

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.006

固体碳源用于污水深度脱氮的研究进展

罗方周, 齐 鲁

(中国人民大学环境学院 低碳水环境技术研究中心, 北京 100872)

摘 要: 为控制严重的水体富营养化问题,满足日趋严格的污水排放标准,污水厂在利用生物反硝化技术进行深度脱氮时大多需要投加外碳源。常见的外碳源可分为液体碳源与固体碳源两类,其中固体碳源近年来引起了国内外的广泛关注。系统总结了固体碳源的物质类型,阐述了固相反硝化系统释碳与脱氮的相关原理,综述了近年来固体碳源在污水深度处理中的应用研究进展,并基于上述内容提出了对固体碳源未来研究的展望。相较于液体碳源,固体碳源既是反硝化过程持续的电子供体,又可作为生物膜生长的载体,相关工艺简单易于控制,脱氮效果稳定,为未来污水深度处理技术的发展提供了一条新思路。

关键词: 固体碳源; 固相反硝化; 生物脱氮; 污水深度处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0034-06

Research Progress on Solid Carbon Source for Advanced Nitrogen Removal in Sewage Treatment

LUO Fang-zhou, QI Lu

(Research Center for Low Carbon Technology of Water Environment, School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In order to control serious water eutrophication and meet increasingly stringent sewage discharge standards, it is need to add external carbon source when using biological denitrification technology for advanced nitrogen removal in sewage treatment plants. Common external carbon source can be divided into liquid carbon source and solid carbon source. Solid carbon source has attracted widespread attention at home and abroad in recent years. This paper systematically summarizes the material types of solid carbon source, expounds the relevant principles of carbon release and nitrogen removal in the solid-phase denitrification system, summarizes the current application research progress of solid carbon source in advanced sewage treatment, and puts forward the prospect for future research on solid carbon source based on the above content. Compared with the liquid carbon source, the solid carbon source is not only a continuous electron donor for the denitrification, but also a carrier for the growth of the biofilm. The process system is simple and easy to control, with stable denitrification efficiency. The solid carbon source provides a new idea for the development of advanced sewage treatment technology.

Key words: solid carbon source; solid-phase denitrification; biological nitrogen removal; advanced wastewater treatment

基金项目: 中国人民大学校内项目(2975205045)

通信作者: 齐鲁 E-mail: qilu@ruc.edu.cn

为了满足日趋严格的污水排放标准对总氮的高要求,许多污水处理厂会在现有处理设施基础上增设深度脱氮单元,生物反硝化技术兼顾了硝酸盐去除效果与成本,是污水厂常用的深度脱氮技术。高效反硝化的实现需要充足的碳源,但是污水厂二级出水中可生物利用的有机物含量极低(C/N约0.3~0.8),因此需在深度脱氮过程中投加一定量的外碳源以保证反硝化效果。

传统的外碳源主要为甲醇、乙醇、乙酸盐、葡萄糖等水溶性物质或液态物质,液体碳源需要持续投加,在使用过程中存在投加量不易精确控制的问题,投加量不足致使出水水质难以达标,投加过量则可能导致二次污染。虽然实时监测与控制技术可实现对液体碳源的精确投加,但其运行维护复杂且成本高昂,目前难以实现大范围应用。此外,部分液体碳源如甲醇、乙醇等存在一定的毒性与可燃性,其运输储存及投加过程存在安全风险。近30年,有研究将一些天然或人工合成的可降解高分子有机物作为反硝化过程的固体碳源,其同时具有生物膜载体的功能。基于固体碳源的生物脱氮系统工艺简单,省去了持续投加的过程,易于控制且运行较稳定,具有较大的发展潜力。

1 固体碳源的物质类型

21世纪初,Hiraishi等提出将固体碳源所支持的反硝化过程称为固相反硝化(SPD),该名词被沿用至今,成为此类技术最常见的表述形式^[1]。根据固体碳源物质获取途径的不同,可将其分为天然高分子物质、合成可生物降解聚合物及复合型物质三种类型。

1.1 天然高分子物质

用作固体碳源的自然高分子主要是纤维素类物质,如木片、麦秆、棉花、玉米芯、废报纸、香蕉皮等^[2-5]。也有利用纤维素类物质以外的天然物质进行反硝化脱氮的报道,如利用蟹壳的几丁质作为反硝化电子供体,其使用寿命比其他纤维素物质更长。天然的固体碳源多取自农业废弃物,便宜易得,具有回收资源及保护环境的现实意义^[6]。但是该类物质的反硝化速率通常较低,且难以长时间维持稳定的反硝化效果,某些天然物质中所含的可溶性有机成分可能会在反应初期大量释放并随出水流失,还可能会附带深色的流出物,使出水色度

超标。

1.2 合成可生物降解聚合物

目前,已有研究的合成可生物降解聚合物主要包括:人工合成的石油基脂肪族聚酯如聚己内酯(PCL)^[7-8]、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)^[9];人工合成的生物基高聚物如聚乳酸(PLA);由人工调控细菌合成的聚羟基脂肪酸酯类(PHAs),常用的主要包括聚3-羟基丁酸酯(PHB)与聚(3-羟基丁酸酯-co-3-羟基戊酸酯)(PHBV)^[10]。可生物降解聚合物作固体碳源时的反硝化速率一般高于天然纤维素类物质,且脱氮效果稳定^[7,11],这类物质直接向水中释放的溶解性有机物较少,通常只有在酶的作用下才会大量水解出小分子物质,出水超标风险较小。目前,使用可生物降解聚合物的脱氮成本较高,据相关文献报道,PCL的脱氮成本约43.2~99.9元/kgNO₃⁻-N,PHBV的脱氮成本约44.7~49.5元/kgNO₃⁻-N,是乙酸钠的2倍(23.1~28.4元/kgNO₃⁻-N),较高的价格对其推广应用有所阻碍^[12-13]。

1.3 复合型物质

复合型的固体碳源物质通常由合成聚合物与天然物质或不同合成聚合物共混而得到,常用淀粉或竹粉(BP)等廉价的天然物质与合成聚合物共混,以降低脱氮成本。文献^[12]报道,PHBV与淀粉共混的脱氮成本可降至32.6~40.96元/kgNO₃⁻-N,PHBV与BP共混的脱氮成本可降至25.6~28.2元/kgNO₃⁻-N。已有的研究表明,淀粉与合成可生物降解聚合物如PCL、PHBV共混^[12,14],能显著缩短反硝化系统的启动时间;PLA在单独作为碳源时反硝化效率较低,而与淀粉共混后能得到较好的反硝化效果^[15];也有研究将淀粉与聚乙烯醇(PVA)的共混物作为固体碳源,其中PVA主要起固定淀粉的骨架材料的作用^[16]。BP与PHBV、PBS等物质的共混同样能缩短系统的启动时间,且能控制材料溶解性有机碳(DOC)释放,降低出水有机物超标的风险^[12,17-18]。另一种复合型固体碳源的制备思路是将不同的合成聚合物相互共混,由于不同材料的性质不一,共混时应考虑其相容性问题,通过适当调整各物质的配比或添加适当的化学助剂以保证其良好的力学性能。Sun等^[11]研究表明,PHBV/PLA共混物的脱氮成本与乙酸钠(27.3元/kgNO₃⁻-N)接近。

综上所述,天然的高分子物质成本低廉,在农村地区易于获得,但其反硝化效果不稳定,考虑到

运输与预处理成本,不适于市政污水的深度处理;合成可生物降解聚合物的反硝化性能稳定但目前的成本较高,随着相关生产工艺技术的进步、产能的提高,有望降低生产成本,扩大其在污水深度脱氮中的应用范围;复合型固体碳源兼顾了反硝化性能与成本,就目前来说更具规模化应用的潜力。

2 固相反硝化系统

2.1 固体碳源的释碳与脱氮原理

固体碳源释碳及脱氮的原理示意图1。随着水中微生物与固体碳源的接触,其表面会逐渐形成生物膜,部分微生物会分泌胞外酶对固体碳源进行水解。反硝化细菌通常不能直接利用大分子化合物,而是将这些物质被酶水解后产生的单体、二聚体或低聚体作为反硝化过程的电子供体。不同类型的固体碳源会在不同种类酶的作用下水解,这些酶一般由多种微生物分泌。Huang等^[19]发现玉米芯在木质纤维素降解酶作用下会分解释放出3,4-二甲基-2-己醇与2,3-二氢苯并呋喃。PCL等合成可生物降解聚合物则会被某些酯酶、脂肪酶、角质酶等水解。固体碳源释放小分子有机物的过程通常被称为固体碳源的释碳^[20]。除了胞外酶作用下的生物水解释碳外,固体碳源还会在物理化学的作用下释碳,但对于BDPs及其共混物来说,释碳主要是由于生物水解过程的作用,物化作用在总释碳量中的占比还不到10%^[20-21]。

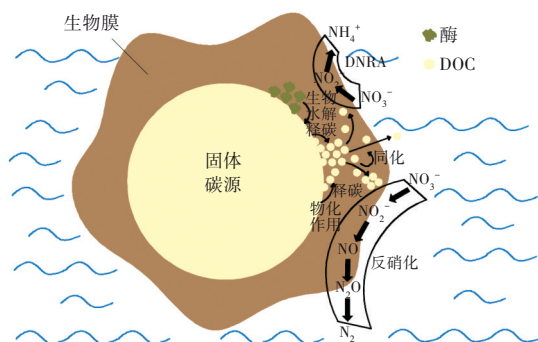


图1 固体碳源的释碳与脱氮原理

Fig.1 Carbon release and nitrogen removal mechanism of solid carbon source

在固相反硝化系统中,除反硝化作用外,还可能发生硝酸盐异化还原成铵(DNRA)的过程,将 NO_3^- -N转化为 NH_4^+ -N并导致其积累^[8-9],但该过程所占的比重较低。据报道^[17],固体碳源DOC释放过多会增强DNRA过程,从而导致 NH_4^+ -N的积累,

DOC释放不足则会导致 NO_2^- -N的积累。

2.2 微生物群落结构

微生物在固相反硝化系统中具有不可替代的地位,近年来,已有多篇文献报道了不同固相反硝化系统中微生物群落结构的组成情况。

在固体碳源支持的生物膜系统中,由于碳源选择的压力,微生物种群的多样性可能会下降,微生物的功能也会变得更加专门化^[7,22]。在门水平上,变形菌门占大部分固相反硝化系统微生物群落的主导地位^[7-8,12,18,21,23],多数反硝化细菌都属于变形菌门^[19];其次,拟杆菌门也是固相反硝化系统中常见的优势菌门^[7-9,18-19],除具有反硝化功能外,其所属的部分细菌还在降解大分子有机物的过程中起主要作用^[19,22]。Shen等^[8]发现在PCL支持的生物膜系统中,变形菌门在低温下(13℃)的丰度更高,而拟杆菌门则在较高温度下(25℃)的丰度更高。厚壁菌门、绿弯菌门等^[1,19,22]也常在不同的固相反硝化系统内被检出,但其丰度相对较低,厚壁菌门被认为是参与 NO_2^- -N转化的主要菌门^[24]。

在科水平上,研究发现隶属于 β -变形菌纲的丛毛单胞菌科在PCL与PBS支持的固相反硝化系统中均占优势^[7],从活性污泥和流化床反应器中分离出的许多可以降解PHAs的反硝化细菌大多属于丛毛单胞菌科,表明隶属于该科的一些细菌同时具备降解聚合物与反硝化的能力。

在属水平上,Fang等^[22]发现PCL平板支持的生物膜反应器中的反硝化菌属与一般活性污泥系统差异较大,活性污泥中常见的索氏菌属等在生物膜中丰度极低,而具备代谢聚酯能力的食酸菌属则成为主要的反硝化菌属。Huang等^[19]研究发现,在SBR中添加玉米芯载体后,其主要的反硝化菌属从索氏菌属变成脱氧单胞菌属,这种菌属具有代谢芳香族化合物的能力,而玉米芯的主要成分木质素则是一种芳香族高分子化合物。Shen等^[8]在PCL-陶粒垂直折流固相反硝化系统中检测到了能够降解大分子有机物的食酸菌与艾德昂菌属细菌。Shen等^[15]发现基于淀粉/PLA的反硝化系统中Alicyclophilus在已鉴定属中的丰度最高,而在乙醇作碳源的生物膜反硝化系统中,索氏菌属的丰度最高。不同类型固体碳源所支持的固相反硝化系统,其主要的反硝化菌属存在一定的差异,优势菌属一般具备代谢聚酯的能力。

在菌株水平上, Mergaert 等^[25]在 PHBV 填充的固定床反应器中分离出 186 株异养型细菌, 其中大多数细菌具有反硝化能力, 并能利用 3-羟基丁酸酯作为单一碳源; 研究还发现, 只有两种菌株同时具有 PHBV 降解与反硝化的功能。

3 固体碳源在深度脱氮中的应用研究进展

3.1 反硝化效率及其影响因素

由于具有稳定而持久的反硝化效果, 可生物降解聚合物及其共混改性物质常作为反硝化生物滤池的滤料而被用于污水深度脱氮。Li 等^[7]构建了集成 PCL 与石英砂的双层滤料固相反硝化生物滤池, 在不同的进水 NO_3^- -N 负荷下均实现了较高的去除率 (88.3% ~ 99.6%), 研究发现温度对该滤池的影响较大, 当温度从 18 °C 降至 8 °C 时, 脱氮率下降至 20%, 反硝化速率从 (3.19 ± 0.07) gN/(L·d) 降至 (1.23 ± 0.26) gN/(L·d), 该滤池同时对 SS 具有较好的截留效果, 砂滤层起主要的截留作用。Zhang 等^[26]使用响应曲面法对 PCL 反硝化滤池的运行工艺参数进行了优化, 发现在最佳工况下, 其 NO_3^- -N 去除率能达到 99.23%, 与常规的陶粒滤池相比, 进水 COD 对 PCL 滤池中 NO_3^- -N 去除的影响不大, HRT 及进水 NO_3^- -N 浓度的影响更大。Xu 等^[27]将 PHBV/PLA 填充的固定床反应器用于污水厂二级出水脱氮, 当 HRT 为 2 h、温度为 30 °C 时脱氮率达到 97%, 当温度分别降至 20、15、10 °C 时, 脱氮率逐步降低, 分别为 59%、38%、20%, 但其反硝化速率基本保持在 0.17~0.18 gN/(L·d)。Jiang 等^[21]利用板状 PCL/热塑性淀粉共混物填充的垂直折流板固相反硝化反应器处理 SBR 出水, 随着进水硝酸盐负荷的提高, 该反应器最高反硝化速率达到 0.33 gN/(L·d), 而随着温度的降低, 其硝酸盐去除率与反硝化速率均降低。

在中试规模上, Shen 等^[8]使用填充 PCL 与陶粒的垂直折流固相反硝化反应器来处理污水厂的二级出水, 发现温度从 30 °C 降至 13 °C, TN 的平均去除率从 84% 降至 49%, 作为反硝化中间产物的 NO_2^- -N 有少量的积累, 但温度并未明显影响 DNRA 过程中 NH_4^+ -N 的积累。Yang 等^[23]对比了基于 PHBV、PHBV/稻壳、PHBV/锯末的 3 个上流式固相反硝化深度处理系统的反硝化脱氮效果, 在稳定运行阶段, 3 个反应器的 NO_3^- -N 去除率均达到 95% 以上, PHBV

系统的出水 DOC 平均浓度明显高于 PHBV/稻壳与 PHBV/锯末。综合来看, 当 HRT 为 1.5 h 时, PHBV/锯末体系表现出最佳的反硝化性能。

固相反硝化系统用于深度脱氮时, 其反硝化效率受到温度、进水硝酸盐浓度、HRT 等因素的影响, 其中, 温度对固相反硝化过程的影响较大, 一般需要采取适当的措施如延长反应器的 HRT 等, 来提升其在低温下的反硝化效果。

3.2 同步脱氮及有机物去除

在污水处理厂的二级出水中, 除了含有 NO_3^- -N 外, 还可能含有 NH_4^+ -N 及某些有机污染物, 给受纳水体及生物圈带来一定的风险。近两年来, 有部分研究探讨了固体碳源系统实现二级出水同步脱氮及有机物去除的潜力。

Sun 等^[13]使用填充 PHBV/PLA 的固定床反应器实现了对模拟二级出水的同步硝化反硝化, 在稳定期对 NH_4^+ -N 及 NO_3^- -N 的平均去除率分别达到了 (98.1 ± 2.9)% 和 (87.2 ± 6.8)%, 出水 DOC 平均为 (9 ± 3.4) mg/L。Gao 等^[1]使用填充 PBS 的固相反硝化生物膜反应器对 SBR 装置的出水进行处理, 成功实现了 97% 的 NO_3^- -N 去除率与 80% 的 COD 去除率。Sun 等^[11]探讨了填充 PHBV 的反应器同时去除氮素和药物及个人护理品 (PPCPs) 的中长期运行性能, 该系统在保持高效的同步硝化反硝化的同时, 对进水 50 μg/L 的布洛芬和三氯生的去除率分别达到 (79.69 ± 6.35)% 与 (65.96 ± 7.62)%, 其中可生物降解底物——固体碳源在增强微生物的代谢活性并诱导非特异性酶降解 PPCPs 的过程中起到了关键作用。Yi 等^[28]开发了集成 PHBV 与颗粒活性炭 (GAC) 的生物滤池, 当 PHBV 与 GAC 的填充率为 1:1 时, 实现了约 95% 的 NO_3^- -N 平均去除率及 80% 的 PPCPs (美托洛尔与双氯芬酸) 平均去除率, 在进水 NO_3^- -N 负荷变化的情况下, 其最高反硝化速率达到 0.76 ~ 0.82 gN/(L·d)。通过适当调控, 固体碳源支持的脱氮系统对 PPCPs 等物质具有较好的去除效果, 使其在污水深度处理领域具备了更大的应用潜力。

4 结语

基于固体碳源的生物脱氮工艺省去了碳源持续投加的过程, 运行调控简单, 出水超标风险小, 在某些应用领域 (如污水的深度处理等) 有望成为液

态碳源的优质替代品。固体碳源按来源可分为天然高分子物质、合成可生物降解聚合物及复合型物质三类,其不仅是反硝化过程持续的电子供体,还是支持生物膜生长的载体。生物水解作用与物化作用共同参与固体碳源的释碳过程,其中生物水解是释碳的主要过程。固相反硝化系统的微生物群落结构与常规工艺存在一定差异,其脱氮效率受到温度、进水负荷等多种因素的影响。在目前已有的研究中,固体碳源可用于多种原水的生物脱氮,随着污水处理行业提质增效需求的扩大,固体碳源在污水深度处理领域具有越来越高的实用价值。

对于固体碳源未来的研究,提出如下几点展望:①现阶段可生物降解聚合物较高的成本使其作为固体碳源难以进行大规模商业推广,建议从复合型材料着手,如PBS、PCL、PHBV等聚合物和天然物质(木屑、几丁质)等共混,寻找更多优质而廉价的复合材料组合,探究其共混条件、配比及改性方法等。②由于固相反硝化系统微生物群落结构的复杂性,不同功能微生物之间可能存在一定的协同与促进作用,这对于系统的脱氮效能存在一定影响。建议从微生物的群体感应及信号分子等角度深入剖析与阐释固体碳源的释碳机理、反硝化特性及其相互关系。③固体碳源在实际应用过程中可能出现一定的有机物积累,同时固体碳源作为生物膜载体时生物膜量的稳定性问题亟待研究,建议针对不同的实际应用情况,开展更多中试及生产性研究,同时开发多种基于固体碳源的高效污水深度处理工艺。

参考文献:

- [1] GAO L J, HAN F, ZHANG X W, *et al.* Simultaneous nitrate and dissolved organic matter removal from wastewater treatment plant effluent in a solid-phase denitrification biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123714.
- [2] ZHAO J M, HE Q C, CHEN N, *et al.* Denitrification behavior in a woodchip-packed bioreactor with gradient filling for nitrate-contaminated water treatment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, 154: 107454.
- [3] SI Z H, SONG X S, WANG Y H, *et al.* Intensified heterotrophic denitrification in constructed wetlands using four solid carbon sources: denitrification efficiency and bacterial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 416–425.
- [4] CAO X, LI Y X, JIANG X Y, *et al.* Treatment of artificial secondary effluent for effective nitrogen removal using a combination of corncob carbon source and bamboo charcoal filter[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 115: 164–170.
- [5] WANG H S, CHEN N, FENG C P, *et al.* Research on efficient denitrification system based on banana peel waste in sequencing batch reactors: performance, microbial behavior and dissolved organic matter evolution [J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126693.
- [6] YANG X L, JIANG Q, SONG H L, *et al.* Selection and application of agricultural wastes as solid carbon sources and biofilm carriers in MBR [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 186–192.
- [7] LI P, ZUO J E, WANG Y J, *et al.* Tertiary nitrogen removal for municipal wastewater using a solid-phase denitrifying biofilter with polycaprolactone as the carbon source and filtration medium [J]. *Water Research*, 2016, 93: 74–83.
- [8] SHEN Q S, JI F Y, WEI J Z, *et al.* The influence mechanism of temperature on solid phase denitrification based on denitrification performance, carbon balance, and microbial analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139333.
- [9] ZHU S M, DENG Y L, RUAN Y J, *et al.* Biological denitrification using poly(butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 603–610.
- [10] ZHANG S S, SUN X B, WANG X M, *et al.* Bioaugmentation with diaphorobacter polyhydroxybutyrate-ivorans to enhance nitrate removal in a poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) supported denitrification reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 263: 499–507.
- [11] SUN H M, WANG T, YANG Z C, *et al.* Simultaneous removal of nitrogen and pharmaceutical and personal care products from the effluent of waste water treatment plants using aerated solid-phase denitrification system [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 287: 121389.
- [12] CHU L B, WANG J L. Denitrification of groundwater using PHBV blends in packed bed reactors and the microbial diversity [J]. *Chemosphere*, 2016, 155: 463–470.
- [13] SUN H M, YANG Z C, YANG F F, *et al.* Enhanced

- simultaneous nitrification and denitrification performance in a fixed-bed system packed with PHBV/PLA blends [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 146: 104810.
- [14] SHEN Z Q, HU J, WANG J L, *et al.* Comparison of polycaprolactone and starch/polycaprolactone blends as carbon source for biological denitrification [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(4): 1235–1242.
- [15] SHEN Z Q, ZHOU Y X, WANG J L. Comparison of denitrification performance and microbial diversity using starch/poly(lactic acid) blends and ethanol as electron donor for nitrate removal [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 33–39.
- [16] LI P, ZUO J E, XING W, *et al.* Starch/poly(vinyl alcohol) blended materials used as solid carbon source for tertiary denitrification of secondary effluent [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 1972–1979.
- [17] LIU D Z, LI J W, LI C W, *et al.* Poly (butylene succinate)/bamboo powder blends as solid-phase carbon source and biofilm carrier for denitrifying biofilters treating wastewater from recirculating aquaculture system [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3289.
- [18] QI W H, TAHERZADEH M J, RUAN Y J, *et al.* Denitrification performance and microbial communities of solid-phase denitrifying reactors using poly (butylene succinate)/bamboo powder composite [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 305: 123033.
- [19] HUANG L P, YE J Y, XIANG H W, *et al.* Enhanced nitrogen removal from low C/N wastewater using biodegradable and inert carriers: performance and microbial shift [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122658.
- [20] YANG M, WANG X N, LIU S, *et al.* Carbon release behaviour of polylactic acid/starch-based solid carbon and its influence on biodenitrification [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, 155: 107468.
- [21] JIANG L, WU A Q, FANG D X, *et al.* Denitrification performance and microbial diversity using starch-polycaprolactone blends as external solid carbon source and biofilm carriers for advanced treatment [J]. *Chemosphere*, 2020, 255: 126901.
- [22] FANG D X, WU A Q, HUANG L P, *et al.* Polymer substrate reshapes the microbial assemblage and metabolic patterns within a biofilm denitrification system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387: 124128.
- [23] YANG Z C, SUN H M, ZHOU Q, *et al.* Nitrogen removal performance in pilot-scale solid-phase denitrification systems using novel biodegradable blends for treatment of waste water treatment plants effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 305: 122994.
- [24] LU Y Q, XU Y, DONG B, *et al.* Effects of free nitrous acid and nitrite on two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: a preliminary study [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 1064–1071.
- [25] MERGAERT J, BOLEY A, CNOCKAERT M C, *et al.* Identity and potential functions of heterotrophic bacterial isolates from a continuous-upflow fixed-bed reactor for denitrification of drinking water with bacterial polyester as source of carbon and electron donor [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, 24(2): 303–310.
- [26] ZHANG Q, JI F Y, XU X Y. Optimization of nitrate removal from wastewater with a low C/N ratio using solid-phase denitrification [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(1): 698–708.
- [27] XU Z S, DAI X H, CHAI X L. Effect of temperature on tertiary nitrogen removal from municipal wastewater in a PHBV/PLA-supported denitrification system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 26893–26899.
- [28] YI C C, QIN W, WEN X H. Renovated filter filled with poly-3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate and granular activated carbon for simultaneous removal of nitrate and PPCPs from the secondary effluent [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141494.

作者简介:罗方周(1997–),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为污水处理技术。

E-mail:luofangzhou99@163.com

收稿日期:2021-02-09

修回日期:2022-05-13

(编辑:丁彩娟)