

DOI: 10.13205/j.hjgc.202506001

张轶洋, 高冰洁, 周小国, 等. 污泥土地利用及土壤有机碳响应机制研究进展[J]. 环境工程, 2025, 43(6): 1-12.

ZHANG Y Y, GAO B J, ZHOU X G, et al. Research progress on sludge land use and response mechanisms of soil organic carbon [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(6): 1-12.

污泥土地利用及土壤有机碳响应机制研究进展

张轶洋¹ 高冰洁¹ 周小国² 陈祥³ 董滨¹ 蔡辰^{1*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 长江生态环保集团有限公司技术中心, 武汉 430014;
3. 中国长江三峡集团有限公司长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430010)

摘要:我国城市污泥处理处置已发展到新的阶段, 工作重点逐渐从污泥处理转向资源化利用。污泥经稳定化处理后用于土地利用, 对土壤有机碳的积累和固持具有正面作用。对污泥土地利用的方式、标准及相关的应用研究案例进行了综述。结果表明, 污泥土地利用不仅可以改善土壤性质, 还能够有效提高土壤有机碳含量。通过对比不同污泥土地利用方式, 发现园林绿化和生态修复相结合的土地利用形式具有较大的发展潜力。进一步总结了污泥土地利用对土壤有机碳的影响机制, 分别从污泥有机质组分、物理化学过程和微生物驱动因素等方面进行了深入分析。在物理化学过程方面, 污泥的施用可显著改变土壤结构和pH, 进而影响土壤有机碳的转化与固存。在微生物过程方面, 污泥施用后微生物群落和功能的变化是影响土壤有机碳周转的关键因素, 其中微生物残体对于有机碳累积至关重要。通过系统梳理国内外相关研究进展, 可为污泥的土地利用及可持续管理提供理论支撑与指导。

关键词: 污泥土地利用; 土壤有机碳; 污泥组分; 微生物群落; 功能基因

Research progress on sludge land use and response mechanisms of soil organic carbon

ZHANG Yiyang¹, GAO Bingjie¹, ZHOU Xiaoguo², CHEN Xiang³, DONG Bin¹, CAI Chen^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Yangtze River Ecology and Environmental Protection Group Co., Ltd., Technology Center, Wuhan 430014, China;

3. China Yangtze Three Gorges Corporation, Yangtze River Economic Belt Ecological Environment National Engineering Research Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: Urban sludge treatment and disposal in China have entered a new phase, shifting from simple treatment to resource utilization. The application of stabilized sludge in land use has been shown to positively contribute to the accumulation and sequestration of soil organic carbon (SOC). This paper reviewed the methods, standards, and mechanisms of SOC response in sludge land use, and found that sludge land use not only improved soil properties but also effectively enhanced SOC content. By comparing different application methods, it was found that the combined approach integrating landscaping and ecological restoration demonstrated significant development potential. The mechanisms underlying the impact of sludge land use on SOC were further summarized, including aspects of sludge organic matter composition, physicochemical processes, and microbial drivers. In terms of physicochemical process, sludge application significantly altered soil structure and pH, thereby influencing SOC transformation and sequestration. Regarding microbial processes, changes in microbial communities and

收稿日期: 2024-12-28; 修改日期: 2025-01-23; 接收日期: 2025-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“生物稳定化污泥施用对土壤有机碳动态变化的影响机制”(42277296); 国家重点研发计划项目“长江经济带典型城市多源污泥协同处置集成示范”(2020YFC1908705)

第一作者: 张轶洋(2000—), 男, 硕士研究生。zyy_yyz_zyy@tongji.edu.cn

* 通信作者: 蔡辰(1988—), 男, 副教授, 主要研究方向为碳中和理论与技术。caic@tongji.edu.cn

functions following sludge application are key factors affecting SOC turnover, with microbial residues playing a critical role in SOC accumulation. By systematically reviewing relevant research progress domestically and internationally, this study can provide theoretical support and guidance for the sustainable management and land use of sludge.

Keywords: sludge land use; soil organic carbon; sludge components; microbial community; functional gene

0 引 言

自“十一五”以来,我国城市污泥处理处置取得了一系列突破,对污泥的认识从污染属性逐渐向资源属性转变。2020年国内已建成的县级以上污水处理厂多达4326家,污泥年产生量超过6500万t(以含水率80%计),预计2025年我国污泥年产生量将突破9000万t^[1]。同时,我国城市污泥泥质也逐渐变好,近30年来,镉、铜、汞、铅等重金属在污泥中的含量呈逐渐下降趋势^[2]。当下我国城市污泥处理处置已发展到新的阶段,工作重点逐渐从污泥处理转向污泥资源化利用。

污泥土地利用在国际上具有广泛应用,但国内仍有较大发展空间。当前,国际上污泥资源化利用已经成为共识。表1为典型国家和地区的污泥资源化利用率。可见,土地利用是污泥资源化利用最主要的形式。其他污泥资源化利用的方法有能源回收、用作替代燃料来源、用作建筑材料、利用新兴技术从污泥中回收资源等。澳大利亚、欧洲、日本和美国是污泥资源化利用的领先者。相比之下,我国在此方面的总体规划仍有一定差距。通过资料调查,1984—2017年间我国共发布63份污泥处理处置相关文件。与污泥土地利用相关的文件仅有4项专项泥质标准,且负面清单中污染物指标含20余项,正面清单只有总养分和总有机质含量。并且,我国当下的污泥处置率较低,远低于欧洲平均水平^[3],深入理解污泥的资源属性,对我国污泥土地利用战略规划具有重要意义。

污泥土地利用具有重要的生态价值和固碳潜力。合理施用污泥可以有效改善土壤结构及其理化性质,从而促进作物生长和提高产量。有研究表明,适量施用稳定化污泥能够显著提高水稻、旱地作物等的产量^[4]。污泥中富含多种营养成分,其土地利用不仅可以为土壤和作物提供养分,还能通过农作物的吸收传递,实现养分在土壤-植物-人类食物链中的循环^[1]。此外,污泥中含有大量有机质组分,这些外源有机质的引入可为土壤有机碳提供重要补充。污泥施用后,其所携带的易腐败有机质经过一系列

表1 典型国家或地区污泥产量和资源化利用率

Table 1 Sludge production and resource utilization rates in typical countries or regions

国家或地区	污泥利用率/%	年干泥产量/ 百万t	主要应用
英国	85	1.05	土地利用,能源回收
澳大利亚	80	0.36	土地利用
南非	80	1.0	土地利用
印度	80	—	土地利用
日本	74	2.2	能源回收,建材利用
德国	60	2.3	土地利用,能源回收
美国	55	17.8	土地利用
欧盟	40	9.0	土地利用
韩国	6	1.9	土地利用,建材利用
新加坡	0	0.12	—
中国香港	0	0.3	—

注:—表示无法获得数据;资料来源为亚行东亚局https://www.adb.org/sites/default/files/publication/29785/promoting-sustainable-sewage-utilization-prc-zh_0.pdf。

生化过程,可转化为较稳定的形态,展现出较好的固碳潜力。

本文就污泥土地利用方式、相关标准及典型应用案例进行了综述,旨在明确污泥土地利用的潜在效益与局限性,为我国污泥土地利用提供一定的实践指导。同时本文对污泥施用后土壤有机碳转化机理进行了深入分析,梳理了污泥对土壤结构、理化性质和微生物活动等方面的影响,为厘清污泥土地利用场景下的土壤固碳机理提供了理论支撑。

1 污泥土地利用方式(标准)及案例

1.1 利用方式

1)农业利用。污泥农业利用是指将处理过的污泥应用于农业领域,以改善土壤肥力的过程。我国污泥的农业利用开始较早,在20世纪60—70年代就已经存在相关应用案例。城市污泥中富含氮、磷、有机质等营养物质,可作为优良的肥料替代品^[5]。Enrica等^[6]将市政污泥施用于意大利南部的农田土壤中,半年后其有机碳含量提升量6.7%。但污泥中的重金属等有害物质,现阶段污泥的农业利用方式仍存在一定阻力^[7]。随着我国城市污泥的污染负荷指数逐年下降^[8],管理不断规范,污泥农业利用将具有较大潜力。

2)林业利用。污泥经堆肥等处理手段后可用于林业应用。我国人工林面积广阔,污泥林业利用不仅有助于改善林地土壤质量,也能有效处置大量城市污泥。污泥林业应用可增加土壤有机质含量、氮磷等营养物质,进而改良土壤结构,提高土壤肥力。研究表明,污泥施用后的林木株高、地径粗等显著提升^[9]。董晓芸等^[10]对北京市某平原造林示范区土地施用堆肥污泥后,土壤有机碳含量提升 18.4%。然而,林业场地通常与污泥处理设施相距较远,会带来较大的运输成本,直接影响污泥林业利用的经济性。此外,有研究表明污泥林业应用时重金属会在短期内停留在土壤表层^[11],其对地下水的污染风险不容忽视。

3)园林绿化。污泥的园林绿化指利用处理后的城市污泥应用在苗圃、市政绿化等场景。由于园林作物并不直接进入食物链,因此可有效规避污泥中污染物带来的潜在风险。研究表明,污泥无论是单

独施用还是与化肥结合施用于园林绿地,草坪、树木的长势均有提升^[9]。由于园林绿化场地多在城市内或城市周边,与污泥处理设施地理位置较为接近,具有明显的运输成本优势。

4)生态修复。污泥可作为优质客土来满足矿山、道路边坡等场景的生态修复需求。我国矿山废弃地面积日益增加,相对应的生态修复对客土需求缺口巨大^[12]。城市污泥可有效改善土壤物理性质,增加土壤肥力^[13]。有研究表明,城市污泥用于矿山废弃地复垦可有效地改善土地理化性质、防范水土流失,有利于迅速恢复当地植被、重构微生物生态^[14]。亦有研究表明污泥生态修复可提升土壤有机质含量。如 Soria 等^[15]在西班牙的一处石灰石采石场施用消化污泥,使得其土壤有机碳含量提升了 7%。鉴于城市矿山等废弃地的生态修复需求较大,生态修复场景可消纳大量的城市污泥。

不同污泥土地利用方式的特点对比见表 2。

表 2 不同污泥土地利用方式对比
Table 2 Comparisons of different sludge land use methods

利用方式	特点	优点	缺点
农业利用	将处理后的污泥作为肥料直接应用于农田	提供丰富的有机质和营养元素,减少化肥使用,降低农业生产成本	污泥中可能含有重金属和病原体,存在食品安全和环境污染风险,且“政出多方”,存在相应风险
林业利用	在林地中施用污泥,促进树木生长	提高土壤有机质含量,改善林地土壤结构和肥力;促进树木生长,增加林下覆盖率与生物量	场地与污泥处理设施距离远,运输成本高;可能导致土壤重金属累积,需评估对森林土壤和地下水的长期影响
园林绿化	将污泥用于城市绿化和园艺	提高草坪、树木长势;靠近城市,运输成本低;避免进入食物链,污染风险相对较低	可能引起土壤结构变化,如板结、酸碱度变化,影响植物生长
生态修复	在受污染或退化的土地上使用污泥	改善土壤理化性质,防止水土流失,快速恢复植被并重构微生物生态;可消纳大量污泥	污泥有害物质可能对修复区域造成二次污染,需要严格控制;针对不同生态修复需求,调整施用方案

1.2 相关标准

污泥中含有丰富的有机营养成分,如氮、磷、钾等以及植物所需的各种微量元素,包括 Ca、Mg、Cu、Zn、Fe 等,是一种有价值的有机资源^[16]。另一方面,污水污泥中含有大量病原菌、寄生虫(卵)和生物难降解物质,特别是含工业废水时,污水污泥可能含有较多的重金属离子和有毒有害化学物质。这些物质随污泥土地利用进入土壤,可能会对土壤-植物系统、地表水、地下水系统产生影响,造成环境和人类健康风险。因此,污泥土地利用不能简单地直接施用,而是需要经过稳定 and 无害化处理,并采用有效的施用手段,保证其进入土壤所带来的风险最低并且可控。污泥土地利用的泥质要求应包括养分、有机质含量、重金属含量、卫生指标要求等。我国污泥土地利用现行的相关标准对不同污泥土地利用方式对

污泥各性质的要求见表 3。

不同污泥土地应用场景的理化性质主要包括 pH 值、含水率、粒径和杂物等方面。在含水率指标上,污泥农用、林地用和土地改良的污泥含水率控制在 60%~65%,园林绿化对于污泥含水率的要求最高,不超过 40%。在外观和嗅觉方面,农用和林地用泥质标准对于污泥的粒径和杂物含量有详细规定,一般要求污泥粒径<10 mm,杂物含量的最高值在 3%~5%。园林绿化和土地改良泥质标准则主要从嗅觉方面作了规定,无明显臭味是污泥土地利用的基本需要,也是污泥稳定化处理后的基本特征。

在各标准均对重金属有明确要求。污泥农业利用对重金属要求最为严格,分为 A 级和 B 级:A 级污泥可用于蔬菜、粮食作物、油料作物、果树、饲料作物和纤维作物;B 级污泥对重金属限量适度放宽,但仅

表 3 现行标准对不同污泥土地利用方式污泥性质的要求

Table 3 Requirements for the properties of sludge in different land use methods according to current standards

部分典型指标	GB 4284—2018《农用污泥污染 物控制标准》		GB/T 23486—2009《城镇污水处 理厂污泥处置 园林绿化用泥质》		CJ/T 362—2011 《城镇污水处理厂 污泥处置 林地用 泥质》	CJ/T 510—2017《城镇污水处 理厂污泥处置 土地改良用 泥质》	
	A 级污泥	B 级污泥	酸性土壤(pH <6.5)	中碱性土壤(pH ≥6.5)		酸性土壤(pH <6.5)	中碱性土壤 (pH≥6.5)
ω(总镉)/(mg/kg DS)	<3	<15	<5	<20	<20	<5	<20
ω(总铅)/(mg/kg DS)	<300	<1000	<300	<1000	<1000	<300	<1000
ω(总铬)/(mg/kg DS)	<500	<1000	<600	<1000	<1000	<600	<1000
ω(总镍)/(mg/kg DS)	<100	<200	<100	<200	<200	<100	<200
ω(总锌)/(mg/kg DS)	<1500	<3000	<2000	<4000	<3000	<2000	<4000
ω(总铜)/(mg/kg DS)	<500	<1500	<800	<1500	<1500	<800	<1500
ω(总汞)/(mg/kg DS)	<3	<15	<5	<15	<15	<5	<15
ω(总砷)/(mg/kg DS)	<30	<75	<75	<75	<75	<75	<75
ω(总硼)/(mg/kg DS)	—	—	<150	<150	/	<100	<150
ω(矿物油)/(mg/kg DS)	500	3000	3000	3000	3000	3000	3000
ω(挥发酚)/(mg/kg DS)	—	—	—	—	—	40	40
ω(总氰化物)/(mg/kg DS)	—	—	—	—	—	10	10
ω(苯并(a)芘)/(mg/kg DS)	2	3	3	3	3	—	—
ω(多氯联苯)/(mg/kg DS)	—	—	—	—	—	0.2	0.2
ω(多环芳烃)/(mg/kg DS)	5	6	—	—	6	—	—
ω(可吸附有机卤化物)/ (mg/kg DS)	—	—	500	500	—	500	500
pH 值	5.5~9.0		6.5~8.5	5.5~7.8	5.5~8.5	5.5~10.0	
含水率/%	≤ 60			< 40	≤ 60	< 65	
种子发芽率/%	> 60			> 70	> 60	—	
外观和嗅觉	粒径≤10 mm,无粒度>5 mm的 有害物质,杂物质量≤3%		比较疏松,无明显臭味		粒径≤10 mm,杂物 质量≤5%	有泥饼型感观,无明显臭味	

能用于油料作物、果树、饲料作物和纤维作物。用于园林绿化、林地和土地改良的污泥对重金属要求相对于农用用途有所降低。园林绿化和土地改良泥质标准根据施用地性质,区分酸性土壤和中碱性土壤,由于酸性土壤重金属的污染风险比碱性土壤大得多,污泥用于酸性土壤的重金属指标限值更为严格。与园林绿化的场地相比,污泥林地用的场地通常远离人类活动场所,故林地用泥质标准未区分酸性土壤和中碱性土壤。现行标准下不同的利用途径对污泥有机污染物的指标要求有所不同。在矿物油方面,A级污泥农用对污泥中有机污染物的要求相对较高。针对挥发酚、总氰化物、多氯联苯等指标,仅土地改良相关的应用场景对其作出了明确限制,而针对苯并(a)芘指标则仅土地改良不作限制。除此之外,各土地利用途径对多环芳烃、可吸附有机卤化物等方面的要求亦有所区分。区别于重金属污染,园林绿化和土地改良泥质标准并未对不同土壤酸碱性质土地区别要求,而农用地依旧分为A、B两级。整体而言,有机物污染物方面仍是A级农用场景要求最

为严格,其他利用途径侧重点略有不同。

1.3 应用案例

在污泥农业利用方面,部分国家已有成熟案例。丹麦的HedeDanmark公司与污水公司签订委托合同,明确污泥产量、存储地的清空频次、营养成分、费用等内容,通过电子表格汇算每吨干基重金属、氮磷含量,对丹麦污泥产品农用标准,对所接收污泥产品的信息进行适用性分析。其后联系目标农场主,与农场主达成共识后,通过签订书面协议明确农场对污泥产品的需求信息,包括需求量、需求时间、农场养分配额量(农业协会向当地农场主建议使用方法和施用量)等。具体施肥量通过农场养分配额换算,污泥产品氮、磷利用率分别按45%、100%计,并在卫星地图中标注客户的具体地点及应用范围。

在污泥林业应用方面,我国已有应用试点。北京高碑店污泥处理厂所属北京市北排集团污泥处置分公司依据住建部发布的《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》和北排集团《污泥资源化林地抚育技术方案》,利用污泥产品有机营养土在北京市大兴区

指定林地区域内进行资源化利用。根据土壤类型、地形地势、施肥区周边敏感区及地下水水位,在场实施前的调查阶段确定了3个典型示范地块,总面积7800亩(约合5.2 km²)。项目开展过程中,定期对土壤、植株长势等进行跟踪检测,结果显示土壤有机质含量提升30%以上,树木长势良好,新生枝条增长量较空白区平均增长了0.26,0.33 m^[17]。

污泥的园林利用亦有相关应用案例。安徽省六安市某园林公司采用沟施进行污泥消纳(图1)。该项目在林带中间开施用沟,平均每1 hm²绿地可开沟约400 m³,可施用污泥产物(含水率40%、密度按0.65 t/m³计算)约260 t。林带间的空间可供开挖施用沟约3次,可连续施用3年,或者隔年进行(总次数为3次)。经调研,该地区林下土壤裸露的主要绿地有植物园、道路生态绿带、国道防护绿地等,林下裸土适合大规模沟施的绿地面积约112.2 hm²,按照260 t/hm²的用量计算,这类绿地单次可施用污泥处理产物(含水率40%)约4万t,按照此用量进行园林绿地利用,可连续施用3年,大大缓解了当地污泥消纳问题。



图1 安徽省六安市某地苗圃机械开沟施用污泥示意
Figure 1 Schematic diagrams of mechanical ditching and sludge application in a nursery, Lu'an, Anhui Province

污泥的生态修复同样在国内多地进行了示范。例如安徽省马鞍山市某矿山修复项目,采用超高温好氧发酵污泥来进行尾矿砂退化地的修复,详见图2。施用污泥后,裸露的尾矿砂退化地区成功恢复了植被覆盖。污泥的施加能够显著改善矿区土壤的理化性质,如降低土壤容重,提高有机质含量,增加速效氮、磷、钾含量等。该项目污泥施用能为每公顷土地提供75 t氮、12 t磷、32 t钾和超过700 t有机质。

综合来看,在农业利用、园林绿化、林业利用、生态修复4种污泥土地利用场景中,尽管农业利用领域有相关的泥质标准出台,但当下污泥农业利用的处置方式仍然受到多种因素限制,其政策风险和污染风险均存在。林业利用、生态修复虽然能消纳大量

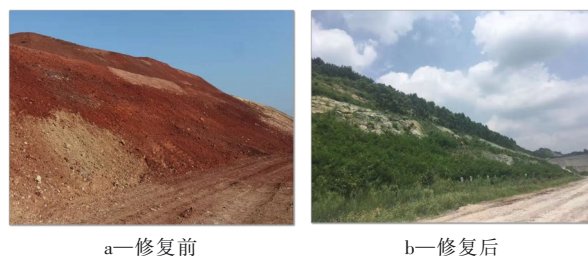


图2 安徽省马鞍山市某尾矿砂退化地修复前后对比
Figure 2 Comparisons of a degraded tailings land in Ma'anshan, Anhui Province before and after restoration

污泥,但存在物理距离、场地适配性等诸多限制因素,且还需要考虑土地酸碱性质。园林利用在就近解决污泥去向方面具有优势,但其市场需求量往往具有较大不确定性。总的来看,考虑到当下的污泥土地利用条件,园林绿化和生态修复相结合的处置方式是现阶段前景较为广阔的污泥处置技术路线。

2 污泥施用后土壤有机碳的响应机制

2.1 污泥施用对土壤有机质含量的影响

城市污泥作为污水处理过程的副产物,富集了污水中的营养物质(碳、氮、磷等)和污染物质(难降解有机物、持久性有机物、重金属等),具备“资源”和“污染”双重属性^[1]。与发达国家相比,我国污泥具有产量大(以含水率80%计,超过6000万t)、含砂量高(占固体含量30%以上)、有机质含量低(占固体含量约50%)等特点^[18, 19]。由于其存在易腐性和污染性,污泥一般都需要经过生物稳定化处理后才能进行土地施用。常用的污泥生物稳定化过程包括好氧发酵和厌氧消化。

生物稳定污泥的土壤生态价值主要体现在2个方面:一方面,污泥可改善土壤理化性质(如土壤透气性、持水能力),提升土壤肥力,具有显著的农业生态效益^[20, 21]。董晓芸等^[10]报道,施用稳定化污泥后,人工林地土壤中的酶活显著提高,且土壤微生物量碳高于对照。另一项研究将污泥施用于蔬菜,结果表明可以促进小松菜生长,促进效果与化肥类似^[22]。污泥还被应用于改良土壤,在污泥施用6个月后,采石场土壤中有机质含量增加,电导率和重金属含量没有显著增加,植物覆盖度较高,可有效控制土壤侵蚀^[23]。

另一方面,施用污泥能实现土壤有机碳的累积与固持,详见表4。现有研究中,污泥类型、土地利用方式、污泥施用量等因素均会影响土壤有机碳含量。

由于实验条件的不同,污泥施用对土壤有机碳含量的提升效果存在较大差异。但总体上看,土壤有机碳提升量均可达到7%以上,即污泥土地利用在一定时间尺度内具有固碳潜力。此外,无论是实验室还是大田研究体系,污泥施用量越大,土壤有机碳的提

升量相应也越大。Rinku等^[21]考察了不同剂量污泥施用对土壤有机碳的影响,结果表明土壤有机碳的浓度随着施用量的增加而增加;同时,此提升并不呈线性,随着施用量的增加,其对土壤有机碳增加量的影响逐渐减弱。

表 4 污泥施用对土壤有机碳含量的提升效果
Table 4 Effects of sludge application on the increase of SOC content

污泥类型	污泥施用量($m_{\text{泥}}/$ $m_{\text{土}} \times 100\%$)	实验类型	土地利用方式	实验时间	作物情况	研究土层/cm	有机碳提升量	文献
污水污泥	0.2%、0.4%、0.6%	实验室	农业利用	90 d	无	0~20	27.3%、60.6%、 109.1%	Rinku ^[21] 等
污水污泥	16.5%	实验室	农业利用	6月	无	0~10	6.7%	Enrica ^[6] 等
厌氧污泥	2.7%	矿山	生态修复	7月	本土植物	0~20	7%	Soria ^[15] 等
厌氧污泥	5.1%、10.2%	实验室	生态修复	60 d	黑麦草	0~20	75.2%、82.6%	Alvarenga ^[24] 等
厌氧污泥	33.3%、100%	填埋场	生态修复	1年	杂草	0~10	87.9%、145.1%	Kelly ^[25] 等
堆肥污泥	0.15%、0.3%、 0.6%	林地	林业利用	1年	速生杂交杨	0~20	44.8%、117.6%、 158.3%	丁超群 ^[26] 等
堆肥污泥	0.57%	林地	林业利用	153 d	人工林	0~20	18.4%	董晓芸 ^[10] 等
堆肥污泥	2%、5%、10%	实验室	林业利用	60 d	无	0~15	9.1%、37%、66%	姚珂涵 ^[27]

2.2 污泥组分的影响

稳定化污泥中的有机质组分存在较大差异。污泥生物稳定化过程主要包括好氧发酵和厌氧消化,两者具备显著不同的产物特征。好氧发酵过程中,污泥有机质一般按照脂肪族物质、蛋白类化合物、多糖类物质和木质素的顺序被降解^[28]。脂链碳在发酵过程中减少,芳香族碳在发酵结束时明显增加。蛋白质类化合物会降解成多种简单的有机化合物,例如氨基酸、简单的肽和结构复杂度低的酚等^[29]。而在厌氧消化过程中,污泥有机质需经历水解、酸化、乙酸化、甲烷化等系列阶段进行降解^[30],且一般按照多糖、蛋白类、脂肪族物质的顺序,但总体有机质降解性能有限(通常不足50%),仍有较多大分子物质残留^[31]。近年来高分辨率质谱的发展推动了对污泥中溶解性有机质(DOM)分子结构的认识。FTL-ICR-MS的分析表明:好氧发酵与厌氧消化污泥DOM的平均分子质量分别为349,442 Da^[32,33],好氧发酵污泥DOM主要来源于单宁、稠环芳烃、糖类和木质素,而厌氧消化污泥中DOM由蛋白质、脂质和多糖类大分子物质以及有机酸等小分子生物降解产物组成。总体来看,生物稳定化污泥中有机质组成复杂、赋存特征差异较大。

污泥有机质组分可影响土壤有机碳转化。Lehmann等^[34]提出了土壤有机质连续体概念模型,该模型指出不同活性有机组分(如非亲和性物质>600

Da、亲和性物质<600 Da)导致了团聚体有机质和矿物结合有机质动态的差异性。考虑到污泥中有机组分的复杂性以及土壤有机质和其微环境的异质性,污泥施用对土壤有机碳累积和碳库组分的影响具有很强的不确定性。Parat等^[35]研究发现,添加厌氧污泥可诱导污泥源有机碳在表土中积累,而污泥停止施用,污泥衍生有机碳源会进一步降解而导致土壤有机质储量下降。Tian等^[36]进一步发现,厌氧污泥长期施用于农田土壤后会促进植物源有机碳在土壤中的积累。在厌氧污泥施用的情况下,有机碳更多会以细颗粒组分形态进行储存^[18]。然而,好氧污泥施用对土壤有机碳的转化则表现出不同规律。Ugolini等^[19]研究表明,好氧污泥的加入倾向于刺激土壤轻组分有机碳的分解,这种差异可能是由于不同稳定化手段处理后,污泥组分中蛋白质、芳香族化合物等大分子分解程度不同所致。现有研究多针对单一污泥类型,将不同类型污泥进行对比分析,以揭示其对土壤有机碳转化的影响机制仍需进一步探究。

2.3 物理化学过程

外源有机质的引入是土壤有机碳的重要来源。除了植物残体、根系及其分泌物外,人为的土壤利用方式(如有机物料的投入)是影响土壤碳库的关键因素^[37-40]。外源有机质在土壤生境中经历分解、转化以及复杂的物理化学过程,通过与土壤矿物质和团聚

体结合等方式实现土壤有机碳的累积和固持^[41]。

污泥施用可影响土壤结构,进而影响土壤有机碳的周转。污泥中含有惰性组分和胶结物质,如微生物残体、腐殖质、芳香类物质等。这些物质可通过物理作用改变土壤结构,同时有助于促进土壤团聚体形成^[42, 43]。有研究表明,污泥施用可使土壤孔隙率提高^[44],进而影响土壤有机碳含量。李渊等^[45]发现土壤容重在污泥施用后呈下降趋势,且土壤容重降幅随污泥施用量的增加而增加。而土壤容重与土壤有机碳含量呈高度负相关^[46],其具体影响机制与土壤孔隙率、孔隙结构等的变化有关^[47]。土壤结构的改变可进一步影响微生物活动,通过改变有机质的赋存形态来调整有机碳周转^[48]。Simoes等^[49]研究表明,相较于施用矿物肥料,施用污泥能明显改善土壤孔隙结构。此外,相关研究发现污泥施用后更多有机碳会以细颗粒组分形态进行储存^[14]。然而,在污泥施用的条件下,土壤孔隙与土壤有机碳之间的作用机制仍有待进一步研究。

污泥施用可改变土壤pH,进而改变有机碳的赋存。施用的污泥类型是影响土壤pH变化的关键因素。孟繁宇等^[50]的研究指出,盐碱土施用一定量的脱水污泥后,其pH值降低1个单位以上(原始土壤pH为 9.37 ± 0.21 ,脱水污泥pH为 5.77 ± 1.46)。然而,施用堆肥污泥后土壤pH值会随之上升,且随污泥施用量的增加而增加(土壤pH值为7.4,堆肥污泥pH值为7.7)^[51]。土壤中pH的变化会进一步影响土壤有机碳的赋存形态。Gou等^[52]研究表明,在高有机质含量的土壤中,腐殖酸与pH值呈显著负相关性,而腐殖酸与黄腐酸的比值则与pH呈正相关。同时,pH的变化会影响有机碳与矿物质的结合,进而影响有机碳的稳定性和可用性^[53]。Xin等^[54]发现,在 $pH > 6.5$

时,阳离子交换络合物上的Ca量显著增加,与带负电荷的有机分子结合,从而形成阳离子桥并增加有机碳的稳定性。土壤pH和有机碳之间的关系还受到其他因素的影响,例如土壤的管理实践和土地利用类型等。

2.4 微生物过程

土壤有机碳的矿化与固持是由土壤微生物(功能)主导的生化过程^[55]。微生物的生命活动不仅可以降解土壤有机碳,其本身及其代谢产物还是土壤有机碳的重要组成部分,对土壤碳氮循环和转化起着重要作用^[43, 56]。有研究表明,土壤中有相当一部分稳定性有机碳来源于微生物源产物,如几丁质、胞壁质、氨基糖等,所以微生物是某些稳定性有机碳形成的驱动者^[42, 57]。此外,有机质在不同微生物种群中参与分解的程度存在差异。例如,主要参与初期分解的真菌及其残体可能与分解程度较低的生物大分子聚合在粒径较大的团聚体中,而充分降解释放的较小分子以及主要参与后期分解的细菌及其残留物趋于向较小团聚体集中。因此,土壤有机质与土壤微生物的代谢与活动密切相关,微生物会显著影响土壤有机碳的稳定与累积,该影响主要体现在微生物量、群落结构和代谢功能等方面(图3)。

微生物生物量包括活体生物量与残体生物量,二者与土壤有机碳含量之间存在显著相关性。Liao等^[58]的研究表明,微生物残体量的增加可导致森林土壤碳储量的增加。同样地,当污泥施用后土壤有机碳在短期内呈现出显著的提升,这主要是因为污泥中携带的大量微生物残体。实验结果显示,好氧稳定化污泥中的微生物残体碳能够达到约84 g/kg,而在厌氧稳定化污泥中则约为141 g/kg(数据尚未发表)。此外,污泥中丰富的有机质也可导致土壤中微

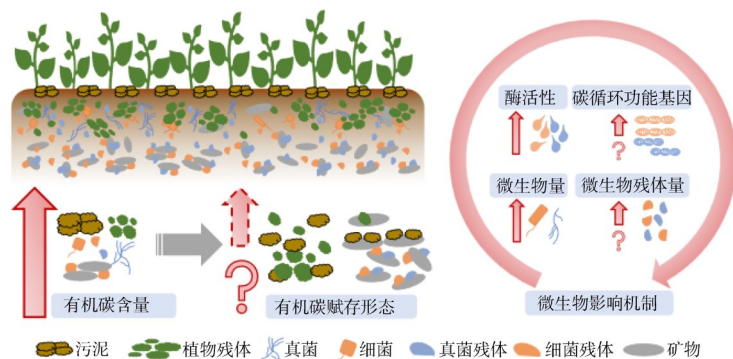


图3 污泥施用后土壤有机碳的微生物响应机制

Figure 3 Microbial response mechanisms of SOC after sludge application

生物的大量繁殖,通过“微生物碳泵”的作用实现土壤有机碳的累积,而这一过程在特定条件下能够保持稳定,在某些情况下可能导致碳的消耗^[59]。研究表明,污泥施用后的土壤中微生物生物量显著高于对照组^[60],且微生物生物量的增加与所施污泥中可分解有机物的比例密切相关^[61]。然而,土壤微生物生物量的变化并非仅受有机质增加的影响。Min等^[62]研究表明,土壤微生物量与重金属浓度间呈负相关。由于污泥中重金属元素的存在,施用污泥后,土壤微生物群落可能长期暴露于重金属环境中,这种长期暴露最终可能对微生物群体造成抑制作用,导致土壤微生物生物量的减少^[63]。

微生物的群落结构和多样性同样对土壤有机碳的固持与转化产生重要影响,其决定了土壤生境的代谢网络及其微生态功能。土壤微生物的群落由真菌和细菌等不同群体组成。这些微生物群体在利用土壤中的异质底物方面采用不同的策略,因此在调节土壤碳循环方面具有不同的功能^[64]。由于资源利用策略和偏好的差异,不同微生物群体在有机物质分解过程中将有机物质转化为生物量时,具有不同的碳利用效率(CUE),从而以不同的程度影响土壤有机碳^[65]。人为源物质的引入是影响土壤土著微生物群落结构和多样性的重要因素。研究表明,污泥土地施用会对各种微生物产生显著的影响,而此种影响在放线菌、真菌群落中更为持久^[66]。此外,污泥自身含有丰富的功能微生物及其残体,且不同来源污泥的微生物群落结构和多样性有显著差异^[67]。在污泥施用后,外源微生物会与土壤中土著微生物相互作用,形成更为复杂的微生物网络生态,对于土壤有机碳的影响更加复杂。研究表明,施用不同外源有机废弃物(牛粪和污泥)导致土壤中累积不同组分的有机碳,土壤碳库组分的差异性可能是由外源有机质中不同的微生物群落导致^[68]。

在土壤生境功能中,胞外酶对土壤有机碳的周转起到了关键作用。土壤胞外酶活性可以反映土壤养分和基质利用的变化,以及微生物的能量和养分需求^[69]。参与土壤碳循环的胞外酶主要包括水解酶(纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等)和氧化酶(多酚氧化酶、过氧化物酶等)^[70, 71]。Liu等^[72]的研究也表明,土壤水解酶和氧化酶的活性与土壤SOC矿化速率正相关。当污泥施用后,土壤中的胞外酶活性会发生显著变化,这种变化主要受到污泥施用量、采样时间等

因素影响^[73, 74]。研究表明, β -葡萄糖苷酶等在土壤污泥施用初期能够迅速增加。Lakhdar等^[73]的研究结果表明,在土地施用15 d后,相较于固废堆肥产物,污泥对土壤酶的活性影响更加显著。需要注意的是,土壤胞外酶活性的增加会刺激土壤SOC的分解并导致SOC的消耗^[75],但随着施用时间的增加,其活性会慢慢恢复到初始水平^[74]。此外,污泥中可能含有的重金属元素,亦会对土壤酶活性产生一定的抑制作用^[76]。可见,污泥施用对土壤胞外酶活性的影响较为复杂。

基于碳循环功能基因的分子生态学方法有助于探究土壤有机碳循环的微生物调控机制^[77]。其中,卡尔文循环是碳固定的主要途径,起主要作用的功能基因为*cbbL*和*cbbM*^[78]。有研究发现,微生物功能基因丰度和特定土壤胞外酶活性的变化很可能是密切相关的。微生物功能基因丰度和相关土壤C降解酶活性的变化对土壤C循环的影响比之前的假设要大得多^[32]。He等^[79]研究发现,功能基因丰度的变化反映了微生物对养分的分解和转化。土壤碳含量增加意味着微生物可利用资源的增加,从而导致功能基因丰度的增加。Zhang等^[80]研究显示:土壤中碳循环功能基因*cbbL7*丰度高于*cbbM*,并且与环境因素呈现更强的正相关,表明对于碳循环过程来说,*cbbL*可能比*cbbM*基因具有更强烈的响应。总体来看,针对碳循环功能基因的研究对于深入理解土壤有机碳周转具有重要意义,但污泥施用后关于土壤有机碳功能基因层面的相关研究还比较匮乏。

3 结论与展望

3.1 结论

1)污泥土地利用在我国表现出了一定的发展潜力。园林绿化和生态修复相结合的方式因其良好的应用前景和潜在的环境效益,是现阶段较为可行的污泥处置技术路线。

2)污泥施用可显著改善土壤的理化性质,提升土壤肥力并促进土壤有机碳的积累和固持。污泥中的有机质组分是影响土壤有机碳转化的重要因素。

3)污泥施用可提升土壤孔隙率、改善孔隙结构,进而影响土壤的微生态环境。此外,污泥施用可改变土壤pH,并通过物理化学过程来影响土壤有机碳的赋存。

4)污泥施用后污泥源微生物和土壤土著微生物会发生相互作用,导致土壤微生物群落和功能的变

化,其中微生物残体对于有机碳的累积至关重要。

3.2 展望

1)我国污泥土地利用相关的标准衔接仍有一定改进空间。现行国家标准基本围绕污泥泥质展开,缺少如有机碳含量等正向指标和指导性准则。未来应逐步完善污泥土地利用标准体系。

2)污泥施用对土壤孔隙结构和有机碳周转的影响尚未完全明确。未来研究应聚焦于土壤孔隙与有机碳之间的相互作用机制,以更好地理解污泥施用对土壤微环境和碳循环的影响。

3)目前关于污泥施用后土壤有机碳功能基因的研究相对匮乏。未来需要通过分子生物学手段,深入研究污泥施用对土壤微生物群落和功能的影响,以揭示土壤有机碳转化的微生物作用机制。

4)尽管污泥对土壤有机碳的固持具有重要的正面作用,但关于污泥施用对土壤稳定碳库的贡献,特别是对微生物残体碳的形成机制也是未来的研究重点。

5)污泥土地利用的管理仍存局限性,对其合理评估是打通土地利用全链条的关键。未来可基于污泥土地利用固碳的定量分析,建立污泥处理处置全过程的综合评估方法,有助于科学管理与决策。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学(上海), 2020, 72(6): 30-34.
- DAI X H. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. Science (Shanghai), 2020, 72(6): 30-34.
- [2] 许玉玉, 张子晨, 文龙杰, 等. 面向土地利用的市政污泥堆肥重金属安全性研究进展[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3923-3933.
- XU Y Y, ZHANG Z C, WEN L J, et al. Review on the safety of heavy metals during land utilization of municipal sludge after composting [J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3923-3933.
- [3] 单灵婕, 王松林, 孙渝波, 等. 污泥处理处置现状分析与资源化利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(12): 192-194.
- SHAN L J, WANG S L, SUN Y B, et al. Analysis of sludge treatment and disposal status and study on resource utilization [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(12): 192-194.
- [4] 丁洪, 余居华, 郑祥洲, 等. 中国城市污泥应用对作物产量、品质和土壤质量的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1933-1942.
- DING H, YU J H, ZHENG X Z, et al. Review on effect of municipal sewage sludge application on yield and quality of crops and soil quality in China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(9): 1933-1942.
- [5] HOANG S A, BOLAN N, MADHUBASHANI A M P, et al. Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: a review [J]. Environmental Pollution, 2022, 293, 118564.
- [6] PICARIELLO E, PUCCI L, CAROTENUTO M, et al. Compost and sewage sludge for the improvement of soil chemical and biological quality of mediterranean agroecosystems [J]. Sustainability, 2021, 13(1): 26.
- [7] 刘洪涛, 王燕文, 孔祥娟, 等. 城市污泥土地利用近期发展趋势及其原因研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(11): 37-40.
- LIU H T, WANG Y W, KONG X J, et al. Development tendency of sludge land application and its reason [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(11): 37-40.
- [8] LI X, YUAN S J, CAI C, et al. A 20-year shift in China's sewage sludge heavy metals and its feasibility of nutrient recovery in land use [J]. Environmental Pollution, 2024, 341, 122907.
- [9] 林兰稳, 钟继洪, 张国林, 等. 广州市污水污泥堆肥在环境绿化中的应用[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 974-978.
- LIN L W, ZHONG J H, ZHANG G L, et al. The Application of compost of city sewage sludge to environmental greening [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 974-978.
- [10] DONG X, KE K, HU Z, et al. Effect of different sludge composting on soil physical and chemical properties and microbial activity [J]. Journal of North-East Forestry University, 2021, 49(6): 70-75.
- [11] 王丽霞. 城市污泥产品林地利用过程中重金属的环境风险评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- WANG L X, Environmental risk assessment of heavy metals in the process of using urban sludge products in forest land [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [12] 刘向敏, 余振国, 杜越天. 矿山生态修复市场化方式实践进展与深化路径研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(12): 66-72.
- LIU X M, YU Z G, DU Y T. Research on practice progress and deepening path of market-oriented mode of mine ecological restoration [J]. China Coal, 2021, 47(12): 66-72.
- [13] 潘志强, 张淑琴, 任大军, 等. 城市污泥的直接施用对矿区土壤修复的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 189-193, 3.
- PAN Z Q, ZHANG S Q, REN D J, et al. Effects of direct application of sewage sludge on soil remediation in abandoned mining area [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 37(11): 189-193, 3.
- [14] LI S Q, DI X Y, WU D M, et al. Effects of sewage sludge and nitrogen fertilizer on herbage growth and soil fertility improvement in restoration of the abandoned opencast mining areas in Shanxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(7): 3323-3333.
- [15] SORIA R, RODRIGUEZ-BERBEL N, SANCHEZ-CANETE E P, et al. Organic amendments from recycled waste promote short-

- term carbon sequestration of restored soils in drylands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 327, 116873.
- [16] 韦小颖, 肖细元, 张珑, 等. 城市污泥中重金属和有机污染物的净化与污泥土地利用[J]. *环境工程*, 2010, 28(增刊1): 235-240.
- WEI X Y, XIAO X Y, ZHANG L, et al. Heavy metals and organic contaminants removal from sewage sludge for land application [J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28 (S1): 235-240.
- [17] 杨喆程, 杜子文, 孙德智, 等. 城市污泥产品林地施用效果与风险评价[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(4): 1432-1443.
- YANG Z C, DU Z W, SUN D Z, et al. Application effect and risk assessment of urban sludge products in forest land [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15 (4): 1432-1443.
- [18] GERZABEK M H, HABERHAUER G, KIRCHMANN H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 352-358.
- [19] UGOLINI F C, ARFAIOLI P, BOSETTO M, et al. Characterization of the soil organic matter in agricultural mine spoils and reclaimed soils treated with organic amendments [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41 (1): 72-87.
- [20] CHEN J, LI K, HU A, et al. The molecular characteristics of DOMs derived from bio-stabilized wastewater activated sludge and its effect on alleviating Cd-stress in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845, 157157.
- [21] DHANKER R, CHAUDHARY S, GOYAL S, et al. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23, 101642.
- [22] THANH-BINH N, SHIMA K. Composting of sewage sludge with a simple aeration method and its utilization as a soil fertilizer [J]. *Environmental Management*, 2019, 63(4): 455-465.
- [23] CARABASSA V, ORTIZ O, ALCANIZ J M. Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: effects on soil and vegetation [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2568-2574.
- [24] ALVARENGA P, PALMA P, GONCALVES A P, et al. Assessment of chemical, biochemical and ecotoxicological aspects in a mine soil amended with sludge of either urban or industrial origin [J]. *Chemosphere*, 2008, 72(11): 1774-1781.
- [25] KELLY J J, FAVILA E, HUNDAL L S, et al. Assessment of soil microbial communities in surface applied mixtures of Illinois River sediments and biosolids [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2/3): 176-183.
- [26] DING C, BAI L, QI H. Physico-chemical properties and environmental pollutions in soil amended with composted sewage sludge to poplar [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(7): 2381-2387.
- [27] 姚珂涵. 城市污泥添加对土壤养分动态的调控机制[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- YAO K H, Regulation mechanism of urban sludge addition on soil nutrient dynamics [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [28] DU J, ZHANG Y, QU M, et al. Effects of biochar on the microbial activity and community structure during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 171-179.
- [29] TANG Y, DONG B, DAI X. Hyperthermophilic pretreatment composting to produce high quality sludge compost with superior humification degree and nitrogen retention [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429, 132247.
- [30] LI L, XU Y, DAI X, et al. Principles and advancements in improving anaerobic digestion of organic waste via direct interspecies electron transfer [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 148, 111367.
- [31] LI L, CAI C, CHEN Y, et al. Secondary acidogenic fermentation of waste activated sludge via voltage supplementation: insights from sludge structure and enzymes activity [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797, 149161.
- [32] CHE J, BAI Y, LI X, et al. Linking microbial community structure with molecular composition of dissolved organic matter during an industrial-scale composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405, 124281.
- [33] HAO S, REN S, ZHOU N, et al. Molecular composition of hydrothermal liquefaction wastewater from sewage sludge and its transformation during anaerobic digestion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 383, 121163.
- [34] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [35] PARAT C, LEVEQUE J, CHAUSSOD R, et al. Sludge-derived organic carbon in an agricultural soil estimated by ^{13}C abundance measurements [J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (1): 166-173.
- [36] TIAN G, CHIU C Y, FRANZLUEBBERS A J, et al. Biosolids amendment dramatically increases sequestration of crop residue-carbon in agricultural soils in western Illinois [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 85: 86-93.
- [37] BOSSOLANI J W, CRUSCIOL C A C, LEITE M F A, et al. Modulation of the soil microbiome by long-term Ca-based soil amendments boosts soil organic carbon and physicochemical quality in a tropical no-till crop rotation system [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 156, 108188.
- [38] CRAIG M E, GEYER K M, BEIDLER K V, et al. Fast-decaying plant litter enhances soil carbon in temperate forests but not through microbial physiological traits [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1229.
- [39] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447 (7141): 143-144.

- [40] ZHANG G, DOU S, MENG F, et al. Transformation of biochar into extracted humic substances under short-term laboratory incubation conditions: evidence from stable carbon isotopes[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 215, 105189.
- [41] 郑聚锋, 陈硕桐. 土壤有机质与土壤固碳[J]. 科学(上海), 2021, 73(6): 13-17.
- ZHENG J F, CHEN S T. Soil organic matter and soil carbon sequestration[J]. Science (Shanghai), 2021, 73(6): 13-17.
- [42] LIANG C, KAESTNER M, JOERGENSEN R G. Microbial necromass on the rise: the growing focus on its role in soil organic matter development [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 150, 108000.
- [43] SOKOL N W, SLESSAREV E, MARSCHMANN G L, et al. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry [J]. Nature Reviews Microbiology, 2022, 20(7): 415-430.
- [44] 邢思奇, 吴旭, 杨华荣. 脱水污泥的土地利用对比研究[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 196-201.
- XING S Q, WU X, YANG H R. Comparative study on land use of dehydrated sludge [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(10): 196-201.
- [45] 李渊. 市政污泥直接施用农田对土壤理化性质的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- LI Y. Effects of direct application of municipal sludge to farmland on soil physical and chemical properties [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [46] 闫俊华, 周传艳, 文安邦, 等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 273-8.
- YAN J H, ZHOU W Y, WEN A B, et al. Relationship between soil organic carbon and bulk density in the rocky desertification process of Karst Ecosystem in Guizhou [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2011, 19(3): 273-278.
- [47] 冯锦, 崔东, 孙国军, 等. 新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 692-697.
- FENG J, CUI D, SUN G J, et al. Soil organic carbon in relation to soil physicochemical properties in Xinjiang [J]. Pratacultural Science, 2017, 11(4): 692-697.
- [48] 张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1-9.
- ZHANG W J, LI S Y, XU Y D, et al. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 1-9.
- [49] SIMOES-MOTA A, VIRTO I, POCH R M. Effects of long-term sewage sludge application to a calcareous soil structure [J]. Soil Use and Management, 2022, 38(4): 1693-1704.
- [50] 孟繁宇, 姜珺秋, 赵庆良, 等. 施污泥对盐碱土理化性质和小麦生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 7.
- MENG F Y, JIANG J Q, ZHAO Q L, et al. Effect of sludge application on physicochemical properties of saline alkali soil and wheat growing [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(9): 7.
- [51] CURCI M, LAVECCHIA A, CUCCI G, et al. Short-term effects of sewage sludge compost amendment on semiarid soil [J]. Soil Systems, 2020, 4(3): 48.
- [52] GOU Z G, ZHAI Z, ZHANG Q Z, et al. Characteristics of organic carbon in tobacco-growing soils with different pH [J]. Bangladesh Journal of Botany, 2024, 53(3): 745-755.
- [53] GARTZIA-BENGOETXEA N, VIRTO I, ARIAS-GONZÁLEZ A, et al. Mineral control of organic carbon storage in acid temperate forest soils in the Basque Country [J]. Geoderma, 2020, 358: 113998.
- [54] XIN Y, ZHANG D, QI Q, et al. Disturbance alters soil organic carbon content and stability in *Carex tussock* wetland, Northeast China [J]. Science of The Total Environment, 2024, 951: 175417.
- [55] 徐建明, 何艳, 许伯乐. 中国土壤化学发展现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(增刊1): 91-105.
- XU J M, HE Y, XU B L. Development and perspective of soil chemistry science in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(S1): 91-105.
- [56] LIU Y R, DELGADO-Baquerizo M, WANG J T, et al. New insights into the role of microbial community composition in driving soil respiration rates [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 118: 35-41.
- [57] 李秀双. 黄土高原南部有机物料还田与化肥施用对冬小麦产量和土壤有机碳固持的影响及机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- LI X S. Effects and mechanisms of organic amendments and mineral fertilization on winter wheat yield and soil organic carbon sequestration in the southern loess plateau [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.
- [58] LIAO C, MEN X, WANG C, et al. Nitrogen availability and mineral particles contributed fungal necromass to the newly formed stable carbon pool in the alpine areas of Southwest China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 173, 108788.
- [59] KAN Z R, LIU W X, LIU W S, et al. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: a global synthesis and perspective [J]. Global Change Biology, 2022, 28(3): 693-710.
- [60] ANDRÉS P, MATEOS E, TARRASÓN D, et al. Effects of digested, composted, and thermally dried sewage sludge on soil microbiota and mesofauna [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48(2): 236-242.
- [61] JIMENEZ P, ORTIZ O, TARRASON D, et al. Effect of differently post-treated dewatered sewage sludge on β -glucosidase activity, microbial biomass carbon, basal respiration and carbohydrates contents of soils from limestone quarries [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(2): 393-398.
- [62] LIAO M, XIE X M. Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a

- reclaimed mining wasteland of red soil area [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66(2): 217–223.
- [63] FERREIRA A A S, LIMA M A R, JACINTO O M L, et al. Soil microbial properties after 5 years of consecutive amendment with composted tannery sludge [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(1): 4153.
- [64] CHEN J, LUO Y, SINSABAUGH R L. Subsoil carbon loss [J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(4): 284–285.
- [65] BOERGER M, BUBLITZ T, DYCKMANS J, et al. Microbial carbon use efficiency of litter with distinct C/N ratios in soil at different temperatures, including microbial necromass as growth component [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2022, 58(7): 761–770.
- [66] GOMES N C M, LANDI L, SMALLA K, et al. Effects of Cd- and Zn-enriched sewage sludge on soil bacterial and fungal communities [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(6): 1255–1263.
- [67] PANG L, GE L, YANG P, et al. Degradation of organophosphate esters in sewage sludge: effects of aerobic/anaerobic treatments and bacterial community compositions [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 255: 16–21.
- [68] PELTRE C, GREGORICH E G, BRUUN S, et al. Repeated application of organic waste affects soil organic matter composition: evidence from thermal analysis, FTIR-PAS, amino sugars and lignin biomarkers [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 104: 117–127.
- [69] CHEN J, LUO Y, GARCIA-PALACIOS P, et al. Differential responses of carbon-degrading enzyme activities to warming: implications for soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4816–4826.
- [70] LI S, ZHANG S, PU Y, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 289–297.
- [71] ZHANG Y, YUAN Y, LI X, et al. Variation characteristics of activities of carbon cycle-related enzymes of mixed leaf litters of *Pinus massoniana* and three broad-leaved tree species during decomposition period [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2022, 31(1): 29–41.
- [72] LIU X, SONG X, LI S, et al. Understanding how conservation tillage promotes soil carbon accumulation: insights into extracellular enzyme activities and carbon flows between aggregate fractions [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 897, 165408.
- [73] LAKHDAR A, SCELZA R, BEN ACHIBA W, et al. Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge on enzymatic activities and wheat yield in a clayey-loamy soil [J]. *Soil Science*, 2011, 176(1): 15–21.
- [74] MATTANA S, PETROVICOVA B, LANDI L, et al. Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75: 150–161.
- [75] FENG J, XU X, WU J, et al. Inhibited enzyme activities in soil macroaggregates contribute to enhanced soil carbon sequestration under afforestation in central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640: 653–661.
- [76] SONG J, SHEN Q, WANG L, et al. Effects of Cd, Cu, Zn and their combined action on microbial biomass and bacterial community structure [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 510–518.
- [77] TRIVEDI P, DELGADO-BAQUERIZO M, TRIVEDI C, et al. Microbial regulation of the soil carbon cycle: evidence from gene-enzyme relationships [J]. *ISME Journal*, 2016, 10(11): 2593–2604.
- [78] HUANG Q, HUANG Y, WANG B, et al. Metabolic pathways of CO₂ fixing microorganisms determined C-fixation rates in grassland soils along the precipitation gradient [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 172, 108764.
- [79] HE Z, DENG Y, XU M, et al. Microbial functional genes commonly respond to elevated carbon dioxide [J]. *Environment International*, 2020, 144, 106068.
- [80] ZHANG W, LI J, STRUIK P C, et al. Recovery through proper grazing exclusion promotes the carbon cycle and increases carbon sequestration in semiarid steppe [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892, 164423.