

李翔, 刘永兵, 程言君, 等. 稳定化处理对底泥利用后土壤重金属形态及蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1278-1285.
LI Xiang, LIU Yong-bing, CHENG Yan-jun, et al. Effects of stabilization on soil heavy metal fractions and vegetable heavy metal content under amendment with dredged river sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1278-1285.

稳定化处理对底泥利用后土壤重金属形态及蔬菜重金属含量的影响

李翔, 刘永兵*, 程言君, 臧振远, 罗楠, 王佳佳

(轻工业环境保护研究所 工业场地污染与修复北京市重点实验室, 北京 100089)

摘要: 采用小区试验, 研究了石灰+钙镁磷肥、海泡石+磷酸二氢钙以及钙镁磷肥 3 种不同稳定剂对底泥利用带来的重金属污染农田土壤的稳定化效果, 以及对空心菜、苦瓜、柿子椒和长豆角 4 种蔬菜吸收重金属的影响。结果表明, 3 种稳定剂均能有效降低重金属在土壤中的迁移性和生物有效性, 减少蔬菜对重金属的吸收。处理后土壤中的 Cd、Pb、Cu、Ni、Zn 的弱酸提取态含量均显著降低, 最大减少率分别为 40.95%、83.87%、67.22%、65.32% 和 71.61%, Cd 稳定化效果最好的处理是 LP(石灰+钙镁磷肥), 而综合所有元素稳定化效果最优的处理是 MP(钙镁磷肥)。处理组蔬菜可食部分中重金属含量均低于《食品中污染物限量》的相关限值, 重金属含量的最大减少率分别为 85.69%(Cd)、100.00%(Pb)、77.91%(Cu)、64.97%(Ni)、70.93%(Zn), 空心菜重金属含量减少最大的处理是 LP(石灰+钙镁磷肥), 3 种处理之间对减少苦瓜、柿子椒和长豆角重金属吸收的差异不显著。空心菜对重金属的平均富集系数大于苦瓜、柿子椒和长豆角。总体来讲, 稳定剂可以有效修复底泥利用带来的土壤重金属轻度污染, 确保种植蔬菜的食品安全性。重金属轻微污染或稳定化处理后的农田可以根据重金属种类、含量和有效性, 种植不同富集能力的蔬菜, 以保证其食品安全性。

关键词: 底泥利用; 土壤重金属; 稳定化; 蔬菜; 富集

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)07-1278-08 **doi:** 10.11654/jaes.2016.07.008

Effects of stabilization on soil heavy metal fractions and vegetable heavy metal content under amendment with dredged river sediments

LI Xiang, LIU Yong-bing*, CHENG Yan-jun, ZANG Zhen-yuan, LUO Nan, WANG Jia-jia

(Beijing Key Lab of Industrial Contamination and Remediation, Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China)

Abstract: A field experiment was carried out to investigate the effects of stabilization on heavy metal fractions in soil and heavy metal content in four different vegetables under agricultural applications of dredged river sediments. Results showed that all stabilization treatments reduced heavy metal content in vegetables by diminishing mobility and bioavailability of heavy metals in soils. Compared with the control, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn in acid extractable fraction were apparently reduced in the treated soil, with the maximal reduction rates of 40.95% for Cd, 83.87% for Pb, 67.22% for Cu, 65.32% for Ni, and 71.61% for Zn. The most effective treatment for soil Cd was LP(lime + calcium magnesium phosphate fertilizer), while the best for all other heavy metals was MP(calcium magnesium phosphate fertilizer). The maximal reduction of heavy metals in the edible parts of vegetables was 85.69% for Cd, 100.00% for Pb, 77.91% for Cu, 64.97% for Ni, and 70.93% for Zn. The content of all heavy metals in the plants met the national food safety standards (GB 2762—2012). LP showed the most effective-

收稿日期: 2015-12-09

基金项目: 海口市南渡江土地整治重大工程科研项目; 土地整治工程中底泥综合利用工程技术集成、优化及技术推广; 2014 年北京市科学技术研究院“科技萌芽计划”; 2015 年轻工业环境保护研究所公益院所改革与发展专项(2015A-5); 2016 年度北京市科学技术研究院“青年骨干计划”; 济源市土壤重金属污染农田修复试点项目(二标: 原位稳定化修复技术)

作者简介: 李翔(1986—), 男, 山东招远人, 助理研究员, 硕士, 主要从事污染场地修复方面的研究。E-mail: liepi_lixiang@163.com

* **通信作者:** 刘永兵 E-mail: liuyongbing21@163.com

ness to reduce Cd uptake by water spinach, whereas three treatments did not show difference in reducing heavy metal uptake by balsam pear, bell pepper and carob. Bioaccumulation factors of water spinach for heavy metals were greater than those of bell pepper, bitter melon, and carob. In conclusion, soil stabilization amendments could effectively control the heavy metal pollution caused by sediment applications, ensuring the vegetable safety. In order to secure safe vegetable production, vegetables with different accumulation capacities should be selected for planting in slightly polluted or stabilized farmland soil based on the species, concentrations and bioavailability of soil heavy metals.

Keywords: sediment utilization; soil heavy metal; stabilization; vegetable; accumulation

由于底泥对重金属等污染物的富集作用, 直接利用容易造成土壤污染, 限制了疏浚底泥的农业土地资源化利用。无害化处理可以减少重金属潜在污染风险, 降低底泥利用的生态风险^[1-3]。土壤中的重金属可以通过食物链进入人体, 对人体健康产生潜在的威胁。作物对重金属的吸收量, 主要取决于其在土壤中的总量和赋存形态, 如何使土壤中重金属的有效态向潜在有效态或无效态转化, 进而减少植物的吸收利用, 是重金属污染土壤原位稳定化修复技术的关键问题^[4]。

原位稳定化修复技术是向污染土壤中加入稳定剂, 通过调节和改变土壤的物理化学性质, 影响重金属离子与土壤组分和稳定剂的吸附、沉淀、氧化还原等作用, 降低土壤重金属的生物有效性和迁移性, 从而减轻重金属对生态环境的危害, 达到污染修复的目的。该技术因其成本低、操作易、见效快、不破坏土壤结构等优点在实际应用中最为广泛^[5]。经稳定化处理后的底泥能够实现无害化和资源化利用, 达到改良土壤、增加产量的目的。常用于农田重金属修复的稳定剂多以石灰、肥料、粘土矿物为主, 例如钙镁磷肥、有机肥、过磷酸钙、海泡石、膨润土、磷矿粉等。这些稳定剂在有效稳定重金属、降低有害元素植物毒性的同时, 还可以改良土壤的理化性质, 减少营养元素的淋失, 恢复其种植功能, 从而增加农作物产量和提高农产品安全性^[6-10]。

不同稳定剂降低重金属有效性的效果及机制有所差别, 磷酸盐类物质主要通过改变土壤 pH、与重金属形成溶解度小的金属磷酸盐等沉淀显著降低重金属的有效性; 石灰类主要是通过提高土壤 pH、与金属离子结合形成碳酸盐沉淀而降低重金属的迁移性; 海泡石等黏土矿物是土壤的主要组分之一, 主要通过离子交换、专性吸附或共沉淀反应降低土壤中重金属活性, 以达到稳定化修复目的^[9, 11-14]。钙镁磷肥、磷酸二氢钙、石灰和海泡石不仅能够有效钝化重金属, 改良土壤, 促进作物生长, 而且成本低廉, 多用于重金属污染

农田土壤的修复中^[9, 14]。

重金属的富集系数可用来衡量植物对土壤重金属的吸收情况。富集系数越大表明作物越容易吸收该元素, 也说明该元素的迁移性越强^[15-20]。经稳定化处理后的土壤, 重金属有效性减小, 作物对重金属富集系数也会减小, 食用安全性提高。作物对于不同重金属的富集系数也不同, 研究表明蔬菜中高富集元素有 Cu、Cd、Zn 等, 中等富集元素为 Hg、As、Cr 等, 而 Pb 则属于低富集元素^[15-16, 20-22]。不同品种的作物对重金属的富集系数差异显著, 因不同种类的蔬菜具有不同的生物学特征, 对重金属的吸收富集量明显不同^[20, 23]。

本文选取海南省海口市某轻微污染河塘底泥土地利用后的农田土壤为研究对象, 开展小区试验, 研究并探讨石灰+钙镁磷肥、海泡石+磷酸二氢钙和钙镁磷肥 3 种稳定剂对土壤进行稳定化处理的效果, 以及稳定化处理后种植的空心菜、苦瓜、柿子椒和长豆角 4 种蔬菜对土壤中重金属的吸收和富集特征, 以期为轻微污染底泥的土地利用筛选出适宜的稳定化材料和蔬菜品种, 并为底泥在农业土地利用后蔬菜安全生产中品种的选择提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集自海口市新坡镇, 为底泥土地利用后重金属污染的农田土壤。疏浚底泥来自于新坡镇下市村的河塘, 于 2012 年 12 月施用, 一次性用量为 $1000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 多次用旋耕机将底泥与土壤混匀。施用底泥后的农田土壤基本理化性质和重金属含量分别见表 1 和表 2。由表 2 可知, 供试土壤中 Cd 含量为标准限值的 2.23 倍, 其他元素含量均低于《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006) 规定的标准限值, 以内梅罗污染指数评价该土壤环境质量属于轻度污染 ($P_N=1.695$)。

稳定剂石灰购自海南省银鑫石灰厂、海泡石购自河北省易县宏科伟利海泡石厂、磷酸二氢钙购自福泉

表1 施用底泥后土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil applied with sediment

pH	土壤质地	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
5.64	砂土	23.37	1.29	0.87	14.82	115.62	111.16	76.39

表2 施用底泥后土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)Table 2 Heavy metal content of soil applied with sediment(mg·kg⁻¹)

重金属元素	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
污染土壤含量	71.33	33.78	47.25	98.25	0.67	40.11	11.22	0.20
《食用农产品产地环境质量评价标准》HJ/T 332—2006 标准限值	150	40	50	200	0.3	50	30	0.25

市洪亮化工有限责任公司、钙镁磷肥购自云南省昆明磷都钙镁磷肥厂。供试空心菜品种为泰国柳叶空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk, 产自泰国正大种子有限公司)、长豆角为泰国金龙长豆角(*Vigna unguiculata*, 产自汕头市金韩种业有限公司, 金船牌)、苦瓜为特选马来五号油绿苦瓜(*Balsam pear*, 产自海南苗丰种苗有限公司, 苗丰牌)、柿子椒为霸椒(*Capsicum annuum* L. var. *grossum*, 产自北京宏图种子有限公司)。

1.2 试验方法

稳定化修复田间试验步骤为: 土地平整→小区划分→稳定剂铺撒→旋耕混匀→干湿交替养护。参照《测土配方施肥技术规范(2011年修订版)》, 设置LP(石灰+钙镁磷肥)、SP(海泡石+磷酸二氢钙)、MP(钙镁磷肥)共3个稳定化处理和未撒稳定剂的对照处理SD。不同处理的稳定剂种类和用量见表3。相同处理分别设置4个小区种植不同的蔬菜, 每个小区宽4 m、长5 m, 面积为20 m²。每种处理的不同蔬菜的小区均设置3个重复, 共48个小区。播种、育苗、肥水、病虫害防治及采收均按照当地管理水平进行, 不同处理的种植管理条件相同。

1.3 样品采集与分析

蔬菜样品按梅花点法采集混合样, 每个小区设5个分点, 每个点的采样量不少于1 kg, 从多个点采集的蔬菜样, 按四分法进行缩分, 装入塑料袋, 粘贴标签, 扎紧袋口。由于是用鲜样进行测定, 空心菜采集时连根带土一起挖出, 用塑料自封袋封存, 防止萎蔫。采

回的新鲜样品放入冷库中保存。每个小区为1个采样区, 共采集蔬菜样品48个。

取蔬菜的可食部分用自来水洗净, 超纯水反复冲洗, 滤纸吸干水分, 四分法取500 g用粉碎机打成匀浆, 装袋贴标备用。称取匀浆5.000 0 g, 置于高硼硅玻璃三角瓶中, 加入5 mL 30%过氧化氢和20 mL HNO₃(均为优级纯)放置过夜, 瓶内置4粒玻璃珠防止暴沸, 瓶口置小玻璃漏斗, 于电热板上150 ℃消解至液体清亮, 自然冷却至室温, 用超纯水定容至50 mL, 待测。每个样品设置3个重复, 同时设置空白对照试验。消解液中的重金属含量使用ICP-MS检测。

土壤样品于蔬菜收获时同步采集。采用梅花点法采集混合样, 每个采样区设5个分点, 采集0~20 cm耕作层土壤不少于1 kg, 各分点土壤混匀后按四分法进行缩分, 作为供试土壤样品。每个小区为1个采样区, 共采集土壤样品48个。采集的土样进行风干、研磨、过100目尼龙筛, 研磨混匀后的样品装袋贴标备用。土样的前处理、消解和检测方法与文献[8, 24]中一致。消解液中的重金属含量使用ICP-MS检测。因土壤中重金属的浸出毒性和生物可利用性不仅与重金属的总量有关, 还与其赋存的化学形态密切相关^[25-26]。本文针对稳定前后污染农田土中的重金属进行BCR连续提取法形态分析, 来反映稳定化处理前后土壤重金属元素的形态变化^[27-28]。顺序提取出土壤中重金属的弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。提取液用ICP-MS测试重金属含量。

1.4 数据处理

蔬菜对重金属的富集系数计算公式为:

富集系数BCF (Bioconcentration Factor)=蔬菜可食用部分重金属含量/土壤重金属含量^[15-17]

实验数据采用Excel 2010计算处理, 并经过IBM SPSS Statistics 20.0软件进行One-way ANOVA单因素方差及多重比较(LSD)分析。

表3 稳定剂的种类和用量(kg·m⁻²)Table 3 Types and rates of stabilizers(kg·m⁻²)

处理 Treatments	石灰 Lime	钙镁磷肥 FCMP	海泡石 Sepiolite	磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂
对照 SD	—	—	—	—
处理 LP	0.60	0.60	—	—
处理 SP	—	—	0.60	0.60
处理 MP	—	1.20	—	—

2 结果与讨论

2.1 不同处理对土壤重金属形态的影响

重金属各形态含量变化从图1中可以看出,3种稳定剂能显著降低所有处理组土壤中Pb、Cd、Zn、Cu和Ni的弱酸提取态含量和大部分处理的可还原态含量,部分处理的可氧化态含量有所增加,所有处理重金属元素的残渣态含量均显著增加。土壤中Pb元素的弱酸提取态减少率大小顺序为MP>SP>LP,最大为83.87%,残渣态含量增加率最大为244.87%;Cd元素的弱酸提取态减少率大小顺序为LP>MP>SP,最大为54.43%,残渣态含量增加率最大为74.15%;Zn元素的弱酸提取态减少率大小顺序为MP>SP>LP,最大为71.61%,残渣态含量增加率最大为206.20%;Cu元素的弱酸提取态减少率大小顺序为MP>LP>SP,最大为67.22%,残渣态含量增加率最大为67.13%;Ni元素的弱酸提取态减少率大小顺序为SP>MP>LP,最大为65.32%,残渣态含量增加率最大为149.83%。

海泡石同时具有提高土壤pH值和增强吸附能力

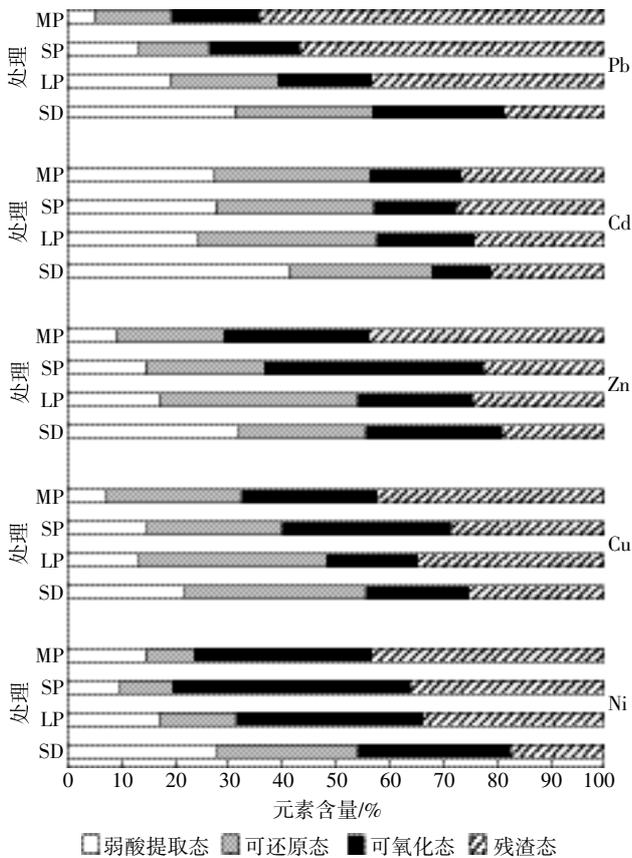


图1 稳定化处理前后重金属元素各形态含量的变化

Figure 1 Distribution of heavy metal fractions in contaminated soils before and after stabilization

的作用,能够有效稳定化重金属。梁学峰、王林等^[13,29]研究表明,海泡石与磷酸盐配合处理对土壤Cd稳定化修复效果最佳,要比海泡石单一处理效果显著。孙约兵等^[30]则发现,海泡石能够提高土壤pH值,使土壤中Cd和Pb由活性较高的可提取态向活性低的碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态以及残渣态转变,减少水稻体内各部分重金属含量,有效钝化修复Cd和Pb复合污染土壤。杨秀敏等^[31]研究发现,海泡石因具有较大的内、外表面积和较强的吸附能力,可以有效地与重金属发生离子交换作用和表面络合吸附作用,减少土壤中Cd和Pb的有效态含量,降低其迁移能力。氧化钙、氧化镁和钙镁磷肥中所含的Ca²⁺、Mg²⁺对重金属离子具有拮抗作用,参与竞争植物根系上的吸收点位,抑制植物对重金属的吸收。周世伟等^[32]研究发现钙镁磷肥等磷酸盐稳定重金属的反应机理有诱导重金属吸附、与重金属生成沉淀或矿物、磷酸盐表面直接吸附重金属,其对Cd的主要作用为表面络合吸附和共沉淀,对于Pb则以生成难溶的磷酸铅矿物为主,表面吸附为辅。陈晓婷等^[33]研究表明,钙镁磷肥处理能提高土壤的pH值,降低土壤中Cd、Zn、Pb、Cu等重金属的有效性,显著抑制其对小白菜的毒害、减少向地上部的迁移。本文与以上研究结果基本一致。

2.2 不同处理对蔬菜中重金属含量的影响

稳定化处理的底泥利用土壤中种植4种蔬菜的重金属含量见表4。所有稳定化处理组的蔬菜,Cd和Pb含量均低于《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中的相关限值(绝大部分样品中Cr、As和Hg含量都低于检出限,故未列出);除了对照组空心菜Cd含量为0.0573 mg·kg⁻¹以外,其他所有处理的所有蔬菜中重金属含量均低于《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)中的相关限量。

对于空心菜而言,除了Ni含量在处理组与对照组之间无显著差异以外,Cu、Zn、Cd和Pb含量3个处理组均显著低于对照组;减少空心菜吸收重金属最好的处理是LP(石灰+钙镁磷肥),其次是SP(海泡石+磷酸二氢钙)和MP(钙镁磷肥)。对于苦瓜而言,除了Cd的含量在处理组与对照组之间无显著差异以外,Zn、Ni、Cu和Pb含量3个处理组均显著低于对照组;减少苦瓜吸收重金属最好的处理是MP,其次是LP和SP。对于柿子椒而言,除了SP处理的Ni、Pb含量以及LP处理的Ni含量在处理组与对照组之间无显著差异以外,3种处理的重金属含量均显著低于对照组;减少柿子椒吸收重金属最好的处理是MP,LP和

SP 处理间差异不显著。对于长豆角而言,除了 LP 处理的 Zn 含量以外,3 种处理的重金属含量均显著低于对照组;减少长豆角吸收重金属最好的处理是 MP 和 SP,二者无显著差异,均优于 LP。

各处理间同种蔬菜中重金属含量对比表明,对于底泥利用后土壤重金属的稳定化处理效果显著,绝大部分处理组的蔬菜对重金属的吸收相对于对照组显著减少。原因在于稳定化处理降低了重金属在土壤中的有效态含量,减少了 4 种蔬菜对重金属的吸收。稳定剂添加前后,土壤重金属活性态含量变化明显,种植的蔬菜中叶菜类的空心菜重金属含量变化明显,与土壤重金属形态变化一致;但由于非叶菜类的苦瓜、柿子椒和长豆角的可食部分对低浓度的重金属富集较小,本研究中轻微污染的重金属的形态变化对这三者的重金属含量影响不大。底泥农用后的污染土壤经稳定化处理后,种植出的 4 种蔬菜中的重金属含量明显低于对照组蔬菜,且全部低于 GB18406.1—2001 和 GB 2762—2012 中的相关限值。因此,该底泥利用后的农田经稳定化处理后,能够降低蔬菜重金属超标的风险,保证种植蔬菜的食品安全性。

2.3 蔬菜对重金属富集特征的差异

本研究中 4 种蔬菜对稳定化处理后土壤重金属的富集系数见表 5。空心菜对几种重金属的平均富集系数大小顺序为 Cd>Ni>Cu>Zn>Pb;苦瓜对几种重金属的平均富集系数大小顺序为 Cu>Ni>Cd>Zn>Pb。柿子椒对几种重金属的平均富集系数大小顺序为 Cd>Cu>Ni>Zn>Pb;长豆角对几种重金属的平均富集系数大小顺序为 Cu>Zn>Ni>Cd>Pb;各元素的平均富集系数大小顺序为 Cd>Cu>Ni>Zn>Pb。由此可见,Cd、Cu、Ni、Zn 较易从土壤向蔬菜的可食用部分转移,属于高富集元素,Pb 则不易从土壤转移至蔬菜的可食用部分,属于低富集元素。这与许多研究的结论一致^[17-18,34-37]。

4 种蔬菜对 Cd、Cu 和 Ni 的富集能力大小为空心菜>柿子椒>苦瓜>长豆角,对 Zn 的富集能力大小为空心菜>柿子椒>长豆角>苦瓜,对 Pb 的富集能力大小为空心菜>苦瓜>柿子椒>长豆角。由此可见,叶菜类的空心菜可食用部分对 Cd、Cu、Ni、Zn、Pb 的富集能力均大于非叶菜类蔬菜的可食用部分^[17,37]。在实际修复工程中,经处理后的重金属污染农田种植前应进行作物品种调整,尽量避免种植重金属富集能力高的

表 4 不同稳定剂处理下不同蔬菜中重金属的含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Heavy metal content in different vegetables under different stabilization treatments(mg·kg⁻¹)

蔬菜种类 Varieties	处理 Treatment	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
空心菜	SD	0.911 2±0.001 0a	1.268 7±0.000 4a	2.257 0±0.005 9a	0.057 3±0.001 5a	0.072 8±0.000 2a
	LP	0.898 5±0.002 2a	0.280 2±0.006 0c	0.790 7±0.008 4c	0.008 2±0.000 4c	0.000 0±0.000 0b
	SP	0.792 2±0.000 9a	0.487 7±0.004 4b	0.656 1±0.004 7c	0.020 2±0.000 8b	0.000 0±0.000 0b
	MP	0.905 7±0.002 0a	0.640 3±0.000 8b	1.169 3±0.003 8b	0.017 3±0.000 4b	0.000 0±0.000 0b
苦瓜	SD	0.097 8±0.002 5a	0.926 6±0.018 7a	0.345 7±0.020 0a	0.003 4±0.000 7a	0.022 4±0.005 7a
	LP	0.068 4±0.005 4bc	0.792 0±0.013 1a	0.241 7±0.009 8b	0.002 2±0.000 5a	0.012 9±0.001 2b
	SP	0.080 2±0.001 2b	0.532 7±0.007 9b	0.267 9±0.016 8b	0.002 5±0.000 1a	0.010 9±0.002 1b
	MP	0.061 1±0.003 7b	0.544 1±0.009 8b	0.211 4±0.002 7b	0.002 1±0.000 7a	0.009 3±0.000 7b
柿子椒	SD	0.234 2±0.007 8a	1.206 9±0.018 7a	0.685 1±0.017 8a	0.017 4±0.003 3a	0.016 7±0.002 1a
	LP	0.215 8±0.010 0a	0.771 4±0.010 0b	0.537 3±0.012 5b	0.013 8±0.001 6b	0.006 4±0.001 1b
	SP	0.227 6±0.013 8a	0.707 8±0.014 6b	0.525 2±0.009 6b	0.013 6±0.002 1b	0.014 7±0.000 9a
	MP	0.152 3±0.009 7b	0.489 8±0.008 5c	0.326 1±0.011 4c	0.010 6±0.001 1c	0.001 7±0.000 1b
长豆角	SD	0.554 7±0.031 4a	0.960 6±0.031 1a	1.338 2±0.029 8a	0.004 9±0.000 7a	0.025 6±0.002 1a
	LP	0.348 3±0.024 0b	0.641 5±0.030 0b	1.036 2±0.037 1a	0.002 7±0.000 4b	0.000 5±0.000 0c
	SP	0.242 0±0.012 8bc	0.585 9±0.027 1b	0.672 7±0.025 6b	0.001 0±0.000 0b	0.000 4±0.000 0c
	MP	0.194 3±0.018 0c	0.611 4±0.018 5b	0.595 6±0.017 7b	0.001 7±0.000 0b	0.002 4±0.000 0b
《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中相关标准限值		—	—	—	0.2(叶菜蔬菜) 0.05(除叶菜蔬菜)	0.3(叶菜蔬菜) 0.1(除叶菜蔬菜)
《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)		—	—	—	0.05	0.2

注:表中同一蔬菜的同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);数值“0.0000”表示该处理的数据低于检出限,绝大部分样品中的 Cr、As 和 Hg 含量都低于检出限,故未列出。

表5 不同蔬菜对重金属的富集系数

Table 5 Bioconcentration factors of heavy metals in different vegetables

重金属 Metals	蔬菜种类 Varieties	对照组 SD	处理组 LP	处理组 SP	处理组 MP
Pb	空心菜	0.004 9±0.001 8a	0.000 2±0.000 0a	0.001 2±0.000 1a	0.002 5±0.000 4a
	苦瓜	0.000 7±0.000 0b	0.000 5±0.000 0a	0.000 4±0.000 0a	0.000 5±0.000 0b
	柿子椒	0.000 2±0.000 0b	0.000 5±0.000 0a	0.000 3±0.000 0a	0.000 2±0.000 0b
	长豆角	0.000 0±0.000 0b	0.000 0±0.000 0a	0.000 2±0.000 0a	0.000 0±0.000 0b
Cd	空心菜	0.116 8±0.002 5a	0.035 7±0.001 5a	0.050 5±0.002 4a	0.060 6±0.003 8a
	苦瓜	0.005 4±0.000 7c	0.005 4±0.000 4b	0.005 9±0.000 7c	0.005 1±0.000 2c
	柿子椒	0.028 6±0.001 1b	0.030 5±0.001 0a	0.028 6±0.002 0b	0.027 1±0.001 5b
	长豆角	0.000 9±0.000 0c	0.002 9±0.000 2b	0.003 3±0.000 2c	0.004 1±0.000 1c
Zn	空心菜	0.019 8±0.002 8a	0.014 4±0.001 0a	0.015 8±0.000 9a	0.049 1±0.002 9a
	苦瓜	0.006 0±0.000 7b	0.005 0±0.000 1b	0.004 9±0.000 5b	0.004 9±0.000 2c
	柿子椒	0.015 5±0.002 1a	0.006 7±0.000 3b	0.007 7±0.000 2b	0.013 4±0.001 5b
	长豆角	0.006 2±0.000 2b	0.011 0±0.001 5a	0.005 1±0.000 2b	0.012 9±0.002 1b
Cu	空心菜	0.058 4±0.005 0a	0.011 4±0.001 2a	0.012 6±0.001 0a	0.030 2±0.002 1a
	苦瓜	0.021 6±0.001 4b	0.018 3±0.001 0a	0.012 1±0.000 7a	0.018 3±0.001 8b
	柿子椒	0.024 5±0.002 7b	0.016 6±0.001 0a	0.016 9±0.001 2a	0.023 3±0.001 1ab
	长豆角	0.006 1±0.000 4c	0.012 7±0.000 0a	0.005 6±0.000 1b	0.012 0±0.000 9c
Ni	空心菜	0.034 2±0.003 4a	0.036 8±0.002 9a	0.038 5±0.002 5a	0.038 3±0.003 0a
	苦瓜	0.008 0±0.000 9c	0.008 5±0.000 8c	0.005 3±0.000 2b	0.009 1±0.000 9c
	柿子椒	0.013 2±0.001 0b	0.021 0±0.001 9b	0.009 6±0.000 9b	0.012 7±0.001 5b
	长豆角	0.003 4±0.000 0c	0.003 5±0.000 8c	0.003 2±0.000 3b	0.003 3±0.000 1c

注:表中同一元素的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

空心菜等叶菜类蔬菜,尽量选择种植低富集能力的蔬菜品种如苦瓜、柿子椒、长豆角等,以降低重金属污染风险,确保食品安全。

3 结论

(1)对于底泥利用后的重金属轻度污染土壤,3种稳定化处理均能够显著减少土壤中重金属的弱酸提取态含量,增加残渣态含量,从而降低了重金属的迁移性和生物有效性。其中,针对Cd稳定化效果最优处理为石灰+钙镁磷肥,所有元素的综合效果最优处理为钙镁磷肥。

(2)相对于对照组,3种稳定化处理均能够减少蔬菜对重金属的吸收,处理组蔬菜的重金属含量均明显低于对照组蔬菜,且达到《食品中污染物限量》和《无公害蔬菜安全要求》中的相关标准。其中,减少空心菜吸收重金属最好的处理是石灰+钙镁磷肥;3种处理对苦瓜、柿子椒和长豆角重金属吸收的减少量差异不显著。

(3)空心菜可食部分多数重金属的富集系数均大于苦瓜、柿子椒和长豆角。Cd、Cu、Ni、Zn较易从土壤向蔬菜的可食部分转移,Pb则不易转移。在重金属污

染的农田种植蔬菜时,可选择富集能力小的非叶菜类蔬菜;经稳定化处理后的污染土壤可明显降低叶菜类蔬菜重金属的富集能力,有利于保证蔬菜种植的安全性。

参考文献:

- [1] 刘永兵,李翔,刘永杰,等. 土地整治中底泥质耕作层土壤的构建方法及应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9):242-248.
LIU Yong-bing, LI Xiang, LIU Yong-jie, et al. Construction method and application effect on tillage layer soil by sediment in land consolidation engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9):242-248.
- [2] 刘永兵,贾斌,李翔,等. 海南省南渡江新坡河塘底泥养分状况及重金属污染评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3):213-224, 299.
LIU Yong-bing, JIA Bin, LI Xiang, et al. Characteristic of nutrients and evaluation of heavy metal contamination on sediments among Xinpo Pond, Nandu River in Hainan Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3):213-224, 299.
- [3] 卓志清,刘永兵,赵从举,等. 河塘底泥与岸边土壤粒径分形维数及其性状关系:以海南岛南渡江下游塘柳塘为例[J]. 土壤通报, 2015, 46(1):62-67.
ZHUO Zhi-qing, LIU Yong-bing, ZHAO Cong-ju, et al. Fractal dimension and characteristics of soil particle size in pond sediment and farmland soil: An example of Tangliu Pond at the lower reach of Nandu Riv-

- er, Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 62-67.
- [4] 刘丽娟, 董元华, 刘云, 等. 不同改良剂对污染土壤中 Cd 形态影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(9): 1778-1785.
LIU Li-juan, DONG Yuan-hua, LIU Yun, et al. Effects of various amendments on the fractions of cadmium in a polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1778-1785.
- [5] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1214-1222.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [6] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1241-1249.
LI Ping, WANG Xing-xiang, LANG Man, et al. Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [7] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3569-3576.
TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, et al. In situ immobilization of Pb and Cd in orchard soil using soil ameliorants[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10): 3569-3576.
- [8] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1946-1954.
LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing. Leaching behavior of Pb, Cd and Zn from soil stabilized by lime stabilized sludge[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1946-1954.
- [9] 丁永祯, 宋正国, 唐世荣, 等. 大田条件下不同钝化剂对空心菜吸收镉的影响及机理[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11): 1758-1763.
DING Yong-zhen, SONG Zheng-guo, TANG Shi-rong, et al. Mechanism and effects of different amendments on cadmium uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) in field conditions[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2011, 20(11): 1758-1763.
- [10] 林大松, 刘尧, 徐应明, 等. 海泡石对污染土壤镉、锌有效态的影响及其机制[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(3): 346-350.
LIN Da-song, LIU Yao, XU Ying-ming, et al. Effects of sepiolite on the immobilization of cadmium and zinc in soil[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(3): 346-350.
- [11] 陈炳睿, 徐超, 吕高明, 等. 6 种固化剂对土壤 Pb Cd Cu Zn 的固化效果[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1330-1336.
CHEN Bing-rui, XU Chao, LÜ Gao-ming, et al. Effects of six kinds of curing agents on lead, cadmium, copper, zinc stabilization in the tested soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1330-1336.
- [12] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1098-1105.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. Effects of different amendments and incubation times on exchangeable cadmium in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1098-1105.
- [13] 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.
LIANG Xue-feng, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. In-situ immobilization of cadmium and lead in a contaminated agricultural field by adding natural lays combined with phosphate fertilizer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1011-1018.
- [14] 韩君, 梁学峰, 徐应明, 等. 黏土矿物原位修复镉污染稻田及其对土壤氮磷和酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(11): 2853-2860.
HAN Jun, LIANG Xue-feng, XU Ying-ming, et al. In-situ remediation of Cd-polluted paddy soil by clay minerals and their effects on nitrogen phosphorus and enzymatic activities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(11): 2853-2860.
- [15] 施泽明, 倪师军, 张成江. 成都城郊典型蔬菜中重金属元素的富集特征[J]. *地球与环境*, 2006, 34(2): 52-56.
SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang. The characteristics of heavy metal enrichment in representative vegetables in Chengdu[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2): 52-56.
- [16] 王玉宏, 李保同, 汤丽梅. 3 种作物对添加外源性 Cu、Zn 的土壤中 Cu、Zn 的富集与转运[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 250-256.
WANG Yu-hong, LI Bao-tong, TANG Li-mei. Bioconcentration and translocation of Cu and Zn by three crops grown in exogenous Cu and Zn added soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 250-256.
- [17] Song N H, Zhang S, Hong M, et al. Impact of dissolved organic matter on bioavailability of chlorotoluron to wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(3): 906-912.
- [18] Wei J L, Lai H Y, Chen Z S. Chelator effects on bioconcentration and translocation of cadmium by hyperaccumulators, *Tagetes patula* and *Impatiens walleriana*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 84(1): 173-178.
- [19] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3): 305-311.
- [20] 方凤满, 汪琳琳, 谢宏芳, 等. 芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1471-1476.
FANG Feng-man, WANG Lin-lin, XIE Hong-fang, et al. Enrichment characteristic and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Sanshan District, Wuhu City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1471-1476.
- [21] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1349-1354.
ZHENG Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Transfer characteristics of mercury, lead, cadmium, zinc and cuprum from soil to vegetable around zinc smelting plant[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1349-1354.
- [22] 张妍, 崔晓勇, 罗维, 等. 小白菜对猪粪中高 Cu 和 Zn 的富集与转运[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1482-1488.

- ZHANG Yan, CUI Xiao-yong, LUO Wei, et al. Bioconcentration and translocation of Cu and Zn by *Brassica sinensis* L. planted in high Cu and Zn contaminated pig manure-applied soils[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1482-1488.
- [23] Zurera-Cosano G, Moreno-Rojas R, Salmeron-Egea J, et al. Heavy metal uptake from greenhouse border soils for edible vegetables[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, 49:307-314.
- [24] 李翔, 刘永兵, 程言君, 等. 稳定化处理对底泥利用后土壤 Cd 形态及空心菜 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2):282-287.
- LI Xiang, LIU Yong-bing, CHENG Yan-jun, et al. Effects of chemical stabilization on soil Cd fractions and water spinach Cd contents after amendment with dredged river sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):282-287.
- [25] 章骅, 何晶晶, 吕凡, 等. 重金属在环境中的化学形态分析研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(1):130-137.
- ZHANG Hua, HE Pin-jing, LÜ Fan, et al. A review on the methods for investigating heavy metal speciation in environmental chemistry[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1):130-137.
- [26] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. *生态环境*, 2007, 16(5):1551-1556.
- LEI Ming, LIAO Bo-han, QIN Pu-feng. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5):1551-1556.
- [27] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1):57-61.
- [28] 李华, 司马菁珂, 罗启仕, 等. 危险废物焚烧飞灰中重金属的稳定化处理[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(10):3740-3746.
- LI Hua, SIMA Jing-ke, LUO Qi-shi, et al. Stabilization of heavy metals in hazardous waste incineration fly ash[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10):3740-3746.
- [29] 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.
- WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(2):314-320.
- [30] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(12):4720-4726.
- SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, et al. Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: Remediation potential and soil environmental quality[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12):4720-4726.
- [31] 杨秀敏. 重金属复合污染土壤的粘土矿物与生物综合修复技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2009.
- YANG Xiu-min. Clay minerals and biology combined remediation for contaminated soil with heavy metals[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2009.
- [32] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(7):3043-3050.
- ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang. The progress in phosphate remediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7):3043-3050.
- [33] 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.
- CHEN Xiao-ting, WANG Guo, LIANG Zhi-chao, et al. Effects of calcium magnesium phosphate and silicon fertilizer on the growth and element uptake of pakchoi in cadmium, lead and zinc contaminated soil[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2002, 31(1):109-112.
- [34] Azpiazua M N, Romero F, Diaz J M. Metal distribution and interaction in plant cultures on artificial soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, 28(1/2):1-26.
- [35] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill(Hunan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1-3):153-166.
- [36] 邱喜阳, 许中坚, 史红文, 等. 重金属在土壤-空心菜系统中的迁移分配[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(6):187-192.
- QIU Xi-yang, XU Zhong-jian, SHI Hong-wen, et al. The transfer and distribution of heavy metals in soil-swamp cabbage systems[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(6):187-192.
- [37] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3):289-292.
- ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Hai-yan, et al. Research on factors influencing concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):289-292.