

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

基于 Meta 分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应

姜继韶¹, 侯睿¹, 崔慧林¹, 闫广轩¹, 刘栋²

(1. 河南师范大学环境学院, 河南省环境污染控制重点实验室, 黄淮水污染控制教育部重点实验室, 新乡 453007; 2. 中国科学院昆明植物研究所, 云南省真菌多样性与绿色发展重点实验室, 中国西南野生生物种质资源库, 昆明 650201)

摘要: 为了综合评估蚯蚓堆肥在不同控制条件下堆肥质量和重金属的转化规律, 综述了 109 篇文献, 通过 Meta 分析定量探讨了蚯蚓种类、预堆肥时间、通风方式、初始 C/N、初始 pH 和初始含水率对提高蚯蚓堆肥质量和降低重金属毒性方面的影响。结果表明, 以上 6 分组因子均显著影响堆肥的质量和重金属毒性。经过蚯蚓堆肥后, 以下营养指标含量显著增加: NO_3^- -N (116.2%)、TN (29.1%)、TP (31.2%) 和 TK (15.0%); 而 NH_4^+ -N 含量 (-14.8%) 和 C/N (-36.3%) 显著降低; 同时也显著降低了最终堆肥中 Cu 和 Cr 总量及其生物有效性。综合考虑不同分组因子对堆肥质量和重金属影响的显著程度, 若堆肥以促进腐熟和富集营养元素为目的, 则建议堆体物料的初始含水率调节为 70% ~ 80%、C/N 为 30 ~ 85 和 pH 为 6 ~ 7, 并进行 0 ~ 15 d 的预堆肥, 通风方式采用自然放置方法; 若以削弱物料中重金属危害为主要目的, 则建议调节物料初始含水率为 50% ~ 60%、C/N 小于 30 和 pH 为 7 ~ 8, 不进行预堆肥, 定时翻堆, 引用 *Eudrilus eugeniae* 种类进行蚯蚓堆肥。

关键词: 蚯蚓堆肥; Meta 分析; 堆肥质量; 重金属; 生物有效性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3047-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306160

Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis

JIANG Ji-shao¹, HOU Rui¹, CUI Hui-lin¹, YAN Guang-xuan¹, LIU Dong²

(1. Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environmental Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Germplasm Bank of Wild Species, Yunnan Key Laboratory for Fungal Diversity and Green Development, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the effects of vermicomposting on compost quality and the conversion of heavy metals under different control conditions, 109 studies were reviewed. The effects of earthworm species, pre-compost time, ventilation methods, initial C/N, initial pH, and initial moisture of the raw materials on compost quality and the heavy metal toxicity were quantitatively discussed during the vermicomposting process through Meta-analysis. The results showed that the six subgroups of factors all showed obvious influences on the compost quality and heavy metal toxicity. After vermicomposting, the contents of NO_3^- -N (116.2%), TN (29.1%), TP (31.2%), and TK (15.0%) were significantly increased, whereas NH_4^+ -N (-14.8%) and C/N (-36.3%) were significantly decreased. Meanwhile, the total amount of Cu and Cr of the final compost and their bioavailability were significantly reduced. Considering the influences of grouping factors on compost quality and heavy metals, it is recommended to adjust the initial moisture of pile materials to 70%-80%, C/N to 30-85, and pH to 6-7 and to conduct pre-composting for 0-15 d; additionally, vermicomposting should be naturally placed when the composting is aimed at promoting the compost quality. If the main purpose is to weaken the perniciousness of heavy metals in the raw material, it is recommended to adjust the initial moisture of the material to 50%-60%, C/N to less than 30, and pH to 7-8; to conduct no pre-compost; regularly turn the piles; and use the earthworm *Eudrilus eugeniae* for vermicomposting.

Key words: vermicomposting; Meta-analysis; compost quality; heavy metals; bioavailability

据估计, 全球每年产生 11.2 亿 t 固体废物, 其中约 46% 为有机废物, 主要包括禽畜粪便、污水污泥、农作物秸秆、厨余垃圾和园林绿化垃圾等^[1,2]。这些有机废物含有作物所需的大量营养物质, 如氮磷钾等, 但若处置不当或随意丢弃不仅会造成资源浪费, 还会造成环境问题, 如对空气、水和土壤的污染等^[3]。好氧堆肥已被证明是一种处理有机固体废物的有效方法, 并在全球范围内得到广泛的应用^[4], 处理过程中氮磷钾等营养元素和重金属的转化成为堆肥研究中普遍关注的问题。

堆肥最终产品可以作为有机肥料, 为作物提供长期的养分供应, 也符合现代农业经济的可持续发展模式。堆肥产品中含有的氮磷钾等营养元素是植

物生长的三大主要营养元素, 因此堆肥中的氮磷钾含量也成为评判堆肥质量的重要指标^[5]。然而全球 Meta 分析表明, 堆肥中主要营养元素氮素在堆肥过程中约 31.4% 都将以不同的形式损失掉, 其中通过 NH_3 和 N_2O 排放的氮损失分别占氮素损失的 54.8% 和 4.5%^[6]。同时, 作为堆肥原材料的有机固体废弃物, 如畜禽粪便、污水污泥等, 含有较多的重金属, 经过堆肥后其中的重金属含量不仅没有减少, 甚至可能由于浓缩效应而有所增加^[7], 堆肥产品已成为农田土壤重金属的主要来源^[8]。虽然在堆肥过程中重金

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41805123, 41807327)

作者简介: 姜继韶(1985 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为有机固体废弃物资源化利用, E-mail: jiangjishao@163.com

属可以从可利用态转化为难利用态^[9,10]，这种变化减缓了重金属的毒性，降低了作物对其的吸收，但重金属的危害并没有完全消除。因此，堆肥过程中营养元素损失和重金属污染等仍是有机固废处理过程中迫切需要面对和解决的问题^[11,12]。

蚯蚓堆肥是利用蚯蚓和微生物共同提高有机废物的分解和转化，从而获得营养丰富且稳定的腐殖质——蚯蚓堆肥的一种经济有效的生物处理技术^[13]。与传统堆肥相比，蚯蚓堆肥有3个突出的优点：首先，蚯蚓对有机废物的吞食减少了有机废物的体积，经过消化循环排出的蚯蚓粪富含氮、磷、钾、钙等可溶性和速效营养物质，有利于微生物的生长，最终优化和加速了堆肥过程^[2,14]。蚯蚓还能够吸收并富集重金属，并在摄入后有效降低重金属的含量并改变其形态^[15]。其次，蚯蚓肠道分泌的蛋白酶、酯酶、淀粉酶和纤维素酶等酶正是有机固体废弃物堆肥过程中所必须的，尤其对纤维素和木质素的降解有促进作用^[16]。第三，蚯蚓通过活动和挖洞行为，促使堆体具有良好的孔隙度、透气性、排水性和较大的比表面积，可以为堆肥有益微生物的生存创造良好的外部环境条件^[13]。这些优点通过蚯蚓堆肥的过程改善微生物的生长，最终减少营养的损失，并降低重金属的含量和优化重金属的形态组成。

近年来，蚯蚓堆肥技术得到了广泛的关注和应用，研究了蚯蚓堆肥过程中堆肥质量如氮、磷、钾含量和重金属含量与形态的变化特征^[17-19]。Mohee等^[20]综述了有机固体废物堆肥中各种金属总含量与

蚯蚓堆肥中金属含量的对比，发现蚯蚓堆肥过程中的金属动态是复杂的，并且在文献中出现了不同蚯蚓堆肥过程中，最终堆肥重金属含量的相反结果。此外，造成差异较大的原因也可能是蚯蚓种类、原料、调理剂、预堆肥时间、堆肥规模、混合料初始指标和工艺控制等因素造成的。然而，以往的研究一般采用单一因素进行设计研究，并对蚯蚓堆肥过程中的某一堆肥质量或是重金属指标进行了研究分析。但考虑到现实情况，在同一项研究中考虑到所有影响因素并进行所有指标分析是不可能实现的。因此，有必要针对不同影响因素对蚯蚓堆肥中的营养元素和重金属的转化特征影响进行全面和定量的评价，以便有效地指导实际生产。

因此，本研究通过收集相关蚯蚓堆肥文献，采用 Meta 分析，量化蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属转化的影响，评估蚯蚓种类、原料性质(pH、含水率和 C/N 等)、过程控制(预堆肥时间和通风方法)对提高堆肥质量和降低重金属毒性的影响效应，以期为蚯蚓堆肥技术优化提供理论依据和技术指导，并对有机固体废弃物资源化和无害化处理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 文献检索和数据搜集

通过 Google Scholar, Elsevier Science Direct, Web of Science 和中国知网，以“蚯蚓堆肥、重金属、生物有效性、营养元素和腐熟度”等关键词系统地检索文献，流程如图 1 所示。

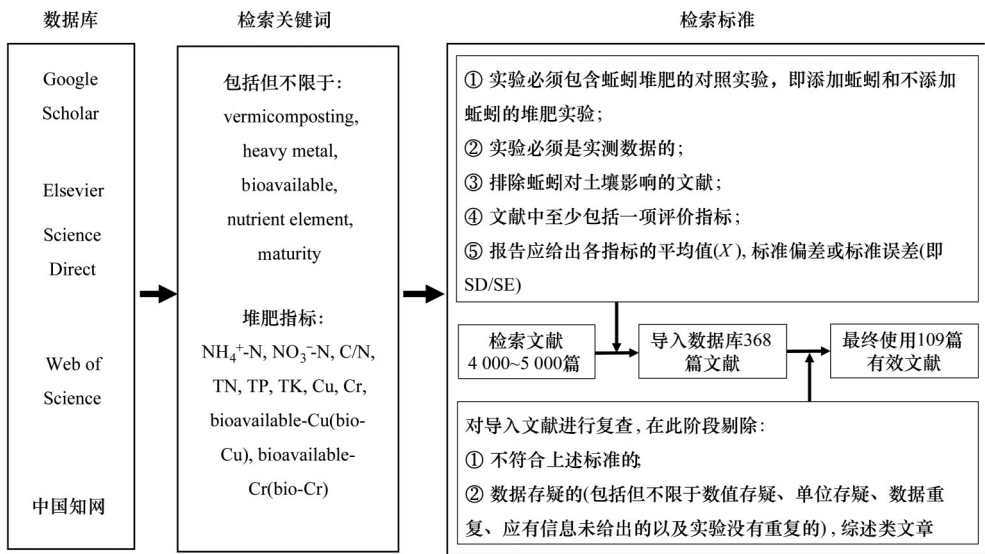


图 1 蚯蚓堆肥文献检索流程

Fig. 1 Literature retrieval process of vermicomposting

在计算分析时使用 SD，若文献中仅有 SE，则使用公式(1)将 SE 转化为 SD：

$$SD = SE \times \sqrt{n} \quad (1)$$

式中， n 为每条研究的重复数。在 SD 或 SE 缺失较少

的情况下，按平均值的 1/10 计算^[21]。基于以上条件，共获得 109 篇有效文献。

分组因子，即解释变量，可以对指标变化做出一定程度上的解释。根据堆肥的客观属性(如初始 C/N 值和初始含水率等)，蚯蚓的种类，通风方式，将各个指标数据分成若干下级分组。综合考虑到分组因子要尽可能地同时解释所有指标，本研究对每个分组因子及其下级分组的分组方式做过反复多次亚组分析(比如初始 C/N 以 30 为界限，是由于此时初始 C/N 解释指标的效果比其他数值为界限相对较好)，并最终确定以下分组因子及其下级分组：蚯蚓种类(*Eisenia fetida*、*Eudrilus eugeniae*、*Perionyx excavatus* 和多种混合)、预堆肥天数(无预堆肥、0 ~ 15 d 和 15 ~ 65 d)、通风(自然放置、翻堆和静态通风)、初始 C/N(0 ~ 30 和 30 ~ 85)、初始含水率(50% ~ 60%、60% ~ 70% 和 70% ~ 80%)和初始 pH(6 ~ 7、7 ~ 8 和 8 ~ 9)。数值因子，作用与分组因子相同，不同的是统计的是具体的连续数值，选择 3 种数值因子：初始 C/N、初始含水率、初始 pH。从所选的研究中提取，如需要从图中获得数据，则使用 GetData 2.2 软件进行获取。

1.2 统计分析

每项研究的效应值以响应比(RR)的自然对数计算，即公式(2)：

lnRR = ln(XE / XC) (2)

式中，XE 为实验组数据，XC 为对照组数据。通过使用 MetaWin 2.1 进行 999 次数据迭代的 bootstrap 程序^[22]，根据异质性检验结果选择混合随机效应模型^[23]。为每个指标和每组的平均效应大小和偏差校

正产生 95% 置信区间(等效加权指数计算结果)。为便于解释，将 lnRR(平均效应和置信区间)的分析结果进行反变换，以指数百分比变化展示，如公式(3)：

变化效应 = [RR - 1] × 100% (3)

本研究结果中，以正负效应值表示分组因子及其下级分组对蚯蚓堆肥后堆肥质量和重金属的影响效应。其中正值代表正效应，如 25.2% 表示某一分组因子对某一指标的增幅为 25.2%(与对照组相比)；负值代表负效应，如 -32.5% 表示某一分组因子对某一指标的降幅为 32.5%(与对照组相比)。若 95% 置信区间不与 0 重叠，则认为实验组与对照组之间存在显著差异；反之无显著差异。显著组间异质性(QB)(P < 0.05)表明某组影响因素与其他因素差异显著，同时，对样本少于 10 个的亚组，结果被认为是存疑的。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓堆肥对堆肥腐熟度、质量和重金属的发表性偏倚检验

各输出结果的发表性偏倚结果见表 1。其中 NH₄⁺-N、C/N、NO₃⁻-N、TN、生物有效性 Cu(bioavailable-Cu, bio-Cu)、Cr 和生物有效性 Cr(bioavailable-Cr, bio-Cr) 的肯德尔等级相关系数大于 0.05，且失安全数大于 5n+10，说明这 4 个指标不存在发表偏倚。而 TP、TK 和 Cu 含量的肯德尔等级相关系数小于 0.05，存在偏差，但其失安全数大于 5n+10，所出现的发表偏倚不影响估计结果^[24]。

表 1 各指标发表偏倚的结果
Table 1 Results of publication bias of various indicators

堆肥指标	研究数	肯德尔等级相关系数	斯皮尔曼相关系数	失安全数	5n+10 ¹⁾	是否存在偏倚	是否影响趋势
NH ₄ ⁺ -N	56	0.397 25	0.398 41	5 774.1	1 030	否	否
NO ₃ ⁻ -N	61	0.870 52	0.564 13	55 243.9	1 200	否	否
C/N	219	0.059 55	0.082 16	7 732 198.1	3 260	否	否
TN	195	0.255 64	0.222 91	3 264 898.8	2 870	否	否
TP	171	0.047 14	0.060 31	1 113 016.8	2 610	是	否
TK	187	0.003 46	0.006 39	1 503 474.2	2 850	是	否
Cu	195	0.028 71	0.068 85	345 638.2	3 045	是	否
bio-Cu	82	0.243 96	0.335 38	34 883.0	1 145	否	否
Cr	59	0.470 11	0.559 95	6 850.8	920	否	否
bio-Cr	40	0.477 79	0.482 84	44 581.3	580	否	否

1) n 为所有样本数之和

2.2 蚯蚓堆肥对堆肥腐熟度、堆肥质量和重金属 Cu 和 Cr 的影响

通过 Meta 分析发现，蚯蚓堆肥对于优化堆肥质量和减少重金属危害有明显的优化效果。如图 2 所

示，经过蚯蚓堆肥，最终堆肥的 NO₃⁻-N、TN、TP 和 TK 含量分别增加了 116.2%(CI: 82.7% ~ 155.8%)、29.1%(CI: 25.2% ~ 33.2%)、31.2%(CI: 27.2% ~ 35.3%) 和 15.0%(CI: 8.9% ~ 21.6%)。而

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和 C/N 逐渐降低, 最终堆肥的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和 C/N 分别降低了 14.8% (CI: -22.4% ~ -6.3%) 和 36.3% (CI: -40.0% ~ -32.5%). 此外, 蚯蚓堆肥显著降低了堆肥中 10.2% (CI: -12.9% ~ -7.4%) 的 Cu 总量和 15.5% (CI: -23.7% ~ -6.4%) Cr 的总量, 同时也消减了 Cu 和 Cr 的生物有效性, 降幅分别为 20.7% (CI: -24.0% ~ -17.3%) 和 41.1% (CI: -46.9% ~ -34.6%).

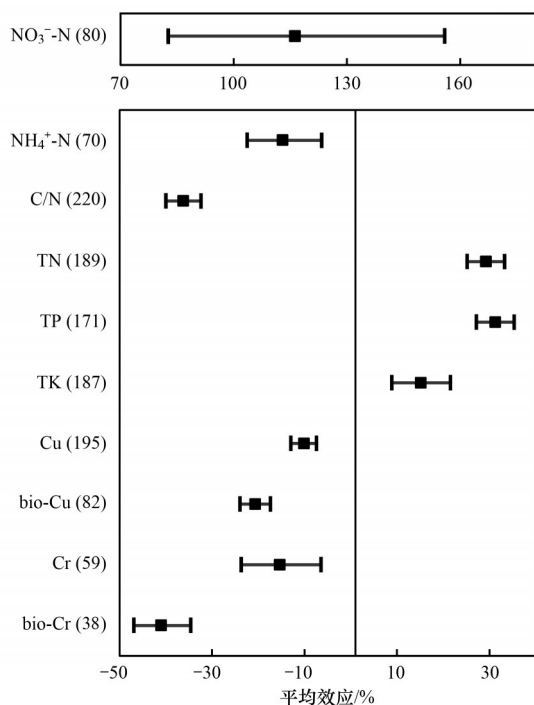


图2 蚯蚓堆肥对腐熟指标、营养元素和重金属指标影响的总效应
Fig. 2 Total effects of vermicomposting on maturity, nutrient elements, and heavy metals

2.3 分组因子和数值因子对堆肥腐熟度和堆肥质量的影响

2.3.1 初始物料性质、蚯蚓种类、预堆肥天数和通风方式的统计分析

为了优化堆肥进程和促进微生物降解, 蚯蚓堆肥的初始参数如含水率、C/N 和 pH 都有严格的限制. Meta 分析显示初始含水率、C/N 和 pH 范围分别在 50% ~ 80%、5 ~ 85 和 6 ~ 9 之间, 除 C/N 范围较大外, 其他基本符合 Bernal 等^[25]推荐的范围. 初始含水率、C/N 和 pH 平均值分别为 65.4%、28.4 和 7.5. 在初始 C/N 中, 观测值在 5 ~ 30 范围内有 133 个, 远多于在 30 ~ 85 内的观测值 (70 个). C/N 过低可能会导致 TN 和 NH_3 的损失增加, 而过高可能会减缓堆肥进程, 因此建议初始堆肥 C/N 调节为 28 左右. Gao 等^[26]也在鸡粪和锯末混合的强制通风堆肥实验中发现初始 C/N 为 28 能够有效提高堆肥的稳定性和腐熟度. 在含水率中, 在 60% ~ 70% 范围内较多, 其平均值

65% 也是微生物最为适宜的水分环境.

在蚯蚓种类中, 由于 *Eisenia fetida* 种类是易获取的种类, 而被研究者广泛应用. 在工厂化生产中, 为了节约堆肥发酵时间, 大多不进行预堆肥处理 (无预堆肥研究数为 99). 然而固体废物的预堆肥在随后的蚯蚓堆肥中起着重要的作用^[27,28], 一方面, 高温预堆肥后, 可以有效消除废弃物中的病原体 and 有害细菌^[29], 而且蚯蚓也可以免受高温影响^[30]; 另一方面, 废物中的有害气体如 NH_3 等, 可以在预堆肥阶段挥发, 以减少对蚯蚓的伤害^[31]. 有许多研究 (研究数为 85) 进行为期 3 ~ 15 d 的预堆肥实验, 以消除不利于蚯蚓生存的环境. 在通风方式中, 蚯蚓堆肥不同于传统堆肥, 由于蚯蚓的吞食、活动和挖洞行为使得堆体孔隙率有所提高^[32], 不进行静态通风和翻堆就能满足微生物的需氧需求, 因而自然放置的研究最为普遍 (研究数为 185).

2.3.2 分组因子对蚯蚓堆肥腐熟度的影响

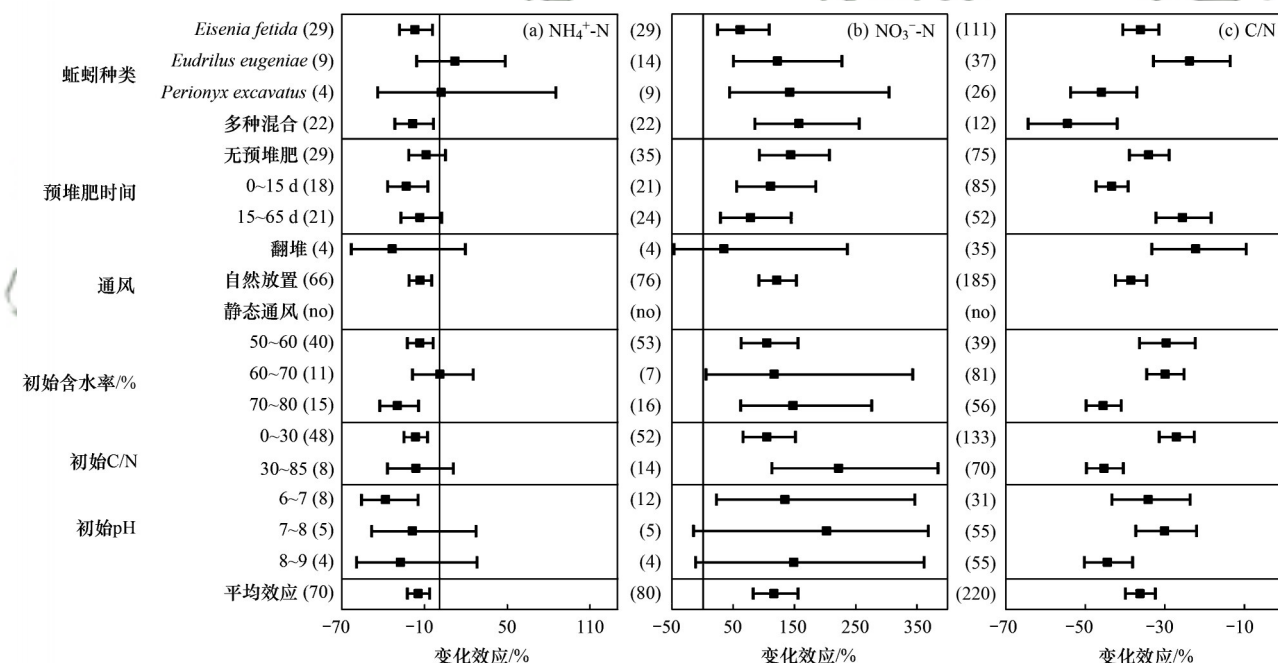
如图 3(a) 所示, 在蚯蚓种类中, 添加 *Eisenia fetida* (-17.1%) 和多种蚯蚓混合 (-18.8%) 添加可有效促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的降低. 在预堆肥天数分组中, 预堆肥 0 ~ 15 d (-23.5%) 能有效降低堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量. 在通风方式中, 自然放置 (-13.4%) 更能有效降低堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量. 在物料初始含水率、C/N 和 pH 分组中, 初始含水率为 70% ~ 80% (-29.9%)、C/N 为 0 ~ 30 (-16.8%) 和 pH 为 6 ~ 7 (-38.6%) 能显著降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量.

同普通堆肥一样, 蚯蚓堆肥也是促使物料中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 逐渐转化的过程, 因此蚯蚓堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低, 而 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量显著增加时, 可标志着堆肥进入腐熟期^[33]. 如图 3(b) 所示, 蚯蚓堆肥之后的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量显著增加, 这可能是因为蚯蚓肠道运输改变了细菌群落多样性和结构, 促进了有机质降解、含氮营养物质的矿化和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化作用^[34]. 蚯蚓种类中多种蚯蚓混合堆肥的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 增加最大 (156.7%), 高于单独使用 *Eisenia fetida* 蚯蚓 (61.3%) 和 *Eudrilus eugeniae* 蚯蚓 (121.9%) 的效果. 在预堆肥天数分组中, 无预堆肥显著增加 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量 (143.2%), 其次为 0 ~ 15 d (110.5%) 和 15 ~ 65 d (78.0%). 初始含水率为 70% ~ 80% (147.1%) 能有效地增加 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量, 其次为 60% ~ 70% (116.3%) 和 50% ~ 60% (104.4%). 虽然通风和初始 pH 分组对蚯蚓堆肥的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 无显著影响, 但其中的自然放置和初始 pH 为 6 ~ 7 显著增加了 120.6% 和 134.0% 的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量的比值也可用于评价堆肥腐熟度, 通过统计分析得出蚯蚓最终堆肥的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量范围在 0.004 ~ 4.7 g·kg⁻¹, 含量平均值

为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 蚯蚓最终堆肥的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量范围在 $0.01 \sim 30.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 二者平均含量的比值为 0.37, 小于 1, 达到了堆肥的腐熟要求^[35].

此外, C/N 也是评价堆肥腐熟度和稳定性的一个重要指标^[36]. 如图 3(c) 所示, 在蚯蚓种类中, 混合蚯蚓堆肥可以显著降低 C/N (-54.6%), 其次分别是 *Perionyx excavatus* (-46.0%)、*Eisenia fetida* (-36.2%) 和 *Eudrilus eugeniae* (-23.9%). 预堆肥时间在 $0 \sim 15 \text{ d}$ 时降低的 C/N 最高 (-43.4%), 其次是无预堆肥 (-34.2%) 和 $15 \sim 65 \text{ d}$ (-25.7%). 经过适当的预堆肥处理后, 可以使一些难消化的有机质降解到蚯蚓可接受的程度, 提高了蚯蚓降解有机物质的效率^[37]. 在自然放置和翻堆的通风条件下, 蚯蚓堆肥的 C/N 分别显著降低了 38.7% 和 22.3% . 在自然放置的情况下, 由于蚯蚓的生命活动, 使堆肥底物由大颗粒破碎成均匀的小颗粒, 提高了通气性和含氧量, 增加了有效微生物表面积, 从而加速

了有机物质的降解^[38]. 蚯蚓堆肥的含水率在 $70\% \sim 80\%$ 时 C/N 降低最大 (-45.6%), 其次为 $60\% \sim 70\%$ (-30.1%) 和 $50\% \sim 60\%$ (-29.8%), 可能是由于在较高的含水率下有助于蚯蚓堆肥基质中产甲烷细菌排放甲烷气体^[39]. 堆肥初始 C/N 在 $30 \sim 85$ (-45.3%) 的时候, C/N 显著降低, 其次是 $0 \sim 30$ (-27.2%), Aira 等^[40]研究表明, 在初始 C/N 高的情况下, 蚯蚓会优先繁殖而不是生长, 蚯蚓的数量增加, 消耗更多的有机碳, 因此最终堆肥的 C/N 降低幅度更大. 堆肥初始 pH 在 $8 \sim 9$ 时降低蚯蚓堆肥 44.5% 的 C/N, 其次是 $6 \sim 7$ (-34.3%) 和 $7 \sim 8$ (-30.1%), 此外, 图 6(d) 显示当初始 pH 为 7.08 时, 蚯蚓堆肥增加的 TN 效应值最小为 24.5% , 与此结果一致, 可能是 pH 在 $6 \sim 8$ 之间时, 蚯蚓和微生物有着较高的活性, 加快了有机氮的分解, 导致氮素流失. 所有观测值的统计分析表明, 最终堆肥 C/N 的范围为 $1.1 \sim 52.7$ 之间, 平均值为 13.8, 小于 15, 满足腐熟的要求.



括号中的数值表示研究数; 线段表示 95% 置信区间; 括号内的 no 表示无对应研究

图 3 不同的分组因子对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 C/N 变化效应的影响

Fig. 3 Effects of different grouping factors on the change efficiency of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, and C/N

2.3.3 分组因子对蚯蚓堆肥质量的影响

蚯蚓分解有机物质后, 自身排出富含微生物的含氮排泄物、分泌的多糖、富含激素和酶的粘液等物质的矿化提高了堆体的氮水平^[41], 此外, 矿化过程中有机氮化合物分解产生的水分蒸发也可能导致氮含量的相对增加. 如图 4(a) 所示, 多种蚯蚓混合增加 TN 的效果 (69.5%) 高于单独蚯蚓种类的添加. 在预堆肥时间中, $0 \sim 15 \text{ d}$ (25.1%) 和 $15 \sim 65 \text{ d}$ (25.2%) 的效果都略低

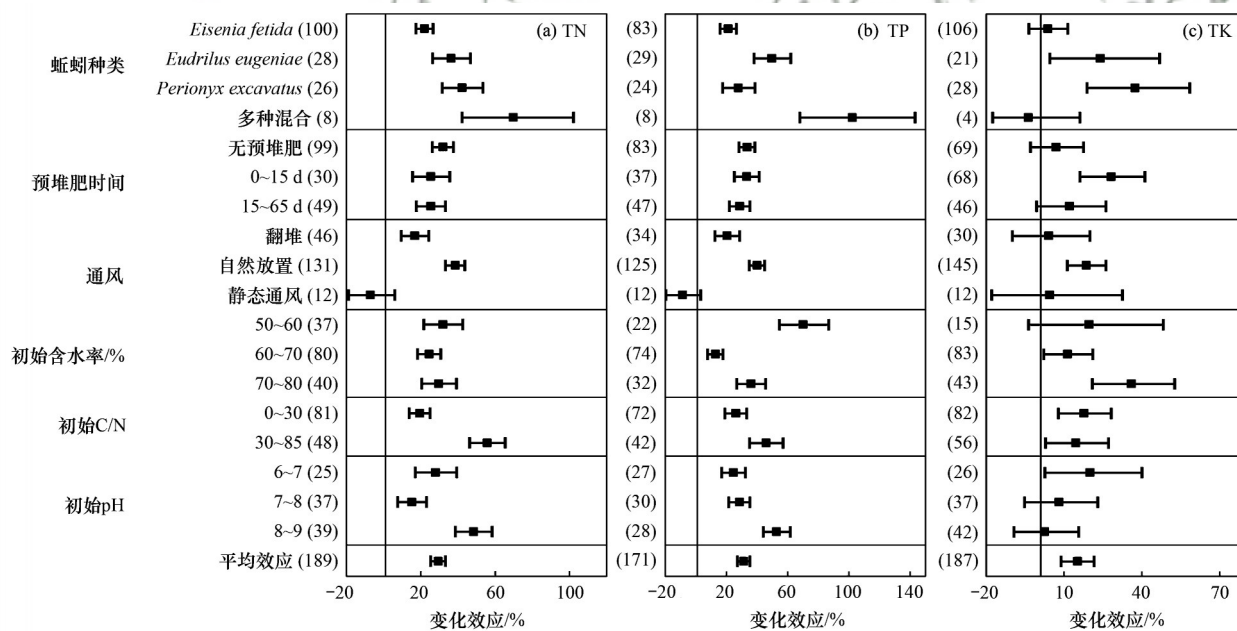
于无预堆肥 (31.7%). 通风方式中效果最好的是自然放置 (38.4%), 而静态通风法却会使蚯蚓堆肥的 TN 含量减少且效应不显著 (-7.3%). 这可能是因为蚯蚓的挖洞习性, 促进了堆肥的通风条件, 优化了微生物群落结构, 从而优化了蚯蚓堆肥的效率, 促进了营养元素的积累^[42]. 蚯蚓堆肥的初始 C/N 在 $30 \sim 85$ 的时候, 蚯蚓堆肥 TN 含量增加最大 (55.6%), 最小在 $0 \sim 30$ (19.2%), 初始 C/N 在较低的水平下, TN 增加量较

小. Liu等^[43]通过Meta分析表明,堆肥中氮素损失随着初始C/N的增加而减少.这可能是若初始C/N过低,则堆肥中有过量的氮素供应,易引起氮素损失. Jiang等^[44]发现猪粪堆肥中料堆C/N在15时比在30时会导致更高的 NH_3 和 N_2O 排放.此外, Wong等^[45]在屠宰场动物残渣堆肥实验中发现,料堆初始C/N在16时会导致84%的初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的损失.可能是由于堆体在较低C/N的时候会导致过量的氮累积,从而刺激 NH_3 排放^[46].初始pH在8~9的时候,蚯蚓堆肥TN含量增幅最大(48.2%),其次为pH为6~7(27.7%)和7~8(15.0%),原因可能是蚯蚓以及堆体中的微生物处于pH为中性的生长环境时有着较高的活性^[47],强烈的生命活动促进堆体有机氮分解,容易造成氮素的损失.

随着堆肥的进行,有机物质快速降解导致的富集效应会使蚯蚓堆肥中TP和TK增加^[48],此外,蚯蚓肠道磷酸酶和溶磷微生物会释放有机质中磷的有效成分^[49].如图4(b)所示,除通风方式外,其他5组分组因子都显著影响蚯蚓堆肥中TP含量.在蚯蚓种类中,混合添加蚯蚓可以最大增加TP含量

(102.1%).无预堆肥、0~15 d和15~65 d预堆肥,都可显著增加TP含量(分别为33.3%、33.0%和28.4%),但3组之间差异不大.在自然放置条件下,蚯蚓堆肥的TP含量增加最大(39.8%).堆肥含水率在50%~60%的时候,蚯蚓堆肥的TP含量增加最大(69.9%),最小是在60%~70%(12.7%).堆肥的初始C/N在30~85的时候TP增加最大(45.6%),在0~30的时候最小(25.9%).初始pH在8~9的时候蚯蚓堆肥的TP含量增加最大(52.5%),其次为7~8(28.2%)和6~7(24.4%).

如图4(c)所示,蚯蚓 *Perionyx excavatus* 可以最大幅度增加TK含量(37.2%),而蚯蚓 *Eisenia fetida* 的效果最小且不显著(3.6%).预堆肥时间仅在0~15 d时显著影响蚯蚓堆肥的TK含量,增幅为28.0%,经过对堆肥原料进行适当的预降解有助于蚯蚓的消化和吸收并最终增加营养元素的含量^[50].在通风方式中,仅自然放置显著增加了18.5%的TK含量.堆肥含水率在70%~80%的时候,TK含量增加35.8%,其次为50%~60%(11.2%).初始pH分组中,仅6~7显著增加了19.9%的TK含量.



括号中的数值表示研究数,线段表示95%置信区间

图4 不同的分组因子对TN、TP和TK变化效应的影响

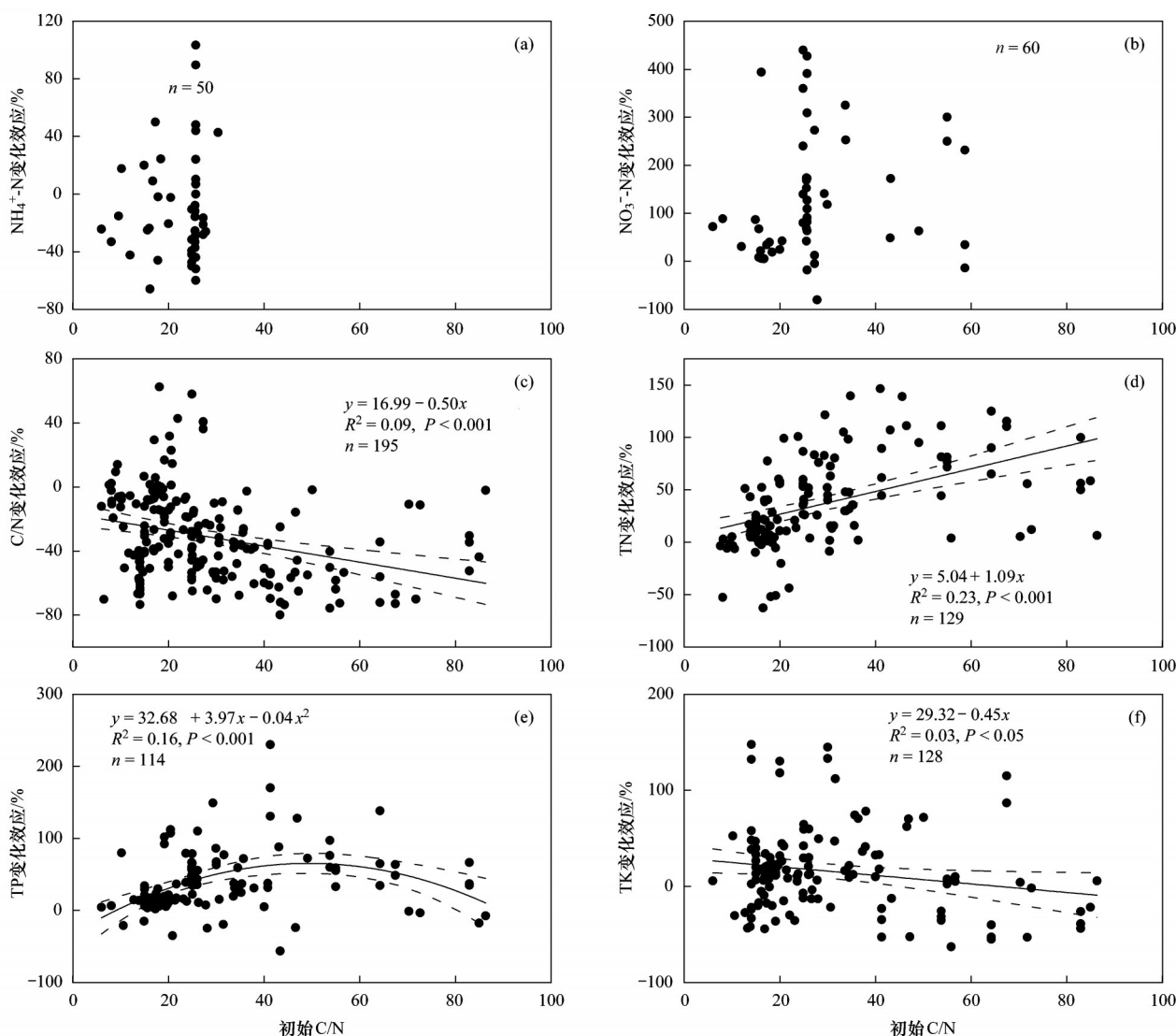
Fig. 4 Effects of different grouping factors on the change efficiency of TN, TP, and TK

2.3.4 堆肥初始性质与堆肥腐熟度和堆肥质量的关系

图5~7表明,初始C/N、pH和含水率显著影响最终蚯蚓堆肥的C/N、TN、TK和TP含量.图5(c)和图5(f)显示,初始C/N与最终堆肥的C/N和TK含量呈现显著的负相关关系.而初始C/N与TN含量呈现显著的正相关关系,意味着蚯蚓堆肥的TN含量随

着初始C/N的增加而增加.图5(d)显示,蚯蚓堆肥中初始C/N低于20的研究数占38.3%.因此导致蚯蚓堆肥对于TN增加的效应值相对较低.此外,初始C/N与最终堆肥的TP含量呈显著的二次方程关系[图5(e)],当初始C/N为49.3时,蚯蚓堆肥增加的TP效应值最大,为65.3%.

图6(c)和6(e)显示初始pH与蚯蚓堆肥最终的



实线表示散点拟合曲线, 两条虚线分别表示 95% 置信区间

图 5 堆肥初始 C/N 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、C/N、TN、TP 和 TK 变化效应的相关关系

Fig. 5 Relationship between the initial C/N of compost and the change efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, C/N, TN, TP, and TK

C/N 呈显著的负相关关系, 而与 TP 含量呈现显著的正相关关系. 此外, 初始 pH 与蚯蚓堆肥最终的 TN 含量呈显著的二次方程关系[图 6(d)], 当初始 pH 为 7.08 时, 蚯蚓堆肥增加的 TN 效应值最小, 为 24.5%.

如图 7(a)所示, 初始含水率与蚯蚓堆肥最终的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著的负相关关系. 初始含水率与最终的 TP 含量呈现显著的二次方程关系[如图 7(e)], 通过计算当初始含水率在 69.5% 的时候, 蚯蚓堆肥对最终 TP 含量增加得最少, 增加幅度为 16.1%. 初始含水率与最终 C/N 呈现显著的三次方程关系[如图 7(c)], 通过计算当初始含水率在 70.4% 时, 蚯蚓堆肥对最终 C/N 降低的幅度最多, 为 41.6%.

2.4 分组因子对蚯蚓堆肥重金属 Cu 和 Cr 总量和生物有效性含量的影响

如图 8(a)所示, 与一般堆肥相比, 蚯蚓

Eudrilus eugeniae 可以显著减少 34.8% 的 Cu 含量, 其次为蚯蚓 *Eisenia fetida* (-11.0%). 在无预堆肥的情况下, 蚯蚓堆肥中 Cu 减少最大(-21.0%); 预堆肥时间越长, 蚯蚓堆肥中的 Cu 减少越小, 且仅预堆肥为 0 ~ 15 d 时减少了 8.9% 的 Cu 含量. 通风方式中采用翻堆可以显著减少蚯蚓堆肥中 23.3% 的 Cu, 其次为自然放置(-3.8%). 堆肥含水率在 50% ~ 60% 时堆体中 Cu 含量减少的效果最大(-41.8%), 其次为 60% ~ 70% (-9.3%), 而在 70% ~ 80% 的情况下, 反而会使 Cu 含量增加 9.1%. 堆肥初始 C/N 在 0 ~ 30 (-6.4%) 和 30 ~ 85 (-11.2%) 时, Cu 减少的效果差别不大. 堆肥的初始 pH 在 7 ~ 8 和 8 ~ 9 的时候, 堆肥 Cu 含量分别减少 16.3% 和 25.6%, 而在 6 ~ 7 的时候, 蚯蚓堆肥的 Cu 含量却显著增加 38.4%.

如图 8(b)所示, 蚯蚓 *Eudrilus eugeniae* 可以显著

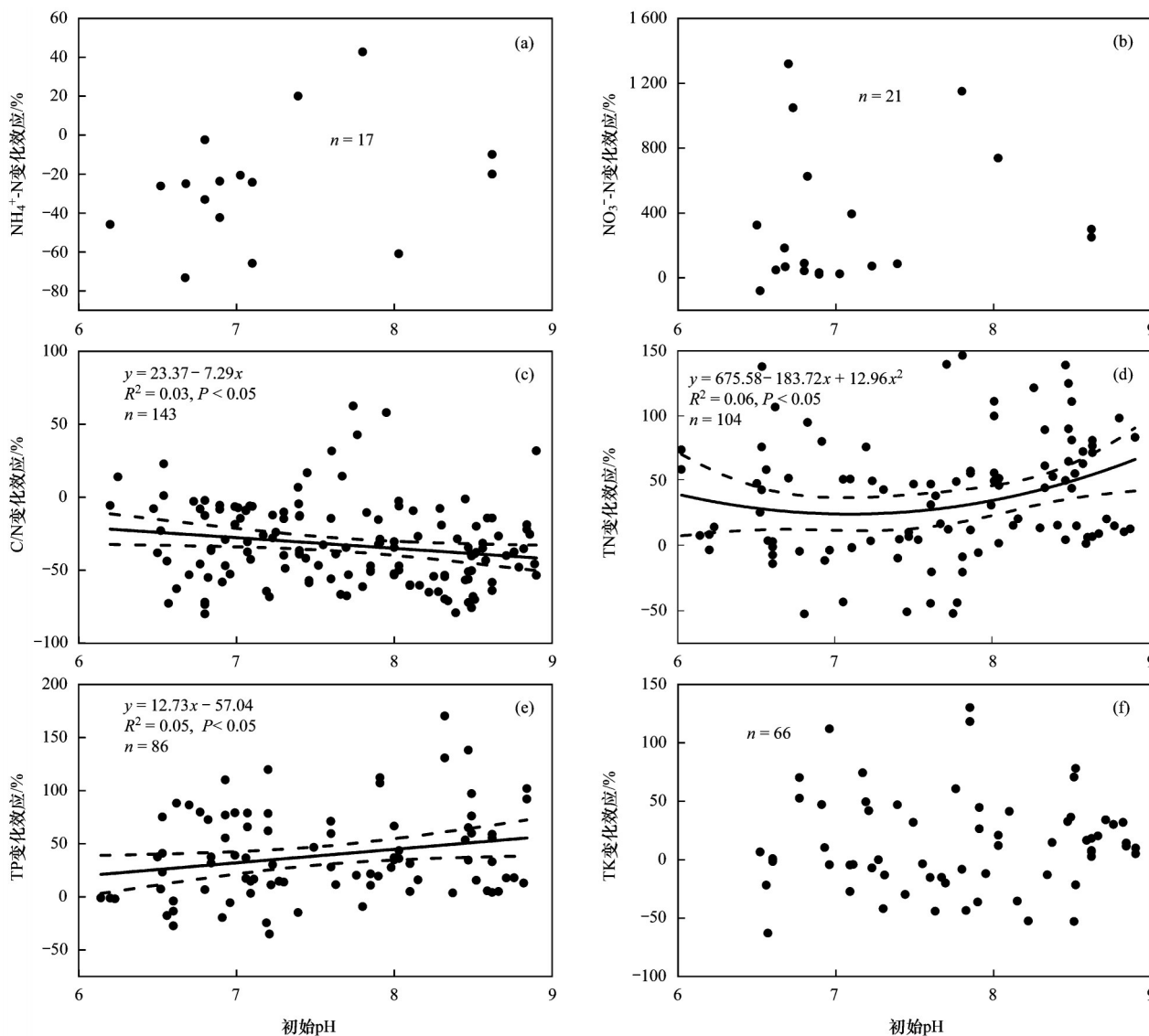


图6 堆肥初始pH与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、C/N、TN、TP和TK变化效应的相关关系

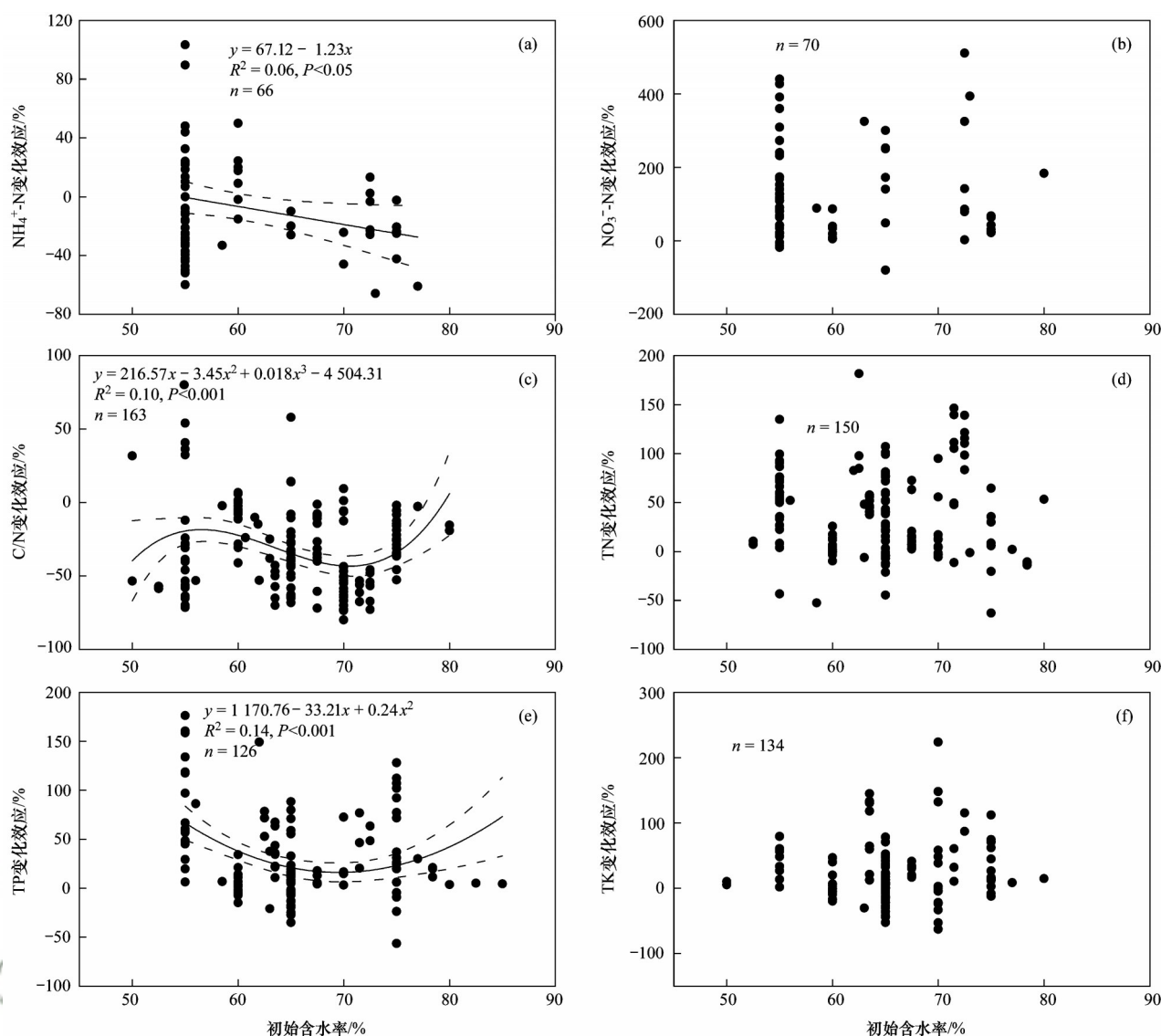
Fig. 6 Relationship between initial pH of compost and changing effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, C/N, TN, TP, and TK

减少堆肥64.1%的Cr含量.预堆肥方式中,只有无预堆肥方式能够显著降低堆肥中Cr含量(-52.1%).通风方式中,仅翻堆的通风方式显著减少了43.4%的蚯蚓堆肥的Cr含量.堆肥含水率在50%~60%的时候,蚯蚓减少堆肥中Cr含量的效果最大(-68.6%).蚯蚓堆肥初始pH仅在7~8时可以显著降低31.2%的Cr含量.

在有机废弃物堆肥过程中,蚯蚓对重金属有效态部分的去除能力主要取决于两个方面.一方面,蚯蚓促进有机物的微生物降解,由于蚯蚓肠道的酶促作用,金属离子被释放到蚯蚓堆肥系统中^[51],在蚯蚓堆肥过程中,金属离子与腐殖质结合显著增加^[52];另一方面,重金属在蚯蚓组织中积累,与低分子量、富含半胱氨酸、对重金属亲和力高的金属硫蛋白结合,形成有机金属配合物,对金属进行

解毒^[53].

如图8(c)所示,蚯蚓堆肥中bio-Cu的减少可能是由于微生物细胞在降解有机质的时候对Cu原子的固定以及Cu在蚯蚓体内稳定化而形成金属硫蛋白络合物^[54].蚯蚓*Eisenia fetida*和*Eudrilus eugeniae*可以显著减少堆肥18.7%和23.0%的bio-Cu.在预堆肥时间上,无预堆肥可以最大程度地减少bio-Cu含量(-24.2%),其次为15~65 d(-18.2%)和0~15 d(-14.1%).在通风方式上,翻堆可以最大程度减少蚯蚓堆肥的bio-Cu(-27.9%),其次是自然放置(-18.5%)和静态通风法(-13.2%).堆肥含水率在50%~60%时bio-Cu(-44.9%)减少最大,其次是60%~70%(-17.8%),这可能是因为在较干燥条件下,废物中的重金属难以以金属离子的形式在堆肥系统中移动^[55],减少了与环境的交换量.物料初始



实线表示散点拟合曲线, 两条虚线分别表示 95% 置信区间

图 7 堆肥初始含水率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、C/N、TN、TP 和 TK 变化效应的相关关系

Fig. 7 Relationship between initial moisture content of compost and change effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, C/N, TN, TP, and TK

pH 在 6 ~ 7 和 7 ~ 8 时能分别有效减少 28.1% 和 22.5% 的 bio-Cu 含量。

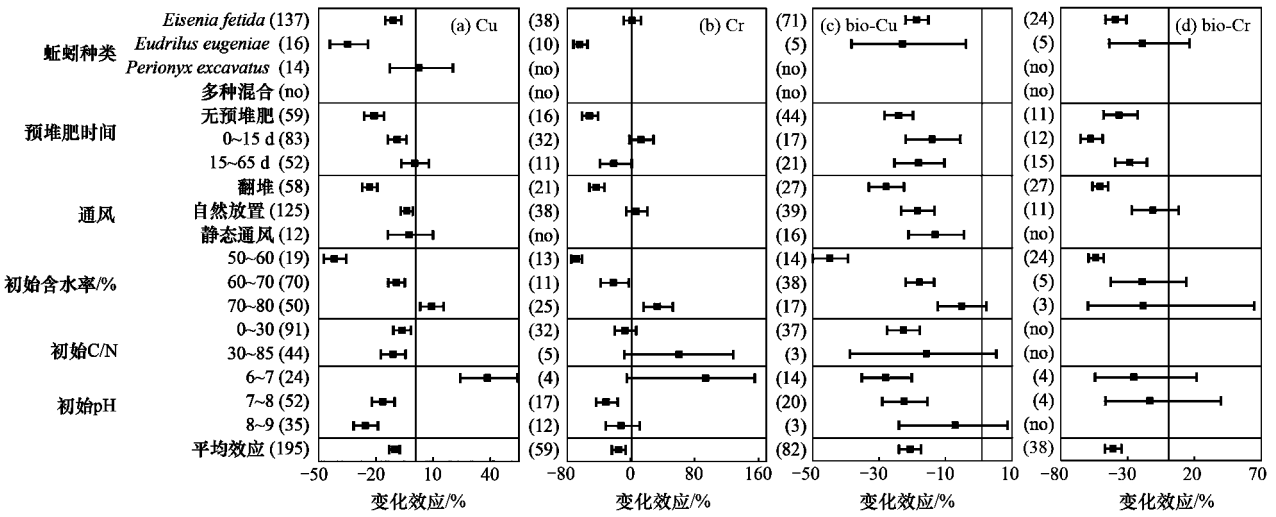
如图 8(d) 所示, 蚯蚓 *Eisenia fetida* 可以显著减少堆肥 39.2% 的 bio-Cr 含量, 可能是因为 *Eisenia fetida* 将对生物毒性较大的 Cr(VI) 还原为毒性较小的 Cr(III), 然后 Cr(III) 与分解的有机物结合^[56], 以此降低了 Cr 的流动性。在预堆肥分组中, 0 ~ 15 d 预堆肥能有效的减少堆肥的 bio-Cr 含量(-57.7%), 其次为无预堆肥(-36.5%)和 15 ~ 65 d(-28.4%)。在通风方式中, 仅翻堆可以有效减少堆肥中 50.7% 的 bio-Cr 含量。物料初始含水率仅在 50% ~ 60%(-53.9%)能有效降低 bio-Cr 含量。蚯蚓堆肥初始 pH 对 bio-Cr 含量无显著的影响。

2.5 蚯蚓堆肥的指导建议

表 2 展示了不同分组因子对堆肥腐熟度、堆肥

质量和重金属影响的正负效应。从中可以看出, 当初始含水率、C/N 和 pH 分别在 70% ~ 80%、30 ~ 85 和 6 ~ 7 范围时, 预堆肥天数在 0 ~ 15 d 之间, 通风方式选为自然放置, 多种蚯蚓混合, 对于蚯蚓堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 C/N 降低的效果更优, 同时也能够显著增加最终蚯蚓堆肥中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP 和 TK 的含量。而在初始含水率、C/N 和 pH 分别在 50% ~ 60%、0 ~ 30 和 7 ~ 8 范围, 不采取预堆肥措施和采取翻堆作为通风方式, 同时选取 *Eudrilus eugeniae* 种类进行蚯蚓堆肥, 对于堆肥中重金属总量及其有效性降低的效果较为显著。

因此在实际大规模蚯蚓堆肥过程中, 若堆肥原料为畜禽粪便、厨余垃圾或其他重金属含量较低的有机固体废弃物, 则蚯蚓堆肥应以提高堆肥腐熟度和质量为目的, 应调节物料初始含水率



括号中的数值表示研究数,线段表示 95% 置信区间;括号内的 no 表示无对应研究

图 8 不同的分组因子对 Cu、Cr、bio-Cu 和 bio-Cr 变化效应的影响

Fig. 8 Effects of different grouping factors on the change efficiency of Cu, Cr, bio-Cu, and bio-Cr

表 2 不同分组因子对堆肥腐熟度、堆肥质量和重金属影响的正负效应¹⁾

Table 2 Positive and negative effect values of different grouping factors on compost maturity, compost quality, and heavy metals

分组	参数	变化效应/%									
		NH ₄ ⁺ -N	C/N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	TK	Cu	bio-Cu	Cr	bio-Cr
初始含水率/%	50 ~ 60	-13.6	-29.8	104.4	31.7	69.9	19.5	-41.8	-44.9	-68.6	-53.9
	60 ~ 70	—	-30.1	116.3	24.3	12.7	11.2	-9.3	-17.8	-22.2	—
	70 ~ 80	-29.9	-45.6	147.1	29.5	35.9	35.8	9.1	—	33.2	—
初始 C/N	0 ~ 30	-16.8	-27.2	104.4	19.2	25.9	17.5	-6.4	-22.8	—	—
	30 ~ 85	—	-45.3	221.3	55.6	45.6	14.4	-11.2	—	—	—
初始 pH	6 ~ 7	-38.6	-34.3	134.0	27.7	24.4	19.9	38.4	-28.1	—	—
	7 ~ 8	—	-30.1	—	15.0	28.2	7.9	-16.3	-22.5	-31.2	—
	8 ~ 9	—	-44.5	—	48.2	52.5	2.4	-25.6	—	—	—
蚯蚓种类	<i>Eisenia fetida</i>	-17.1	-36.2	61.3	21.8	21.0	—	-11.0	-18.7	—	-39.2
	<i>Eudrilus eugeniae</i>	—	-23.9	121.9	36.1	49.5	23.9	-34.8	-23.0	-64.1	—
	<i>Perionyx excavatus</i>	—	-46.0	141.6	42.0	27.6	37.2	—	—	—	—
	多种混合	-18.8	-54.6	156.7	69.5	102.1	—	—	—	—	—
预堆肥天数	无预堆肥	—	-34.2	143.2	31.7	33.3	—	-21.0	-24.2	-52.1	-36.5
	0 ~ 15 d	-23.5	-43.4	110.5	25.1	33.0	28.0	-8.9	-14.1	—	-57.7
	15 ~ 65 d	—	-25.7	78.0	25.2	28.4	—	—	-18.2	—	-28.4
通风方式	翻堆	—	-22.3	—	16.6	20.3	—	-23.3	-28.0	-43.4	-50.7
	自然放置	-13.4	-38.7	120.6	38.4	39.8	18.5	-3.8	-18.5	—	—
	静态通风	—	—	—	—	—	—	—	-13.2	—	—

1) “—”表示置信区间与 0 相交,即不显著

70% ~ 80%、C/N 为 30 ~ 85 和 pH 6 ~ 7, 同时进行 0 ~ 15 d 的预堆肥, 通风方式为自然放置, 多种蚯蚓混合堆肥; 若堆肥原料为城市成活污泥、工业污泥或其他含重金属较高的有机固体废物, 当以去除重金属为主, 同时兼顾堆肥的腐熟度和堆肥质量, 应调节物料初始含水率 50% ~ 60%、C/N < 30 和 pH 7 ~ 8, 同时不进行预堆肥, 选取通风方式为翻堆, 引用 *Eudrilus eugeniae* 种类进行蚯蚓堆肥。

3 结论

本研究通过 Meta 分析系统整合了与蚯蚓堆肥营养元素和重金属相关的所有文献数据, 发现蚯蚓堆肥明显有助于提升堆肥质量并降低重金属危害性。经过蚯蚓堆肥后, 堆体中 NO₃⁻-N、TN、TP 和 TK 含量分别增加了 116.2%、29.1%、31.2% 和 15.0%。而 NH₄⁺-N 含量和 C/N 分别降低了 14.8% 和 36.3%。堆肥中 Cu 总量和 Cr 总量显著降低了 10.2% 和 15.5%, 同时生物有效性 Cu 和 Cr 的含量也分别降低了 20.7% 和

41.1%。本研究比较分析了在不同的蚯蚓种类、预堆肥时间、通风方式、初始含水率、初始 pH 和初始 C/N 对蚯蚓堆肥各指标的影响效应, 以及腐熟度和营养元素指标($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、C/N、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP 和 TK)与初始含水率、初始 pH 和初始 C/N 的相关关系, 发现在促进堆肥腐熟、富集营养元素方面, 调节物料初始含水率为 70%~80%、C/N 为 30~85 和 pH 为 6~7, 进行 0~15 d 的预堆肥, 自然放置蚯蚓堆肥的效果最好; 而在减少堆体重金属总量, 降低重金属危害性时, 建议调节物料初始含水率在 50%~60%、C/N 小于 30 和 pH 7~8, 不进行预堆肥, 定时翻堆, 引用 *Eudrilus eugeniae* 种类进行蚯蚓堆肥。

参考文献:

- [1] Bhat S A, Singh S, Singh J, *et al.* Bioremediation and detoxification of industrial wastes by earthworms: vermicompost as powerful crop nutrient in sustainable agriculture [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **252**: 172-179.
- [2] Chen Y X, Zhang Y, Shi X, *et al.* The contribution of earthworms to carbon mineralization during vermicomposting of maize stover and cow dung [J]. *Bioresource Technology*, 2023, **368**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128283.
- [3] Awasthi M K, Yan B H, Sar T, *et al.* Organic waste recycling for carbon smart circular bioeconomy and sustainable development: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, **360**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127620.
- [4] Goyer C, Neupane S, Zebarth B J, *et al.* Diverse compost products influence soil bacterial and fungal community diversity in a potato crop production system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **169**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104247.
- [5] Umar G, Mohee R. Assessing the effect of biodegradable and degradable plastics on the composting of green wastes and compost quality [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 6738-6744.
- [6] Zhao S X, Schmidt S, Qin W, *et al.* Towards the circular nitrogen economy - a global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135401.
- [7] Wu S H, Tursenjan D, Sun Y B. Impact of compost methods on humification and heavy metal passivation during chicken manure composting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116573.
- [8] Peng H, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 776-786.
- [9] Chen X M, Du Z, Liu D, *et al.* Biochar mitigates the biotoxicity of heavy metals in livestock manure during composting [J]. *Biochar*, 2022, **4**(1), doi: 10.1007/s42773-022-00174-x.
- [10] Wang M M, Wu Y C, Zhao J Y, *et al.* Comparison of composting factors, heavy metal immobilization, and microbial activity after biochar or lime application in straw-manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, **363**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127872.
- [11] Huang D L, Gao L, Cheng M, *et al.* Carbon and N conservation during composting: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **840**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156355.
- [12] Yousif Abdellah Y A, Shi Z J, Luo Y S, *et al.* Effects of different additives and aerobic composting factors on heavy metal bioavailability reduction and compost parameters: a meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **307**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119549.
- [13] Lim S L, Lee L H, Wu T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **111**: 262-278.
- [14] Gong X Q, Zou L, Wang L, *et al.* Biochar improves compost humification, maturity and mitigates nitrogen loss during the vermicomposting of cattle manure-maize straw [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116432.
- [15] Wang F, Yao W, Zhang W W, *et al.* Humic acid characterization and heavy metal behaviour during vermicomposting of pig manure amended with ^{13}C -labelled rice straw [J]. *Waste Management & Research: The Journal for A Sustainable Circular Economy*, 2022, **40**(6): 736-744.
- [16] Gómez-Brandón M, Fornasier F, de Andrade N, *et al.* Influence of earthworms on the microbial properties and extracellular enzyme activities during vermicomposting of raw and distilled grape marc [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **319**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115654.
- [17] Devi J, Pegu R, Mondal H, *et al.* Earthworm stocking density regulates microbial community structure and fatty acid profiles during vermicomposting of lignocellulosic waste: unraveling the microbe-metal and mineralization-humification interactions [J]. *Bioresource Technology*, 2023, **367**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128305.
- [18] Ducasse V, Capowiez Y, Peigné J. Vermicomposting of municipal solid waste as a possible lever for the development of sustainable agriculture. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, **42**(5), doi: 10.1007/s13593-022-00819-y.
- [19] Dume B, Hanc A, Svehla P, *et al.* Nutrient recovery and changes in enzyme activity during vermicomposting of hydrolysed chicken feather residue [J]. *Environmental Technology*, 2022, doi: 10.1080/09593330.2022.2147451.
- [20] Mohee R, Soobhany N. Comparison of heavy metals content in compost against vermicompost of organic solid waste: past and present [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, **92**: 206-213.
- [21] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis [J]. *Ecology*, 2006, **87**(1): 53-63.
- [22] Yangjin D, Wu X W, Bai H, *et al.* A meta-analysis of management practices for simultaneously mitigating N_2O and NO emissions from agricultural soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.still.2021.105142.
- [23] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, *et al.* A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis [J]. *Research Synthesis Methods*, 2010, **1**(2): 97-111.
- [24] Zhou S X, Kong F L, Lu L, *et al.* Biochar — an effective additive for improving quality and reducing ecological risk of compost: a global meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151439.
- [25] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. a review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(22): 5444-5453.
- [26] Gao M C, Liang F Y, Yu A, *et al.* Evaluation of stability and

- maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios[J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(5): 614-619.
- [27] Liégué G S, Cognet S, Djumyom G V W, *et al.* An effective organic waste recycling through vermicomposting technology for sustainable agriculture in tropics [J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2021, **10**(3): 203-214.
- [28] Singh V, Wyatt J, Zoungrana A, *et al.* Evaluation of vermicompost produced by using post-consumer cotton textile as carbon source [J]. *Recycling*, 2022, **7**(1), doi: 10.3390/recycling7010010.
- [29] Azizi A B, Lim M P M, Noor Z M, *et al.* Vermiremoval of heavy metal in sewage sludge by utilising *Lumbricus rubellus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **90**: 13-20.
- [30] Ahadi N, Sharifi Z, Hossaini S M T, *et al.* Remediation of heavy metals and enhancement of fertilizing potential of a sewage sludge by the synergistic interaction of woodlice and earthworms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121573.
- [31] Kaur A, Singh J, Vig A P, *et al.* Cocomposting with and without *Eisenia fetida* for conversion of toxic paper mill sludge to a soil conditioner[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8192-8198.
- [32] Pathma J, Sakthivel N. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential [J]. *SpringerPlus*, 2012, **1**(1), doi: 10.1186/2193-1801-1-26.
- [33] Chang H Q, Zhu X H, Wu J, *et al.* Dynamics of microbial diversity during the composting of agricultural straw [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, **20**(5): 1121-1136.
- [34] Wang N, Wang W H, Jiang Y J, *et al.* Variations in bacterial taxonomic profiles and potential functions in response to the gut transit of earthworms (*Eisenia fetida*) feeding on cow manure [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147392.
- [35] Zhang L, Sun X Y. Food waste and montmorillonite contribute to the enhancement of green waste composting [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, **170**: 983-998.
- [36] Yang W, Zhang L. Addition of mature compost improves the composting of green waste [J]. *Bioresource Technology*, 2022, **350**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.126927.
- [37] Ramesh S. Grain yield, nutrient uptake and nitrogen use efficiency as influenced by different sources of vermicompost and fertilizer nitrogen in rice [J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, **7**(5): 52-55.
- [38] Yang F, Li G X, Zang B, *et al.* The maturity and CH₄, N₂O, NH₃ emissions from vermicomposting with agricultural waste [J]. *Compost Science & Utilization*, 2017, **25**(4): 262-271.
- [39] Swati A, Hait S. Greenhouse gas emission during composting and vermicomposting of organic wastes - a review [J]. *Clean - Soil, Air, Water*, 2018, **46**(6), doi: 10.1002/clen.201700042.
- [40] Aira M, Monroy F, Domínguez J. C to N ratio strongly affects population structure of *Eisenia fetida* in vermicomposting systems [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, **42**: S127-S131.
- [41] Pandit L, Sethi D, Pattanayak S K, *et al.* Bioconversion of lignocellulosic organic wastes into nutrient rich vermicompost by *Eudrilus eugeniae* [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, **12**, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100580.
- [42] Zhao C H, Wang Y, Wang Y, *et al.* Insights into the role of earthworms on the optimization of microbial community structure during vermicomposting of sewage sludge by PLFA analysis [J]. *Waste Management*, 2018, **79**: 700-708.
- [43] Liu Y, Tang R L, Li L Q, *et al.* A global meta-analysis of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen losses during livestock manure composting: influencing factors and mitigation strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **885**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163900.
- [44] Jiang T, Schuchardt F, Li G X, *et al.* Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1754-1760.
- [45] Wong J W C, Selvam A, Zhao Z Y, *et al.* In-vessel co-composting of horse stable bedding waste and blood meal at different C/N ratios: process evaluation [J]. *Environmental Technology*, 2012, **33**(22): 2561-2567.
- [46] Cao Y B, Wang X, Bai Z H, *et al.* Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **235**: 626-635.
- [47] Ali U, Sajid N, Khalid A, *et al.* A review on vermicomposting of organic wastes [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, **34**(4): 1050-1062.
- [48] Devi C, Khwairakpam M. Bioconversion of *Lantana camara* by vermicomposting with two different earthworm species in monoculture [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **296**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122308.
- [49] Suthar S. Bioconversion of post harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae* Kinberg [J]. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(3): 206-214.
- [50] Kausar H, Khwairakpam M. Organic waste management by two-stage composting process to decrease the time required for vermicomposting [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, **25**, doi: 10.1016/j.eti.2021.102193.
- [51] Suthar S. Nutrient changes and biodynamics of epigeic earthworm *Perionyx excavatus* (Perrier) during recycling of some agriculture wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(8): 1608-1614.
- [52] He X, Zhang Y X, Shen M C, *et al.* Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 867-873.
- [53] Swati A, Hait S. Fate and bioavailability of heavy metals during vermicomposting of various organic wastes—a review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, **109**: 30-45.
- [54] Singh J, Kalamdhad A S. Reduction of bioavailability and leachability of heavy metals during vermicomposting of water hyacinth [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8974-8985.
- [55] Stovold R J, Whalley W R, Harris P J. Dehydration does not affect the radial pressures produced by the earthworm *Aporrectodea caliginosa* [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **37**(1): 23-28.
- [56] Hait S, Tare V. Transformation and availability of nutrients and heavy metals during integrated composting - vermicomposting of sewage sludges [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **79**: 214-224.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)