

陆素芬,曹晶潇,田美玲,等. 土壤改良剂对污染土壤及栽培蔬菜 Pb、Cd 含量的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):278-281.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.066

土壤改良剂对污染土壤及栽培蔬菜 Pb、Cd 含量的影响

陆素芬^{1,2}, 曹晶潇¹, 田美玲², 余元元², 宋波²

(1. 河池学院化学与生物工程学院,广西宜州 546300; 2. 桂林理工大学环境科学与工程学院,广西桂林 541004)

摘要:为了研究受酸性尾矿渣冲刷造成的低浓度 Pb、Cd 污染土壤的钝化效果,筛选出降低土壤及蔬菜体中有效态 Pb、Cd 含量的改良剂。通过盆栽试验研究了尾矿污染土壤中施用石灰、钙镁磷肥、泥炭、活性炭和聚丙烯酸钠 5 种改良剂对蔬菜(water spinach)的生长发育、Pb、Cd 含量特性的影响,分析了施用改良剂后土壤 pH 值和有效态 Pb、Cd 含量的变化。研究表明,复合改良剂的施用不仅可以明显提高蔬菜地上部鲜质量,还可以降低蔬菜中铅、镉的含量。施加 1% 生石灰后的土壤 pH 值的均值为 5.95,明显高于未修复的土壤,结合蔬菜鲜质量及其体内 Pb、Cd 的含量,施用 1% 生石灰、0.2% 钙镁磷肥、6% 泥炭、0.4% 活性炭和 0.1% 聚丙烯酸钠后改良矿区污染土壤的效果最好。总体上讲,施用改良剂对轻微 Pb-Cd 污染的酸性农田土壤有修复作用,能够确保蔬菜的种植安全性。

关键词:铅镉污染;钝化;土壤改良剂;蔬菜;生长

中图分类号: S151.9⁺3; S156.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1002-1302(2019)07-0278-04

矿山尾砂库垮坝导致的污染物迁移和扩散,不仅会导致大面积的土地污染,下游土地的重金属含量升高,土壤酸化,有机质含量降低和土壤板结^[1-2],而且会影响农产品的生长及品质,最终危害到人体健康和生命安全。土壤的酸碱度、理化特性及重金属与农作物有着密切的联系。因此,探讨 Pb-Cd 污染对农作物生长的影响,为防止 Pb-Cd 污染和土壤修复具有重要意义。在农产品的生长发育中,土壤中的污染物会在农产品体内不同程度地累积。相关报道显示,由于受到采矿活动和冶炼业的影响,矿业周边及下游农田土壤出现板结、重金属污染等问题。如湖南省花垣矿区^[3]、广东省乐昌铅锌矿区^[4]、云南省个旧市郊农作物^[5]、广西省南丹典型矿区^[6]等地蔬菜中的重金属含量超标。为了避免重金属通过食物链进入人体,可多种植对重金属富集较低的蔬菜。此外,添加土壤改良剂改变土壤结构,通过对土壤重金属的吸附、沉淀或络合作用等降低重金属向农作物的迁移作用。施加泥炭^[7]、钙镁磷肥^[8]、有机肥^[9-10]、石灰^[11]等措施不仅可以改善土壤质量,还可以降低重金属向植物体迁移的效率^[11-12],

从而达到土壤改良和修复的效果^[13]。如广西省环江毛南族自治县受尾砂库溃坝影响的农田就近 6 666 hm²,导致该区域出现土壤板结、作物枯萎、土地荒废等现象。因此,本研究针对广西省环江毛南族自治县受污染农田土壤的特性,设置施加不同用量的 5 种改良剂(石灰、泥炭、钙镁磷肥、活性炭、聚丙烯酸钠)的处理,进行蔬菜(water spinach)种植盆栽试验。旨在了解不同环境材料对蔬菜的生长及污染土壤环境质量的影响,为修复当地农田土壤及改良剂的合理施用提供一定的参考。

1 材料与与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自广西省环江毛南族自治县受尾砂库溃坝影响的污染土,为典型的赤红壤,其基本理化性质如表 1 所示。选用 5 种土壤改良剂分别为石灰、钙镁磷肥、泥炭、活性炭、聚丙烯酸钠,试验处理如表 2 所示;试验蔬菜为蔬菜,栽培试验于 2016 年 4 月在桂林理工大学实验基地进行模拟种植。

表 1 供试土壤基本性质

指标	全量含量 (mg/kg)		有效态含量 (mg/kg)		pH 值	容重 (g/cm ³)	阳离子交换 量(CEC, cmol/kg)	有机质 含量 (g/kg)	碱解氮 含量 (mg/kg)	全磷 含量 (g/kg)	速效磷 含量 (mg/kg)	全钾 含量 (g/kg)	速效钾 含量 (mg/kg)
	Pb	Cd	Pb	Cd									
含量	267	0.5	140	0.082	3.21	1.56	7.10	20.5	115.1	0.41	8.48	18.91	1 410
参考	50	0.3	—	—	5-6	1.2	20	30	120	0.8	20	20	150

1.2 试验设计

1.2.1 土壤稳定化处理 取污染农田表层(0~20 cm)土壤

作供试样品,去除杂物,风干过 10 目筛,称取过 10 目筛土样 2 kg,按照表 2 的配方充分混匀后放置于花盆(高 20 cm,盆直径 18 cm)中进行老化(2 周)。除石灰外,试验设计按所添加的另外 4 种修复材料进行 4 因素 4 水平正交设计,共 16 个处理,每个处理 4 个平行,共设 64 个盆栽。在播种前对土壤进行老化培养期间,在常温常压下,对土壤进行浇水,确保保持土壤含水率为田间持水率的 60%~70%;老化后种植蔬菜,种植周期为 8 周左右(可视具体的生长状态而增加或减少其种植周期)。收获后,分别对蔬菜的生长状况(株高、鲜质量、

收稿日期:2017-12-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:41261082);“八桂学者”建设工程专项;广西自然科学基金重大项目(编号:2013GXNSFEA053002);河池学院重点科研项目基金硕士基金(编号:2016HJA001/XJ2017ZD07)。作者简介:陆素芬(1989—),女,广西平果人,硕士,主要从事污染土壤调查与风险评估研究。E-mail:lusufen2012@sina.com。

表2 每个处理添加改良剂及比例

编号	各改良剂的添加比例(%)				
	石灰	钙镁磷肥	泥炭	活性炭	聚丙烯酸钠
1		0.0	0	0.0	0.0
2		0.0	2	0.2	0.1
3		0.0	4	0.4	0.2
4		0.0	6	0.5	0.3
5		0.2	0	0.2	0.2
6		0.2	2	0.0	0.3
7		0.2	4	0.5	0.0
8	1	0.2	6	0.4	0.1
9		0.4	0	0.4	0.3
10		0.4	2	0.5	0.2
11		0.4	4	0.0	0.1
12		0.4	6	0.2	0.0
13		0.6	0	0.5	0.1
14		0.6	2	0.4	0.0
15		0.6	4	0.2	0.3
16		0.6	6	0.0	0.2

干质量)及可食部分进行重金属的全量分析。

1.2.2 蔬菜种植 种子的预处理:由于蔬菜种皮厚而硬,须进行催芽,要用30℃左右的温水浸种18h,然后用沙布包好置于28~30℃的条件下催芽2d,当种子有50%~60%露白时即可进行播种。将露白的种子每间隔2cm×2cm均匀撒种在试验盆栽土壤中,再覆盖0.5~1.0cm的疏松土样,浇透水保湿,为防止水分的快速蒸发,再在土壤上覆盖1层干稻草。种植期间定期对蔬菜浇水,确保土壤含水率在田间持水量的60%~70%。蔬菜从播种至可收获的生长周期为55d,即苗高为20~30cm时可采收。

1.3 样品采集及测定

采用乙醇拭擦过的不锈钢剪刀,对蔬菜地上可食部分进行采集,去除表面的杂草及污垢,分别用档案袋收集,带回实验室用自来水反复清洗,去除表面泥土及灰尘,再用去离子水润洗3~5遍,自然晾干,测量其高度和鲜质量。在80℃下烘干、粉碎、备用。采用5点混合法采集试验土壤约200g,带回

实验室自然风干后,分别过0.149、0.250mm筛,备用。

土壤和植物消解参考美国国家环保局(US EPA)推荐的 $\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$ ^[14]消解体系。土壤重金属有效态含量的测定,采用碳酸氢铵-二乙三胺五乙酸(AB-DTPA)浸提法。土壤镉(Cd)、铅(Pb)含量用石墨炉-原子吸收光谱法测定。土壤的pH值、速效磷含量和有机质含量参照《土壤农化分析》^[15]进行测定。样品分析过程中分别加入空白样、平行样和国家标准土壤样品(GSS-6)、植物样品(GSV-1)进行质量控制,样品分析过程所用试剂均为优级纯,所用水均为超纯水。分析过程中的各种重金属的回收率分别为: Cd, 84.4%~113.2%; Pb, 88.0%~106%,质量控制结果符合国家标准允许范围,符合试验样品分析质量控制要求。

1.4 数据处理

所得数据均为4次重复试验的平均值,数据表述为“平均值±标准差”,用Microsoft Office Excel 2010软件进行整理,采用SPSS 10.0统计分析软件进行方差分析和多重比较。用单因素方差分析方法分析盆栽试验土壤不同处理间重金属不同形态的差异,采用多重比较法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂处理对污染土壤中理化特性的影响

供试土样的pH值为3.21。由表3可知,添加改良剂的所有处理土壤pH值均明显高于供试土样,且均达到适合植物生长的范围,统计结果显示,添加石灰对土壤pH值具有显著提高作用($P<0.01$)。其中,与处理1相比,复合添加修复剂处理的盆栽土壤pH值均有所提高,其中pH值增加最为明显的是处理16(pH值=7.40)与处理15(pH值=7.27),且处理2~处理16的pH值均高于处理1。总体来说,复合添加剂施加水平的增加对提高土壤pH值有一定的作用。

处理3、处理7~处理16的速效磷含量均高于NY/T 391—2000《绿色食品 产地环境技术条件》中Ⅰ级肥力标准($>10\text{ mg/kg}$);其中,处理4、5达到标准中Ⅱ级肥力标准($5\sim 10\text{ mg/kg}$)。可知,施加的修复剂能提高土壤速效磷含量,且大部分处理可达到Ⅰ级肥力标准。添加复合修复剂的

表3 不同处理盆栽试验土壤pH值、速效磷及有机质含量

编号	pH值			速效磷含量(mg/kg)			有机质含量(g/kg)		
	均值±标准差	极小值	极大值	均值±标准差	极小值	极大值	均值±标准差	极小值	极大值
1	5.95±0.24	5.65	6.19	0.63±0.14	0.48	0.82	15.5±0.80	14.4	16.2
2	6.61±0.18	6.49	6.88	3.13±0.91	1.79	3.77	16.4±1.30	15.2	17.8
3	6.76±0.23	6.57	7.06	12.10±2.28	9.81	15.21	21.3±2.56	18.1	23.4
4	7.13±0.03	7.10	7.17	9.75±3.49	6.27	14.58	19.6±1.77	18.1	22.1
5	6.82±0.22	6.53	7.01	6.52±1.96	4.30	8.74	16.6±1.45	15.4	18.6
6	7.18±0.08	7.06	7.25	13.10±8.57	5.36	24.12	15.1±1.05	13.7	16.0
7	7.01±0.05	6.94	7.05	15.50±4.26	10.10	19.99	20.6±1.22	19.4	21.8
8	7.22±0.02	7.20	7.23	18.90±6.36	10.90	26.47	19.0±1.63	17.9	21.4
9	6.36±0.57	5.57	6.93	19.10±2.94	15.10	21.68	16.7±0.42	16.2	17.2
10	6.92±0.56	6.08	7.29	18.30±6.67	10.00	25.65	17.8±0.42	17.2	18.2
11	7.17±0.09	7.11	7.30	16.40±6.78	12.40	26.60	16.9±1.09	15.9	18.4
12	7.17±0.01	7.09	7.24	41.00±4.56	37.10	47.61	20.5±1.11	19.2	21.7
13	6.98±0.04	6.92	7.02	30.30±3.33	25.9	33.67	17.4±0.70	16.8	18.1
14	6.96±0.13	6.84	7.13	14.00±3.97	10.50	19.52	18.3±0.69	17.3	18.7
15	7.27±0.06	7.21	7.35	22.20±8.63	15.00	33.47	17.8±0.71	16.9	18.4
16	7.40±0.03	7.36	7.42	43.20±14.20	24.00	54.71	19.9±1.63	18.0	21.7

处理中,除了处理 6 外,其余各处理的有机质含量均高于未施加修复剂的处理 1,达到《全国第 2 次土壤普查养分分级标准》的四级水平。

通过组间差异分析得出同一因子影响结果的离散程度,离散程度越大,说明结果受该因子影响越大。通过对添加的修复材料中不同含量的组间及组内的差异分析得出,对 pH 值、速效磷含量和有机质含量影响最大的因素为泥炭,其中

pH 值、速效磷含量、有机质含量在泥炭施加量为 6% 时最大,均值分别为 7.23 mg/kg、28.23 mg/kg 和 19.74 g/kg。针对 4 种因素对其进行统计分析,结果如表 4 所示,钙镁磷肥对土壤 pH 值和速效磷含量有显著性影响,泥炭对土壤中 pH 值、速效磷含量和有机质含量都有显著性影响,活性炭只对土壤有机质含量有显著性影响,其余因素对土壤的 pH 值、速效磷含量和有机质含量均无显著性的影响。

表 4 4 种不同改良剂对土壤及蔬菜各项指标的差异性分析

各因素	土壤中的 P 值					蔬菜中的 P 值	
	pH 值	速效磷含量	有机质含量	Pb 含量	Cd 含量	鲜质量	Pb 含量
钙镁磷肥	0.001	0.000	0.894	0.028	0.000	0.698	0.020
泥炭	0.000	0.000	0.000	0.664	0.178	0.001	0.000
活性炭	0.642	0.953	0.022	0.023	0.371	0.032	0.022
聚丙烯酸钠	0.380	0.762	0.059	0.025	0.179	0.642	0.489

2.2 不同改良剂对土壤有效态 Pb-Cd 的影响

总体来看,有效态 Pb、Cd 的含量均处于较低水平(表 5)。其中,处理 2、3、11 的有效态 Pb 含量高于未施加复合修复剂的处理 1,其他处理有效态 Pb 含量均低于处理 1;除处理 9 有效态 Cd 含量高于处理 1 外,其余处理均低于处理 1。针对土壤有效态 Pb、Cd,大部分的处理达到了钝化效果。

由统计分析(表 4)结果可知,对土壤有效态 Pb、Cd 含量影响最大的因素为钙镁磷肥,其中土壤有效态 Pb、Cd 含量最

小,均值分别为 69.17、0.047 mg/kg。由表 4 可知,钙镁磷肥对土壤中 Pb、Cd 含量影响显著;活性炭、聚丙烯酸钠均对土壤中 Pb 含量影响显著。根据施加不同含量改良剂对有效态 Pb、Cd 的处理效果,本试验分析土壤有效态 Pb、Cd 在各因素不同水平的含量大小(表 5)。针对有效态 Pb 含量,施加改良剂组合为 0.4% 钙镁磷肥、0.4% 活性炭和 0.3% 聚丙烯酸钠时,其含量最小;当施加 0.6% 钙镁磷肥、2% 泥炭、0.4% 活性炭时,土壤有效态 Cd 的含量最小。

表 5 盆栽土壤中 Pb、Cd 的有效态含量

各处理 编号	有效态 Pb 含量(mg/kg)			有效态 Cd 含量(mg/kg)		
	均值 ± 标准差	极小值	极大值	均值 ± 标准差	极小值	极大值
1	102.00 ± 29.64	84.69	146.1	0.090 ± 0.003	0.086	0.093
2	105.10 ± 37.39	83.82	161.0	0.085 ± 0.027	0.054	0.110
3	122.60 ± 46.80	94.49	192.5	0.057 ± 0.005	0.053	0.064
4	80.30 ± 15.21	69.97	102.7	0.076 ± 0.007	0.069	0.085
5	98.21 ± 9.85	90.93	112.7	0.050 ± 0.004	0.047	0.055
6	83.40 ± 6.69	75.87	90.84	0.050 ± 0.010	0.038	0.061
7	53.59 ± 6.04	47.37	60.67	0.049 ± 0.004	0.043	0.053
8	72.31 ± 10.06	62.60	84.33	0.056 ± 0.001	0.055	0.057
9	47.58 ± 11.46	39.23	64.45	0.101 ± 0.007	0.092	0.109
10	78.48 ± 22.84	57.97	110.28	0.055 ± 0.009	0.045	0.067
11	109.70 ± 29.87	91.46	154.37	0.058 ± 0.007	0.051	0.066
12	85.10 ± 13.15	68.45	99.84	0.049 ± 0.007	0.044	0.059
13	64.33 ± 4.71	58.83	69.83	0.034 ± 0.001	0.032	0.035
14	89.93 ± 1.70	72.22	121.4	0.033 ± 0.004	0.029	0.039
15	68.67 ± 6.16	60.62	75.51	0.053 ± 0.002	0.051	0.056
16	96.34 ± 19.16	71.60	115.2	0.068 ± 0.027	0.054	0.108

2.3 不同改良剂处理土壤种植蔬菜生长情况及铅、镉含量

不同处理间蔬菜植株长势不均衡,植株最高达为 22 cm,其中大部分高度为 12~16 cm,而最低的株高仅 4~5 cm。从实际种植情况来看,植物的长势越茂盛越好,鲜质量值越大越好。由表 6 可知,添加复合改良剂的蔬菜鲜质量均高于处理 1,说明供试土壤须施加一定量的改良剂才能确保蔬菜正常生长。各因素对蔬菜鲜质量的影响分析结果显示,对蔬菜生物量影响从大到小顺序为泥炭 > 钙镁磷肥 > 活性炭 > 聚丙烯酸钠,且施加 6% 泥炭对生物量的影响最大。

由表 6 可知,添加复合改良剂的蔬菜 Pb 含量均低于处理 1。其中,处理 1、2、5、6、13、14、15 种植的蔬菜 Pb 含量均超过 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的限量值 0.3 mg/kg;处理 8、12 的蔬菜 Pb 含量较低,约为 0.05 mg/kg。所有处理的蔬菜 Cd 含量均低于 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的限量值 0.2 mg/kg;其中,处理 2、9 的蔬菜 Cd 含量高于处理 1,说明该处理施加的修复剂可能在一定程度上促进了蔬菜对 Cd 的吸收。由于蔬菜中 Pb 含量超标,笔者对其影响因素进行单因

表6 各处理蔬菜鲜质量和 Pb、Cd 含量

各处理 编号	鲜质量 (g)	Pb 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)
1	7.25 ± 1.14	0.656 ± 0.000	0.047 ± 0.000
2	13.90 ± 3.35	0.478 ± 0.132	0.064 ± 0.020
3	14.03 ± 2.75	0.164 ± 0.000	0.017 ± 0.005
4	15.93 ± 6.18	0.095 ± 0.049	0.021 ± 0.004
5	8.38 ± 2.24	0.429 ± 0.000	0.025 ± 0.000
6	8.05 ± 1.29	0.408 ± 0.000	0.010 ± 0.000
7	20.73 ± 5.12	0.076 ± 0.047	0.013 ± 0.004
8	22.25 ± 4.77	0.053 ± 0.013	0.015 ± 0.004
9	11.00 ± 1.06	0.213 ± 0.141	0.092 ± 0.023
10	9.88 ± 3.37	0.127 ± 0.021	0.041 ± 0.026
11	10.98 ± 1.48	0.216 ± 0.006	0.006 ± 0.004
12	22.63 ± 2.87	0.056 ± 0.009	0.012 ± 0.005
13	8.90 ± 1.65	0.327 ± 0.102	0.001 ± 0.001
14	8.35 ± 2.64	0.525 ± 0.264	0.006 ± 0.001
15	9.10 ± 1.60	0.342 ± 0.237	0.006 ± 0.002
16	14.35 ± 5.06	0.142 ± 0.055	0.007 ± 0.001

子差异性分析,结果(表4)显示,施加钙镁磷肥、泥炭、活性炭对蔬菜中 Pb 含量影响显著,而施加聚丙烯酸钠影响不显著。

3 讨论与结论

土壤有效态重金属的稳定性会随土壤 pH 值的增加而增加。通过调节土壤 pH 值来调控金属络合物的形成,调节重金属在土壤中的行为,重金属的有效性会随着碱度的增加而降低^[16-17]。本试验中施加的改良剂(生石灰、钙镁磷肥、泥炭、活性炭、聚丙烯酸钠)明显提高环江地区污染土壤的 pH 值,将其控制在适宜作物生长的范围内。施加复合改良剂对土壤 pH 值和速效磷含量、有机质含量均有明显影响,其中施加 1% 石灰对该区域土壤 pH 值有显著的提高作用。有关研究表明,土壤施加石灰后,水溶态、交换态 Pb、Cd 含量随石灰用量的增加而急剧减少^[18-19],同时土壤 Pb、Cd 的植物可利用性降低。此外,在未施加改良剂前,土壤氮钾含量较高,但处于严重缺磷、极度酸化状态,但在修复后前述情况均有所改善。

其中处理 8 蔬菜可食部分中 Pb 含量最低,改良剂的组合及施加量为 1% 生石灰、0.2% 钙镁磷肥、6% 泥炭、0.4% 活性炭和 0.1% 聚丙烯酸钠。考虑所种植蔬菜的生物量与株高影响,笔者认为施加 6% 泥炭、0.4% 活性炭的改良剂,植物的长势最佳。综上所述,当改良剂组合为 1% 生石灰、0.2% 钙镁磷肥、6% 泥炭、0.4% 活性炭、0.1% 聚丙烯酸钠时,蔬菜 Pb、Cd 含量和生物量能达到最佳水平。

对于该区域污染土壤,相对于对照组处理 1,施加复合改良剂的处理能明显减小土壤有效态 Pb、Cd 迁移性和生物有效性,并达到一定的稳定化效果。施加复合改良剂的处理中,除处理 2、9 外,其他蔬菜 Cd 含量均低于处理 1,且低于 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中的相关限值,符合食品安全性的要求。但部分处理蔬菜 Pb 含量仍高于对应的标准值,而均低于未施加改良剂的处理 1。结合蔬菜生物量及体内 Pb、Cd 含量,施加改良剂的最佳水平为 1% 生石灰、0.2% 钙镁磷肥、6% 泥炭、0.4% 活性炭和 0.1% 聚丙烯酸钠。

参考文献:

- [1] 翟丽梅,陈同斌,廖晓勇,等. 广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J]. 环境科学学报,2008,28(6):1206-1211.
- [2] 唐成. 大环江两岸农田土壤重金属污染现状及其健康风险评估[D]. 南宁:广西大学,2013:21-22.
- [3] 杨胜香,易波浪,刘佳,等. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):17-23.
- [4] 杨清伟,束文圣,蓝崇钰. 乐昌铅锌矿区蔬菜重金属含量与适种性评价[J]. 金属矿山,2007,378(12):126-127.
- [5] 肖青青,王宏征,赵宾,等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2):271-281.
- [6] 陆素芬,宋波,伏凤艳,等. 南丹矿业活动影响区蔬菜重金属含量及健康风险[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(3):478-485.
- [7] Kang H, C. Freemman. Interactions of marsh orchid (*Dactylorhiza* spp.) and soil microorganisms in relation to extracellular enzyme activities in a peat soil[J]. Pedosphere,2007,17(6):681-687.
- [8] Juan L, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility[J]. Agricultural Sciences in China,2008,7(3):336-343.
- [9] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of Southern China[J]. Agricultural Sciences in China,2008,7(10):1245-1252.
- [10] Sun Y, Wang Y M, Zhang P P. Effects of organic fertilizer on fruit quality and acidified soil chemical properties in Yantai Orchard[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(5):1145-1148,1165.
- [11] Chen X T, Wang G, Liang Z C. Effect of amendments on growth and element uptake of pakchoi in a cadmium, zinc and lead contaminated soil[J]. Pedosphere,2002,12(3):243-250.
- [12] 宋波,曾炜铨,陆素芬,等. 含磷材料在铅污染土壤修复中的应用[J]. 环境工程学报,2015,9(12):5649-5658.
- [13] 郭晓芳,卫泽斌,谢方文,等. 过磷酸钙与石灰混施对污染农田低累积玉米生长和重金属含量的影响[J]. 环境工程学报,2012,6(4):1374-1380.
- [14] United States Environmental Protection Agency. Superfund public health evaluation manual[M]. United States Environmental Protection Agency,1986.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:229-273.
- [16] 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,2015,24(2):282-287.
- [17] Zhang M K, Pu J C. Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils[J]. Journal of Environmental Sciences,2011,23(4):607-615.
- [18] 李正强,熊俊芬,马琼芳,等. 4种改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苜蓿生长及重金属吸收特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(1):158-163.
- [19] Tan W N, Li Z A, Qiu J, et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in South China[J]. Pedosphere,2011,21(2):223-229.