

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.012

投加菌剂对清淤底泥好氧堆肥效果的强化作用

代浩¹, 李连龙¹, 包强¹, 关仕林¹, 李飞¹, 蒋昌波^{2,3,4}

(1. 中交一航局第三工程有限公司, 辽宁 大连 116083; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南省环境保护河湖疏浚污染控制工程技术中心, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为解决清淤底泥好氧堆肥存在有机质含量低、高温阶段升温不足的问题,从自然堆肥过程中分离提取优势菌株,制成微生物复合菌剂,通过投加菌剂强化清淤底泥好氧堆肥效果。结果表明,与对照组相比,试验组堆体温度升高快,高温阶段持续时间长,高于 55 ℃ 的时间可达 9 d,满足《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)的规定。菌剂投加促进了堆料腐熟,种子发芽指数从 86.9% 提高到 96.3%。试验组和对照组的 C/N 值分别降低了 22.0% 和 14.3%,可见投加菌剂还可以提高堆料保氮效果。

关键词: 菌剂; 好氧堆肥; 清淤底泥; 种子发芽指数; C/N

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0070-07

Aerobic Composting Performance of Dredged Sediment Enhanced by Microbial Agent Addition

DAI Hao¹, LI Lian-long¹, BAO Qiang¹, GUAN Shi-lin¹, LI Fei¹,
JIANG Chang-bo^{2,3,4}

(1. No. 3 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Dalian 116083, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-lake Dredging Pollution Control, Changsha 410114, China)

Abstract: Aerobic composting of dredged sediment has the problems of low organic matter content and slow temperature rise in high temperature stage. To deal with the problems, dominant strains were isolated from the natural composting process to prepare mixed microbial agent, and it was applied to enhance the aerobic composting performance of dredged sediment. Compared with the control group, the experimental group possessed higher rate of temperature rise and longer high temperature stage, and the days with temperature above 55 ℃ lasted for 9 days, which met the requirement of *Hygienic Requirements for Harmless Disposal of Night Soil* (GB 7959-2012). The addition of mixed microbial agent promoted the maturity of the compost, and seed germination index increasing from 86.9% to 96.3%. Moreover, C/N ratios of the experimental and control groups decreased by 22.0% and 14.3%, respectively, indicating that the addition of mixed microbial agent could improve the nitrogen conservation of the

基金项目: 湖南省自然科学基金资助面上项目(2020JJ4609); 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2191)

compost.

Key words: microbial agent; aerobic composting; dredged sediment; seed germination index; C/N

环保疏浚通过疏挖污染底泥,辅以后续疏浚余水和底泥处理处置,可将内源污染彻底移除,是水体内源污染治理主流技术之一^[1]。其中,疏浚底泥的资源化利用是关键,决定着环保疏浚成效。常见资源化利用方案有建材利用、环境功能材料制备和好氧堆肥等^[2]。清淤底泥的产生具有短时、量大特点,建材利用存在基建投资大、运行成本高等问题;清淤底泥有机质含量低,制备的陶粒、生物炭等环境功能材料效果有限。好氧堆肥可充分利用清淤底泥中有机质和氮磷等营养物质,投资和运行成本低,且堆肥产品市场需求量大,便于就地消纳,优势明显。

但清淤底泥好氧堆肥存在高温阶段升温不足等问题,这是因为清淤底泥相对于其他堆肥材料如市政污泥和农业废物,有机质含量明显偏低,难以维持堆体中放线菌或嗜热真菌分解代谢所需。此外,清淤底泥中泥沙含量高导致含水率变化大,也不利于堆体高温阶段的维持。吕志刚等^[3]在太湖疏浚底泥中加入猪粪、稻壳和菇渣等辅料,改善了堆体的理化特性,堆肥效果有一定提升,但 55℃ 以上高温持续时间仍不足 7 d,且种子发芽指数不足 70%,说明仅靠添加辅料无法满足堆肥的稳定化要求。相关研究表明^[4-5],向堆体外投加菌剂,可以大幅提高微生物对木质纤维素的降解效率,从而改善好氧堆肥效果。李天枢^[6]从自然堆肥中筛选优势菌属后进行复配,获得的复合菌剂明显提高了堆肥温度和高温持续时间。

堆肥原料的不同,发挥主要作用的微生物种类也不同,目前成熟的微生物菌剂有 EM 菌剂、VT 菌剂及 RW 菌剂等^[7-8]。针对疏浚底泥特性,为取得更好的堆肥效果,笔者通过制备并添加微生物菌剂,促进好氧堆肥中难降解有机质的腐殖化,改善堆体升温效果,旨在为清淤底泥的资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

坑塘底泥取自海口市江东新区起步区水系综合治理工程清淤底泥,坑塘原为鱼塘,上层底泥(0.2 m 以上)由于养殖户曾投加清洁砂不适合用于堆肥,本试验取用 0.4 m 以下的底泥。为了提高有机

质与全氮含量,试验中采用海口当地的糠皮(由稻壳粉碎制成)和新鲜的鸡粪与底泥混合,混合比例(质量比)为底泥:鸡粪:糠皮=3:3:2,各原料的理化特性见表 1。混合后的堆肥试样中,含水率在 60% 左右,有机质含量为 40.7%,根据有机质含量换算的有机碳含量为 236.08 g/kg,测得全氮含量为 14.04 g/kg,堆肥物料的 C/N 值为 16.81。

表 1 试验材料的理化特性

Tab. 1 Physical and chemical properties of dredged sediment

项 目	pH 值	含水率/%	有机质/%	全氮/(g·kg ⁻¹)	单质磷和五氧化二磷/(g·kg ⁻¹)
底泥	7.94	91.3	8.6	1.51	0.81
鸡粪	6.82	64.8	69.6	36.15	11.90
糠皮	7.04	6.5	46.3	4.23	0.03
混合料	7.07	60.2	40.7	14.04	4.11

1.2 试验方法

1.2.1 堆肥装置

淤泥与鸡粪、糠皮混合后进行装垛。由于通风管道及通风孔设置在堆垛下方,因此装垛前,在堆垛内底部铺设草垫,以防止通风孔堵塞。混合料堆填至要求高度(1.1 m)后,清除多余的混合料,堆肥装垛位置如图 1 所示。

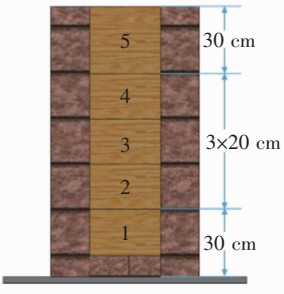


图 1 堆肥装垛位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of composting and stacking position

1.2.2 菌剂的制备

在自然条件下堆肥,于高温期取堆肥试样 W,置于已灭菌的三角瓶中,加入蒸馏水 V,得到 W:V=1:10 的稀释液,用摇床恒温振荡 30 min,使样品均匀分散。静置 20 min 后提取上清液,用梯度稀释法得到稀释倍数为 10⁻⁸~10⁻¹ 的稀释液。

预试验的结果表明,最佳稀释倍数为 10⁻⁴~

10^{-2} , 每个稀释梯度设置 3 个重复样。在此梯度中分别取稀释液 100 μL 涂抹至牛肉膏蛋白胨培养基、高氏 1 号培养基、马铃薯培养基^[6]上, 培养和提取细菌、放线菌及真菌, 在培养箱中恒温 50 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h, 根据菌落形状、大小、颜色、边缘情况、透明度等, 挑取出现频率高、繁殖速度快、清晰且形态特征显著的菌落。在上述相同培养环境下, 经过 3~7 次重复后获得细菌、真菌和放线菌 3 种纯种优势菌。纯化完成后采用固体斜面低温保存法, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下进行保存, 使用时将 3 种优势菌等比例混合, 于堆肥物料混合时进行菌剂接种。

1.2.3 添加菌剂的堆肥试验

以菌剂为试验变量, 分别设置不投加菌剂的对照组和添加菌剂的试验组, 按堆肥试验物料总质量 0.5% 的添加量进行菌剂接种, 通风量均控制为 0.3 m^3/min , 其余环境条件相同, 堆肥周期为 30 d。

1.3 分析项目及方法

在混料进行翻堆时同步取样, 取样时间分别为第 0、3、5、7、10、13、15、17、20、23、25、27、30 天, 用洁净的取样器在堆垛高度为 30、50、70 cm 处分别取样约 300 g, 样品均匀混合后分为两份, 一份用于现场理化指标测试(约 100 g), 另一份采用凹凸扣自封袋盛装(约 200 g), 放置在 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中临时冷藏, 待样品分组取样完成后进行实验室性状分析。

堆体温度采用自动测温记录仪进行测定并记录, 测温仪探头埋设深度为地面以上高度为 70 cm 位置的堆肥材料中心, 每天早、中、晚各测量一次并取平均值。含水率采用烘干法测定, 有机质采用灼烧法测定, 腐殖质采用修正的 Folin-Lowry 法测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 铵态氮采用蒸馏后滴定法测定, 速效磷采用消解-抗坏血酸法测定。种子发芽指数 GI 由式(1)计算。

$$\text{GI} = (\text{样品发芽数} \times \text{样品根长度}) / (\text{对照发芽数} \times \text{对照根长度}) \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 菌剂对堆肥过程中温度的影响

菌剂对疏浚底泥堆肥过程中温度的影响见图 2。试验组和对照组的堆体温度在前 3 d 迅速升温至高温阶段, 说明此阶段嗜温菌活性较强, 可将物料中易降解有机物迅速降解, 热量快速累积。虽然本研究中堆料内易降解有机物含量低于市政污泥堆料, 但升温速率仍然较快, 这可能与试验阶段海口市

气温较高有关。试验组的升温速率相对较快, 且高温期的温度保持效果更好, 温度保持在 55 $^{\circ}\text{C}$ 以上达 9 d, 满足《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012) 的规定。试验组升温快、高温期保温效果好, 说明投加菌剂不但增加了嗜温菌的数量, 而且增加了对难降解有机物(如木质素)有降解能力的耐热放线菌数量。刘凯军等^[9]发现, 复合菌剂既可促进升温, 也可延长高温期。对照组高温阶段温度波动大、维持时间短, 无法达到 GB 7959—2012 标准。

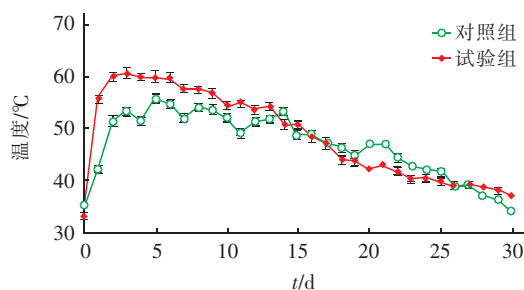


图2 堆肥过程中温度的变化

Fig. 2 Change of temperature during composting

试验组和对照组约在第 15 天后开始进入缓慢降温阶段, 这是因为水分的蒸发和翻堆带走了大量热量。此外, 堆体中有机质含量的降低也会引起微生物的活性降低, 微生物活动产生的热量减少。同时还发现, 试验组降温速率更慢, 这说明菌剂投加也有利于高温阶段之后嗜温菌活性的恢复。

2.2 菌剂对 GI 的影响

堆肥过程中 GI 的变化如图 3 所示。

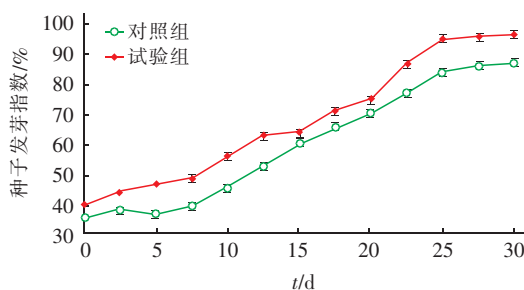


图3 堆肥过程中 GI 的变化

Fig. 3 Change of GI during composting

从图 3 可以看出, 初始 GI 在 35%~40% 之间, 随着堆肥时间延长而逐渐上升。试验结束后, 对照组的 GI 为 86.9%, 达到基本腐熟标准, 试验组的 GI 为 96.3%, 达到较好腐熟标准^[10], 说明菌剂的投加有效促进了堆体的腐熟。堆肥过程中, 初期升温阶段 GI 升高不明显, 这是因为此阶段微生物对有机物

的快速降解会引起堆体内铵态氮、有机酸、多酚、醛类等物质的累积,从而对种子发芽产生一定的抑制作用^[11]。进入高温阶段及后续缓慢降温阶段后,上述物质将因为挥发、硝化或腐殖化作用而逐渐减少,因此GI持续上升。

由图3还可知,整个堆肥周期内试验组的GI始终高于对照组,说明菌剂的投加促进了铵态氮、有机酸、多酚、醛类等物质的挥发、硝化或腐殖化作用。如果升温快且高温阶段持续时间长,则有助于前述物质挥发。

2.3 菌剂对含水率的影响

水分是堆肥能否顺利腐熟的首要条件。大量研究表明^[8,12],堆肥过程的初始含水率在50%~70%之间为宜,含水率过高会导致堆肥原料的孔隙度减少,局部出现厌氧;含水率过低又会导致微生物休眠或者死亡。图4为堆肥过程中含水率的变化。可以看出,随着堆肥时间的延长,堆肥物料的含水率呈下降趋势。相关研究曾报道^[11],在好氧堆肥的升温 and 高温期,由于微生物活动产水速率大于水分蒸发速率,堆体含水率会呈现增大的趋势。本研究中,试验组和对照组在升温 and 高温期含水率均明显降低,这可能与市政污泥中泥沙含量高、持水性能差有关。试验组由于投加了菌剂,升温快且高温阶段持续时间长,水分蒸发量高于对照组,因此堆体含水率低于对照组。进入腐熟阶段后,对照组与试验组的温度下降明显,此时含水率的降低可能是持续的通气和翻堆引起的,因此该阶段对照组和试验组水分下降的速率非常接近。堆肥结束以后,对照组的含水率分别为30.4%和21.4%,试验组满足GB 7959—2012含水率低于30%的要求。

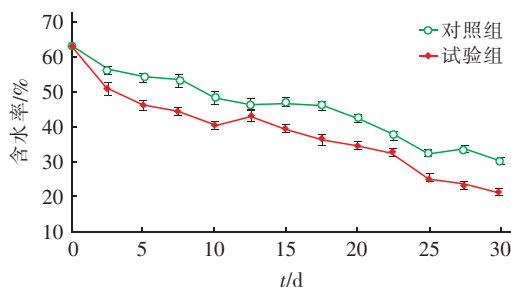


图4 堆肥过程中含水率的变化

Fig. 4 Change of moisture content during composting

2.4 菌剂对堆肥物料营养成分的影响

2.4.1 有机质与腐殖质的变化

相关研究表明^[13],好氧堆肥过程中有机质的含

量在20%~80%最为合适。本研究通过投加鸡粪和糠皮,使堆料有机质含量达到了40.7%,满足好氧堆肥要求。图5为堆肥过程中有机质含量的变化。可知,随着堆肥时间的延长,对照组和试验组的有机质含量整体呈下降趋势,说明整个堆肥期内,无论是高温阶段还是腐熟阶段,物料中的有机质被微生物利用而发生转化。综合图2和图5可知,腐熟阶段有机质含量的降低速率要明显低于高温阶段,这是因为高温阶段主要发生的是易降解有机质的降解,而腐熟阶段则为难降解有机质的降解^[8],降解速率较低。进一步分析可知,在高温和腐熟阶段,试验组的有机质降解速率均高于对照组,如第17天至堆肥结束,对照组有机质含量从31.9%降至29.3%,降幅为2.6%,试验组从26.3%降至21.6%,降幅为4.7%。这说明菌剂的投加既增加了嗜温菌的数量,也增加了对难降解有机质有良好降解性能的放线菌数量,同时促进了易降解和难降解有机质的降解。试验结束后,试验组有机质含量为21.6%,明显低于对照组的29.3%。

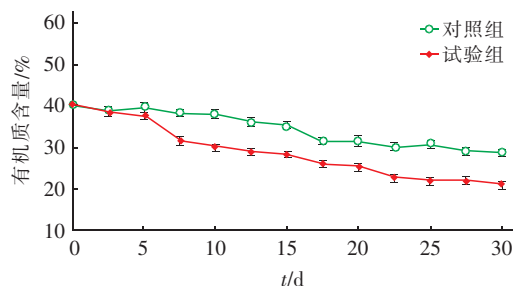


图5 堆肥过程中有机质含量的变化

Fig. 5 Change of organic matter content during composting

腐殖质不仅可以改善土壤结构,更是植物生长所需的重要有机碳源,因此是堆肥产品质量的重要指标之一^[14]。图6为堆肥过程中腐殖质含量的变化。对照组和试验组的腐殖质含量在0~15d均逐渐升高,其中第5天至第10天上升最快。堆肥期间有机质在微生物的作用下产生小分子有机酸,这些小分子物质进一步缩合形成腐殖质。尽管在0~5d堆体内微生物活动旺盛,有利于腐殖化,但同时堆料中原有的一部分腐殖质也会被微生物矿化,因此该阶段腐殖质含量的增加相对缓慢。此后微生物利用纤维素、木质素等难降解有机物继续进行腐殖化,堆体中腐殖质含量迅速增加。第15天以后,堆体的腐殖化过程仍在继续,但同时前期生成的一些结构简

单、易被降解的不稳定腐殖质也会被矿化,因此腐殖质含量逐渐趋于稳定。对比可知,进入高温期后,试验组的腐殖质含量明显高于对照组,堆肥结束后两者的腐殖质含量分别为330和275 mg/kg,说明菌剂有效促进了堆料的腐殖化。

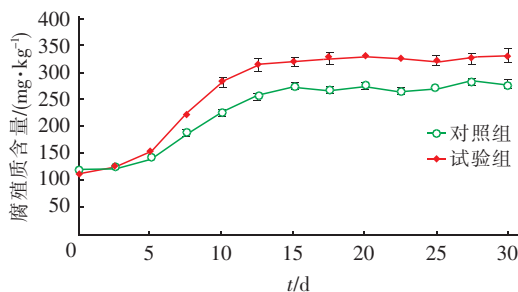


图6 堆肥过程中腐殖质含量的变化

Fig. 6 Change of humus content during composting

2.4.2 堆肥期间 C/N 值的变化

堆肥期间物料的 C/N 值变化如图7所示。

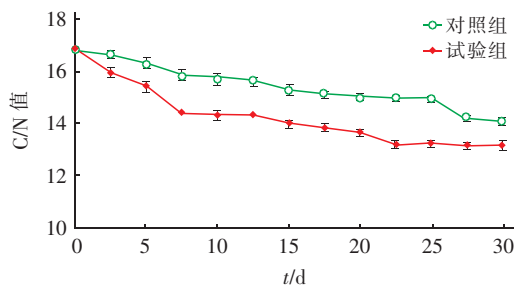


图7 堆肥过程中 C/N 值的变化

Fig. 7 Change of C/N ratio during composting

从图7可以看出,堆肥前后试验组和对照组堆料 C/N 值均明显下降,且主要集中在升温 and 高温阶段,这是因为此阶段有机质被快速降解。在降温阶段,堆料中有机氮的氨化过程产生的铵态氮可以被硝化菌利用,氮素不会明显降低,加上此时仍有部分难降解有机物可被降解,因此 C/N 值得以继续降低。C/N 值的降低是堆肥腐熟的标志。弓凤莲等^[10]采用 C/N 值的降幅对堆肥效果进行评价,认为降幅达到12%和21%分别为未腐熟和基本腐熟,与堆肥前相比,试验组和对照组的 C/N 值分别降低了22.0%和14.3%,前者达到基本腐熟标准,后者则未腐熟,这再次表明菌剂的投加促进了堆料的腐熟。与市政污泥堆肥相比,疏浚底泥 C/N 值的降幅明显偏低,可能与疏浚底泥有机质含量低、初始 C/N 值相对较低有关。本研究中,堆料初始 C/N 值为16.8,明显低于《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南》规定的20~30^[15]。

2.4.3 铵态氮的变化

图8为堆肥过程中铵态氮含量的变化。升温阶段,堆料中有机氮转化为铵态氮,铵态氮含量迅速增加,此后的高温阶段,由于高温和通气,部分铵态氮转化为氨气逸出,铵态氮含量降低。进入降温阶段后,由于温度的下降和铵态氮含量的降低,硝化菌活性得以恢复,一部分铵态氮被硝化为硝态氮,同时在细胞质合成过程中,也消耗了一定量氨气,因此铵态氮有进一步降低的趋势。

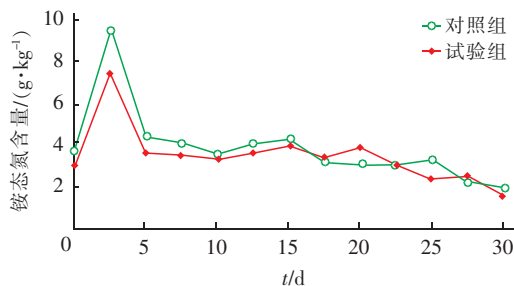


图8 堆肥过程中铵态氮含量的变化

Fig. 8 Change of ammonium nitrogen content during composting

进一步分析图8还可知,升温阶段后试验组铵态氮的挥发损失量要明显小于对照组,分别为5.54和7.33 g/kg。莫云等^[16]的研究表明,菌剂的添加对铵态氮转化为氨气具有明显的抑制作用。Mao等^[17]也认为,菌剂对堆料中铵态氮具有吸附保留作用,这对于保持堆料全氮含量、提高产品肥效具有重要意义。本试验结果表明,投放的菌剂同样具有良好的保氮作用。

2.4.4 速效磷的变化

图9为堆肥过程中速效磷含量的变化。

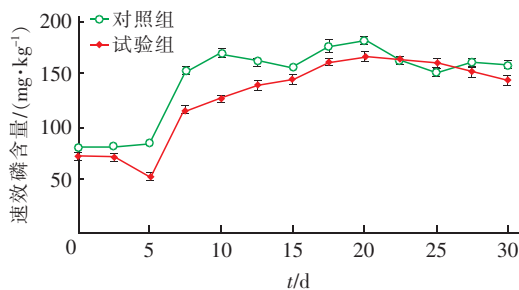


图9 堆肥过程中速效磷含量的变化

Fig. 9 Change of available phosphorus content during composting

从图9可知,堆肥前20 d,速效磷整体上呈现曲折上升的趋势,部分阶段内会出现小幅度下降。这

是由于微生物的增殖会消耗一部分速效磷,并转化为缓效磷,但由于微生物的作用,溶磷菌将部分固定态磷转化为活性态,因此速效磷的含量整体来看是升高的,尤其是堆肥至30 d,速效磷的含量比堆肥初期增大了约1倍。从图9还可以看出,是否添加菌剂对于速效磷含量的影响不大。

3 结论

通过提取分离自然堆肥中优势菌株制得复合菌剂,用于改善疏浚底泥好氧堆肥效果。试验结果显示,菌剂对于疏浚底泥堆肥具有良好的强化效果,堆体温度高于55℃的时间达到9 d,达到《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)的规定;堆肥产物种子发芽指数为96.3%,有机质含量为21.6%,含水率为21.4%,底泥减量效果明显;同时堆料腐熟程度和保氮效果明显改善。

参考文献:

- [1] OLDENBORG K A, STEINMAN A D. Impact of sediment dredging on sediment phosphorus flux in a restored riparian wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1969–1979.
- [2] 景长勇. 河道底泥的处理处置途径分析[J]. *工业安全与环保*, 2018, 34(10): 8–10.
JING Changyong. Analyses on the treatment and disposal of river sediment [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 34(10): 8–10 (in Chinese).
- [3] 吕志刚, 杨艳丽, 徐敏, 等. 河湖疏浚底泥与固体废物好氧堆肥研究[J]. *环境科技*, 2010, 23(2): 12–14.
LÜ Zhigang, YANG Yanli, XU Min, *et al.* Research on aerobic co-composting of water systems dredged sediment and solid waste [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23(2): 12–14 (in Chinese).
- [4] 何宙阳, 徐谓, 刘超, 等. 木质纤维降解复合菌剂促进堆肥腐熟研究[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 728–735.
HE Zhouyang, XU Xu, LIU Chao, *et al.* Using wood fiber degrading compound microbial agents to promote maturity of composting [J]. *Soils*, 2020, 52(4): 728–735 (in Chinese).
- [5] ZHANG L, SUN X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 274–284.
- [6] 李天枢. 畜粪堆肥高效复合微生物菌剂的研制与应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
LI Tianshu. Preparation and Application of Efficient Microbial Compound Fertilizer for Dung Compost [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013 (in Chinese).
- [7] 蔡瑞, 徐春城. 堆肥用微生物及其效果研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(5): 1–7.
CAI Rui, XU Chunheng. Research progress on microorganisms commonly used in composting and their effects [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(5): 1–7 (in Chinese).
- [8] 张秧, 艾为党, 靳向丹, 等. 3种菌剂对小麦秸秆好氧堆肥降解效果比较[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 709–716.
ZHANG Yang, AI Weidang, JIN Xiangdan, *et al.* Effects of three microbial agents on wheat straw aerobic composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(2): 709–716 (in Chinese).
- [9] 刘凯军, 罗华琦, 黄克毅, 等. 低温条件下市政污泥好氧堆肥的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(7): 107–113.
LIU Kaijun, LUO Huaqi, HUANG Keyi, *et al.* Pilot-scale experiment of municipal sludge aerobic composting in low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(7): 107–113 (in Chinese).
- [10] 弓凤莲, 杨义, 于淑婷, 等. 市政污泥堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 128–131.
GONG Fenglian, YANG Yi, YU Shuting, *et al.* Parameter change and comprehensive evaluation of maturity during municipal sewage sludge composting process [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(21): 128–131 (in Chinese).
- [11] 张海霞, 李昕晨, 孙晓红. 污泥堆肥微生物菌剂的筛选优化及应用[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(8): 910–915.
ZHANG Haixia, LI Xinchun, SUN Xiaohong. Screening and optimization of microbial agents and its application in sludge composting [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(8): 910–915 (in Chinese).
- [12] 李梦蛟. 底泥固废好氧发酵转化为栽培基质的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
LI Mengjiao. Study on Aerobic Fermentation of Sediment and Solid Wastes for Usage as Plants Growth Substrates [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese).

- Chinese).
- [13] GOMEZ-BRANDON M, LAZCANO C, DOMINGUEZ J. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(3): 436–444.
- [14] 吕药灵, 姜晓琳, 牛明星, 等. 腐殖土对牛粪好氧堆肥的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(9): 119–122.
LÜ Yaoling, JIANG Xiaolin, NIU Mingxing, *et al.* Effect of humus soil on cattle manure aerobic composting[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(9): 119–122 (in Chinese).
- [15] 高剑平, 黄建峰, 张梁. 污泥与菌渣混合好氧快速堆肥协同发酵研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(9): 127–130.
GAO Jianping, HUANG Jianfeng, ZHANG Liang. Cooperative fermentation for aerobic co-composting of edible fungi residue and sewage sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(9): 127–130 (in Chinese).
- [16] 莫云, 尹红梅, 杜东霞, 等. 添加菌剂 YX-3 对猪粪堆肥氮素转化的影响[J]. *湖南农业科学*, 2020(3): 57–60.
MO Yun, YIN Hongmei, DU Dongxia, *et al.* Effect of microbial inoculum YX-3 on nitrogen transformation of pig manure composting [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020(3): 57–60 (in Chinese).
- [17] MAO H, LV Z Y, SUN H D, *et al.* Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 195–202.

作者简介: 代浩(1987–), 男, 河北永清人, 本科, 工程师, 主要研究方向为工程管理。

E-mail: 2507154275@qq.com

收稿日期: 2021-02-25

修回日期: 2021-03-16

(编辑: 任莹莹)

(上接第69页)

- genotoxicity analyses of disinfection by-products: an updated review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 58: 64–76.
- [7] WANG X M, MAO Y Q, TANG S, *et al.* Disinfection byproducts in drinking water and regulatory compliance: a critical review[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(1): 3–15.
- [8] HRUDEY S E, FAWELL J. 40 years on: what do we know about drinking water disinfection by-products (DBPs) and human health? [J]. *Water Science & Technology*, 2015, 15(4): 667–674.
- [9] 刘静, 陈超, 张晓健, 等. 两点短时游离氯后转氯胺的顺序氯化消毒工艺研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3368–3371.
LIU Jing, CHEN Chao, ZHANG Xiaojian, *et al.* Use of Two-points-short-term free chlorine plus chloramines disinfection process in conventional treatments of water supply [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3368–3371 (in Chinese).
- [10] 韩艳梅, 郅燕秋, 方自毅, 等. 天津开发区净水厂实现水质达标的技术设计[J]. *给水排水*, 2010, 36(1): 7–11.
HAN Yanmei, QIE Yanqiu, FANG Ziyi, *et al.* Technical design to reach the water quality standards of the Tianjin development zone water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(1): 7–11 (in Chinese).

作者简介: 周立娇(1988–), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 工程师, 主要从事净水处理、循环冷却水系统方面的研究工作。

E-mail: 158475652@qq.com

收稿日期: 2020-10-09

修回日期: 2020-11-05

(编辑: 任莹莹)