

# 堆肥对土壤重金属垂直分布的影响与污染评价<sup>\*</sup>

晁雷<sup>1,2</sup> 周启星<sup>1,3\*\*</sup> 崔爽<sup>1,2</sup> 陈苏<sup>1,2</sup> 任丽萍<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup> 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

**摘要** 对不同畜禽粪便堆肥与土壤重金属垂直分布的关系进行了研究。结果表明, 在畜禽粪便堆肥过程中, 粪堆下土壤 pH 值和有机质显著增加, 其 pH 和有机质含量的垂直分布表现为从表层到底层逐渐降低。各种畜禽粪便堆肥下土壤 Zn、Cd 含量明显增高, 且从表层到底层呈逐渐减小的趋势。鸡粪和猪粪堆肥下土壤 Cu 含量随土层深度增加而降低; 牛粪堆肥下土壤 Cu 含量随土层深度增加没有明显的变化。自然条件下 Cd 和 Zn 在土壤系统中的迁移能力大于 Cu。各粪堆下的部分土层 Cu、Zn、Cd 含量超过我国土壤环境质量一级标准。应用地质积累指数法对各土层污染评价的结果表明, 只有肉鸡粪堆下 0~10 cm 土壤和蛋鸡粪堆下 0~40 cm 土壤受到轻度 Zn 污染, 其它粪堆下各土层均未受到 Cu、Zn、Pb 和 Cd 污染。

**关键词** 畜禽粪便 重金属 垂直分布 地质积累指数

**文章编号** 1001-9332(2007)06-1346-05 **中图分类号** X53 **文献标识码** A

**Profile distribution and pollution assessment of heavy metals in soils under livestock feces composts.** CHAO Lei<sup>1,2</sup>, ZHOU Qi-xing<sup>1,3</sup>, CUI Shuang<sup>1,2</sup>, CHEN Su<sup>1,2</sup>, REN Li-ping<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; <sup>3</sup>College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(6): 1346–1350.

**Abstract:** This paper studied the profile distribution of heavy metals in soils under different kind livestock feces composts. The results showed that in the process of livestock feces composting, the pH value and organic matter content of soil under feces compost increased significantly, and had a decreased distribution with soil depth. The contents of soil Zn and Cd also had an obvious increase, and decreased with increasing soil depth. Under the composts of chicken and pig feces, soil Cu content decreased with soil depth, while under cattle feces compost, it had little change. Soil Cd and Zn had a stronger mobility than soil Cu, and the Zn, Cd and Cu contents in some soil layers exceeded the first level of the environmental quality standard for soils in China. The geo-accumulation indices showed that only the 0–10 cm soil layer under chicken feces compost and the 0–40 cm soil layer under egg chicken feces compost were lightly polluted by Zn, while the soil profiles under other kinds of livestock feces compost were not polluted by Pb, Cu, Zn and Cd.

**Key words:** livestock feces; heavy metal; profile distribution; geo-accumulation index.

## 1 引言

目前, 我国广大农村地区的畜禽养殖户普遍采用原始的露天堆肥方式处理畜禽粪便。据调查, 在辽宁地区采用露天堆肥方式处理的畜禽粪便占畜禽粪

便总量的 70% 左右<sup>[3]</sup>。当畜禽粪便中有较高含量的 Zn、Cu 和 Cd 等重金属时<sup>[5,12,20]</sup>, 露天堆肥的畜禽粪便处理方式会对大气、水及土壤环境造成很大的污染, 而农村地区又以地下水为主要饮用水源, 因此具有较高重金属含量的畜禽粪便在露天堆肥处理过程中产生的深层土壤污染问题值得关注。

近年来, 众多研究者在畜禽粪便对农田中重金属含量的贡献<sup>[10–11]</sup>, 重金属在各种不同条件堆肥过程中的形态变化<sup>[6,20]</sup>, 以及畜禽粪便的施用对重金

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418503)、国家自然科学基金杰出青年项目(20225722)和国家自然科学基金重点资助项目(20337010)。

\*\* 通讯作者. E-mail: zhouqx@iae.ac.cn

2006-04-20 收稿, 2007-03-19 接受。

属的植物可利用性的影响<sup>[18]</sup>等方面进行了大量的研究,但有关畜禽粪便在实际堆放过程中对深层土壤的污染研究却鲜有报道。自然条件下畜禽粪便堆放对深层土壤污染影响的研究,可为我国广大农村环境治理提供参考依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

辽宁省(除大连外)80%大型养牛场和养鸡场都存在着露天堆肥的现象;大型养猪场的猪粪一般都堆放在专门的混凝土堆肥池内,只有朝阳市某养猪专业村存在露天堆肥现象。选择规模大且有代表性的养殖场设置采样点(表1)。采样时,用铁铲清除粪堆后,用1 m长土钻进行采样,采样深度为土钻能够采到的最大深度(土层下的岩层限制了采样深度)。同时在各采样点附近采集深层清洁土壤作为背景值<sup>[16~17]</sup>,各采样点背景值见表2。

表1 各采样点具体情况

Tab. 1 Situation of investigated sites

| 采样点<br>Sampling site | 粪便种类<br>Kinds of feces | 所在城市<br>City    | 堆肥坑<br>Time of composted<br>(a) | 采样深度<br>Sampling depth<br>(cm) |
|----------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1                    | 肉鸡<br>Flesh chicken    | 朝阳市<br>Chaoyang | 4                               | 30                             |
| 2                    | 蛋鸡<br>Egg chicken      | 抚顺市<br>Fushun   | 5                               | 80                             |
| 3                    | 肉牛<br>Beef cattle      | 盘锦市<br>Panjin   | 3                               | 70                             |
| 4                    | 奶牛<br>Dairy cattle     | 阜新市<br>Fuxin    | 4                               | 80                             |
| 5                    | 猪<br>Pig               | 朝阳市<br>Chaoyang | 5                               | 60                             |

表2 各采样点土壤背景值

Tab. 2 Background of investigated site soils

| 采样点<br>Sampling site | pH   | 有机质<br>Organic matter<br>(%) | 总Cd<br>Total Cd<br>(mg·kg⁻¹) | 总Pb<br>Total Pb<br>(mg·kg⁻¹) | 总Zn<br>Total Zn<br>(mg·kg⁻¹) | 总Cu<br>Total Cu<br>(mg·kg⁻¹) |
|----------------------|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1                    | 6.31 | 3.09                         | 0.17                         | 32.91                        | 67.32                        | 19.32                        |
| 2                    | 7.69 | 3.91                         | 0.16                         | 28.04                        | 77.11                        | 18.71                        |
| 3                    | 8.09 | 3.60                         | 0.17                         | 32.41                        | 44.82                        | 18.15                        |
| 4                    | 7.18 | 3.93                         | 0.17                         | 23.83                        | 41.67                        | 18.07                        |
| 5                    | 7.60 | 3.87                         | 0.17                         | 25.14                        | 67.29                        | 18.69                        |

表3 采样点土壤pH值随土层深度的变化

Tab. 3 Profile distribution of pH of investigated soils

| 采样点<br>Sampling site | 土层深度 Soil depth (cm) |             |             |             |             |             |             |             |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                      | 0~10                 | 10~20       | 20~30       | 30~40       | 40~50       | 50~60       | 60~70       | 70~80       |
| 1                    | 7.89 ± 0.01          | 7.28 ± 0.02 | 6.35 ± 0.01 | —           | —           | —           | —           | —           |
| 2                    | 7.97 ± 0.01          | 7.83 ± 0.01 | 7.70 ± 0.02 | 7.70 ± 0.01 | 7.68 ± 0.01 | 7.69 ± 0.02 | 7.66 ± 0.01 | 7.67 ± 0.01 |
| 3                    | 8.41 ± 0.01          | 8.31 ± 0.01 | 8.30 ± 0.01 | 8.10 ± 0.01 | 8.05 ± 0.01 | 8.09 ± 0.01 | 8.09 ± 0.01 | —           |
| 4                    | 7.54 ± 0.01          | 7.54 ± 0.01 | 7.43 ± 0.01 | 7.19 ± 0.01 | 7.18 ± 0.01 | 7.18 ± 0.01 | 7.19 ± 0.01 | 7.18 ± 0.01 |
| 5                    | 8.05 ± 0.01          | 7.92 ± 0.01 | 7.92 ± 0.01 | 7.72 ± 0.01 | 7.61 ± 0.01 | 7.59 ± 0.01 | —           | —           |

## 2.2 研究方法与数据统计

各采样点按采样深度分成不同土样,每10 cm为1个土样。土壤样品在去除植物等杂质后,于室温下风干(防止阳光直射和尘土落入),碾碎后过100目筛。土壤样品用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>法消化(体积比为87:13)、原子吸收分光光度计(日立180-80)法测定重金属含量,重复3次。土壤有机质含量的测定采用常规方法<sup>[7]</sup>。pH用pHS-3B型pH计测定,土水比为1:2.5(V/V)。用Microsoft Excel和SPSS软件对数据进行处理。

### 2.3 评价方法

采用地质累积指数(index of geoaccumulation,  $I_{geo}$ )对剖面的污染情况进行评价。

地质累积指数是用来评价沉积物中重金属污染的常用指标<sup>[13]</sup>,其计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 1.5 B_n \quad (1)$$

式中,  $C_n$  为被测样品中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量,  $B_n$  为所测元素的土壤背景值,系数1.5为校正系数。地质累积指数可分为6个级别,1~6级表示污染程度由无到极强,最高一级(6级)的元素含量可能是背景值的几百倍。不同的级别也代表着不同的重金属污染程度:1级表示未污染( $I_{geo} < 1$ );2级表示偏轻度污染( $1 < I_{geo} \leq 2$ );3级表示轻度污染( $2 < I_{geo} \leq 3$ );4级表示中度污染( $3 < I_{geo} \leq 4$ );5级表示重污染( $4 < I_{geo} \leq 5$ );6级表示严重污染( $I_{geo} > 5$ )。

## 3 结果与讨论

### 3.1 堆肥土壤pH与有机质的空间变化特征

从表3可以看出,鸡粪、牛粪、猪粪堆下土壤pH值均随剖面深度的增加而降低。采样点1和采样点2土壤在粪堆下20~30 cm左右达到背景值,采样点3和采样点4土壤在粪堆下30~40 cm左右达到背景值,采样点5土壤在粪堆下40~50 cm左右达到背景值。而在清洁土壤的剖面中,土壤的pH值基本保持不变<sup>[2,9]</sup>,由此可见,畜禽粪便堆肥可以增加土壤pH且可影响到一定深度的土壤。

表4 采样点土壤有机质含量随深度的变化

Tab.4 Profile distribution of organic matter of investigated soils(%)

| 采样点<br>Sampling site | 土层深度 Soil depth(cm) |           |           |           |           |           |           |           |
|----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | 0~10                | 10~20     | 20~30     | 30~40     | 40~50     | 50~60     | 60~70     | 70~80     |
| 1                    | 6.51±0.02           | 5.03±0.02 | 4.08±0.01 | -         | -         | -         | -         | -         |
| 2                    | 6.75±0.03           | 6.02±0.01 | 5.11±0.02 | 5.20±0.03 | 4.67±0.04 | 4.31±0.04 | 4.02±0.03 | 3.92±0.04 |
| 3                    | 4.62±0.02           | 4.45±0.03 | 4.54±0.03 | 3.65±0.03 | 3.73±0.03 | 3.58±0.03 | 3.61±0.02 | -         |
| 4                    | 5.51±0.03           | 5.13±0.02 | 4.77±0.03 | 4.11±0.03 | 4.08±0.03 | 3.98±0.03 | 3.93±0.03 | 3.95±0.03 |
| 5                    | 6.18±0.03           | 5.68±0.03 | 5.58±0.03 | 5.18±0.03 | 4.59±0.04 | 3.96±0.03 | -         | -         |

所调查的5个土壤剖面有机质含量均表现出从表层到底层逐渐降低的趋势(表4). 距离畜禽粪便堆肥最近的土层土壤有机质含量最高, 随着深度的增加土壤有机质含量有所减少. 鸡粪堆下表层土壤有机质含量最高, 肉鸡粪堆下表层土壤有机质含量为6.51%, 蛋鸡粪堆下表层土壤有机质含量为6.75%; 牛粪堆下表层土壤有机质含量相对较低, 肉牛粪堆下表层土壤有机质含量为4.62%, 奶牛粪堆下表层土壤有机质含量为5.51%. 由此可见, 不同畜禽粪便堆肥改善土壤有机质含量的能力是不同的. 鸡粪增加土壤有机质含量的能力要大于猪粪和牛粪. 与对土壤pH值的影响相比, 畜禽粪便堆肥对土壤剖面有机质含量的影响更突出. 2号采样点影响深度达到土层下70 cm; 3号采样点达到土层下50 cm; 4号采样点达到土层下60 cm; 5号采样点达到土层下60 cm.

### 3.2 堆肥土壤重金属的垂直变化特征

Zn是动植物生长必不可少的微量元素. Zn不仅可参与畜禽的许多代谢过程, 还可作为杀菌剂防止断奶后的乳猪腹泻<sup>[4]</sup>. 现代的饲料在生产过程中都会加入Zn, 这些投加在饲料中的Zn, 有很大一部分通过粪尿排出体外(表5), 最终以肥料的方式进入土壤, 但过量的Zn进入土壤系统, 则会对生物的生长产生毒害作用. 在一般清洁土壤中, 1 m深范围内土壤Zn浓度随土层深度的增加不会有太大的变化<sup>[2,9]</sup>. 但本研究中, 各土层Zn浓度有很大的变化(图1). 在同一剖面中, 由表层到底层土壤Zn浓度逐渐减小. 其中, 鸡粪堆下土壤Zn浓度要高于猪粪

表5 不同畜禽粪便中的重金属浓度情况

Tab.5 Concentration of heavy metals in the feces of livestock and chicken (mg·kg<sup>-1</sup>)

| 重金属<br>Heavy metal | 奶牛<br>Dairy cattle | 肉牛<br>Beef cattle | 猪<br>Pig | 家禽<br>Poultry |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------|---------------|
| Zn                 | 180                | 110               | 500      | 400           |
| Cu                 | 50                 | 25                | 360      | 80            |
| Pb                 | <20                | <20               | <5       | <10           |
| Cd                 | <20                | <20               | <5       | <10           |

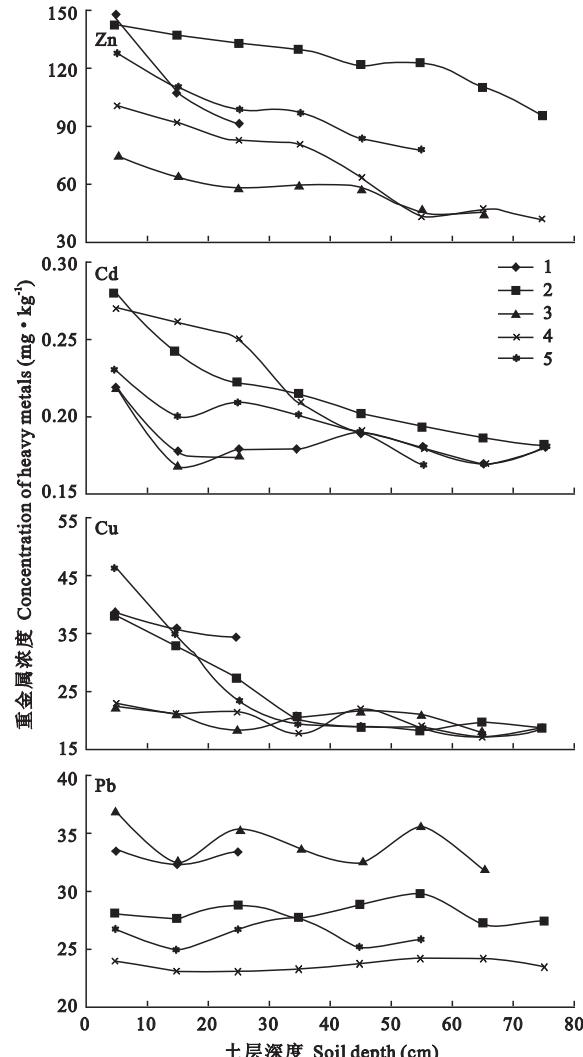


图1 各采样点土壤Zn、Cu、Pb和Cd浓度随土层深度的变化

Fig.1 Profile distributions of Zn, Cu, Pb and Cd concentration of investigated soils.

堆下, 其浓度均超过我国土壤环境质量一级标准; 牛粪堆下的土壤Zn浓度最低, 其表层土的Zn浓度低于我国土壤环境质量一级标准. 这种现象是由于不同畜禽饲喂的饲料不同及消化吸收能力差异造成的. 有研究表明, 各种畜禽粪便堆下表层土壤中Zn浓度顺序为鸡粪>猪粪>牛粪<sup>[9-10]</sup>.

Cu是一种抗菌剂和骨骼强壮剂<sup>[15]</sup>, 也是猪体

内多种代谢所需关键酶的辅助因子,直接参与胆固醇代谢、骨骼矿化、免疫机能调节等代谢过程。我国猪饲料中普遍添加  $\text{CuSO}_4$ ,不少饲料中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度已超过猪的最大耐受量  $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有些甚至高达  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,大大高于养猪科学研究所的建议量  $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[21]</sup>,因而许多学者<sup>[19,21]</sup>担心猪粪中 Cu 对土壤的污染。本研究表明,猪粪堆下的表层土壤 Cu 浓度的确高于牛粪和鸡粪堆下的表层土壤,但是 Cu 的迁移能力不是很强<sup>[8,10]</sup>,在使用 5 年的堆肥池中 Cu 只迁移到表层土壤下 40 cm。猪粪堆下的表层土壤中 Cu 浓度为  $46.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,低于我国土壤环境质量二级标准,同时也低于美国马里兰州土壤清洁标准( $310 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和丹麦土壤质量基准( $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[22]</sup>。鸡粪堆下表层土壤 Cu 浓度高于牛粪堆下表层土壤 Cu 浓度,同时也略高于我国土壤质量一级标准。与猪粪堆下 Cu 的垂直迁移规律相似,采样点 2 土壤中 Cu 浓度也在表层下 40 cm 处达到背景值。结果表明,肉牛和奶牛粪堆下各层土壤 Cu 浓度几乎没有变化,表层土壤 Cu 浓度都仅略高于背景值,可见牛粪 Cu 浓度是比较低的,不会为土壤带来大量的外源 Cu。猪粪、鸡粪和牛粪堆下表层土壤 Cu 浓度顺序为:猪粪 > 鸡粪 > 牛粪。

Pb 不是畜禽体内必需的元素,所以也未见畜禽粪中重金属 Pb 污染的报道<sup>[14]</sup>,本试验也验证了这一结果。从图 2 可以看出,同一采样点各土层 Pb 浓度虽有小幅波动,但其波动范围大体相同,各土层 Pb 的浓度都接近各采样点的土壤背景值。

Cd 不是畜禽体内必需的元素。一般来说,畜禽粪中 Cd 浓度大小主要取决于饲料的背景浓度。从图 2 可以看出,各层土壤 Cd 浓度变化不大,主要集中于  $0.15 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。各采样点表层下 40 cm 处土壤 Cd 浓度都达到  $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。浓度最高的土层均为表层土,其中 2 号(蛋鸡粪堆下)、4 号(奶牛粪堆下)剖面表层土壤 Cd 浓度明显高于 1 号(肉鸡粪堆下)、3 号(肉牛粪堆下)和 5 号(猪粪堆下)。由于畜禽粪便中的重金属只有 3 个来源,即饲料的背景浓度、为了畜禽的健康在饲料中添加的微量元素和为了加快畜禽的生长而在饲料中添加的生长促进剂,因而肉用畜禽粪便中 Cd 浓度低于非肉用的原因是由于饲料的背景浓度差异,还是在非肉用畜禽饲喂过程中投加的某种生长促进剂所造成的,还需进一步研究。

### 3.3 不同重金属在土层中的迁移能力

各种粪便堆下土壤剖面 Zn、Cd 的浓度分布都

是从表层到底层逐渐降低(图 1)。牛粪堆下的土壤 Cu 浓度没有什么变化,而鸡粪和猪粪堆下的土壤 Cu 浓度从表层到底层逐渐降低;Pb 在各种粪堆下的垂直分布并无明显变化。因此,选择 2 号(蛋鸡粪堆下)和 5 号(猪粪堆下)点为研究对象,对 Cu、Zn、Cd 的垂直迁移能力进行研究。两采样点各土层中 Cu、Zn、Cd 超出背景值的量主要是由其上方堆放的鸡(猪)粪造成的。对于同一剖面而言,不同外源重金属的投加时间是相同的,但 Cu、Zn、Cd 影响的土层深度却不相同,这是由于它们的迁移能力不同造成的<sup>[1]</sup>。

如图 2 所示,2 号和 5 号采样点 Cu 浓度变化自表层下 40 cm 开始趋于平缓,土壤中 Cu 浓度近似于当地土壤背景值,说明粪堆中 Cu 元素只迁移到其下 40 cm 深处。在 2 号和 5 号点的整个采样深度内,土壤 Cd 和 Zn 含量始终呈下降趋势,未见其浓度在某一值左右波动的现象,故可推断在自然状态下 Zn、Cd 在土壤系统中的迁移能力要大于 Cu。

### 3.4 堆肥土壤污染评价

应用地质累积指数对各采样剖面进行评价,结果表明,只有 1 号采样点 0~10 cm 土壤和 2 号采样点 0~40 cm 土壤受到 Zn 的偏轻度污染,其它各采样点各土层均未受到 Cu、Zn、Pb、Cd 污染。1 号采样点为肉

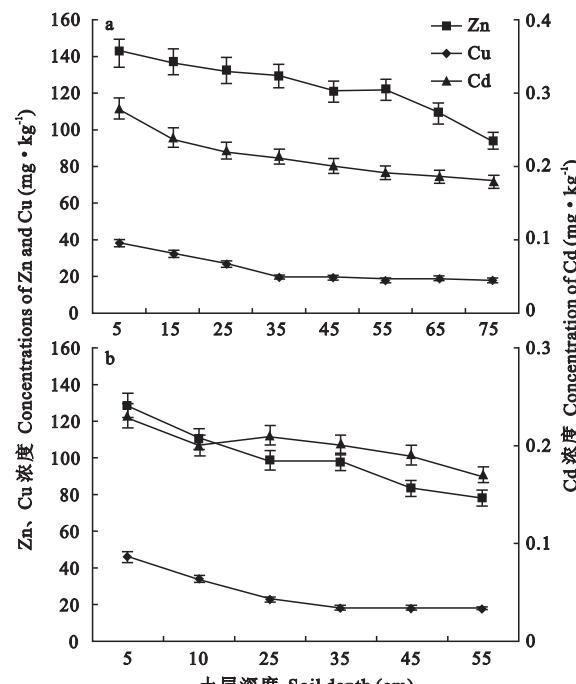


图 2 2 号(a)和 5 号(b)采样点土壤 Zn、Cu 和 Cd 浓度随土层深度的变化

Fig. 2 Profile distributions of Zn, Cu and Cd concentration of sample 2 (a) and sample 5 (b) soils.

鸡粪堆下土壤,2号采样点为蛋鸡粪堆下土壤。由此可见,鸡粪中Zn浓度较高,其长时间堆放会对下层土壤造成一定程度的污染,而猪粪、牛粪中的Cu、Zn、Pb、Cd在3~5年内不会对其下层土壤产生污染。

## 4 小 结

畜禽粪便可以显著提高土壤有机质含量和土壤pH,且土壤pH和有机质含量均随土层深度的增加而减少。各种畜禽粪便堆下土壤Zn、Cd浓度明显增高,且从表层到底层呈逐渐减小的趋势。鸡粪和猪粪堆下土壤Cu浓度随土层深度增加而降低;牛粪堆下土壤Cu浓度随土层深度增加没有明显的变化。各粪堆下土壤Pb浓度几乎不随土层深度变化而变化。各畜禽粪便堆下表层土壤Zn、Cd和Pb浓度随畜禽种类的变化而变化。自然条件下在土壤系统中Cd和Zn的迁移能力大于Cu。

粪堆下的部分土层土壤Cu、Zn、Cd浓度超过我国土壤环境质量一级标准,但均未超过我国土壤环境质量二级标准。对各堆肥土壤的污染评价表明,只有肉鸡粪下0~10 cm土壤和蛋鸡粪下0~40 cm土壤受到Zn的偏轻度污染,其它各粪堆下各土层土壤均未受到Cu、Zn、Pb、Cd污染。

## 参考文献

- [1] Abollino O, Aceto M, Malandrino M, et al. 2002. Distribution and mobility of metals in contaminated sites: Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution*, **119**: 177~193
- [2] Bai Z-S(白增森), Wu J-H(吴家华), Dong Y-Z(董云中), et al. 1997. Vertical distribution and regional differentiation of heavy metal in Fen river area. *Agro-Environment and Development*(农业环境与发展), **14**(4): 11~16 (in Chinese)
- [3] Chao L(晁雷), Zhou Q-X(周启星), Zhang L(张蕾), et al. 2006. Research on environment pollution of concentrated livestock and poultry operations and its control strategies in Liaoning Province. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*(农业系统科学与综合研究), **22**(3): 81~83 (in Chinese)
- [4] Holm A. 1990. E. coli associated diarrhoea in weaner pig: Zinc oxide added to the feed as a preventative measure. Proceedings of the International Pig Veterinary Society. 11th Congress, July 1~5, Lausanne, Switzerland.
- [5] Hsu JH, Lo SL. 2001. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese and Zinc from swine manure. *Environmental Pollution*, **114**: 119~127
- [6] Huang G-F(黄国锋), Zhang Z-T(张振钿), Zhong L-J(钟流举), et al. 2004. Chemical changes of heavy metals in the process of pig manure composting. *China Environmental Science*(中国环境科学), **24**(1): 94~99 (in Chinese)
- [7] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences(中国科学院南京土壤研究所). 1978. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. (in Chinese)
- [8] Karczewska A. 1996. Metal species distribution in top-and sub-soil in an area affected by copper smelter emissions. *Applied Geochemistry*, **11**: 35~42
- [9] Lin ZX. 1997. Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. *Science of the Total Environment*, **198**: 13~31
- [10] Martley E, Gulson BL, Pfeifer HR. 2004. Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of Port Kembla, NSW, Australia. *Science of the Total Environment*, **325**: 113~127
- [11] Nicholson FA, Chambers BJ, Williams JR, et al. 1999. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresources Technology*, **70**: 23~31
- [12] Nicholson FA, Smith SR, Alloway BJ, et al. 2003. An inventory of heavy metal inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, **311**: 205~219
- [13] Peng X-T(彭晓彤), Zhou H-Y(周怀阳), Weng H-X(翁焕新), et al. 2003. Distribution characteristics, transfer mechanism and pollution assess of heavy metal vanadium, nickel and cobalt in sediment cores of the Zhejiang Estuary. *Journal of Zhejiang University*(浙江大学学报), **30**(1): 103~108 (in Chinese)
- [14] Prohaska T, Wenzel WW, Steding G. 2005. ICP-MS-based tracing of metal sources and mobility in a soil depth profile via the isotopic variation of Sr and Pb. *International Journal of Mass Spectrometry*, **242**: 243~250
- [15] Rosen GD, Roberts PA. 1996. Comprehensive Survey of the Response of Growing Pigs to Supplementary Copper in Feed. London: Field Investigations and Nutrition Service Ltd: 113~121
- [16] Sterckeman T, Douay F, Proix N, et al. 2000. Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France. *Environmental Pollution*, **107**: 377~389
- [17] Wu Y-Y(吴燕玉). 1991. *Background of Soil Element in Liaoning Province*. Beijing: China Environmental Science Press: 23~34 (in Chinese)
- [18] Yin J-L(尹金来), Shen Q-R(沈其荣), Zhou C-L(周春霖), et al. 2001. Effects of pig slurry and P fertilizer on inorganic-P fractions of soils and their availabilities. *Scientia Agricultura Sinica*(中国农业科学), **34**(3): 296~300 (in Chinese)
- [19] Yu Y, Zhou QX, He ZL. 2005. Effects of methamidophos and glyphosate on copper sorption-desorption behavior in soils. *Science in China (Series C: Life Science)*, **48**: 67~75
- [20] Zheng G-D(郑国砥), Chen T-B(陈同斌), Gao D(高定), et al. 2005. Influence of high temperature aerobic composting treatment on the form of heavy metals in pig manure. *China Environmental Science*(中国环境科学), **25**(1): 6~9 (in Chinese)
- [21] Zhong Y-L(钟逸兰). 1999. The reasonable application of Cu in pig forage. *Guangdong Feed*(广东饲料), (3): 15~16 (in Chinese)
- [22] Zhou Q-X(周启星), Song Y-F(宋玉芳). 2004. Remediation of Contaminated Soils Principles and Methods. Beijing: Science Press: 525~536 (in Chinese)

**作者简介** 钟雷,男,1978年生,博士研究生。主要从事污染生态学研究。E-mail: mailchaolei@yahoo.com.cn

**责任编辑** 梁仁禄

