

养猪舍不同发酵床垫料重金属 Zn 累积特征初探

张丽萍^{1,2}, 盛 婧^{1,2}, 孙国锋^{1,2}, 郑建初^{1,2*}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了研究养猪舍不同发酵床垫料及发酵床底部表层土壤中重金属 Zn 的累积特征与活性大小,以节约经济成本和适宜猪生长发育为前提选取 3 种发酵床垫料组合:FJ(40%稻壳+60%菌糠)、FD(40%稻壳+60%锯木屑)、FW(40%稻壳+60%酒糟),采用物质流分析(MFA)和潜在生态危害评价的方法进行研究。结果表明,一个在养猪周期过后,重金属 Zn 在垫料 FD 中累积量较大;而不同垫料对 Zn 活性大小的影响不同,FD 中有效态 Zn 活性显著高于其他 2 种,所占比例高达 25.01%,其次是 FJ>FW($P<0.05$);表层土壤中,有效态 Zn 活性高低差异不显著($P>0.05$)。所选取的 3 种垫料中,尽管 Zn 在 FJ 中累积量最小,渗漏到土壤中的全量 Zn 与有效态活性与其他 2 种垫料无明显差异,然而其潜在生态风险最小,因此从控制 Zn 污染角度出发,该配比垫料优于 FD 与 FW。经过潜在生态危害评价分析,3 种垫料在养殖结束后其潜在生态危害均未超过轻微生态危害临界值($E_i^p \leq 40$),在不断补充垫料的前提下发酵床可以使用约 10 年。

关键词: 发酵床垫料;重金属 Zn 累积;有效态重金属;潜在生态危害评价;物质流分析

中图分类号:X713

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)01-0050-06

doi: 10.13254/j.jare.2013.0149

Primary Research on Characteristics of Zinc Accumulation of Different Pig-on-litters

ZHANG Li-ping^{1,2}, SHENG Jing^{1,2}, SUN Guo-feng^{1,2}, ZHENG Jian-chu^{1,2*}

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to study zinc accumulation and activity in different fermentation mattresses and topsoil, three combinations of fermentation beds were selected: 40% rice husk+ 60% mushroom bran (FJ), 40% rice husk+ 60% sawdust (FD), 40% rice husk+ 60% vinasse (FW), to save economic costs and be suitable for pig growth. Two methods named material flow analysis (MFA) and potential ecological risk assessment were used in this study. The results showed that, after one breeding cycle, the combination of FD had stronger ability to absorb heavy metal Zn; different litters had different effects on the activity of available Zn, thus in the litter of FD, the Zn activity was significantly higher than the other two, the proportion as high as 25.01%, followed by the FJ>FW ($P<0.05$). To the contrary, there were no significant impacts on available Zn activity ($P>0.05$) in different topsoil. In the selected three litters, the absorptive capacity for Zn of FJ was smallest; meanwhile, the total Zn leaked into topsoil and the effective activity of Zn had no significant differences from FD and FW. However, its potential ecological risk was minimization. For the reason to reduce Zn contamination, the litter of FJ was better than the other two. After analysis of ecological risk assessment, the potential ecological risk of these three litters didn't exceed the minimal ecological risk threshold ($E_i^p \leq 40$). The useful life of the fermentation bed should be about ten years in the premise of constantly replenished litter.

Keywords: fermentation bed litter; Zn accumulation; available heavy metals; potential ecological risk; material flow analysis (MFA)

日本是最早从事猪发酵床养殖技术研究的,他们

于 1970 年建立了第一个发酵床系统。该系统利用坑道以木屑作垫料,上面加盖聚氯乙烯塑料布而成^[1]。目前,发酵床养猪舍的垫料主要由锯木屑、稻壳、菌糠、酒糟等材料配比一定的有益微生物菌种混合而成,因而富含氮、磷、钾以及有机质等大量的营养元素,清理之后仍可作为有机肥施于农田,而且由于发酵床养猪

收稿日期:2013-09-11

基金项目:集约化农区种养结合生产技术集成与工程示范(201203050-2)

作者简介:张丽萍(1983—),女,博士,助研,研究方向为农业资源与利用。E-mail:lp.zhang@hotmail.com

* 通信作者:郑建初 E-mail:zjc@jaas.ac.cn

具有低排放、低污染的优良特性,越来越受到人们的重视^[2]。然而养猪过程中因猪的采食、排便等原因不可避免地会使饲料中添加的重金属(主要是 Zn、Cu、As)滞留在垫料中^[3],进而通过渗漏作用沉积到垫料下的表层土壤中(0~20 cm)。众所周知,土壤既是自然环境的构成要素,又是农业生产最重要的自然资源。因此垫料中留存的重金属含量的多少会对其后续作为有机肥施用于农田产生一定的影响,进而影响农产品的质量安全。

目前,土壤重金属污染作为土壤环境健康质量恶化重要标志之一,受到国内外学者的普遍关注。部分学者从重金属来源的角度研究了畜禽饲料和粪便中重金属 Zn 对环境的影响。有人通过长期施用高 Zn 猪粪(以施用量最低 10 g·盆⁻¹计),根据土壤 pH 值的不同,则土壤中 Zn 含量在 12~28 年间可能超过国家土壤环境质量的二级标准,且 pH 值愈低,情况愈严重^[4]。另有学者通过对长期施用规模养殖场猪粪和未施猪粪土壤的调查,发现施猪粪土壤及蔬菜中 Zn 含量均显著高于对照组。土壤中 Zn 含量最高为对照组的 5 倍,蔬菜中 Zn 含量最高为对照组的 4 倍;施猪粪土壤中 Zn 超标最高达 52.05%;施猪粪蔬菜 Zn 超标最高达 117%^[5]。还有学者为了系统评价猪饲料中高剂量的 Zn 对环境的影响,在猪饲料中添加了不同量的高锌,发现其对水体、土壤及农作物造成了不同程度的污染,并认为减少污染最根本的办法是制定相关限量使用标准,降低饲料中铜锌的添加量,并根据不同的土壤类型合理施用含高铜高锌猪粪有机肥^[6]。另外,针对重金属的土壤环境污染问题,也有学者从潜在生态风险及评价的角度评估土壤重金属的环境质量状况。有人结合多年工作经验,综述了近年来国内外有关重金属污染土壤修复技术的研究进展;同时对国内外典型的重金属污染土壤修复工程实践进行了介绍,以期重金属污染土壤的修复提供借鉴和参考^[7]。另有国外学者分别从土壤重金属污染的污染评价方法^[8-9]、空间分布特征^[10]等方面进行了研究。

以上研究分别从宏观和微观角度切入,对一个地区或区域内的重金属 Zn 累积情况进行描述和研究;为畜禽养殖中重金属 Zn 累积和污染评估提供了多种思路。然而不同材料的发酵床养殖用垫料及发酵床下部土壤重金属 Zn 累积状况与生态风险评价鲜有报道。本文以猪舍发酵床为例,以物质流分析的方法研究了不同材料的发酵床垫料中重金属 Zn 累积变化,并对这些材料及该区域表层土壤 Zn 累积的潜在生态

风险作出评价,以评估 Zn 量控制方面最适宜做垫料的材料。

1 材料与方法

1.1 试验设计

通过前期试验,试验区以节约经济成本和适宜生猪生长发育为前提研究确定了 3 种较好的垫料材料:40%稻壳+60%菌糠(FJ)、40%稻壳+60%锯木屑(FD)、40%稻壳+60%酒糟(FW)。每个猪栏面积为 37 m²,存栏仔猪 15 头,仔猪初始体重分别为 FJ:28.75±1.21 kg、FD:28.09±2.01 kg、FW:27.91±1.49 kg,每日消耗饲料量为 25 kg。由于物料的孔隙度、比重及容重不尽相同,为了使发酵床床体厚度达到 50 cm,3 种发酵床投入的垫料总量分别为 FJ:11 800 kg、FD:6 000 kg、FW:9 700 kg。

1.2 样品采集与分析

鉴于猪的生活习性,每个栏区划分 4 个采样区:饮水区、重排便区、轻排便区、活动区(采用多点测量并通过不规则多边形计算确定各个区域的面积);按照垫料层厚度,每个小区域分层取样(0~20、20~50 cm),每个样品至少 3 个重复,每个重复的样品留取二分之一制成混合样。所有样品均风干后过 100 目筛备用。

样品分析按照中华人民共和国农业部发布的 NY/T 1613—2008 行业标准采用三酸(HCl-HNO₃-HClO₄)法消解样品,上 ICP 测定样品中的全量 Zn;有效态 Zn 用 0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl 浸提^[11],用 ICP 测定含量。采用 Excel 软件进行图表和表格制作并进行标准偏差分析;采用 SPSSV17.0 和软件对重金属 Zn 的增量、超背景值比率、有效态活性及污染系数等数据进行单因素方差分析。

1.3 分析评价方法

应用物质流分析的方法,能够较全面地反映一种或几种重金属在发酵床养殖过程中各个阶段的含量的变化^[12-13]。物质流总量遵循质量守恒定律,其公式为:物质的输入量(Inputs)=物质的输出量(Outputs)+库存净增量(NAS)^[14-16]。

本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[17]分析和评价垫料及表层土壤重金属的潜在生态风险。该法是 Hakanson 根据重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。具体公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i; \quad C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i \quad (1)$$

式中: C_j 为单个重金属污染系数; $C_{\text{表层}}^i$ 表示土壤某重金属浓度实测值; C_n^i 为参比值,此处参比值采用结合当地实测背景值。 T_i 为某重金属的毒性响应系数,反映重金属毒性水平及土壤对重金属污染的敏感程度,据 Hakanson 的元素丰度原则与元素释放度原则标准化重金属毒性系数,取 $Zn=1$ [17]。 E_i^j 为某单重金属潜在生态危害系数。重金属污染生态危害系数分级标准列于表 1。

表 1 E_i^j 的分级标准

Table 1 Grade standard of E_i^j

污染系数 E_i^j	污染程度
≤ 40	轻微生态危害
40~79	中等生态危害
80~159	强生态危害
160~320	很强生态危害
>320	极强生态危害

2 结果与分析

2.1 养殖过后发酵床垫料及表层土壤重金属 Zn 累积特征

通过垫料剖面分层取样,分别测定了垫料中 Zn 的全量和有效态含量。随着垫料层次的加深,3 种垫料中全量 Zn 含量逐次递减,FJ 与 FW 下降程度比较高;同样 3 种垫料的有效态 Zn 含量也随着垫料层次的加深逐渐减少,但下降程度均不太明显。由此推断,全量 Zn 在 FJ 与 FW 2 种垫料中主要分布在 0~20 cm 的表层,而有效态分布较均匀(图 1)。综合而言,3 种垫料中大部分的 Zn 会滞留在垫料中,此结果与土壤中重金属 Zn 的层次分布规律相同[18]。

通过对比分析,研究不同组合的发酵床对 Zn 的吸纳能力。由表 2 可知,养殖结束后垫料中 Zn 的总累

表 2 养殖前后 3 种发酵床垫料 Zn 全量变化

Table 2 Total content changes of Zn in three litters before and

after breeding

垫料配比	背景值/g	养殖后/g	增量/g	超背景值倍数
FJ	185.01c±2.45	321.07c±8.41	136.06b±7.83	1.74a±0.04
FD	127.19a±1.30	249.69a±0.32	122.50a±1.52	1.96c±0.02
FW	144.23b±3.83	268.39b±1.67	124.16a±4.04	1.86b±0.05

注:同列不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

积量显著高于垫料背景值,而不同的垫料配比其 Zn 的累积量也不同。FJ(40%稻壳+60%菌糠)配比的垫料 Zn 增量为 136.06 g,显著高于 FD 与 FW 配比的发酵床;然而从平均总量超背景值倍数来看,FD(40%稻壳+60%锯木屑)配比的垫料其 Zn 的超背景值倍数为 1.96,显著高于 FJ 的 1.74 与 FW 的 1.86。3 种发酵床重金属 Zn 的超背景值倍数大小顺序为 $FD > FW > FJ$,从而表明他们对 Zn 的吸纳能力高低顺序为 $FD > FW > FJ$ 。

由于淋溶作用,发酵床垫料中的重金属会渗漏到床下表层土壤中进行累积,对这部分土壤(0~20 cm)的 Zn 含量进行测定分析后,从表 3 得知养殖后发酵床下部表层土壤中 Zn 的累积总量高于土壤背景值。然而,3 种发酵床垫料的增量分别为 FJ:5.83 g、FD:6.87 g、FW:6.19 g,统计学分析显示,3 种发酵床增量并没有显著性差异。同样,从超背景值倍数来看,3 种

表 3 养殖前后 3 种发酵床底层土壤 Zn 全量变化

Table 3 Total content changes of heavy metals in

topsoil before and after breeding

垫料配比	背景值/g	养殖后/g	增量/g	超背景值倍数
FJ	79.05b±0.52	84.88b±0.87	5.83a±0.39	1.07a±0.004
FD	87.88c±0.36	94.75c±0.39	6.87a±0.29	1.08a±0.003
FW	69.19a±0.69	75.38a±0.09	6.19a±0.62	1.09a±0.009

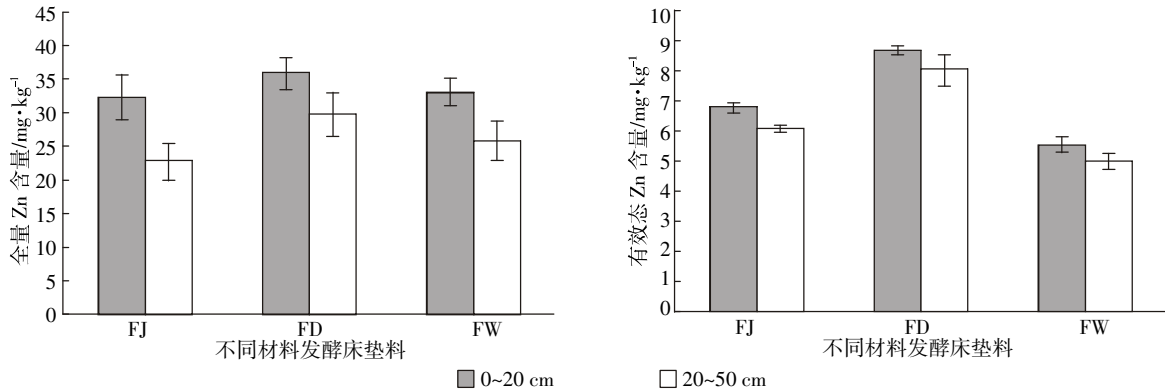


图 1 垫料不同剖面层次 Zn 分布特征

Figure 1 Litter profile distribution characteristics of Zn in different levels

发酵床超背景值倍数分别为 1.07、1.08、1.09, 也不具备显著性差异。结合表 2 与表 3 的情况,FD 类型的垫料其 Zn 的超背景值倍数最高而渗漏到土壤中的 Zn 量与其他 2 种垫料相比并具备明显差异,因此可以初步得出结论,在这 3 种组合的发酵床中,就其对重金属 Zn 的吸纳效果而言,FD 组合的发酵床垫料对重金属 Zn 的吸纳能力较强。

从物质流分析的角度出发,我们设系统边界为一个养殖周期,即 5 个月,研究对象为整个发酵床垫料层,同时暂不考虑其他隐藏流。由于 Zn 的主要来源是饲料添加剂,而垫料中 Zn 的输入来源主要为猪粪尿的排放,因此该部分 Zn 的总增量即可视为系统总输入的一部分,而渗漏到表层土壤中的增量则视为系统的总输出。根据物质守恒定律,得到该系统物质流公式:物质总输入(养猪前垫料 Zn 全量+粪便输入 Zn 量)=养猪后垫料 Zn 库存量+土壤 Zn 输出量(表 4)。因此表 4 清晰地表明,养殖过后,由于重金属的累积效应,垫料中 Zn 的总库存量远远大于总输出量,3 种发酵床垫料中 Zn 的总库存量分别是总输出量的 55.07 倍(FJ)、36.34 倍(FD)和 43.36 倍(FW),再次表明重金属 Zn 只有很少一部分经渗漏作用沉积到表层土壤中,大部分滞留在垫料中。

表 4 发酵床垫料重金属 Zn 的物质流分析
Table 4 Material flow analysis on Zn accumulations of fermentation litters

垫料配比	猪增重/ kg·头 ⁻¹	粪尿输入/g	总输入/g	总库存量/g	总输出量/g
FJ	57.49	141.89	326.90	321.07	5.83
FD	51.71	129.37	256.56	249.69	6.87
FW	51.47	130.35	274.58	268.39	6.19

2.2 养殖过后发酵床垫料及表层土壤有效态重金属 Zn 累积特征

土壤中全量重金属 Zn 形态稳定,不易变化,然而有效态重金属 Zn 却易于转化和迁移,其数量受人类生产活动和土壤条件因子等的制约。同时有效态 Zn 易被农作物吸收而进入食物链,对环境和人畜造成危害。因此,了解重金属 Zn 有效态的含量及其所占全量的比率(表 5),对于更深层次地了解土壤重金属 Zn 污染非常重要。

表 5 表明在垫料组合中,FD 中 Zn 的有效态所占比例最高,为 25.01% ($P<0.05$),其活性显著高于 FJ 与 FW 组合的发酵床,这可能与 FD 中 Zn 的超背景值倍数高有关,同时也说明该种垫料作为有机肥料施

表 5 发酵床垫料及表层土壤中 Zn 有效态含量

Table 5 Available contents of Zn in three fermentation beds and topsoil

垫料配比	项目	$w(\text{垫料 Zn})$	$w(\text{土壤 Zn})$
FJ	平均值/mg·kg ⁻¹	6.69±0.18	1.24±0.10
	比率/%	19.35b±0.009	18.23a±0.011
FD	平均值/mg·kg ⁻¹	8.63±0.35	1.36±0.18
	比率/%	25.01c±0.011	17.67a±0.027
FW	平均值/mg·kg ⁻¹	5.51±0.24	1.05±0.08
	比率/%	17.76a±0.009	18.07a±0.012

注:比率=垫料有效态含量平均值/垫料全量平均值×100%。

用于农田后, 重金属 Zn 有可能更容易在土壤中迁移或者被农作物吸收,其次分别是 FJ 与 FW。然而在表层土壤中, 有效态 Zn 的活性大小并不具备显著性差异,推测可能的原因是由垫料渗漏到表层土壤中的全量 Zn 无论是增量还是超背景值倍数均不具备显著性差异。

影响重金属有效态含量高低的因素有很多,有研究表明,土壤中全量 Zn 与有效态 Zn 含量呈正相关关系^[18]。在发酵床下部表层土壤中,3 种土壤的有效态 Zn 所占比率高没有明显差异,也就是 Zn 活性不具备明显差异,究其原因,可能是因为从垫料渗漏到表层土壤中的 Zn 全量没有明显差异;然而 3 种土壤中有效态 Zn 活性均接近 20%, 即均具有较强的迁移性。然而影响有效态 Zn 活性大小的因素,不仅与土壤重金属 Zn 全量有关,而且受元素赋存形态和土壤物理化学性质的制约,如土壤 pH 值、有机质含量、铁锰化物等^[19-20];而发酵床系统又是一个复杂的微生物微生态系统,不同的微生物群落对重金属 Zn 的活化、络合及钝化作用不同,因此这 3 种组合的垫料对 Zn 活性大小的影响还需进一步深入研究。

2.3 发酵床垫料及表层土壤重金属 Zn 污染评价及潜在的生态危害

由于发酵床垫料能作为有机肥施用于农田,因此垫料还田后其所含重金属 Zn 的量对土壤的污染评价及潜在的生态危害就显得极为重要;而发酵床下部表层土壤由于长期渗漏作用也会累积重金属 Zn,因此这部分区域的表层土壤其重金属 Zn 污染和潜在的生态危害也是我们关注的重点。

通过公式(1)可以得到重金属 Zn 的 E_i^p 值。由表 6 可知, 经过一个养殖周期,3 种垫料其潜在生态危害系数,即 E_i^p 值分别为 1.74、1.96、1.86,具备显著性差异,且危害性高低为 FD>FW>FJ;而在土壤中则没有

表 6 垫料及表层土壤 Zn 污染潜在生态危害评价结果

Table 6 Assessment results of Zn potential ecological risk in

litters and topsoil		
评价指标	垫料 E_i^r	表层土壤 E_i^r
FJ	1.74a	1.07a
FD	1.96c	1.08a
FW	1.86b	1.09a

显著性差异。然而无论是发酵床垫料还是床下部表层土壤,Zn 的潜在生态风险均远远小于轻微生态危害的临界值($E_i^r \leq 40$),即在一个养殖周期内,Zn 的累积不会对当地土壤造成生态危害。据此初步推算,若每个发酵床一年养殖 2 批次的猪,发酵床垫料与其下部表层土壤则会经过一个相对较长的时间 Zn 的累积才会达到轻微生态危害临界值(约为 10 年)。在实际养猪过程中,会通过不断地补充垫料来维持发酵床的体系的运转,垫料中的有机营养也会不断得到补充,因此若只考虑 Zn 累积的话,建议发酵床可以一直使用以节约成本。

3 结论

(1)经过一个养猪周期(150 d),所选取的 3 种发酵床垫料其全量与有效态 Zn 含量均随着垫料层次的加深而逐层递减。虽有少量 Zn 经由淋溶作用渗漏到床下部的表层土壤中,然而 97%~98%的 Zn 都累积在垫料层中。垫料种类不同,对 Zn 的累积效用具有一定的影响,其中 FD 对重金属 Zn 的吸纳能力较强。

(2)不同垫料也会对有效态 Zn 活性大小产生一定的影响。FD 中 Zn 的有效态所占比例最高,活性显著高于 FJ 与 FW。而表层土壤中,3 种土壤的有效态 Zn 活性大小不具备显著性差异。活化重金属对土壤和农作物潜在危害较大,但影响有效态 Zn 活性的因素众多,这 3 种垫料哪一种更利于 Zn 的络合与钝化,还需深入研究。

(3)一个养殖周期结束后,垫料与土壤中 Zn 的污染与生态危害均小于轻微生态危害的临界值(污染系数 $E_i^r \leq 40$),此阶段垫料与表层土壤中累积的 Zn 不会对该区域造成生态危害。就发酵床垫料组合来说,本文所选取的 3 种垫料中,Zn 在 FJ 其潜在生态风险最小,从控制 Zn 污染角度出发,FJ 垫料优于 FD 垫料与 FW 垫料。

参考文献:

[1] 刘金林. 新罗区生猪发酵床配套技术初探[D]. 福建农林大学, 2009.

LIU Jin-lin. Initial study on the technology of pig fermentation bed in Xinluo area[D]. Fujian Agricultural And Forestry University, 2009. (in Chinese)

[2] 崔艳霞,潘晓亮,徐亚楠. 发酵床养猪的研究现况与展望[J]. 中国畜牧兽医, 2011(6): 213-216.

CUI Yan-xia, PAN Xiao-liang, XU ya-nan. The research status of fermentation bed raisepigs[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011(6): 213-216. (in Chinese)

[3] 郭 彤,马建民,赵曾元,等. 不同使用时间和深度的发酵床垫料成分及重金属沉积规律的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2013(10): 51-55.

GUO Tong, MA Jian-min, ZHAO Zeng-yuan, et al. The study on different utility time and depth of pig-on-litter composition and heavy metal deposition [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2013(10): 51-55. (in Chinese)

[4] 杨定清,傅绍清. 施用高锌猪粪对土壤环境污染的影响[J]. 四川环境, 2000(2): 30-34.

YANG Ding-qing, FU Shao-qing. Effect of application of pig dung with high Zn on soil contamination[J]. *Sichuan Environment*, 2000(2): 30-34. (in Chinese)

[5] 王 瑾,韩剑众. 饲料中重金属和抗生素对土壤和蔬菜的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008(4): 90-93.

WANG Jin, HAN Jian-zhong. Effects of heavy metals and antibiotics on soil and vegetables [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008(4): 90-93. (in Chinese)

[6] 李松岩. 猪饲料中高剂量的铜锌对环境的影响及其控制 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.

LI Song-yan. The assessment and control of environmental impact of high-dose zinc and copper in the pig's feed[D]. Nanjing: College of Veterinary Medicine, Nanjing Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[7] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013(3): 409-417.

HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metal-contamination soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013(3): 409-417. (in Chinese)

[8] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to a cultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311: 205-219.

[9] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30(2): 159-165.

[10] Söderström M. Modelling local heavy metal distribution: A study of

- chromium in soil and wheat at a ferrochrome smelter in South-Western Sweden[J]. *Acta Agriculture Scandinavia*, 1998, 48: 2-10.
- [11] 国家环境保护总局. 中华人民共和国环境保护行业标准 HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- SEPA. The People's Republic of China Environmental Protection Industry Standard HJ/T 166—2004 Soil Environmental Monitoring Technical Specifications[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.(in Chinese)
- [12] 孙启宏, 李艳萍, 段 宁, 等. 基于 EW-MFA 方法的我国 1990—2003 年资源利用与环境影响特征研究[J]. 环境科学研究, 2007(1): 108-113.
- SUN Qi-hong, LI Yan-ping, DUAN Ning, et al. Study on resource utilization and environmental impact characteristics for China in 1990—2003 based on economy-wide material flow analysis[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007(1): 108-113.(in Chinese)
- [13] 黄和平, 毕 军, 张 炳, 等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2007(1): 368-379.
- HUANG He-ping, BI Jun, ZHANG Bing, et al. A critical review of material flow analysis (MFA)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007(1): 368-379.(in Chinese)
- [14] 王 军, 周 燕, 刘金华, 等. 物质流分析方法的理论及其应用研究[J]. 中国人口资源与环境, 2006(4): 64-68.
- WANG Jun, ZHOU Yan, LIU Jin-hua, et al. Study on theory and application of material flow analysis[J]. *China Population. Resources and Environment*, 2006(4): 64-68.(in Chinese)
- [15] 沈 镭, 刘晓洁. 资源流研究的理论与方法探析[J]. 资源科学, 2006(3): 9-16.
- SHEN Lei, LIU Xiao-jie. Discussion on theories and methods of resources flow [J]. *Resources Science*, 2006(3): 9-16.(in Chinese)
- [16] Tachibana J, Hirota K, Goto N, et al. A method for regional-scale material flow and decoupling analysis: A demonstration case study of Aichi prefecture, Japan [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008 (12): 1382-1390.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980(8): 975-1001.
- [18] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J]. 地理科学, 2007(3): 395-400.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang city, Jiang su province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007(3): 395-400.(in Chinese)
- [19] 陈玉娟, 温琰茂, 柴世伟. 珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究 [J]. 环境科学研究, 2005(3): 75-87.
- CHEN Yu-juan, WEN Yan-mao, CHAI Shi-wei. The heavy metal content character of agricultural soil in the Pearl River Delta [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005(3): 75-87.(in Chinese)
- [20] 周国华, 谢学锦, 刘占元, 等. 珠江三角洲潜在生态风险: 土壤重金属活化[J]. 地质通报, 2004(11): 1088-1093.
- ZHOU Guo-hua, XIE Xue-jin, LIU Zhan-yuan, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal in soils in the Zhujiang River delta: heavy metal activation in soils[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004 (11): 1088-1093.(in Chinese)