

人工湿地强化脱氮研究进展

陶 敏^{1,2}, 贺 锋², 王 敏¹, 吴振斌²

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室, 湖北黄石 435003;
2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

[摘要] 脱氮效率不高一直是困扰人工湿地应用的问题之一, 如何强化人工湿地脱氮已成为近年来的研究热点。人工湿地对于氮的去除作用主要有氮的挥发、水生植物的吸收、基质的吸附、沉淀以及微生物的硝化与反硝化作用, 也发现了一些新的脱氮途径, 如短程硝化反硝化、同步硝化反硝化等。从湿地结构改进、运行方式优化、建立湿地组合系统、基质优选、植物筛选、微生物调控等方面详细论述了人工湿地强化脱氮措施及净化效果, 以为人工湿地技术优化与工程应用提供参考。

[关键词] 人工湿地; 脱氮; 强化措施

[中图分类号] X52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2014)03-0006-05

Research progress in the enhancement of nitrogen removing by constructed wetlands

Tao Min^{1,2}, He Feng², Wang Min¹, Wu Zhenbin²

(1. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control & Remediation, School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: Low nitrogen removing efficiency has been one of the problems that disturbs the application of constructed wetlands. How to enhance denitrification by constructed wetlands is one of research hot spots in recent years. Constructed wetlands act on nitrogen removing mainly by way of nitrogen volatilization, absorption of aquatic plants, adsorption of substrate, precipitation, and microbial nitrification and denitrification. Moreover, some new routes of denitrification have also been found, such as short-range nitrification and denitrification, synchronous nitrification and denitrification, etc. Measures to enhance constructed wetlands nitrogen removal and purification effect are expounded in detail, including improvement of wetlands structure, optimization of operating conditions, establishment of combined system with other types of constructed wetlands, optimization of substrates and plants, microorganisms regulation, etc., so as to provide reference for the optimization and engineering application of constructed wetland technique.

Key words: constructed wetland; denitrification; enhancement measures

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51178452); 湖北省杰出青年基金项目(2010CDA093); 国家科技支撑计划(2012BAJ21B03-04); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101007-005); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20114401); 湖北理工学院引进人才项目(11yjz08R)

[30] Chung B Y, Cho J Y, Song C H, et al. Degradation of naturally contaminated polycyclic aromatic hydrocarbons in municipal sewage sludge by electron beam irradiation[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 81(1): 7-11.

[31] 孙永亮, 李欣, 王杰, 等. 电子束辐照技术在剩余污泥处理中的应用[J]. 原子核物理评论, 2013, 30(1): 72-78.

[32] 包伯荣, 吴明红, 罗文芸, 等. 辐射技术在废水及污泥处理中的应用[J]. 核技术, 1996, 19(12): 759-764.

[33] 胡媛, 胡湖生, 杨明德, 等. 铜氰溶液的电子束辐照降解[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(1): 31-34.

[34] 吴季兰, 戚生初. 辐射化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 6-20.

[35] 胡俊, 王建龙, 程荣. γ -辐照- O_3 氧化联合作用下 4-氯酚的降解[J]. 中国科学: B 辑, 2005, 35(6): 520-525.

[36] 李坤豪, 李召朋, 赵惠东, 等. 辐照技术处理丙烯腈生产中的废水研究[J]. 河南科学, 2010, 28(6): 666-669.

[作者简介] 陈建平(1971—), 博士, 副教授. E-mail: cjplgd@126.com. 通讯联系人: 张会杰, E-mail: mizh@ihep.ac.cn.

[收稿日期] 2013-12-02(修改稿)

人工湿地具有处理效果好、投资省、管理简单、应用方式灵活及美化环境等优点,已广泛应用于生活污水、工业废水、垃圾渗滤液的治理以及受污染湖泊水体的修复^[1-2]。据统计,美国有1 000多座人工湿地正在运行,欧洲有5 000多座各类人工湿地,我国人工湿地工程数量达到400多项^[2-3]。然而,运行中的许多人工湿地虽然对总悬浮颗粒物、有机物的去除率较高,但对氮的去除率却较低^[1]。因此,关于强化人工湿地脱氮已成为近年来的研究热点。

人工湿地对于氮的去除作用包括氮的挥发、水生植物的吸收、基质的吸附、沉淀以及微生物的硝化与反硝化作用;其中微生物的硝化与反硝化作用被认为是湿地脱氮的主要途径^[4]。近期研究学者也发现了一些新的脱氮微生物,如厌氧氨氧化菌、好氧反硝化菌等,并提出了短程硝化反硝化、同步硝化反硝化等脱氮新途径,这为湿地强化脱氮研究提供了新的方向。

1 湿地结构改进

针对水平潜流湿地溶解氧浓度低、脱氮效率不高的问题,K. Seidel^[5]首次提出了垂直流系统,并将其进一步设计为以卵石代替土壤作为基质的垂直流湿地^[6]。与水平流相比,垂直流湿地布水更均匀、充氧更充分,有利于好氧微生物的生长和硝化反应的进行,因而对氮的去除有了较大提高。1995年,吴振斌等^[7]构建了下行流-上行流相结合的复合垂直流人工湿地,该湿地较其他同类型人工湿地具有更高的净化能力。

为了进一步提高湿地脱氮效果,研究学者在垂直流人工湿地中插装竖直通气管,并采用慢灌快排方式使系统充分换气,极大提高了对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果^[8];而在水平潜流人工湿地中采用铺设分层通气管,再辅以连续进水、间歇出水的方式实现了自动增氧,显著提高了湿地的净化能力和抗冲击负荷能力^[9]。由于通气管向周围介质进行氧扩散的范围有限,因而又改进为在湿地底部进行强化曝气,由此明显改善了湿地的缺氧环境,提高了对有机物和氮的去除^[10-12];研究还发现,在湿地后端强化曝气净化效果更具优势,且能耗较低^[13]。另外,强化曝气可使湿地具有较理想的水力特性^[14],尤其冬季时可显著增强基质微生物的活性^[10]。

同时,为了满足湿地系统反硝化反应所需的缺氧环境和节约能源的要求,将其中的连续曝气改进

为间歇曝气,可显著降低出水中硝态氮的浓度,提高对总氮的去除^[15-16]。然而,关于最佳停曝时间比却因其影响因素较多(如水力负荷、有机物浓度、总氮浓度等),而得出了差别较大的结论^[15,17]。Liyu Zhang等^[18]采用一种限制性强化曝气方式,即溶解氧浓度达到设定值便停止曝气,这很好地解决了停曝时间比难以设定的问题,同时也节约了曝气费用。

2 运行方式优化

人工湿地最初运行方式常采用连续式进水,后来逐步得到优化,出现许多新的运行方式,如干湿交替、多点进水、出水回流等。干湿交替最早源于土地快速渗滤系统,之后被引进到人工湿地系统,其目的是减缓堵塞和加强复氧^[19]。后来,又被改进为间歇式进水,不仅促进了湿地复氧和硝化作用的发生,而且大大提高了湿地的水力负荷^[20]。同时,也出现了一些类似运行方式的湿地系统,如潮汐流人工湿地^[21]、序批式人工湿地等^[22]。

研究表明,多点进水可有效防止湿地前段堵塞,使植物生长均匀,增大溶解氧浓度,提高湿地脱氮效果^[23]。另外,出水回流也有利于提高湿地脱氮效果^[24-25],且脱氮率随着回流比的增加而增加^[26],当湿地出水按1/3回流比回流至湿地进水口时,TN去除率可提高约20%^[27]。

3 建立湿地组合系统

3.1 湿地串联

前期研究结果表明,垂直流湿地具有较好的硝化能力,而水平流湿地即使在碳氮比很低的情况下反硝化作用也很好,因此有研究学者分析了垂直流与水平流湿地不同串联方式下的净化效果,对比研究后推荐水平流-垂直流-垂直流-水平流湿地串联系统,该串联系统不仅具有较好的脱氮效果,而且有效防止了垂直流湿地的堵塞问题^[28]。同时,研究也证实了下行垂直流-表面流串联人工湿地的脱氮率可达70%以上^[29]。采用二级串联潜流人工湿地处理污水时,不仅表现出良好的去污效果,而且湿地串联有利于保持冬季时出水水质稳定^[30]。

另外,如复合垂直流人工湿地^[7]、金字塔式人工湿地^[31]、梯田式人工湿地^[32]等都可看作是湿地串联的一种形式。

3.2 湿地与其他污水处理工艺组合

近年来,人工湿地与其他污水处理工艺的结合

显著扩大了其应用范围,可以说这是人工湿地技术快速发展的一个重要举措。目前,已出现许多新型组合污水处理系统,如动态膜生物反应器-人工湿地组合系统(DMBR-IVCW)^[33]、生物膜-人工湿地组合工艺(BBFR-IVCW)^[34]、SMBR-IVCW 复合系统^[35]、内外循环厌氧反应器-序批式生物膜反应器-人工湿地组合工艺(IOC-SBBR-CW)^[36]、生物接触氧化-复合人工湿地组合工艺^[37]等,它们被广泛应用于生活污水、高浓度含氮污水、猪场废水、工业废水的处理,结果显示组合工艺处理效果明显优于单一工艺,且处理效果稳定、抗冲击负荷强。

4 基质优选

湿地基质可通过过滤、吸附、沉淀而去除污水中的部分氮。研究发现,沸石、陶瓷滤料和蛭石对氮具有较好的吸附效果^[38];进一步研究表明,与单一基质和单一粒径相比,分层粒径级配沸石的脱氮效果更好,而生物陶粒、沸石和无烟煤组合基质综合去污能力更强^[39]。另外,研究发现粉煤灰和空心砖粉块组合基质对氨氮的去除率可达 89%^[40],但基质保持对氮的高效吸附时间有限,仅在湿地运行初期效果显著^[22]。

5 植物筛选

湿地植物可摄取污水中的无机氮,然后通过植物收割从系统中去除。一般情况下,植物吸收氮量约占总去除氮量的 8%~16%,植物吸收在处理低负荷污水时才有较大的作用^[41]。植物的另一个重要功能是向根际输氧,并且通过根系向外部扩散,在其周围形成一个好氧微环境,有利于硝化作用;研究也证实了植物湿地对 NH_4^+-N 的去除率显著高于无植物湿地^[42]。W. Armstrong 等^[43]首次发现了有植物的系统内氧的浓度皆高于无植物的系统;随后研究学者发现不同植物根系气体交换容量、泌氧速率存在差异,根系不同部位也有明显不同^[44-45]。另外,研究还发现植物根系的输氧作用促进了基质微生物的生长和繁殖^[46]。因此,在植物筛选时,应尽量选择根系发达、气孔大、输氧能力强的植物,如芦苇、美人蕉等^[47]。

6 微生物调控脱氮

6.1 调控硝化、反硝化菌脱氮

硝化反应是在有氧状态下由硝化细菌、亚硝化细菌完成的,因而可通过改善湿地内溶解氧水平而强化这类微生物脱氮,以上讨论的设置通气管、强化

曝气、间歇式运行、植物根系复氧等强化措施正是通过改善硝化细菌的脱氮性能来提高湿地的脱氮效果。

反硝化反应是在缺氧条件下由反硝化细菌完成的,同时还需要充足的碳源作为电子受体。因而,常采用投加碳源强化反硝化细菌脱氮,可分为液体碳源和固体碳源两种。常用液体碳源有甲醇、葡萄糖、果糖、乙酸等。R. M. Gersberg 等^[48]最早发现向湿地中补充甲醇,湿地脱氮率可达 95%。对于碳氮比较低的污水,投加碳源可显著增强湿地的反硝化效果^[49-50],且当系统中 BOD_5/TN 大于 3 时被认为碳源充足^[51]。另外,利用通气管直接向湿地内部投加碳源,其反硝化效果明显优于向进水中投加的方式,且节省了碳源投加量^[52]。固体碳源主要为纤维素类物质,相比液体碳源其价格低廉,且具有缓释作用,影响效果更长久。目前,已发现的适宜于作为反硝化补充的固体碳源有香蒲叶^[53]、麦秆^[54]、芦苇竿^[55]等。

6.2 强化特异微生物脱氮

厌氧氨氧化菌在厌氧条件下以 CO_2 作为碳源,可将亚硝态氮与氨氮作为底物代谢产生氮气^[56]。这种反应不需要氧气和有机物的参与,且几乎不产生 N_2O ,避免了传统硝化-反硝化反应产生的温室气体排放。范改娜等^[57]证实了人工湿地中存在厌氧氨氧化菌,且它们对于湿地中氮的转化有着重要作用。然而,由于厌氧氨氧化菌培养条件苛刻,其用于强化湿地脱氮还有待研究。

好氧反硝化菌可在有氧条件下进行反硝化作用,从而可实现同步硝化反硝化脱氮。L. A. Robertson 等^[58]首次分离出 1 株好氧反硝化菌(脱氮副球菌, *Paracoccus denitrificans*),该菌株具有同步异养硝化与好氧反硝化的功能。王莹等^[59]从增氧型人工湿地中分离出 1 株高效好氧反硝化菌,脱氮速率高达 $20.58 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 。同时,研究显示包埋异养硝化-好氧反硝化菌的多孔填料具有良好的脱氮性能^[60-61],这为强化湿地微生物脱氮提供了研究基础。

7 研究展望

人工湿地是一种集环境效益、经济效益与社会效益于一体的污水处理技术,提高人工湿地净化效果,扩大人工湿地应用范围,对我国水环境污染治理和环境保护具有重要的意义。今后,人工湿地强化脱氮的发展方向将主要集中在以下几个方面:(1)研发新型填料,如可光催化填料、高吸附性能填料;(2)加

大与其他污水处理技术的结合,开发人工湿地新型组合工艺;(3)利用生物基因技术改良湿地植物或微生物,提高其脱氮性能;(4)积极探索湿地脱氮新途径,筛选高效脱氮微生物,深入开展其纯培养、固定化等研究。

参考文献

- [1] Kadlec R H, Wallace S D. Treatment wetlands [M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2008: 8-11.
- [2] Zhang Ting, Xu Dong, He Feng, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010 [J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 189-197.
- [3] USEPA. Constructed treatment wetlands [M]. United States Environmental Protection Agency, 2004: EPA 843-F-03-013.
- [4] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands [M] // Vymazal J, Brix H, Cooper P F, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 182-190.
- [5] Seidel K. Abgau von *baSterium coli* durch hoehere wasserpflanzen [J]. Naturwiss, 1964, 51: 395.
- [6] Kadlec R H. Detention and mixing in free water wetlands [J]. Ecological Engineering, 1994, 3: 345-380.
- [7] 吴振斌, 雷志洪. 一种污水处理方法及装置: CN, 00114693.9 [P]. 2000-07-11.
- [8] Green M, Friedler E, Safrai I. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump [J]. Water Research, 1998, 32(12): 3513-3520.
- [9] 孙亚兵, 冯景伟, 田园春, 等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 404-408.
- [10] Ouellet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, et al. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate [J]. Ecological Engineering, 2006, 27(3): 258-264.
- [11] 鄢璐, 王世和, 钟秋爽, 等. 强化供氧条件下潜流型人工湿地运行特性 [J]. 环境科学, 2007, 28(4): 736-741.
- [12] Tao Wendong, Wang Jing. Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 836-842.
- [13] 任拥政, 章北平, 海本增. 局部充氧提高波形潜流人工湿地除污效能的研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(11): 28-31.
- [14] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(3): 748-754.
- [15] Nivala J, Hoos M B, Cross C, et al. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland [J]. Science of Total Environment, 2007, 380(1/2/3): 19-27.
- [16] Tang Xianqiang, Huang Suiliang, Scholz M, et al. Nutrient removal in pilot-scale constructed wetlands treating eutrophic river water: assessment of plants, intermittent artificial aeration and polyhedron hollow polypropylene balls [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, 197(1/2/3/4): 61-73.
- [17] Tao Min, He Feng, Xu Dong, et al. How artificial aeration improved the sewage treatment of an integrated vertical-flow constructed wetland [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2010, 19(1): 181-189.
- [18] Zhang Lieyu, Zhang Lan, Liu Yongding, et al. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater [J]. Desalination, 2010, 250(3): 915-920.
- [19] 汪民, 吴永锋, 钟佐, 等. 污水快速渗滤土地处理 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-12.
- [20] 贺锋, 吴振斌, 付贵萍, 等. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 279-283.
- [21] Austin D C, Lohan E, Verson E. Nitrification and denitrification in a tidal vertical flow wetland pilot [C] // Proceedings of the water environment technical conference 2003. Los Angeles, California: Water Environment Federation, 2003: 333-357.
- [22] 王晟, 徐祖信, 李怀正. 潜流湿地处理生活污水时的强化方法 [J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2432-2438.
- [23] 鄢璐, 王世和, 钟秋爽, 等. 人工湿地强化运行措施研究 [J]. 中国工程科学, 2007, 9(10): 88-90.
- [24] He Liansheng, Liu Hongliang, Xi Beidong, et al. Effects of effluent recirculation in vertical-flow constructed wetland on treatment efficiency of livestock wastewater [J]. Water Science & Technology, 2006, 54(16): 137-146.
- [25] 张勤, 周兴伟, 周健. 强化生物絮凝/三级人工湿地处理高浓度生活污水 [J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 1-4.
- [26] 崔理华, 郑离妮, 楼倩, 等. 不同回流比对无植物垂直流人工湿地除氮效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1170-1174.
- [27] 张涛, 宋新山, 严登华, 等. 不同回流位置对潜流人工湿地氮分布及去除效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(10): 2204-2208.
- [28] Cooper P. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment system [J]. Water Science & Technology, 1999, 40(3): 1-9.
- [29] 刘峰, 梁文艳, 隋丽丽, 等. 垂直流-表流串联人工湿地处理生活污水的研究 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(5): 12-15.
- [30] 帖靖玺, 钟云, 郑正, 等. 二级串联人工湿地处理农村污水的脱氮除磷研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(1): 88-96.
- [31] 夏世斌, 张召基. 一种金字塔型人工湿地污水处理方法: CN, 200610124991.X [P]. 2006-11-09.
- [32] 詹鹏, 王湘英, 朱建林, 等. 梯田式人工湿地处理生活污水的初步研究 [J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 27-30.
- [33] 贺锋, 孔令为, 夏世斌, 等. DMBR-IVCW 系统处理生活污水的研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(B06): 367-370.
- [34] 贺锋, 曹湛清, 夏世斌, 等. 生物膜-人工湿地组合工艺处理城镇生活污水的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1655-1660.
- [35] Xiao Enrong, Liang Wei, He Feng, et al. Performance of the combined SMBR-IVCW system for wastewater treatment [J]. Desalination, 2010, 250(2): 781-786.

- [36] 万金保,陈琳,吴永明,等. IOC—SBBR—人工湿地组合工艺在猪场废水处理中的应用[J]. 给水排水, 2011, 37(7): 47-51.
- [37] 朱琼璐,楼倩,崔理华,等. 生物接触氧化—复合人工湿地组合工艺对工业园区污水的处理效果研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(1): 37-41.
- [38] 武俊梅,王荣,徐栋,等. 垂直流人工湿地不同填料长期运行效果研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 633-638.
- [39] 武俊梅,张翔凌,王荣,等. 垂直流人工湿地系统基质优化级配研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1227-1232.
- [40] 鲁妮,章北平,刘真,等. 人工湿地处理低浓度生活污水的填料优化级配[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(1): 81-84.
- [41] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(3): 11-17.
- [42] Aiyuk S, Amoako J, Raskin L, et al. Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept[J]. Water Research, 2004, 38(13): 3031-3042.
- [43] Armstrong W. Root aeration in wetland condition [M]//Hook D D, Crawford R M. Plant life in anaerobic environments, Ann Arbor: Ann Arbor science, MI, 1978: 269-297.
- [44] Bendix M, Torbjerg T, Brix H. Internal gas transport in *Typha latifolia* L. and *Typha angustifolia* L. I. Humidity-induced pressurization and convective throughflow[J]. Aquatic Botany, 1994, 49(2/3): 75-89.
- [45] 邓泓,叶志鸿,黄铭洪. 湿地植物根系泌氧的特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007(6): 69-76.
- [46] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 179-184.
- [47] 黄娟,王世和,雒维国. 植物光合特性及其对湿地 DO 分布、净化效果的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1828-1832.
- [48] Gersberg R M, Elkins B V, Coldman C R. Nitrogen removal in artificial wetlands[J]. Water Research, 1983, 17(9): 1009-1014.
- [49] Lin Yingfeng, Jing Shuren, Wang T W, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. Environmental Pollution, 2002, 119(3): 413-420.
- [50] Rustige H, Ndde Erwin. Nitrogen elimination from landfill leachates using an extra carbon source in subsurface flow constructed wetlands[J]. Water Science and Technology, 2007, 56(3): 125-133.
- [51] 杨思璐. 潜流人工湿地启动期反硝化碳源补充技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [52] 余丽华,贺锋,徐栋,等. 碳源调控下复合垂直流人工湿地脱氮研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3300-3305.
- [53] Ingersoll T L, Baker L A. Nitrate removal in wetland microcosms[J]. Water Research, 1998, 32(2): 667-684.
- [54] 陈云峰,文辉,张彦辉. 不同固态碳源用于反硝化去除污水处理厂尾水中硝态氮的研究[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 140-143.
- [55] 赵联芳,朱伟,高青. 补充植物碳源提高人工湿地脱氮效率[J]. 解放军理工大学学报, 2009, 10(6): 644-649.
- [56] Zhu Guibing, Jetten M S M, Kuschik P, et al. Potential roles of anaerobic ammonium and methane oxidation in the nitrogen cycle of wetland ecosystems[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(4): 1043-1055.
- [57] 范改娜,祝贵兵,王雨,等. 河流湿地氮循环修复过程中的新型功能微生物[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1558-1563.
- [58] Robertson L A, Vanniell E W J, Torremans R A M, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. Applied & Environmental Microbiology, 1988, 54(11): 2812-2818.
- [59] 王莹,周巧红,梁威,等. 人工湿地高效好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1193-1198.
- [60] 王磊,汪苹,刘健楠,等. 固定异养硝化—好氧反硝化菌脱氮能力的研究[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2010, 28(1): 18-23.
- [61] 苏俊峰,黄廷林,刘燕,等. 异养型同步硝化反硝化处理微污染水源水[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 141-143.

[作者简介] 陶敏(1982—), 博士, 讲师。电话: 15172014620, E-mail: tmiii@163.com。通讯联系人: 贺锋, 博士, 研究员。E-mail: hefeng@ihb.ac.cn。

[收稿日期] 2013-11-07(修改稿)