

王成贤,石德智,沈超峰,等. 2011. 畜禽粪便污染负荷及风险评估——以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 31(11): 2562–2569

Wang C X, Shi D Z, Shen C F, et al. 2011. Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11): 2562–2569

畜禽粪便污染负荷及风险评估

——以杭州市为例

王成贤¹, 石德智^{1,*}, 沈超峰^{1,2}, 吴伟祥¹, 陈英旭^{1,2}

1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029

2. 浙江大学水环境研究院, 杭州 310029

收稿日期: 2011-01-22

修回日期: 2011-03-04

录用日期: 2011-03-11

摘要: 针对规模化畜禽养殖业发达地区畜禽粪便引发的重金属和可溶性盐污染负荷重等问题, 以杭州市为例, 分析了杭州市各区县由畜禽粪便引起的氮、磷污染负荷。同时, 通过空间分析与基于土壤盐分和重金属累积模型的模拟预警分析, 评估了畜禽粪便农用过程中对温室土壤次生盐渍化和重金属累积的潜在影响。结果表明, 杭州市畜禽粪便氮磷污染负荷分布不均, 以建德市、萧山区、临安市污染最为严重, 氮磷污染预警级别达到 IV ~ VI 级; 所辖各市区磷污染风险等级均高于或者等于各自的氮污染风险等级。若农田中施用畜禽粪便时以氮为指标, 将可能造成磷素的累积和流失。施用畜禽粪便对温室土壤影响较大, 畜禽粪便盐施肥量越高, 土壤盐渍化和重金属累积的趋势越明显。在畜禽粪便中等盐分和重金属含量及中、高施肥量条件下 (65 ~ 100 t·hm⁻², 以干粪计), 经过 5 a 左右的累积, 土壤盐渍化程度将有明显提高; 经过 4 a 左右的累积, 重金属 Cu、Zn 的土壤环境质量将会从二级变为三级。

关键词: 畜禽粪便农用; 氮磷; 重金属; 土壤次生盐渍化; 风险评估

文章编号: 0253-2468(2011) 11-2562-08

中图分类号: X713; X820. 4

文献标识码: A

Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou

WANG Chengxian¹, SHI Dezhi^{1,*}, SHEN Chaofeng^{1,2}, WU Weixiang¹, CHEN Yingxu^{1,2}

1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029

2. Academy of Water Science & Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029

Received 22 January 2011;

received in revised form 4 March 2011;

accepted 11 March 2011

Abstract: Heavy metals and salinization resulted from intensive livestock production have been significant environmental problems in breeding developed areas. Livestock manure-derived nitrogen and phosphorus loads in farmland of districts in Hangzhou were calculated respectively in this study. The main heavy metals and salt content in livestock manure samples were analyzed and the potential risk was evaluated by the methods of simulating prediction on the accumulation model of salt and heavy metal in soil. As a result, the nitrogen and phosphorus pollution load in Jiande, Xiaoshan and Linan districts were higher, and the alert levels were IV ~ VI. The alert levels of phosphorus in those districts were equal to or higher than the alert levels of nitrogen. It might lead to the risk of accumulation or loss of phosphorus when livestock manure was applied according to nitrogen quantity demanded of soil. It might result in the risk of salinization and heavy metal accumulation by the application of livestock manures in the greenhouse soil. With the middle level amount of salinity and heavy metals in livestock manure, and the high level application of livestock manure (65 ~ 100 t·hm⁻² dry manure) in greenhouse soils, the salinization of soils would be remarkable in 5 years, and the environmental quality for soils (Cu, Zn) would reach level III from level II in 4 years.

Keywords: livestock manures application; nitrogen and phosphorus; heavy metal; soil salinisation; risk evaluation

1 引言(Introduction)

近年来,我国畜禽养殖业一直在迅猛发展,规

模化、集约化饲养的比例不断提高,已连续多年保持禽肉、猪肉、鸡蛋产量世界第一(苏杨, 2006),由此产生的畜禽粪便量也极为惊人。目前,全国畜禽

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2008ZX07101-006-04)

Supported by the National Key Science and Technology Project of Water Pollution Control and Treatment (No. 2008ZX07101-006-04)

作者简介: 王成贤(1980—),男,博士研究生, E-mail: aayu@zju.edu.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: shidezhi@zju.edu.cn

Biography: WANG Chengxian(1980—), male, Ph. D. candidate, E-mail: aayu@zju.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: shidezhi@zju.edu.cn

粪便年排放量超过 40 亿 t, 是工业有机污染物的 4.1 倍(阎波杰等 2010)。作为有机肥施入农田是我国目前处理畜禽粪便最主要也是最有效的方式。然而, 农田中过量地施用畜禽粪便会引起水体、土壤污染等一系列环境问题(Eghball *et al.*, 1994; Daniel *et al.*, 1994; Couillard *et al.*, 1993), 如氮磷流失引起地表水富营养化、土壤重金属累积、土壤盐渍化、地下水硝酸盐污染等(国家环境保护总局自然生态保护司 2000)。据王方浩等(2000)的研究报道, 全国耕地负荷的畜禽粪便平均值为 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 7 个省区超过了 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 如此高的负荷极有可能对农业环境造成极大威胁。王晓燕等(2005)基于粪便养分含量、作物养分需求等因素, 对北京市密云县畜禽粪便的耕地负荷进行了估算和风险评价。李帷等(2009)以北京市为研究区域, 基于 GIS 下采用权重线性加和模型(WLC)对北京市畜禽粪便土地利用的适宜性进行了相应的环境影响风险研究。杭州市地处长江三角洲和钱塘江流域, 畜禽养殖业发达, 养殖密度大, 区域内充沛的降水更是加剧了畜禽粪便农用过程中造成面源污染的风险。因此, 本研究在采样分析和数据调查的基础上, 运用土壤-植物营养学原理, 通过空间分析与土壤盐分和重金属累积模型的模拟预警分析, 对杭州市各区县由畜禽粪便引起的氮、磷污染负荷及温室土壤次生盐渍化和重金属累积等风险进行较为全面的评价, 以期对杭州市畜禽粪便的合理利用和畜禽养殖业的可持续发展提供科学依据。

2 研究对象与方法(Research objects and methods)

2.1 研究对象

杭州位于浙江省西北部, 地处长江三角洲南沿和钱塘江流域, 西部属浙西丘陵区, 东部属浙北平原, 地势低平, 河网密布。杭州市总面积约 1.66 万 km^2 , 其中, 市辖区 3068 km^2 , 辖 8 个市辖区、2 个县, 代管 3 个县级市。养殖业是杭州市重要的经济来源, 具有集约化程度高、养殖总量和密度大等特点。本研究以杭州市的主要畜禽作为研究对象, 结合调查采样分析结果, 估算全市猪、牛、羊、家禽等畜禽粪便的污染负荷, 并对其环境风险进行评估。

2.2 研究方法

2.2.1 各类畜禽粪便的产生量 在相关文献中, 畜禽粪便的产生量通常有两种计算方法。一种是把各种畜禽的年末存栏量视为一个相对稳定的饲养量,

采用以下计算方法: 畜(禽)年粪便量 = 存栏量 $\times$ 日排泄系数($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$) $\times 365$ (d) (张绪美等 2007); 另一种是将各种畜禽的年出栏量视为饲养总量, 采用以下计算方法: 畜(禽)年粪便量 = 年出栏量 $\times$ 日排泄系数($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$) $\times$ 饲养周期(d) (许俊香等 2005)。本研究中采用第一种计算方法, 以避免较大的饲养周期误差。各种畜禽粪便日排放系数见表 1(张震等 2009)。

表 1 各种畜禽粪便日排放系数

Table 1 Daily discharge rate of livestock manure

畜禽种类	日排放系数/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	
	粪	尿
牛	30.0	18.0
猪	2.2	2.9
羊	2.3	1.5
禽类	0.12	—

2.2.2 农田畜禽粪便氮、磷负荷量 畜禽粪便氮、磷负荷量是指单位种植面积畜禽粪便中氮、磷的承载量。假设研究区域内各区、县市能自行消纳本区域所产生的全部畜禽粪便, 并且畜禽粪便基本上还田使用。因此, 以研究区域内农田面积作为畜禽粪便的负载面积, 其计算公式为:

$$R = W \times P / S = \sum (N \times X \times B \times 365) \times P / S \quad (1)$$

式中 R 为畜禽粪便中氮或磷的负荷量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); W 为各类畜禽粪便中氮或磷的总量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); S 为有效农用地面积(hm^2); P 为畜禽粪便中各种利用方式的养分利用率(李帷等 2007; Centner *et al.*, 2008), 畜禽粪基本上全部还田, 因此, 利用率以 100% 计, 尿液的利用率相对较低, 根据杭州市畜禽粪便的处理状况及调查结果, 以 50% 进行估算; N 为某畜禽种类年末存栏量; X 为某畜禽种类的日排泄系数($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$); B 为某种畜禽粪便氮、磷含量系数, 取值见表 2(高定等 2006)。杭州市各种畜禽养殖量和有效耕地面积数据来源于《杭州市统计年鉴 2010》(中国统计出版社 2010)。

表 2 畜禽排泄物氮、磷含量系数

Table 2 Nitrogen and phosphorus content in animal waste

种类	氮素/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磷素/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
猪粪	20.9	9.0
猪尿	10.7	4.6
牛粪	16.7	4.3
牛尿	25.7	11.1
羊粪	10.1	2.2
羊尿	19.2	8.3
禽粪	23.4	9.3

2.2.3 作物所需畜禽粪便养分最大供应量 假设作物生长所需氮、磷主要来自土壤、化肥、人粪尿和畜禽粪便,那么,可以通过公式(2)就可求出某一区域内单位面积作物所需最大畜禽粪便养分供应量(王晓燕等,2005),它可以反映某一区域对其产生的畜禽粪便营养物质的吸收和消纳能力。

$$M = (Y_T - Y_S - Y_C - Y_P) / S \quad (2)$$

式中, M 为某区域单位面积作物所需最大畜禽粪便养分供应量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_T 为作物对氮或磷的需求总量(t); Y_S 为土壤提供的氮或磷量(t),但当采样面积大时实测土壤提供的氮或磷量比较难实现,所以,此处采用经验值,对于长期种植作物、肥力一般的地块,土壤供氮量大约占作物所吸收养分的1/3; Y_C 为化肥提供的氮或磷量(t); Y_P 为人粪尿提供的氮或磷量(t); S 为有效农用地面积(hm^2)。本研究中,忽略人粪尿的影响,并在风险评估时,再考虑化肥施用的比例,确定预警值。作物对养分的需求总量可以根据养分平衡法计算得到。作物生长期所需养分的数量在此认为取决于作物的种类和产量。本研究中,将某种作物生产出单位经济产量所需氮养分假定为常数,从而使定量计算单位面积作物所需氮养分成为可能(王凯军等,2002)。研究区域内某种作物对氮的需求量采用公式(3)进行计算(王晓燕等,2005)。

$$Y_F = O_F \times G_F \quad (3)$$

式中, Y_F 为作物 F 所需氮或者磷的量(t); O_F 为作物 F 的年产量(t); G_F 为作物 F 1kg经济产量的氮或磷养分需求量(t),具体取值见表3(陈阜新,2002;骆世明等,1987)。各种作物的年产量和耕地面积以《杭州市统计年鉴2010》中统计值为准(中国统计出版社,2010)。

表3 作物形成100 kg产量需吸收的营养元素量

Table 3 Amount of nutrients absorbed by plants for yielding 100 kg of product

作物	氮素/kg	磷素/kg
粮食	2.20	0.80
水果	0.46	0.14
蔬菜	0.32	0.09

2.2.4 畜禽粪便氮磷污染风险等级预测 为了便于对杭州市各区、县市畜禽养殖的污染状况进行评价,有必要引进预警值 A 对农田畜禽粪便氮、磷负荷进行预警分析,计算过程如公式(4)所示(王晓燕等,2005)。预警值 A 用农田畜禽粪便氮、磷实际负

荷与作物所需畜禽粪便氮、磷最大供应量的比值来表征,其大小可以说明各地所承受畜禽粪便的实际压力是否超载,是否会给当地环境带来潜在的污染威胁。 A 值越大,说明环境受到畜禽粪便的威胁越大;反之,威胁程度越小。

$$A = L_R / L_{\max} \quad (4)$$

式中, A 为耕地畜禽粪便负荷预警值; L_R 为单位面积耕地畜禽粪便养分实际负荷量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); $L_{\max}$ 为单位面积耕地畜禽粪便最大负荷量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。 $A \leq 0.7$,为I类,无污染; $0.7 < A \leq 1.6$,为II类,稍有污染; $1.6 < A \leq 2.4$,为III类,有污染; $2.4 < A \leq 3.6$,为IV类,污染较严重; $3.6 < A \leq 5.9$,为V类,污染严重; $A > 5.9$,为VI类,污染很严重。

2.2.5 盐渍化和重金属累积风险预测 目前,农业生产实践中土壤重金属累积和次生盐渍化的问题都比较突出(Centner *et al.*, 2008; 余海英等,2006)。通常集约化养殖所产生的畜禽粪便都含有较高浓度的可溶性盐和重金属,农田过量施用畜禽粪便会引起土壤中重金属的累积和盐渍化风险。因此,有必要对长期大量施用畜禽粪便的土壤的重金属累积和盐渍化风险进行预测。畜禽粪便对土壤次生盐渍化和重金属Cu、Zn累积风险的预测采用公式(5)计算(王辉等,2008)。

$$Q_t = Q_0 + Q \times K(1 - K^t) / (1 - K) \quad (5)$$

$$Q = E \times C / H \quad (6)$$

式中, Q_t 为某一利用年限土壤盐分或重金属Cu、Zn含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 为利用年限(a); Q_0 为土壤盐分或重金属Cu、Zn本底值($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本文中土壤盐分和重金属Cu、Zn背景值分别为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中,盐分标准为未盐渍化,重金属Cu、Zn为pH中性时土壤环境质量标准二级标准; Q 为每年随畜禽粪便农用带入土壤的盐分或者重金属Cu、Zn量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K 为土壤盐分或重金属Cu、Zn的残留率,盐分取70%,重金属取80%; E 为畜禽粪便施量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为土壤盐分或重金属Cu、Zn含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); H 为单位面积耕作层土壤质量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。不同土地利用方式下畜禽粪便施用量不同,温室大棚是施用畜禽粪便较多的典型土壤,年施用量可达 $30 \sim 100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于塑料薄膜的覆盖,使其与雨水隔绝,因此,可溶性盐和重金属的残留率也相对较大。本研究计算中选择了温室大棚这种特殊的种植方式。对于残留率 K ,土壤盐分参考相

关文献及中国南方地区化学氮肥的土壤残留率(李辉信等,2002; 国家环保局,2003),温室大棚取70%; 重金属的残留率理论上要高于土壤盐分,此处取80%。

2.3 样品的采集和分析

对杭州市各区、县市典型畜禽养殖场产生的粪便进行采样,采集样品兼顾猪、牛、羊、家禽等畜禽种类,大、中、小型养殖场规模,以及畜禽的不同生长阶段(畜类粪便分为幼畜、成年畜和种畜3个阶段,禽类由于生长周期较短,未分生长阶段),具体情况见表4。将采集到的样品风干、磨碎、过筛后,采用微波消解法消解,再用原子吸收分光光度计(AA-100)对重金属Cu、Zn含量进行测定。

表4 畜禽粪便样品的种类和数量
Table 4 Types and number of livestock manure samples

畜禽种类	不同规模养殖场个数			总样品数
	大	中	小	
牛	2	7	2	51
猪	5	15	8	127
羊	1	5	5	49
禽类	5	14	6	75

3 结果(Results)

3.1 杭州市养殖状况和氮、磷排放量

据《杭州市统计年鉴2010》显示,杭州市下辖各区、县市畜禽的2009年年末总存栏量为生猪187.6万头,牛23389头,羊15.3万头,家禽2014.0万羽(中国统计出版社,2010)。根据表1中各种畜禽粪便日排放系数可以计算出杭州市各区、县市畜禽粪便的年产生量,再由表2中畜禽粪便氮、磷含量系数可以得出杭州市各区、县市每年由畜禽粪便为农田提供的N和P的量分别为71101.6 t和28913.1 t,其中,萧山区、建德市和余杭区的排放总量依次排在前三位。各区、县市畜禽粪便氮磷排放的具体分布情况见表5。

3.2 农田畜禽粪便氮、磷负荷和污染预警分析

根据2009年杭州市主要农作物的产量,结合表3可以估算出农作物生长所需要的营养元素氮、磷总量分别为37175.2 t和12391.7 t。结合各区、县市的农田面积及公式(1)~(3)可以估算出各区、县市作物所需最大畜禽粪便养分供应量及农田畜禽粪便氮、磷实际负荷。其预警分析结果见表5。

从表5可以看出,杭州市总体畜禽粪便氮、磷污

染较为严重,各区县的污染程度分布不均,磷素污染预警值都大于氮素污染预警值。全市氮、磷污染风险等级均为Ⅳ类,污染较为严重。其中,江干区和拱墅区氮、磷污染风险等级均为Ⅰ类,无污染;西湖区和滨江区氮、磷污染风险等级均为Ⅱ类,稍有污染;余杭区、淳安县、富阳市氮、磷污染风险等级均为Ⅲ类,有污染;桐庐县、萧山区、临安市、建德市氮污染风险等级分别为:Ⅲ、Ⅳ、Ⅳ、Ⅴ类,而磷污染风险等级都比各自的氮污染风险高1个级别,分别为:Ⅳ、Ⅴ、Ⅴ、Ⅵ类。

3.3 土壤次生盐渍化和重金属累积的风险预警

对采集的畜禽粪便进行样品的可溶性盐和重金属Cu、Zn分析,结果显示(表6),可溶性盐、Cu、Zn的含量都较高,以猪粪为例,其平均含量分别为 $8.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $740.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1260.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

研究中做如下假设:在不考虑化肥施用对土壤次生盐渍化影响的情况下,温室大棚施用畜禽粪便按低、中、高3种施肥量分别为 $30 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $65 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $100 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 来计算,畜禽粪便的盐分和重金属含量选用调查采样中猪粪含量的平均值。通过公式(5)对长期施用猪粪带来的盐渍化和重金属累积风险进行预警,结果见图1。

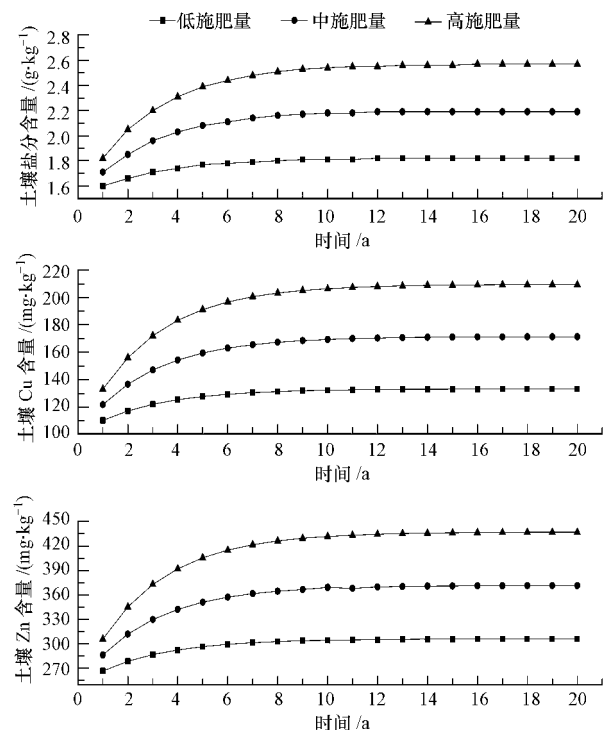


图1 施用猪粪对土壤次生盐渍化和重金属Cu、Zn累积的预警
Fig. 1 Prediction of animal livestock application on soil salinisation, Cu and Zn accumulation

表 5 杭州市各区、县市畜禽粪便污染状况及预警级别
Table 5 Environmental risk levels of manure load of farmland in Hangzhou

乡镇	耕地面积 /10 ⁴ km ²	牛/头	猪/万头	家禽/万羽	羊/万头	氮素				磷素					
						N _T /t	M (t·km ⁻²)	R (t·km ⁻²)	A	风险等级	P _T /t	M (t·km ⁻²)	R (t·km ⁻²)	A	风险等级
江干区	0.35	0	0.1	0.0	0.4	85.1	0.054	0.02	0.5	I	28.8	0.015	0.01	0.5	I
拱墅区	0.04	0	0	0.4	0.0	4.2	0.061	0.01	0.2	I	1.7	0.005	0.00	0.2	I
西湖区	0.54	20	1.2	17.8	0.1	463.5	0.075	0.09	1.1	II	190.9	0.003	0.00	1.4	II
滨江区	0.17	0	0.5	0.5	0.0	125.8	0.087	0.07	0.9	II	54.0	0.008	0.01	1.2	II
萧山区	3.73	2015	79.8	405.9	1.8	22844.0	0.180	0.61	3.4	IV	9600.8	0.021	0.09	4.3	V
余杭区	5.60	1057	15.9	384.6	5.2	8503.1	0.079	0.15	1.9	III	3404.3	0.003	0.01	2.3	III
桐庐县	2.63	2867	12.8	76.9	1.4	4615.7	0.085	0.18	2.1	III	1845.9	0.003	0.01	2.4	IV
淳安县	4.25	2213	16.9	37.5	0.3	4795.1	0.060	0.11	1.9	III	1976.8	0.002	0.00	2.3	III
建德市	3.44	3022	16.2	806.6	1.1	12862.9	0.073	0.37	5.2	V	5148.6	0.003	0.02	6.1	VI
富阳市	3.83	3357	16.6	188.4	3.2	6985.3	0.096	0.18	1.9	III	2779.5	0.003	0.01	2.2	III
临安市	2.37	3638	18.2	87.8	1.8	6201.3	0.077	0.26	3.4	IV	2492.5	0.002	0.01	3.9	V
全市	31.60	23389	187.6	2014.0	15.3	71101.6	0.078	0.22	2.9	IV	28913.1	0.003	0.01	3.5	IV

注: N_T、P_T分别为作物对氮或磷的需求总量; M代表单位面积作物所需最大畜禽粪便氮或磷的供应量; R代表畜禽粪便氮或磷的负荷量; A代表风险等级, A≤0.7, 为I类, 无污染; 0.7<A≤1.6, 为II类, 稍有污染; 1.6<A≤2.4, 为III类, 有污染; 2.4<A≤3.6, 为IV类, 污染较严重; 3.6<A≤5.9, 为V类, 污染严重; A>5.9, 为VI类, 污染很严重。

表 6 杭州市畜禽粪便可溶性盐和重金属 Cu、Zn 含量

Table 6 Salt and heavy metal contents of livestock manures in various towns of Hangzhou

粪便种类	数据类型	含盐量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
猪粪	最大值	25.1	1397.0	2274.3
	最小值	2.8	272.1	411.7
	平均值	8.3	740.5	1260.8
牛粪	最大值	6.7	202.1	668.9
	最小值	4.8	135.8	260.4
	平均值	5.7	173.6	495.7
羊粪	最大值	9.1	255.0	595.0
	最小值	5.5	144.6	256.9
	平均值	7.5	214.7	431.7
禽粪	最大值	22.9	362.1	610.1
	最小值	7.3	93.6	150.6
	平均值	15.9	209.4	420.5

从图 1 可以看出,施肥量越高,土壤盐渍化趋势越明显。在畜禽粪便中等盐分含量($1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)条件下,经过 5 a 左右的累积,中施肥量和高施肥量土壤盐分含量增加值分别为 $0.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,非盐渍化土地地区土壤含盐量接近轻度盐渍化土壤水平,盐渍化土地地区土壤盐渍化程度接近中等盐渍化水平,已能影响蔬菜等农作物的生长。而低施肥量条件下,土壤盐分含量增加值 $< 0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,无论盐渍土地地区或非盐渍土地地区,畜禽粪便农用均不会对农作物生长造成显著影响。

与土壤盐渍化风险相似,施肥量越高土壤重金属累积趋势越明显。对于重金属 Cu,在中等施肥量条件下经过 4 a 左右的累积,土壤环境质量就可以从二级变为三级,而高等施肥量条件下只需要 2 a;低施肥量条件下不会对其环境质量等级产生明显影响。对于重金属 Zn,在低、中、高施肥量条件下,土壤环境质量从二级变为三级需要的时间分别为 7、2 和 1 a。

以上预警均未考虑化肥投入的影响,由于农业生产过程中一般化肥与有机肥同时施用,因此,土壤重金属累积和次生盐渍化的问题可能比预警严峻得多,即使露天蔬菜地土壤在大量化肥与有机肥施用后、淋洗前短时间内也有可能对农作产生较大的影响。

4 讨论 (Discussion)

4.1 畜禽粪便污染风险因子的筛选

据调查估计(林葆,2003),目前我国畜禽粪便

中氮、磷的流失量大于化肥的流失量,约为化肥流失量的 122% 和 132%,已成为我国农村面源污染的主要来源之一。本研究以土壤-植物营养学原理为指导,以杭州市畜禽养殖规模及农业种植结构为基础,分析了杭州市各区县由畜禽粪便引起的氮、磷污染负荷。结果显示,磷素污染预警值都大于氮素污染预警值。但在具体实践中,氮磷何种营养元素能够成为土壤施用畜禽粪便的限制因子,还与各地区的土壤质地、氮磷化肥施用比例、作物种类及地形坡度等差异有关(李帷,2009)。杭州市农业种植结构复杂,西部属浙西丘陵区,东部属浙北平原,地势低平,河网密布,加大了氮磷流失的风险不确定性。因此,建议在施肥时应根据土壤中磷的含量来确定畜禽粪便的最大施用量的同时,亦要充分重视氮素的污染。

据报道,我国规模化养殖产生的畜禽粪中重金属、盐分等有害污染物已经成为影响农田土壤健康功能的主要限制因素之一(张树清,2005)。杭州市具有畜禽养殖业发达、规模化程度高的特点。对杭州市畜禽粪便的采样分析结果显示,猪、牛、羊和畜禽粪便中重金属 Cu 的平均含量分别为 740.5、173.6、214.7 和 209.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Zn 的平均含量分别为 1260.8、495.7、431.7 和 420.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 可溶性盐的平均含量分别为 8.25、5.70、7.46 和 15.92 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。具有重金属和盐分含量高的典型特征,因此,对土壤次生盐渍化和重金属累积进行风险预警十分必要。

4.2 土壤次生盐渍化和重金属累积的风险预警模型的选择

土壤污染物的预测预警是指对一定时期的土壤污染状况进行预测、分析与评价,确定土壤质量变化的趋势、速度及达到某一变化限度的时间等,按需要适时地给出变化和恶化的各种警戒信息及相应对策(严加永等,2007;吴春发,2008)。目前,国内外污染预警方式主要有空间分布预测、污染状态预警、污染趋势预警和污染速率预警等几种类型,具体模型有超标年限预测模型、灰色聚类模型、情景预测法及人工神经网络模型等多种(杨忠平等,2010)。本研究对土壤次生盐渍化和重金属累积的风险预警属于污染状态和污染速率预警。由于设置了不考虑化肥施用的影响、温室大棚的种植方式、固定的畜禽粪便施用量及盐分和重金属含量等假设条件,故选择了污染物累积的情景预测法模型。

预测结果表明,土壤施用畜禽粪便的前 8~10 a 为盐渍化和重金属累积的加速阶段,之后保持基本稳定.这与王辉等(2008)的研究结论较为一致,该研究认为这是由于研究区域处于湿润与半湿润地区,淋洗效率较高的缘故.

5 结论(Conclusions)

1) 分析结果表明,杭州市总体畜禽粪便氮、磷负荷已经超出了其农田的消纳能力,污染较为严重,且畜禽粪便氮、磷污染程度分布不均.其中,以萧山区、临安市和建德市的氮、磷污染最为严重,预警级别达到了 IV~VI 类.可以考虑将当地作物所需的畜禽粪便最大供应量作为当地养殖总规模最大值的控制指标之一,并适当削减以上 3 个县市的畜禽饲养量,以达到降低氮磷污染的目的.

2) 畜禽粪便污染的预警分析中,桐庐县、萧山区、临安市、建德市磷污染风险等级都比各自的氮污染风险高一个级别.因此,农田中施用畜禽粪便时如果以氮为指标,往往会造成磷素的累积和流失,形成严重的环境问题.为确保畜禽粪便的安全施用,建议在施肥时应主要根据土壤中的磷含量来确定畜禽粪便的最大施用量,但在具体的生产实践中,考虑到土壤质地、氮磷化肥施用比例、作物种类及地形坡度等因素的差异,也应对氮素的污染予以足够的重视.

3) 杭州市畜禽粪便中可溶性盐和重金属 Cu、Zn 的含量较高,以猪粪为例,其平均含量分别为 $8.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $740.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1260.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过了《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-84)中规定的 Cu、Zn 最高容许含量(分别为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

4) 在温室大棚的种植条件下,畜禽粪便对土壤的重金属累积和次生盐渍化影响较大,畜禽粪便施肥量越高,土壤盐渍化趋势越明显.在畜禽粪便中等盐分和重金属含量及中、高施肥量条件下,经过 5 a 左右的累积,非盐渍化土地区土壤含盐量接近轻度盐渍化土水平,盐渍化土地区土壤盐渍化程度接近中等盐渍化水平;经过 1~4 a 的累积,重金属 Cu、Zn 的土壤环境质量就会从二级变为三级.

责任作者简介:石德智(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为固体废弃物污染控制与资源化技术. E-mail: shidezhi@zju.edu.cn.

参考文献(References):

- Centner T J, Wetzstein M E, Mullen J D. 2008. Small livestock producers with diffuse water pollutants: adopting a disincentive for unacceptable manure application practices [J]. *Desalination*, 226 (1/3): 66-71
- 陈阜新. 2002. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业大学出版社. 262
- Chen F X. 2002. Agriocology [M]. Beijing: China Agricultural University Press. 262 (in Chinese)
- Couillard D, Li J F. 1993. Assessment of manure application effects upon the run-off water quality by algal assays and chemical analysis [J]. *Environ Pollut*, 80: 273-279
- Daniel T C, Sharpley A N, Edwards D R *et al.* 1994. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management [J]. *J Soil Water Conserv*, 49: 30-37
- Eghball B, Power J F. 1994. Beef cattle feedlot manure management [J]. *J Soil Water Conserv*, 49: 113-122
- 国家环境保护总局自然生态保护司. 2000. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1-10
- Department of Nature and Ecology Conservation, State Environmental Protection Bureau. 2000. Investigation and Preventive Counter measures of Scale Poultry and Livestock Breeding Pollution in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1-40 (in Chinese)
- 国家环保局. 2003. 2003 年长江三峡工程生态与环境监测公报 [EB/OL]. 2003-06-16. http://www.zhb.gov.cn/tech/hjjc/jcxs/sxgb/2003/200306/t20030616_85467.htm
- Environmental Protection Bureau. 2003. The Ecology and Environment Monitoring Annual Report of the Three Gorges Project in 2003. [EB/OL]. 2003-06-16. http://www.zhb.gov.cn/tech/hjjc/jcxs/sxgb/2003/200306/t20030616_85467.htm (in Chinese)
- 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 2006. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略 [J]. *地理研究*, 25(2): 311-319
- Gao D, Chen T B, Liu B, *et al.* 2006. Pollution risk and control strategy of livestock manure in China [J]. *Geographical Research*, 25(2): 311-319 (in Chinese)
- 杭州市统计局. 2010. 杭州市统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社. 52-97
- Hangzhou Statistics Bureau. 2010. Hangzhou Statistical Yearbook in 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press. 52-97 (in Chinese)
- 李辉信, 胡峰, 蔡贵信, 等. 2002. 红壤的供氮能力及化肥氮的去向 [J]. *土壤学报*, 39(3): 390-396
- Li H X, Hu F, Cai G X *et al.* 2002. Soil nitrogen supply capacity and fate of applied fertilizer nitrogen in red soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 39(3): 390-396 (in Chinese)
- 李帷, 李艳霞, 张丰松, 等. 2007. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 26(6): 2350-2357
- Li W, Li Y X, Zhang F X, *et al.* 2007. The spatial and temporal distribution features of animal production in three northeast provinces and the impacts of manure nutrients on the local environment [J].

- Journal of Agro-Environment Science, 26 (6) : 2350-2357 (in Chinese)
- 林葆. 2003. 化肥与无公害农业 [M]. 北京: 中国农业出版社. 1141-1581
- Lin B. 2003. Fertilizer and Pollution-free Agriculture [M]. Beijing: China Agriculture Press. 1141-1581 (in Chinese)
- 骆世明 陈聿华 严斧. 1987. 农业生态学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社. 456-461
- Luo S M ,Chen Y H ,Yan F. 1987. Agriecology [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press. 456-461 (in Chinese)
- Moral R , Perez-Murcia M D , Perez-Espinosa A , *et al.* 2007. Salinity , organic content , micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain [J]. Waste Management , 28: 367-371
- 苏杨. 2006. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究 [J]. 中国生态农业学报 , 14 (2) : 15-18
- Su Y. 2006. Research of countermeasures on waste treating of intensive livestock and poultry farms in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture , 14 (2) : 15-18 (in Chinese)
- 王方浩 马文奇 袁争. 2006. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. 中国环境科学 26 (5) : 614-617
- Wang F H ,Ma W Q ,Dou Z. 2006. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. China Environmental Science 26 (5) : 614-617 (in Chinese)
- 王辉 董元华 张绪美 等. 2008. 集约化养殖畜禽粪便农用对土壤次生盐渍化的影响评估 [J]. 环境科学 , 29 (1) : 183-188
- Wang H ,Dong Y H ,Zhang X M *et al.* 2008. Risk of soil salinisation by application of concentrated animal manures [J]. Environmental Science , 29 (1) : 183-188 (in Chinese)
- 王凯军 金冬霞. 2002. 加强北京市规模化畜禽养殖场污染防治工作 [J]. 城市管理与科技 , 4 (1) : 29-31
- Wang K J ,Jin D X. 2002. How to prevent and control pollutions for large scale poultry and livestock farms in Beijing [J]. Municipal Administration & Technology , 4 (1) : 29-31 (in Chinese)
- 王晓燕 汪清平. 2005. 北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评估 [J]. 农村生态环境 21 (1) : 30-34
- Wang X Y ,Wang Q P. 2005. Livestock manure load of farmland in Miyun County and its environmental risk assessment [J]. Rural Eco-environment 21 (1) : 30-34 (in Chinese)
- 吴春发. 2008. 复合污染土壤环境安全预测预警研究——以浙江省富阳市某污染场地为例 [D]. 杭州: 浙江大学
- Wu C F. 2008. Prediction and early-warning for soil environmental safety in a mixed contaminated area — A case study in Fuyang City , Zhejiang Province , China [D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese)
- 许俊香 刘晓利 王方浩 等. 2005. 中国畜禽粪尿磷素养分资源分布以及利用状况 [J]. 河北农业大学学报 , 28 (4) : 5-9
- Xu J X ,Liu X L ,Wang F H *et al.* 2005. The distribution of phosphorus resources and utilization of animal manure in China [J]. Journal of Agricultural University of Hebei , 28 (4) : 5-9 (in Chinese)
- 阎波杰 赵春江 潘瑜春 等. 2010. 大兴区农用地畜禽粪便氮负荷估算及污染风险评价 [J]. 环境科学 , 31 (2) : 437-443
- Yan B J ,Zhao C J ,Pan Y C *et al.* 2010. Estimation of livestock manure nitrogen load and pollution risk evaluation of farmland in daxing district [J]. Environmental Science , 31 (2) : 437-443 (in Chinese)
- 严加永 吕庆田 葛晓立 等. 2007. GIS 支持下的土壤重金属污染预测预警研究 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版) , 37 (3) : 592-596
- Yan J Y ,Lü Q T ,Ge X L *et al.* 2007. The research about soil heavy metal pollution forecast and early warning support by GIS [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) , 37 (3) : 592-596 (in Chinese)
- 杨忠平 卢文喜 龙玉桥 等. 2010. 长春市城区土壤重金属污染趋势预测预警 [J]. 城市环境与城市生态 23 (3) : 1-4
- Yang Z P ,Lu W X ,Long Y Q *et al.* 2010. Prediction and precaution of heavy metal pollution trend in urban soils of Changchun City [J]. Urban Environment & Urban Ecology 23 (3) : 1-4 (in Chinese)
- 余海英 李廷轩 周健民. 2006. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究 [J]. 土壤学报 , 43 (6) : 571-576
- Yu H Y ,Li T X ,Zhou J M. 2006. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects [J]. Acta Pedologica Sinica , 43 (6) : 571-576 (in Chinese)
- 张树清 张夫道 刘秀梅 等. 2005. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究 [J]. 植物营养与肥料学报 , 11 (6) : 822-829
- Zhang S Q ,Zhang F D ,Liu X M *et al.* 2005. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science , 11 (6) : 822-829 (in Chinese)
- 张绪美 董元华 王辉 等. 2007. 中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析 [J]. 环境科学 , 28 (6) : 1311-1318
- Zhang X M ,Dong Y H ,Wang H *et al.* 2007. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China [J]. Environmental Science , 28 (6) : 1311-1318 (in Chinese)
- 张震 司友斌 谷勋刚 等. 2009. 巢湖流域规模化养殖场畜禽粪便污染负荷研究——以居巢区为例 [J]. 安徽农业科学 , 37 (15) : 7159-7161
- Zhang Z ,Si Y B ,Gu X G *et al.* 2009. Study on waste load of farmland for the development of scale breeding farm in Chaohu Basin — A case study in Chaohu District [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences , 37 (15) : 7159-7161 (in Chinese)