

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.003

# 污水厂污泥堆肥有机污染物降解及土地利用生态风险

李思莹<sup>1,2</sup>, 贾学斌<sup>1</sup>, 张 军<sup>1</sup>

(1. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘 要:** 污水厂污泥中富集了多种来源的有机污染物,若不进行有效处置,将会严重影响生态环境和人类健康。污泥堆肥是降解污泥中有机污染物的有效途径之一,然而堆肥后有机污染物过度残留也限制了堆肥产品的后续土地利用。以多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯(PAEs)、抗生素和抗性基因(ARGs)等典型有机污染物为对象,综述了其在好氧堆肥过程中的降解效率以及影响因素,同时分析了堆肥产物土地利用生态风险,以期为污泥的土地利用提供建议。

**关键词:** 污水厂污泥; 堆肥; 有机污染物; 降解效率; 土地利用; 生态风险

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0018-06

## Research Progress on Degradation of Organic Pollutants in Sewage Sludge Composting and Ecological Risk of Land Application

LI Si-ying<sup>1,2</sup>, JIA Xue-bin<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A broad range of organic pollutants from different origins has been detected in the sewage sludge, which will inevitably lead to a toxic effect on the environment and human health without feasible dispose methods. Sewage sludge composting is an effective method to degrade the organic pollutants. However, the excessive residues of these pollutants restrict the subsequent land application of composting products. The efficiency and influence factors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), phthalates (PAEs), antibiotics and antibiotics resistance genes (ARGs) removal during aerobic composting were reviewed in this paper. Moreover, the ecological risk of composting products was also assessed and aimed to provide valuable suggestions for land application.

**Key words:** sewage sludge; composting; organic pollutants; removal efficiency; land application; ecological risk

近年来,随着城镇化发展水平的提高和污水处理设施的完善,我国污水厂污泥年产量已突破 $6\,000\times 10^4\text{ t}^{[1]}$ ,污泥中富含有机质和氮磷等营养物质,堆肥后土地利用可以增加土壤肥力、促进植物

生长,实现污泥的资源化利用,具有广阔的需求和应用前景<sup>[2]</sup>。污水厂污泥中含有的重金属、有机污染物等有害成分增加了土地利用的生态风险<sup>[3]</sup>,尤其是污泥中很多有机污染物具有“三致”作用,受到

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1906501)

通信作者: 贾学斌 E-mail: 2009030@hlju.edu.cn

广泛关注。污泥堆肥产物的土地利用是符合我国国情的一种污泥处置途径,但由于目前国内尚未建立污泥土地安全利用风险评估体系,从而限制了污泥的土地利用范围。研究表明,好氧堆肥可以有效降解污泥中的有机污染物,降低后续土地利用过程的生态风险<sup>[4]</sup>,因此研究污泥堆肥过程中有机污染物的降解规律以及堆肥产物土地利用中的生态风险,对污泥的土地资源化利用和生态安全评价具有重要意义。

### 1 有机污染物在堆肥过程中的降解

污泥中有机污染物种类繁多,污泥好氧堆肥对多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯(PAEs)、抗生素(Antibiotics)和抗性基因(ARGs)、有机磷酸酯(OPEs)、壬基酚聚氧乙烯醚(NPnEO)等典型有机污染物具有明显的降解效果。在污泥堆肥过程中,不同的堆肥材料、堆肥方式和堆肥时间等因素都可能影响有机污染物的降解效果。

#### ① PAHs

PAHs是常见的持久性有机污染物,具有致癌性、致畸性和诱变性等毒性<sup>[5]</sup>。PAHs由于其水溶性低的特点,在污水处理过程中容易富集在污泥中,我国城市污泥中总PAHs浓度范围为1.156~34.94 mg/kg<sup>[6]</sup>。王杰<sup>[7]</sup>在污泥堆肥过程中发现调理剂种类和含水量对PAHs降解影响较大,采用复合调理剂(草炭+稻草)时,对PAHs的去除效率最高,含水量为55%时对14种PAHs的处理效果最好,室内和室外总PAHs降解率分别为79.6%和81.4%。石守业<sup>[8]</sup>发现三环和四环的PAHs降解率较高,而五环和六环的PAHs的降解率相对较低。因此,针对污泥中PAHs各组分的含量分布特性,合理控制堆肥过程中的各项参数对于PAHs降解至关重要。

#### ② PAEs

PAEs属于具有“三致”作用的内分泌干扰物质,由于具有疏水性而在污水处理过程中极易吸附到污泥中形成蓄积,我国城市污泥中PAEs浓度一般为10.4~114.7 mg/kg<sup>[9]</sup>。微生物代谢是PAEs降解的主要途径,Fu等<sup>[10]</sup>通过污泥和猪粪共堆肥发现,总PAEs在堆肥60 d后降解率达到74.7%~78.0%;Pakou等<sup>[11]</sup>将污泥与粪便堆肥62 d后实现了DEHP(污泥中PAEs的一种常见类型)降解率为97%的去除效果。上述研究表明,投加粪便混合堆肥对PAEs

的去除效果优于普通堆肥,这是由于粪便中含有丰富的微生物菌群,因此进一步促进了PAEs的降解。沈思等<sup>[12]</sup>研究发现,戈登氏菌、嗜甲基菌和分枝杆菌等好氧菌种对PAEs具有很好的降解效果。

#### ③ 抗生素

抗生素被生物体摄入后只有30%能够被分解代谢,其余部分则通过各种途径进入环境。污水中的抗生素通过吸附作用转移到污泥,好氧堆肥降解污泥中抗生素的效果显著。Zhang等<sup>[13]</sup>通过对污泥好氧堆肥后发现,诺氟沙星的去除率为89.6%~95.4%,氧氟沙星的去除率也达到87.2%~95.4%。Iranzo等<sup>[14]</sup>通过污泥和秸秆好氧堆肥实现了对阿奇霉素和厄贝沙坦的有效去除,去除率分别达到62%和60%。韦蓓等<sup>[15]</sup>通过脱水污泥、木屑和秸秆共堆肥发现,土霉素、金霉素和四环素降解率分别为91.4%、85.3%和85.6%。Yang等<sup>[16]</sup>研究也发现,在堆肥过程中青霉素浓度从开始时的 $(1\ 093.6 \pm 20.76)$  mg/kg大幅下降到 $(55.5 \pm 9.80)$  mg/kg,降解率达到95%。氧气含量和温度是影响污泥好氧堆肥过程中抗生素降解的重要因素,Zheng等<sup>[17]</sup>通过污泥和木屑堆肥,探究氧气含量对三氯生(TCS)降解的影响,研究发现氧气含量提高5.3%后,TCS的降解率相应提高了11.4%。Yu等<sup>[18]</sup>研究发现,高温好氧堆肥(70℃)对抗生素的分解有促进作用。Zhang等<sup>[13]</sup>也发现诺氟沙星和氧氟沙星在高温期降解速率更快,并且提高氧气含量对诺氟沙星和氧氟沙星的降解也具有促进作用。氧气含量和温度主要通过介导好氧堆肥过程中微生物群落的变化,进而影响其对抗生素的降解效率。

#### ④ ARGs

ARGs是由于抗生素的不合理使用诱导微生物产生的,借助可移动遗传元件(MGEs)能够实现微生物种属之间的基因水平转移和扩散。因此,ARGs在不同环境中的传播、扩散以及持久度给人类带来的危害远远高于抗生素本身。污泥中汇集了大量的ARGs,开展降解污泥ARGs的相关研究已经刻不容缓。韦蓓等<sup>[19]</sup>采用脱水污泥堆肥后发现,温度可能是影响磺胺类和大环内酯类抗性基因变化的重要因素,尽管ARGs的相对丰度在升温阶段呈下降趋势,但在随后的冷却和腐熟阶段却显著反弹,可能造成抗生素ARGs的二次扩散。Liu等<sup>[20]</sup>在研究抗生素菌渣堆肥过程中发现,ARGs和MGEs的丰度

没有明显降低。与传统好氧堆肥相比,超高温堆肥(80℃以上)对ARGs和MGEs的降解效果更明显,降解率分别提高89%和49%<sup>[21]</sup>。Liao等<sup>[22]</sup>研究发现,极端嗜热环境显著降低了ARGs潜在的宿主——放线菌门、拟杆菌门、壁厚菌门和变形菌门的丰富度和多样性,通过减少MEGs抑制基因水平转移,从而提高ARGs的去除效果。魏华炜<sup>[23]</sup>发现C/N比能够影响污泥好氧堆肥中ARGs的去除效果,调节C/N比为30时, $\beta$ -内酰胺类抗性基因和四环素抗性基因的相对丰度分别降低90.24%~96.20%和94.69%~95.78%。ARGs的传播主要是通过驱动ARGs宿主菌实现,而优化初始C/N比可以降低ARGs宿主菌群丰度,从而削减ARGs丰度。抗性基因在污泥堆肥过程中的削减机制(见图1)将成为研究重点。

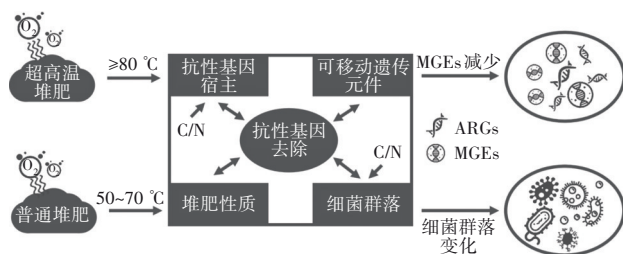


图1 抗性基因在污泥堆肥过程中的削减机制

Fig.1 Removal mechanism of ARGs by sludge composting

#### ⑤ OPEs

OPEs是一类阻燃剂和增塑剂,通过吸附作用富集于脱水污泥上。污泥堆肥是降解OPEs的有效方式,Pang等<sup>[24]</sup>研究发现,污泥堆肥中添加猪粪可以显著提高产碱杆菌、芽孢杆菌和假单胞菌等菌群丰度,对三丁基磷酸酯和三丁氧基乙基磷酸酯的降解率分别达到49.1%和21.1%,OPEs总体去除率可以达到19.1%。

#### ⑥ NPnEO

NPnEO是广泛使用的表面活性剂,大量应用于家庭洗护产品和工业洗涤剂中,可降解为具有内分泌干扰效应的短链产物和最终产物壬基酚(NP)。NPnEO和NP具有较强的生物累积性和生物毒性,废水中NPnEO经由多步处理工艺后最终汇聚到污泥中。目前,NPnEO在污泥堆肥过程中的降解也受到广泛关注。Pakou等<sup>[11]</sup>采用污泥和粪便共堆肥后观察到,经过60d的好氧发酵后NPnEO降解率为74.12%。氧气浓度、膨胀剂、温度、微生物群落等因素已经被证实能够影响好氧堆肥过程中NPnEO的

降解<sup>[25]</sup>。

#### ⑦ 二噁英(PCDD/Fs)

PCDD/Fs是具有“三致”作用的毒性有机污染物,由于水溶性低、脂溶性强的特点,在污水处理过程中常富集在活性污泥中。Patureau等<sup>[26]</sup>采用脱水污泥、园林废弃物和垃圾进行好氧堆肥,堆肥结束后PCDD/Fs浓度由11.1 ng/kg上升至15.0 ng/kg。Muñoz等<sup>[27]</sup>对污泥、秸秆和锯末混合好氧堆肥后观察到,八氯代二苯并-对-二噁英(OCDD)的浓度高于初始堆肥水平。由此可见,好氧堆肥对PCDD/Fs的降解不显著,堆肥过后PCDD/Fs浓度反而呈现上升的趋势。研究<sup>[27]</sup>发现,通风不足和五氯苯酚(PCP)存在时都会导致OCDD浓度增加,因此,在好氧堆肥过程中应合理控制这两个因素,以防止PCDD/Fs的形成。

#### ⑧ 多氯联苯(PCBs)

PCBs是人工合成的氯代芳烃类化合物,由于具有毒性效应强、难降解和迁移距离长等特性,在《斯德哥尔摩公约》中被列为首批持久性污染物之一。Siebielska等<sup>[28]</sup>通过消化污泥与城市固废好氧堆肥发现,降解的PCBs以低分子质量为主,四氯联苯(PCB 52)、五氯联苯(PCB 101)、六氯联苯(PCB 138)和七氯联苯(PCB 180)平均浓度仅分别下降了15.7%、11.8%、9.6%和6.9%,氯取代基较少的PCBs的降解率远大于氯取代基较多的PCBs的降解率。探究经济高效的脱氯前处理方法亦是加速PCBs降解的新思路。

### 2 污泥土地利用中有机污染物生态风险

通过对污泥好氧堆肥过程中有机污染物降解效率的分析发现,堆肥产品中仍残留部分有害的有机污染物。这些有机污染物普遍具有生物富集性、难降解性和高毒性,随着堆肥产物的土地利用在土壤中不断蓄积,对土壤种植的植物、饲养的动物和土著微生物产生毒性效应,并容易通过下渗和径流对地下水源和地表水源产生污染。最终土壤中的有机污染物将通过果蔬粮食、肉制品、奶制品和水源等途径对人体健康造成影响<sup>[8]</sup>,施加污泥肥料的土地也会对农耕人员直接造成职业健康风险。污泥堆肥产物中的有机污染物在土地利用过程中存在的生态风险(见图2)需要引起人们的关注。

污泥中有机污染物生态风险研究最早起源于20世纪70年代的美国,1985年美国科学家研究会



对污泥中23种污染物进行了全面系统的生态风险分析,并于1989年试行了与污泥标准和管理相关的503法规。欧盟国家制定的污泥农用标准(86/278/EEC)对污泥中有机污染物浓度、单位面积土地污泥施用量、施用频率、施用时间等都作了严格限制。我国《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)和《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)规定了污泥土地利用对有机污染物的控制标准。

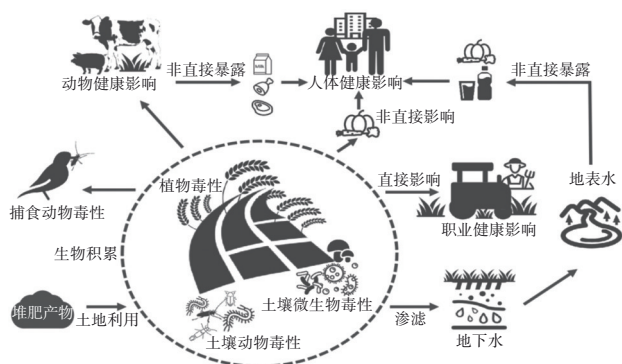


图2 污泥土地利用中有机污染物生态风险示意

Fig.2 Ecological risk diagram of organic pollutants of sludge land application

近年来,污泥堆肥产物土地利用过程带来的生态风险也受到越来越多的关注。Zheng等<sup>[29]</sup>采用三氯卡班(TCC)污染污泥分别与木屑和秸秆堆肥后发现,TCC降解率分别为65.7%和82.8%,堆肥产物中TCC剩余浓度分别为278.3 ng/g和537.9 ng/g,土地利用后土壤中TCC浓度分别为2.30 ng/g和4.45 ng/g,通过风险评估后建议这两种堆肥产物的最大施用量分别为35.0 t/hm<sup>2</sup>(木屑堆肥)和18.0 t/hm<sup>2</sup>(秸秆堆肥)。Yang等<sup>[30]</sup>评估了施用多溴联苯醚污染污泥对土壤生态的影响,发现土壤中五溴二苯醚、八溴二苯醚、十溴二苯醚浓度分别为0.19、0.03和39.5 ng/g时,生态风险较低。Mejías等<sup>[31]</sup>也总结了受抗生素污染污泥土地利用情况,详细分析了土壤中四环素类、大环内酯类和喹诺酮类药物对微生物产生毒性影响的限值。

目前我国污泥土地利用还停留在关注污染物控制指标是否达标的阶段,尚未建立完善的生态环境风险评价体系,尤其针对有机污染物相关研究数据匮乏,难以从危害鉴定、剂量-效应评价、暴露程度和风险度评定等角度对其进行完整评价。此外,缺乏公认的生态风险评估程序及产业发展经济政

策也是制约我国污泥土地利用的重要原因<sup>[3]</sup>。

### 3 结语

目前,国内外针对污泥好氧堆肥过程中有机污染物的降解规律进行的研究发现:①好氧堆肥对污泥中PAHs、PAEs、抗生素、ARGs、OPEs和NPnEO等有机污染物的降解效果明显,对PCBs的降解效果较差,堆肥后PCDD/Fs浓度出现上升趋势;②温度、供氧量、C/N比、膨胀剂种类和水分含量等不同堆肥条件可以影响有机污染物的降解转化,提高供氧量和发酵温度能够改善污染物的降解效果,超高温堆肥对ARGs降解更具优势;③提高微生物数量和种类可以促进有机污染物的降解,采用污泥与粪便共堆肥是提高有机污染物降解效果的重要途径;④污泥堆肥产品残留的有机污染物在土地利用过程中对土壤及其周边环境构成生态风险,并对人体健康产生影响。

未来可采用优化堆肥条件和引入特定的微生物菌种相结合的策略来提高难降解污染物的降解效率,从而获得较安全的堆肥产物。土地利用是污泥堆肥产物的最终去向,我国亟需开展对污泥土地利用过程中各类有机污染物的生态风险评价,并建立相应的限量控制标准,以便为污泥土地安全利用提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理的必要性和迫切性的思考[J]. 给水排水, 2017, 43(12): 1-5.  
DAI Xiaohu. Thoughts on the necessity and urgency of sludge stabilization in sewage treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(12): 1-5 (in Chinese).
- [2] 余杰, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥土地利用的国际发展趋势与展望[J]. 中国给水排水, 2012, 28(20): 28-30.  
YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al. International trend and prospect on land application of sewage sludge [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(20): 28-30 (in Chinese).
- [3] 黄岚, 封莉, 杜子文, 等. 我国城市污泥土地利用瓶颈问题分析与对策研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 31-36.  
HUANG Lan, FENG Li, DU Ziwen, et al. Analysis and countermeasures research on bottleneck problem of

- municipal sludge land application in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(20): 31–36 (in Chinese).
- [4] 郭广慧, 陈同斌, 雷梅, 等. 污泥堆肥产物在农业利用中的潜力和问题[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(20): 34–38.
- GUO Guanghui, CHEN Tongbin, LEI Mei, *et al.* Potentials and problems in application of composted sewage sludge to agricultural utilization [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(20): 34–38 (in Chinese).
- [5] HAN B, LIU A, GONG J W, *et al.* Spatial distribution, source analysis, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments from rivers emptying into Jiaozhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 168: 112394.
- [6] 余杰, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2271–2278.
- YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, *et al.* Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2271–2278 (in Chinese).
- [7] 王杰. 不同堆腐条件下污泥中多环芳烃变化特征及在土壤-植物中迁移规律[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 30–33.
- WANG Jie. Studies on Variation Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sewage Sludge under Different Composting Conditions and Its Migration between Soil and Plant [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016: 30–33 (in Chinese).
- [8] 石守业. 污泥堆肥过程中多环芳烃降解及转化的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 42–50.
- SHI Shouye. Study on Degradation and Transformation of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs) during Digested Sludge Compost [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 42–50 (in Chinese).
- [9] 梁志锋, 周文, 林庆祺, 等. 城市污泥中邻苯二甲酸酯(PAEs)的厌氧微生物降解[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1163–1170.
- LIANG Zhifeng, ZHOU Wen, LIN Qingqi, *et al.* Anaerobic biodegradation of phthalic acid esters (PAEs) in municipal sludge [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1163–1170 (in Chinese).
- [10] FU J, PAN F, SONG S, *et al.* Biodegradation of phthalic acid esters in sewage sludge by composting with pig manure and rice straw [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(8): 2289–2299.
- [11] PAKOU C, KORNAROS M, STAMATELATOU K, *et al.* On the fate of LAS, NPEOs and DEHP in municipal sewage sludge during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(4): 1634–1642.
- [12] 沈思, 王晓瑜, 王海霞, 等. 细菌降解邻苯二甲酸酯的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2019, 35(11): 2104–2120.
- SHEN Si, WANG Xiaoyu, WANG Haixia, *et al.* Advances in biodegradation of phthalates esters [J]. *Chinese Journal Biotechnology*, 2019, 35(11): 2104–2120 (in Chinese).
- [13] ZHANG J, BAO Y, JIANG Y, *et al.* Removal and dissipation pathway of typical fluoroquinolones in sewage sludge during aerobic composting [J]. *Waste Management*, 2019, 95: 450–457.
- [14] IRANZO M, MIGUEL G, BOLUDA R, *et al.* Analysis of pharmaceutical biodegradation of WWTP sludge using composting and identification of certain microorganisms involved in the process [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640: 840–848.
- [15] 韦蓓, 黄福义, 苏建强. 堆肥对污泥中四环素类抗生素及抗性基因的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(12): 5431–5438.
- WEI Bei, HUANG Fuyi, SU Jianqiang. Effect of composting on tetracyclines and tetracycline resistance genes in sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5431–5438 (in Chinese).
- [16] YANG L, ZHANG S H, CHEN Z Q, *et al.* Maturity and security assessment of pilot-scale aerobic co-composting of penicillin fermentation dregs (PFDs) with sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 204: 185–191.
- [17] ZHENG G D, YU B, WANG Y W, *et al.* Removal of triclosan during wastewater treatment process and sewage sludge composting—a case study in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Environment International*, 2020, 134: 105300.
- [18] YU Y S, CHEN L J, FANG Y, *et al.* High temperatures can effectively degrade residual tetracyclines in chicken manure through composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 380: 120862.
- [19] 韦蓓, 黄福义, 李虎, 等. 污泥堆肥过程中磺胺类和大环内酯类抗性基因的残留[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 395–400.

- WEI Bei, HUANG Fuyi, LI Hu, *et al.* Persistence of sulfonamide and macrolide resistance genes during sewage sludge composting [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20 (3): 395-400 (in Chinese).
- [20] LIU Y W, FENG Y, CHENG D M, *et al.* Dynamics of bacterial composition and the fate of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during the co-composting with gentamicin fermentation residue and lovastatin fermentation residue[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 261:249-256.
- [21] 余震,周顺桂. 超高温好氧发酵技术:堆肥快速腐熟与污染控制机制[J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43 (5): 781-789.
- YU Zhen, ZHOU Shungui. Hyperthermophilic composting of organic solid wastes: accelerated humification and pollution control mechanisms [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43 (5): 781-789 (in Chinese).
- [22] LIAO H P, LU X M, RENSING C, *et al.* Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(1):266-276.
- [23] 魏华炜. 秸秆基质协同污泥好氧堆肥及资源化利用中抗生素抗性基因风险研究[D]. 上海:华东师范大学, 2020: 72-79.
- WEI Huawei. Study on the Risk of Antibiotic Resistance Genes in Straw Substrate Synergistic Sludge Composting and Resource Utilization [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020 : 72-79(in Chinese).
- [24] PANG L, GE L M, YANG P J, *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.
- [25] ZHENG G D, CHEN T B, YU J, *et al.* Impact of composting strategies on the degradation of nonylphenol in sewage sludge [J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24: 2081-2087.
- [26] PATUREAU D, DELGENES N, MULLER M, *et al.* Chemical and toxicological assessment of a full-scale biosolid compost [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(12): 2748-2756.
- [27] MUÑOZ M, GARRIDO M A, GOMEZ-RICO M F, *et al.* PCDD/F determination in sewage sludge composting. Influence of aeration and the presence of PCP [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 763-773.
- [28] SIEBIELSKA I, SIEDEŁKO R. Polychlorinated biphenyl concentration changes in sewage sludge and organic municipal waste mixtures during composting and anaerobic digestion [J]. *Chemosphere*, 2015, 126: 88-95.
- [29] ZHENG G D, YU B, WANG Y W, *et al.* Fate and biodegradation characteristics of triclocarban in wastewater treatment plants and sewage sludge composting processes and risk assessment after entering the ecological environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125270.
- [30] YANG C, MENG X Z, LING C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in sewage sludge from Shanghai, China: possible ecological risk applied to agricultural land [J]. *Chemosphere*, 2011, 85(3): 418-423.
- [31] MEJÍAS C, MARTÍN J, SANTOS J L, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals and their metabolites in sewage sludge and soil: a review on their distribution and environmental risk assessment [J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2021, 30:e00125.

作者简介:李思莹(2000- ),女,黑龙江哈尔滨人,硕士在读,研究方向为污水污泥处理与资源化。

E-mail:1296354473@qq.com

收稿日期:2021-05-31

修回日期:2021-06-09

(编辑:丁彩娟)