

吉林省畜禽粪便自然堆放条件下粪便/土壤体系中 Cu、Zn 的分布规律

谢忠雷^{1,2}, 朱洪双³, 李文艳¹, 李小滢¹, 蔡文达¹, 牛海玉¹, 李 晶¹

(1.吉林大学环境与资源学院, 长春 130012; 2.吉林大学植物科学学院, 长春 130062; 3.吉林省冶金研究院, 长春 130021)

摘 要: 本文通过对不同养殖场鸡、猪、牛粪便自然堆放条件下粪便和土壤样品的采集和实验室分析, 研究了吉林省部分养殖场不同类型畜禽粪便 Cu、Zn 含量, 以及粪便自然堆放对土壤 Cu、Zn 含量的影响。结果表明, 鸡粪、猪粪和牛粪中 Cu 的含量范围和均值分别为 7.12~26.04 mg·kg⁻¹ (风干样, 下同) (均值 18.24 mg·kg⁻¹)、87.99~463.7 mg·kg⁻¹ (均值 243.6 mg·kg⁻¹)、3.95~27.63 mg·kg⁻¹ (均值 12.28 mg·kg⁻¹); Zn 的含量范围和均值分别为 179.2~340.8 mg·kg⁻¹ (均值 276.9 mg·kg⁻¹)、140.5~455.8 mg·kg⁻¹ (均值 381.8 mg·kg⁻¹)、150.5~292.3 mg·kg⁻¹ (均值 188.1 mg·kg⁻¹)。不同类型粪便中 Cu、Zn 含量均是猪粪>鸡粪>牛粪, 但不论是哪种类型的畜禽粪便重金属含量均是 Zn>Cu。在自然堆放条件下, 鸡粪和猪粪中的 Cu 可从粪便向底土迁移, 迁移量随粪便中 Cu 含量的增加而增加, 并主要积累在土壤表层, 而牛粪在自然堆放过程中对底土的 Cu 含量影响不显著, 粪底土 Cu 含量分布规律为猪粪底土>鸡粪底土>牛粪底土; 鸡粪、猪粪和牛粪中的 Zn 也可向底土迁移, 使粪底土 Zn 含量有不同程度的增加, 但主要积累在粪底土的表层, 且不同类型粪便底土 Zn 含量差异不明显。

关键词: 畜禽粪便; 自然堆放; 粪底土; 重金属; 分布规律

中图分类号: X835 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)11-2279-06

Distribution of Cu and Zn in System of Animal Manures/Excrement-Subsoil Under Natural Stacking of Animal Manures in Jilin, China

XIE Zhong-lei^{1,2}, ZHU Hong-shuang³, LI Wen-yan¹, LI Xiao-ying¹, CAI Wen-da¹, NIU Hai-yu¹, LI Jing¹

(1.College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130012, China; 2.College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China; 3.Jilin Province Metallurgy Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: With the development of poultry breeding and increasing of Cu and Zn additive amount in feed, Cu and Zn in animal manures have become the considering resource of heavy metals in soils, therefore, there will be of the significance to study the migration and accumulation of Cu and Zn in system of animal manures/excrement-subsoil under natural stacking of animal manures for rightly assessing the pollution effect of Cu and Zn in animal manures. The contents of Cu and Zn in animal manures and effects of animal manures stacking under natural condition on the contents of Cu and Zn in the excrement-subsoil were studied in the paper by sampling different kinds of animal manures excremental-subsoil located in Jilin Province. The results showed that the contents of Cu in chicken manure, pig excrement and cow dung were the range of 7.12~26.04 mg·kg⁻¹ (air-dried sample, being the same as the following) (average of 18.24 mg·kg⁻¹, the same meaning as this in the following), 87.99~463.7 mg·kg⁻¹ (243.6 mg·kg⁻¹) and 3.95~27.63 mg·kg⁻¹ (12.28 mg·kg⁻¹), and the contents of Zn in chicken manure, pig excrement and cow dung were the range of 179.2~340.8 mg·kg⁻¹ (276.9 mg·kg⁻¹), 140.5~455.8 mg·kg⁻¹ (381.8 mg·kg⁻¹) and 150.5~292.3 mg·kg⁻¹ (188.1 mg·kg⁻¹), respectively. The contents of Cu and Zn were the order of pig excrement>chicken manure>cow dung in the different kinds of animal manures and were the order of Zn>Cu in the same animal manures. Under the natural condition stacking, Cu could move from pig excrement and chicken manure to excremental-subsoil and the amount of Cu from animal manures into soils increased with the increasing of contents of Cu in animal manures, consequently Cu accumulated nearly in the topsoil, however, the effect of cow dung on the content of Cu in excremental-subsoil was not obvious. Generally, the contents of Cu in the excremental-subsoil was in the order of pig excrement>chicken manure>cow dung. Meanwhile, the content of Zn in the excremental-subsoil increased to some extent under the natural stacking of pig excrement, chicken manure and cow dung and accumulated mainly in topsoil, however, there was not obvious difference of the content of Zn among the different kinds of excremental-subsoil.

Keywords: animal manure; natural stacking; excremental-subsoil; heavy metals; distribution

收稿日期: 2011-05-14

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(201105012); 吉林省人才开发基金资助项目

作者简介: 谢忠雷(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境污染与控制化学。E-mail: xiezL@jlu.edu.cn

随着我国畜禽养殖业的发展和饲料添加剂中金属元素的使用,畜禽粪便中重金属对环境的影响越来越引起人们的关注,畜禽粪便的农田利用已成为土壤重金属污染的重要来源之一^[1-2]。经调查,中小型规模化养殖场畜禽粪便在处理或施肥之前基本以自然堆放为主,畜禽粪便中的重金属可通过雨水淋溶或粪便溶液渗透而进入土壤,造成粪便堆放场土壤重金属污染。近年来,很多国内外学者分析了畜禽粪便中重金属的含量^[3-8],研究了粪便施肥或堆肥对土壤重金属含量的影响^[9-12],但有关畜禽粪便自然堆放对土壤重金属含量的影响很少见报道。因此,本研究拟通过采集吉林省部分地区中小规模的养殖场自然堆放的畜禽粪便,以及不同深度的粪便底土,探讨不同类型畜禽粪便重金属 Cu、Zn 含量分布规律,以及畜禽粪便自然堆放对粪底土重金属 Cu、Zn 含量的影响,为了解自然堆放条件下重金属在畜禽粪便/土壤体系中的迁移累积规律提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集和制备

在吉林省长春(年平均气温 4.7~4.9℃,年平均降雨量 508~579 mm)、吉林(年平均气温 3.6~4.0℃,年平均降雨量 660~750 mm)、四平(年平均气温 5.6~5.9℃,年平均降雨量 562~649 mm)、通化(年平均气温 4.6~6.5℃,年平均降雨量 708~955 mm)和辽源(年平均气温 4.3~5.2℃,年平均降雨量 653~663 mm) 5 个地区,选择同时具有鸡、猪、牛养殖场的采样点各 8 个,代号分别为 CC1(43°36'00"~43°36'24"N, 125°33'20"~125°33'40"E)、CC2(43°45'45"~43°45'52"N, 125°21'56"~125°23'12"E)、CC3(44°31'38"~44°31'56"N, 124°54'37"~125°00'38"E)、CC4(44°13'25"~44°17'08"N, 125°07'15"~125°07'26"E)、JL(44°06'30"~44°08'08"N, 126°31'23"~126°32'51"E)、SP(43°22'17"~43°22'37"N, 124°38'45"~124°38'53"E)、TH(42°29'43"~42°30'43"N, 125°36'33"~125°40'02"E)和 LY(42°41'42"~42°42'03"N, 125°31'40"~125°32'33"E)。在每个养殖场分别采集粪便样品 1 个,粪底土和远离粪便堆放场的土壤样品各 3 个(均为不同剖面土壤,即 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 的土壤样品,分别记为 P1、P2 和 P3)。粪便与土壤样品均根据粪便堆放情况(所有养殖场的粪便均为露天堆放,粪便堆放时间在两周左右,固定堆放点使用时间在 1 a 以上),多点采集样品后混匀,四分法获取样品 1 kg 密封于塑料袋中。粪便和

土壤样品在实验室条件下自然风干,剔除石砾和植物残体,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 筛,储存于塑料密封袋中备用。

1.2 粪便和土壤样品的前处理和重金属测定方法

畜禽粪便 Cu、Zn 含量采用盐酸-硝酸消化,火焰原子吸收分光光度法测定^[13];土壤 Cu、Zn 含量采用盐酸-硝酸-高氯酸消化,火焰原子吸收分光光度法测定。本文所有畜禽粪便和土壤样品中重金属的测定结果均为单位质量的风干样品中重金属的含量。

1.3 粪便和土壤 Cu、Zn 含量评价标准

(1)采用我国农用污泥中污染物控制标准(GB 4284—1984)(当土壤 pH>6.5 时,Cu 和 Zn 全量的最高限值分别为 500 mg·kg⁻¹ 和 1 000 mg·kg⁻¹)和德国腐熟堆肥中 Cu、Zn 限量标准(Cu 和 Zn 全量的最高限值分别为 100 mg·kg⁻¹ 和 400 mg·kg⁻¹)评价粪便中 Cu、Zn 含量^[8]。

(2)采用我国土壤环境背景值(吉林省土壤 Cu 和 Zn 背景值分别为 16.24 mg·kg⁻¹ 和 71.68 mg·kg⁻¹)^[14]和我国土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)评价粪底土中 Cu、Zn 含量(当土壤 pH 为 6.5~7.5 时,Cu、Zn 全量的最高限值分别为 100 mg·kg⁻¹ 和 250 mg·kg⁻¹)^[15]。

2 结果与讨论

2.1 不同类型畜禽粪便中 Cu、Zn 含量

图 1 和图 2 分别是不同类型畜禽粪便中 Cu 和 Zn 的含量。由图 1 和图 2 可见,不同养殖场和不同种类粪便重金属 Cu、Zn 含量均有显著差异。鸡粪、猪粪和牛粪中 Cu 的含量范围(均值)分别为 7.12~26.04 mg·kg⁻¹ (18.24 mg·kg⁻¹)、87.99~463.7 mg·kg⁻¹ (243.6 mg·kg⁻¹)和 3.95~27.63 mg·kg⁻¹ (12.28 mg·kg⁻¹);Zn 的含量范围(均值)分别为 179.2~340.8 mg·kg⁻¹ (276.9 mg·kg⁻¹)、140.5~455.8 mg·kg⁻¹ (381.8 mg·kg⁻¹)和 150.5~292.3 mg·kg⁻¹ (188.1 mg·kg⁻¹)。总体上看,不同类型粪便中 Cu、Zn 含量均是猪粪>鸡粪>牛粪,但不论是哪种类型的畜禽粪便 Cu、Zn 含量均是 Zn>Cu。按照我国农用污泥中污染物控制标准,鸡粪、猪粪和牛粪中 Cu、Zn 含量均未超标,按照德国腐熟堆肥中重金属限量标准,鸡粪和牛粪 Cu、Zn 含量也均未超标,而 7 个养殖场(CC1、CC2、CC3、CC4、TH、LY 和 JL)的猪粪 Cu 含量和 5 个养殖场(CC1、CC3、CC4、LY 和 SP)的猪粪 Zn 含量超标(各占采样养殖场数的 87.5% 和 62.5%)。同国内的其他地区如北京^[15,7]、江

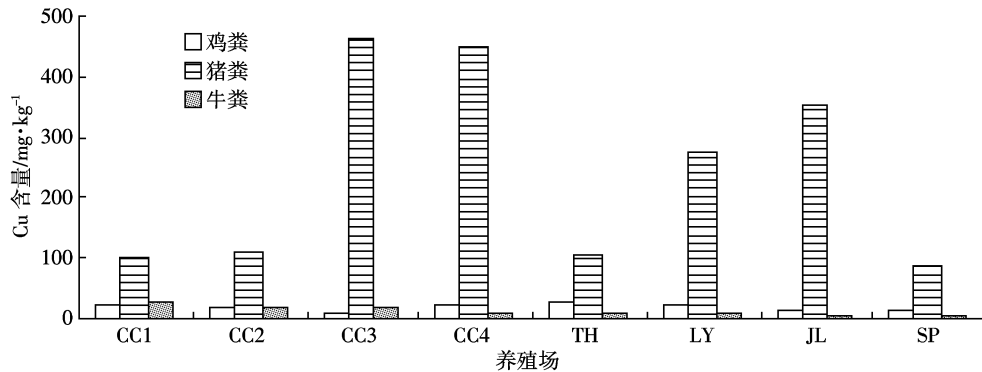


图 1 不同养殖场畜禽粪便中 Cu 含量

Figure 1 Contents of Cu in animal manures from different breeding farms

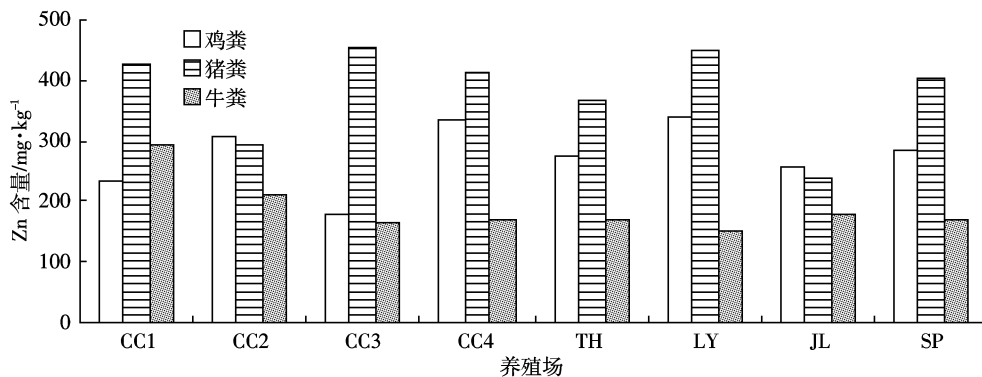


图 2 不同养殖场畜禽粪便中 Zn 含量

Figure 2 Contents of Zn in animal manures from different breeding farms

苏^[4]、福建^[8]和国外的某些地区如英格兰和威尔士^[3]畜禽粪便 Cu、Zn 含量比, 本研究所采集的吉林省部分养殖场畜禽粪便 Cu、Zn 含量是比较低的。

2.2 畜禽粪便自然堆放对土壤 Cu、Zn 含量的影响

2.2.1 对土壤 Cu 含量的影响

图 3、图 4 和图 5 分别是鸡粪、猪粪和牛粪自然堆放条件下不同剖面底土 Cu 的含量。由图 3 和图 4 可见, 随土壤剖面的加深, 鸡粪和猪粪底土土壤 Cu 含量基本呈下降趋势, 但一般都高于相应剖面的对照土壤 Cu 含量; 由图 5 可见, 不同养殖场牛粪底土 Cu 含

量随土壤剖面的加深没有统一的变化规律, 两个养殖场(LY 和 SP)牛粪底土铜含量随剖面加深而下降, 其余养殖场牛粪底土铜含量或中间土含量较高或低层土含量较高, 但有 3 个养殖场(CC1、TH 和 SP)的牛粪底土 Cu 含量高于对照土壤。同鸡粪和猪粪相比, 由于牛粪中铜含量较低, 对粪底土铜含量影响较小。随粪便中 Cu 含量的增加或降低, 同一种类型粪便底土 Cu 含量没有明显变化趋势, 不同类型粪便的底土 Cu 含量则随粪便中 Cu 含量增加呈升高趋势, 一般为猪粪底土>鸡粪底土>牛粪底土。由此表明, 鸡粪和猪粪

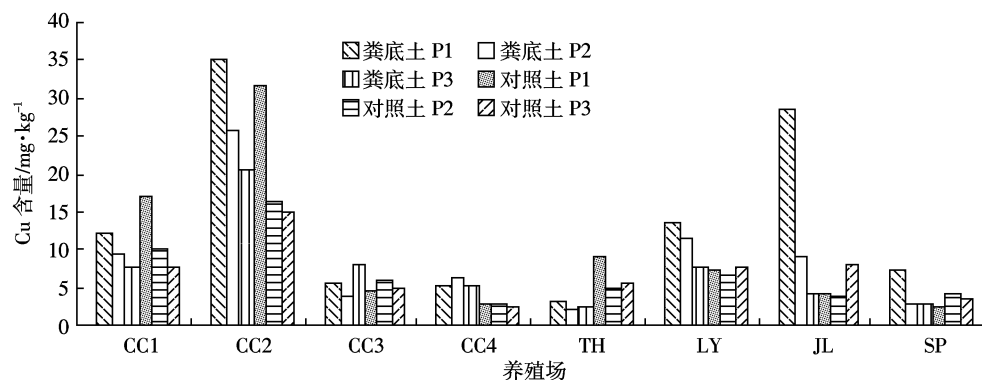


图 3 不同养鸡场粪底土壤中 Cu 的含量

Figure 3 Contents of Cu in excrement-subsoil from different chicken breeding farms

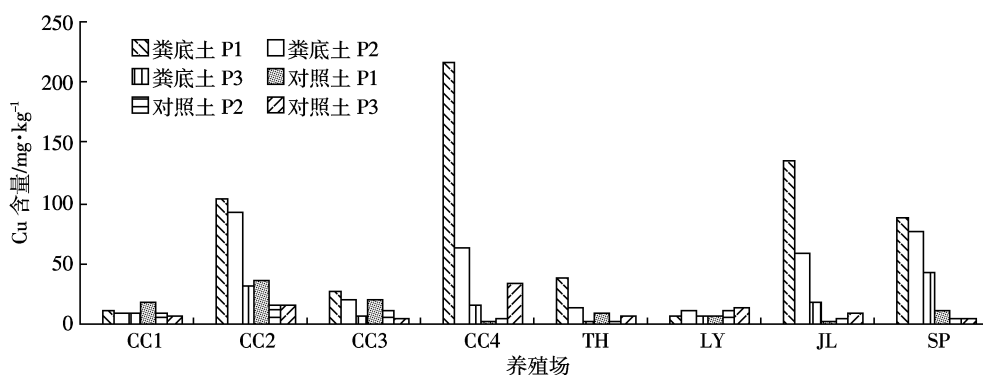


图4 不同养猪场粪底土壤中Cu的含量

Figure 4 Contents of Cu in excrement-subsoil from different pig breeding farms

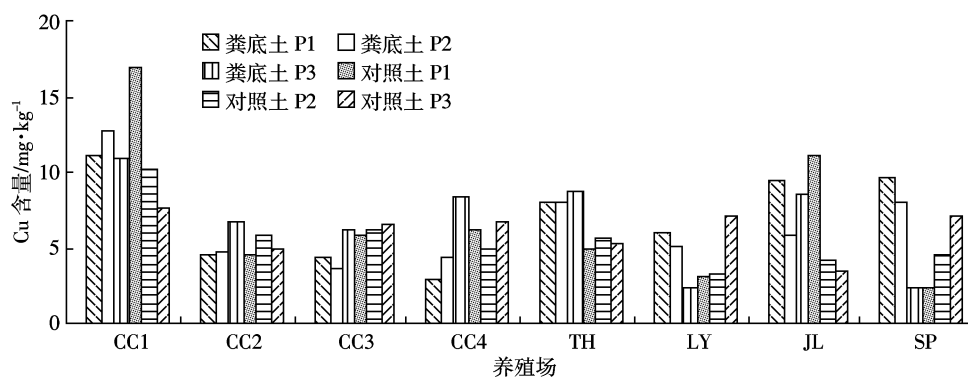


图5 不同养牛场粪底土壤中Cu的含量

Figure 5 Contents of Cu in excrement-subsoil from different cow breeding farms

在自然堆放过程中,Cu可从粪便迁移进入土壤,随粪便中Cu含量的增加迁移量也增加,并主要积累在土壤表层;而牛粪在自然堆放过程中对底土中Cu的含量影响不显著。晁雷等^[10]在研究堆肥对土壤重金属垂直分布的影响时也得到相同的结果。同我国土壤环境质量二级标准比较,除3个养猪场表层粪底土(CC2-P1、CC4-P1和JL-P1)Cu含量超出我国土壤环境质量二级标准外,其余粪便底土Cu含量均未达到污染水平,但同吉林省土壤Cu的背景值比($16.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),个别鸡粪底土和大部分猪粪底土Cu含量高于背景值,而牛粪底土Cu含量均低于背景值。

2.2.2 对土壤Zn含量的影响

图6、图7和图8分别是鸡粪、猪粪和牛粪自然堆放条件下不同剖面底土Zn的含量。由图6和图7可见,大部分养猪场的鸡粪和猪粪底土Zn含量基本为表层土>中间土>下层土,有4个养猪场鸡粪底土(CC2、CC4、TH和JL)和6个养猪场猪粪底土(CC2、CC3、CC4、TH、LY和TH)Zn含量高于对照土壤,表明鸡粪和猪粪自然堆放条件下,粪便中的Zn也可向土壤中迁移,主要积累在粪底土的表层。由图8可见,除

了CC2和TH养殖场外,其余养殖场不同剖面的牛粪底土Zn含量基本随土壤剖面的加深呈下降趋势,有4个养殖场(CC2、CC3、LY和SP)的牛粪底土Zn含量略高于对照土壤。由此可见,鸡粪、猪粪和牛粪自然堆放条件下,粪便中的Zn也可向底土迁移,使粪底土Zn含量有不同程度的增加,主要积累在粪底土的表层,但不同类型粪便底土Zn含量差异不明显。不论是粪底土还是对照土的Zn含量均高于吉林省土壤Zn的背景值,但同我国土壤环境质量二级标准比较,除了一部分鸡粪底土(CC2-P1、CC2-P2、JL-P1)和猪粪底土(CC2-P1、CC2-P2、TH-P1、SP-P1和SP-P2)外,其余粪便底土Zn含量均未超出我国土壤环境质量二级标准。

2.3 讨论

影响畜禽粪便重金属含量的因素主要有饲料添加量、畜禽的喂食方式和畜禽的种类和生长期,其中,饲料中重金属添加量高而畜禽吸收利用率低是导致畜禽粪便重金属含量升高的重要因素^[1,3,5]。根据本研究中一部分养殖场所用饲料商品标签或说明书所标记的Cu、Zn含量,如鸡饲料(CC3:Zn $130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu

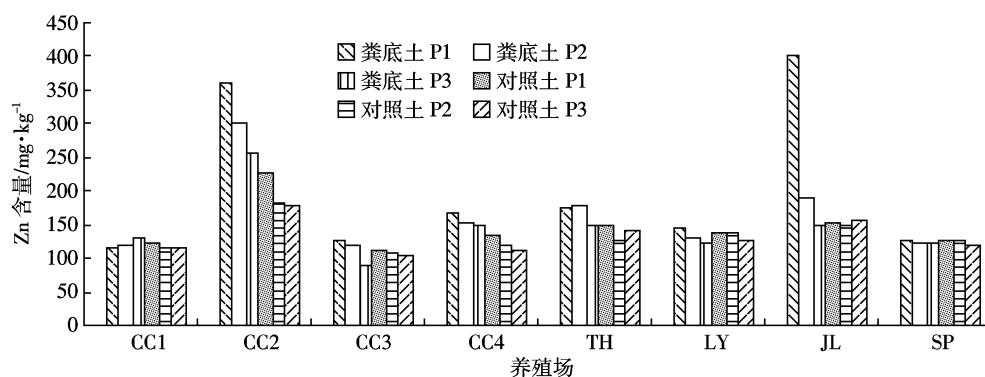


图6 不同养鸡场粪底土壤中 Zn 的含量

Figure 6 Contents of Zn in excrement-subsoil from different chicken breeding farms

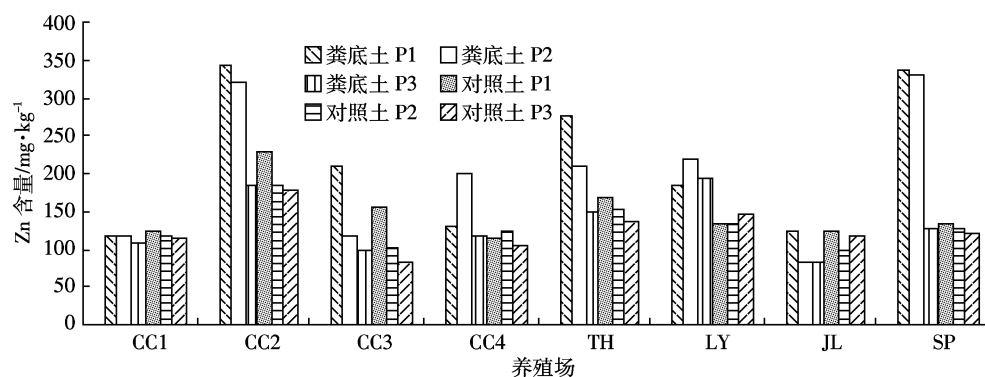


图7 不同养猪场粪底土壤中 Zn 的含量

Figure 7 Contents of Zn in excrement-subsoil from different pig breeding farms

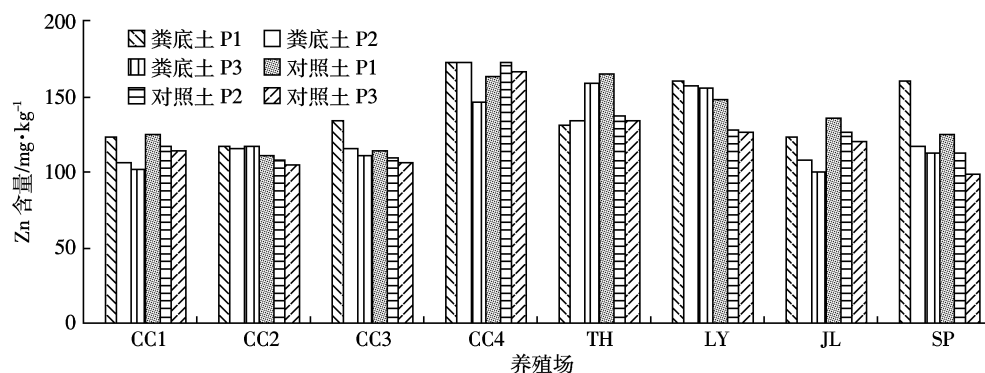


图8 不同养牛场粪底土壤中 Zn 的含量

Figure 8 Contents of Zn in excrement-subsoil from different cow breeding farms

2.6~65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; TH: $\text{Zn} > 130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} > 12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; LY: $\text{Zn} 183 \sim 499 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} 12 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; SP: $\text{Zn} 1500 \sim 5000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} 100 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、猪饲料 (LY: $\text{Zn} 200 \sim 599 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} 1.3 \sim 116 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; SP: $\text{Zn} \geq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} \geq 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、牛饲料 (JL: $\text{Zn} 250 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} 5 \sim 175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以及市场上出售的不同类型的猪饲料中 Cu、Zn 含量 (仔猪浓缩饲料含 $\text{Cu} 150 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} 150 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 乳猪浓缩饲料含 $\text{Cu} 100 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} 80 \sim 375 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 育

肥猪浓缩饲料含 $\text{Cu} 40 \sim 230 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} 300 \sim 590 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 哺乳母猪浓缩饲料含 $\text{Cu} 12 \sim 140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} 160 \sim 550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 可见, 鸡、猪、牛饲料中 Cu、Zn 添加量各不相同, 即使同为猪饲料但由于配方不同而 Cu、Zn 添加量也不相同, 再加上不同养殖场的喂养方式和鸡、猪、牛对 Cu、Zn 吸收利用率的差异, 结果导致了不同养殖场不同类型的畜禽粪便 Cu、Zn 含量不同。

畜禽粪便中的重金属在粪便自然堆放过程中可通过粪便液的渗透或雨水的淋溶进入土壤, 进入土壤

中的重金属又可在雨水的作用下由表层土壤不断向下层迁移。粪便自然堆放过程中重金属由粪便向粪便底土迁移的能力受粪便组成、水热条件、重金属含量和存在形态的影响^[16-17],外源重金属进入土壤后在土壤中的迁移能力受到土壤水热条件、组成结构和理化性质的影响^[18]。本研究所采集的不同养殖场的不同类型的畜禽粪便的堆放时间、水热条件、重金属含量和存在形态可能存在一定差异,不同养殖场粪便土壤的组成和理化性质以及水热条件也可能存在一定差异,因此,重金属 Cu、Zn 由鸡粪、猪粪和牛粪中向底土迁移的能力和迁移的量就存在一定差异,从而导致粪便底土中重金属 Cu、Zn 含量和分布规律有一定差异。

3 结论

(1)不同类型粪便中 Cu、Zn 含量均是猪粪>鸡粪>牛粪,但不论是哪种类型的畜禽粪便重金属含量均是 Zn>Cu;(2)在自然堆放条件下,鸡粪和猪粪中的 Cu 可从粪便向底土迁移,迁移量随粪便中 Cu 含量的增加而增加,并主要积累在土壤表层,而牛粪在自然堆放过程中对底土的 Cu 含量影响不显著,粪底土 Cu 含量基本规律为猪粪底土>鸡粪底土>牛粪底土;鸡粪、猪粪和牛粪中的 Zn 也可向底土迁移,使粪底土 Zn 含量有不同程度的增加,但主要积累在粪底土的表层,且不同类型粪便底土 Zn 含量差异不明显。

参考文献:

- [1] 吴二社,张松林,刘焕萍,等.农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J].中国农学通报,2011,27(3):285-288.
- [2] WU Er-she, ZHANG Song-lin, LIU Huan-ping, et al. Livestock and poultry breed aquatics in rural areas and soil heavy metal pollutions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3):285-288.
- [3] Petersen S O, Sommer S G, et al. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective[J]. *Livestock Science*, 2007, 112:180-191.
- [4] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Biore-sourse Technol*, 1999, 70:23-31.
- [5] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, et al. Heavy metals pollution poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province [J]. *China J Environ Sci*, 2004, 16(3):371-374.
- [6] 索超,李艳霞,张增强,等.北京集约化养殖畜禽饲料 Zn 含量及粪便 Zn 残留特征研究[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2173-2179.
- [7] SUO Chao, LI Yan-xia, ZHANG Zeng-qiang, et al. Residual character of Zn in feeds and their feces from intensive livestock and poultry farms in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2173-2179.
- [8] 李书田,刘荣乐,陕红.我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J].农业环境科学学报,2009,28(1):179-184.
- [9] LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):179-184.
- [10] XIONG Xiong, LI Yan-xia, LI Wei, et al. Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(11):985-990.
- [11] 彭来真,刘琳琳,张寿强,等.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(自然科学版),2010,39(5):523-527.
- [12] PENG Lai-zhen, LIU Lin-lin, ZHANG Shou-qiang, et al. Heavy metals content in manure of commercial animal farms in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2010, 39(5):523-527.
- [13] 赵明,蔡葵,赵征宇,等.畜禽粪肥对土壤有效铜锌铁锰含量的影响[J].土壤通报,2007,38(1):93-96.
- [14] ZHAO Ming, CAI Kui, ZHAO Zhen-yu, et al. Effect of organic manure on the content of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1):93-96.
- [15] 晁雷,周启星,崔爽,等.堆肥对土壤重金属垂直分布的影响与污染评价[J].应用生态学报,2007,18(6):1346-1350.
- [16] CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CUI Shuang, et al. Profile distribution and pollution assessment of heavy metals in soils under livestock feces composts[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6):1346-1350.
- [17] 单婕,邵孝侯.奶牛粪污染条件下土壤重金属的含量与分布[J].湖北农业科学,2008,47(5):531-534.
- [18] SHAN Jie, SHAO Xiao-hou. Heavy metals content and distribution in soil under cow manure pollution condition[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 47(5):531-534.
- [19] HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, CHEN Huai-man, et al. Leaching of copper and zinc in a garden soil receiving poultry and livestock manures from intensive farms[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1):69-76.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局.有机-无机复混肥料国家标准 GB 18877—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [21] General Administration of National Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. Organic-inorganic fertilizer national standards GB 18877—2002[S]. Beijing:Standards Press of China, 2002.
- [22] 孟宪玺,李生智.吉林省土壤元素背景值研究[M].北京:科学出版社,1995.
- [23] MENG Xian-xi, LI Sheng-zhi. Jilin background value of elements in soils[M]. Beijing:Science Press, 1995.
- [24] 中华人民共和国国家标准.土壤环境质量标准[S].GB 15618—1995.
- [25] National Standards of China. Soil environmental quality standard[S]. GB 15618—1995.
- [26] Hsu Jenn-Hung, Lo Shang-lien. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114:119-127.
- [27] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Composting of spent pig litter at different seasonal temperatures in subtropical climate[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1):97-104.
- [28] 戴树桂.环境化学[M].第二版.北京:高等教育出版社,2006.
- [29] DAI Shu-gui. Environmental Chemistry[M]. second edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.