

添加蚯蚓对矸石-污泥好氧堆肥熟化成土的影响^{*}

耿际深, 尚海丽

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为了解决煤矸石作为煤炭开发过程中伴生大宗固废的消纳问题,以及提高矸石制备人工土的熟化速度,以煤矸石、城市污泥为基质,通过添加蚯蚓的措施,进行好氧型固废熟化成土试验。结果表明:添加蚯蚓显著降低物料的生物毒性,添加蚯蚓15 d种子发芽指数即达到熟化水平,活动态重金属含量显著降低;添加蚯蚓显著提高物料有效养分含量,呈现总氮含量升高,总有机碳含量显著下降的趋势,35 d后综合肥力最佳;添加蚯蚓促进物料的碳氮转化,腐殖质化指标 R_1 、 R_D 、 R_P 均随时间显著增加。这为大宗消纳矸石固废制备人工土提供了理论依据。

关键词:矸石;污泥;蚯蚓;人工土熟化;好氧堆肥

中图分类号:TD167 文献标识码:A

文章编号:2095-2295(2026)01-0031-06

DOI:10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.004

The effect of adding earthworms on the maturation of gangue sludge into soil

GENG Jishen, SHANG Haili

(School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to solve the problem of the disposal of coal gangue as a large solid waste in the coal development process, and to improve the maturation speed of artificial soil prepared from gangue, aerobic solid waste maturation into soil experiments were conducted using coal gangue and urban sludge as substrates by adding earthworms. The results showed that the addition of earthworms significantly reduced the biological toxicity of the material. The germination index of the seeds reached maturity level after 15 days of adding earthworms, and the dynamic heavy metal content was significantly reduced; The addition of earthworms significantly increased the effective nutrient content of the material, showing an increase in total nitrogen content and a significant decrease in total organic carbon content. After 35 days, the comprehensive fertility was optimal; Adding earthworms promotes the carbon and nitrogen conversion of materials, and the humification indicators R_1 , R_D , and R_P all significantly increase over time. This provides a theoretical basis for the preparation of artificial soil from bulk disposal of gangue solid waste.

Key words: coal gangue; sludge; earthworm; artificial soil maturation; aerobic composting

煤矿开采过程中,大量煤矸石堆置,不仅浪费土地资源,还因其成分复杂且含重金属,未经处理易造成环境污染。目前,煤矸石的消纳途径丰富,涵盖填

埋、回填矿井、建材生产、能源转化等多个领域^[1]。值得关注的是,煤矸石作为土壤改良材料及人工土潜在原料,含有有机质、无机养分,呈碱性或中性,矿物

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF1306003-4);内蒙古自然科学基金委面上项目(2022MS05016);高校基本科研业务费项目(2023);鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20232342)。

作者简介:耿际深,男,硕士研究生。

通信作者:尚海丽,女,副教授,E-mail:150678516@qq.com

收稿日期:2025-01-18

成分与土壤同源,具备制备优质人工土的物质基础^[2-3]。经熟化处理后,其无机养分活化,可为人工土提供必需矿物质营养,提升矿区土壤肥力^[4]。

煤矸石制备人工土及土壤改良剂的技术路径主要包括物理与化学协同处理。通过粉碎、筛分等物理方法调控颗粒粒径,再经热处理、酸洗、碱洗或生物改良等化学手段去除有害成分(如重金属、硫化物)并优化其理化特性。该方法可改善煤矸石基质结构,通过孔隙结构优化、通气性提升及保水能力增强,同步提升其肥力与土壤改良性能^[5]。这样做也面临着一些问题,田巧艳等^[6]人研究发现,矸石本身具有较强的碱性,加入土壤中会显著提高 pH 值,导致土壤盐碱化,这不利于许多植物的生长。SHU 等^[7]研究探讨了矸石作为人工土的使用效果,发现其含有的有机质较少,且矿物质养分的含量不均匀,不能满足大多数植物的生长需求^[7]。

将煤矸石与污泥联用制备人工土,可以有效弥补煤矸石在成土过程中存在的多个问题。煤矸石本身缺乏足够的有机质和养分,而污泥富含有机质、微量元素和有益的土壤活性成分,能够为人工土提供必要的营养物质,改善其肥力和土壤微生物活性^[8]。国内外学者通过污泥与矸石的混合使用能显著提高人工土的有机质含量,改善土壤的水分保持性和透气性。但依赖微生物降解的堆肥工艺存在碳氮转化速率低(C/N 比降幅 < 30%)、腐殖质合成周期长(60 d)等技术瓶颈^[9]。BUSHRA 等^[10]发现污泥与矸石混合物在提高土壤养分、调整 pH 值及改善土壤结构方面具有显著效果。但矸石-污泥混合体系中重金属(如 Cd、Pb)与污泥次生污染物的复合毒性未得到有效控制,现有手段对重金属生物有效性的调控不足,导致人工土发芽指数偏低(< 50%)。

蚯蚓在土壤改良中具有显著的优势,在人工土制备过程中具有提高土壤团聚性、促进熟化速率的潜在优势^[11]。首先,蚯蚓能够通过其消化作用,将有机物料分解为更易于植物吸收的养分,增加土壤的肥力和养分含量。其次,蚯蚓的活动能改善土壤的结构,增加土壤的通气性和透水性,从而提高土壤

的排水性和根系的生长环境^[12-13]。王峰等^[14]研究表明,蚯蚓通过改善土壤结构和增加土壤孔隙度,增强土壤的透气性与水分保持能力,从而促进了植物根系的生长。孔令玮等^[15]研究表明,蚯蚓肠道富含氮、磷、钾等元素,能够改善植物的生长环境,并提高土壤肥力。但细腐殖质组分重构(富里酸/胡敏酸比值动态变化)及土壤团聚体形成(0.25 mm 团聚体占比 < 20%)的动态影响缺乏系统性研究^[15]。上述问题制约了人工土快速熟化与生态安全性提升。王晋等^[16]通过碳循环功能基因组特征得到环境因素对其影响。温欣等^[17]通过对开采沉陷地表变形影响试验研究得到了土壤容重量化地表变形强度。

本研究以煤矸石和城市污泥为主要研究对象,聚焦于两者混合后在添加蚯蚓的条件下进行好氧型固废熟化成土的过程。通过开展小型好氧堆肥试验,系统分析煤矸石的化学成分与污泥的养分组成特征,并围绕矸石-污泥混合物料在蚯蚓生物降解作用下的有机质转化、团聚体形成及重金属迁移等关键指标展开动态监测。研究旨在解决煤矸石作为煤炭开发伴生大宗固废的消纳问题,同时提高矸石制备人工土的熟化速度。通过开展小型好氧堆肥试验,探究蚯蚓生物降解作用对矸石-污泥好氧堆肥熟化过程的促进作用,该研究可为煤基固废协同资源化利用提供新路径,既有利于降低矿区重金属污染风险,又能通过重构土壤理化性质为矿区生态修复提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

污泥取自内蒙古自治区包头市污水处理厂脱水污泥。煤矸石取自乌海市某洗煤厂,使用颚式破碎机破碎后分别过 80、200 目标准筛,得到粒径为 80~200 目的煤矸石粉,采用 X 射线衍射仪(XRD)对煤矸石进行化学成分分析。蚯蚓来自鑫伊达蚯蚓养殖场,品种为牛粪蚯蚓,长度为 4~5 cm。

表 1 煤矸石化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of coal gangue(mass fraction, %)

含量/%	C	Si	Al	Ca	Ti	Cr	Na
煤矸石	17.16	26.88	19.08	1.92	0.61	0.09	0.21

表2 污泥养分组成(质量分数,%)
Table 2 Nutrient composition of sludge

物料	有机碳/%	有机氮/%	有机质/%	含水率/%	pH 值	C/N
污泥	5.25	0.66	53.48	78.35	7.49	7.95

表3 煤矸石及污泥重金属含量
Table 3 Heavy metal content of coal gangue and sludge

物料/(mg·kg ⁻¹)	Cd	Hg	As	Cr	Ni
煤矸石	1.11	1.06	47.78	287.68	188.75
污泥	3	1.64	/	20.99	69.54

1.2 试验设计

矸石-污泥熟化成土试验在微生物复垦试验室进行,为期 35 d。试验温度为 26 ℃,湿度为 55% ~ 60%。按照预实验结果,将煤矸石、污泥按照各 50% 比例进行混合,设 4 个处理,分别为 15 d 蚯蚓堆肥处理、25 d 蚯蚓堆肥处理、35 d 蚯蚓堆肥处理,并设置无蚯蚓对照处理,记为 CK。每个处理设 3 个重复,合计 12 个堆体。堆体大小为 25 kg,并控制各堆体含水率 60% 左右,通过尿素调节碳氮比,使碳氮比在 25:1 左右。成土初期为 5 d,每 24 h 翻堆一次,中期为 15 d,每 2 d 翻堆一次,后期为 15 d,每 5 d 翻堆一次。

1.3 测试指标

堆肥样品采集:在堆肥试验结束后,对蚯蚓添加处理分别在第 15、25、35 d 采样;对照组采集 35 d 样品,将一部分堆肥样品放入无菌自封袋,置于 -20 ℃ 保存。剩余土样风干,过 2 mm 筛保存。

土壤指标测定:pH 采用 pH 计进行测定,按照水土比 5:10 置于离心管中,振荡 30 min,用 pH 计和电导率仪对上清液进行测定;速效磷采用钼锑抗比色法测定;铵态氮硝态氮采用氯化钾浸提方法测定;脱氢酶采用脱氢酶试剂盒测定;富里酸和胡敏酸采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;重金属测定采用毒性特征沥滤方法(TCLP)测定煤矸石重金属 TCLP 浓度,总有机碳采用 TOC 元素分析仪测定。

种子发芽指数测定:所采集堆肥样品按干物质与去离子水 1:10 比例,室温条件下浸提 24 h,定性滤纸过滤,然后取滤液 5 mL 加入垫有两层滤纸的培养皿中,在滤纸上均匀放入 20 粒种子,以去离子水为空白对照,放入 25 ℃ 恒温培养箱内培养 48 h 后取出,计算种子发芽指数。种子发芽率 = (总种

子数/发芽种子数) × 100%。

腐殖化指数:利用方程(1) ~ (3) 计算了腐殖化指数 R_P 、 R_D 、 R_I 。

$$R_P = \frac{C_{HA}}{C_{EX}}, \quad (1)$$

$$R_D = \frac{C_{HA}}{C_{FA}}, \quad (2)$$

$$R_I = \frac{C_{HA}}{C_{TO}}. \quad (3)$$

式中: R_I 为腐殖化指数; R_P 为 HA 的百分比,%; R_D 为聚合度; C_{TO} 、 C_{HA} 、 C_{FA} 分别为 T_{OC} 、胡敏酸、富里酸的含量,g/kg。

1.4 数据处理

用 SPSS23.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),差异显著性定义为 $P < 0.05$; Origin 2022 进行图件绘制。

2 试验结果与分析

2.1 生物毒性的影响与分析

添加蚯蚓可显著提高矸石污泥人工土种子发芽指数,且随蚯蚓堆肥时间增长,种子发芽指数显著提升。当种子发芽指数超 80%,堆肥被视为完全腐熟且无毒,表明添加蚯蚓能显著加快矸石人工土熟化速率、提升熟化程度。

此外,蚯蚓的引入不仅显著加速矸石污泥人工土熟化进程,同时通过其生物扰动作用使煤矸石中活动态重金属的生物可利用性降低。随着堆肥时间增加,堆肥中煤矸石活动态重金属铬、镍含量及生物毒性均显著降低。与 CK 相比,堆肥 15、25、35 d,煤矸石中活动态重金属铬分别下降 58.62%、64.65%、67.24%,镍含量分别下降 35.48%、

51.24%、48.38%。

在蚯蚓协助矸石污泥堆肥过程中,重金属浓度变化受多种因素影响。蚯蚓通过肠道酶解代谢及微生物协同作用降低重金属浓度。堆肥时污泥 pH 值下降也影响重金属富集。蚯蚓对不同重金属的富集

能力与种类、生长环境相关。研究表明,污泥有机物矿化程度越高,蚯蚓生长越好,煤矸石重金属浓度降幅越大。结果显示,随着堆肥时间增长,煤矸石重金属浓度逐渐降低,说明蚯蚓对重金属富集能力逐渐增强,第 35 d 重金属含量降幅最大。

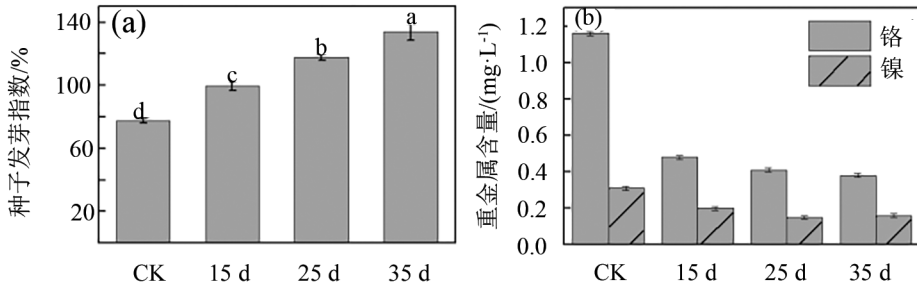


图 1 种子发芽指数、土壤重金属含量变化

Fig. 1 Variation of seed germination index and soil heavy metal content

(a) 种子发芽指数(%); (b) 重金属含量变化。

2.2 速效养分的影响与分析

矸石污泥人工土壤 pH 在 6~9 间,处于适宜微生物代谢活动的区间。与对照组相比,添加蚯蚓处理 25 d 后,pH 显著提升至中性,说明蚯蚓活动产生的分泌物及肠道微生物有助于酸碱调节。

蚯蚓堆肥处理组,速效磷、总氮及脱氢酶含量显著高于对照组,这是因为蚯蚓活动促进有机物分解,增强微生物代谢,加速有机磷矿化释放速效磷;其排

泄物富集氮素,同时肠道分泌物及扰动作用提升脱氢酶活性,优化堆肥养分转化。有机碳含量则显著降低,表明蚯蚓加速有机物分解,消耗大量有机碳。其中,速效磷与总氮含量随堆肥时间增长显著提高,25 d 达最大值;有机碳与脱氢酶含量随时间增加显著降低,第 25 d 有机碳含量降至最低,第 35 d 脱氢酶含量降至最低。

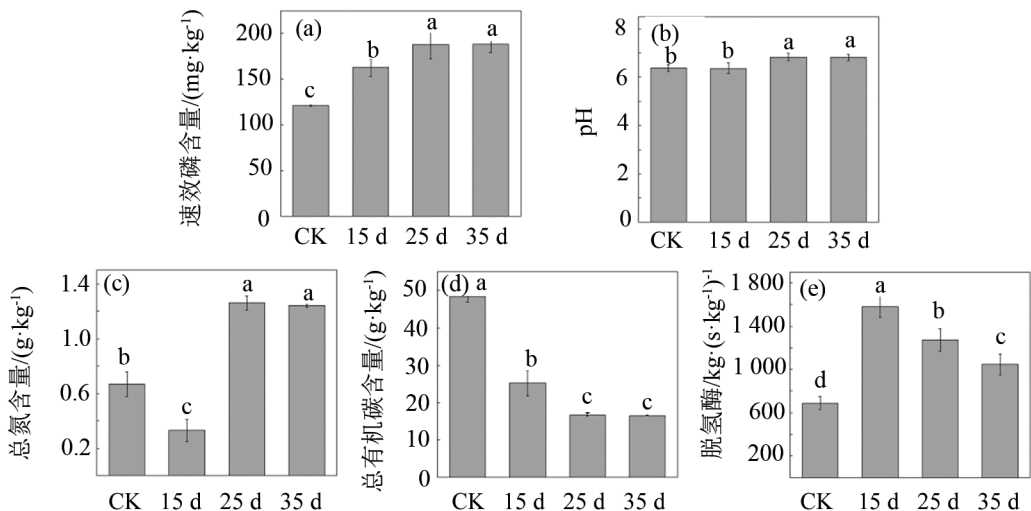


图 2 pH、速效磷、总氮、总有机碳、脱氢酶含量变化

Fig. 2 Variation of pH, available phosphorus, total nitrogen, total organic carbon, and dehydrogenase

(a) 速效磷含量; (b) pH 值; (c) 总氮含量; (d) 总有机碳含量; (e) 脱氢酶。

综上,添加蚯蚓处理 25 d 后,矽石污泥人工土的速度性养分呈现稳定状态。研究表明,蚯蚓活动通过抑制氨挥发途径及调节堆体 pH 值,显著增强微生物代谢活性,加速有机质生物降解进程。其肠道酶系与本土微生物群落形成协同效应,以有机-无机复合氮为氮源驱动碳氮代谢。总碳以 CO_2 形式流失而显著下降,蚯蚓消化道丰富的酶类,促进有机质分解矿化,大幅降低煤矽石和污泥中的有机碳。

2.3 碳氮转化的影响与分析

堆肥过程中,氮转化以氨化和硝化为特征。结

束后,与对照组相比,添加蚯蚓处理组氨态氮显著降低、硝态氮显著升高,说明蚯蚓造成氨态氮损耗,减少氨气排放;对照组则氨态氮增加、硝态氮降低,以硝化作用为主。

碳氮比是衡量堆肥腐熟度的关键指标,一般认为 C/N 小于 20 堆肥腐熟。添加蚯蚓处理组在 25 d 时碳氮比降至小于 20,标志着矽石-污泥人工土进入腐熟稳定阶段,而对照组碳氮比始终维持在较高水平。结果表明 25 d 和 35 d 的样品均满足腐熟度标准,堆肥时间越长,腐熟效果越好。

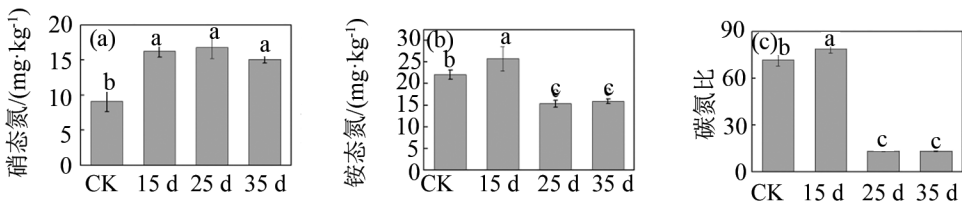


图 3 铵态氮、硝态氮含量、碳氮比变化

Fig. 3 Changes in ammonium nitrogen nitrate nitrogen content and carbon-to-nitrogen ratio

(a) 硝态氮含量; (b) 铵态氮; (c) 碳氮比。

添加蚯蚓提高了富里酸向胡敏酸的转化,促进了矽石人工土的腐殖化程度。添加蚯蚓处理在 35 d 的胡富比显著高于未添加蚯蚓对照组。随着堆肥时间增长,添加蚯蚓处理组胡富比表现出先降低再升高的规律,在 25 d 胡富比值呈最低值为 1.02。可能

是在此阶段堆肥第二次发酵,导致第 25 d 富里酸升高,胡敏酸降低,导致胡富比降低。在 35 d 时,富里酸含量的下降与微生物对有机质的充分降解有关,因为富里酸是一种小分子物质,可以被微生物直接利用并转化为胡敏酸等大分子。

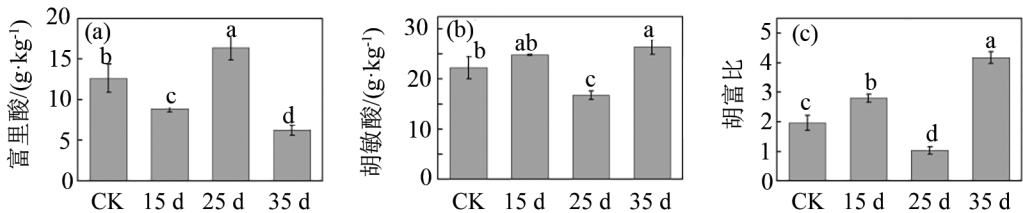


图 4 富里酸、胡敏酸含量、胡富比变化

Fig. 4 Changes in fulvic acid humic acid content and HA:FA ratio

(a) 富里酸; (b) 胡富比; (c) 胡敏酸。

腐殖化指数 R_1 、 R_p 和 R_D 是反映堆肥腐殖化程度和腐熟度的较为客观和全面的参数。 R_1 用于评价堆肥溶解有机质的腐殖化程度。随着蚯蚓堆肥时间增加, R_1 、 R_p 显著升高,且显著高于对照组,表明添加蚯蚓可显著促进堆肥的腐殖化程度。

R_D 是评估堆肥腐殖质化及相对固存速度的重要指标。它随堆肥时间呈波动式上升,在 35 d 达到

最大值,且显著高于对照组。意味着添加蚯蚓能提高总微生物活性,推动腐殖质化与成熟进程。经 35 d 堆肥的产品符合成熟度要求,可安全用于田间施肥。

在堆肥过程中添加蚯蚓,能够增强微生物活性,提升堆肥效率与产品质量。相较于腐殖质组分

(C_{HA} 和 C_{FA}), 腐殖质化指数(R_1 、 R_p 和 R_D) 更能客观反映堆肥的腐殖质化程度与最终成熟度。蚯蚓的加入促进了 C_{HA} 合成, 尤其在 15 d 和 35 d 时, 提升了

C_{HA} 合成效率。 C_{FA} 因分子量低, 可被微生物转化为更稳定的 C_{HA} , 进而增加 R_1 和 R_p 。

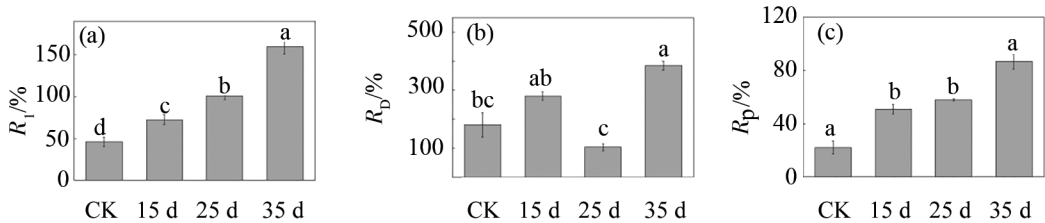


图5 R_1 (腐殖化指数)、 R_D (聚合度)、 R_p (胡敏酸的百分比) 变化

Fig. 5 Variation of R_1 (Humitication Index)、 R_D (Degree of Polymerization) and R_p (Percentage of Humic Acia) (a) R_1 ; (b) R_p ; (c) R_D 。

3 结论

围绕矸石-污泥熟化成土的问题, 采用添加蚯蚓措施加速其熟化进程。通过对比研究添加蚯蚓措施对矸石人工土的生物毒性、有效养分和碳氮转化过程的影响, 综合评价添加蚯蚓在矸石污泥成土中的应用潜力。研究结论如下:

1) 添加蚯蚓措施有效降低矸石人工土的生物毒性。其中, 添加蚯蚓措施不仅显著提高种子发芽指数, 堆肥 35 d 达到最佳腐熟, 而且显著降低物料的活动态重金属含量, 25 d 达到稳定。

2) 添加蚯蚓显著提高物料有效养分含量, 表现出总氮含量升高, 总有机碳含量显著下降的趋势, 35 d 后综合肥力最佳。

3) 添加蚯蚓促进物料的碳氮转化, 促进了矸石人工土的腐殖化程度。添加蚯蚓处理在 35 d 的胡富比显著高于未添加蚯蚓对照组。腐殖质化指标 R_1 、 R_D 、 R_p 均随时间显著增加。

4) 矸石-污泥熟化成土过程中加入蚯蚓措施, 能够显著提高腐熟速率和熟化程度, 这为大宗消纳矸石固废制备人工土提供了重要技术支撑。然而, 研究仍存在以下局限性和未解决问题: 实验周期仅覆盖短期(35 d)熟化过程, 缺乏对长期稳定性的跟踪评估; 未对土壤团聚体进行深入分析。尚未建立基于碳氮代谢通量的熟化进程动态预测模型。后续研究需重点解决蚯蚓对土壤团聚体的影响以及人工土工程化应用中的生态适应性等关键问题。

参考文献:

- [1] 李晋荣, 洪坚平, 郝鲜俊, 等. 不同磷水平下接种 AM 真菌对矿区玉米生长的影响[J]. 山西农业科学, 2013, 41(8): 834.
- [2] 柯凯恩, 董晓芸, 周金星, 金基石, 郑景明. 煤矸石生态基质的制备配方及其肥力特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 308.
- [3] 康振中. 煤基固废与牛粪混合发酵基质在荒漠化土壤改良中的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [4] 赵佩伦. 煤基固废与生物质配制再造土壤微生物的群落结构特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [5] 时尚, 孙文涛, 唐晶, 等. 有机固废好氧发酵堆肥技术研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(S2): 62.
- [6] 田巧艳, 亢福仁, 张凯煜, 等. 煤基固废生态化利用研究进展[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(6): 57.
- [7] SHU L, WANG H, HE X. Physicochemical properties and planting performance of artificial Soil developed from multiple coal-based solid waste materials [J]. Sustainability, 2024, 16(5).
- [8] LUO C, LI S, REN P, et al. Enhancing the carbon content of coal gangue for composting through sludge amendment: a feasibility study [J]. Environmental Pollution, 2024, 348(May): 1-11.
- [9] WEISS B, LARINK O. Influence of sewage sludge and heavy metals on nematodes in an arable soil [J]. Biology & Fertility of Soils, 1991, 12(1): 5.
- [10] 于川洋. 生物炭添加污泥堆肥对土壤改良效果研究 [J]. 绿色科技, 2017, 19(8): 95.