

# 畜禽粪肥施用对耕地土壤金属元素影响的 Meta 分析

郭暖, 郭晓明\*, 张清淼

(河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 基于 Meta 分析, 研究畜禽粪肥类型、耕作方式和施肥量对土壤中 Cu、Zn、Cd 和 As 含量的影响。结果表明: 畜禽粪肥(鸡粪、猪粪和牛粪)施用会显著提高耕地土壤中 Cu、Zn、Cd 和 As 含量, 其平均含量的增幅分别可达 18.14%、16.44%、16.61% 和 14.81%; 与施用鸡粪和牛粪相比, 施用猪粪土壤 Cu 含量增加显著, 且其 Zn 和 As 含量的增幅也最高; 高粪肥施用量( $\geq 60 \text{ t/hm}^2$ )下土壤 Cu、Zn 和 Cd 含量的增幅均达 35% 以上, 而低粪肥施用量( $\leq 30 \text{ t/hm}^2$ )下其含量的增幅均低于 20%; 旱地和水旱轮作 2 种耕作方式下施用粪肥土壤中金属元素含量显著增加, 而水田耕作方式下其含量无显著变化。

**关键词:** 金属元素; Meta 分析; 畜禽粪便; 耕地土壤

中图分类号: X53; X713

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2023)05-0068-04

## Meta-analysis of Effect of Livestock Manure Application on Metal Elements in Cultivated Soil

GUO Nuan, GUO Xiao-ming\*, ZHANG Qing-miao

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract:** The effects of livestock manure types, tillage and fertilizer application amount on the content of Cu, Zn, Cd and As in soil were studied by Meta analysis. The results showed that the application of livestock manure(chicken manure, pig manure and cow dung) significantly increased the content of Cu, Zn, Cd and As in cultivated soil, with an average increase of 18.14%, 16.44%, 16.61% and 14.81%, respectively. Compared with the application of chicken manure and cow dung, the application of pig manure significantly increased the content of Cu in the soil, and the content of Zn and As also increased the most. The content of Cu, Zn and Cd in soil with high manure application rate( $\geq 60 \text{ t/hm}^2$ ) increased by more than 35% while that with low manure application rate( $\leq 30 \text{ t/hm}^2$ ) increased by less than 20%. The content of metal elements in the soil applied with manure increased significantly under dry farming and water-dry rotation cultivation, but did not change significantly under paddy cultivation.

**Key words:** Metal elements; Meta-analysis; Livestock manure; Cultivated soil

近年来,我国耕地土壤环境质量状况不容乐观。2014年4月17日,由原环境保护部和原国土资源部联合发布的全国土壤污染状况调查公报表明,全国16.1%的土壤污染物超标<sup>[1]</sup>。我国是畜禽养殖大国,每年产生的畜禽粪污约38亿t<sup>[2]</sup>。由于约80%的畜禽粪便没有经过综合无害化处理,直接被施用于农田<sup>[3]</sup>,从而引发土壤的金属元素污染问题<sup>[4-5]</sup>。相关研究表明,畜禽粪便还田后虽然会改变土壤中金属元素含量<sup>[6-7]</sup>,但土壤中金属

元素含量的变化趋势却各有不同<sup>[8-11]</sup>。研究结果的差异反映出单个研究具有较大的不确定性和偏差,不能较好地反映畜禽粪便还田对土壤中金属

收稿日期:2022-09-07;修订日期:2023-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42177070, 41502241);国家重点实验室开放基金资助项目(GBL22104);河南省高校基本科研业务费专项基金资助项目(NSFRF210321)

作者简介:郭暖(2000—),女,河南商水人,在读研究生,研究方向为土壤和地下水污染。

\*通信作者:郭晓明 E-mail: guoxiaoming@hpu.edu.cn

元素含量影响的普遍规律,给畜禽粪便还田下土壤金属元素污染行为的科学认识带来一定不确定性。

目前,国内有关畜禽粪肥施用对土壤金属元素影响的 Meta 分析研究鲜见报道。今采用 Meta 分析方法,以中国知网、万方和 Web of science 已发表文献数据为基础,以土壤中金属元素含量作为 Meta 分析的效应量,系统分析畜禽粪肥施用对土壤金属元素的影响,为我国农业有机废弃物资源化的合理利用提供理论支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

通过中国知网数据库 (<http://www.cnki.net/>)、万方和 Web of science,以“畜禽粪便 (live-stock manure)”“土壤 (Soil)”“金属元素 (heavy metal)”和“中国 (China)”为主要关键词检索相关期刊文献,收集的文献数据时间为 2002—2021 年。文献中实验数据筛选标准如下:①实验地点在中国;②同一实验中必须包含不施肥处理和施用畜禽粪肥 (固体粪肥、液体粪肥) 处理;③文中不同实验处理重复次数不少于 3 次。

### 1.2 数据库建立与分类

基于以上标准,筛选出 56 篇文献,共收集 685 组数据。采用 Excel 2019 软件建立施用畜禽粪肥与土壤金属元素关系的数据库,收集内容主要包括:作者、标题、实验年份、采样深度、土壤类型、土壤 pH 值、施肥量、粪肥类型、土壤金属元素含量。获得的数据需要包含相应的标准差 (SD),若文献中是标准误 (SE),则需要通过公式  $SD = SE\sqrt{n}$  进行转化,其中  $n$  代表实验重复次数。若文献中不含有标准差 (SD),则按照金属元素含量平均值的 1/10 作为标准差 (SD)<sup>[12]</sup>。在提取数据时,要对文献中提取的数据进行标准化处理 (如果是室内盆栽实验,那么以每亩耕层土壤质量为  $15 \times 10^4$  kg 进行单位换算<sup>[13]</sup>)。在提取数据的过程中,若数据是以图的形式呈现,则采用 Engauge Digitizer 进行数字化转换后再提取。

### 1.3 数据 Meta 分析及处理

为进一步探索不同条件下施用畜禽粪肥对土壤金属元素的影响,将提取的所有数据划分为 3 个子类别:①畜禽粪肥类型 (猪粪、鸡粪、牛粪);②土壤耕作方式 (水田、旱地、水旱轮作);③施肥量 (低

量施肥  $\leq 30$  t/hm<sup>2</sup>、中量施肥  $30$  t/hm<sup>2</sup> ~  $60$  t/hm<sup>2</sup>、高量施肥  $\geq 60$  t/hm<sup>2</sup>)。数据均来自相对独立的研究,可以采用 Meta 分析了解中国区域内施用畜禽粪肥对土壤中金属元素含量产生的正负效应及效应值大小。每组数据分为对照组 (不施用畜禽粪肥) 和实验组 (施用畜禽粪肥),实验土壤中金属元素含量采用自然对数的响应比 (Response Ratio, RR) 作为效应量<sup>[14]</sup>。其具体算法为:

$$\ln RR = \ln \left( \frac{\bar{X}_d}{\bar{X}_w} \right) \quad (1)$$

式中:  $\bar{X}_d$  和  $\bar{X}_w$  分别为实验组和对照组中土壤金属元素含量的平均值。

当  $X_d$  和  $X_w$  符合正态分布且  $X_w$  不等于 0 时,  $\ln RR$  也为近似正态分布,其方差为:

$$V_{\ln RR} = \frac{SD_d^2}{N_d (\bar{X}_d)^2} + \frac{SD_w^2}{N_w (\bar{X}_w)^2} \quad (2)$$

式中:  $N_d$  和  $N_w$  分别为实验组和对照组的对应样本;  $SD_d$  和  $SD_w$  分别为实验组和对照组土壤金属元素含量的标准差。

对每个独立研究的响应比进行加权得到加权平均响应 ( $RR_{++}$ ):

$$V = SD_d^2 / (N_d \times X_d) + SD_w^2 / (N_w \times X_w) \quad (3)$$

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{V} \quad (5)$$

式中:  $W_{ij}$  为权重系数,采用变异系数的倒数表示<sup>[15]</sup>;  $V$  为平均值变异系数。

最终获得的相关数据通过 Meta Win 2.1 软件进行处理。处理过程中,需要对各研究结果进行异质性检验,如果各研究结果具有同质性,那么选择固定效应模型;反之,采用随机效应模型。为了更加直观地描述结果,将  $\ln RR_{++}$  的分析结果转化成百分比变化率  $(e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 。当效应量的 95% 置信区间包含 0 时,表明实验组的效应量等于对照组,实验组与对照组对研究对象的影响程度相当 ( $p > 0.05$ ); 当其 95% 置信区间的值均  $> 0$  时,表明实验组的效应量大于对照组 ( $p < 0.05$ ); 当其 95% 置信区间的值均  $< 0$  时,表明实验组的效应量小于对照组 ( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 畜禽粪肥类型对土壤金属元素的影响

畜禽粪肥类型、施用量和耕作方式对土壤金属元素含量的影响见表 1。由表 1 可知,粪肥类型对耕地土壤金属元素含量具有显著的影响。畜禽粪肥(鸡粪、猪粪和牛粪)施用能够显著提高耕地土壤中金属元素 Cu、Zn、Cd 和 As 含量,其平均含量的增幅分别可达 18.14%、16.44%、16.61% 和 14.81%。与对照组相比,施用猪粪土壤中 Cu、Zn、Cd 和 As 含量均显著增加,平均增幅分别为 30.21%、23.24%、7.86% 和 18.31%;施用鸡粪土壤中 Zn、Cd 和 As 均显著增加,增幅分别为 15.67%、14.26% 和 6.90%;施用牛粪土壤中 As 含量显著增加,增幅为 15.49%。这与鸡粪、猪粪和牛粪等有机肥已成为土壤金属元素重要来源的研究结果一致<sup>[16-19]</sup>。表明与施用鸡粪和牛粪相比,施用猪粪土壤中不仅 Cu 含量增加显著,Zn 和 As 含量的增幅也最高,表明施用猪粪对土壤金属元素含量的影响效应相对最大,这可能是由于猪粪中 Cu、Zn、Cd 和 As 含量均大于鸡粪和牛粪<sup>[20]</sup>。与施用猪粪和鸡粪相比,施用牛粪土壤中 Zn 和 Cd 含

量均无显著增加,表明施用牛粪对土壤金属元素含量的影响效应相对最小,这可能与牛为食草动物有关<sup>[21]</sup>。

### 2.2 畜禽粪肥施用量对土壤中金属元素的影响

由表 1 可知,随着施粪肥量的增加土壤金属元素含量的增幅呈现出上升趋势,高施肥量( $\geq 60 \text{ t/hm}^2$ )土壤 Cu、Zn 和 Cd 含量的增幅均达到 35% 以上,而低施肥量( $\leq 30 \text{ t/hm}^2$ )土壤金属元素含量的增幅均低于 20%。李可等<sup>[16]</sup>研究发现土壤中 Cd、Cu、Zn 和 As 的全量均随鸡粪有机肥施加量的增加而增大;覃丽霞<sup>[22]</sup>也发现有机肥施用量越高,土壤金属元素 Cu、Zn 的含量越高,相应的污染指数和生态危害系数也相对增大。上述研究结果与 Meta 分析结果一致。

### 2.3 不同耕作方式下施用畜禽粪肥对土壤中金属元素的影响

由表 1 可知,耕作方式对耕地土壤中金属元素含量具有显著的影响。在旱地和水旱轮作 2 种耕作方式下,粪肥施用土壤中 Cu、Zn、Cd、As 含量均显著增加,增幅分别为 31.73% 和 22.86%、26.06% 和 56.02%、49.41% 和 16.15%、38.60% 和 5.61%,

表 1 不同粪肥类型、耕作方式和施肥量对土壤 Cu、Zn、Cd 和 As 含量的影响

Table 1 Effects of different types of manure, tillage and fertilizing amount on the content of Cu, Zn, Cd and As in soil

实验组	Cu		Zn	
	效应量(95%置信区间)	增幅/%	效应量(95%置信区间)	增幅/%
总体	0.166 7(0.135 2,0.198 2)	18.14	0.152 2(0.118 5,0.185 8)	16.44
猪粪	0.264 0(0.227 3,0.300 7)	30.21	0.209 0(0.159 5,0.258 6)	23.24
鸡粪	0.011 2(-0.062 9,0.085 3)	1.12	0.145 6(0.037 1,0.254 2)	15.67
牛粪	0.097 0(-0.024 2,0.218 3)	10.19	0.004 9(-0.152 2,0.162 0)	0.49
水田 <sup>①</sup>				
水旱轮作	0.205 9(0.138 8,0.273 0)	22.86	0.444 8(0.438 7,0.451 0)	56.02
旱地	0.275 6(0.173 1,0.378 0)	31.73	0.231 6(0.210 9,0.252 3)	26.06
低施肥量	0.170 9(0.114 1,0.227 7)	18.64	0.138 6(0.095 6,0.181 7)	14.87
中施肥量	0.212 4(0.115 4,0.309 3)	23.66	0.170 5(0.097 9,0.243 0)	18.59
高施肥量	0.312 8(0.207 7,0.417 8)	36.72	0.343 2(0.265 1,0.421 4)	40.59
实验组	Cd		As	
	效应量(95%置信区间)	增幅/%	效应量(95%置信区间)	增幅/%
总体	0.153 7(0.124 5,0.183 0)	16.61	0.138 1(0.103 4,0.172 8)	14.81
猪粪	0.075 7(0.067 2,0.084 2)	7.86	0.168 1(0.124 9,0.211 3)	18.31
鸡粪	0.133 3(0.120 3,0.146 3)	14.26	0.066 7(0.003 8,0.129 5)	6.90
牛粪	-0.075 8(-0.100 5,-0.051 1)	-7.30	0.144 0(0.032 5,0.255 6)	15.49
水田	0.037 6(-0.094 3,0.169 5)	3.83	0.046 4(-0.028 7,0.121 4)	4.75
水旱轮作	0.149 7(0.106 5,0.192 9)	16.15	0.054 6(0.016 9,0.092 4)	5.61
旱地	0.401 5(0.331 8,0.471 2)	49.41	0.326 4(0.267 5,0.385 3)	38.60
低施肥量	0.139 7(0.075 2,0.204 3)	14.99	0.097 0(0.079 3,0.114 8)	10.19
中施肥量	0.280 5(0.098 3,0.462 7)	32.38	0.129 7(0.077 6,0.181 8)	13.85
高施肥量	0.334 4(0.176 8,0.492 0)	39.71	0.234 3(0.180 1,0.288 5)	26.40

①收集的文献中关于水田的 Cu、Zn 数据较少。

而在水田耕作方式下,土壤中 Cd 和 As 含量无显著增加。较早地和水旱轮作 2 种耕作方式,水田耕作方式下施用粪肥土壤金属元素含量无显著变化;较水旱轮作耕作方式,旱地耕作方式下施用粪肥土壤 Cu、Cd 和 As 含量的增幅相对较大。分析其原因,在水田淹水条件下,土壤氧化还原环境及理化性质发生变化,使得土壤金属元素的移动性和活性增加<sup>[23-24]</sup>。此外,相比于旱地,水田土壤中含水量较高,土壤金属元素在土壤水流的作用下,其对流、扩散作用越大<sup>[25]</sup>,导致金属元素易于向深层土壤和排水中迁移,从而降低了耕作层土壤中金属元素的滞留量。

### 3 结语

采用 Meta 分析方法研究畜禽粪肥施用对土壤中金属元素含量的影响,结果表明:畜禽粪肥(猪粪、鸡粪和牛粪)施用会显著提高耕地土壤中 Cu、Zn、Cd 和 As 含量;与鸡粪和牛粪相比,猪粪还田后土壤中 Cu、Zn 和 As 含量的增幅最高;土壤中金属元素含量随畜禽粪肥施用量增大而升高,高施用量( $\geq 60 \text{ t/hm}^2$ )土壤中金属元素含量的增幅均达到 35% 以上;与旱作和水旱轮作两种模式相比,畜禽粪肥还田对水田土壤中的金属元素含量影响较小。上述研究通过整合分析畜禽粪肥施用对耕地土壤金属元素的影响,为实现畜禽粪便资源化利用和土壤生态环境安全的协调统一提供理论基础。在实际生产中,应针对不同的土壤类型,选择合适的畜禽粪肥及施用量,并且通过改变土地耕作方式等方法削弱畜禽粪肥施用后对土壤中金属元素含量的影响。

#### [参考文献]

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业,2014(5):10-11.
- [2] 牛新胜,巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1462-1479.
- [3] 国家自然科学基金委员会中国科学院. 中国学科发展战略:土壤生物学[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [4] KUMAR R R, PARK B J, CHO J Y. Application and environmental risks of livestock manure[J]. J Korean Soc Appl Bi, 2013,56(5):497-503.
- [5] 张克强,杜连柱,社会英,等. 国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2021,40(11):2472-2481.
- [6] 茹淑华,张国印,杨军芳,等. 鸡粪和猪粪对小麦生长及土壤重金属累积的影响[J]. 华北农学报,2015,30(S1):494-499.
- [7] 郭德杰,刘新红,徐丽萍,等. 连续多季施用猪粪有机肥对设施大棚中土壤及作物中 Cu、Zn 含量的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(18):283-286.
- [8] 贾武霞. 畜禽粪便施用对土壤中重金属累积及植物有效性影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
- [9] 黄小洋,邵劲松,马运涛. 施用猪粪有机肥对土壤环境质量的影响[J]. 河南农业科学,2017,46(11):60-68.
- [10] 李轶,巩俊璐,张辉,等. 不同施肥处理对污灌区土壤中 Pb、Cu 和 Zn 的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(6):731-736.
- [11] 宋姿蓉,俄胜哲,袁金华,等. 不同有机物料对灌漠土重金属累积特征及作物效应的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(19):3367-3379.
- [12] GATTINGER A, MULLER A, HAENI M, et al. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2012,109(44):18226-18231.
- [13] 冉继伟,肖琼,黄敏,等. 施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析[J]. 环境科学,2022,43(3):1688-1696.
- [14] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology,1999,80(4):1150-1156.
- [15] ADAMS D C, GUREVITCH J, ROSENBERG M S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data[J]. Ecology,1997,78(4):1277-1283.
- [16] 李可,谢厦,孙彤,等. 鸡粪有机肥对设施菜地土壤重金属和微生物群落结构的影响[J]. 生态学报,2021,41(12):4827-4839.
- [17] 穆虹宇,庄重,李彦明,等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学,2020,41(2):986-996.
- [18] 叶必雄,刘圆,虞江萍,等. 畜禽粪便农用区土壤-小麦系统中重金属污染及迁移[J]. 地理研究,2013,32(4):645-652.
- [19] 师荣光,郑向群,龚琼,等. 农产品产地土壤重金属外源污染源解析及防控策略研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(4):9-13.
- [20] 张亦菲,张浩然,徐汀,等. 上海地区畜禽粪便中的重金属含量分析[J]. 畜牧与兽医,2021,53(6):27-32.
- [21] 李林海. 畜禽粪便中的主要养分和重金属含量分析[J]. 南方农业,2018,12(23):126-128.
- [22] 覃丽霞. 养殖源有机肥的重金属污染及环境风险评价研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.
- [23] 黄斌. 重金属在稻田土壤中的吸附、富集、迁移特征及稳定化研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [24] 杨梦丽,叶明亮,马友华,等. 基于重金属有效态的农田土壤重金属污染评价研究[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(1):10-13.
- [25] 张天玑,王海芳. 重金属在土壤-地下水中的迁移模型研究——以山西、陕西黄土高原区为例[J]. 中北大学学报(自然科学版),2021,42(2):151-158.