

文章编号:1000-8551(2011)03-0548-05

施用猪粪对土壤 Zn 形态和菜心 Zn 含量的影响

李 延 彭来真 刘琳琳 吴良友

(福建农林大学资源与环境学院,福建 福州 350002)

摘 要:采用盆栽试验的方法,研究施用猪粪对土壤和菜心 Zn 含量的影响,以为蔬菜安全施用畜禽粪便提供依据。结果表明,土壤全 Zn、有效态 Zn 和菜心 Zn 含量均随猪粪施用量和施用茬数的增加而提高,连续 2 茬施用猪粪达到 40g/kg 时,土壤全 Zn 含量和菜心 Zn 含量分别达到 266.42 和 21.03mg/kg,超过国家土壤质量二级标准($\text{pH} \leq 6.5$ 时,全 Zn $\leq 200\text{mg/kg}$)和食品卫生标准($\text{Zn} \leq 20\text{mg/kg}$)。随猪粪用量的增加,土壤各形态 Zn 的分配系数表现为松结有机态 Zn 明显提高,紧结有机态、固体颗粒态 Zn 呈提高的趋势,而残留态尤其是交换态 Zn 降低。统计分析表明,交换态、松结有机态 Zn 是菜心吸收 Zn 的主要来源,而施用猪粪处理的土壤松结有机态 Zn 的含量和分配系数均远高于交换态 Zn,说明松结有机态 Zn 对提高菜心 Zn 含量的贡献大于交换态 Zn。

关键词:猪粪;土壤;菜心 Zn 含量;土壤 Zn 形态

INFLUENCE OF PIG MANURE ON ZINC FORM IN SOIL AND ZINC CONTENT OF *Brassica campestris*

LI Yan PENG Lai-zhen LIU Ling-ling WU Liang-you

(College of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002)

Abstract:To provide the experimental evidence for using animal manure safely in vegetable production, pot experiment was conducted to study the effect of pig manure on zinc contents in soil and *Brassica campestris*. Results showed that when the pig manure was applied, total zinc contents, available zinc content in soil and zinc content in *Brassica campestris* increased significantly. Successively applying pig manure in two crops at the level of 40g/kg, zinc contents in soil and in *Brassica campestris* were 266.42 and 21.03mg/kg, respectively, which exceeded the second grade of heavy metals in Environmental Quality Standards for Soils ($\text{pH} \leq 6.5$, $\text{Zn} \leq 200\text{mg/kg}$) and the national food hygiene standards ($\text{Zn} \leq 20\text{mg/kg}$). Pig manure application increased the distribution coefficient of organically bound zinc, organically complex zinc and solid particulate zinc, while it decreased the distribution coefficient of residual fraction zinc and exchangeable zinc. Statistics analysis showed that exchangeable and organically complex zinc were the main factors which affected *Brassica campestris* zinc content. The content and distribution coefficient of organically bound zinc in the soils with pig manure were much higher than that of exchangeable zinc, and it indicated that organically bound zinc contributed more on the zinc content in *Brassica campestris* than that of exchangeable zinc.

Key words: pig manure; soil; *Brassica campestris* zinc content; chemical forms of zinc in soil

规模化畜禽养殖业快速发展产生的大量畜禽粪便,已成为我国农村主要的面源污染物^[1],而畜禽粪

便污染治理的重要途径之一便是其肥料化利用。生产上畜禽粪便一直被认为是蔬菜种植的优质有机肥,提

收稿日期:2010-09-25 接受日期:2011-01-10

基金项目:福建省自然科学基金项目(2008K0046)

作者简介:李 延(1964-),男,福建南安人,博士,教授,研究方向为植物营养生理。Tel:0591-83789361;E-mail:fauliyang@163.com

倡长期施用,而且施用量大。然而随着高 Zn 饲料添加剂在集约化畜禽养殖场中的广泛使用,加之畜禽对 Zn 的低利用率^[2],导致畜禽粪便中的 Zn 富集^[3-5]。长期大量施用富集 Zn 的畜禽粪便会增加土壤及植物中 Zn 含量^[6]。重金属的生物有效性不仅与其总量有关,更与其化学形态密切相关。迄今,有关畜禽粪便对蔬菜地土壤重金属形态转化及其与蔬菜吸收的关系研究鲜见报道。本文以重金属 Zn 含量较高的猪粪为试材,研究猪粪施用对土壤 Zn 的形态及其蔬菜中 Zn 富集的影响,旨在为蔬菜安全施用畜禽粪便提供依据。

1 材料与方方法

供试蔬菜的品种为“四九”菜心。

1.1 供试材料

供试土壤取自福建农林大学试验地 0~20cm 的菜园土,土壤母质为河流冲积物。猪粪取自某大型养猪场,经风干后过 2mm 筛并混匀,塑料袋密封备用。供试土壤和猪粪的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和猪粪的基本理化性状
Table 1 Properties of soil and pig manure

项目 item	pH	有机质 organic content (g/kg)	全 N total N (g/kg)	全 P total P (g/kg)	全 K total K (g/kg)	全 Zn total Zn (g/kg)
土壤 soil	5.12	20.23	1.67	1.23	20.76	132.49
猪粪 pig manure	8.01	654.31	29.78	46.51	12.11	2435.96

1.2 试验设计

试验设 7 个处理:(1)CK:不施肥;(2)F:只施用化肥;(3)FM₁:每 kg 土施 5g 猪粪(风干基,下同);(4)FM₂:每 kg 土施 10g 猪粪;(5)FM₃:每 kg 土施 20g 猪粪;(6)FM₄:每 kg 土施 40g 猪粪;(7)FM₅:每 kg 土施 60g 猪粪。FM₁~FM₅是在 F 的基础上增施猪粪,处理 FM₁~FM₅按耕层土壤重量 150000kg/666.7m²计算,分别相当于施用猪粪 750、1500、3000、6000、9000 kg/666.7m²,其中最大施用量 9000kg/666.7m²相当于田间常规施用量的 4~5 倍。每处理 4 个重复。采用米氏盆种植,每盆装土 4kg,将土壤与猪粪拌匀后装盆,化肥以溶液形式作基肥一次性施入,施用量为每 kg 土壤 N(尿素)75mg、P₂O₅(磷酸二氢钾)50mg、K₂O(氯化钾+磷酸二氢钾)75mg。土壤在 60%田间持水量条件下平衡 2d 后播种菜心种子,播种深度 1cm,2 片真叶时间苗,每盆保留 4 株,第 40 天收获,地上部经洗净、烘干后用于 Zn 含量的测定。第一茬菜心种植结

束时,将盆土倒出拌匀,用四分法取土壤样品 200g,剩余土壤倒回米氏盆供第二茬试验;第二茬试验的施肥与第一茬相同。

1.3 测定方法

土壤 pH 测定用电位法(水土比 2.5:1);有机质用重铬酸钾容量法测定;全 N 测定用半微量开氏法;全 P 用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮-钼锑抗比色法测定;全 K 用氢氧化钠熔融法-火焰光度计测定^[7];土壤全 Zn 用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消煮,土壤有效态 Zn 用 DTPA 浸提,原子吸收分光光度计测定^[7];菜心 Zn 含量采用干灰化,原子吸收分光光度计测定^[7],菜心 Zn 含量以鲜基计算。土壤 Zn 形态分级和提取方法参考 He 等^[8]和 Hsu^[9]的连续提取法,具体步骤如下:(1)称取样品 2.00g,加入 30ml 去离子水振荡 24h,离心,沉淀部分加入 1mol/L KCl 30ml 浸提 24h,再次离心,合并 2 次上清液,测定可交换态(含水溶态)Zn。(2)步骤(1)的沉淀部分加入 30ml 的 0.1 mol/L Na₄P₂O₇ 浸提 24h,加入 0.5g KCl,溶解,离心取上清液;沉淀部分再加入 30ml 去离子水振荡 30min,加 0.5g KCl 溶解后离心,合并 2 次离心的上清液,用于松结有机态 Zn 测定;(3)步骤(2)的沉淀部分加入 30ml 的 0.1 mol/L NaOH 浸提 24h,离心后取上清液测定紧结有机态 Zn;(4)向步骤(3)沉淀部分加入 4mol/L HNO₃ 30ml 浸提 24h,离心后取上清液测定固体颗粒态 Zn;(5)由全 Zn 含量减去以上 4 种形态 Zn 含量获得残留态 Zn 的含量。以上步骤的离心均在 4000g 下离心 30min,上清液用于测定前均需经过 0.45μm 的滤膜过滤。

1.4 统计分析方法

采用 DPS 和 Excel 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 施用猪粪对土壤 Zn 含量和形态的影响

2.1.1 全 Zn 含量 单施化肥对土壤 Zn 含量影响不大,而施用猪粪则明显提高土壤的 Zn 含量。从图 1 可以看出,与 CK 相比,种植第一茬菜心的 FM₁、FM₂、FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理中土壤 Zn 含量分别提高了 9.28%、18.56%、30.18%、59.32% 和 72.41%,差异均达到极显著水平。相关分析表明,土壤 Zn 含量(y)与猪粪施用量(x)呈极显著相关(第一茬 $y = 138.4652e^{0.0084x}$, $r = 0.9805^{**}$; 第二茬 $y = 148.9971e^{0.0130x}$, $r = 0.9882^{**}$),说明增加猪粪施用量对土壤 Zn 含量的提高有显著的影响。对比第一茬和第

二茬菜心土壤中的 Zn 含量可以看出,第二茬土壤 Zn 含量明显高于第一茬,且增幅随猪粪施用量的增加而提高。FM₁、FM₂、FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理的第二茬土壤 Zn 含量较第一茬分别提高了 8.61%、14.97%、18.66%、29.99% 和 42.75%,差异亦极显著。

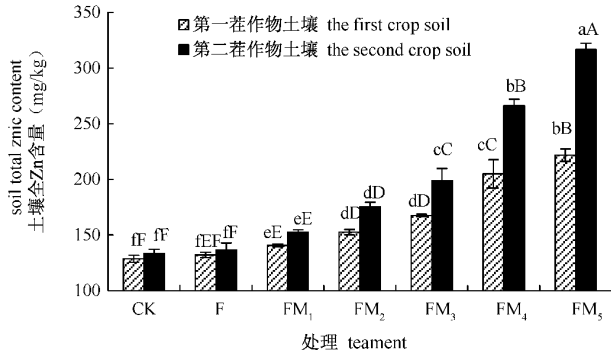


图 1 施用猪粪对土壤全 Zn 含量的影响

Fig. 1 Effect of pig manure application on soil total zinc content

注:图中同茬数据上方带有不同小写/大写字母表示在 0.05/0.01 水平差异显著;下图同。

Note: Different small and capital letters on the date of same crop indicated significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively; The same as the following figures.

2.1.2 有效态 Zn 含量 施用猪粪对土壤有效态 Zn 含量的影响与全 Zn 相似(图 2),表现为土壤有效态 Zn 含量随着猪粪施用量的增加而提高。与种植第一茬菜心 CK 相比较,FM₁、FM₂、FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理的土壤有效态 Zn 含量分别提高了 64.10%、101.71%、158.90%、204.57% 和 240.07%,差异均达到极显著水平。相关分析表明,土壤有效态 Zn 含量(y)与猪粪施用量(x)呈极显著相关(第一茬 $y = 7.1632e^{0.0133x}$, $r = 0.9060^{**}$;第二茬 $y = 15.3447e^{0.0228x}$, $r = 0.9369^{**}$),说明施用猪粪会提高土壤有效态 Zn 含量。施用猪粪的同一处理的两茬间相比,种植第二茬菜心的土壤有效 Zn 含量均极显著高于第一茬土壤。

2.1.3 土壤 Zn 形态 残留态、固体颗粒态和松结有机态 Zn 是土壤 Zn 存在的主要形态。从表 2 中各形态 Zn 的分配系数看,随猪粪施用量增加,松结有机态 Zn 明显提高,紧结有机态、固体颗粒态 Zn 呈提高的趋势,而交换态和残留态 Zn 则随猪粪用量的增加而下降,其中尤以交换态 Zn 的分配系数下降最明显。与 CK 相比,种植第一茬菜心 FM₅ 处理的松结有机态、紧结有机态、固体颗粒态分配系数分别提高了 373.32%、162.16% 和 10.44%,而交换态、残留态则分别下降了

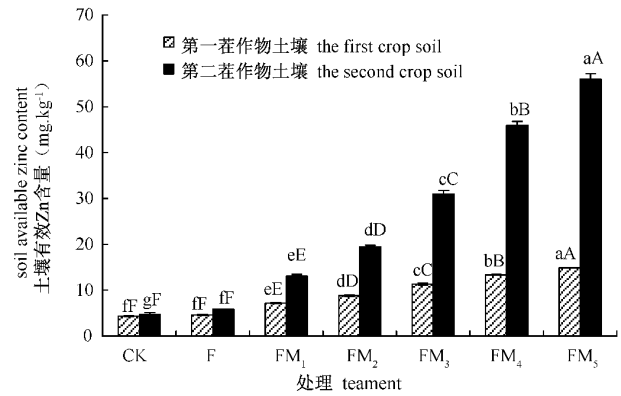


图 2 施用猪粪对土壤有效态 Zn 含量的影响

Fig. 2 Effect of pig manure application on soil available zinc content

93.63% 和 20.18%,差异均达极显著水平。比较相同处理第一茬和第二茬菜心土壤中各形态 Zn 的分配系数,第二茬土壤的松结有机态、紧结有机态、固体颗粒态 Zn 的分配系数都高于第一茬,交换态、残留态 Zn 的分配系数则明显下降。

对比施用猪粪对土壤有效态 Zn 和交换态 Zn、松结有机态 Zn 含量的影响,可以发现松结有机态 Zn 的变化与有效态 Zn 一致,均随猪粪施用量增加而提高,而交换态 Zn 的变化与土壤有效态 Zn 相反,其含量随猪粪施用量增加而降低。

2.2 施用猪粪对菜心 Zn 含量的影响

如图 3 所示,施用猪粪和单施化肥的菜心 Zn 含量均较 CK 有所提高,并且菜心 Zn 含量呈随猪粪用量增加而升高的趋势。与 CK 相比较,第一茬 FM₁、FM₂、FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理的菜心 Zn 含量分别提高了 42.04%、45.77%、19.71%、40.19% 和 58.03%,除 FM₃ 处理与 CK 的差异显著外,其余处理与 CK 的差异均达极显著水平。对比两茬菜心的 Zn 含量可以看出,

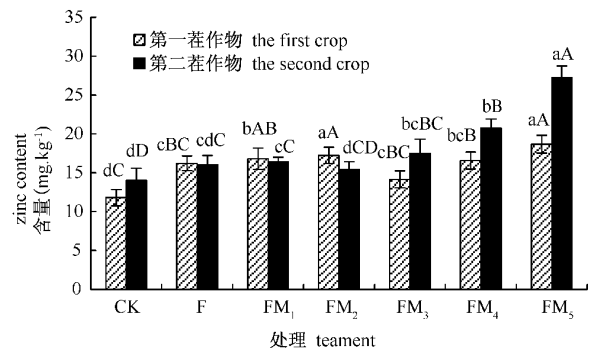


图 3 施用猪粪对菜心 Zn 含量的影响

Fig. 3 Effect of pig manure application on zinc content of *Brassica campestris*

表 2 施用猪粪对土壤各形态 Zn 含量影响

Table 2 Effect of pig manure on the concentrations of different chemical forms of zinc in soil (mg/kg)

处植茬数 crop	处理 treatment	交换态 exchangeable zinc	松结有机态 organically bound zinc	紧结有机态 organically complex zinc	固体颗粒态 particulate zinc	残留态 residual fraction zinc
第一茬 the first crop	CK	9.70 (7.54% aA)	5.93 (4.61% fF)	0.48 (0.37% cB)	28.97 (22.52% cC)	83.58 (64.97% abAB)
	F	8.23 (6.22% bB)	6.26 (4.74% fF)	0.49 (0.37% cB)	31.25 (23.64% bcABC)	85.95 (65.03% aA)
	FM ₁	8.33 (5.93% bB)	11.03 (7.84% eE)	0.55 (0.39% cB)	31.85 (22.66% cBC)	88.82 (63.19% bcB)
	FM ₂	6.36 (4.17% cC)	16.83 (11.04% dD)	0.37 (0.24% dC)	37.37 (24.50% abABC)	91.59 (60.05% bcB)
	FM ₃	3.03 (1.81% dD)	25.58 (15.27% cC)	0.67 (0.40% cB)	42.96 (25.65% aA)	95.24 (56.87% dC)
	FM ₄	1.52 (0.74% eE)	38.53 (18.80% bB)	1.89 (0.92% bA)	50.01 (24.40% abABC)	113.00 (55.14% dCD)
第二茬 the second crop	CK	4.60 (3.45% cC)	5.97 (4.48% eE)	0.82 (0.61% dC)	28.22 (21.19% cB)	93.60 (70.27% aA)
	F	5.79 (4.24% bB)	5.12 (3.75% eE)	0.84 (0.61% dC)	28.99 (21.22% cB)	95.89 (70.18% aA)
	FM ₁	7.64 (5.00% aA)	18.96 (12.42% dD)	1.04 (0.68% cdC)	35.85 (23.48% bcB)	89.20 (58.42% bB)
	FM ₂	4.78 (2.96% dD)	40.13 (24.83% cC)	1.10 (0.68% cdC)	42.20 (26.11% bB)	73.42 (45.42% cC)
	FM ₃	1.43 (0.72% eE)	56.70 (28.53% bB)	1.42 (0.71% bcBC)	56.71 (28.54% aA)	82.45 (41.49% dD)
	FM ₄	0.28 (0.10% fF)	80.34 (30.15% bB)	2.08 (0.78% abAB)	73.36 (27.54% aA)	110.37 (41.43% dD)
	FM ₅	0.13 (0.04% fF)	112.69 (35.59% aA)	2.62 (0.83% aA)	91.87 (29.02% aA)	109.30 (34.52% eE)

注:表中同列数据后带有相同小写/大写字母表示在 0.05/0.01 水平不显著;括号中数据为分配系数,即各形态 Zn 占全 Zn 含量的百分比值。

Note: Data in the same column followed by common small and capital letters indicated no significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively; Number in parentheses is distribution coefficient (the percent of different chemical forms of zinc in total zinc content).

FM₁、FM₂ 处理的两茬间差异不明显,但当猪粪施用量达到 20g/kg (FM₃) 时,第二茬菜心的 Zn 含量明显高于第一茬,且增幅随猪粪施用量的增加而提高。FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理下第二茬菜心 Zn 含量较第一茬分别提高了 23.66%、26.92% 和 46.25%,差异达到显著水平。

3 讨论

Zn 是植物生长发育所必需的微量元素^[10],有关畜禽粪便对提高土壤 Zn 含量、改善作物 Zn 营养的结论已得到许多研究的证实^[11]。然而,Zn 制剂等饲料添加剂的广泛使用,导致猪粪中高浓度 Zn 的残留,给环境造成潜在的污染风险^[12]。本试验结果表明,菜心 Zn 含量提高与施用猪粪后土壤 Zn 形态的改变有关。施用猪粪提高了土壤的松结有机态、紧结有机态、固体颗粒态和残留态 Zn 的含量,而交换态 Zn 随猪粪用量的增加出现下降趋势(表 2)。土壤交换态 Zn 含量降低又与土壤 pH 的提高有关,CK、FM₁、FM₂、FM₃、FM₄、FM₅ 处理种植菜心第一茬土壤 pH 值分别为 5.16、5.20、5.47、5.79、6.08、6.25,第二茬的分别为 5.10、5.23、5.57、5.90、6.17 和 6.19,即土壤 pH 值随猪粪用量的增加而提高。有研究表明,土壤 pH 升高可增加

土壤对 Zn 的吸附量^[13]和吸持强度^[14],降低土壤交换态 Zn 的含量。施用猪粪后土壤腐殖质的提高也是影响土壤 Zn 有效性的重要因素,白玲玉等^[15]研究认为,芳构化程度高的腐植酸对 Zn 有较强的络合固定作用,而芳构化程度低的腐植酸则能增加土壤中 Zn 的移动性。本研究中,土壤松结有机态 Zn 和紧结有机态 Zn 含量均随猪粪用量增加而提高,前者土壤松结有机态 Zn 含量明显高于后者(表 2)。菜心 Zn 含量与土壤各形态 Zn 的逐步回归最优方程为: $y = 11.9306 + 0.2513X_1$ (交换态 Zn) + $0.1210X_2$ (松结有机态 Zn) ($R^2 = 0.957^{**}$),说明松结有机态 Zn 和交换态 Zn 是影响菜心 Zn 含量的主要因素。这一结论似乎与施用猪粪降低土壤交换态 Zn 含量存在矛盾,但对比施用猪粪处理的土壤松结有机态 Zn、交换态 Zn 的含量和分配系数(表 2),可以看出,猪粪处理土壤的松结有机态 Zn 的含量和分配系数均远高于交换态 Zn,并且差异随猪粪施用量的提高而增大。如第二茬 FM₃、FM₄ 和 FM₅ 处理的松结有机态 Zn 的含量(56.70、80.34 和 112.69mg/kg)分别较交换态 Zn 含量(1.43、0.28 和 0.13mg/kg)提高 39.65、286.93、866.85 倍,分配系数(28.53%、30.15%、35.59%)分别较交换态 Zn (0.72%、0.10%、0.04%)提高 39.63、300.15 和 889.75 倍,说明松结有机态 Zn 是菜心吸收 Zn 的主要

来源。

畜禽粪便是农业生产必不可少的肥源,在培肥地力、提供养分、改善作物品质等方面发挥着重要的作用。农业部制定的“沃土计划”,要求每年有机肥料投入量不低于 2000kg/666.7m²,有机肥投入总量要年递增 5%。按照国家土壤质量二级标准(pH≤6.5,全 Zn ≤200mg/kg)^[16]和食品卫生标准(Zn ≤20mg/kg)^[17],本试验连续种植两茬菜心,施用猪粪达到或超过 40mg/kg 的 FM₄ 和 FM₅ 处理均出现土壤和菜心 Zn 污染。因此,必需抓紧制定畜禽粪便重金属的限量标准,以减少畜禽粪便施用带来的生态环境风险。由于本盆栽试验采用猪粪与土壤充分混匀的施用方法,与生产实际中猪粪等有机肥采用条施或穴施的方法存在很大的差异,因此,生产实际中猪粪的安全施用量有待进一步的田间试验研究。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1008-1017
- [2] 王希春,吴金节,汤继顺,陈亮,何小佳. 高锌日粮对断奶仔猪血清、组织及粪便中铜、铁、锌水平的影响[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(4):127-132
- [3] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, Unwin R J. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales [J]. Bioresource Technology, 1999, 70:23-31
- [4] Jackson B P, Bertsch P M, Cabrera M L, Camberato J J, Seaman J C, Wood C W. Trace element speciation in poultry litter [J]. Environ. Qual, 2003, 32:535-540
- [5] Qian P, Schoenau J J, Wu T, Mooleki S P. Copper and zinc amounts and distribution in soil as influenced by application of animal manure in east-central Saskatchewan Can [J]. J Soil Sci, 2003, 83:197-202
- [6] 姚丽贤,李国良,党志,何兆桓,周昌敏,杨苞梅. 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
- [7] 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, 318-333
- [8] He X T, Logan T J, Traina S J. Physical and chemical characteristics of selected U. S. municipal solid waste composts [J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24:543-552
- [9] Hsu J H, Shang L L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure [J]. Environmental Pollution, 2001, 114:119-127
- [10] 白玲玉,韦东普,华珞,陈世宝. 高锌土壤上春小麦对⁶⁵Zn 的吸收分布及其根际效应[J]. 核农学报, 1999, 13(6):353-356
- [11] 杨玉爱,何念祖,叶正钱. 有机肥料对土壤锌、锰有效性的影响[J]. 土壤学报, 1990, 27(2):195-201
- [12] 彭来真,刘琳琳,张寿强,李延. 福建省规模化养殖场畜禽粪便中的重金属含量[J]. 福建农林大学学报, 2010, 39(5):523-527
- [13] Gupta R K, Elshout S V D, Abbol I P. Effect of pH on zinc adsorption-precipitation reactions in an alkali soil [J]. Soil Sci, 1987, 143(3):198-204
- [14] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为和环境质量[M]. 北京:科学出版社, 2002, 130-136
- [15] 白玲玉,陈世宝,华珞,韦东普. 腐植酸与 Cd、Zn 的络合特性研究[J]. 核农学报, 2000, 14(1):44-48
- [16] 国家环境保护局. GB15618-1995. 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1995
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB13106-1991, 食品中锌的限量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1991

(责任编辑 邱爱枝)