

猪粪与农田土壤中重金属累积污染的相关分析^①赵睿¹, 吴智书², 罗阳¹, 董丽¹, 王淑楠¹, 王海斌³, 喻礼怀^{1*}

(1 扬州大学动物科学与技术学院, 江苏扬州 225009; 2 仪征市陈集镇畜牧兽医站, 江苏仪征 211900;

3 太仓市金诺农业发展有限公司, 江苏太仓 215436)

摘要: 为调查猪粪和农田土壤中 Cu、Zn、As、Hg、Cr、Cd、Pb、Ni 8 种重金属元素的累积和相关关系, 文章抽取了 30 篇已发表文献中关于 8 种重金属的浓度数据进行分析。原始分析包括上海周边、浙江、江苏、福建、山东、陕西、山西、青海、北京、河南、吉林、湘江下游、河北保定、广东东莞、新疆乌鲁木齐和石河子等地, 共包括超过 2 000 个猪粪样品和 1 700 个土壤样品, 取其中的均值共 550 个进行分析。分析发现: 猪粪中 Cu 超标最严重, Zn 次之; 土壤中 Cu、Zn 累积不多, 但是多来自猪粪; 土壤中 Cd 超标最为严重, 其次为 Cr, 且主要污染源不是来自猪粪。

关键词: 猪粪; 农田土壤; 重金属

中图分类号: S141; X53 文献标识码: A

土壤可以通过几种不同的方式影响人们的健康^[1], 如食土癖、粉尘吸入或者通过其上种植的植物。农田土壤中的重金属可以通过污染蔬菜、谷物及果品等可食用植物进入人体, 对人体健康造成潜在的危害^[2]。近年来, 有机食品生产和消费量大大上涨, 在 2012—2013 年中, 有机食品的产量由 21 万吨增至 32 万吨, 涨幅超过 53%^[3]。在各种有机农副产品的生产中, 生物有机肥占据越来越重要的地位。然而, 国内的畜禽粪便重金属超标率较高, 尤其以猪粪为最, Cu 元素的超标率在 54% 以上^[4], 有机肥中 Pb 元素的超标率达 80% 以上^[5]。重金属通过食物链在人体内累积, 会对人体健康造成很大危害, 如 Pb 会伤害人的脑细胞, 阻止儿童的智力发育^[6]; 徐博^[7]的研究发现过量的 Cu 在小鼠体内蓄积会对心、肝、脾、肾等器官造成损害。Dassel 等人^[8]的研究发现过量的 Cu 会导致肝硬化。研究发现, 长期施用畜禽有机肥的土壤会积蓄粪污中的重金属^[2]。本试验中采用相关分析及多元统计分析方法, 对 17 篇包含猪粪中重金属含量^[4-5, 9-23]及 14 篇包含农田土壤重金属含量^[10, 24-36]的文章数据进行提取分析。

文章的搜索关键词为: 猪粪、有机肥、土壤、农田土壤、重金属; 选取原则为: 研究性文章, 包括猪

粪中的重金属含量和猪粪有机肥, 农田土壤中重金属含量; 发表数据包括平均数。排除综述性文章、文章中为其他动物的粪便重金属含量及其他因素污染土壤的文章。以保证本文中所选取的土壤中主要的外在影响因素为猪粪有机肥和灌溉水。

探讨猪粪中重金属含量与农田土壤中重金属含量的联系, 对解释重金属转移、重金属污染溯源具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

文章中所用数据均为国内已发表论文, 其中包含猪粪重金属污染 21 篇, 农田土壤重金属含量共 14 篇, 从 2005 年到 2016 年, 其数据量见表 1。

表 1 各元素数据量
Table 1 Data quantity of each element

项目	Cu	Zn	As	Cr	Cd	Pb	Ni	Hg
猪粪重金属含量	51	50	44	36	40	37	15	26
农田土壤重金属含量	39	34	32	33	34	36	19	24

所选文章中有施用对应猪粪的土壤数据, 也有单独的猪粪、土壤数据, 将所有的猪粪和土壤数据合并

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)1003)、江苏省苏北发展计划项目(BN2015073)、扬州市产学研合作项目(YZ2016257)和太仓市现代农业项目(TC2015NY11)资助。

* 通讯作者(lhyu@yzu.edu.cn)

作者简介: 赵睿(1990—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事反刍动物营养研究。E-mail: 734948896@qq.com

起来进行分析。所选文章中只有陈芳等^[25]报道了施用年限为 12 a, 且其为研究所内试验田, 并非普通农田。在普通农田的调查研究中, 并无猪粪施用年限的数据。

选取每篇报道中 Cu、Zn、As、Cr、Cd、Pb、Ni、Hg 元素的均值, 共包括 550 个, 其采样地点包括上海周边、浙江、江苏、福建、山东、陕西、山西、青海、北京、河南、吉林、湘江下游、河北保定、广东东莞、新疆乌鲁木齐和石河子等地, 较大范围地包括了我国国内地区, 所测猪粪样品超过 2 000 个, 土壤样品超过 1 700 个, 可以在一定程度上代表国内猪粪和农田土壤中重金属含量。

1.2 统计分析方法

重金属单项污染指数评价: $P_i = C_i/S_i$; P_i 为某种重金属的污染指数; C_i 为某种重金属实际含量; S_i 为某项重金属的含量限值; $P_i \leq 1$ 为合格, $P_i > 1$ 为超标。

$$\text{Nemerow 综合污染指数法: } P_N = \sqrt{\frac{P_{\text{mean}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}};$$

P_N 为 Nemerow 综合污染指数; P_{mean} 为各单项污染指数(P_i)的平均值; P_{max} 为各单项污染指数中最大值。

统计分析使用 Pearson 相关分析, 检测猪粪中与农田土壤中的重金属含量相关性; 采用主成分分析, 并使用变量投影重要性(VIP)筛选出猪粪和农田土壤中代表性的污染重金属。

2 结果与分析

2.1 猪粪及农田土壤中的重金属超标率及含量分布

从表 2 可以看出, 猪粪中重金属超标率从大到小为 Cu、Zn、As、Hg、Cd, 各研究中只有 Cr、Pb 和 Ni 没有超标。土壤中重金属的超标率从大到小为 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Ni、As、Zn, 每种重金属都有超标。

表 2 猪粪及农田土壤中的重金属超标率
Table 2 Exceeding rates of heavy metals in pig manure and farmland soil

样品	项目	Cu	Zn	As	Hg	Cr	Cd	Pb	Ni
猪粪	限值(mg/kg)	110	600	15	2	150	3	50	25
	超标率(%)	100.00	84.00	34.09	11.50	0.00	5.00	0.00	0.00
	P_i	5.30 ± 3.32	2.44 ± 2.64	0.84 ± 1.27	0.39 ± 1.41	0.08 ± 0.12	0.78 ± 2.96	0.10 ± 0.12	0.12 ± 0.19
	P_N	4.38 ± 2.60							
土壤	限值(mg/kg)	50	200	40	0.3	150	0.3	250	40
	超标率(%)	10.26	2.94	3.13	8.33	24.24	52.94	5.56	5.26
	P_i	0.64 ± 0.28	0.44 ± 0.28	0.23 ± 0.28	0.29 ± 0.66	0.61 ± 0.64	2.04 ± 3.29	0.33 ± 0.30	0.34 ± 0.38
	P_N	1.71 ± 2.26							

注: 猪粪 As、Cr、Pb、Hg、Cd 的限值标准为《有机肥料》(NY525-2012), Cu、Zn、Ni 的限值为台湾省有机肥标准。土壤中重金属含量限值标准为《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中二级土壤标准。

猪粪中 Cu 元素的超标率为 100%(表 2), 从图 1 可以看到, 猪粪中 Cu 元素的浓度多在 300 ~ 750 mg/kg, 并且在 1 050 ~ 1 200 mg/kg 时也有一个小高峰, 故 Cu 的平均 P_i 较高, 为 5.30。Zn 的超标率为 84%, 且多集中在较低的超标浓度, 平均 P_i 为 2.44。As 的超标率为 34.09%, 但是 As 大多数集中在浓度较低的部分, 平均 P_i 为 0.84, 标准差为 1.27, 变异幅度较小。Hg 的超标率为 11.50%, 平均 P_i 为 0.39, 标准差为 1.41, 有两个试验中 Hg 浓度较高。Cd 的超标率为 5.00%, 平均 P_i 为 0.78, 标准差为 2.96, 变异较大。

农田土壤中超标率最高的为 Cd 元素, 超标率为 52.94%, 平均 P_i 为 2.04, 标准差为 3.29, 超标的试验数据较多(表 2, 图 2); Cr 的超标率 24.24%, 平均 P_i 为 0.61 标准差为 0.64, 大部分数据都低于 100 mg/kg; Cu 的超标率 10.26%, 平均 P_i 为 0.64, 标准差为 0.28, 超标率较低, 且浓度比较低, 所以平均 P_i 比较低; Hg

的超标率 8.33%, 平均 P_i 为 0.29, 标准差为 0.66; Pb 的超标率 5.56%, 平均 P_i 为 0.33, 标准差为 0.30; Ni 的超标率 5.26%, 平均 P_i 为 0.34, 标准差为 0.38; As 的超标率 3.13%, 平均 P_i 为 0.23, 标准差为 0.28; Zn 的超标率 2.94%, 平均 P_i 为 0.44, 标准差为 0.28。Hg、Pb、Ni、As 4 个元素的超标率较低。

2.2 猪粪及农田土壤中的重金属含量相关性分析

表 3 是土壤和猪粪中重金属含量的相关性分析结果。从表 3 可以看出, 相关性最高的为土壤中 Ni 含量和猪粪中 Hg 含量, 呈正相关, 相关系数为 0.913; 同时土壤中的 Ni 与猪粪中的 Cd 呈显著负相关, 相关系数为 -0.625。土壤中的 Cr 与猪粪中 Zn、As、Cr、Cd 和 Pb 重金属元素均显著相关。土壤中的 Cu、As、Cd 与猪粪中重金属元素无显著相关。土壤与猪粪中相对应重金属显著相关的有 Hg、Cr、Pb; 土壤中的 Ni 与猪粪中的 Ni 因数据原因, 无法计算相关性。

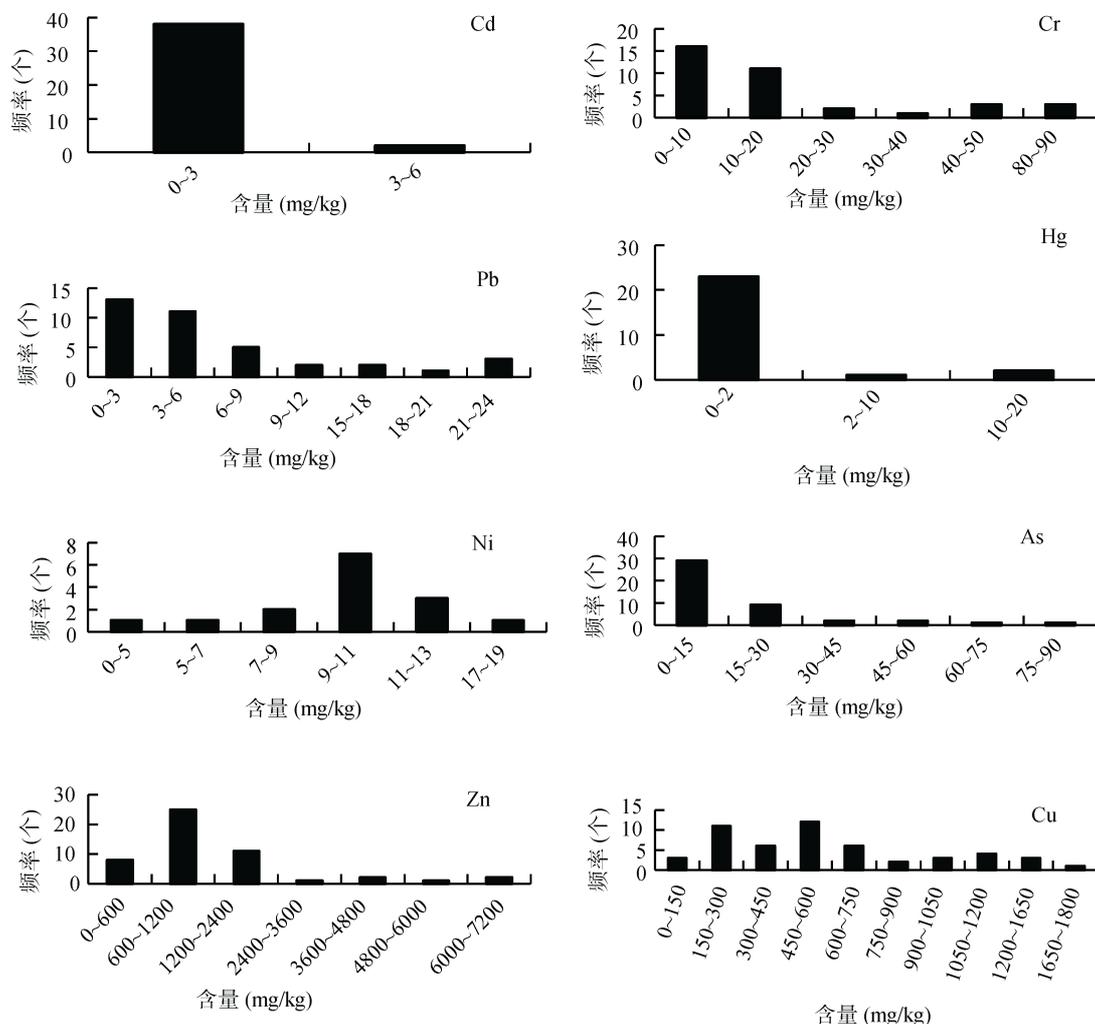


图 1 猪粪中 Cu、Hg、Zn、Cr、Cd、Ni、As、Pb 的含量频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of Cu, Hg, Zn, Cr, Cd, Ni, As and Pb in pig manure

2.3 猪粪及农田土壤中的重金属含量主成分分析

表 4 是将猪粪和土壤中的 8 种重金属浓度数据结合在一起使用主成分分析所得到的结果。从表 4 中可以看出,两个成分即可以解释模型中 68% 的变异,成分提取停止。同时结合变量投影重要性分析发现,在 8 种重金属元素中,Pb 和 Ni 是最重要的两种元素,VIP 值分别为 2.411 和 2.223;接下来是 Cu 和 Zn,VIP 值分别为 2.169 和 2.065。

3 讨论

3.1 猪粪及农田土壤中重金属超标率及含量分布

从结果中看到,猪粪中 Cu、Zn 超标率极高,这是因为在猪的饲料中添加高 Cu 和高 Zn 可以促进猪的生长^[37],故而在饲料中添加剂量较高,可达到 250 mg/kg。而在饲料中多以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 等无机物的形式添加,其生物学效价低

于金属螯合物的有机添加形式。有机金属添加形式在较低添加量时可以达到在无机矿物添加剂在高剂量时才能达到的生物效果,改用有机金属添加可以降低粪污中金属元素的排出^[38-39]及对环境的污染。

在饲料中添加蛋氨酸铬对猪的生长育肥具有促进作用^[40],但在试验中只添加 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 即可达到很好的效果,其添加量只有有机肥限值的千分之一左右,饲料卫生标准^[41]的百分之二,远低于限值,故而在猪粪中没有超标。

其余如 As、Hg、Cd,虽然有超标,但是这 3 种元素对猪的生产性能没有促进作用,反而有很强的毒性,在有机肥的标准中 As、Hg、Cd 的限值低于其他元素^[42],同时在饲料安全卫生标准中对这 3 种重金属的限值也很低,Pb、Ni 元素也同上述 3 种重金属类似。

而在农田土壤中,超标率最高的元素是 Cd,接

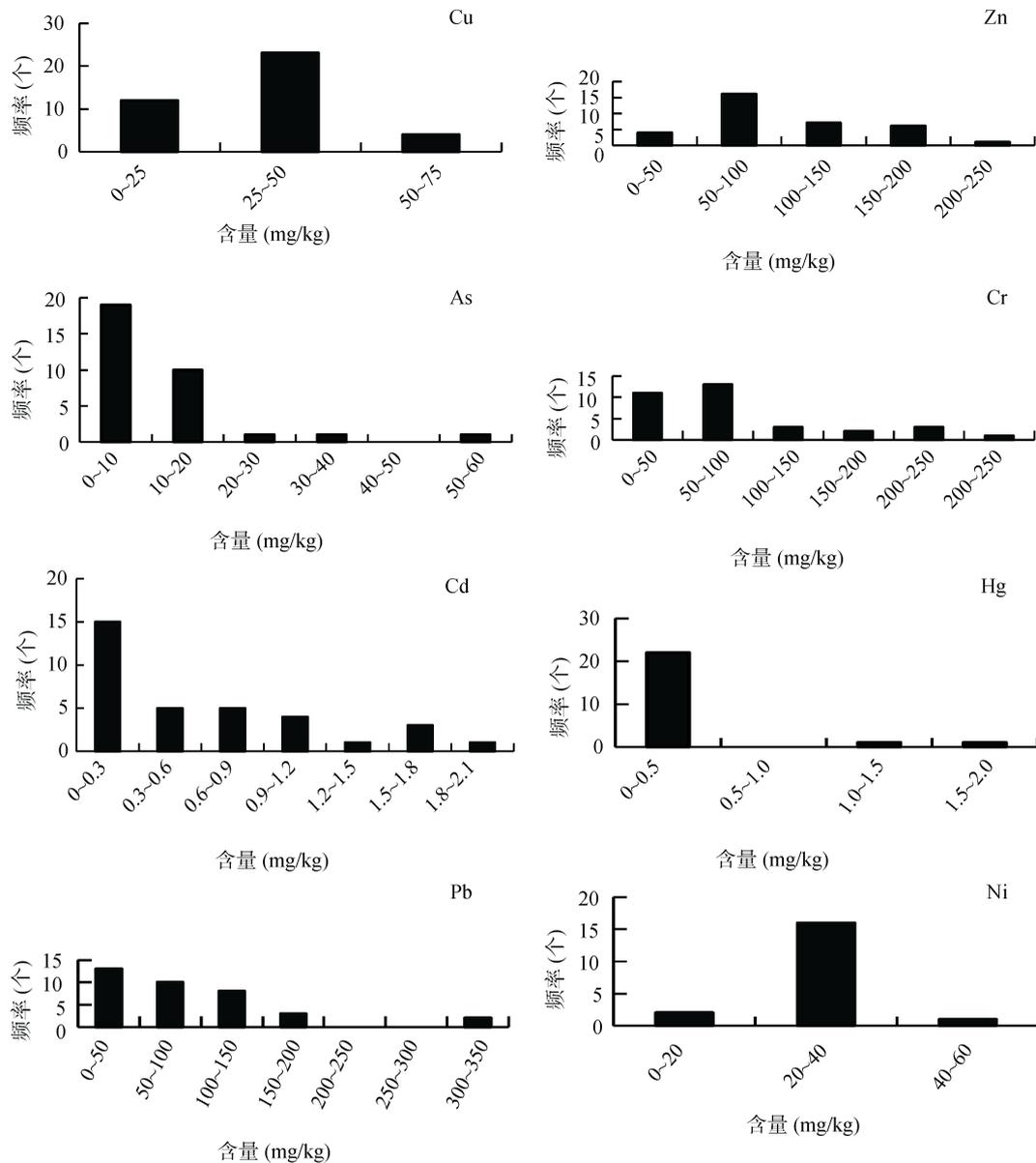


图 2 土壤 Cu、Hg、Zn、Cr、Cd、Ni、As、Pb 的含量频数分布
Fig. 2 Frequency distribution of Cu, Hg, Zn, Cr, Cd, Ni, As and Pb in farmland soil

表 3 猪粪和土壤中重金属含量的相关性
Table 3 Correlations of heavy metal contents in pig manure and farmland soil

猪粪重金属	土壤重金属							
	Cu	Zn	As	Hg	Cr	Cd	Pb	Ni
Cu	0.259	-0.023	-0.055	0.157	0.162	-0.305	0.047	0.105
Zn	0.264	0.028	-0.331	-0.158	0.384*	-0.029	0.342*	-0.194
As	-0.299	-0.288	-0.210	-0.159	0.448*	-0.102	-0.076	-0.303
Hg	0.271	0.546*	-0.093	0.598*	-0.126	-0.136	-0.003	0.913**
Cr	-0.042	0.049	-0.136	-0.223	0.598**	0.264	0.288	-0.472
Cd	0.191	-0.003	-0.361	-0.022	0.647**	-0.067	0.529**	-0.625*
Pb	0.038	0.222	-0.397	-0.214	0.429*	0.206	0.426*	0.087
Ni	-0.006	0.004	0.311	-0.876**	-0.390	-0.350	-0.430	c

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)显著相关, *表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关; c 因为至少有一个变量为常量, 所以无法进行计算。

下来是 Cr 和 Cu 元素。除去 Cd、Cr、Cu，剩下的重金属超标率均低于 10%，甚至 Zn 的超标率只有 2.94%。土壤中的重金属可以通过食物链进入人体累积，并最终影响人体健康^[43]。

从单项污染指数可以看出，在猪粪中，Cu、Zn 显著高于其他 6 种金属；在土壤中则是 Cd 远高于其他 7 种，说明猪粪和土壤污染的主要贡献金属不同。且猪粪的 Nemerow 综合污染指数高于土壤，说明在施用有机肥的情况下猪粪中污染最重要的 Cu、Zn 并没有大量地累积在土壤中。且从二者的 Nemerow 综合污染指数就可以看出，土壤污染较猪粪轻。

表 4 猪粪及农田土壤中的重金属含量主成分得分系数
Table 4 Scores of component analysis of heavy metal contents in pig manure and farmland soil

重金属	主成分		VIP
	PC1	PC2	
Pb	0.908	0.197	2.411
Ni	0.829	0.369	2.223
Cu	-0.810	0.331	2.169
Zn	-0.774	0.257	2.065
Hg	0.727	0.074	1.925
Cr	0.666	0.090	1.764
As	-0.409	0.734	1.307
Cd	-0.219	-0.768	0.962
解释的方差(%)	49.422	18.666	
累积的解释方差(%)	49.422	68.088	

3.2 猪粪及农田土壤中重金属含量的相关性

猪粪中的重金属主要由于其饲料带来，Cr 可以增强胰岛素在体内的生理功能，进而提高动物的生长、繁殖性能^[44]；Cu、Zn 的添加也可以提高动物的生长性能。在畜牧生产中，Cu、Zn、Cr 除去饲料原料，如谷物、饲草等所带来的之外，还由畜牧生产者额外添加矿物原料^[45]，导致在猪粪中 Cu、Zn 过高的超标率。Cr 为土壤中超标率排在第二的重金属，Cr 与猪粪中较多重金属元素存在显著正相关，可以发现土壤中的 Cr 元素与猪粪中的 Cr、Zn 和 Cd 具有显著正相关。可以认为土壤中的 Cr、Zn 在很大程度上由猪粪带来。农田中超标率最高的元素为 Cd，其与猪粪中的其他任何一种重金属元素都没有显著相关，与猪粪中的 Cd 元素更是呈负相关。金属 Cd 具有较大的动物毒性，在动物生产当中并无积极作用，故而土壤中的金属 Cd 不是由施用动物粪便的有机肥所导致。金属 Cd 较多地应用在电子制造行业中，如镉镍电池^[46]、镉镀层^[47]、颜料^[48]等，故土壤中的金属 Cd 有很大可能是灌溉水

被污染所导致。土壤中 Cu 的超标率也较高，且在猪粪中 Cu 的超标率为 100%，可以推测在生产中 Cu 的添加量极高；相关分析中，土壤和猪粪中 Cu 并无显著相关，只有较小的相关性，由此推测土壤 Cu 在一定程度上是由猪粪所带来，但并不是主要因素。

土壤与猪粪中相对应重金属有显著正相关关系的为 Hg、Cr、Pb，说明土壤中这些重金属在很大程度上是由猪粪所带来。

3.3 猪粪及农田土壤中重金属主成分分析及标志性重金属的筛选

从图 3 可以看出，8 种重金属分成两个主成分，与第一主成分相关性较大的为 Ni、Pb、Cr、Hg、Cu、Zn，第二主成分为 As、Cd。第一主成分主要由工业废弃物的重金属和粪便中的重金属所组成，第二主成分主要由工业废水中的重金属组成。其中 Ni、Pb、Cr、Hg 聚在一起，Cu、Zn 聚在一起，二者在第一主成分上呈负相关。在相关分析中，Hg、Cr、Pb 与对应的重金属呈显著正相关，Ni 元素由于数据问题，无法检测相关性。As、Cd 在主成分分析的变量投影重要性较低，在主成分分析中忽略。

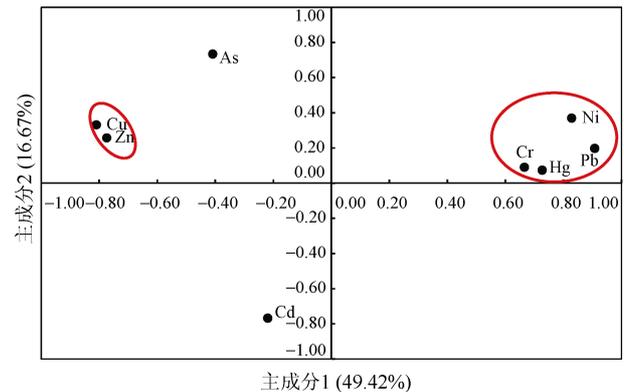


图 3 主成分得分图

Fig. 3 Scores plot of component analysis

将主成分分析与相关分析结合起来可以看出，Cu、Zn 在一定程度上来源于猪粪，通过施用有机肥累积在农田土壤中。土壤中的 Pb、Cr、Hg 与饲料中相应的 Pb、Cr、Hg 具有显著正相关，说明有机肥中的 Pb、Cr、Hg 在土壤中累积，会提高土壤中相应的浓度。建议在畜牧生产中降低 Cu、Zn、Cr 的添加量，或者在饲料中的添加改为有机螯合物的添加形式，可以提高动物对金属元素的利用率。并且在畜牧生产中严格控制饲料原料的 Pb、Hg 含量，防止在粪便有机肥中的累积。

Ni 由于数据缺失原因，无法进行相关性分析。在主成分分析中，Ni 的 VIP 值较高，说明 Ni 的浓度

也可以较好地解释土壤和粪便中重金属的变异。这个结果与王飞等^[5]在 2013 年的结果不同, 他们的分析中, 以 Cr 元素为最大。这可能与其分析中纳入了其他动物粪便有关。

从上述分析可以看出, 土壤中重金属超标率最高的是 Cd, 并且不是来源于粪便有机肥, 而是由工业废弃物通过污水灌溉所致^[49]。

4 结论

土壤 Pb、Cr、Hg 与猪粪有机肥中相应重金属显著相关, 而 Ni 因为数据原因无法进行相关分析。但 Pb、Ni 是重金属污染中标志性重金属。土壤 Cu、Zn 与猪粪有机肥中的 Cu、Zn 相关性不大, 但猪粪有机肥中的 Cu、Zn 对土壤重金属中 Cu、Zn 累积具有一定的作用。

参考文献:

- [1] Oliver M A. Soil and human health: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(4): 573-592
- [2] Chabukdhara M, Munjal A, Nema A K, et al. Heavy metal contamination in vegetables grown around peri-urban and urban-industrial clusters in Ghaziabad, India[J]. *Human & Ecological Risk Assessment*, 2015, 22(3): 736-752
- [3] 肖琼. 2015—2016 中国消费市场流行趋势之有机食品[N]. *消费日报*, 2015-1-20: A01
- [4] 朱恩, 王寓群, 林天杰, 等. 上海地区畜禽粪便重金属污染特征研究[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(1): 90-93
- [5] 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 202-208
- [6] 王豫. 浅谈食品中重金属对人体的危害及预防[J]. *青海农技推广*, 2010(4): 8-9
- [7] 徐博. 小鼠铜蓄积性毒性试验及其残留分析研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008
- [8] Dassel D V J, Zietz B, Schneider H B, et al. Determination of the extent of excessive copper concentrations in the tap-water of households with copper pipes and an assessment of possible health hazards for infants[J]. *European Journal of Medical Research*, 1999, 4(11): 475-482
- [9] 潘寻, 韩哲, 贲伟伟. 山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013(1): 160-165
- [10] 姜长安, 潘能, 文雯, 等. 石河子垦区农田土壤重金属含量与风险评价[J]. *石河子大学学报: 自然科学版*, 2013(5): 541-548
- [11] 谢云发, 汪生贵, 韩廷义. 青海省部分地区猪饲料和粪便中重金属含量调查[J]. *家畜生态学报*, 2014, 35(2): 75-78
- [12] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 822-829
- [13] 王玉婷, 吕梦园, 韩新燕. 宁波地区不同规模猪场粪便中重金属含量分析[J]. *家畜生态学报*, 2016, 37(3): 55-58
- [14] 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
- [15] 谢忠雷, 朱洪双, 李文艳, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2279-2284
- [16] 何波澜, 黄勤楼, 钟珍梅, 等. 福建省猪场粪污及土壤重金属含量的调查研究[J]. *福建畜牧兽医*, 2015, 37(5): 13-17
- [17] 袁云丽. 猪饲料和粪便中重金属的土壤累积效应及其环境影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012
- [18] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 261-267
- [19] 董占荣. 猪粪中的重金属对菜园土壤和蔬菜重金属积累的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- [20] 何波澜. 猪场粪污重金属含量及镉和砷在沼草循环中迁移规律研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013
- [21] 石艳平, 黄锦法, 倪雄伟, 等. 嘉兴市主要生猪规模化养殖饲料和粪便重金属污染特征[J]. *浙江农业科学*, 2015, 1(9): 1494-1497
- [22] 蒋强勇. 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
- [23] 吴大伟, 李亚学, 吴萍, 等. 规模化猪场育肥猪饲料、猪肉及粪便中重金属含量调查[J]. *畜牧与兽医*, 2012, 44(4): 38-40
- [24] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(9): 994-1003
- [25] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. *土壤*, 2005, 37(3): 308-311
- [26] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3487-3496
- [27] 成杰民, 张丽娜. 近 20 年山东省典型农田土壤中重金属含量变化特征及积累速率估计[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 99-104
- [28] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. *地理学报*, 2008, 63(1): 3-11
- [29] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(6): 1520-1528
- [30] 徐理超, 李艳霞, 苏秋红, 等. 阜新市农田土壤重金属含量及其分布特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1510-1517
- [31] 钱翌, 于洪, 王灵. 乌鲁木齐市米东区农田土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 303-310

- [32] 陆安祥, 孙江, 王纪华, 等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3778-3789
- [33] 杨奕如, 殷云龙, 於朝广, 等. 205 国道两侧农田土壤和水稻叶片及糙米中重金属含量的空间分布特征[J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(2): 73-79
- [34] 孙雷, 赵焯, 李强, 等. 北京东郊污水与清水灌区土壤中重金属含量的比较研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 29-33
- [35] 孙崇玉. 吉林省典型黑土区农田土壤重金属环境风险研究[D]. 北京: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013
- [36] 王凌青. 西安市郊农田土壤重金属污染及形态分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007
- [37] 刘强. 日粮中不同铜水平对生长肥育猪影响的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006
- [38] 雷颂苹. 硫酸铜和纳米铜对断奶仔猪血清抗氧化能力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013
- [39] 杨坡, 王选年, 李敬玺. 氨基酸螯合铜在动物生产中的应用[J]. 动物医学进展, 2006, 27(9): 46-50
- [40] 李斯丽. 蛋氨酸铬作为饲料添加剂在生长肥育猪生产中的应用技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013
- [41] 王建, 贾斌, 郭丽萍, 等. 火焰原子吸收分光光度法测定饲料中的铬[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(7): 1142-1144
- [42] 全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料卫生标准(GB 13078-2001)[S]. 北京: 标准出版社, 2001
- [43] Khan S, Cao Q, Zheng Y, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(3): 686-692
- [44] 刘兵, 瞿明仁, 张学峰, 等. 微量元素铬在动物营养上的研究与应用[J]. 江西饲料, 2006(4): 7-10
- [45] 王锡茂, 陈少华, 车日晖. 猪饲料微量元素添加剂新型配方[J]. 广东微量元素科学, 2016(3): 7-13
- [46] 黄旌理. 镉的生产及在镉镍电池中的应用[J]. 电池, 1989(5): 20-23
- [47] 谢勤. Zn-Ni、Zn-Ni-P 合金电镀工艺及其基础理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2001
- [48] Dickenson J, 李诗华. 镉在颜料中的应用〔镉译文之五〕[J]. 中国有色冶金, 1985(11): 35-37
- [49] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 407-418

Correlation Analysis of Heavy Metals Accumulation Pollution in Pig Manure and Farmland Soil

ZHAO Rui¹, WU Zhishu², LUO Yang¹, DONG Li¹, WANG Shunan¹, WANG Haibin³, YU Lihuai^{1*}

(1 College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2 Animal Husbandry and Veterinary Station of Chen Town, Yizheng, Jiangsu 211900, China;

3 Jinzhu Agricultural Development Co., LTD., Taicang, Jiangsu 215436, China)

Abstract: 30 published references were used to analyze the accumulation and correlation of heavy metal contents in pig manure and farmland soil. The study areas in the original papers included Shanghai, Zhejiang, Jiangsu, Fujian, Shandong, Henan, Shanxi, Shaanxi, Qinghai, Beijing, Jilin, Baoding, Dongguan, Urumqi, Shihezi, and downstream of the Xiang river, a total of 550 mean values of heavy metals were analyzed from 2 000 more samples of pig manures and 1 700 more farmland soil samples included in these references. It was founded that Cu has highest over standard rate in the pig manure, then followed by Zn; but Cu and Zn were accumulated little in the farmland soil although they mainly came from pig manure. Cd had the highest over standard rate in soil, then followed by Cr, but they did not mainly come from pig manure.

Key words: Pig manure; Farmland soil; Heavy metal