

长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响

李双异, 刘 赫, 汪景宽

(农业部土壤与环境重点实验室, 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要:以沈阳农业大学长期定位试验为基础,选取(0~20 cm)不同年限土壤样品,分析了无肥对照(CK)、单施化肥(N_4P_2)、中量有机肥(M_2)、高量有机肥(M_4)和高量有机肥+化肥($M_4+N_2P_1$)5个处理下土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb 和 Cd 全量及其有效态含量的变化。结果表明,20 多年的定位施肥增加了土壤中重金属元素 Cu、Zn、Pb 和 Cd 全量,虽然有所波动但总的趋势明显,其中以 $M_4+N_2P_1$ 处理对 Cu 和 Zn 增加最为明显,而 Pb 和 Cd 在 M_4 处理增长量最大,单施 N_4P_2 处理对 4 种重金属元素全量影响不明显。施有机肥能显著提高 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量,与对照相比分别平均提高 61.28 %、169.3 %和 123.7 %,不同施肥处理土壤中 Cd 含量已超标,属污染水平。有效态 Pb 在 N_4P_2 处理要显著高于其他各处理,而各年份 M_4 处理有效态 Pb 的含量要低于 CK 处理。20 年来有效态 Pb 含量相对于 CK 平均降低了 4%。土壤中 4 种重金属全量与其有效态含量相关性表明:Cu、Zn 和 Cd 全量与其有效态含量呈极显著正相关关系,全量 Pb 与有效态 Pb 呈显著负相关而与有效态 Cu 和 Zn 不显著相关。

关键词:长期定位施肥;棕壤;重金属;有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1125-05

Effects of Long-term Located Fertilization on Heavy Metals and Their Availability in Brown Earth

LI Shuang-yi, LIU He, WANG Jing-kuan

(The Soil and Environment Key Lab of the Ministry of Agriculture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Based on the long-term located experiment in Shenyang Agricultural University, the contents of heavy metals (Cu, Zn, Pb and Cd) in soil were determined in five treatments, such as no fertilizer control (CK), a single application of chemical fertilizer (N_4P_2), the moderate level of organic manure (M_2), high level of organic fertilizer (M_4), and high level of organic manure mixed with chemical fertilizer ($M_4+N_2P_1$). The results showed that after 20 years of applying fertilization, the contents of Cu, Zn, Pb and Cd in soil increased generally. Treatments with high organic manure mixed with chemical fertilizers made significant impacts for Cu and Zn. While the Pb and Cd contents were increased significantly in M_4 . Chemical fertilizer treatment (N_4P_2) had not affected the contents of Cu, Zn, Pb and Cd. The available contents of Cu, Zn, Cd and Pb in soil were enhanced in the treatments of manure applied, with the average increase of 61.28%, 169.3% and 123.7% compared with CK. The contents of available Pb in N_4P_2 was significantly high compared with other treatments, and the contents of available Pb in M_4 was lower than CK in different years. During the past 20 years, the content of available Pb reduced 4% compared with CK. The correlation and their availability showed that the contents of Cu, Zn and Cd highly were significant positive correlation. The content of Pb and its availability were significantly negative related and not significantly related with available Cu and available Zn in soils.

Keywords: long-term fertilization; brown earth; heavy metal; availability

重金属在土壤中的积累是全世界面临的一个主要环境问题^[1]。我国作为世界人口大国,随着经济的发展、人口的不断增加、耕地的逐年减少,粮食安全成为

国家安全的关键。而提高粮食单产则成为解决我国粮食安全问题的主要途径^[2],其中肥料的大量使用功不可没,进而造成土壤中重金属含量的增加。大量研究表明,化肥具有增加作物产量、培肥土壤、改进品质、发挥良种增产潜力、改善生态环境等多方面的积极作用,这些作用在化肥有效使用范围内是非常明显的^[3]。但同时重金属具有富集且不易分解的特性,大量使用会加大土壤的污染程度。目前施肥能显著提高土

收稿日期:2009-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40871142);沈阳农业大学青年基金项目(20070225)

作者简介:李双异(1979—),男,辽宁东港人,在读博士,讲师,主要从事土壤肥力的教学与科研工作。

通讯作者:汪景宽 E-mail:j-kwang@163.com

壤肥力,显著影响作物产量^[4-5]这一结论早已证实,但不同施肥处理对土壤中重金属含量的影响国内尚无定论,而且不同地区土壤差异很大,结果截然相反。因此,有必要进一步开展不同施肥对土壤重金属含量影响研究。本文主要研究棕壤长期定位试验下不同施肥处理重金属全量以及有效态含量的关系,旨在为指导合理施肥提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

沈阳农业大学棕壤长期地膜覆盖定位实验站(北纬 41°49',东经 123°34'),土壤为发育在黄土性母质上的壤质棕壤。气候条件属北温带大陆季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年均温 7.2℃,>10℃积温 3 350℃;年降水量 730 mm,85%集中于 4—9 月。

该试验从 1987 年开始种植玉米,划分为 54 个小区,每小区面积 69 m²,分地膜覆盖(Covered)和裸地(Uncovered)两种方式,3 次重复,随机排列。每年 4 月 25 日左右施肥、播种、覆膜,并按常规进行田间管理,10 月 1 日前后收割。本试验供试土壤为棕壤,试验开始时有有机质含量 15.6 g·kg⁻¹,全氮 1.0 g·kg⁻¹,全磷 0.5 g·kg⁻¹,碱解氮 67.4 mg·kg⁻¹。

1.2 样品的采集与制备

长期定位试验每年在玉米收割时取土,取土采用五点法,土样经过自然风干后研磨、过 10 目筛。本试验供试土壤(0~20 cm)选取 1987 年、1998 年、2000 年、2002 年、2004 年和 2006 年土壤中的 5 个不同施肥处理,土壤样品分别为:①无肥对照(CK);②高量有机肥(M₄),折合年施 N 量 270 kg·hm⁻²;③中量有机肥(M₂),折合年施 N 量 135 kg·hm⁻²;④化肥(N₄P₂);⑤高量有机肥和化肥配施(M₄+N₂P₁),年施有机肥 N 270 kg·hm⁻²;化肥 N 135 kg·hm⁻²,P₂O₅ 67.5 kg·hm⁻²。施用的有机肥为猪厩肥,其有机质含量为 150 g·kg⁻¹左右,全氮为 10 g·kg⁻¹左右。用过 10 目筛土样测定重金属有效态含量,取过 10 目筛样品研磨过 100 目筛用来测定土壤重金属全量。

1.3 测定方法

土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮含量等按文献[6]方法测定,土壤全量按照农业部发布的 NY/T 1613—2008 行业标准采用三酸(HCl-HNO₃-HClO₄)法消解,重金属有效态含量采用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 按水土比 5:1 浸提^[7],1.5 h 后离心过滤。全量及有效态重金属均采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测

定。数据分析采用 SPSS 13.0 和 Excel 软件。

2 结果与讨论

2.1 长期不同施肥处理对土壤重金属全量的影响

Cu、Zn、Pb、Cd 4 种元素在土壤中含量各不相同,其中以 Zn 含量最多,Cd 含量最少(表 1),含量的多与少并不能直接用于判断土壤的污染情况,还要根据环境质量标准中各种元素具体值来加以界定。Cu、Zn 能被植物体吸收,是植物体内必需的营养元素,含量过少或过多时都会影响作物生长乃至品质。而 Pb 是一种有毒的重金属元素,同时也是土壤污染较普遍的元素,一般进入土壤中的 Pb 极不易分解,其对植物种子的发芽率和呼吸强度有一定的影响。Cd 虽然含量很少,但人体少量摄入即可致命,通过富集作用进入体内,使人患骨痛病等,长期摄入过量 Cd 会致癌甚至畸形^[8]。

表 1 土壤中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 元素标准值(mg·kg⁻¹)

Table 1 Standardized values of heavy metals(Cu, Zn, Pb and Cd) in soil(mg·kg⁻¹)

元素	一级	二级			三级
		pH<6.5	pH6.5~7.5	pH>7.5	pH>6.5
Cu	30	50	100	100	400
Zn	100	200	250	300	400
Pb	35	250	300	350	500
Cd	0.2	0.3	0.3	0.6	1.0

就不同年限不同处理测定的数据的平均值来看(表 2),4 种元素含量在不同施肥处理条件下相对于 1987 年基础土壤来说均有一定幅度的增长,其中 Cu、Zn 增长以 M₄+N₂P₁ 处理最为明显,分别为 41.7、116.48 mg·kg⁻¹,增加了 21.5、58.49 mg·kg⁻¹。Pb、Cd 含量以施用 M₄ 处理增长最为明显,分别为 33.23、2.33 mg·kg⁻¹,增加了 9.51、1.12 mg·kg⁻¹。由此可见,施用高量有机肥可以增加 4 种重金属元素的全量。

最近几年由于有机肥肥源有了较大改变,当前有机肥肥源大多来源于集约化的养殖场,普遍采用含有重金属元素的饲料添加剂,而畜禽粪便中重金属含量跟饲料中重金属含量有直接的联系^[9],导致施用 M₄ 处理重金属富集趋势在不断加大。各年份 N₄P₂ 处理相对于 M₄ 处理、M₄+N₂P₁ 处理来说对耕层 4 种元素全量影响并不大,Cu、Zn、Pb、Cd 含量 20 多年仅增长了 4.35、16.78、8.05、0.58 mg·kg⁻¹。Cd 元素在 N₄P₂ 处理的含量有些年份还有下降的趋势,其原因可能是本试验

所用化肥为 P_2O_5 , 与通常所说的磷肥过磷酸钙相比较为纯净, 加之化肥的施用有助于作物的生长, 玉米长势明显好于 CK 处理, 施肥能显著地影响作物产量^[4-5], 致使植物体所吸收的 Cd 含量可能大于每年进入土壤的量。由于每年施用的有机肥来源有所不同, 导致不同年份 4 种元素全量增长略有波动但总的趋势比较明显。1998 年 M_4 处理、 N_4P_2 处理和 $M_4+N_2P_1$ 处理 Pb 含量差异不显著, 2000 年、2002 年和 2006 年除 M_4 处理外其余各处理均差异不显著。Pb 在各年份间 M_4 处理和 CK 处理之间的差值并没有随年份的增长而加大, 20 多年来 CK 的增长量与 M_4 增长量之间差异不显著, 由此我们可以看出有机肥虽然可以增加 Pb 全量但并不是使 Pb 含量增加的主要原因, 农田生态系统重金属的来源一般包括施肥、灌溉和大气沉降三方面^[10-11], 由于本试验区不采取人为灌溉, 因此大气沉降认定为本试验区 Pb 含量增加的主要因素。

经过 20 多年的施肥, 土壤中 Cu 含量仍然在环境质量二级标准以下^[12], Zn 除了高量有机肥和化肥配

施($M_4+N_2P_1$)处理外均在土壤环境质量标准一级以下, 但 Cu、Zn 的增长速度却不容忽视。Cd 含量由于试验基础值较高, 加之 20 年来的长期带入使得 Cd 含量已严重超出土壤环境三级质量标准($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 污染问题十分严重, 为今后实施 Cd 的监测与治理敲响了警钟。

2.2 长期不同施肥处理对土壤重金属有效态的影响

从表 3 可以看出, 不同处理下 Cu、Zn 和 Cd 3 种元素有效态含量均随年限有一定的增长, 虽然有所波动但总的趋势很明显, 无论是 M_4 处理还是 N_4P_2 处理均有不同程度的上升, 施有机肥可以增加土壤中 Cu、Zn 和 Cd 全量, 而且 Cu、Zn 和 Cd 全量与其有效态又常有较好的正相关^[13], 因此施用有机肥带来全量增加的同时其有效态含量也随之增加, 结果显示有机肥对于 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量均有较大影响。由于有机肥中含有较多的 Cu、Zn, 而且大多数是以有机结合态的形式存在, 而有机态分解后便可释放出大量的 Cu、Zn, 从而使土壤中有效 Cu、Zn 含量增加。经显著性检验可知($P<0.05$), 不同年份 CK 和 M_4 处理 Cu、Zn 和

表 2 长期定位不同施肥处理土壤全量重金属含量

Table 2 The contents of soil heavy mentals in different fertilization treatments and years

重金属	处理	1998 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2000 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2002 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2004 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2006 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cu	CK	27.04d	25.05d	20.84d	22.22e	23.77c
	M_2	28.12bc	31.54b	27.63b	29.39b	37.73b
	M_4	30.15a	35.53a	27.58b	30.16a	41.36a
	N_4P_2	27.55c	32.71b	22.06c	22.74d	24.53c
	$M_4+N_2P_1$	28.69b	28.06c	28.71a	28.92c	41.68a
Zn	CK	60.64e	68.20d	68.57e	73.31c	70.17e
	M_2	67.15c	80.56b	82.78c	90.92b	92.17c
	M_4	76.61a	93.87a	91.06b	95.32a	96.57b
	N_4P_2	64.22d	72.58c	72.13d	74.45c	74.78d
	$M_4+N_2P_1$	75.00b	82.02b	97.21a	90.54b	116.48a
Pb	CK	22.53c	26.09c	27.98b	28.73c	31.81b
	M_2	23.82b	27.31b	28.27b	29.45b	32.42b
	M_4	26.13a	30.41a	30.95a	32.45a	33.23a
	N_4P_2	25.37a	26.80bc	28.39b	28.33c	31.89b
	$M_4+N_2P_1$	26.33a	26.82bc	28.71b	29.98b	31.49b
Cd	CK	1.34c	1.63c	2.12c	2.05b	2.07d
	M_2	1.52b	2.49a	2.36ab	2.27a	2.19c
	M_4	2.23a	2.51a	2.46a	2.24a	2.33b
	N_4P_2	1.19d	1.60c	2.21bc	1.91c	1.79e
	$M_4+N_2P_1$	1.35c	2.08b	2.31ab	2.18a	2.44a

注: 表中数据为 3 次重复的平均值, 同列中相同英文字母表示差异不显著水平($P<0.05$), 下同。

表 3 长期定位不同施肥处理土壤有效态重金属含量

Table 3 The contents of soil available heavy metals in different fertilization treatments and years

项目	处理	1998 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2000 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2002 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2004 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2006 年/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cu	CK	3.27d	3.23d	3.77c	3.65d	4.42d
	M_2	3.76c	6.82a	5.46b	6.27b	9.36b
	M_4	5.40a	6.40b	5.59b	6.07c	5.70c
	N_4P_2	2.72e	2.30e	2.73d	2.71e	2.93e
	$M_4+N_2P_1$	4.16b	5.57c	6.61a	6.79a	12.74a
Zn	CK	6.57c	7.12bc	5.63d	5.72c	8.56d
	M_2	5.96c	10.82b	14.58c	16.74b	11.36c
	M_4	14.41a	15.80a	18.85b	16.02b	24.87b
	N_4P_2	4.23d	5.96c	4.94d	4.32c	4.87e
	$M_4+N_2P_1$	8.67b	11.20b	21.61a	21.20a	27.28a
Pb	CK	3.13b	3.06c	3.08b	3.21b	3.00b
	M_2	3.00c	3.00c	2.88bc	2.81c	2.78c
	M_4	3.10b	3.02c	2.83c	2.92c	3.08b
	N_4P_2	3.60a	3.92a	3.74a	3.86a	4.07a
	$M_4+N_2P_1$	3.11b	3.24b	2.57d	2.46d	2.76c
Cd	CK	0.10bc	0.11c	0.14c	0.13c	0.17d
	M_2	0.10bc	0.21b	0.28b	0.31a	0.28c
	M_4	0.20a	0.23b	0.28b	0.25b	0.53b
	N_4P_2	0.10bc	0.10c	0.11d	0.11d	0.12e
	$M_4+N_2P_1$	0.11b	0.29a	0.31a	0.26b	0.70a

注: 表中数据为 3 次重复的平均值。

Cd 有效态含量差异显著,而 Pb 在 1998 年、2000 年和 2006 年差异不显著,各年份除 2006 年以外 M_4 处理 Pb 含量均低于 CK 处理,可见施用有机肥降低了土壤有效 Pb 含量,而有效态 Pb 含量在各年份均以 N_4P_2 处理最高。各年份 CK 处理 Cu、Zn 有效态含量的平均值分别为 3.67、6.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而各年份 N_4P_2 处理平均值为 2.68、4.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从结果上看 N_4P_2 处理不但没有增加土壤中 Cu、Zn 有效态含量,而且比同年 CK 处理还低,分析其原因可能是 N、P 元素的施用有助于玉米的生长,促进玉米对土壤中有效态重金属 Cu、Zn 的吸收,使得土壤中含量低于 CK 对照,另外长期施用含磷化肥, P 与 Cu 和 Zn 拮抗作用,可使土壤中有效 Cu、Zn 含量有所降低。也有研究表明单施化肥对土壤有效 Cu 的影响不大,或降低土壤有效 Cu 的含量 (MypaBcka, 1993)^[14-15],这也与本试验结果相一致。但值得注意的是从 2002 年开始 M_4 和 N_4P_1 配施测得的有效态 Cu、Zn 含量要比单施 M_4 处理高,而且增长趋势正在加大,原因有待进一步研究。

2.3 土壤重金属全量与有效态含量的关系

为了探讨土壤中重金属对植物吸收重金属的影响机理,以及如何在两者之间找到一个纽带,本研究分析了土壤重金属全量与有效态含量的关系,土壤有效态重金属由于对植物作用最为明显,直接影响植物的吸收与利用,同时也与人类关系最为密切,所以有很大的研究价值。

从表 4 可以看出全量 Cu 与有效态 Cu, 全量 Zn 与有效态 Zn, 全量 Cd 与有效态 Cd 之间均呈极显著正相关,说明土壤中 3 种元素全量与其有效态含量有直接关系,而有效态又直接影响植物的吸收与利用,但具体植物吸收利用值本研究还没有得出,不同重金属元素在玉米体内的吸收系数有待进一步研究。全量 Pb 与有效态 Cu 和 Zn 不显著相关,与有效态 Pb 则呈显著负相关。有效态 Pb 与全量 Cu、Zn 和 Cd 均呈负

相关,虽然没达到显著负相关水平,但略微给了我们些启示,即施有机肥有助于降低土壤中有效态 Pb 含量。大量研究也表明有机肥具有增加土壤养分、增强土壤微生物活性及降低污染土壤重金属毒性和改善作物品质等作用,但过量施用也会显著增加土壤中 Cu、Zn 和 Cd 含量,造成土壤重金属富集。所以,在今后的工作中需要特别注重有机肥施用对微量元素及重金属对土壤-植物系统中环境行为和效应的研究。

3 结论

(1)经过 20 年来施肥,4 种重金属全量含量均呈增长趋势,不同施肥处理对土壤中重金属全量影响存在差异, M_4 处理对于 Cu、Zn、Cd 影响显著,Cu、Zn 增长以 $M_4+N_4P_1$ 处理增长最为明显。而 Pb、Cd 含量以 M_4 处理增长最为明显。 M_4 处理可以增加土壤全量 Pb,但并不是影响土壤中 Pb 的主要因素。各施肥处理 Cd 含量均超出 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的国家三级质量标准,属于严重超标,应引起高度重视。

(2)长期施肥土壤中 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量虽有所波动,但总体增长趋势明显,施有机肥能显著提高 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量;Pb 在 N_4P_2 处理要显著高于其他各处理,而各年份 M_4 处理有效态 Pb 的含量要低于 CK 处理;各年份单施 N_4P_2 处理 Cu、Zn 和 Cd 含量要低于 CK 含量。

(3)土壤中 Cu、Zn 和 Cd 全量与其有效态呈极显著正相关关系,而全量 Pb 与有效态 Cu 和 Zn 不显著相关,而与有效态 Pb 呈显著负相关,有效态 Pb 与全量 Cu、Zn 和 Cd 均呈一定的负相关。

参考文献:

- [1] 鲁洪娟,孔文杰,张晓玲,等.有机无机肥配施对稻-油系统中重金属污染风险和产品质量的影响[J].浙江大学学报,2009,35(1):111-118.
LU Hong-juan, KONG Wen-jie, ZHANG Xiao-ling, et al. Risk of heavy metal pollution and product quality in rice-rape cropping system as affected by integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2009, 35(1): 111-118.
- [2] 马文奇,张福锁,张卫锋. 关于我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, 27(3):33-40.
MA Wen-qi, ZHANG Fu-suo, ZHANG Wei-feng. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3):33-40.
- [3] 李庆远,朱兆良,于天仁.中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社, 1998.

表 4 土壤重金属全量与有效态含量相关性

Table 4 The correlations between soil total and available heavy metals

指标	全量				
		Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹
有效态含量	Cu	0.723**	0.866**	0.484	0.625**
	Zn	0.533*	0.808**	0.470	0.574*
	Pb	-0.349	-0.534*	-0.174	-0.464
	Cd	0.750**	0.885**	0.629**	0.616**

注:n=25,*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$)。

- LI Qing-kui, ZHU Zhao-liang, YU Tian-ren. Fertilizer question in Chinese a culture sustainable development[M]. Nanchang: Science Technology Press of Jiangxi, 1998.
- [4] 黄欠如, 胡 锋, 李辉信, 等. 红壤性水稻土施肥的产量效应及气候、地力的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 926-933.
- HUANG Qian-ru, HU Feng, LI Hui-xin, et al. Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 926-933.
- [5] Jiang D, Hengsdijk H, Dai T B, et al. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter Wheat-maize system in Jiangsu, China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 25-32.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [7] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- Soil Science Society of China. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [8] Muhamad Jaffar Hassan. The Influence of cadmium toxicity on growth and antioxidant enzymes of rice as affected by zinc, sulfur and nitrogen forms[J]. *Thesis for the Degree of Philosophy*, 2004, 6.
- [9] 郝秀珍, 周东美. 畜禽粪中重金属环境行为研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(4): 509-513.
- HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei. A review: Environmental behaviors of heavy metals in livestock and poultry manures[J]. *Soil*, 2007, 39(4): 509-513.
- [10] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. Atmospheric accessions of heavy metals to some New Zealand pastoral soils [J]. *Sci Total Environ*, 2003, 305(1-3): 105-115.
- [11] Rautaray S K, Ghosh B C, Mitra B N. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils[J]. *Bioresource Technol*, 2003, 90(3): 275-283.
- [12] 中国环境保护标准汇编——环境质量与污染物排放[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 96-99.
- China environment protection standard——Environmental quality and pollutant emission[M]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 96-99.
- [13] 姜培坤, 徐秋芳. 不同施肥雷竹林土壤重金属含量的动态分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 168-170, 180.
- JIANG Pei-kun, XU Qiu-fang. Dynamics of heavy metal amount in soil with different treatments under *hylostachys praecox* stands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 168-170, 180.
- [14] Schwab A P, Owensby C E, Kulyingyong S. Change in soil chemical properties due to 40 years of fertilization[J]. *Soil Science*, 1990, 149(1): 35-43.
- [15] 胡思农. 硫、镁和微量元素在作物营养平衡中的作用[C]//国际学术讨论会论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 329-398.
- HU Si-nong. The effect of sulfur, magnesium and trace element in crop nutrient balance international academic symposium[C]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993: 329-398.