

我国畜禽粪便重金属污染特征、环境风险与 防控策略研究进展

邹欣瑞*, 甘瑾瑜, 邱 诚, 熊 平

成都工业学院材料与环境工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年9月18日; 录用日期: 2026年10月17日; 发布日期: 2026年10月27日

摘 要

随着我国畜禽养殖业集约化、规模化程度的不断提高, 畜禽粪便中重金属污染问题日益凸显, 已成为制约农业绿色发展和威胁生态环境安全的重要因素。本文系统综述了我国畜禽粪便重金属污染的研究进展, 从污染来源、含量特征、空间分布、环境风险及防控措施等方面进行了全面梳理与分析。研究表明, 饲料添加剂是畜禽粪便重金属的主要来源, 铜和锌的富集最为显著; 不同畜种间重金属含量差异明显, 总体呈现猪 > 家禽 > 牛的特征; 固态粪肥中重金属富集程度显著高于液态粪肥; 区域分布上呈现经济发达养殖密集区高于欠发达地区的特征; 铜和镉是粪肥还田利用中风险发生频率最高的重金属元素。本文从源头管控、过程处理和末端监管三个层面提出了综合防控策略, 并对未来研究方向进行了展望, 以期为我国畜禽粪便重金属污染防治和粪肥安全还田利用提供科学参考。

关键词

畜禽粪便, 重金属污染, 污染特征, 环境风险, 防控策略

Research Review on Pollution Characteristics, Environmental Risks and Control Strategies of Heavy Metals in Livestock and Poultry Manure in China

Xinrui Zou*, Jinyu Gan, Cheng Qiu, Ping Xiong

School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: September 18, 2026; accepted: October 17, 2026; published: October 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 邹欣瑞, 甘瑾瑜, 邱诚, 熊平. 我国畜禽粪便重金属污染特征、环境风险与防控策略研究进展[J]. 农业科学, 2026, 16(10): 1538-1545. DOI: 10.12677/hjas.2026.1610183

Abstract

With the continuous improvement of intensification and scale of livestock and poultry breeding in China, the problem of heavy metal pollution in livestock and poultry manure has become increasingly prominent, which has become an important factor restricting the green development of agriculture and threatening the safety of ecological environment. This paper systematically reviews the research progress of heavy metal pollution in livestock and poultry manure in China, and comprehensively combs and analyzes the pollution sources, content characteristics, spatial distribution, environmental risks and control measures. The results show that feed additives are the main source of heavy metals in livestock and poultry manure, and the enrichment of copper and zinc is the most significant. There are obvious differences in heavy metal contents among different livestock species, generally showing the characteristics of pig > poultry > cattle. The enrichment degree of heavy metals in solid manure fertilizer is significantly higher than that in liquid manure fertilizer. The regional distribution shows that the areas with developed economy and intensive breeding are higher than the underdeveloped areas. Copper and cadmium are the heavy metal elements with the highest risk frequency in the application of manure fertilizer to farmland. This paper puts forward comprehensive control strategies from three aspects: source control, process treatment and end supervision, and looks forward to the future research direction, in order to provide scientific reference for the prevention and control of heavy metal pollution in livestock and poultry manure and the safe application of manure fertilizer to farmland in China.

Keywords

Livestock and Poultry Manure, Heavy Metal Pollution, Pollution Characteristics, Environmental Risk, Control Strategy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是世界最大的畜禽养殖国，畜禽养殖业在保障畜产品供给、促进农民增收和推动农村经济发展方面发挥着不可替代的作用。然而，随着畜禽养殖业从传统散养向集约化、规模化生产快速转型，畜禽粪污产生量急剧增加，已成为农业面源污染的主要来源之一。第二次全国污染源普查公报结果显示，畜禽粪污已居农业源污染之首[1]。

在畜禽养殖过程中，为促进动物生长、预防疾病和提高饲料转化率，含铜、锌等重金属元素的饲料添加剂被广泛使用。然而，畜禽对这些微量元素的吸收利用率极低，研究表明仅有 5%~30% 被机体吸收，其余 70%~95% 随粪便排出体外，导致畜禽粪便中重金属含量持续升高，对周边土壤、水体和大气环境构成潜在威胁[2]。方林冲等[3]通过小鼠饲喂试验验证了这一规律，研究发现小鼠粪便中铅和镉含量与饲料中铅、镉添加量呈显著正相关($P < 0.05$)，且粪便中重金属含量远高于饲料中同种元素含量，证实了重金属在动物排泄物中的富集效应。与此同时，畜禽粪便作为有机肥还田利用是推动种养循环、改善土壤肥力的重要途径，但长期大量施用含有重金属的粪肥，会导致土壤重金属累积，并通过食物链传递威胁农产品安全和人体健康[4] [5]。

在此背景下，如何科学认识畜禽粪便重金属污染现状、准确评估其环境风险并采取有效防控措施，成为保障粪肥安全还田和农业可持续发展的关键科学问题。近年来，国内外学者围绕畜禽粪便重金属污

染开展了大量研究工作，在污染来源解析、含量特征分析、环境风险评估及污染治理技术等方面取得了重要进展。本文基于国内相关研究成果，对我国畜禽粪便重金属污染的来源、含量特征、空间分布、环境风险及防控措施进行全面综述，以期对畜禽粪便重金属污染防治和粪肥安全还田利用提供科学参考。

2. 畜禽粪便重金属含量特征

2.1. 不同畜种含量差异

我国不同畜种粪便中重金属含量存在显著差异[6]。猪粪便中铜和锌的含量显著高于牛粪和鸡粪。黄亚捷等[7]基于 2004~2025 年 10327 个有效数据样本构建的全国多源畜禽粪肥重金属数据库，系统揭示了不同畜种粪便重金属含量的分异特征。具体而言，猪粪便中铜平均含量为 531.37 mg/kg，锌平均含量为 1019.98 mg/kg；家禽粪便中铜平均含量为 96.05 mg/kg，锌平均含量为 346.17 mg/kg；牛粪便中铜平均含量为 56.93 mg/kg，锌平均含量为 221.27 mg/kg。猪粪便中铜含量是牛粪的 9.3 倍，锌含量是牛粪的 4.6 倍。

王朝阳等[8]对甘肃武威地区畜禽粪便堆肥中重金属含量的分析进一步印证了这一规律。该研究采集牛粪堆肥 112 份、猪粪堆肥 32 份、鸡粪堆肥 83 份，检测结果表明猪粪堆肥中铜、锌及镉浓度与鸡粪、牛粪堆肥之间存在统计上的显著差异($P < 0.05$)，其中猪粪堆肥中锌平均含量为 629.89 mg/kg，铜平均含量为 184.80 mg/kg；而牛粪堆肥中锌和铜的平均含量分别为 257.99 mg/kg 和 72.62 mg/kg。值得注意的是，该研究中猪粪堆肥的铜、锌含量低于黄亚捷等报道的全国平均水平，这可能与采样区域饲料配方和养殖管理模式的差异有关，提示不同地区之间即使同一畜种的粪便重金属含量也存在较大变异。

在其他重金属元素方面，不同畜种也呈现各自的特征。铬在家禽粪便中含量较高，平均贡献比例达 53.45%；镉在家禽粪便中的贡献比例高达 70.09%。纪立东等对宁夏吴忠市的研究表明，奶牛粪便中铅、铜、锌、镉、铬的残留量最高，其中铬和铜的超标率分别达 6.67%和 3.33%。这一发现与全国尺度的研究结论有所不同，可能与西北地区奶牛养殖中饲料添加剂使用习惯以及区域地质背景有关。总体而言，不同畜种粪便中重金属含量呈现猪 > 家禽 > 牛的特征规律，这与饲料添加剂使用强度直接相关。黄亚捷等量化了不同畜种对粪肥重金属输入的贡献比例，在粪便中猪对锌和铜含量的贡献比例分别达 64.25%和 77.65%，远高于家禽(锌：21.81%，铜：14.04%)和牛(锌：13.94%，铜：8.32%)，进一步证实了猪粪是粪肥重金属输入的主要贡献者。

2.2. 不同粪肥类型含量差异

畜禽粪肥根据处理方式和形态可分为固态粪肥(粪便、有机肥)和液态粪肥(沼液)。研究表明，固态粪肥中重金属的富集程度显著高于液态粪肥，这一特征与粪污处理工艺密切相关。畜禽粪污经厌氧发酵后，大部分重金属因物理沉降和化学吸附作用沉淀于固态残渣中，导致沼液中重金属浓度大幅降低。

以猪粪源为例，粪便中铜、锌平均含量分别为 531.37 mg/kg 和 1019.98 mg/kg；由猪粪加工制成的有机肥中铜、锌平均含量分别为 419.68 mg/kg 和 912.87 mg/kg；而沼液中铜、锌平均含量显著降低，粪便中铜、锌含量分别是沼液中的 50 倍和 110 倍以上。这表明饲料中的重金属添加剂主要进入畜禽排泄物的固体部分，厌氧发酵过程对液态部分具有一定的净化作用。

方林冲等通过小鼠饲喂试验证实了重金属主要随粪便排出的规律，研究表明小鼠经口摄入的铅有 90%以上会通过粪便排出。这与黄亚捷等关于固态粪肥重金属富集程度显著高于液态粪肥的结论相互印证，从机理层面解释了固液分配差异的原因。

2.3. 区域分布特征

畜禽粪便重金属含量在区域分布上呈现明显差异，总体表现为经济发达、养殖密集区域高于欠发达

地区。黄亚捷等的研究显示,样本来源覆盖河南、四川、山东等我国主要畜牧养殖产区,不同区域粪便重金属含量存在较大变异。纪立东等对宁夏吴忠市不同区县的调查表明,利通区和青铜峡市畜禽粪便中铅的残留量较高,分别为 10.58 mg/kg 和 9.01 mg/kg;同心县铅残留量最低,为 2.85 mg/kg。在铜的残留量方面,利通区和青铜峡市同样较高,分别为 39.60 mg/kg 和 44.28 mg/kg;红寺堡区最低,为 18.23 mg/kg。这种区域差异与各地养殖规模、饲料配方和经济发展水平密切相关。

3. 畜禽粪便重金属环境风险评估

3.1. 评价标准与方法

开展畜禽粪便重金属环境风险评估,需参照相关标准。目前,粪便中镉、铬、铅、汞的残留量可参照《有机肥料》(NY/T 525-2021)进行评价,铜、锌的限量标准可参考相关文献。依据 NY/T 1334-2007《畜禽粪便安全使用准则》,粪便中铜限值为 600 mg/kg,锌限值为 3400 mg/kg;有机肥中铜、锌限值参照 GB 38400-2019《肥料中有毒有害物质的限量要求》,分别为 100 mg/kg 和 400 mg/kg;沼液中铜、锌限值参照 GB/T 40750-2021《农用沼液》及德国腐熟堆肥标准。

然而,现行评价标准体系存在明显不足。一方面,国家层面尚未出台有机肥和沼液中锌、铜的含量限值标准,实际监管中缺乏明确依据;另一方面,NY/T 1334-2007 中对粪便铜、锌的限值远宽松于国际公认标准,难以有效管控高含量锌、铜粪肥的还田利用。此外,现有标准对不同畜种、不同处理产物的差异化考量不足,未针对猪、家禽等重金属高富集畜种制定更严格的限量要求。在评价方法上,传统方法多采用超标率法和单因子指数法,主要关注污染“量”的累积程度,难以捕捉重金属组成的内在结构变化。邱诚等[9]提出的几何指纹识别方法通过构建风险熵雷达图,实现了污染总量与结构畸变的双维解耦评估,为畜禽粪便重金属风险评价提供了新思路。

3.2. 风险发生频率

黄亚捷等基于 10327 个有效数据样本的分析表明,不同粪肥中重金属的风险发生频率呈现粪便 > 有机肥 > 沼液的规律。在粪便中,铜的风险发生频率最高,猪和家禽粪便中铜平均浓度均超过限值,风险发生频率分别为 29%和 5%;镉的风险次之,在猪、家禽、牛粪便中的风险发生频率分别为 22%、15%和 15%;家禽粪便中铬、汞、锌和砷的风险发生频率分别为 10%、7%、3%和 3%。

在有机肥中,猪粪源有机肥中铜的风险发生频率为 26%,镉为 3%,铅为 3%,砷为 10%。沼液中各类重金属的风险发生频率总体较低。上述结果表明,铜和镉是粪肥还田利用中需要优先关注和管控的重金属元素。这一结论与纪立东等对宁夏吴忠市的研究结果部分一致,该研究同样发现铜是畜禽粪便中最主要的风险元素之一。

3.3. 单位面积输入量

在综合考虑施用量与重金属含量的情况下,粪便还田时带来的单位面积重金属输入量最高。以猪粪为例,粪便中铜的单位面积输入量达 10627.40 g/hm²,锌为 20399.60 g/hm²。值得注意的是,沼液虽重金属浓度较低,但推荐施用量(30,000 kg/hm²)远高于粪便(20,000 kg/hm²)和有机肥(4500 kg/hm²),导致牛沼液和家禽沼液中汞的单位面积输入量分别达 3.02 g/hm²和 2.49 g/hm²,超过固态粪肥中汞的输入量。这一发现提示,在评估粪肥环境风险时不能仅关注重金属含量,还需结合实际施用量进行综合判断。

从风险管控的角度来看,粪便还田利用时单位面积重金属输入量最高,应作为优先管控对象;而沼液虽然重金属浓度较低,但因施用量大,其部分重金属(如汞)的单位面积输入量已超过固态粪肥,同样不可忽视。邱诚等的研究进一步指出,污染总量与结构畸变之间存在随机性解耦关系,这意味着仅依赖浓

度总量的传统评价方法无法准确评估结构畸变带来的生态环境风险，需要引入双维指标进行综合评判。

4. 畜禽粪便重金属污染的生态环境影响

4.1. 对土壤性质的影响

重金属进入土壤后，会与土壤胶体发生吸附、络合等反应，改变土壤电荷特性和离子交换能力，破坏土壤原有的化学平衡[10]。其累积会显著降低土壤孔隙度与透气性，阻碍水分渗透与根系伸展，导致土壤板结。同时，重金属对土壤微生物具有毒性效应，抑制微生物活性和酶功能，削弱有机质分解与养分循环过程，降低土壤肥力。此外，部分重金属在土壤中可转化为可溶性形态，随降水淋溶至深层土壤或地下水，扩大污染范围，威胁水环境安全[11]。

4.2. 对植物生长的影响

土壤重金属污染对植物的影响贯穿生理到生态多个层面。高浓度重金属会破坏植物细胞膜结构，干扰离子通道功能，导致水分和养分吸收受阻，发生叶片萎蔫、黄化等生长抑制现象[12]。重金属还会抑制光合作用关键酶活性，降低叶绿素合成效能，使植物光合速率下降，生物量积累减少。部分重金属可在植物体内富集，干扰激素平衡与基因表达，引发根系畸形、开花延迟等发育异常。土壤重金属污染还会降低植物抗逆性，使其更易受病虫害侵袭，导致物种多样性下降与生态系统功能退化[13]。

4.3. 对水体与大气的影晌

土壤中的重金属经雨水冲刷、淋溶等作用渗入地下水，导致地下水源遭受污染。其难以自然降解，长期积累使水质恶化，威胁饮用水安全。地表水体接纳含重金属的径流后，重金属在水体中迁移转化，破坏水生生态系统平衡，经食物链传递在更高营养级生物体内富集，最终经水产品等途径进入人体，危害人体健康[14]。

在大气方面，土壤中的重金属在风力作用下形成扬尘，直接进入大气环境，增加空气中颗粒物浓度从而降低空气质量。这些重金属颗粒物可被人体吸入，沉积在呼吸道和肺部，引发呼吸系统疾病。同时，大气中的重金属还会参与光化学烟雾等大气化学反应，生成二次污染物，进一步恶化大气环境[15]。

5. 畜禽粪便重金属污染防控策略

5.1. 源头管控

源头管控是治理畜禽粪便重金属污染的最根本途径。在饲料优化方面，应推广使用有机形态的生物复合型微量元素，替代无机矿物质添加剂，在保障畜禽健康和生产性能的前提下减少重金属的添加量。陈志祥等指出，研究和应用环保型饲料是未来饲料工业发展的必然趋势。在饲料中添加中草药(如艾叶、大蒜、苍术等)等天然添加剂，既能促进畜禽生长发育，又能减少矿物质用量、降低饲料成本。

在标准完善方面，应健全重金属限量标准体系。当前我国畜禽粪肥还田利用的重金属限量标准体系尚不完善，存在限值宽松、覆盖不全的问题。应针对不同畜种制定更为严格的饲料添加剂限量标准，并建立从“饲料-养殖-粪污-粪肥-还田”的全链条追溯体系。刘元鹏[16]建议，应制定涉重金属行业准入清单，实施环评审批等量替换政策，从源头削减污染排放。

5.2. 过程处理

在粪污处理环节，好氧堆肥是目前最简便有效的无害化处理方法。堆肥过程中，微生物将有机物分解转化的同时，可将重金属络合固定，降低其生物有效性。高温堆肥因无害化程度高、处理时间短、规

模易放大、适于工厂化生产等优点，逐渐成为畜禽粪便处理的首选方式。

添加钝化剂可进一步强化对重金属的吸附和固定效果。常用的钝化剂主要包括物理钝化剂(如硅酸盐物质、生物炭、沸石、膨润土、海泡石等)、化学钝化剂和生物钝化剂。物理钝化剂具有容易获得、原理简单和操作简便等优点；化学钝化效果好但易造成二次污染；生物钝化剂通过微生物代谢活动将重金属离子转化为不易被植物吸收的形态，处理费用低、修复效率高，是较为理想的治理途径[17]。王朝阳等通过堆肥添加实验发现，在畜禽粪便堆肥中添加 10% 的木屑可有效降低牛粪、猪粪中铜含量以及牛粪、猪粪、鸡粪中锌含量；添加 10% 的秸秆或木屑均可降低鸡粪中镉含量和牛粪、鸡粪中铅含量，为钝化剂的实际应用提供了数据支撑。

沼气发酵是另一种重要的粪污处理方式。厌氧发酵可有效降低粪肥中重金属含量，同时产生清洁能源沼气，沼液和沼渣还田后还能改善土壤肥力[18]。不同处理工艺的选择应因地制宜，综合考虑资源化利用效率和重金属去除效果。

5.3. 无害化处理方法对比

畜禽粪便无害化处理技术的选择需综合考虑粪污形态、处理规模、资源化利用目标和重金属去除效果等因素。目前应用最为广泛的处理方法包括好氧堆肥、厌氧发酵、物理钝化和生物钝化四类，各类方法在重金属钝化效果、处理效率和适用条件上各有优劣，见表 1。

Table 1. Comparison of main harmless treatment methods for livestock and poultry manure
表 1. 畜禽粪便主要无害化处理方法对比

无害化处理方法	主要原理	优点	缺点	适用对象
好氧堆肥	微生物好氧分解有机物，络合固定重金属	无害化程度高、处理时间短、适于工厂化生产	需控制温度湿度、占地面积较大	固态粪便
厌氧发酵	微生物厌氧代谢产生沼气，重金属沉淀于沼渣	产生清洁能源、改善土壤肥力	周期较长、沼液施用量大	液态粪污
物理钝化	添加吸附材料(生物炭、沸石等)固定重金属	操作简便、成本较低	钝化剂与堆肥难分离	各类粪肥
生物钝化	微生物代谢转化重金属形态	处理费用低、修复效率高、无二次污染	周期较长、环境条件要求高	各类粪肥

由表 1 可知，好氧堆肥和厌氧发酵分别适用于固态粪便和液态粪污的规模化处理，是当前畜禽粪污资源化利用的主流技术；物理钝化和生物钝化则可作为辅助手段，与堆肥或发酵工艺联合使用，进一步降低粪肥中重金属的生物有效性。实际应用中，应根据养殖场规模和粪污特性，因地制宜地选择单一或组合处理工艺，以实现无害化与资源化的双重目标。

5.4. 末端监管

末端监管是保障粪肥安全还田的最后防线。在监测网络建设方面，应构建“国家－省－市－县”四级土壤－粪肥协同监测网络，将中小规模养殖场纳入监管范围，实现对粪污生产、处理到还田的全链条质量监控。应强制涉重金属企业安装在线监测设备，实时上传废水、废气中重金属浓度数据至环保监管平台，利用大数据分析技术识别异常排放行为。

在部门协同方面，应建立多部门协同监管机制，明确农业农村、生态环境等部门的职责划分，形成监管合力。推行企业环境信用评价制度，将重金属排放达标情况与信贷、税收等政策挂钩。完善信息公

开制度,保障公众知情权,落实公众举报奖励机制,形成政府、企业、公众协同共治格局。

在风险预警方面,应积极探索基于大数据的区域重金属污染风险评估模型与预警系统,整合饲料使用、养殖规模、粪肥流向、土壤监测等多源数据,实现风险的精准识别和及时预警。邱诚等提出的几何指纹识别框架为构建结构预警系统提供了新思路,通过设定综合风险面积(S_{area})和变异系数(CV)的双重阈值,可以将粪肥样本分为不同风险等级,对高畸变样本实施更加严格的管控措施。

6. 结论与展望

本文系统综述了我国畜禽粪便重金属污染的研究进展,主要结论如下:

第一,我国畜禽粪便中铜和锌的富集最为突出,猪粪中铜、锌含量显著高于牛粪和家禽粪,这与饲料添加剂使用强度的差异直接相关。固态粪肥中重金属富集程度显著高于液态粪肥,重金属主要富集于固体部分。

第二,不同畜种间的重金属富集差异明显,总体呈现猪 > 家禽 > 牛的特征。区域分布上,经济发达、养殖密集区域的粪便重金属含量普遍较高。

第三,风险评估表明,铜和镉是粪肥还田利用中风险发生频率最高的重金属元素。粪肥还田利用时单位面积重金属输入量最大,但沼液中部分重金属因施用量大同样不可忽视。

第四,应从源头管控、过程处理和末端监管三个层面协同推进,包括完善限量标准体系、推广优化堆肥与钝化技术、构建全链条监管体系等措施,以保障畜禽粪肥的安全还田利用。

未来研究应进一步拓展至更多畜禽类型和不同区域,深入开展重金属在土壤-作物系统中的迁移转化规律及形态变化研究。同时,应整合重金属形态分析和生物有效性评价,完善风险评估体系。此外,探索基于人工智能和大数据技术的粪肥重金属污染动态预警方法,将为农业绿色可持续发展提供更坚实的科技支撑。

基金项目

2026 年四川省大学生创新创业训练计划项目(省级,我国畜禽粪便重金属污染特征,项目编号:S202611116053)。

参考文献

- [1] 纪立东,司海丽,刘莉莲,等. 吴忠市畜禽粪便重金属残留累积特征与评价[J]. 宁夏农林科技, 2022, 63(12): 35-37.
- [2] 李臣芝. 土壤重金属污染的环境影响评价与管理策略研究[J]. 清洗世界, 2026, 46(6): 169-171.
- [3] 方林冲,邢维芹,许春红,等. 饲喂污染饲料对小鼠粪便重金属含量的影响研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(6): 172-177.
- [4] Li, J., Dai, J. and Yang, L. (2025) Heavy Metal Enrichment Characteristics and Synergistic Evaluation in Soil-Crop-Human Systems of Agricultural Land with Different Soil Parent Materials. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, Article No. 71. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02382-3>
- [5] Luo, S., Liang, P., Li, X., Li, Z., Zou, T., Li, C., et al. (2026) Source Analysis and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil-Rice System in Nandu River Basin, Zhanjiang City, Guangdong Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, Article No. 100. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14959-7>
- [6] 陈志祥,董乐辉,杨倩,等. 我国畜禽粪便重金属污染情况及处理措施[J]. 现代园艺, 2019(11): 30-31.
- [7] 黄亚捷,赵计伟,崔艳智,等. 我国主要畜禽粪肥重金属污染特征及风险评估[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(7): 167-178.
- [8] 王朝阳,马强,张晋. 畜禽粪便堆肥中重金属含量实验研究[J]. 现代畜牧科技, 2025, 53(2): 27-30.
- [9] Qiu, C., Yi, J.J., Fan, S.B., et al. (2026) Quantifying the Decoupling of Pollution Magnitude and Geochemical Signatures

- in Livestock Manure: A Novel Geometric Fingerprint Approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, **198**, Article No. 502. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15360-8>
- [10] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- [11] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [12] 刘春红, 张亮, 贾学梓, 等. 我国土壤重金属污染环境风险评价方法及防治措施探讨[J]. 环境影响评价, 2024, 46(6): 1-5+14.
- [13] 李书田, 刘荣乐. 国内外关于有机肥料中重金属安全限量标准的现状与分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 777-782.
- [14] 张硕峰. 土壤重金属污染的环境影响评价及管理分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(24): 187-189.
- [15] 周李蕾. 土壤重金属污染的环境影响评价及管理分析[J]. 四川有色金属, 2024, 39(1): 54-57.
- [16] 刘元鹏. 土壤重金属污染土壤环境影响评价及修复方法[J]. 科技资讯, 2020, 18(21): 97-98+101.
- [17] Cui, W., Li, X., Duan, W., Xie, M. and Dong, X. (2023) Heavy Metal Stabilization Remediation in Polluted Soils with Stabilizing Materials: A Review. *Environmental Geochemistry and Health*, **45**, 4127-4163. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01522-x>
- [18] 刘趁. 全国绿色种养循环农业试点县畜禽粪污综合利用率达 93.5% [EB/OL]. 2024-06-13. http://www.agri.cn/zx/nyyw/202406/t20240613_8642094.htm, 2026-10-21.