

# Strategies of Carbon Source in Constructed Wetland

Jing Huai, Juan Wu, Fei Zhong, Shuiping Cheng

Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai  
Email: winonahuai@163.com

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

When it comes to the treatment of high nitrogen and low carbon sewage, constructed wetlands (CWs) are always inefficient due to a lack of carbon source. Since adding external carbon can improve the denitrification performance, we summarize the pros and cons of different carbon sources. We also compare their efficiency, strengthening methods as well as the modes of dosage. In the precedent studies, common carbon sources are smaller hydrocarbons, plant debris and biodegradable high-molecular polymers. Choosing the effective carbon source and proper dosing methods can promote the denitrification of CWs.

## Keywords

Constructed Wetland, Carbon Source, Denitrification

---

# 人工湿地碳源补充策略研究进展

怀 静, 吴 娟, 钟 非, 成水平

同济大学, 长江水环境教育部重点实验室, 上海  
Email: winonahuai@163.com

收稿日期: 2018年11月2日; 录用日期: 2018年11月19日; 发布日期: 2018年11月26日

---

## 摘 要

人工湿地在处理高氮低碳污水时往往存在碳源不足的困境, 可采用外加碳源的方法提高人工湿地脱氮效率。本文总结了人工湿地外加碳源的种类及效果, 比较了各种碳源性能优缺点、改良方法以及投加方式等。目前用于人工湿地外加碳源的材料主要有: 低分子碳水化合物, 天然有机底物, 可生物降解的高分子聚合物等。选择高效碳源及合适的投加量、投加方式是提升人工湿地脱氮效率的可行手段。

## 关键词

人工湿地, 外加碳源, 反硝化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

人工湿地作为典型的生态处理技术, 已被广泛应用于污染水体的水质净化与恢复、面源污染控制、雨水处理与利用以及污水处理等领域[1] [2] [3], 人工湿地的脱氮机制主要包括植物吸收、基质吸附、微生物作用等, 其中微生物的硝化反硝化是湿地中的主要脱氮机制[4], 其脱氮量可占人工湿地脱氮量的54%~94% [5]。反硝化是反硝化细菌在缺氧、厌氧条件下, 将硝态氮还原为亚硝态氮、氧化一氮、一氧化二氮最终变为氮气的过程, 此过程需要碳源作为电子供体[6]。人工湿地在深度处理污水厂二级出水时, 由于污水有机物本底值低或大部分在前期被去除, 导致人工湿地进水有机碳含量很低, 并多为难降解有机碳, 限制了人工湿地脱氮效果[7] [8], 碳源不足成为了人工湿地脱氮效果的主要限制性因素。为了解决这个问题, 现阶段采用的措施主要是通过投加外源性碳源来增强人工湿地的脱氮效率。然而在各类研究中采用碳源种类多样, 碳源投加量与投加方式不一而足。本文旨在对近年来人工湿地外加碳源方面的研究进行综合比较分析, 包括外加碳源种类、添加方式以及与其他技术的结合应用, 并对照各实验的脱氮效率、其它污染物去除效果以及运行成本, 以期为今后的研究及工程应用的碳源补充策略提供参考。

## 2. 外加碳源种类

碳源种类可以很大程度上决定碳源利用效果以及反硝化效果。目前, 用作人工湿地外加碳源的选择主要有: 低分子碳水化合物、天然有机底物以及可生物降解的高分子聚合物。

### 2.1. 低分子有机碳源

低分子有机碳源如葡萄糖[9] [10] [11]、果糖[12]、乙醇、甲醇[13], 因其碳含量高, 易被分解利用的特点, 在作为人工湿地外加碳源时可以有效提高反硝化效果。王丽丽等[14]对比了反硝化细菌在 20℃时的有关动力学常数, 得出反硝化过程与所利用碳源的性质有关的结论, 而无论是对微生物的最大比生长速度、微生物的内源衰减系数, 还是对于微生物的理论产率而言, 甲醇都是其中最理想的碳源。Chen 等人[13]用甲醇做外加碳源使进水 COD/N 为 4, 经过 3 个周期的培养后, 反硝化细菌有了明显的累积并趋于稳定, 此时硝酸盐去除速率为  $2.31 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 而对照组为  $0.21 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在 Lin 等人[12]的研究中, 利用果糖调节地下水 COD/N 并对其进行处理后发现, 当 COD/N 为 6.2 时, 种植不同植物的人工湿地脱氮效率都分别趋近 100%。但与此同时, 出水 COD 浓度一直维持在大于  $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的水平, 且进水中大部分果糖被好氧细菌利用。由此可见, 低分子有机碳源虽然可以有效提高湿地脱氮性能, 但也存在着出水 COD 含量高, 碳源无法被反硝化细菌高效利用的情况, 这无疑提高了运行成本与应用门槛。

### 2.2. 天然有机物

植物材料富含纤维素、半纤维素、木质素等, 具有很高的 COD/N, 且其存在广泛, 取材方便、廉价。近年来, 湿地植物材料又因其可就地利用的特点, 在人工湿地外加碳源的研究中受到广泛关注。由于不

同植物所含纤维素、木质素等成分差异大,因而造成微生物分解利用速率不一,人工湿地脱氮提升效果不一。以往研究中采用的湿地植物有芦苇[15][16]、香蒲[17][18][19]、美人蕉[18]、伊乐藻[16]、灯芯草[17]、凤眼莲[13]等。武海涛[20]对反硝化植物碳源的选择研究中,发现在简单处理组,硝态氮去除率为再力花秸秆(96.92%) > 香蒲枯叶(90.60%) > 芦苇枯叶(84.16%) > 香根草(81.08%) > 芦苇秸秆(80.60%)。Bastviken [16]等人对比研究了外加香蒲、芦苇以及伊乐藻碳源对表面流人工湿地脱氮效果的影响。结果表明,尽管伊乐藻组 COD/N 提高程度不及香蒲与芦苇,却有着最优的反硝化细菌丰度和脱氮效果。这可能表明相较于挺水植物,沉水植物所含的碳源种类更趋向于被反硝化细菌所利用;另一种可能的解释为沉水植物材料表面更易形成富含反硝化细菌的生物膜。

然而在 Chen 等[13]对甲醇、乙醇、黑藻和凤眼莲的对比实验中发现,凤眼莲组的脱氮效果较对照组有所降低,可能与其分解释放过多 N 有关。而黑藻组的脱氮效率虽有提升,提升效果并不显著;与之相比,甲醇、乙醇碳源的投加却使湿地脱氮速率提升了十倍。另外,将植物碳源投加入人工湿地系统中时,出水中总含有一定量游离的  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{NH}_4^+$ , 其含量与植物碳源投加量成正比[21][22]。由此,植物碳源可以有限得提升反硝化效果,但因其碳源难以被反硝化菌分解利用,单纯得投加此种碳源无法满足脱氮需求。

### 2.3. 可生物降解的多分子聚合物

可生物降解的多分子聚合物如 PHB (聚  $\beta$ -羟基丁酸)、PHBV (聚  $\beta$ -羟基丁酸戊酸酯)、PLA (聚乳酸)[23]、PCL [24][25], 淀粉-聚己内酯交联产物[26]也被作为人工湿地外加碳源。Shen [25]将淀粉与聚己内酯混合物添加到垂直流人工湿地基质中,发现基质中可利用碳源多为多糖与还原性糖。当硝氮负荷  $70 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 反硝化速率为  $69 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 而当硝氮过量, 负荷  $127 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 反硝化速率  $92 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 表明此时氮负荷超过剩, 超出其最高去除能力范围。其结果远远优于碱处理后的香蒲作为外加碳源时最高反硝化速率  $29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  [15]与桉树木屑做外加碳源时的总氮去除速率  $9\sim 20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  [19]。与木质纤维构成的植物材料相比, 淀粉具有较高的可生物降解性, 因此, 对湿地脱氮效果有更明显的改善。

然而在使用合成材料 PHB, PCL 等外加碳源时[10], 结果发现虽反硝化效果良好, 但合成碳源的水解需一定时间, 因此存在 8~16 天反应滞后期, 且也面临碳源成本过高的困扰。另外, 合成材料的形态结构、表面性质、颗粒粒径对反硝化速率影响大, 其生物可降解性和反硝化性能随分子量增加而降低[27]。因此现阶段聚合物类的碳源因其市场价格较高、碳源释放缓慢等因素而未被广发应用。

## 3. 提高碳源质量的方法

外加碳源后, 人工湿地反硝化能力的提升可归因于碳源提供了反硝化作用的电子供体, 以及碳源氧化分解强化了人工湿地缺氧状态[28]。Ingersoll 与 Baker [7]提出反硝化速率与碳源提供量呈线性关系, 并设想最佳 C/N 为 5。然而在 Bremner 和 Shaw [29]的研究发现, 反硝化最理想 C/N 与碳源的可利用性有关, 因此选择不同种类外加碳源, 其进水最适 C/N 应有所不同。Hume 等人[17]提出相比于 C/N,  $C_{\text{app}}/N$  是反硝化速更优异的指示因子( $C_{\text{app}}$ 为酸溶性碳源)。因此, 提升碳源质量、提高酸溶性碳源含量, 并依据  $C_{\text{app}}/N$  寻找最适投加比例, 可以经济有效地利用外加碳源以得到理想脱氮效果。

植物材料中纤维素、半纤维素、木质素含量显著影响着外加碳源的分解速率。为改善植物碳源的利用效果, 不同的实验研究中采用了粉碎、高压蒸煮、发酵[30]、厌氧浸泡[31]、碱处理[15]、酸处理[18][32]等预处理方式。Zhang 等人[33]使用香蒲发酵液为碳源处理污水厂二级出水, 调节 C/N 为 1~3 时, 脱氮速率与 C/N 成线性关系( $R^2 = 0.977$ )。Ding 等[18]使用 2%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  对香蒲、美人蕉、秸秆进行水解, 当反应时间为 60 min 时, 通过 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  处理的秸秆 COD 释放最多, 并且发现 C/N 为

2~4 时, 硝化与反硝化可同时发生; 当  $C/N > 6$ , 反硝化速率大幅提升, 硝态氮迅速减少; 而  $C/N = 9$  时, 硝态氮被完全去除, 而硝化反应受到明显抑制。而另一项研究[34]显示, 湿地中  $C/N < 6$  时, 氨氮去除途径为氨氧化作用; 而  $C/N > 6$  时会出现厌氧氨氧化作用, 作为氮去除的另一种途径。Yin 等人[30]采用将香蒲在  $35^{\circ}\text{C}$  发酵, 发酵液  $C/N$  达到 158, 调节进水  $C/N$  至 1~4, 对应反硝化速率是分别提升 4.0~15.5 倍, 出水 COD 含量并无显著提高。刘畅等[35]同样以香蒲发酵液为碳源, 发现进水  $C/N$  至 1~4 时, 反硝化细菌总数随碳源增加而增加。Wen 等人[15]使用 2% NaOH 溶液浸泡香蒲碎叶, 发现预处理可以降低香蒲碳源的木质素含量, 提升纤维素、半纤维素含量以及碳源的利用效率, 预处理后的香蒲作为外加碳源时, 初始阶段反硝化强度大幅提升。反硝化速率随时间呈现阶段性变化, 碱处理组与对照组的反硝化速率分别由最初阶段的  $14\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $29\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  下降到  $2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在杨思路[36]关于人工湿地启动器反硝化碳源的补充研究中, 湿地运行前 33 d 内, 经碱洗预处理香蒲枯叶反硝化速率常数约为只经简单物理预处理香蒲枯叶反硝化速率常数的 3.18 倍; 反应器运行中后期, 经碱洗预处理香蒲枯叶反硝化速率常数约为只经简单物理预处理香蒲枯叶反硝化速率常数的 2.66 倍。Ballantine 等人[37]比较了稻草、表层土壤,  $450^{\circ}\text{C}$  热解后的木屑作为基质的处理效果, 结果表明土壤表层组尽管  $C/N$  最低, 但反硝化效果明显优于另外两组。在此实验中过高的  $C/N$  降低了有机氮的矿化作用并抑制硝化作用, 从而造成反硝化中的氮匮乏。

$C_{\text{app}}/N$  可以作为脱氮性能提升的指示因子, 当  $C_{\text{app}}/N$  高于 6 时, 湿地可以表现出良好的脱氮性能, 但  $C_{\text{app}}/N$  并非越高越好。天然有机底物碳源可生物利用的碳源含量低且往往释放缓慢, 适当的预处理可以改变纤维素类碳源结构、孔隙率以及比表面积, 提高其生物可利用性。然而这往往也会造成前期碳源充足甚至过剩而后期碳源不足的问题, 并同时伴随着额外的运行开支和人力投入。

#### 4. 碳源投加方式

由于湿地中各部分环境条件不同, 碳源的投加方式会影响到碳源的有效利用以及出水水质。赵秋菊、陈昱奇[38]发现, 采用碱处理玉米秸秆为碳源补充材料, 潮汐流湿地氨氮、亚硝态氮、总氮去除主要发生在中上层, 底层主要发生硝氮的去除; 而 COD 去除主要发生在中部砾石层。肖蕾等[39]的研究亦表明, 向垂直流人工湿地添加固体碳源, 添加位置为下层时硝化反应最为完全, 总氮去除率最高, 与此同时, 总磷去除效果也明显优于其他各组; 投加位置为表层时, 会造成碳源大量流失以及出水 COD 增加。Chen 等[13]研究发现, 表面流人工湿地中水-基质界面有很强的脱氮潜能, 湿地中硝氮浓度变化遵循一级动力学方程式, 而碳源与基质纵向混合, 可以显著提高反应速率。在 Fleming 等人[40]比较了固体碳源-基质混合组与固体碳源层覆盖于基质之上组的脱氮效果, 硝氮浓度同样遵循一级反应, 然而固体碳源覆盖于基质上一组的反应速率明显高于混合组。这可能是因为固体碳源层改变了湿地水平、竖直方向上的水力条件, 并有效增加了孔隙率与比表面积, 为微生物生存提供了有利场所。

基质或土壤的不同会很大程度上影响分解者的数量、组成、活性, 从而影响到分解速率[41], 因此, 亦可将有机碳源作为人工湿地基质对其进行改良。以往研究中所采用的材料包括木屑[19]、甘蔗渣[42]椰壳渣[43]等等。选择米糠作为折流湿地基质[44], 发现 HRT 为 2, 3, 5 天时, 相较于传统基质氨氮去除率 55%, 70%, 96%, 改良后的湿地去除率提升到 74%, 84%, 99%, 且氮氧化物残余率趋近零。Ballantine 等[37]对比了稻草、表层土壤,  $450^{\circ}\text{C}$  热解后的木屑作为基质的处理效果, 土壤碳源提高了 13%~63%, 其中使用表层土壤的改良组相较于对照组其反硝化强度提高了 161%, 并使土壤中氮循环成倍加速。

为达到理想的脱氮效果, 根据湿地条件, 选择适当的投加方式、投加位置也是必要的。潜流湿地中碳源投加在中下层时可以达到较理想的反硝化效果, 以自然有机底物作为基质也可以提升脱氮效率。而在表面流湿地中, 在水-基质界面混合碳源与基质, 以及设置固体碳源层, 对加强反硝化也有着不同的功效。

## 5. 展望

目前,为了解决人工湿地脱氮能力不足的问题,现阶段采用的措施主要是通过投加外源性碳源来增强湿地的脱氮效率,而如何经济有效地添加碳源则成为解决这一问题的技术瓶颈。关于碳源种类和投加方式的选择虽展开了一定的研究,但目前用于实践中的碳源却都存在着各自不同的缺陷。低分子碳水化合物、高分子聚合物的价格阻碍了其实际应用的普及;而大型植物碳源则由于其碳源释放缓慢而无法达到理想脱氮效果。每种碳源由于可利用碳源含量不同、理化性质不同而表现出最佳投放量差别大的特点, $C_{app}/N$ 可作为碳源投加量的控制指标。增加可利用碳源的比例,可以减少投加量,提升脱氮速率。然而前处理步骤的增加也意味着运行成本、人力投入的增加。且目前对植物碳源碱处理等方法也存在着前期碳源释放快后期不足的问题。根据上述问题,人工湿地外加碳源的研究工作应从以下方面展开:

- 1、开发可利用碳源含量高、廉价易得、生态环保的优质碳源;
- 2、研究提升碳源酸溶性有机物含量,同时可使碳源匀速、可控释放的前处理方法;
- 3、实际工况研究中,应依照不同碳源的特性,以 $C_{app}/N$ 和实际去除效果为指标,采用相应的碳源添加量;并根据湿地类型采取高效的添加方式。

## 参考文献

- [1] Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F., *et al.* (2002) Efficiency of Constructed Wetlands in Decontamination of Water Polluted by Heavy Metals. *Ecological engineering*, **18**, 317-325. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00091-X)
- [2] Babatunde, A.O., Zhao, Y.Q., O'Neill, M., *et al.* (2008) Constructed Wetlands for Environmental Pollution Control: A Review of Developments, Research and Practice in Ireland. *Environment International*, **34**, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.06.013>
- [3] Vymazal, J. (1996) The Use of Subsurface-Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, **7**, 1-14. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00061-5)
- [4] Vymazal, J. (2007) Removal of Nutrients in Various Types of Constructed Wetlands. *Science of the Total Environment*, **380**, 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- [5] Chen, Y., Wen, Y., Zhou, Q., *et al.* (2014) Effects of Plant Biomass on Nitrogen Transformation in Subsurface-Batch Constructed Wetlands: A Stable Isotope and Mass Balance Assessment. *Water research*, **63**, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.015>
- [6] Hauck, R.D. (1984) Atmospheric Nitrogen Chemistry, Nitrification, Denitrification, and Their Relationships. In: Hutzing, O., Ed., *The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 1. Part C, The Natural Environment and Biogeochemical Cycles*, Springer-Verlag, Berlin, 105-127.
- [7] Ingersoll, T.L. and Baker, L.A. (1998) Nitrate Removal in Wetland Microcosms. *Water Research*, **32**, 677-684. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00254-6)
- [8] Sirivedhin, T. and Gray, K.A. (2006) Factors Affecting Denitrification Rates in Experimental Wetlands: Field and Laboratory Studies. *Ecological Engineering*, **26**, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.001>
- [9] Lu, S., Hu, H., Sun, Y., *et al.* (2009) Effect of Carbon Source on the Denitrification in Constructed Wetlands. *Journal of Environmental Sciences*, **21**, 1036-1043. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62379-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62379-7)
- [10] Boley, A., Müller, W.R. and Haider, G. (2000) Biodegradable Polymers as Solid Substrate and Biofilm Carrier for Denitrification in Recirculated Aquaculture Systems. *Aquacultural engineering*, **22**, 75-85. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00033-9)
- [11] Zhang, M., Zhao, L., Mei, C., Yi, L. and Hua, G. (2014) Effects of Plant Material as Carbon Sources on TN Removal Efficiency and  $N_2O$  Flux in Vertical-Flow-Constructed Wetlands. *Water, Air, & Soil Pollution* **225**, 11. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2181-9>
- [12] Lin, Y.F., Jing, S.R., Wang, T.W., *et al.* (2002) Effects of Macrophytes and External Carbon Sources on Nitrate Removal from Groundwater in Constructed Wetlands. *Environmental pollution*, **119**, 413-420. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00299-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00299-8)
- [13] Chen, X., He, S., Zhang, Y., *et al.* (2015) Enhancement of Nitrate Removal at the Sediment-Water Interface by Carbon Addition Plus Vertical Mixing. *Chemosphere*, **136**, 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.010>
- [14] 王丽丽, 赵林, 谭欣, 等. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. 环境保护科学, 2004, 30(1): 15-18.

- [15] Wen, Y., Chen, Y., Zheng, N., *et al.* (2010) Effects of Plant Biomass on Nitrate Removal and Transformation of Carbon Sources in Subsurface-Flow Constructed Wetlands. *Bioresource Technology*, **101**, 7286-7292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.068>
- [16] Bastviken, S.K., Eriksson, P.G., Premrov, A., *et al.* (2005) Potential Denitrification in Wetland Sediments with Different Plant Species Detritus. *Ecological Engineering*, **25**, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.04.013>
- [17] Hume, N.P., Fleming, M.S. and Horne, A.J. (2002) Plant Carbohydrate Limitation on Nitrate Reduction in Wetland Microcosms. *Water Research*, **36**, 577-584. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00276-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00276-7)
- [18] Ding, Y., Song, X., Wang, Y., *et al.* (2012) Effects of Dissolved Oxygen and Influent COD/N Ratios on Nitrogen Removal in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *Ecological Engineering*, **46**, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.002>
- [19] Saeed, T. and Sun, G. (2011) Enhanced Denitrification and Organics Removal in Hybrid Wetland Columns: Comparative Experiments. *Bioresource Technology*, **102**, 967-974. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.056>
- [20] 武海涛. 人工湿地反硝化脱氮外加碳源选择研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [21] Hamid, A. and Lutfi, H. (2008) Nitrogen and Phosphorus Removal from Effluent of Sewage Treatment Plant Using Water Lettuce (*Pistia stratiotes*). Universiti Teknologi Petronas.
- [22] 常军军, 刘虎, 罗通, 等. 花卉秸秆为碳源的潜流人工湿地对硝氮的去除及其负效应[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5313-5318.
- [23] 刘佳, 沈志强, 周岳溪, 等. 聚己内酯/淀粉共混物和砾石系统反硝化特性[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4): 441-446.
- [24] Shen, Z., Zhou, Y., Hu, J., *et al.* (2013) Denitrification Performance and Microbial Diversity in a Packed-Bed Bioreactor Using Biodegradable Polymer as Carbon Source and Biofilm Support. *Journal of Hazardous Materials*, **250**, 431-438. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.026>
- [25] Shen, Z., Zhou, Y., Liu, J., *et al.* (2015) Enhanced Removal of Nitrate Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source in a Constructed Wetland. *Bioresource Technology*, **175**, 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.006>
- [26] Shen, Z. and Wang, J. (2011) Biological Denitrification Using Cross-Linked Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source and Biofilm Carrier. *Bioresource Technology*, **102**, 8835-8838. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.090>
- [27] 张千. 基于固相反硝化和吸附除磷的低碳源污水脱氮除磷技术研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [28] Hamersley, M.R. and Howes, B.L. (2002) Control of Denitrification in a Septage-Treating Artificial Wetland: The Dual Role of Particulate Organic Carbon. *Water Research*, **36**, 4415-4427. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00134-3)
- [29] Bremner, J.M. and Shaw, K. (1958) Denitrification in Soil. II. Factors Affecting Denitrification. *The Journal of Agricultural Science*, **51**, 40-52. <https://doi.org/10.1017/S0021859600032779>
- [30] Yin, Q., Guo, W., Wen, Y., *et al.* (2015) Effect of COD/N Ratio on Nitrate Removal in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands. Atlantis Press, Atlantis, 1758-1762. <https://doi.org/10.2991/icimm-15.2015.329>
- [31] 王勇, 张宝莉, 刘灏, 等. 人工湿地外加碳源碳溶出及反硝化效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 137-143.
- [32] 张羽, 宋永会, 高红杰, 等. 人工湿地反硝化外加固体碳源选择研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(1): 66-70.
- [33] Zhang, C., Yin, Q., Wen, Y., *et al.* (2016) Enhanced Nitrate Removal in Self-Supplying Carbon Source Constructed Wetlands Treating Secondary Effluent: The Roles of Plants and Plant Fermentation Broth. *Ecological Engineering*, **91**, 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.039>
- [34] Zhi, W. and Ji, G. (2014) Quantitative Response Relationships between Nitrogen Transformation Rates and Nitrogen Functional Genes in a Tidal Flow Constructed Wetland under C/N Ratio Constraints. *Water Research*, **64**, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.035>
- [35] 刘畅, 闻岳, 余雪岑, 等. 碳源自供给潜流人工湿地中反硝化基因与碳氮比的关系[J]. 山东化工, 2017, 46(3): 126-129.
- [36] 杨思璐. 潜流人工湿地启动期反硝化碳源补充技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [37] Ballantine, K.A., Groffman, P.M., Lehmann, J., *et al.* (2014) Stimulating Nitrate Removal Processes of Restored Wetlands. *Environmental Science & Technology*, **48**, 7365-7373. <https://doi.org/10.1021/es500799v>
- [38] 赵秋菊, 陈昱奇. 潮汐流人工湿地不同位置脱氮效果及外加碳源对其影响[J]. 供水技术, 2015, 9(4): 32-37.
- [39] 肖蕾, 贺锋, 梁雪, 等. 添加固体碳源对垂直流人工湿地污水处理效果的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 843-848.
- [40] Fleming, S. and Horne, A.J. (2002) Enhanced Nitrate Removal Efficiency in Wetland Microcosms Using an Episodi-

- ment Layer for Denitrification. *Environmental Science & Technology*, **36**, 1231. <https://doi.org/10.1021/es010967j>
- [41] Cornwell, Cornelissen, W.K., Amatangelo, J.H.C., Dorrepaal, K., Eviner, E., Godoy, V.T., Hobbie, O., Hoorens, S.E., Kurokawa, B. and Perez-Harguindeguy, H.N. (2008) Plant Species Traits Are the Predominant Control on Litter Decomposition Rates within Biomes Worldwide. *Ecology Letters*, **11**, 1065-1071. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x>
- [42] Saeed, T. and Sun, G. (2013) A Lab-Scale Study of Constructed Wetlands with Sugarcane Bagasse and Sand Media for the Treatment of Textile Wastewater. *Bioresource Technology*, **128**, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.052>
- [43] Saeed, T., Afrin, R., Al Mueeed, A., *et al.* (2012) Treatment of Tannery Wastewater in a Pilot-Scale Hybrid Constructed Wetland System in Bangladesh. *Chemosphere*, **88**, 1065-1073. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.055>
- [44] Tee, H.C., Lim, P.E., Seng, C.E., *et al.* (2012) Newly Developed Baffled Subsurface-Flow Constructed Wetland for the Enhancement of Nitrogen Removal. *Bioresource Technology*, **104**, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.032>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)