

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

李翔¹, 刘永兵^{1*}, 程言君¹, 罗楠¹, 臧振远¹, 吴军², 洪文良², 沈来新³

(1.轻工业环境保护研究所, 北京 100089; 2.海口市土地整治重大工程领导小组, 海口 570312; 3.北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要:采用大田试验,研究了石灰+钙镁磷肥、海泡石+磷酸二氢钙、单独使用钙镁磷肥3种不同的稳定剂组合对底泥土地利用后造成污染的农田土壤中Cd的稳定化处理效果以及对空心菜吸收Cd的影响。结果表明,3种稳定剂组合均能有效改变土壤中Cd的形态分布,弱酸提取态含量最大减少率54.43%,可还原态含量最大增加率81.90%,可氧化态含量最大增加率107.43%,残渣态含量最大增加率74.15%,稳定化效果明显。稳定化处理组的空心菜Cd含量显著低于对照组,减少率为38.61%~85.69%,且达到无公害蔬菜安全要求。不同污染水平下,稳定剂对空心菜中Cd浓度减少率的影响程度均为石灰+钙镁磷肥>钙镁磷肥>海泡石+磷酸二氢钙,与对土壤Cd弱酸提取态含量减少的影响一致。总体上讲,稳定剂可以有效修复轻微污染底泥利用带来的土壤Cd污染,确保种植空心菜的安全性。

关键词:底泥利用;镉;稳定化;形态分析;空心菜

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0282-06 doi:10.11654/jaes.2015.02.011

Effects of Chemical Stabilization on Soil Cd Fractions and Water Spinach Cd Contents After Amendment with Dredged River Sediments

LI Xiang¹, LIU Yong-bing^{1*}, CHENG Yan-jun¹, LUO Nan¹, ZANG Zhen-yuan¹, WU Jun², HONG Wen-liang², SHEN Lai-xin³

(1.Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 2.Haikou City Major Land Arrangement Project Leading Group, Haikou 570312, China; 3.Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: In situ stabilization is a low-cost, simple-operation and fast-effectiveness technique for remediating heavy metals-contaminated soils. In this study, a field trial was carried out to investigate the stabilization effects of three different amendment treatments (lime + calcium magnesium phosphate fertilizer, sepiolite + calcium dihydrogen phosphate, and calcium magnesium phosphate fertilizer alone) on soil Cd forms and bioavailability. The effectiveness of the treatments was evaluated by soil Cd fractions and Cd contents in water spinach. Results showed that amendments changed Cd fractions in treated soil. Compared with the control, the maximum reduction of acid extractable Cd fraction was 54.43%, while the increase percentages were as high as 81.90% for reducible fraction, 107.43% for oxidizable fraction, and 74.15% for residual fraction. Water spinach Cd contents were 38.61% to 85.69% lower in the stabilization treatments than in control, meeting the safety requirements for non-pollution vegetables. For all Cd levels, the reducing effect of stabilizers on water spinach Cd content was lime + calcium magnesium phosphate fertilizer > calcium magnesium phosphate fertilizer > sepiolite + calcium dihydrogen phosphate, which was consistent with acid extractable Cd in soil. In conclusion, soil amendments could effectively control the Cd pollution caused by sediment applications, ensuring the food safety of water spinach produce.

Keywords: sediment utilization; cadmium; stabilization; chemical fractionation; water spinach

收稿日期:2014-08-27

基金项目:海南省海口市南渡江流域土地整治重大工程科研项目:底泥应用试验示范工程监测与应用效果评价;2014年轻工业环境保护研究所公益院所改革与发展专项;2014年北京市科学技术研究院萌芽计划“石灰干化污泥对重金属稳定化作用机理及应用研究”

作者简介:李翔(1986—),男,山东招远人,硕士,助理研究员,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

河塘底泥富含氮磷钾和有机物,是土地利用的理想资源,但由于其中富集重金属等污染物,造成利用后土壤污染,限制了底泥的资源化利用。在进行底泥农业土地应用前应该对底泥进行修复,减少重金属潜在的污染风险,提高底泥利用的安全性^[1]。Cd 是人体和动植物的非必需重金属元素,可通过食物链进入人体,累积达一定量后会危害人体健康。人体 Cd 的积累主要来自于食物链,而食物中 Cd 主要来源于土壤^[2]。作物对 Cd 的吸收量,主要取决于 Cd 在土壤中的赋存形态,如何使土壤中有效态 Cd 向潜在有效态或无效态转化,进而减少植物的吸收利用,是 Cd 污染土壤原位修复技术的关键问题^[3]。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。

国内外修复 Cd 污染土壤的技术很多,其中原位稳定化技术具有成本较低、操作简单、见效快且不破坏土壤结构等优点,在实际应用中最为广泛^[4]。该修复技术通过向污染土壤中人为加入稳定剂,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可迁移性,从而减轻重金属对生态环境的危害,达到污染修复的目的。该技术在重金属污染土壤的修复工作中已取得了一些初步的成效^[5]。石灰、海泡石、钙镁磷肥、硅肥、泥炭等稳定剂在 Cd 污染土壤修复上的研究表明,稳定剂的应用能够使土壤有效态 Cd 向潜在有效态或无效态转化,减少其生物有效性,从而达到稳定化修复的目的^[5-10]。有关河塘底泥土地利用后稳定化处理对 Cd 形态变化影响、稳定剂调配的研究及种植空心菜评价稳定化效果等方面的研究较少。

本研究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为研究对象,开展大田试验,研究并探讨石灰+钙镁磷肥(LP)、海泡石+磷酸二氢钙(SP)和单独使用钙镁磷肥(MP)3 种稳定剂组合对土壤中 Cd 的稳定化效果及对空心菜吸收 Cd 的影响。利用 BCR 顺序提取法分析土壤稳定化前后 Cd 形态的变化,并比较不同稳定化处理下空心菜中 Cd 含量

的变化,以评价 Cd 的稳定化效果,为治理 Cd 污染农田遴选出适宜的稳定化材料提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的污染土壤采集自海口市新坡镇,疏浚底泥土地利用后轻微污染的农田。随着底泥用量的增加,土壤中 Cd 含量逐渐增加,依次为低浓度、中浓度和高浓度。污染土壤的基本理化性质见表 1,其中重金属含量见表 2。数据表明,3 个污染水平的农田土中,只有 Cd 元素含量超标。低、中、高浓度土壤 Cd 含量分别为标准限值的 1.10、1.57 倍和 2.23 倍。3 个污染水平土壤中 Cd 的 BCR 法形态分析结果见图 1,Cd 的弱酸提取态含量较高,分别为 47.58%、55.22%和 41.25%,说明其生物有效性和植物可吸收性较强,用作蔬菜种植前需进行稳定化修复处理。

供试稳定剂分别为:石灰(海南省银鑫石灰厂)、海泡石(河北省易县宏科伟利海泡石厂)、磷酸二氢钙(福泉市洪亮化工有限责任公司)、钙镁磷肥(云南省昆阳磷都钙镁磷肥厂)。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤稳定化处理

Cd 污染农田土壤稳定化修复的田间试验步骤为:土地平整→小区划分→稳定剂铺撒→旋耕混匀→干湿交替养护。不同处理的稳定剂种类和用量见表 3,相同污染水平土壤不同处理的稳定剂用量保持一

表 2 施用底泥后农田土重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 Contents of heavy metals in soils amended with sediments(mg·kg⁻¹)

浓度	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
低浓度	28.55	16.43	35.85	33.98	0.33	13.59	1.05	0.06
中浓度	45.25	21.22	41.89	61.24	0.47	28.15	4.58	0.17
高浓度	71.33	30.78	47.25	98.25	0.67	40.11	11.22	0.24
限值	150	40	50	200	0.3	50	30	0.25

注:限值采用《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)的相关限值。

表 1 施用底泥后农田土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil amended with sediments

浓度	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
低浓度	5.59	砂土	22.08	1.23	0.87	13.18	98.94	95.83	76.39
中浓度	5.64	砂土	20.58	1.17	0.69	14.27	83.55	111.16	74.93
高浓度	5.28	砂土	23.37	1.29	0.82	14.82	115.62	94.33	70.68

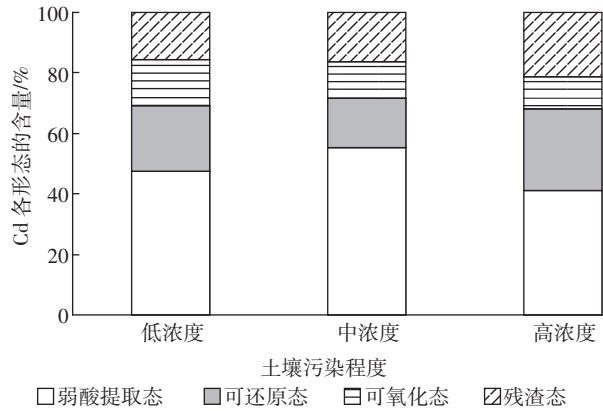


图 1 污染土壤中 Cd 形态分布

Figure 1 Distribution of Cd fractions in contaminated soils

致。参照《测土配方施肥技术规范(2011 年修订版)》，每个污染水平田块设置 3 个不同的稳定化处理 and 1 个不撒稳定剂的对照处理,每个处理设置 3 个重复小区,每个小区宽 4 m、长 5 m,面积为 20 m²。

1.2.2 空心菜种植

供试空心菜品种为柳叶空心菜(产自泰国正大种子有限公司,购于海口市新坡镇农资站)。播种、肥水和病虫害防治均按照当地管理水平进行,不同稳定化处理的种植管理条件完全一致,试验过程利用 DELTA-WET 土壤水分速测仪监测并保持各处理间土壤含水率基本一致。空心菜生长 30 d 后采收。

1.3 样品采集与处理

1.3.1 土壤样品采集与处理

土壤样品于空心菜收获时同步采集。由于试验田面积较小、地势平坦、土壤物质和受污染程度较为均

匀,故采用梅花点法采样,每个小区设 5 个分点。在每个分点处采 0~20 cm 耕作层土壤,每个土壤单元至少由 3 个采样点组成,每个采样点的样品为农田土壤的混合样,各分点混匀后取 1 kg,多余部分用四分法弃去。采集的土壤样品于风干室中风干,压碎,拣出碎石、砂砾和植物残体。风干后土样于磨样室中使用木棒、有机玻璃棒等再次压碎,拣出杂质并混匀,研磨到全部通过 100 目尼龙筛,研磨混匀后的样品装于样品袋中,贴标备用。土壤中 Cd、Pb 等元素全量的前处理用普通酸分解法进行消解^[11],消解过程的质量控制和 Cd 等元素的检测按照文献[12]中相关步骤操作。

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^[13-14]。BCR 顺序提取法是欧共体标准局在 Tessier 方法的基础上提出的重金属形态分析方法,重现性较好。本文针对稳定前后污染农田土中的 Cd 进行 BCR 连续提取法形态分析^[15]。顺序提取出土壤中 Cd 的弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态,提取液则供 ICP-MS 检测 Cd 含量。

1.3.2 蔬菜样品采集与处理

空心菜采样按“S”形法布点,每个小区设 10 个采样点,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,采样时连根带土一起挖出,用塑料自封袋封存,防止萎蔫。采集回新鲜样品放入冷库中保存。

取蔬菜的可食用部位(空心菜的茎叶),用自来水冲洗干净,用去离子水反复冲洗,晾干,用粉碎机匀浆

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

镉浓度 Cd content	处理 Treatment	石灰 Lime	钙镁磷肥 Fused calcium-magnesium phosphate	海泡石 Sepiolite	磷酸二氢钙 Calcium dihydrogen phosphate
低浓度	3SD	—	—	—	—
	3LP	0.30	0.30	—	—
	3SP	—	—	0.30	0.30
	3MP	—	0.60	—	—
中浓度	4SD	—	—	—	—
	4LP	0.45	0.45	—	—
	4SP	—	—	0.45	0.45
	4MP	—	0.90	—	—
高浓度	5SD	—	—	—	—
	5LP	0.60	0.60	—	—
	5SP	—	—	0.60	0.60
	5MP	—	1.20	—	—

后待消解。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 10 个样品设置 1 个重复,同时设置空白试验。消解液中 Cd 等元素使用 ICP-MS 检测。

2 结果与讨论

2.1 不同稳定剂处理土壤 Cd 形态变化

研究中利用 BCR 顺序提取法来反映稳定化处理前后土壤 Cd 元素的形态变化。弱酸提取态的重金属主要包括直接在水体中溶解的重金属、通过扩散作用和外层络合作用吸附在土壤表面的重金属、以碳酸盐形式存在的重金属;可还原态形式存在的重金属主要是铁锰氧化物结合态;可氧化态形式存在的重金属主要是有机物结合态^[16]。分析结果见图 2。

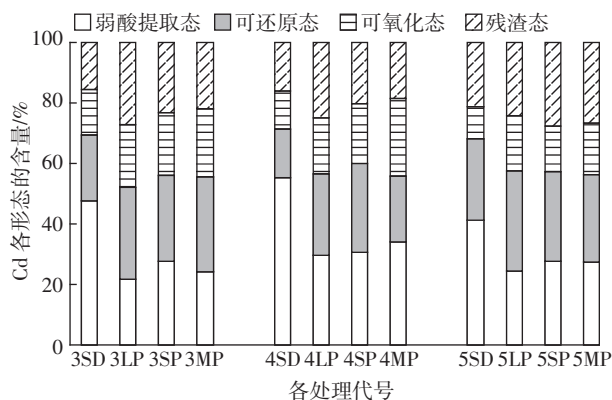


图 2 施用不同稳定剂前后土壤 Cd 元素的形态分布

Figure 2 Distribution of Cd fractions in Cd-contaminated soils before and after applying stabilizers

低浓度污染土壤稳定化处理后,相对于对照处理(3SD),Cd 弱酸提取态含量分别减少了 54.43%(3LP)、41.82%(3SP)和 49.33%(3MP);可还原态含量增加了 40.36%(3LP)、30.95%(3SP)、45.06%(3MP);可氧化态含量增加了 36.90%(3LP)、37.03%(3SP)、47.59%(3MP);残渣态含量增加了 74.15%(3LP)、48.62%(3SP)、41.63%(3MP)。

中浓度污染土壤处理后,Cd 弱酸提取态含量减少了 46.56%(4LP)、38.16%(4SP)、44.62%(4MP);可还原态含量增加了 67.18%(4LP)、81.90%(4SP)、32.64%(4MP);可氧化态含量增加了 48.30%(4LP)、58.97%(4SP)、107.43%(4MP);残渣态含量增加了

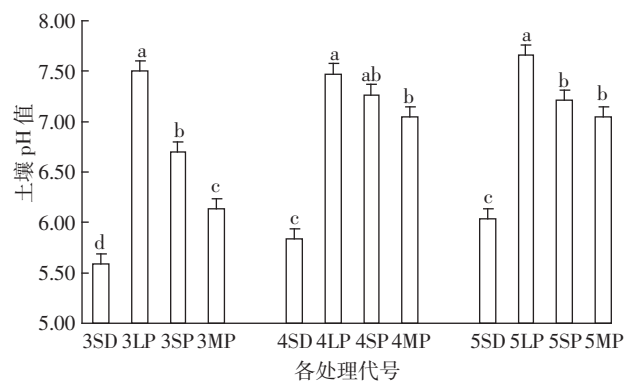
54.58%(4LP)、25.00%(4SP)、15.28%(4MP)。

高浓度污染土壤处理后,Cd 弱酸提取态含量减少了 40.95%(5LP)、32.90%(5SP)、33.55%(5MP);可还原态含量增加了 23.86%(5LP)、10.31%(5SP)、8.25%(5MP);可氧化态含量增加了 69.73%(5LP)、40.11%(5SP)、56.64%(5MP);残渣态含量增加了 14.10%(5LP)、30.61%(5SP)、26.08%(5MP)。

综上可知,稳定化处理后土壤中的有效态 Cd 向潜在有效态或无效态转化,移动性减小,生物有效性减小,稳定化效果显著。对于不同污染水平的土壤,稳定剂对 Cd 稳定化作用大小一致,均依次为 LP>MP>SP,即石灰+钙镁磷肥效果最好,单独使用钙镁磷肥效果其次,海泡石+磷酸二氢钙再次之。

2.2 不同稳定剂处理土壤 pH 值的变化

土壤中大多数 Pb、Cd 和 Zn 的盐类溶解度随着 pH 升高而减小,且土壤胶体对其吸附量随 pH 的升高而增加^[17]。pH 升高会导致土壤中 Cd 等重金属形态分布发生变化,明显减少可交换态含量,降低生物有效性^[3]。稳定化处理 30 d 后,测试各处理的土壤 pH 值,结果如图 3 所示。可以看出,稳定化处理均提高了土壤的 pH 值。



图中字母 a~d 表示处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 3 稳定化处理前后土壤 pH 值的变化

Figure 3 Variation of soil pH values before and after applying stabilizers

3 种污染水平下,相对于各自的对照组,土壤 pH 值分别提高了 1.91 (3LP)、1.11 (3SP)、0.55 (3MP), 1.64 (4LP)、1.44 (4SP)、1.22 (4MP), 1.62 (5LP)、1.17 (5SP)、1.01 (5MP)。对于不同污染水平的土壤来说,稳定剂对 pH 的影响效果均为 LP>SP>MP。但 pH 的提高效果有限,一方面由于土壤缓冲能力较大,能够减弱稳定剂的效果;另一方面由于修复后土壤用于种植蔬菜,pH 需控制在适宜作物生长的范围内,稳定剂

的用量过大会导致烧苗。此外,稳定剂加入前的污染农田土 pH 值表现为高污染水平土壤>中污染水平土壤>低污染水平土壤。其原因是海口农田土壤呈酸性(底泥利用前 pH=5.02),而疏浚底泥的酸性较小(pH=6.05),所以底泥用量越大,污染水平越高,土壤 pH 值也随之越高。

2.3 不同稳定剂处理土壤种植空心菜 Cd 含量

稳定化处理土壤种植的空心菜地上部分重金属含量见表 4。所有稳定化处理组的空心菜中,Cr、Pb、As 和 Hg 的含量均低于《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)和《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)的相关限量指标;低、中、高污染水平的对照组空心菜中 Cd 含量分别为 0.050 5、0.052 6、0.057 3 mg·kg⁻¹。低于《食品中污染物限量》指标,但略高于《无公害蔬菜安全要求》指标。而经过 3 种稳定剂处理土壤所种植的空心菜 Cd 含量均低于《无公害蔬菜安全要求》的限值。

IBM SPSS Statistics 20.0 软件 One-way ANOVA 单因素方差及多重比较(LSD)分析表明,在 0.05 和 0.01 水平上,各处理空心菜地上部的 Cr、Ni、As、Hg 含量差异均不显著。只有低污染水平土壤的稳定化处理和对照组的空心菜 Pb 含量有显著差异且低于对照组,稳定化处理组之间没有显著性差异;中污染水平和高污染水平的各个处理间差异均不显著。不同污染水平土壤中空心菜地上部分的 Cu、Zn、Cd 含量在对照组和稳定化处理组之间差异显著,但 3 个稳定化

处理之间差异不显著。

3 个稳定化处理组的空心菜 Cd 含量显著低于对照组,处理组之间则没有显著性差异。3 种污染水平下,相对于各自的对照组 SD,空心菜 Cd 含量的减少率分别为 83.17%(3LP)、38.61%(3SP)、65.35%(3MP)、52.28%(4LP)、38.78%(4SP)、44.49%(4MP)、85.69%(5LP)、64.75%(5SP)、69.81%(5MP)。稳定剂对空心菜 Cd 含量减少率的影响均为 LP>MP>SP,与稳定化后土壤中 Cd 弱酸提取态含量的减少率变化一致,说明 Cd 弱酸提取态的含量与其植物可吸收性呈正相关,但与稳定剂对 pH 的影响效果的顺序不一致,说明受试土壤的 pH 值不是影响 Cd 吸收的唯一因素。

3 结论

(1)对于底泥利用后的 Cd 污染土壤,相对于对照组,3 种稳定剂处理使较易迁移的弱酸提取态含量显著减小,降低了 Cd 的迁移性和生物有效性,稳定化效果显著。

(2)经稳定化处理后的土壤种植的空心菜 Cd 含量显著低于对照组,且低于《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)和《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)的相关标准限值,符合食品安全性的要求。

(3)不同污染水平下,空心菜 Cd 含量的减少率大小均为 LP>MP>SP,与稳定化处理土壤中 Cd 弱酸

表 4 不同稳定剂处理下空心菜中重金属的含量

Table 4 Heavy metal contents in water spinach under different stabilization treatments

处理	Cr/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹	Hg/mg·kg ⁻¹
3SD	0.209 3±0.001 7aA	0.703 6±0.003 7aA	4.140 0±0.001 8aA	4.503 9±0.001 9aA	0.050 5±0.001 1aA	0.160 3±0.005 6aA	0.000 0±0.000 0aA	0.002 6±0.000 8aA
3LP	0.229 2±0.005 3aA	0.772 6±0.005 5aA	0.431 1±0.002 7bB	1.047 6±0.002 7bB	0.008 5±0.001 8cB	0.000 0±0.000 0bB	0.000 0±0.000 0aA	0.006 2±0.000 7aA
3SP	0.251 1±0.006 9aA	0.756 9±0.004 6aA	0.361 7±0.000 7bB	0.983 4±0.002 1bB	0.031 0±0.000 5bC	0.000 0±0.000 0bB	0.000 0±0.000 0aA	0.001 9±0.000 2aA
3MP	0.220 2±0.002 3aA	0.786 4±0.002 8aA	0.448 4±0.002 8bB	0.821 6±0.001 4bB	0.017 5±0.000 6bAB	0.028 6±0.002 3bB	0.000 0±0.000 0aA	0.006 1±0.000 9aA
4SD	0.073 3±0.003 4aA	0.722 7±0.001 8aA	1.372 4±0.006 5aA	0.741 5±0.003 0aA	0.052 6±0.000 9aA	0.080 9±0.006 9aA	0.027 9±0.000 9bA	0.003 5±0.000 4aA
4LP	0.056 2±0.003 6aA	0.725 9±0.005 9aA	0.677 2±0.002 5bB	0.274 8±0.009 8bB	0.025 1±0.001 8bB	0.015 4±0.001 3aA	0.051 0±0.001 0aB	0.002 1±0.000 4abA
4SP	0.107 2±0.003 9aA	0.843 0±0.001 2aA	0.593 3±0.003 2bB	0.407 0±0.004 1bB	0.032 2±0.001 6bB	0.050 9±0.002 8aA	0.048 8±0.003 9abA	0.002 6±0.000 9abA
4MP	0.121 3±0.004 2bA	0.796 3±0.001 1aA	0.834 5±0.003 9bB	0.489 7±0.007 2bAB	0.029 2±0.000 7bB	0.145 4±0.001 8aA	0.075 2±0.006 9aA	0.001 3±0.000 5bA
5SD	0.287 4±0.003 6aA	0.792 2±0.000 9aA	1.268 7±0.000 4aA	2.257 0±0.005 9aA	0.057 3±0.001 5aA	0.000 0±0.000 0aA	0.000 0±0.000 0aA	0.002 8±0.000 7aA
5LP	0.233 6±0.001 7aA	0.898 5±0.002 2aA	0.280 2±0.006 0bB	0.790 7±0.008 4bB	0.008 2±0.000 4bB	0.000 0±0.000 0aA	0.000 0±0.000 0aA	0.001 6±0.000 4aA
5SP	0.309 6±0.001 2aA	0.911 2±0.001 0aA	0.640 3±0.000 8abAB	1.169 3±0.003 8bAB	0.020 2±0.000 8bB	0.002 8±0.000 2aA	0.027 6±0.000 8aA	0.001 8±0.000 3aA
5MP	0.271 4±0.002 5aA	0.905 7±0.002 0aA	0.487 7±0.004 4bAB	0.656 1±0.004 7bB	0.017 3±0.000 4bB	0.000 0±0.000 0aA	0.000 0±0.000 0aA	0.001 7±0.000 7aA
限值 1	0.5	—	—	—	0.2	0.3	0.5	0.01
限值 2	0.5	—	—	—	0.05	0.2	0.5	0.01

注:同一列中小写字母相同表示在 $P=0.05$ 水平上差异不显著;同一列中大写字母相同表示在 $P=0.01$ 水平上差异不显著。限值 1 为《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)相关标准限值;限值 2 为《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)相关标准限值。

提取态含量的减少率顺序一致,说明Cd弱酸提取态的含量与其植物可吸收性呈正相关。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 赵中秋,朱永官,蔡运龙.镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J].生态环境,2005,14(2):282-286.
ZHAO Zhong-qiu, ZHU Yong-guan, CAI Yun-long. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):282-286.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 谢飞,梁成华,孟庆欢,等.添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J].环境工程学报,2014,8(8):3505-3510.
XIE Fei, LIANG Cheng-hua, MENG Qing-huan, et al. Effects of natural zeolite and lime on form transformation of cadmium in soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(8):3505-3510.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 朱奇宏,黄道友,刘国胜,等.石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究[J].水土保持学报,2009,23(1):111-116.
ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, LIU Guo-sheng, et al. Effects and mechanism of lime and sepiolite on remediation of Cd contaminated soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1):111-116.
- [11] 中华人民共和国环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2005.
Environmental Protection Administration of PRC. HJ/T 166—2004, The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [12] 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.
- [13] 章骅,何品晶,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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 刘兆荣,谢曙光,王雪松.环境化学教程[M].二版.北京:化学工业出版社,2010:247-249.
LIU Zhao-rong, XIE Shu-guang, WANG Xue-song. Environmental chemistry tutorial[M]. Second Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:247-249.