

河北省集约化养殖场畜禽粪便中 重金属含量及变化特征

茹淑华¹, 苏德纯², 张永志³, 张国印¹, 耿 暖¹, 孙世友¹, 王 凌¹

(1.河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050051; 2.中国农业大学资源与环境学院环境科学与工程系, 北京 100193; 3.浙江省农业科学院农产品质量标准研究所, 浙江 杭州 310021)

摘 要:通过对河北省全省区域典型集约化养殖场的主要畜禽粪便采样,分析测定畜禽粪便中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 8 种重金属含量并进行数据分析,结果表明河北省集约化养殖场畜禽粪便中 8 种重金属的含量(中位值)均符合德国腐熟堆肥标准和中国有机肥料标准,但数据离散且呈偏态分布。按德国腐熟堆肥标准和中国有机肥(NY 525—2012)的标准,河北省畜禽粪便的 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni、Hg 和 As 超标率分别为 41.73%、50.39%、31.50%、5.51%、0.79%、7.87%、4.63%和 12.60%。鸡粪重金属超标率顺序为 Zn>Cr>Cu>Ni>As>Cd>Pb>Hg,其中,Cu、Zn、Cr 超标率分别为 22.22%、40.74%和 33.33%。猪粪重金属超标率顺序为 Cu>Zn>Cr>As>Ni 和 Cd,其中,Cu、Zn、Cr 和 As 超标率分别为 80.43%、78.26%、30.43%和 21.74%,Pb 和 Hg 不超标。牛粪重金属超标率顺序为 Cr>Hg>Zn,其他重金属均不超标。按施用量 15 t·hm⁻² 推算出猪粪、鸡粪和牛粪的最严格土壤安全施用年限分别为 26、79 年和 207 年。因此,施用集约化畜禽粪便有机肥带来的环境风险需要引起足够的重视。

关键词: 畜禽粪便;重金属;特征;含量;河北省

中图分类号:S141.2 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)06-0533-07 doi: 10.13254/j.jare.2016.0099

引用格式:

茹淑华, 苏德纯, 张永志, 等. 河北省集约化养殖场畜禽粪便中重金属含量及变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 533-539.

RU Shu-hua, SU De-chun, ZHANG Yong-zhi, et al. Manure from the Large-scale Farms in Hebei Province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 533-539.

Contents and Characteristics of Heavy Metals in the Livestock and Poultry Manure from the Large-scale Farms in Hebei Province, China

RU Shu-hua¹, SU De-chun², ZHANG Yong-zhi³, ZHANG Guo-yin¹, GENG Nuan¹, SUN Shi-you¹, WANG Ling¹

(1. Institute of Agro-resource and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Institute of Quality and Standard for Agricultural Products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: The different types of livestock and poultry manure, including pig manure, chicken manure, cow manure were collected from the typical large-scale farms in Hebei Province and heavy metals contents in the samples were analyzed. The results showed that the median contents of heavy metal Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, As, Hg and Ni in the livestock and poultry manure were below the limitations of Manure Composition of Germany and Organic Fertilizer of China (NY 525—2012). However, according to the limitations, the exceeding rates of the concentrations of Cu, Zn, Cr, Cd, Pb, Ni, Hg and As in the livestock and poultry manure were 41.73%, 50.39%, 31.50%, 5.51%, 0.79%, 7.87%, 4.63% and 12.60%, respectively. The order of the exceeding rates for heavy metals in chicken manure was Zn>Cr>Cu>Ni>As>Cd>Pb>Hg. The exceeding rates of the concentrations of Cu, Zn and Cr in chicken manure were 22.22%, 40.74% and 33.33%, respectively. The order of the exceeding rates for heavy metals in pig manure was Cu>Zn>Cr>As>Ni/Cd and the contents of other heavy metals did not exceed the limi-

收稿日期:2016-04-18

基金项目:河北省自然科学基金项目(C2013301066);河北省农林科学院项目(A2015130301);国家自然科学基金项目(41271488);河北省科技计划项目(15227511D,14397502D)

作者简介:茹淑华(1973—),女,硕士,研究员,主要从事施肥与农业环境方面的研究。E-mail: shuhuaru@163.com

tation. The exceeding rates of the concentrations of Cu, Zn, Cr and As in pig manure were 80.43%、78.26%、30.43% and 21.74%, respectively. The order of the exceeding rates for heavy metals in cow manure was Cr>Hg>Zn and the contents of other heavy metals did not exceed the limitation. Estimated on the application rate of $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, the safety application years of pig manure, chicken manure and cow manure were 26, 79 years and 207 years, respectively. Therefore, the livestock and poultry manure from large-scale farms should be disposed before used.

Keywords: livestock and poultry manures; heavy metals; characteristics; content; Hebei Province

随着经济的发展,我国畜牧业的集约化和规模化生产得到迅速发展,畜禽废弃物产生量大大增加。2010 年中国畜禽粪便总量达 22.35 亿 t^[1],直接和间接还田利用的畜禽粪便占排放量的 60%以上^[2]。由于微量元素 Cu、Zn 等饲料添加剂的普遍使用,造成集约化养殖场的畜禽粪便中重金属含量超标^[3]。有研究表明,畜禽粪便有机肥的施用为我国农田土壤中重金属的重要来源之一^[4-6]。Xiong 等^[7]研究发现北京地区猪粪样品 Cu 含量高达 $2\ 016.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Cang 等^[8]对江苏省 10 个地区 31 个大型养殖场的畜禽粪中 14 种重金属元素含量进行了调查,发现以 Cu 和 Zn 污染最为严重。Zhang 等^[9]对我国东北三省 224 个畜禽粪便样品的分析表明,猪粪平均 Cu 含量为 $642.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高达 $1\ 521.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。胡海平等^[10]对东北三省不同规模养殖场畜禽饲料和粪便中 Zn 含量特征的研究表明,猪粪、鸡粪、牛粪均以大规模养殖场的 Zn 含量最高,分别为 691.56 、 $384.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $136.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且畜禽粪便与饲料中的 Zn 含量呈显著正相关。长期定位试验表明,施用猪粪后,土壤全 Cu、全 Zn 较仅施用化肥处理分别增长 53.6%、23.6%^[11]。连续 4 年施用猪粪,土壤全 Cu 和全 Zn 含量分别经过 10 年和 15 年就会超过国家农田土壤二级标准^[12]。畜禽粪便有机肥中重金属生物有效性也存在显著差异,有研究表明,石灰性和酸性土壤上施用鸡粪和猪粪后 6 个月内不同阶段,畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 和 Cd 的生物有效性显著低于等量该重金属无机盐或与之相当^[13-14]。

河北省作为我国畜牧业最发达的地区之一,规模养殖所带来的畜禽污染也最为严重。畜禽粪便对环境的污染已经引起许多学者的关注。统计显示,2010 年河北省畜禽粪便产生量在 1.00 亿 t 以上,其污染物 COD 产生量在 1 000 万 t 以上^[1]。规模养殖场畜禽粪便有机肥的农田利用是最经济有效的资源化利用和污染控制途径,但合理施用以及确定畜禽粪便的农田负荷,控制规模养殖场畜禽粪便有机肥对农田土壤的污染是至关重要的。本研究旨在通过研究分析现阶段

河北省集约化养殖场主要畜禽粪中的重金属含量及变化特征,以了解当前该地区畜禽粪便中重金属的污染状况,从而为安全施肥和保障人体健康提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间、地点

本研究参照河北省颁布的 2012 年部级畜禽养殖标准化示范场名单,于 2013 年 5 月—2014 年 12 月期间在邯郸、邢台、石家庄、保定、张家口、承德、衡水、廊坊和沧州等 9 个地市选择具有代表性的集约化畜禽养殖场(生猪>50 头·场⁻¹,鸡>2 000 只·场⁻¹,牛>50 头·场⁻¹)进行调查和采样,每个养殖场采集新鲜的畜禽粪便样品 1 个,共 120 个。其中,采集猪粪 46 个、鸡粪 54 个、牛粪 20 个,采集的畜禽粪便为多点混合样品(不含垫料),并随机采集饲料样品 9 个。样品的前处理在河北省农林科学院农业资源环境研究所完成。

1.2 样品的分析测定

将采集的新鲜样品用塑料袋密封后带回实验室风干,剔除杂质,研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,于塑料密封袋中保存备用。样品重金属的测定工作由浙江省农业科学院农产品质量标准研究所协助完成。重金属测定方法如下:称取 0.200 g 样品,并置于微波消解罐中,加入 5 mL 硝酸,2 mL 双氧水,静置 2 h 后放入微波消解装置中(美国 CEM 公司, Mars5)进行样品消解,消解过程完成待样品冷却后,将样品定容到 50 mL,同时做试剂空白试验。用电感耦合等离子体质谱仪(美国热电公司 X2)测定 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As 和 Hg 含量。

1.3 数据处理

在评价河北省集约化养殖场畜禽粪便重金属含量及变化特征时,如果数据服从正态分布,则采用算术平均值;如果数据服从对数正态分布,则采用几何平均值;如果数据既不服从正态分布也不服从对数正态分布,则采用中位值。数据处理及图表分析应用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 20 软件。

2 结果与分析

2.1 河北省畜禽粪便和饲料中重金属含量变化特征

河北省畜禽粪便有机肥中8种重金属Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni的含量分布符合偏态分布(表1),但由于数据分布较为离散,因此,采用中位值(50%分位值)来表征畜禽粪便重金属含量分布特征。畜禽粪便Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni含量分别为63.00、399.10、0.23、4.60、53.30、4.60、0.25、10.40 mg·kg⁻¹。所采集的不同畜禽粪便中重金属含量差异较大,变异系数在51.86%~414.48%之间,大小顺序为As>Cr>Pb>Cd>Zn>Hg>Cu>Ni,变异系数较大的重金属元素As和Cr是常用的饲料添加物质,这也说明因饲料添加量不同而导致畜禽粪便中重金属含量差异较大。按德国腐熟堆肥标准(Cu≤100 mg·kg⁻¹、Zn≤400 mg·kg⁻¹、Cr≤100 mg·kg⁻¹、Cd≤1.5 mg·kg⁻¹、Pb≤150 mg·kg⁻¹、Ni≤20 mg·kg⁻¹、Hg≤1 mg·kg⁻¹),河北省41.73%的畜禽粪便样本Cu超标,50.39%的样本Zn超标,31.50%的样本Cr超标,超标率均高于30%。Cd、Pb、Ni和Hg的超标率分别为5.51%、0.79%、7.87%和4.63%,均低于10%。按中国有机肥标准(NY 525—

2012,As≤15 mg·kg⁻¹),有12.60%的样本超标。

从畜禽粪便中重金属含量分位值来看,河北省畜禽粪便Cu、Zn和Cr的50%分位值符合德国腐熟堆肥标准,Ni的90%分位值符合德国腐熟堆肥标准,Cd、Pb、Hg全部符合德国腐熟堆肥标准,As的75%分位值符合中国有机肥标准。75%分位值中Cu、Zn和Cr,95%分位值中Ni均超过德国腐熟堆肥标准,90%分位值中As超过中国有机肥标准。

从表2河北省饲料中重金属含量特征来看,8种重金属Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni的平均值分别为164.10、151.47、0.04、1.41、41.21、0.96、0.05、9.64 mg·kg⁻¹。按中国饲料卫生标准(GB 13078—2001)(Cd≤0.5 mg·kg⁻¹、Pb≤5 mg·kg⁻¹、As≤2.0 mg·kg⁻¹、Cr≤10 mg·kg⁻¹、Hg≤0.1 mg·kg⁻¹),饲料中Cr含量100%超标,As含量超标22.22%,其他重金属不超标。按俄国饲料标准(Cu≤8.0 mg·kg⁻¹、Zn≤100 mg·kg⁻¹、Cd≤0.5 mg·kg⁻¹、Pb≤5 mg·kg⁻¹、As≤2.0 mg·kg⁻¹、Cr≤10 mg·kg⁻¹、Hg≤0.1 mg·kg⁻¹),Cr含量100%超标,Cu、Zn超标率分别为77.78%和55.56%,As含量超标22.22%,其他重金属不超标。可见,由于饲料添加剂的广泛应用,饲料里的某些微量重金属元素超标比较严重。

表1 河北省主要畜禽粪便重金属含量分布特征(n=120)

Table1 Heavy metals contents in the main livestock and poultry manure in Hebei Province(n=120)

项目	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
算术平均值/mg·kg ⁻¹	213.76±266.6	907.95±1 560	0.37±0.53	10.60±22.67	119.93±293.92	15.56±65.01	0.32±2.40	11.74±6.10
数据分布类型	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布
变幅/mg·kg ⁻¹	18.61~1 027	45.54~8 851	0.07~5.33	0.39~166.6	8.00~2 595	0.69~685.1	0.05~4.56	3.05~41.30
几何平均值/mg·kg ⁻¹	105.27±287.17	483.22±1 610.8	0.26±0.54	5.51±23.14	58.87±299.05	4.86±65.63	0.39±0.22	10.20±5.37
中位值/mg·kg ⁻¹	63.00±304.26	399.10±1 634.9	0.23±0.54	4.60±23.31	53.30±300.17	4.60±65.68	0.25±0.22	10.40±5.33
变异系数/%	123.77	167.46	169.89	205.50	241.67	414.48	145.79	51.86
超标率/%	41.73	50.39	5.51	0.79	31.50	12.60	4.63	7.87
重金属元素含量/mg·kg ⁻¹								
5%分位值	23.13	104.97	0.09	1.36	13.16	1.10	0.079	4.45
10%分位值	27.44	133.86	0.12	1.90	17.84	1.40	0.10	5.30
25%分位值	42.70	249.40	0.17	3.35	31.50	2.20	0.16	7.30
50%分位值	63.00	399.10	0.23	4.60	53.30	4.60	0.25	10.40
75%分位值	343.25	785.05	0.35	8.30	107.95	7.40	0.32	14.05
90%分位值	719.72	1 632.14	0.57	19.02	192.96	20.58	0.41	19.08
95%分位值	824.48	4 619.19	1.01	33.94	292.08	42.97	0.84	21.77

表2 河北省饲料中重金属含量特征(n=9, mg·kg⁻¹)

Table 2 Heavy metals contents in feed in Hebei Province(n=9, mg·kg⁻¹)

项目	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
范围	6.54~755.64	50.49~397.50	0.02~0.07	0.97~2.12	24.99~88.60	0.18~3.00	0.05~0.06	6.80~11.64
平均含量	164.10±285.34	151.47±118.69	0.04±0.02	1.41±0.37	41.21±19.48	0.96±0.97	0.05±0.002	9.64±1.52

2.2 不同种类畜禽粪便中重金属含量特征

从表 3~表 5 可以看出,河北省鸡粪、猪粪和牛粪中 8 种重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量均符合偏态分布,但由于数据分布较为离散,因此,采用中位值来表征鸡粪、猪粪和牛粪重金属含量特征。鸡粪中 8 种重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别为 57.45、387.90、0.22、4.55、61.25、5.75、0.26、12.25 mg·kg⁻¹。鸡粪 Cu 和 Ni 含量的 75%分位值、Zn 和 Cr 含量的 50%分位值、Cd 含量的 90%分位值、Pb 含量的 95%分位值、Hg 含量的 95%分位值均符合德国腐熟堆肥标准,As 含量的 75%分位值符合中国有机肥标准。鸡粪重金属超标率顺序为 Zn>Cr>Cu>Ni>As>Cd>Pb>Hg。其中,Cu、Zn、Cr 超标率分别为

22.22%、40.74%、33.33%。猪粪中 8 种重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别为 390.90、855.85、0.26、3.80、47.35、5.95、0.25、9.65 mg·kg⁻¹,猪粪 Cu 和 Zn 含量的 10%分位值、Cr 含量的 50%分位值、Ni、Cd、Pb 和 Hg 含量的 95%分位值均符合德国腐熟堆肥标准,As 含量的 75%分位值符合中国有机肥标准。猪粪重金属超标率顺序为 Cu>Zn>Cr>As>Ni 和 Cd、Pb 和 Hg 不超标。其中,Cu、Zn、Cr、As 超标率分别为 80.43%、78.26%、30.43%、21.74%。牛粪中 8 种重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别为 37.35、148.15、0.21、7.60、36.80、2.80、0.30、7.75 mg·kg⁻¹。Cr 含量的 50%分位值、Zn 含量的 90%分位值符合德国腐熟堆肥标准,其他元素全部符合德国腐熟堆肥标准

表 3 河北省鸡粪中重金属含量特征(n=54)
Table 3 Heavy metals contents in chicken manure in Hebei Province(n=54)

项目	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
算术平均值/mg·kg ⁻¹	96.20±136.10	509.18±613.35	0.42±0.65	15.73±33.25	185.89±435.59	23.26±96.67	0.28±0.20	13.08±5.74
数据分布类型	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布
变幅/mg·kg ⁻¹	22.60~812.30	103.80~4 485.0	0.07~3.80	1.27~166.55	10.48~2 594.54	1.24~685.08	0.05~4.56	4.76~32.55
几何平均值/mg·kg ⁻¹	64.87±139.72	396.91±623.73	0.25±0.67	6.51±34.52	72.16±450.46	5.70±98.28	0.23±0.21	11.90±5.86
变异系数/%	141.47	120.46	156.47	211.40	234.32	415.64	72.37	43.85
超标率/%	22.22	40.74	7.41	5.56	33.33	9.26	4.26	12.96
重金属元素含量/mg·kg ⁻¹								
5%分位值	23.18	185.78	0.07	1.70	14.55	1.48	0.070	5.28
10%分位值	27.00	211.45	0.095	2.15	20.10	1.80	0.098	5.80
25%分位值	42.18	291.50	0.13	3.38	31.55	2.90	0.17	8.85
50%分位值	57.45	387.90	0.22	4.55	61.25	5.75	0.26	12.25
75%分位值	97.65	494.10	0.35	8.98	128.38	7.43	0.33	16.60
90%分位值	156.30	825.10	0.86	34.25	339.65	17.00	0.39	21.75
95%分位值	440.55	1 369.6	1.98	129.63	1 414.4	86.45	0.86	22.98

表 4 河北省猪粪中重金属含量特征(n=46)
Table 4 Heavy metals contents in pig manure in Hebei Province(n=46)

项目	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
算术平均值/mg·kg ⁻¹	438.56±300.39	1 744.6±2 254.0	0.37±0.50	5.50±5.93	74.44±64.58	13.09±21.91	0.25±0.11	10.65±4.59
数据分布类型	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布
变幅/mg·kg ⁻¹	24.57~1 027.13	125.37~8 850.96	0.09~3.48	0.39~32.28	8.00~277.09	0.69~106.26	0.06~0.55	3.05~22.79
几何平均值/mg·kg ⁻¹	296.00±333.19	959.47±2 389.7	0.28±0.11	3.81±6.17	51.39±68.65	5.26±23.29	0.23±0.11	9.72±4.68
变异系数/%	68.50	129.20	134.65	107.90	86.75	167.40	42.17	43.09
超标率/%	80.43	78.26	2.17	—	30.43	21.74	—	2.17
重金属元素含量/mg·kg ⁻¹								
5%分位值	36.84	135.27	0.15	0.84	11.87	0.87	0.075	4.94
10%分位值	41.41	252.38	0.17	1.17	13.93	1.10	0.12	5.21
25%分位值	202.90	469.03	0.20	2.23	25.28	1.50	0.16	6.95
50%分位值	390.90	855.85	0.26	3.80	47.35	5.95	0.25	9.65
75%分位值	716.45	1 464.20	0.37	7.05	107.50	13.78	0.32	13.35
90%分位值	871.68	5 998.8	0.52	8.26	192.67	42.53	0.41	18.15
95%分位值	969.09	8 416.7	0.90	22.72	216.65	74.49	0.42	19.75

表5 河北省牛粪中重金属含量特征(n=20)
Table 5 Heavy metals contents in cow manure in Hebei Province(n=20)

	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
算术平均值/mg·kg ⁻¹	39.64±16.45	168.71±92.17	0.24±0.12	8.46±3.99	64.27±51.77	3.20±2.01	0.36±0.28	8.58±4.26
数据分布类型	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布	偏态分布
变幅/mg·kg ⁻¹	18.61~74.99	45.54~408.73	0.09~0.60	4.26~20.12	12.37~219.20	0.93~9.13	0.17~1.10	3.16~19.00
几何平均值/mg·kg ⁻¹	36.52±16.76	148.77±94.41	0.22±0.13	7.72±4.06	49.07±54.07	2.73±2.08	0.31±0.19	7.58±4.38
变异系数/%	41.51	54.63	51.61	47.08	80.55	62.88	77.83	49.69
超标率/%	—	5.00	—	—	30.00	—	11.11	—
重金属元素含量/mg·kg ⁻¹								
5%分位值	18.65	47.80	0.09	4.30	12.66	0.91	0.17	3.22
10%分位值	19.82	91.83	0.12	4.30	18.32	1.15	0.17	3.61
25%分位值	26.45	103.65	0.16	5.38	31.90	1.70	0.21	4.55
50%分位值	37.35	148.15	0.21	7.60	36.80	2.80	0.30	7.75
75%分位值	49.85	196.00	0.28	9.93	105.78	3.93	0.35	12.30
90%分位值	68.27	357.81	0.48	14.77	130.89	6.76	—	13.60
95%分位值	74.17	406.56	0.59	19.85	214.88	9.00	—	18.73

和中国有机肥标准。牛粪重金属超标率 Cr>Hg>Zn,其他重金属均不超标。河北省猪粪 Cu 和 Zn 含量明显高于鸡粪和牛粪,其 Cu 含量分别是鸡粪和牛粪的 6.80 倍和 10.47 倍,Zn 含量分别是鸡粪和牛粪的 2.21 倍和 5.78 倍。鸡粪 Cr 含量明显高于猪粪和牛粪,分别是猪粪和牛粪的 1.29 倍和 1.67 倍。

2.3 施用畜禽粪肥有机肥每年带入土壤的重金属量估算

商品有机肥一般是由一种或多种畜禽粪便为主要原料加工而成的,如果原料中的重金属含量较高,势必会造成商品有机肥重金属含量较高。因此,如果长期将这类畜禽粪肥有机肥施入土壤,重金属会在土壤中累积,最终将会对土壤和水环境造成严重的环境压力^[5]。据河北省统计年鉴资料,猪、牛和鸡是河北省养殖场畜禽粪便的主要排放源。如果将这些畜禽粪便全部还田将在很大程度上解决畜禽粪便的资源化利用问题。参照本研究中猪粪、鸡粪和牛粪重金属的含量(中位值),按施用量 15 t·hm⁻² 计算出河北省主要畜禽粪肥每年带入农田的重金属量(表 6)。假定表层土深 0.20 m,土壤容重 1.15 kg·dm⁻³,每年施用猪粪后土壤 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别增加

2.55、5.58、0.001 7、0.025、0.31、0.039、0.001 6、0.063 mg·kg⁻¹;每年施用鸡粪后土壤 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别增加 0.37、2.53、0.001 4、0.030、0.40、0.038、0.001 7、0.080 mg·kg⁻¹;每年施用牛粪后土壤 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As、Hg、Ni 的含量分别增加 0.24、0.97、0.001 4、0.050、0.24、0.018、0.002 0、0.051 mg·kg⁻¹。在 pH>7.5 的菜田土壤上,以 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》一级自然背景值为当前土壤重金属含量,以 GB 15618—2008《土壤环境质量标准》二级标准值为超标限值,综合考虑河北省畜禽粪肥中 8 种重金属元素含量,按施用量 15 t·hm⁻² 推算出猪粪、鸡粪和牛粪的最严格土壤安全施用年限分别为 26、79 年和 207 年。因此,施用集约化畜禽粪肥有机肥带来的环境风险需要引起足够重视。

3 讨论

饲料中高浓度的重金属添加剂,造成了畜禽粪肥中高含量的重金属残留,给其资源化利用带来很大的限制和风险。调查表明我国猪饲料中 Cu 添加量高达 150~250 mg·kg⁻¹,是饲料中 Cu 正常添加量的 20~40 倍^[16]。Mantovip 等^[17]研究表明,猪饲料中的 Zn 有 92%

表6 河北省畜禽粪肥每年带入农田的重金属量
Table 6 Heavy metals loading quantities in soil per year after application of manures in Hebei Province

项目	重金属元素/g·hm ⁻²							
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Ni
猪粪	5 863.35	12 837.60	3.90	57.45	710.10	89.40	3.75	144.90
鸡粪	862.20	5 818.35	3.30	68.25	919.35	86.40	3.90	183.60
牛粪	560.70	2 222.55	3.15	114.60	552.00	42.15	4.50	116.55

~96%不能被动物吸收而从粪便中排出。本研究中,按德国腐熟堆肥标准,河北省 41.73%的畜禽粪便样本 Cu 超标,50.39%的样本 Zn 超标,31.50%的样本 Cr 超标,超标率均高于 30%,这在很大程度上可能是由于饲料中添加了高浓度的 Cu、Zn 和 Cr 制剂所致。本研究中,河北省猪粪 Cu 和 Zn 含量明显高于鸡粪和牛粪,鸡粪 Cr 含量明显高于猪粪和牛粪,这可能是由于不同畜禽所采用的饲料中所添加的微量元素制剂剂量不同所导致的。因此,应该采取减量化技术从源头上控制由饲料进入畜禽粪便的重金属量。大量研究表明,在畜禽粪便堆肥过程中不同钝化剂对重金属有明显的钝化效果^[18-21],因此,在商品有机肥生产过程中应加入重金属钝化剂,将畜禽粪便经无害化处理后进入农田施用,这将会大大降低土壤重金属的有效性,从而保证农产品的安全生产。另外,本研究中按施用量 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 推算出猪粪、鸡粪和牛粪的最严格土壤安全施用年限分别为 26、79 年和 207 年。可见,施用不同种类畜禽粪便有机肥带来的环境风险也是有差别的。因此,相关部门应尽快制定针对重金属的集约化养殖场畜禽粪便有机肥量化施用标准,用来规范和指导农民科学施肥。

4 结论

按德国腐熟堆肥标准,河北省 41.73%的畜禽粪便样本 Cu 超标,50.39%的样本 Zn 超标,31.50%的样本 Cr 超标,超标率均高于 30%。Cd、Pb、Ni 和 Hg 的超标率分别为 5.51%、0.79%、7.87%和 4.63%,均低于 10%。按中国有机肥 As 的标准,有 12.60%的样本超标。

鸡粪重金属超标率顺序为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg}$ 。其中,Cu、Zn、Cr 超标率分别为 22.22%、40.74%和 33.33%。猪粪重金属超标率顺序为 $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni}$ 和 Cd,其中,Cu、Zn、Cr 和 As 超标率分别为 80.43%、78.26%、30.43%和 21.74%,Pb 和 Hg 不超标。牛粪重金属超标率顺序为 $\text{Cr} > \text{Hg} > \text{Zn}$,其他重金属均不超标。河北省猪粪 Cu 和 Zn 含量明显高于鸡粪和牛粪,猪粪 Cu 含量分别是鸡粪和牛粪的 6.80 倍和 10.47 倍,Zn 含量分别是鸡粪和牛粪的 2.21 倍和 5.78 倍。鸡粪 Cr 含量明显高于猪粪和牛粪,分别是猪粪和牛粪的 1.29 倍和 1.67 倍。

按施用量 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 推算出猪粪、鸡粪和牛粪的最严格土壤安全施用年限分别为 26、79 年和 207 年。因此,施用集约化畜禽粪便有机肥带来的环境风险需要引起足够重视。

参考文献:

- [1] 耿 维,胡 林,崔建宇,等.中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J].农业工程学报,2013,29(1):171-179.
GENG Wei, HU Lin, CUI Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 171-179. (in Chinese)
- [2] 彭 奎,朱 波.试论农业养分的非点源污染与管理[J].环境保护,2001(1):15-17.
PENG Kui, ZHU Bo. Discussion on non-point pollution and management of agricultural nutrients[J]. Environmental Protection, 2001(1): 15-17. (in Chinese)
- [3] 张 勇,朱宇旌.饲料与饲料添加剂[M].北京:化学工业出版社,2008:100-105.
ZHANG Yong, ZHU Yu-jing. Feed and feed additives[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:100-105. (in Chinese)
- [4] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2524-2530.
- [5] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2):392-397.
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 392-397. (in Chinese)
- [6] 董同喜,杨海雪,李花粉,等.华北农田小麦-玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究[J].农业资源与环境学报,2014,31(4):355-365.
DONG Tong-xi, YANG Hai-xue, LI Hua-fen, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the soil with wheat-corn rotation system in North China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(4): 355-365. (in Chinese)
- [7] XIONG X, LI Y X, LIN W, 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.
- [8] CANG L, WANG Y J, ZHOU D M, et al. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(3): 371-374.
- [9] ZHANG F S, LI Y X, YANG M, et al. Copper residue in animal manure and the potential pollution risk in northeast China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(1):91-96.
- [10] 胡海平,王代懿,张丰松,等.东北三省不同规模养殖场畜禽饲料和粪便中锌含量特征[J].环境科学研究,2013,26(6):689-694.
HU Hai-ping, WANG Dai-yi, ZHANG Feng-song, et al. Contents of zinc in animal feeds and manures from farms of different scales in the northeast of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26

- (6): 689-694. (in Chinese)
- [11] 张树清,张夫道,刘秀梅,等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. 中国农业科学,2006,39(2):337-343.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2):337-343. (in Chinese)
- [12] 黄治平,徐斌,张克强,等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报,2008,23(11):239-244.
HUANG Zhi-ping, XU Bin, ZHANG Ke-qiang, et al. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soils[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 23(11): 239- 244. (in Chinese)
- [13] 商和平,李洋,张涛,等. 畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化[J]. 环境科学,2015,36(1):314-324.
SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, et al. Form tendency and bio-availability dynamics of Cu and Zn in different farm soils after application of organic fertilizer of livestock and poultry manures[J]. Environmental Sciences, 2015, 36(1): 314-324. (in Chinese)
- [14] 张云青,张涛,李洋,等. 畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化[J]. 农业环境科学学报,2015,24(1):87-96.
ZHANG Yun-qing, ZHANG Tao, LI Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metal in livestock and poultry manures added to different farmland soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 24(1):87-96. (in Chinese)
- [15] 冯爱萍,王雪蕾,刘忠,等. 东北三省畜禽养殖环境风险时空特征[J]. 环境科学研究,2015,28(6):967-974.
FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, LIU Zhong, et al. Temporal-spatial analysis of environmental risks from animal production in northeast China[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6):967-974. (in Chinese)
- [16] 王幼明,王小龙. 高铜的应用对畜禽的慢性中毒作用及对环境生态的影响[J]. 中国兽医杂志,2001,37(6):36-38.
WANG You-ming, WANG Xiao-long. Effect of application of high copper on chronic poisoning of livestock and poultry and the ecological environment[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2001,37(6): 36-38. (in Chinese)
- [17] Mantovip, Bonazzig, Maestrie, et al. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in a agricultural soils and crop plants[J]. Plant and Soil, 2003, 250: 249-257.
- [18] 蒋强永. 不同钝化剂对猪粪堆肥重金属钝化效果研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2009:3-4.
JIANG Qiang-yong. Effects of different heavy metal deactivation on bioavailability of heavy metal during pig manure composting [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009: 3-4. (in Chinese)
- [19] 刘秋萌. 不同钝化剂对畜禽粪便模拟施肥土壤重金属吸附特性和活性的影响[D]. 长春:吉林大学,2015:26-28.
LIU Qiu-meng. Effects of different passivation on adsorption and activity of heavy metal in soil simulated fertilization with livestock manure [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 26-28. (in Chinese)
- [20] 龚浩如,韩永亮,王杰,等. 不同钝化剂对猪粪堆肥中重金属的钝化效果[J]. 湖南农业科学,2012(9):69-71.
GONG Hao-ru, HAN Yong-liang, WANG Jie, et al. Passivation effect of different passivating agents on heavy metals in composting of pig manure[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012(9):69-71. (in Chinese)
- [21] 杨坤,李军营,杨宇虹,等. 不同钝化剂对猪粪堆肥中重金属形态转化的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(6):43-48.
YANG Kun, LI Jun-ying, YANG Yu-hong, et al. Effect of passivator on form transformation of heavy metal in composting of pig manure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(6):43-48. (in Chinese)