

稳定化垃圾填埋场中腐殖土的特性及资源潜力分析综述

孙新茹^{*}, 胡涵, 刘伟盼, 席慧君, 周鹏

西藏大学, 西藏 拉萨 850000

DOI: 10.61369/SSSD.2025080020

摘要 : 腐殖土作为垃圾填埋场稳定化处理的产物, 具有优良的团聚结构、保水能力和养分保留特性。本文系统综述了腐殖土的物理、化学与微生物特性: 其粒径分布不均、干密度较高, 但有机质和养分含量高于天然土壤; 化学性质呈中性至弱碱性, 盐分与重金属(如Cu、Pb、Cr等)含量需关注环境风险; 微生物群落以Proteobacteria、Actinobacteria等为主, 参与有机质转化与温室气体减排。腐殖土在生态修复(矿山复垦、退化土地治理)、非食用农业及园艺生产中展现出巨大资源化潜力。通过整合生物炭、蛋白基产品及堆肥技术可进一步提升其安全性与效能。未来需构建多指标评估体系, 深化腐殖化机理研究, 完善标准化管理, 以支撑“无废城市”与“双碳”目标实现。

关键词 : 垃圾填埋场; 腐殖土; 特性; 资源化潜力; 浅析

Review on Characteristics and Resource Potential of Humus Soil in Stabilized Landfills

Sun Xinru^{*}, Hu Han, Liu Weipan, Xi Huijun, Zhou Peng

Tibet University, Lhasa, Tibet 850000

Abstract : As a product of stabilized treatment in landfills, humus soil possesses excellent aggregate structure, water retention capacity, and nutrient preservation properties. This paper systematically reviews the physical, chemical, and microbial characteristics of humus soil: its particle size distribution is uneven and dry density is relatively high, but the contents of organic matter and nutrients are higher than those in natural soil; its chemical properties are neutral to weakly alkaline, and the contents of salts and heavy metals (such as Cu, Pb, Cr, etc.) require attention to environmental risks; the microbial community is dominated by Proteobacteria, Actinobacteria, etc., which are involved in organic matter transformation and greenhouse gas emission reduction. Humus soil shows great resource potential in ecological restoration (mine reclamation, degraded land management), non-edible agriculture, and horticultural production. The integration of biochar, protein-based products, and composting technology can further improve its safety and efficiency. In the future, it is necessary to construct a multi-index evaluation system, deepen the research on humification mechanisms, and improve standardized management to support the realization of the "zero-waste city" and "double carbon" goals.

Keywords : landfill; humus soil; characteristics; resource potential; review

腐殖土是垃圾经过长期填埋及后续稳定化处理过程中, 经过生物、化学、物理等多重因素共同作用下转化形成的类似天然土壤的基质, 具有一定的团聚结构和保水能力^[1,2], 其不仅保留了有机质中的部分营养成分, 而且在物理结构上与农田土壤更为接近, 在重塑生态环境和恢复土壤健康方面具有明显的功能优势。

在无废城市建设及双碳战略背景下, 腐殖土的资源化利用显得尤为重要。其废弃物到资源化产品的转化, 不仅为土壤改良和生态恢复提供了廉价且高效的材料, 同时也在碳循环过程中起到了固碳和调控土壤生物活性的双重作用。这种由填埋场废弃物转化得到的“新型土壤”与传统腐殖质相比, 能够在保障土壤生态功能的同时, 通过较高含量的有机质改善土壤微生物多样性和生物活性, 在农业和园艺等生产中实现优良的施肥效果, 并对改善城市绿化和退化土地治理提供切实支持。

一、腐殖土的特性

(一) 物理特性

物理特性对于土壤的结构稳定性、通气透水性能以及植物根系发育至关重要。然而，填埋场腐殖土由于原始混合废物组成复杂，导致其物理性质与自然土壤存在显著差异。典型稳定化填埋场腐殖土的粒径分级表现出一定的特征，通常包含砂粒、粉粒和黏粒等不同粒径的颗粒，这主要是由于原始垃圾成分的差异以及降解过程中有机质分解与无机物残留的相对比例变化所致。粒径分布不均可能会对后续利用产生影响，如过粗的颗粒可能不利于耕作，而过细的颗粒则容易导致板结或流失^[3]。总孔隙度、通气孔隙与持水孔隙的比例关系是评价腐殖土结构特征的重要指标。填埋过程中长期的压实会导致结构性破坏，进而影响根系穿透和气体交换。填埋场腐殖土的干密度典型值范围通常在1.1–1.6 g/cm³之间，与适宜植物生长的土壤容重（一般<1.4 g/cm³）相比，可能偏高，高干密度主要是由于机械压实和有机质矿化后骨架塌陷等原因造成的。高干密度会对植物根系生长产生阻力，并降低水分入渗速率，产生负面影响^[4]。田间持水量（FC）、萎蔫系数（PWP）和有效水含量等参数是衡量腐殖土水分保持能力的重要指标。腐殖土中有机质含量与持水能力之间存在正相关关系，但颗粒组成不合理可能导致排水不良或快速失水。

(二) 化学特性分析

与天然农地土壤相比，填埋场腐殖土表现出类似土壤的特性，孔隙率高、渗透率高，养分含量显著升高，有效钾、氮、磷和有机质含量高出5.0–21.6倍。多数填埋场腐殖土pH呈中性至弱碱性（pH 7.0–8.5），这源于填埋过程中碳酸盐类物质积累或渗滤液循环影响。pH值会影响养分有效性（如磷的固定）和重金属溶出行为。电导率（EC）值范围可以反映腐殖土的盐分状况，盐分来源包括厨余垃圾分解、建筑材料溶解、渗滤液回灌等，高盐分常见于早期或管理不当的填埋场。盐胁迫会抑制植物种子发芽和幼苗生长，需要设定安全阈值参考（如EC<4 dS/m）。垃圾填埋场土壤中铜、铅、铬、锌和镉等重金属浓度较高，并且在特定方向上发生显著迁移，特别是向河流和农业区迁移^[5]。不同金属的重金属迁移率差异很大，其中锌表现出最大的迁移率，而镉在垃圾填埋场中保留得很好^[6]；环境条件强烈影响金属释放，与中性条件相比，酸性和好氧条件大大增加了重金属的迁移率^[7,8]。随着填埋龄增加，有机质趋于稳定、养分释放缓慢、重金属相对固定、pH趋于中性，体现出“自稳定化”的趋势。

(三) 微生物特性分析

稳定化过程中细菌、真菌、古菌等主要类群的动态变化呈现一定的规律，早期以发酵菌为主，后期甲烷氧化菌、硝化菌增多。高通量测序研究结果（如16S rRNA/ITS测序）可以揭示优势门类，如Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes、Actinobacteria、Ascomycota等。其中：分解者（纤维素降解菌、木质素降解真菌^[9]，在有机质转化中发挥重要作用），固氮菌（虽然不是填埋系统的主导功能，但在后期生态修复中具有潜在价值），植物促生菌（产激素、溶磷、抗病等功能可以提升腐殖土的农用

价值），丛枝菌根真菌（虽然在填埋环境中稀少，但其重建是实现生态功能恢复的重要标志^[10]），甲烷氧化菌与反硝化菌（参与温室气体减排，体现了“双碳”背景下的环境正效益。）

二、腐殖土的资源化利用潜力

(一) 生态修复应用

矿山复垦：矿山开采活动对地表造成严重破坏，导致土壤结构退化、养分流失，甚至重金属污染。腐殖土富含有机质，能够改善土壤结构，增加孔隙度，提高保水保肥能力，为植被恢复提供良好的生长基质。此外，腐殖土中的微生物群落能够促进养分循环，加速矿区生态系统的重建。

城市绿化：城市绿化是改善城市环境质量的重要手段。一方面，腐殖土能够提供植物生长所需的养分，减少对化肥的依赖，降低绿化维护成本。另一方面，腐殖土具有良好的保水能力，能够减少灌溉频率，节约水资源。相比于传统的土壤改良方式，利用垃圾填埋场产生的腐殖土，能够实现城市固废的资源化利用，符合可持续发展的理念。

退化土地治理：全球范围内存在大量的退化土地，如盐碱地、沙化土地和污染土壤，这些土地由于自然或人为因素的影响，生产力低下，甚至寸草不生。腐殖土作为一种土壤改良剂，可以通过多种途径改善这些退化土地的状况。对于盐碱地，腐殖土中的有机质可以与土壤中的盐分离子结合，降低盐分浓度，改善土壤的通透性。对于沙化土地，腐殖土可以增加土壤的团聚作用，提高保水能力，防止土壤侵蚀。对于污染土壤，腐殖土中的有机质可以吸附重金属等污染物，降低其生物有效性，从而减少对植物的危害。

(二) 非食用农业及园艺生产

非食用农业：在花卉、草坪、苗木培育等非食用农业领域，由于腐殖土富含植物生长所需的各种营养元素，能够促进植物的生长发育，提高产量和品质。与传统的化学肥料相比，腐殖土具有缓释养分的特点，能够长期稳定地供应植物养分，减少养分流失，降低环境污染风险。腐殖土中的微生物群落能够改善土壤微生态环境，增强植物的抗病虫害能力。考虑到安全问题，非食用农业使用腐殖土时应加强对重金属等有害物质的监测，确保产品质量安全。

园艺生产：在家庭园艺和温室栽培中，腐殖土可以作为盆栽基质或有机肥料的替代品。腐殖土质地疏松，透气性好，有利于植物根系的生长。同时，腐殖土富含有机质和各种营养元素，能够满足植物生长所需的养分。腐殖土还具有良好的保水保肥能力，可以减少浇水和施肥的频率，节省管理成本。

(三) 协同技术整合与增效策略

为了进一步提高腐殖土的资源化利用效率和应用效果，可以将腐殖土与其他技术进行整合，形成协同效应，实现增效。

生物炭复合：生物炭是一种由生物质在高温、缺氧条件下热解产生的富碳物质。生物炭具有孔隙结构发达、比表面积大、化学性质稳定等特点，能够改善土壤结构，提高保水保肥能力，吸

附重金属等污染物。腐殖土与生物炭复合使用，可以形成优势互补，产生协同效应。生物炭还可以吸附腐殖土中的重金属等污染物，降低其生物有效性，提高腐殖土的安全性。有研究表明，用啤酒废粮制成的生物炭可以有效改善叶用莴苣的生长和品质。

蛋白基产品：蛋白基产品，如蛋白水解物、氨基酸肥料等，是一类由蛋白质水解产生的含有多种氨基酸和肽类的有机肥料。蛋白基产品能够直接被植物吸收利用，促进植物生长发育，提高产量和品质。腐殖土与蛋白基产品协同使用，可以提高养分利用率，促进植物生长。蛋白基产品还可以改善土壤结构，提高土壤的保水保肥能力。将农业食品和工业副产品开发成生物刺激剂，是现代农业可持续发展的方向。

堆肥技术整合：堆肥技术可以将农业废弃物、城市垃圾等有机物转化为有机肥料，实现资源化利用。腐殖土与堆肥技术整合，可以加速有机物的分解，提高堆肥的质量。堆肥过程还可以将腐殖土中的养分转化为植物更容易吸收利用的形式，提高其肥

效。有研究表明，酒厂废醪经过堆肥处理后，可以成为一种富含养分、改良土壤的有机肥料。

三、总结

通过对稳定化垃圾填埋场腐殖土的物理、化学和生物特性进行系统分析，明确了稳定化成熟度在评估腐殖土资源化利用安全性中的核心作用。当前绝大多数研究均表明，科学的稳定化处理不仅能显著改善土体物理结构和有机质组成，通过特定工艺路径还能够有效降低污染物（如重金属、微塑料）的释放风险，从而实现环境安全与资源再生的双重目标。只有将多维指标体系（包含C/N比、腐殖化指数、呼吸速率、微生物活性及重金属浸出毒性等）综合考量，腐殖土资源化利用才能真正具备长远的环保与经济意义。

参考文献

- [1] Yang Fan, Tang Chunyu, Antonietti Markus. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(10): 6221–6239. doi:10.1039/d0cs01363c.
- [2] Zhang Cheng - liang, Feng Jingjing, Ting-ning Zhao, et al. Physical, Chemical, and Engineering Properties of Landfill Stabilized Waste[J]. Land Degradation and Development, 2016, 28(3): 1113–1121. doi:10.1002/ldr.2594.
- [3] Shulan, Zhao et al. "Physical and chemical characterization of municipal solid waste compost in different particle size fractions." Polish Journal of Environmental Studies 21 (2012): n. pag.
- [4] Tang, Yongkang et al. "Effects of Different Particle Sizes on the Bulk Density, Porosity Character, Water Suction of Substrates." Chinese Journal of Space Science(2022): n. pag.
- [5] 詹明晔, 孙言秋, 周涛, 刘小婷, 廖瑜亮, 曹军, 黎鹏, 蓝焕杰, 杨林, 杨黎, 赵由才. 填埋场周边土壤重金属时空分布及污染评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(4): 167–179.
- [6] Chai, X., Shimaoka, T., Cao, X., Qiang, G., & Zhao, Y. (2007). Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: implications in risk assessment and reclamation. Journal of hazardous materials, 144 1–2, 485–91.
- [7] Lee H, Coulon F, Wagland ST. Influence of pH, depth and humic acid on metal and metalloids recovery from municipal solid waste landfills. Sci Total Environ. 2022;806(Pt 1):150332.
- [8] Ze, Luo. "STUDY ON HEAVY METAL TO ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM AN OLD LANDFILL IN WUHAN, HUBEI PROVINCE." Geological Science and Technology Information(2003): n. pag.
- [9] Hao X , Li J , Xia J , et al. Isolation and characterization of a low-temperature and cellulose-degrading fungus Tausonia pullulans LC-6[J]. 2025.
- [10] Palla M., Turrini Alessandra, Cristani Caterina, et al. Impact of sheep wool residues as soil amendments on olive beneficial symbionts and bacterial diversity[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2022.