熟红黄泥
19	湖南省株洲市醴陵市花桥村	113°22'03"E	27°40'25"N	熟红黄泥
20	湖南省株洲市醴陵市莲旗村	113°33'27"E	27°38'24"N	熟红黄泥
21	湖南省株洲市醴陵市温泉村	113°37'20"E	27°42'57"N	熟红黄泥
22	湖南省株洲市醴陵市申熙村	113°36'23"E	27°41'07"N	熟红黄泥
23	湖南省株洲市醴陵市新树村	113°41'27"E	27°49'22"N	熟红黄泥
24	湖南省株洲市攸县株形村	113°21'49"E	27°13'57"N	紫泥田
25	湖南省株洲市攸县高岭村	113°20'40"E	27°02'18"N	紫泥田
26	湖南省株洲市攸县谭桥社区	113°17'46"E	26°58'07"N	紫砂泥
27	湖南省株洲市攸县先锋村	113°26'35"E	27°00'10"N	紫砂泥
28	湖南省株洲市攸县田富村	113°26'35"E	27°05'30"N	紫砂泥
29	湖南省株洲市攸县铜坝村	113°15'48"E	27°00'32"N	紫砂泥

使用 Origin 9.0 进行作图,采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析(多重比较方法为 Duncan's 新复极差法),比较不同处理间差异的显著性水平( $\alpha=0.05$ )。相关性分析通过 R version 3.6.1(www.r-project.org)统计软件进行,采用 R 语言程序包 gpairs 和 Performance analytics 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 治理式休耕对土壤总镉和有效态镉含量的影响

土壤中总镉含量是评判土壤中重金属有效性和环境效益的基础,也是评价土壤受到镉污染程度的重要指标。而土壤中具有生物有效性且理化性质活泼的有效态镉则是土壤镉污染治理中的重中之重。本试验中,土壤总镉含量在 CD、CS 和 CV 三个处理间并

无显著差异,这是由于休耕和治理式休耕并不能影响土壤镉总量。而 CD、CS 和 CV 三个处理的土壤有效态镉平均含量分别为 0.199、0.187  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.158  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , CV 处理的土壤有效态镉显著低于 CD 处理(图 1)。说明在经过治理式休耕处理(即治理措施和休耕措施并用)后,土壤得到了充分的休息和调整,降低了土壤中有效镉的活性和生物有效性,土壤中有效态镉含量显著降低。这有力证明了治理式休耕对降低土壤镉的生物有效性和治理农田土壤镉污染的可行性。

### 2.2 治理式休耕对耕层土壤容重、pH 和阳离子交换量的影响

土壤容重(Bulk density, BD)和阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC)都是表征土壤保水保

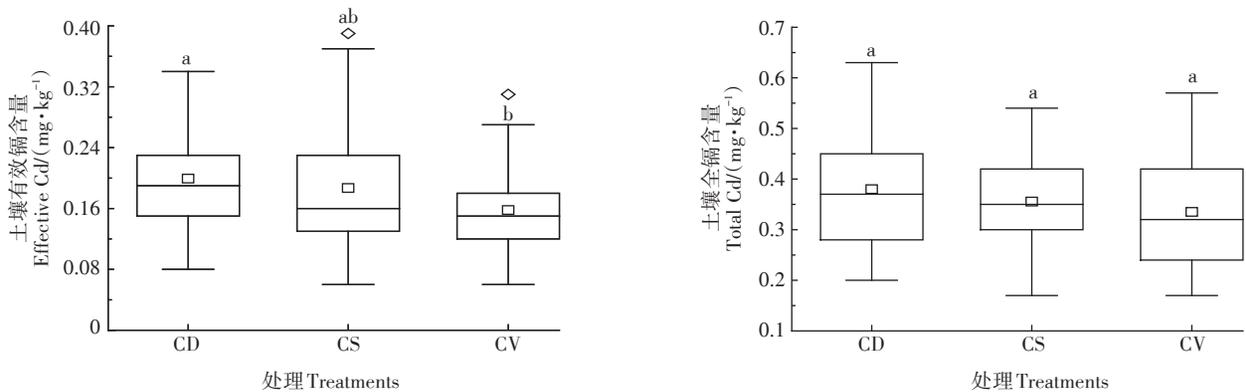
肥能力的重要指标。由图2可知,CD、CS和CV处理的土壤容重和CEC均无显著差异,而CV处理下的土壤pH值显著大于CD,但CS处理与CD、CV处理间的土壤pH均无显著差异。其中,CD、CS、CV处理的土壤容重均值分别为1.20、1.20、1.17 g·cm<sup>-3</sup>,尽管CD、CS、CV处理间的土壤容重均值无显著差异,但CS较CD处理中值低,而CV较CS、CD处理也有下降趋势。这表明休耕和治理式休耕都有利于降低土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤保水蓄肥能力。而CD、CS、CV处理的CEC均值分别为17.13、16.71、17.83 cmol·kg<sup>-1</sup>。CV较CS处理土壤CEC有升高趋势,表明治理式休耕更有利于提高土壤CEC,从而增强土壤保肥和重金属吸附能力。而CV处理下的土壤pH值显著高于CD,则表明治理式休耕不仅改善了土壤保水蓄肥能力,还有效提高了土壤pH值,改善了土

壤酸化。

### 2.3 治理式休耕对土壤养分及交换性钙、镁含量的影响

土壤有机质作为植物养分的主要来源,是表征土壤肥力状况的重要指标。本试验中,CD、CS和CV三个处理的土壤有机质均值分别为40.01、39.45 g·kg<sup>-1</sup>和46.19 g·kg<sup>-1</sup>,且CV处理下的土壤有机质均值显著大于CD和CS处理(图3),而尽管CS与CD处理间土壤有机质均值无显著差异,但CS处理的中值低于CD处理。表明普通休耕并不利于土壤有机质的增加,而治理式休耕可以有效地增加土壤有机质,调节土壤养分状况。此外,从图3中可知,CD、CS和CV三个处理下土壤的全氮、有效磷和速效钾均无显著差异。

钙、镁不仅是植物生长所需的重要营养元素,还是影响植物重金属累积的重要因素。本试验中,CD、CS、CV处理下的交换性钙和镁含量均值分别为



图中CD、CS、CV分别代表不休耕对照、一般式休耕和治理式休耕处理;箱体上、下边界,箱体中间横线与上、下方横线,箱体内正方形和箱体外菱形分别为上四分位数(75%分位数)、下四分位数(25%分位数)、中位数、上限[75%分位数+(75%分位数-25%分位数)×1.5]、下限[75%分位数-(75%分位数-25%分位数)×1.5]、均值和异常值。下同

The CD, CS, CV in the figure represent non-fallow control, general fallow and managed fallow treatment; The upper and lower boundaries of the box, the middle, upper and lower horizontal lines of the box, the square inside the box and the diamond outside the box represent the upper quartile (75% quantile), the lower quartile (25% quantile), the median, the upper limit [75% quantile + (75% quantile - 25% quantile) × 1.5], the lower limit [75% quantile - (75% quantile - 25% quantile) × 1.5], the mean and abnormal values, respectively. The same below

图1 对照、休耕和治理式休耕的土壤总镉及有效态镉含量

Figure 1 Total Cd and effective Cd content of control, fallow and managed fallow soils

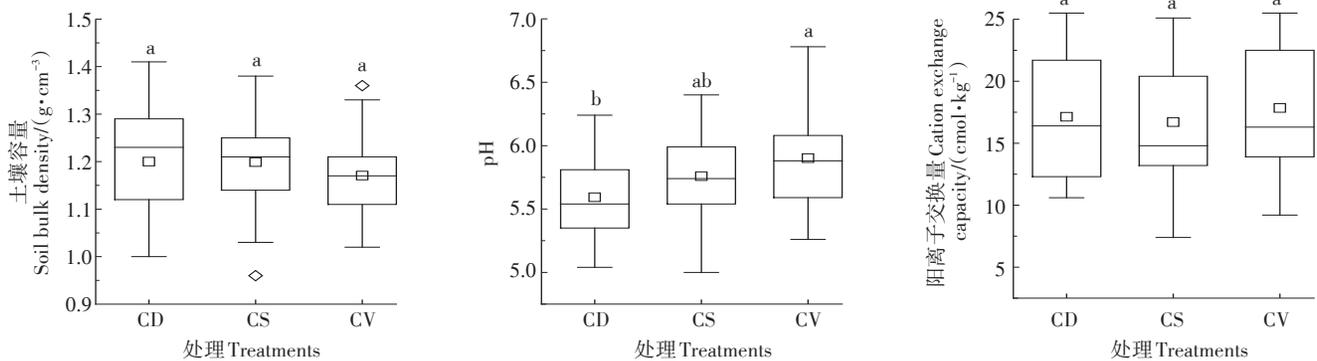


图2 对照、休耕和治理式休耕的土壤容重、pH和阳离子交换量

Figure 2 Soil bulk density, pH, and CEC of control, fallow and managed fallow

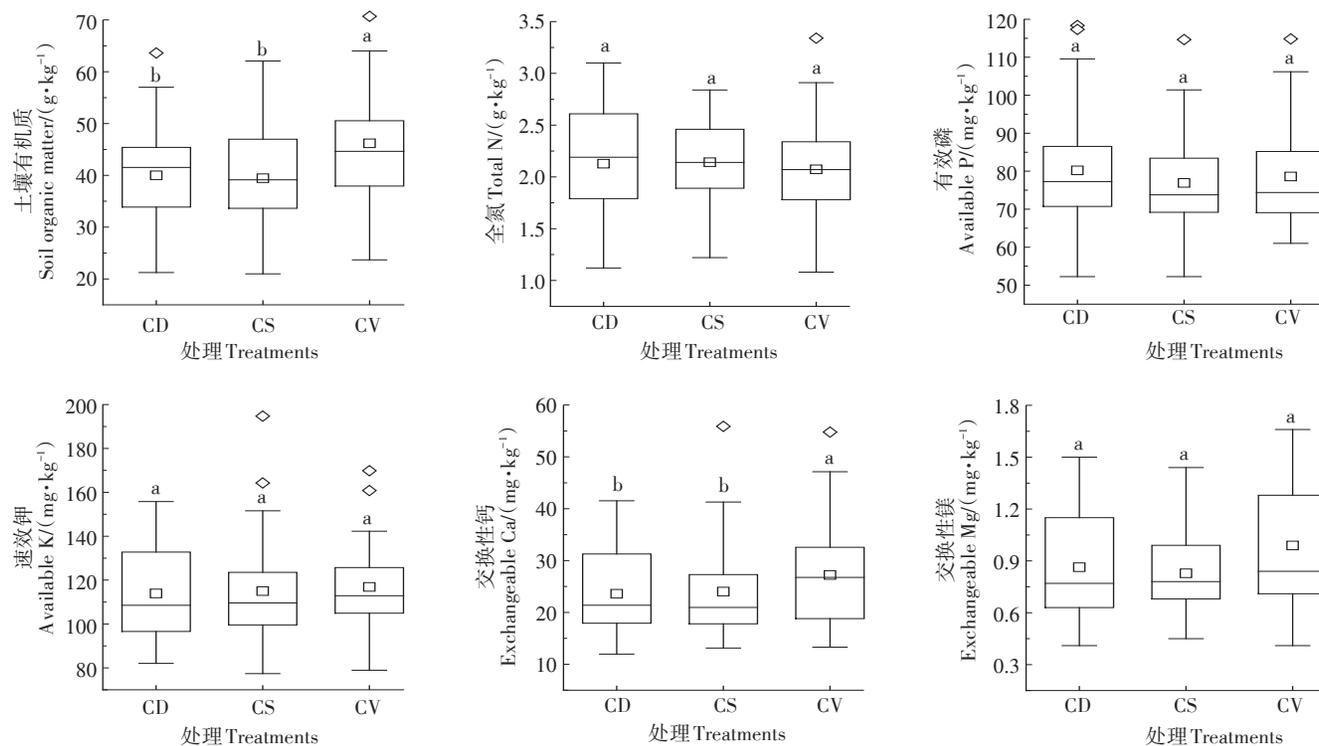


图3 对照、休耕和治理式休耕的土壤养分及交换性钙、镁含量

Figure 3 Soil nutrient and exchangeable Ca and Mg content of control, fallow and managed fallow

23.60、24.03、27.21  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.86、0.83、0.99  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图3)。其中, CV处理的交换性钙含量均值显著大于CD和CS处理。而CV处理下的交换性镁含量均值和中值也均大于CD和CS处理。表明治理式休耕不仅显著提高了土壤交换性钙含量, 对土壤交换性镁含量也有积极作用。因此, 治理式休耕可以通过提高土壤有机质和交换性钙含量, 有效改善土壤肥力。

#### 2.4 治理式休耕对土壤有效态矿质元素含量的影响

土壤矿质元素是表征土壤肥力的重要指标。由图4可知, CV处理的土壤有效态硫、硅含量显著大于CD处理, 尽管CV与CS处理间无显著差异, 但CV处理下有效态硫、硅含量的均值和中值均大于CS处理; 而CS处理的土壤有效态硫含量显著大于CD处理, 土壤有效态硅的均值和中值也大于CD处理, 但差异不显著。此外, CD、CS和CV处理的有效态铁、锰、铜、锌均无显著差异。以上结果表明, 治理式休耕较普通休耕处理更有效地提高了土壤有效态硫、硅含量, 增加了土壤部分矿质元素含量, 对改善土壤肥力具有积极作用。

#### 2.5 对照、休耕和治理式休耕土壤理化性质的相关性

本试验中, 治理式休耕对治理镉污染农田、降低土壤镉的生物有效性具有显著效果(图1)。而土壤中镉的赋存形态及生物有效性受到土壤各环境因子

的影响, 土壤有效态镉含量作为表征土壤镉活性的重要指标同样受到各个环境因子的调控。相关性分析(表2)表明, 土壤总镉与土壤理化性质之间并无显著相关性, 但土壤有效态镉含量与土壤pH值和土壤有机质含量呈显著负相关关系; 此外, 土壤有效态镉与有效铁、有效铜和有效锌含量之间存在显著正相关关系。而土壤有效态镉含量占土壤总镉含量的比例与土壤有机质含量存在显著负相关关系, 与有效铜含量存在显著正相关关系。这证明了土壤理化性质间存在相互影响, 尤其是土壤有机质含量和有效铜含量, 研究结果为治理土壤镉污染、降低土壤镉的生物有效性提供借鉴。

### 3 讨论

近年来, 为实现我国重金属污染农田的耕地资源可持续利用, 在我国农田重金属污染区域开展了治理式休耕(休耕+治理措施: 施用生石灰、深翻耕、种植绿肥)制度的探索, 以期控制农田重金属污染、调整农作物种植结构<sup>[14]</sup>。而治理式休耕不仅可以控制农田土壤中的镉污染, 同时还可以有效提高土壤pH值。本研究结果表明, 治理式休耕处理的土壤pH均值较不休耕对照和一般休耕分别上升了0.31、0.14个单位(图2)。这一方面归因于治理式休耕中撒施生石灰

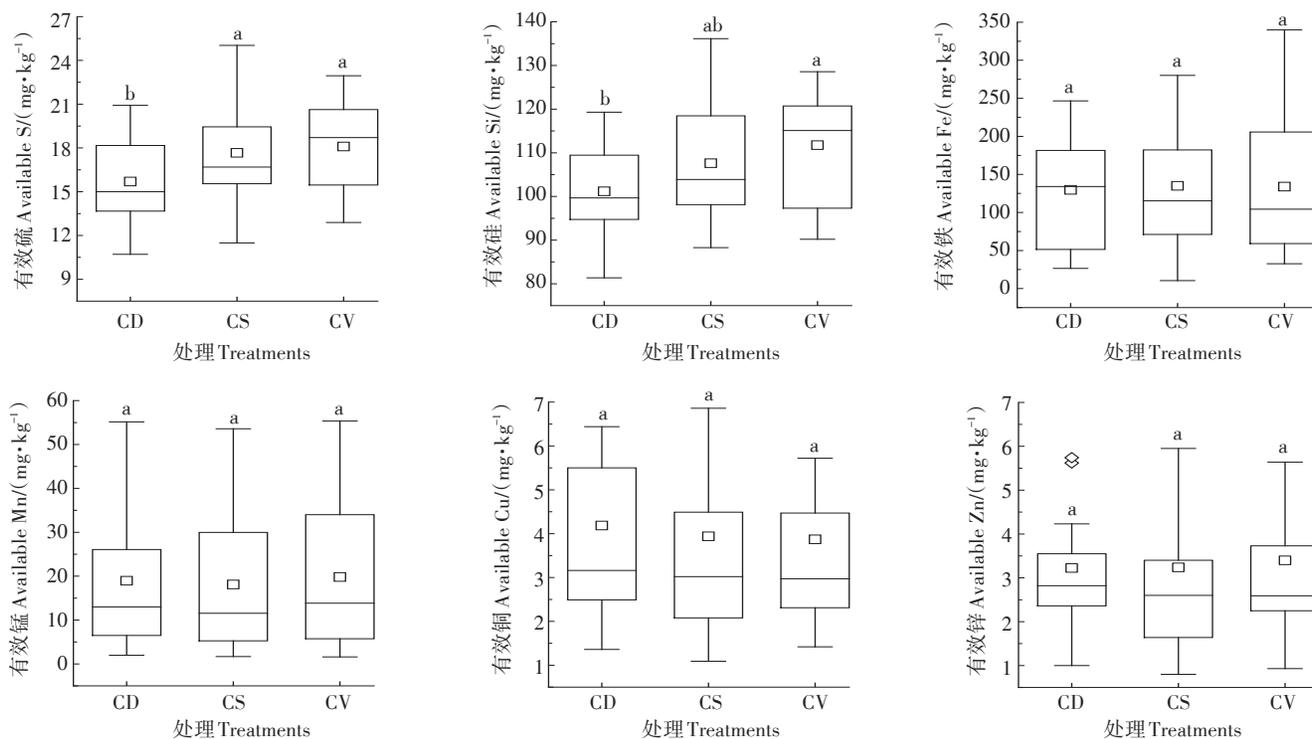


图4 对照、休耕和治理式休耕的土壤矿质元素含量

Figure 4 Soil mineral element content of control, fallow and managed fallow

表2 土壤总镉、有效态镉含量及其占比与土壤理化性质的相关性(*r*)

Table 2 Correlation between content and proportion of total cadmium, available cadmium and physicochemical properties of soil (*r*)

项目 Items	土壤总镉 Total Cd	土壤有效态镉 Available-Cd	有效态镉/总镉 Available-Cd/ Total Cd	项目 Items	土壤总镉 Total Cd	土壤有效态镉 Available-Cd	有效态镉/总镉 Available-Cd/ Total Cd
pH	-0.09	-0.46*	-0.29	交换性镁	0.23	-0.01	-0.10
容重	-0.12	-0.25	-0.13	有效硫	-0.21	0.09	0.19
阳离子交换量	0.04	-0.40	-0.33	有效硅	0.02	0.03	0.01
土壤有机质	0.10	-0.49*	-0.43*	有效铁	0.04	0.45*	0.29
全氮	0.19	-0.11	-0.21	有效锰	-0.19	0.22	0.38
有效磷	0.13	-0.24	-0.31	有效铜	0.06	0.67*	0.48*
速效钾	0.02	-0.27	-0.26	有效锌	0.19	0.66*	0.36
交换性钙	0.15	-0.04	-0.16				

注: \*表示相关性达到显著水平( $P < 0.05$ )。  
Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ).

等治理措施,石灰是提高土壤酸度和降低土壤植物重金属有效性的有效措施<sup>[17-19]</sup>,邓小华等<sup>[20]</sup>的研究表明,酸性土壤中施用生石灰可以有效提高表土pH值0.22个单位,Huang等<sup>[21]</sup>的研究证明了在酸性稻田连续4年施用生石灰可以有效提高土壤pH值0.57个单位。另一方面,治理措施中的种植绿肥措施也是影响土壤pH的重要因素,李艳等<sup>[22]</sup>的研究表明,在酸性土壤中种植豆科绿肥可显著提高土壤pH。因此,在我国南部地区酸性稻田进行治理式休耕可以有效提高土壤

pH,治理土壤酸化。

土壤CEC和交换性钙、镁含量是表征土壤阳离子交换性和酸碱缓冲能力的重要指标。本研究中,尽管治理式休耕土壤CEC含量并未显著增加,但仍有上升趋势。而治理式休耕较不休耕对照和一般休耕处理土壤交换性钙显著提高15.34%和13.28%,交换性镁含量提高14.46%和19.49%(图3)。孟赐福等<sup>[23]</sup>的研究也发现相似结果,施用生石灰显著增加了土壤中交换性钙、镁含量。这主要归因于治理式休耕中施

用生石灰等措施,生石灰中不仅含有大量氧化钙,还含有部分氧化镁,导致土壤钙、镁离子增加,从而提高了土壤中交换性钙、镁含量。因此,治理式休耕能有效提高酸性土壤中交换性钙、镁含量,增强土壤的缓冲能力。

土壤有机质是表征土壤肥力状况的重要指标。治理式休耕显著提高了土壤有机质含量,较不休耕对照和一般休耕处理分别显著提高了15.45%和17.09%(图3)。同时,治理式休耕还有效提高了土壤中的矿质营养元素硫和硅,有效硫和有效硅较不休耕对照处理显著提高了15.28%和10.44%(图4)。这主要归因于种植绿肥等治理措施,种植绿肥已被证明是提高土壤有机质含量、调节土壤肥力的有效举措<sup>[24]</sup>。种植绿肥为土壤提供的新鲜有机物,一方面为土壤带来了大量营养元素,从而增加了土壤部分矿质营养元素含量;另一方面,还促进了土壤养分循环,调节了土壤有机质的组成和结构特点,并有效提高了土壤微生物量碳、氮和土壤肥力<sup>[25]</sup>。此外,休耕措施还极大地减少了土壤耕层的人为扰动,减少了土壤养分的流失,并提高了自然水的利用率<sup>[26]</sup>。因此,治理式休耕可以有效提高土壤有机质含量、调节土壤养分状况、改善土壤水利用率,从而达到改土培肥的效果。

土壤有效态镉含量是表征土壤镉污染危害的直接指标。本研究结果表明,治理式休耕有效降低了土壤有效态镉含量,较不休耕对照和一般休耕处理分别下降20.60%和15.50%(图1)。而土壤有效态镉含量受多种土壤环境因子的影响<sup>[27]</sup>。通过相关性分析可知,尽管土壤总镉含量与土壤理化性质间无显著相关关系,但土壤有效态镉含量与土壤有机质含量、pH值之间呈显著负相关关系,且土壤有效态镉含量占总镉比例也与土壤有机质含量存在显著负相关关系(表2)。究其原因,单一的休耕措施并未将镉从土壤中运离,且土壤理化性质的变化未能转移土壤中的镉,因此土壤总镉与土壤理化因子间不存在显著相关性。而土壤有机质主要通过直接吸附、离子交换等作用促使土壤有效态镉与其结合形成有机结合态镉,从而降低土壤镉的活性态含量和生物有效性<sup>[28]</sup>。另一方面,土壤pH值被认为是影响植物吸收土壤中镉的关键环境因子,对土壤溶液中镉的溶解度和形态分布具有重要影响<sup>[29]</sup>。土壤pH值的升高增加了土壤胶体表面负电荷,从而提升土壤胶体对镉的吸附作用,降低土壤镉的生物有效性,进而导致土壤总镉和有效镉与土壤理化性质呈现出截然不同的相关性关系。

综上所述,治理式休耕通过撒施生石灰和种植绿肥等治理措施,提高了土壤有机质含量和pH值,从而有效降低了土壤有效态镉含量。

## 4 结论

(1)治理式休耕显著改善了土壤养分状况,显著提高了土壤有机质及多种矿质营养元素含量,达到了改土培肥的效果。同时,治理式休耕还显著提高了土壤pH值和土壤交换性钙、镁含量,从而有效调节土壤酸化,增强土壤的缓冲能力。

(2)治理式休耕通过影响土壤有机质含量和pH值等理化性质,显著降低了土壤有效态镉含量,有效减轻了农田土壤镉污染的危害。

(3)在“长株潭”地区开展的治理式休耕,不仅有效治理了农田土壤镉污染及土壤肥力退化,同时,为镉污染农田区域的休耕制度探索提供了借鉴经验。

### 参考文献:

- [1] 黄国勤, 赵其国. 轮作休耕问题探讨[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 357-362. HUANG Guo-qin, ZHAO Qi-guo. A discussion on land fallow rotation problem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2): 357-362.
- [2] Leštan D, Luo C L, Li X D. The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(1): 3-13.
- [3] 陈平, 陈研, 白璐. 日本土壤环境质量标准与污染现状[J]. 中国环境监测, 2003, 20(3): 63-66, 62. CHEN Ping, CHEN Yan, BAI Lu. Environmental quality standards for soil and state of soil pollution in Japan[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2003, 20(3): 63-66, 62.
- [4] 黄毅, 邓志英. 我国重金属污染区耕地轮作休耕存在的问题及对策——以湖南省为例[J]. 环境保护, 2019, 47(13): 22-26. HUANG Yi, DENG Zhi-ying. Problems and countermeasures on farmland rotation and fallow system in the heavy metal polluted region of China[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(13): 22-26.
- [5] Rasmussen P E, Parton W J. Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. inputs, yield, and soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(2): 523.
- [6] Styger E, Rakotondramasy H M, Pfeffer M J, et al. Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 119(3/4): 257-269.
- [7] 俞振宁, 谭永忠, 吴次芳, 等. 耕地休耕研究进展与评述[J]. 中国土地科学, 2018, 32(6): 82-89. YU Zhen-ning, TAN Yong-zhong, WU Ci-fang, et al. Progress review on land fallow[J]. *China Land Science*, 2018, 32(6): 82-89.
- [8] Eduardo S B, Karen A K, Wendell C, et al. Swidden fallow management to increase landscape-level Brazil nut productivity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 464: 118019.

- [9] Papatheodorou E M, Kapagianni P, Georgila E D, et al. Predictability of soil succession patterns under different agricultural land use practices: Continual conventional cultivation versus transformation to organic cultivation or fallow periods[J]. *Pedobiologia*, 2013, 56(4/5/6):233-239.
- [10] Pinto P, Fernández L M E, Piñero G, et al. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of southern South America? [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 248:48-57.
- [11] Onwonga R N, Lelei J J, Freyer B, et al. Short rain season fallow: Window of opportunity for integrating improved fallow legumes into the farming system of Molo District, Kenya[J]. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 2010, 5(2):10-18.
- [12] Baudhdh K, Singh K, Singh B, et al. *Ricinus communis*: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84:640-652.
- [13] 尹珂, 肖轶. 三峡库区消落带农户生态休耕经济补偿意愿及影响因素研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(9):1123-1129. YIN Ke, XIAO Yi. Empirical research on household willingness and its caused factors for economic compensation of eco-fallow in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges reservoir area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9):1123-1129.
- [14] 赵其国, 沈仁芳, 滕应, 等. 中国重金属污染区耕地轮作休耕制度试点进展、问题及对策建议[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(12):2003-2007. ZHAO Qi-guo, SHEN Ren-fang, TENG Ying, et al. Pilot progress, problems and countermeasures on farmland rotation and fallow system in the heavy metal polluted region of China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12):2003-2007.
- [15] 曹俏, 周清, 李志明, 等. 宁乡市治理式休耕对稻田耕层土壤肥力水平的影响[J]. *湖南农业科学*, 2018(8):37-39, 43. CAO Qiao, ZHOU Qing, LI Zhi-ming, et al. Effects of managed fallow on soil fertility level of paddy field in Ningxiang[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(8):37-39, 43.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. *Soil agro-chemical analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰对土壤pH及镉有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6):199-203, 208. ZHOU Xiang-yu, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effect of magnesium, manganese, activated carbon and lime on soil pH and available cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):199-203, 208.
- [18] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2):750-759.
- [19] Zhu H H, Chen C, Xu C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219:99-106.
- [20] 邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 等. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(9):1577-1587. DENG Xiao-hua, HUANG Jie, YANG Li-li, et al. The synergistic effect of lime, green manure and bio-organic fertilizer on restoration of acid field and improvement of tobacco production efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9):1577-1587.
- [21] Huang Y, Sheng H, Zhou P, et al. Remediation of Cd-contaminated acidic paddy fields with four-year consecutive liming[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 188:109903.
- [22] 李艳, 刘国道, 张如莲, 等. 施用热带豆科绿肥对砖红壤pH值的动态影响及其机制研究[J]. *土壤*, 2012, 44(1):101-106. LI Yan, LIU Guo-dao, ZHANG Ru-lian, et al. Dynamic effect on latosol pH value after leguminous green manure application and relevant mechanism[J]. *Soils*, 2012, 44(1):101-106.
- [23] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(2):129-136. MENG Ci-fu, FU Qing-lin, SHUI Jian-guo, et al. Effect of liming on acidity and exchangeable calcium and magnesium of red soil in central Zhejiang[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1999, 5(2):129-136.
- [24] Iqbal J, Hu R, Lin S, et al. CO<sub>2</sub> emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3/4):292-302.
- [25] 潘孝晨, 唐海明, 肖小平, 等. 不同耕作和秸秆还田模式对紫云英-双季稻土壤微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8):1585-1595. PAN Xiao-chen, TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of different soil tillage and returning crop residues systems on soil microbial biomass carbon and nitrogen under Chinese milk vetch and double-cropping rice field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(8):1585-1595.
- [26] Sun M, Ren A X, Gao Z Q, et al. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218(9):24-32.
- [27] 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 等. 连续4 a施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量[J]. *环境科学*, 2020, 41(4):1880-1887. XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, et al. Reduction of soil cadmium activity and rice cadmium content by 4-year-consecutive application of organic fertilizer[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4):1880-1887.
- [28] 王海波, 尚艺婕, 史静. 生物质炭对土壤镉形态转化的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4):22-26. WANG Hai-bo, SHANG Yi-jie, SHI Jing. Influence of biochar on the transformation of soil cadmium form[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4):22-26.
- [29] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1):84-91.