

施肥对土壤重金属的影响研究进展

邢维芹*,冉永亮,梁爽,史凡,李立平
(河南工业大学 化学化工学院,河南 郑州 450001)

摘要:综述了近年来施肥对土壤重金属含量和有效性影响的研究进展。主要回顾了施用化肥、有机肥、污泥对土壤重金属含量和有效性的影响,并对今后的研究进行了展望。

关键词:肥料;土壤;重金属;有效性

中图分类号: S147.2 X131.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-3268(2010)05-0129-05

施肥是农田生态系统中物质输入的重要途径,因此,关注施肥对农田土壤重金属含量和有效性的影响对于控制农田土壤质量具有重要意义。目前,我国耕地化肥使用量平均每年达 375 kg/hm^2 ,肥料的连续施用会向土壤中输入一定量的重金属,同时施肥也会影响土壤原有重金属循环过程。

1 施肥对土壤重金属含量的影响

施肥是影响土壤重金属含量的重要因素。不同土地利用方式下施用肥料的种类和数量不同。大量施肥的菜地土壤中某些重金属的含量显著高于种植粮食作物的农田土壤^[1,2]。

1.1 化肥

通常,磷肥和有机肥中重金属含量较高^[1,3,4],磷肥中最常见的重金属是 Pb、Cd、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni 和 V 等^[4,7](As 为类金属,文中为叙述方便以重金属称之),不同磷肥重金属含量差别较大^[8]。氮肥和钾肥重金属含量较低^[4,9,10]。

世界范围内,每年磷肥用量在 $3 \times 10^7 \text{ t}$ 左右^[11],磷肥对土壤重金属的积累有重要贡献^[1,12-15]。长期肥料试验结果表明,施用磷肥是土壤重金属含量增加的主要原因^[12,16]。潮土上 25 a 定位试验结果表明,土壤 Cd 和 Pb 的富集主要来自施用的过磷酸钙,施用过磷酸钙后土壤 Cd 富集量高出试验前 $3.4 \sim 38.6$ 倍^[16]。连续施肥 12 a 后土壤重金属相对百分含量增加顺序为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As}$,4 种元素分别比试验开始时增加了 81%、23%、17% 和 7%^[12]。但也有些长期定位试验结果表明,施用化

学磷肥对土壤重金属含量的影响较小^[17,18]。

1.2 有机肥

农业生产中施用的有机肥主要以畜禽粪便、作物秸秆和其腐熟产物为主。在规模化畜禽养殖过程中,由于饲料中广泛添加 Cu、Zn、Fe、As、Mn 等元素,导致畜禽粪便积累高量的重金属元素^[1,5,7,9-12]。一般情况下,作物秸秆重金属含量较低,但在有大气污染源或土壤污染情况下,作物秸秆也会含有较高量的重金属^[22]。

对我国 7 个省、市、自治区的典型规模化养殖场畜禽粪便的研究表明,As、Cu、Zn、Cr 等重金属含量较高,55 个猪、鸡粪样中, Cu、Zn、Cr 和 As 含量变幅分别为 $10.7 \sim 1591 \text{ mg/kg}$ 、 $71.3 \sim 8710 \text{ mg/kg}$ 、 $0 \sim 688 \text{ mg/kg}$ 、 $0.01 \sim 65.4 \text{ mg/kg}$,猪粪中 Cu、Zn、Cr 和 As 含量明显高于鸡粪^[23]。我国商品有机肥中重金属 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd、Ni、Hg 和 As 的含量变异很大,从痕量到百分之几,平均含量分别为 732.4 mg/kg 、 75.4 mg/kg 、 53.5 mg/kg 、 36.6 mg/kg 、 5.64 mg/kg 、 21.0 mg/kg 、 0.44 mg/kg 、 2.96 mg/kg 。畜禽粪便在腐熟过程中,由于有机物的分解,会导致其中的重金属含量增加^[21,24]。

有机肥料中,长期施用畜禽粪便易造成土壤重金属积累^[17,18,25],绿肥由于重金属含量低而对土壤重金属含量的影响较小^[25,26]。对湖南省 7 个 18 a 长期定位试验土壤的研究表明,施用有机肥(猪厩肥)加大了稻田土壤受重金属污染的风险,中、高量有机肥处理明显提高了土壤 Zn、Cu、Cd 的含量,高量有机肥处理下土壤 Zn、Cu、Cd 含量分别比对照增

收稿日期: 2009-11-29

作者简介:邢维芹(1972-),女,河南安阳人,副教授,博士,主要从事土壤污染与修复研究。*为通讯作者。

E-mail: weiqinxing@yahoo.com.cn

加了6.1%、18.7%和8.3%，施用有机肥对土壤Pb的影响较小^[17]。紫色水稻土长期施用有机肥（猪粪、胡豆青和细绿萍）与单施化肥比较，全Zn增加了5.5%~30.0%，同时，长期施用有机肥增大了土壤Cu的消耗，此外，不同有机氮和无机氮组合也影响到土壤重金属的形态和总量^[26]。非石灰性潮土上26a的定位试验结果表明，长期单施有机肥土壤的Pb积累量低于不施肥土壤^[16]。

3a 定位试验结果表明，有机肥（紫云英、猪厩肥、稻草）、无机肥（氮磷钾肥）配施在提高土壤Zn、Cu储量方面有重要作用，猪厩肥对提高土壤Zn、Cu全量的作用最大^[25]。在水稻土和赤红壤中分别以质量分数2%和4%施入含As、Cu和Zn的鸡粪和猪粪，与对照相比，土壤全As、Cu和Zn含量分别提高0.3~3.0mg/kg、3.1~30.4mg/kg、10.6~79.6mg/kg^[19]。

不同腐熟阶段的有机肥（污泥和棉花废弃物的混合物）施入土壤后（用量与土壤质量比为1:49），有机肥引起土壤Zn含量增加2.9mg/kg，Cu、Ni、Cd、Cr和Pb的增加幅度均在1mg/kg以下^[27]。

1.3 污泥

污泥是农业生产中施用的另外一类重金属含量较高的有机物。污泥中常见的重金属有Hg、Pb、Cd和Cr等，不同来源的污泥重金属含量差异较大。广州市某污水厂污泥中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和Ni的含量分别为289.4mg/kg、723.6mg/kg、145.8mg/kg、3.48mg/kg、105.5mg/kg、86.92mg/kg，均低于污泥农用控制标准值^[28]。泰国曼谷一污水处理厂污泥中Zn、Mn、Cu、Ni、Pb、Cd和Cr平均含量分别为2061.0mg/kg、471.0mg/kg、218.0mg/kg、24.95mg/kg、12.2mg/kg、2.1mg/kg、19.6mg/kg^[29]。美国宾夕法尼亚的18个农场施用的污泥As、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg、Ni、Se、Zn平均含量分别为3.4mg/kg、2.2mg/kg、35.1mg/kg、505.0mg/kg、62.0mg/kg、1.5mg/kg、22.0mg/kg、4.4mg/kg、694.0mg/kg^[30]。不同行业的污泥重金属含量存在较大差异，武汉市化工厂污泥中Cd、Cu、Zn和Pb含量均高于机械厂污泥，啤酒厂污泥中Cr含量较高，而污水处理厂污泥中Ni含量较高^[31]。

美国宾夕法尼亚18个农场施用污泥（用量为5~159t/hm²，施用2~18a）试验结果表明，施用污泥的土壤中Cu、Cr、Hg、Mo、Mn、Pb和Zn含量高于对照，根据参考指标判断，Pb的积累程度最大，但作物器官中这些元素含量与对照没有显著差异^[30]。

施用脱水的厌氧分解污泥、腐熟污泥和污泥灰均提高了表层土壤Cu、Zn和Pb含量^[32]。

工业废水污泥与稻草制成的堆肥在用量为每年5t/hm²和10t/hm²时，连续12a施用造成表土全Cu和全Zn的积累量明显增加，同时小麦籽粒、甜菜根、玉米籽粒中Cu含量也上升^[33]。以75、150、300、600t/hm²的用量施用城市生活垃圾堆肥，发现各用量引起土壤中Cu、Zn含量增加，小麦籽粒Cu、Zn含量也有所上升^[34]。

2 施肥对土壤重金属有效性的影响

长期施肥可能会导致土壤重金属含量的变化并影响土壤重金属的有效性^[35]。不同作物对同一土壤中同一重金属的吸收存在差异，同时，肥料中的阳离子也对作物吸收重金属有重要影响^[36]。

2.1 化肥

在重金属污染土壤中施用磷肥是降低土壤重金属有效性的有效方法。一般认为，水溶性磷加入土壤后会与土壤重金属形成多种形态的难溶性磷酸盐，从而降低土壤重金属的有效性。向人为加入Pb形成的污染砖红壤中施加过磷酸钙，能显著降低水溶态Pb和交换态Pb的含量，可使有机结合态Pb、碳酸盐结合态Pb和铁锰氧化物结合态Pb含量下降，而残余态Pb增加^[37]。研究发现，在Cd、Pb、Zn污染的酸性土壤上，施用钙镁磷肥能显著抑制Cd、Pb和Zn对小白菜的毒害及向地上部的迁移^[38]。在未污染土壤中，大田和土壤培养试验表明，施磷有增加土壤Zn、Cu和Mn有效性的趋势^[39]。加入重过磷酸钙可降低Pb、Sb和As污染土壤中Pb的生物有效性，但在加入初期可增加Pb的移动性，并且引起土壤中Sb和As的显著释放，显著增加后2种元素的移动性，并在一定程度上增加其生物有效性^[40]。

磷肥对土壤重金属有效性的影响还受磷肥种类的影响。在磷肥对As污染土壤的影响方面，过磷酸钙对解除As毒性的效果较差，磷酸二氢钙的效果最好^[41]。磷矿粉、羟基磷灰石和磷酸氢钙对土壤Pb有效性的影响差异较小^[42]。研究也表明，在Pb污染土壤中施入磷肥后，Pb的有效性降低，植物生长受到促进，同时，虽然植物体内Pb浓度降低，但由于植物生长量的增加，植物对Pb的吸收反而会增加^[43]。As污染土壤施用磷肥后植物生长得到促进，植物对As的积累量也比未施用磷肥时有所增加^[44]。

许多研究表明，铵态氮肥对作物吸收Cd有促进作用^[36]。氯离子能够与Cd形成络离子，从而增加后

者的溶解性。因此,水溶性氯能够增加植物对 Cd 的吸收。研究表明,将 KCl 与含 Cd 过磷酸钙混合后造粒施用与将二者分别造粒后混合施用,前者能增加植物对 Cd 的吸收^[45]。盆栽试验结果表明,Cd 污染土壤施用 K₂SO₄ 对土壤中 Cd 的化学形态和 Cd 对小麦的毒性有影响,施用钾肥降低了土壤中交换态 Cd 含量^[46]。

2.2 有机肥

由于有机肥来源广泛、种类多样,导致不同有机肥对土壤重金属形态的影响可能不同,不同有机肥施入土壤后对土壤 pH 的影响也可能存在差异^[47]。另外,有机肥施入土壤后,不但影响土壤重金属全量,而且还会通过有机肥及其分解产物中的有机物影响土壤重金属形态。

土壤重金属含量对有机肥施用后土壤重金属有效性的变化也有影响。一般来说,在未污染土壤施用大量重金属含量较高的有机肥会增加土壤重金属的有效性。3a 定位试验表明,施肥对水稻土 Zn 和 Cu 形态有明显的影响,猪厩肥提高土壤有效态 Zn 和 Cu 的作用最大^[25]。在水稻土和赤红壤中施入含 As、Cu 和 Zn 的鸡粪和猪粪,与对照相比,粪肥处理土壤有效态 As、Cu 和 Zn 分别提高 0.011 ~ 0.034 mg/kg、5.2 ~ 19.4 mg/kg、4.0 ~ 65.9 mg/kg^[19]。长期施用中、高量猪厩肥处理明显提高了稻田土壤 Zn、Cu 和 Cd 有效性,高量有机肥处理下土壤 Zn、Cu 和 Cd 有效态含量分别比对照增加了 87.3%、65.8%和 41.4%,但对土壤 Pb 的影响较小,原因可能是厩肥中 Zn、Cu 和 Cd 含量较高而 Pb 含量较低^[17]。张青等研究发现,施用有机肥后污染土壤 Cd 和 Zn 有效性下降,而未污染土壤中这 2 种重金属的有效性略有升高^[48]。

有机肥重金属含量也影响施用有机肥后的土壤重金属有效性。在污染土壤中施用重金属含量高的畜禽粪便一般能提高土壤重金属的有效性;作物秸秆由于重金属含量低,施用后可引起重金属有效性下降。在未污染的混合土壤中,加入重金属含量较低的稻草和重金属含量较高的鸡粪,前者能够降低土壤重金属有效性,而后者显著增加土壤重金属有效性^[20]。然而,潘逸等的微区试验研究表明,水稻秸秆对作物吸收 Cu 和 Cd 的促进作用比猪粪大^[49]。在 Zn、Pb 污染土壤中施用新鲜牛粪和橄榄壳,橄榄壳处理增加了土壤 DTPA-Mn 的含量,持续时间达 15 个月,橄榄壳处理在 3 个月内也增加了 DTPA-Cu 的含量,2 种处理对 DTPA-Fe、Zn 和 Pb 的含量没有显著影响,Mn 有效性提高的原因是还原条件

促进了 Mn 的溶解^[50]。

2.3 污泥

总的来说,污泥影响土壤重金属有效性的研究较少。土柱试验表明,无污染土壤中施用脱水的厌氧分解污泥、腐熟污泥均提高了土壤 DTPA-Cu、Zn 和 Pb 含量,重金属存在向土壤下层的运动^[32]。将污泥和煤灰按不同比例混合,以 52 t/hm² 的用量施用一次,施用 1 a 后,土壤活性 Cd、Ni 和 Zn 含量明显上升,这种变化可能与土壤有机碳含量下降有关^[51]。不同腐熟阶段的有机肥(污泥和棉花废弃物的混合物)施入土壤后,腐熟程度并不影响土壤 Zn、Ni、Pb、Cu、Cr 和 Cd 的有效性。加入有机肥后,DTPA-Cu 含量下降,而 DTPA-Zn 增加,Ni 和 Pb 有效性受有机肥的影响较小^[27]。Zhang 等将污泥和树枝堆肥按不同比例加入泥炭制成植物生长基质,随着堆肥比例的增加,基质中水溶态重金属除 Cu 外均下降,因为堆肥中 Fe、Al、Ca 含量和 pH 值均比泥炭高^[52]。

3 展望

综上所述表明,肥料对土壤重金属的影响主要有 3 个方面,一是由于部分肥料中含有重金属,因此施用这些肥料能够增加土壤重金属的含量;二是某些肥料能够影响植物对重金属的吸收,从而影响土壤重金属的含量;三是肥料,尤其是有机肥和污泥施用后对土壤重金属有效性有影响。在长期定位试验中,施肥处理的土壤重金属含量可能会低于对照^[16,18],这可能与施肥处理增加了植物从土壤中带走的重金属数量有关。因此,仅考虑肥料中的重金属含量及肥料施用后土壤重金属有效性的变化对于评价肥料对土壤重金属的影响是不全面的。要全面、准确理解肥料对土壤重金属的影响,必须考虑施肥带入土壤的重金属数量和施肥后植物从土壤中带走重金属数量的变化。

从研究现状来看,磷肥、复合肥和畜禽粪便重金属含量较高,长期大量施用这类肥料将会引起土壤重金属积累。不同施肥条件下植物生长状况和重金属的吸收也有差别,从而造成不同施肥方式对土壤重金属的积累产生影响。目前,多数长期定位试验设置了作物秸秆和畜禽粪便处理,很少有试验设置施用污泥的处理。随着城市化和规模化畜禽养殖的快速发展,将会有越来越多的污泥和畜禽粪便产生,这两类有机物施入土壤除影响土壤重金属含量和有效性外,还可能会影响到地下水和作物籽粒中重金

属含量,因此,应当重视污泥和畜禽粪便施用的长期效应。

土壤重金属含量是重金属添加量和通过作物收获带走的数量平衡的结果,肥料不但影响土壤中的重金属总量,同时也通过影响作物生长及对重金属的吸收影响土壤重金属含量。从目前研究来看,大部分研究仅关注了施肥对土壤重金属总量或有效性的影响,少数研究也关注了对作物吸收重金属的影响,很少有研究关注长期定位施肥条件下施肥对土壤重金属平衡的影响,尤其是长期试验中作物对土壤重金属吸收的变化。因此,在长期定位试验中,结合物质流分析,对不同施肥方式下重金属在农田生态系统中的循环进行分析,从而了解不同施肥方式对土壤重金属平衡的影响。

参考文献:

- [1] Sheppard S C, Grant C A, Sheppard M I, *et al.* Heavy metals in the environment risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils [J]. *J Environ Qual*, 2009, 38(3): 919-932.
- [2] Huang S W, Jin J Y. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 139(1-3): 317-327.
- [3] Otero N, Vitoria L, Soler A, *et al.* Fertiliser characterization: Major, trace and rare earth elements [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(8): 1473-1488.
- [4] 陈海燕, 高雪, 韩峰. 贵州省常用化肥重金属含量分析及评价 [J]. *耕作与栽培*, 2006(4): 18-19.
- [5] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 392-397.
- [6] 任顺荣, 邵玉翠, 王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 216-218.
- [7] 董占荣, 陈一定, 林咸永, 等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态 [J]. *浙江农业学报*, 2008, 20(1): 35-39.
- [8] 周永锋, 刘兴成, 周艳琳. 肥料中重金属含量及其对干旱灌溉农区玉米吸收累积的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 503-506.
- [9] 刘志红, 刘丽, 李英. 进口化肥中有害元素砷、镉、铅、铬的普查分析 [J]. *磷肥与复肥*, 2007, 22(2): 77-78.
- [10] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险 [J]. *农村生态环境*, 2004, 20(2): 62-64.
- [11] Ashraf E, Khater M. Uranium and heavy metals in phosphate fertilizers [M]. // Merkel B J, Hasche-Berger A. Uranium, mining and hydrogeology. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 193-198.
- [12] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化 [J]. *土壤*, 2005, 37(3): 308-311.
- [13] Luo W, Lu Y, Giesy J P, *et al.* Effects of land use on concentrations of metals in surface soils and ecological risk around Guanting reservoir, China [J]. *Environ Geochem Health*, 2007, 29(6): 459-471.
- [14] Huang B, Kuo S, Bembenek R. Cadmium uptake by cucumber from soil amended with phosphorus fertilizers [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2003, 128(4): 615-620.
- [15] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 96-99.
- [16] 刘树堂, 赵永厚, 孙玉林, 等. 25 年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 164-167.
- [17] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 105-108.
- [18] 王颖, 韩晓日, 孙彬彬, 等. 长期定位施肥对棕壤重金属的影响及其环境质量评价 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(4): 442-446.
- [19] 姚丽贤, 李国良, 党志, 等. 施用鸡粪和猪粪对 2 种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响 [J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2592-2598.
- [20] 郝秀珍, 周东美, 钱海燕. 改良剂对铜矿尾矿砂与菜园土混合土壤性质及黑麦草生长的影响 [J]. *农村生态环境*, 2003, 19(2): 38-42.
- [21] Ko H J, Kim K Y, Kim H T, *et al.* Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure [J]. *Waste Management*, 2008, 28(5): 813-820.
- [22] Bi X, Feng X, Yang Y, *et al.* Allocation and source attribution of lead and cadmium in maize (*Zeamays* L.) impacted by smelting emissions [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(3): 834-839.
- [23] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 822-829.
- [24] Gil M V, Carballo M T, Calvo L F. Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients [J]. *Waste Management*, 2008, 28(8): 1432-1440.
- [25] 潘伟彬, 李延, 庄卫民, 等. 施肥对红壤性水稻土锌、铜形态及有效性的影响 [J]. *福建农业学报*, 2000, 15(2): 45-49.
- [26] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*,

- 2000, 6(1): 11-17.
- [27] Sanchez-Monedero M A, Mondini C, de Nobili M, *et al.* Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter[J]. *Waste Management*, 2004, 24(4): 325-332.
- [28] 张朝升, 陈秋丽, 张可方, 等. 大坦沙污水厂污泥重金属形态及其生物有效性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 1259-1264.
- [29] Parkpian P, Leong S T, Laortanakul P, *et al.* Influence of salinity and acidity on bioavailability of sludge-borne heavy metals. A case study of Bangkok municipal sludge[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 139(1/4): 43-60.
- [30] Shober A L, Stehouwer R C, Macneal K E. On-farm assessment of biosolids effects on soil and crop tissue quality[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32(5): 1873-1880.
- [31] 胡承孝, 谭启玲, 吴礼树, 等. 湖北省武汉市几种污泥的化学特性及其在作物生产中的应用[J]. *华中农业大学学报*, 2002, 21(4): 362-366.
- [32] Benitez E, Romero E, Gomez M, *et al.* Biosolids and biosolids-ash as sources of heavy metals in a plant-soil system[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 132(1/2): 75-87.
- [33] Mantovi P, Baldoni G, Toderi G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop[J]. *Water Research*, 2005, 39(2/3): 289-296.
- [34] 马琨, 王兆骞, 杜茜, 等. 城市生活垃圾堆肥对春小麦生长和土壤的影响[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(5): 312-314.
- [35] Ju X T, Kou C, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497-506.
- [36] Kashem M A, Singh B R. The effect of fertilizer additions on the solubility and plant-availability of Cd, Ni and Zn in soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(3): 287-296.
- [37] 岳平. 添加化学改良剂对海南岛砖红壤中铅的化学形态与转化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1791-1795.
- [38] 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.
- [39] 张淑香, 王小彬, 金柯, 等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 391-396.
- [40] Kilgoura D W, Moseley R B, Barnetta M O, *et al.* Heavy metals in the environment potential negative consequences of adding phosphorus-based fertilizers to immobilize lead in soil[J]. *J Environ Qual*, 2008, 37(5): 1733-1740.
- [41] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2906-2911.
- [42] 陈世宝, 朱永官, 马义兵. 不同磷处理对污染土壤中有效态铅及磷迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(7): 1140-1144.
- [43] 陈世宝, 朱永官. 不同含磷化合物对中国芥菜 (*Brassica oleracea*) 铅吸收特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 707-712.
- [44] Pigna M, Cozzolino V, Violante A, *et al.* Influence of phosphate on the arsenic uptake by wheat (*Triticum durum* L.) irrigated with arsenic solutions at three different concentrations[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 197(1): 371-380.
- [45] Chien S H, Carmona G, Prochnow L I, *et al.* Cadmium availability from granulated and bulk-blended phosphate-potassium fertilizers[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32(5): 1911-1914.
- [46] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 182-188.
- [47] 朱林, 张春兰, 沈其荣. 施用稻草等有机物料对黄瓜连作土壤 pH、EC 值和微生物的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2001, 28(4): 350-353.
- [48] 张青, 李菊梅, 徐明岗, 等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 861-865.
- [49] 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.
- [50] Clemente R, de la Fuente C, Moral R, *et al.* Changes in microbial biomass parameters of a heavy metal-contaminated calcareous soil during a field remediation experiment[J]. *J Environ Qual*, 2007, 36(4): 1137-1144.
- [51] Chaudhuri D, Tripathy S, Veeresh H, *et al.* Relationship of chemical fractions of heavy metals with microbial and enzyme activities in sludge and ash-amended acid lateritic soil from India[J]. *Environmental Geology*, 2003, 45(1): 115-123.
- [52] Zhang M K, He Z L, Stoffella P J, *et al.* Solubility of phosphorus and heavy metals in potting media amended with yard waste-biosolids compost[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33(1): 373-379.