

不同土壤质地条件下麦秸、铅对镉在水稻-土壤系统中迁移的影响

陈京都¹, 刘 萌¹, 顾海燕¹, 戴其根^{1*}, 仲晓春¹, 林忠成^{1,2}, 张洪程¹

(1.扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏 扬州 225009; 2.吴江市农业委员会, 江苏 吴江 215200)

摘 要:通过室外砂土和黏土的大型土柱栽培试验,研究了麦秸、铅对镉在水稻-土壤中迁移的影响。研究表明,在砂土和黏土中随着水稻的生长发育,水稻植株镉含量逐渐降低,添加铅和麦秸均促进了水稻对镉的吸收,增加了水稻植株镉的含量,且铅的促进效应大于麦秸处理。添加铅和麦秸有利于镉向籽粒的转运和提高水稻籽粒镉的富集系数,砂土中添加铅、麦秸的处理籽粒镉含量和富集系数比镉单一处理分别增加 44.00%、36.00%和 41.67%、50.00%;黏土中分别增加 58.62%、43.00%和 46.15%、61.54%。镉进入土壤后会随着水分流动向下迁移,在砂土中的迁移能力大于黏土。随着土壤深度的增加镉含量逐渐减少,黏土在 40~60 cm、砂土在 60~80 cm 土层中镉含量与对照含量差异不显著。添加铅和麦秸可以降低镉在土壤中向下迁移的能力,降低幅度黏土大于砂土。

关键词:水稻;土壤;镉;铅;麦秸;迁移

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1295-05

Effects of Wheat Straw and Lead on Cadmium Remove in Rice-Soil Systems in Different Texture Soils

CHEN Jing-du¹, LIU Meng¹, GU Hai-yan¹, DAI Qi-gen¹, ZHONG Xiao-chun¹, LIN Zhong-cheng^{1,2}, ZHANG Hong-cheng¹

(1.Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Agriculture Committee of Wujiang County, Wujiang 215200, China)

Abstract: The experiments of rice cultivated in sandy and clay soil columns were conducted under outdoor condition to investigate the effects of wheat straw and lead on cadmium remove in rice-soil systems in artificial Cd-contaminated soil. The results of the study indicated that the content of cadmium in rice reduced gradually with growth and development. Both of wheat straw and lead promoted the rice to absorbed cadmium and increased the content of cadmium in rice, which the impact of lead was greater than wheat straw. The acceleration in different growth periods showed different in sandy and clay soil. Wheat straw and lead promoted the cadmium transported into grain and increased concentration factor in the Cd-contaminate soil. Compare to cadmium single treatment, the content of cadmium and concentration factor of rice grain increased by 44.00%, 36.00% and 41.67%, 50.00% respectively in sandy soil and 58.62%, 43.00% and 46.15%, 61.54% in clay soil. Cadmium entered into soil and removed downward with water flow and the migration ability of cadmium in sandy soil was greater than clay soil. With increasing of soil depth, the content of cadmium became less and less, while the soil depth in 40~60 cm of the clay soil and 60~80 cm of sandy soil, the content of cadmium was similar with blank control. Wheat straw and lead reduced the migration ability of cadmium in clay soil, which was greater than sandy soil in rice season.

Keywords: rice; soil; cadmium; lead; wheat straw; migration

水稻是我国主要的粮食作物之一,也是容易吸收

和积累镉(Cd)的粮食作物,而镉又是一种分布广泛、污染面积大的重金属元素^[1-2]。随着社会的发展,大量的镉进入农田生态环境中,目前我国受镉污染的耕地约 $113 \times 10^4 \text{ hm}^2$,涉及 11 个省(市)的 25 个地区^[3]。我国秸秆年产量约为 $6 \times 10^8 \text{ t}$,其中水稻、小麦及玉米秸秆约占 75%^[4],随着环保意识的增强和作物栽培学与

收稿日期:2010-12-03

基金项目:江苏省农委项目;江苏省农产品质量安全产地适宜性评价;国家粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A03)

作者简介:陈京都(1985—),男,在读博士研究生,主要从事农产品安全与环境方面的研究。E-mail:chenjingdu1985@163.com

* 通讯作者:戴其根 E-mail:qgdai@yzu.edu.cn

耕作学的发展,秸秆还田的耕作方式日益普遍。秸秆还田有利于改善土壤理化和生物学性状、培肥土壤,促进作物生长发育和产量的提高,但同时土壤中已有的污染物的性质也会产生影响^[9],从而影响到作物的产量和品质。重金属污染常常是 2 种或 2 种以上元素共同作用形成的复合污染,元素间的联合作用对作物的产量及元素在作物体内的分配有着重要的影响。因此,本研究在 2 种不同质地的土壤条件下,探讨在镉污染土壤中麦秸、铅对镉在水稻-土壤系统中迁移的影响,为作物生产上合理的秸秆还田,降低重金属在土壤中迁移性,改善作物的品质和减少环境污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为南粳 44,为早熟晚粳品种。土壤为砂土和黏土两种不同质地的土壤,为排除其他重金属元素过量对试验的干扰,选用农田耕层 0~20 cm 以下的土壤,基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

本研究在高 1.2 m、半径为 0.25 m 的无底圆柱筒内进行,底部装有可控的排水系统,以使土壤中水分垂直运动。土壤深度为 1 m,上层 0~20 cm 土层的土壤添加重金属镉,设置对照、镉单一污染、麦秸和镉、镉铅复合污染 4 种处理,分别用对照、Cd、Cd+麦秸和 CdPb 表示,每个处理设置 3 次重复。添加的镉浓度为 1.5 mg·kg⁻¹,铅添加量为 200 mg·kg⁻¹。重金属添加以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中Ⅱ级标准为依据,使添加重金属后土壤达到重污染的水平。麦秸剪碎为每段 5 cm 左右,添加量参照大田全量还田在圆柱筒中添加 120 g。

将土壤过筛除去杂质后装入圆柱筒中,装入高度为 1 m,然后上水使土壤持水量达到饱和,静置一段时间,使土壤充分沉实后补充土壤至 1 m,如此重复直至土柱高度为 1 m。将上层 0~20 cm 土壤全部取出放入塑料桶中,将分析纯 CdCl₂·2.5H₂O 和 Pb(Ac)₂ 溶解于去离子水配制成溶液,加入塑料桶中,用木棍充

分搅拌后静置晾至可用手捏碎即可。将土壤用木槌敲碎,全部返回圆柱筒中。静置半个月后移栽水稻,每个处理施用纯氮 4.42 g,过磷酸钙 2.35 g(以 P₂O₅ 计),氯化钾 3.52 g(以 K₂O 计),氮肥以基肥:追肥为 6:4 的比例施用,磷钾肥做为基肥一次性施入。每桶水稻栽插 14 穴,全生育期水分管理与大田一致。

1.3 测定指标与方法

水稻于 6 月 15 日移栽,移栽后 30、40、80 d 和 130 d 分别取分蘖盛期、拔节期、齐穗期和成熟期样品,选取生长一致的水稻植株,每个处理取 2 穴测定水稻镉的含量;成熟期收获全部水稻籽粒,用四分法进行分样,测定籽粒中镉的含量;水稻收获后取土层 0~20 cm 以下各层土壤测定总镉含量,每 20 cm 取土 1 次。所取的植株和籽粒样品经自来水和去离子水冲洗后,置于烘箱内 80 ℃烘干至恒重,粉碎后经过充分混匀后过 45 目筛。称取 0.500 0 g 植株及籽粒样品,采用硝酸-双氧水-去离子水消解体系微波消解,过滤并用去离子水定容至 50 mL^[6]。所取的土壤样品剔除杂物后室内风干研磨,并过 100 目筛。称取 0.500 0 g 土壤,采用王水-去离子水消解体系微波消解,过滤并用去离子水定容至 50 mL^[7]。采用等离子原子发射光谱光度计测定各消解液中镉的含量,测定时加入国家标准物质控制分析质量。

1.4 数据处理与分析

数据采用 Excel 2003 和 DPS 2000 进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 水稻植株中镉的含量

从表 2 可以看出,添加外源镉后,水稻各个时期植株镉含量上升,黏土上种植的比砂土的上升幅度大。水稻植株中镉的含量随着其生长进程逐步下降。不同的处理对植株镉含量的影响不同,CdPb 处理镉的含量最高,Cd+秸秆处理次之,Cd 处理最低。方差分析表明,不同处理对植株镉含量影响的差异性各个时期表现不一致。总体而言,水稻全生育期内在两种质地的土壤条件下,CdPb 处理与 Cd 处理植株镉含量均

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 The basic properties of tested soils

土壤质地	pH	有机质/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	总铅/mg·kg ⁻¹	总镉/mg·kg ⁻¹	有效态镉/mg·kg ⁻¹
砂土	7.43	11.93	0.54	26.99	50.21	30.850	0.55	0.068
黏土	7.19	8.62	0.49	16.20	58.54	13.246	0.73	0.043

表 2 水稻不同生育期植株镉的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 The content of cadmium of rice plant at different stages($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤质地	处理	分蘖盛期	拔节期	齐穗期	成熟期
砂土	Cd	1.90Bb	1.26Aa	0.56Bb	0.44Bb
	Cd+秸秆	1.92Bb	1.48Aa	1.01ABa	0.6ABb
	CdPb	2.50Aa	1.66Aa	1.43Aa	1.29Aa
	对照	0.11	0.10	0.08	0.08
黏土	Cd	1.79Cc	1.35Bb	0.97Bc	0.62Bc
	Cd+秸秆	2.49Bb	1.81Bb	1.26Bb	0.86Bb
	CdPb	6.11Aa	3.14Aa	2.55Aa	2.49Aa
	对照	0.10	0.08	0.09	0.09

注:同一列同一土壤质地中,不同小写字母者表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著,不同大写字母表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

表现出极显著差异,说明铅在两种质地土壤中都可以很明显的促进水稻各个时期对镉的吸收和积累。Cd+秸秆处理与 Cd 处理植株镉各个时期含量不同质地土壤表现出不同差异,砂土中除齐穗期植株镉的含量差异显著外($P<0.05$),其他各时期植株镉含量在两种水平上均表现出差异不显著,黏土中除分蘖盛期植株镉的含量差异极显著外($P<0.01$),其他各时期差异显著($P<0.05$),但拔节期在两种水平上均表现出差异不显著,说明麦秸在两种不同质地的土壤中促进水稻对镉的吸收作用不同,黏土的促进作用大于砂土。

2.2 水稻籽粒镉含量及其富集

从图 1 可以看出,添加外源镉后籽粒中镉含量升高,升高幅度黏土大于砂土。麦秸和铅可以进一步提高籽粒中镉的积累量,不同质地的土壤提高的程度不同。砂土中,CdPb 处理籽粒镉含量为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd+秸秆处理籽粒镉含量砂土为 $0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 Cd 处理分别增加 44.00%和 36.00%;黏土中,

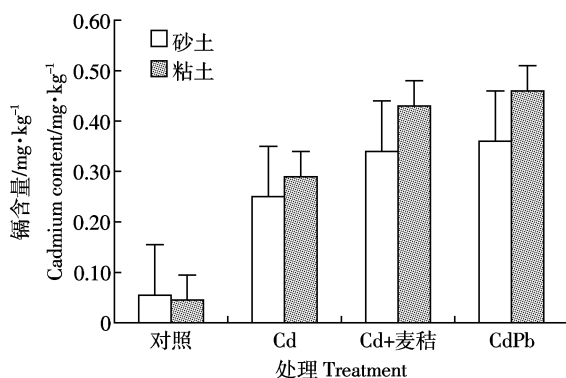


图 1 不同处理下籽粒中镉含量

Figure 1 The content of cadmium of grain in different treatment

CdPb 处理籽粒镉含量为 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd+秸秆处理籽粒镉含量为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 Cd 处理分别增加 58.62%和 43.00%。

水稻籽粒中镉的富集系数为籽粒中镉含量与土壤中镉含量的比值。图 2 表示在不同质地的土壤条件下,籽粒镉的富集程度不同。添加外源镉后籽粒镉的富集系数明显升高,升高幅度黏土大于砂土。麦秸和 Pb 可以提高籽粒镉的富集系数,不同质地的土壤升高的程度不一样。砂土中,CdPb 处理籽粒镉的富集系数为 0.17,Cd+秸秆处理为 0.18,比 Cd 处理分别提高了 41.67%和 50.00%;黏土中,CdPb 处理籽粒镉富集系数为 0.19,Cd+秸秆处理为 0.21,比 Cd 处理分别提高了 46.15%和 61.54%。

2.3 耕层以下土壤镉的纵向分布

进入土壤的重金属镉,一部分被植物吸收,一部分随着土壤溶液的下渗而迁移进入土壤耕层以下的土壤,还有很大一部分被固定在土壤中无法迁移。重金属镉能够接受多种阴离子和独对电子,生成配位络合物,还能与一些大分子有机物生成螯合物。难溶性的重金属在生成络合物和螯合物以后,其在水中的溶解度可能增大,进而在土壤环境中迁移,增大其污染危害的范围。

从表 3 可以看出,随着土壤深度的增加镉含量逐渐减少,表明了镉随着土壤溶液向下迁移的过程中,土壤不断吸附固定溶液中镉,减弱了镉继续向下迁移的能力。方差分析表明,不同质地的土壤对镉的吸附固定能力不同,在砂土中,60~80 cm 土层土壤镉含量与对照镉含量差异极显著($P<0.01$),而黏土在 40~60 cm 土层土壤镉含量与对照镉含量差异就已经不显著($P<0.01$)。

从表 3 还可以看出,Cd 处理各层土壤镉含量比

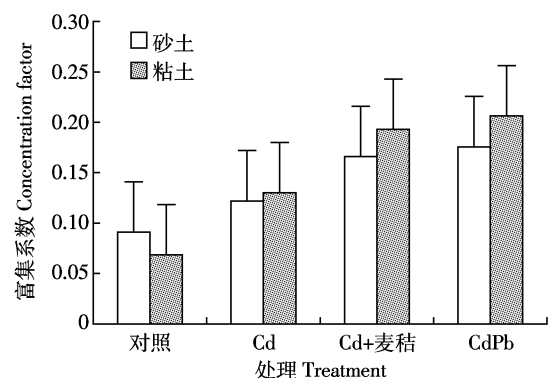


图 2 不同处理下籽粒中镉的富集系数

Figure 2 The concentration factor of grain in different treatment

表3 镉在土壤耕层以下不同土层中含量分布

Table 3 Contents of cadmium in different layers of soil under topsoil

土壤质地	处理	各土层镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
		20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm
砂土	Cd	0.747Aa	0.630Aa	0.623Aa
	Cd+麦秸	0.627Bb	0.59ABab	0.537Bb
	CdPb	0.623Bb	0.567ABbc	0.533Bb
	对照	0.503Cc	0.543Bc	0.553Bb
黏土	Cd	0.850ABa	0.807Aa	0.773Aa
	Cd+麦秸	0.820BCb	0.803Aa	0.777Aa
	CdPb	0.847Aa	0.790Aa	0.777Aa
	对照	0.797Cc	0.777Aa	0.780Aa

CdPb、Cd+麦秸处理的高,表明短期内麦秸和铅均可以促进土壤对镉的吸附和固定,降低镉在土壤中的迁移性。方差分析表明,不同质地的土壤的促进作用不同,砂土中CdPb、Cd+麦秸处理各个土层镉含量基本上与Cd处理镉含量差异显著($P<0.05$),黏土中只有20~40 cm土层中Cd+麦秸与Cd处理镉含量差异显著,其余各土层镉含量差异不显著($P<0.05$),表明短期内麦秸和铅对土壤吸附和固定镉的促进作用砂土大于黏土。

3 讨论

随着水稻的生长发育,水稻对重金属抗性提高以及生物量不断增加,植株体内镉含量逐渐降低。水稻对重金属镉的吸收除了受本身因素的影响还受到土壤因素的影响,不同土壤质地具有不同的pH、Eh、有机质含量、阳离子交换量等,对水稻吸收镉产生不同的影响。

在本试验条件下,铅可以促进水稻对镉的吸收和积累,这与前人的研究结果相似^[8-9],究其原因可能为镉、铅同时存在时,铅可夺取镉在土壤中的吸附点^[10-11],提高了土壤中镉的有效性,使其更易被水稻所吸收。

镉污染土壤上施用麦秸,提高了镉的植物有效性,使水稻镉含量显著增加。麦秸分解产生的有机酸、氨基酸等产物及次生的聚合物(胡敏酸、富里酸等),可与镉形成可溶的络合物,从而提高了镉的有效性。贾乐等研究表明,镉污染水稻土上还田玉米和菜豆秸秆显著提高了土壤中醋酸铵提取态镉和DTPA提取态镉含量^[12]。植物吸收的镉主要为离子态,吸收离子态镉的时候植物一般会产生生理反应,阻止镉过量进入植物,而麦秸分解产生的有机酸、氨基酸等能与镉

形成络合物,植物可以直接吸收有机酸、氨基酸等小分子有机物,随着植物对这些有机物质的吸收,络合态镉也可能同时进入体内。潘逸等的研究结果表明,施用水稻秸秆后旱地耕层土壤中交换性镉含量明显增加,从而促进小麦对镉的吸收和积累,在重金属污染的土壤中当季大量施用新鲜的有机肥可能有增加重金属污染的风险^[13]。

镉属于积累性土壤污染物,进入土壤的镉与土壤中的无机-有机胶体发生吸收代换作用,使镉大部分积累在0~20 cm的耕层中,很少向下迁移^[14],土壤质地越粘重,土壤对重金属的吸附能力越强。本研究表明0~20 cm以下土壤镉含量较低,与上述结论相似。已有研究表明麦秸对土壤镉具有溶出作用,有助于镉在土壤中的迁移^[5,12],但也有研究表明,施用秸秆等有机物可以原位钝化土壤中重金属^[15]。本试验表明,在短时间内(一季稻)麦秸对镉在土壤中的迁移表现出抑制的作用。镉在土壤中迁移途径主要是溶于土壤溶液,随着水分流动而迁移,水稻生长过程中土壤水分饱和,水分向下流动量低,加之土壤中重金属有向根际土壤迁移的趋势,导致镉很难向下迁移。

4 结论

(1)在低浓度非胁迫的条件下,随着水稻的生长发育,植株体内重金属含量逐渐减少,麦秸和重金属铅均可以促进水稻对镉的吸收,增加植株体内以及籽粒中镉的含量,从而导致水稻安全品质的降低。麦秸和铅在不同质地土壤中促进水稻对镉的吸收作用不同,在黏土中的作用大于砂土。

(2)重金属镉进入土壤后会随着水分流动在土壤中向下迁移,本试验研究表明,短时间内麦秸和重金属铅在稻季对土壤固定和吸附镉具有一定的促进作用,不同质地土壤促进作用不同,在砂土中的促进作用大于黏土。

参考文献:

- [1] Michael P Waalkes. Cadmium carcinogenesis in review[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2000, 79: 241-244.
- [2] 魏树和,周启星,刘睿. 重金属污染土壤修复中杂草资源的利用[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 432-440.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, LIU Rui. Utilization of weed resource in the remediation of soils contaminated by heavy metal[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 432-440.
- [3] 顾继光,林秋奇,胡韧,等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 128-133.

- GU Ji-guang, LIN Qiu-qi, HU Ren, et al. Heavy metals pollution in soil-plant system and its research prospect[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 128-133.
- [4] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242-247.
- GAO Xiang-zhao, MA Wen-qi, MA Chang-bao, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, 21(3): 242-247.
- [5] 单玉华, 李昌贵, 陈晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1362-1366.
- SHAN Yu-hua, LI Chang-gui, CHEN Chen, et al. Effects of straw incorporation on the solubility of cadmium and copper in flooded soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1362-1366.
- [6] 杨京蓉, 等. 微波消解 ICP-AES 法测定粮食中的常量及微量元素[J]. 光谱实验室, 1997, 14(3): 22-25.
- YANG Jing-rong, et al. Determination of the content of major and trace elements in the grain crops by microwave digestion and ICP-AES method[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 1997, 14(3): 22-25.
- [7] 陈丰, 刘芳. 微波消解 ICP-AES 法测定土壤中的环境有效态金属元素[J]. 上海环境科学, 2003, 22(12): 967-970.
- CHEN Feng, LIU Fang. Detection of metal elements under effective state of environment in soil with microwave digestion and ICP-AES[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(12): 967-970.
- [8] 王新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应研究[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 41-44.
- WANG Xin, LIANG Ren-lu, ZHOU Qi-xing. Ecological effect of Cd-Pb combined pollution on soil-rice system[J]. *Rural Eco-environment*, 2001, 17(2): 41-44.
- [9] 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-289.
- LI Ben-yin, WANG Peng, WU Xiao-chen, et al. Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 281-289.
- [10] 杨崇洁. 几种金属元素进入土壤后的迁移转化规律及吸附机理的研究[J]. 环境科学, 1989, 10(3): 2-8.
- YANG Chong-jie. Transport and transformation of some heavy metals in soil and research of their adsorption mechanism[J]. *Environmental Science*, 1989, 10(3): 2-8.
- [11] 余国营, 吴燕玉. 土壤环境重金属元素的相互作用及其对吸附特性的影响[J]. 环境化学, 1997, 16(2): 30-36.
- YU Guo-ying, WU Yan-yu. Effect of heavy metals joint action on their characteristic of sorption and desorption in brown soil[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(2): 30-36.
- [12] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯, 等. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992-1998.
- JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun, et al. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1992-1998.
- [13] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(2): 142-146.
- PAN Yi, ZHOU Li-xiang. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on copper and cadmium activity in the contaminated wheat soil: field micro-plot trials[J]. *Environmental Science*, 2007, 30(2): 142-146.
- [14] 陈怀满, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CHEN Huai-man, et al. Behavior of chemicals in soil and environmental quality[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [15] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10): 1292-1300.