

生物生态集成技术去除村镇生活污水中总氮及化学需氧量研究

李金中, 李学菊

(天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要:农村生活污水具有排放分散,以有机耗氧污染和氮、磷污染为主,生化降解性好,氮、磷含量高等特点,其处理要求低投资、低能耗、低运行费、维护简单,因而现有技术难以适应。为此,采用物理沉降、固定化微生物、太阳能增氧和人工湿地等多项技术优化集成,构建出一个高效低耗的链式生物生态净化系统,并在天津市蓟县刘相营村建成了日处理能力为 $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的农村生活污水处理示范工程。通过近一年的监测结果表明,该集成工艺具有非常高的耐冲击负荷能力和净化效果:出水 TN 浓度稳定在 $0.82 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,去除率达到 $90.08\% \sim 98.68\%$;出水 COD_{Cr} 浓度稳定在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,去除率达到 $84.53\% \sim 96.74\%$ 。该示范工程截污减排效果明显,而且管理维护方便、能耗小、运行费用低。

关键词:生活污水处理;固定化微生物;人工湿地;生物生态集成技术;TN 去除率;COD 去除率

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)06-1238-06 doi:10.11654/jaes.2013.06.022

Biological and Ecological Integration Technology for Removing TN and COD from Rural Domestic Sewage

LI Jin-zhong, LI Xue-ju

(Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Although wastewater treatment technique had been developed for many years, there are few successful projects in treating rural sewage water were reported. It's because of the variable collected wastewater quantity due to the scatter distributed discharge sources, as well as the requirements of low cost in building, running and maintaining the treatment system. However, the sewage water in rural area has the characteristics of high COD, high nitrogen and phosphorus and easily be biodegraded. According to those characteristics, in this paper we introduced a high efficiency and low cost treatment system which integrated the techniques of physical settlement, immobilized microorganism, solar energy driven aeration and artificial wetland linearly. Correspondingly a demonstrate project was constructed in Liu Xiangying Village with the capacity of 4000 m^3 per day. After be treated by this system, the outlet water had steady nitrogen concentration around $0.82 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and COD_{Cr} concentration was no more than $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The rejection of TN and COD_{Cr} might reach $90.08\% \sim 98.69\%$ and $84.53\% \sim 96.74\%$ respectively. The cost of cleaning 1 m^3 sewage water was no more than 0.15 yuan RMB. This system could reach the requirements of easy maintained, low cost and high efficiency and was suitable for treating the rural area sewage water.

Keywords: domestic sewage treatment; immobilized microorganism; artificial wetland; biological and ecological integration technology; removal of TN; removal of COD

随着农村人口的快速增长和农村城镇化建设速度的加快,农村水资源和水生态环境面临着越来越大

的压力^[1-2]。农村人口居住分散,地域面积广,排水系统及生活污水净化系统不完善,生活污水未经处理直接排放,已成为水环境污染的重要原因。

农村生活污水水质具有以有机耗氧和氮、磷污染为主,可生化降解性好的特点,但排放具有面广、分散、难以集中收集的特点,同时要求处理工程低投资、低能耗、低运行费、维护简单,农村污水处理工作难度较大,在我国尚属起步和探索阶段。目前应用的技术

收稿日期:2012-11-13

基金项目:天津市科技支撑计划重点项目(12ZCZDSF01300);水利部公益性行业科研专项经费项目(200801100);水利部科技推广计划项目(TG1149);农业科技示范推广项目(201101034);水利部公益性行业科研专项经费项目(201101060)

作者简介:李金中(1970—),男,湖南人,博士,正高级工程师,主要研究方向为水环境治理与水生态修复。E-mail:sbqqqk@sohu.com

主要有厌氧沼气池技术、土地渗滤技术、固定化微生物技术、人工湿地技术。厌氧沼气池技术将污水处理与生物质能源回用有机结合,实现了污水的资源化^[3],但该技术目前出水仍难以达到国家排放标准的要求。土壤渗滤系统包括慢速渗滤系统和快速渗滤系统,是土地处理技术中应用最广泛的一种,该技术具有处理效果好、投资低的优点^[4],但也存在占地面积大、冬季不能运行、长期运行易堵塞等不足。固定化微生物技术具有微生物密度高、反应速度快、微生物流失少、产物分离容易、处理设备小型化等特点^[5-7],该技术的主要缺点是对 N、P 去除效果较差,出水与地表水水质标准对照仍有一定的差距,难以实现资源再生利用。人工湿地由人工基质、水生植物和附着在基质及植物根区的微生物组成,是一种独特的“基质-植物-微生物”生态系统^[8-10],人工湿地在相同面积条件下处理能力大幅度提高,能够克服天然湿地比较脆弱的缺点,具有负荷率高、占地面积小、效果可靠、耐冲击负荷等优点^[11-13],人工湿地技术在处理生活污水方面的应用需要解决的关键问题是必须采取有效措施或预处理方法防止湿地内部的堵塞。综上所述,现有污水处理技术用于农村生活污水处理,在运行和管理方面尚存在诸多现实问题^[14-15],难以适应农村生活污水处理的要求。

鉴于此,本文将物理沉降、固定化微生物、太阳能增氧和人工湿地等多项技术优化集成,构建出一个高效的链式生物生态净化系统,实现对村镇生活污水的高效低耗处理,并在天津蓟县刘相营村建立了示范工程。通过示范工程长达 1 年的监测,总结了该技术对生活污水中总氮和化学需氧量的实际净化效果。

1 材料与方法

生物生态集成技术由三格式沉砂拦污池、固定化微生物滤池、太阳能增氧池和人工湿地 4 个功能单元组成,空间布局上采用串联方式,沉砂过滤池位于系统的最前端,固定化微生物滤池安排在沉砂过滤池的下游,太阳能增氧池位于固定化微生物滤池的下游,人工湿地是处理系统的核心,面积为 8000 m²,设置在系统的最末端。工艺流程见图 1。污水依次流经沉砂

拦污池、固定化微生物滤池、太阳能增氧池和人工湿地,4 个功能单元既保持在空间上的相对独立性,功能上又相互联系、互为补充,形成功能一体化、园艺景观化、自然生态化的生物通道,既充分发挥各单项技术的优势,又使 4 项技术形成优势互补,发挥多技术的协同净化的作用。

沉砂拦污池由 3 个相互连通的密封沉淀池组成,生活污水由进水管进入第一池后依次顺流至第三池,生活污水中的粪便及其他漂浮物、悬浮物被拦截在前二格沉淀池内,进入第三池的废水基本上已经不含寄生虫卵和漂浮物及悬浮物,达到了固液分离的目的,中层清液进入下一级处理单元。

生活污水中氮、磷等污染物多以有机形态(如蛋白质类、尿素、生物细胞体等)存在于水体中,不利于后续湿地系统的快速降解,需通过厌氧环境将高分子有机物降解为低分子有机物,将有机氮降解为无机氮,以提高后续湿地处理系统对污染物的去除效率。固定化微生物滤池是装有填料的生物反应器,在滤料表面有以生物膜形态生长的微生物群体,在滤料的空隙中则截留了大量悬浮生长的微生物,废水通过滤料层时,有机物被截留,吸附及代谢分解,最后达到稳定化。同时,固定化微生物滤池的密闭厌氧环境,蛋白性有机物通过厌氧发酵而分解,并产生氨等物质,具有杀灭寄生虫卵及病菌的作用。

生活污水经厌氧生物滤池处理后,水中溶解氧含量极低,处于严重亏氧状态。为提高后续湿地处理工艺中好氧微生物的活性,需通过人工措施增加污水中的溶解氧含量。太阳能曝气机的主要原理是通过太阳能转换装置将太阳能转换为电能,为曝气机提供充足的能源,避免了对不可再生能源的消耗和环境污染。太阳能曝气装置主要构件包括太阳能板、蓄电池、曝气机及与之连接的曝气管,太阳能板连接蓄电池,蓄电池连接曝气机,曝气机连接伸入水中的曝气管。

人工湿地结构采用波式流人工湿地,波式流人工湿地处理单元由人工基质、水生植物和附着在基质及植物根区的微生物组成,是一种独特的“基质-植物-微生物”生态系统。该系统中,植物扎根于基质床的表层,植物根系和填料为微生物提供附着的载体^[16-17],



图 1 生物生态集成技术工艺流程示意图

Figure 1 The flow chart of biological and ecological integration technology

同时植物根系为微生物提供氧源,在靠近根区的填料层形成好氧区,而在远离根区的填料层形成厌氧或兼氧区,水体以波浪式流经填料表层和底层时,反复经过好氧、厌氧以及硝化和反硝化的过程,从而实现有机污染物和氮磷的高效去除^[18-20]。与自然湿地相比,波式流人工湿地在相同面积条件下处理能力大幅度提高,具有负荷率高、占地面积小、效果可靠、耐冲击负荷等优点,而且水流在填料表层以下流动,不易滋生蚊蝇。湿地表面种植水质净化能力强、景观效果好的水生植物,在净化水质的同时,可收到良好的景观效果。

示范工程位于天津市蓟县穿芳峪乡刘相营村,收水范围包括刘相营、大辛庄、小辛庄、姚白庄4个村庄,汇水区面积2.25 km²,人口4010人,污水处理规模为4000 m³·d⁻¹。不降雨时污水主要来源为生活污水和分散的养殖废水,实际处理水量为400~500 m³·d⁻¹;降雨时处理污水包括生活污水、分散养殖废水和初期雨水,实际处理水量受降雨量影响而变化,最大不超过4000 m³·d⁻¹,即在降雨径流小于4000 m³·d⁻¹时,雨水径流全部进入处理系统处理,此时实际处理水量为雨水径流量和污水量之和;当降雨径流大于4000 m³·d⁻¹时,水体自流溢出,不进入处理系统,此时处理水量为4000 m³·d⁻¹。工程于2009年12月开始建设,

2010年9月26日开始进行水质监测。共设置了8个监测点,其中沉砂拦污池进水口(1#)、沉砂拦污池出水口(2#)、固定化微生物滤池出水口(3#)、太阳能增氧池出水口(4#)、人工湿地出水口(8#)各设一个监测点,并在人工湿地内部沿水流方向间隔100 m左右增设一个监测点,共增设3个监测点(5#、6#、7#),监测点布置见图2。

监测频率为每周取样一次,总氮(TN)分析采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,仪器为UV-7504c紫外分光光度计(上海)。化学需氧量(COD_{Cr})采用催化消解-分光光度法,测定仪器为COD快速测定仪(HE-9906,德国)。根据各监测点污染物浓度,分别计算各处理单元及整体工艺对TN、COD_{Cr}的去除率。去除率的计算公式如下:

$$P = \frac{C_{\text{进水}} - C_{\text{出水}}}{C_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为TN、COD_{Cr}去除率,%; $C_{\text{进水}}$ 、 $C_{\text{出水}}$ 分别为进、出水口处的TN、COD_{Cr}浓度,mg·L⁻¹。

2 结果与讨论

各处理单元进、出水TN、COD_{Cr}浓度变化分别如图3、图4所示。

由图3可以看出,处理工程进水TN的浓度变化

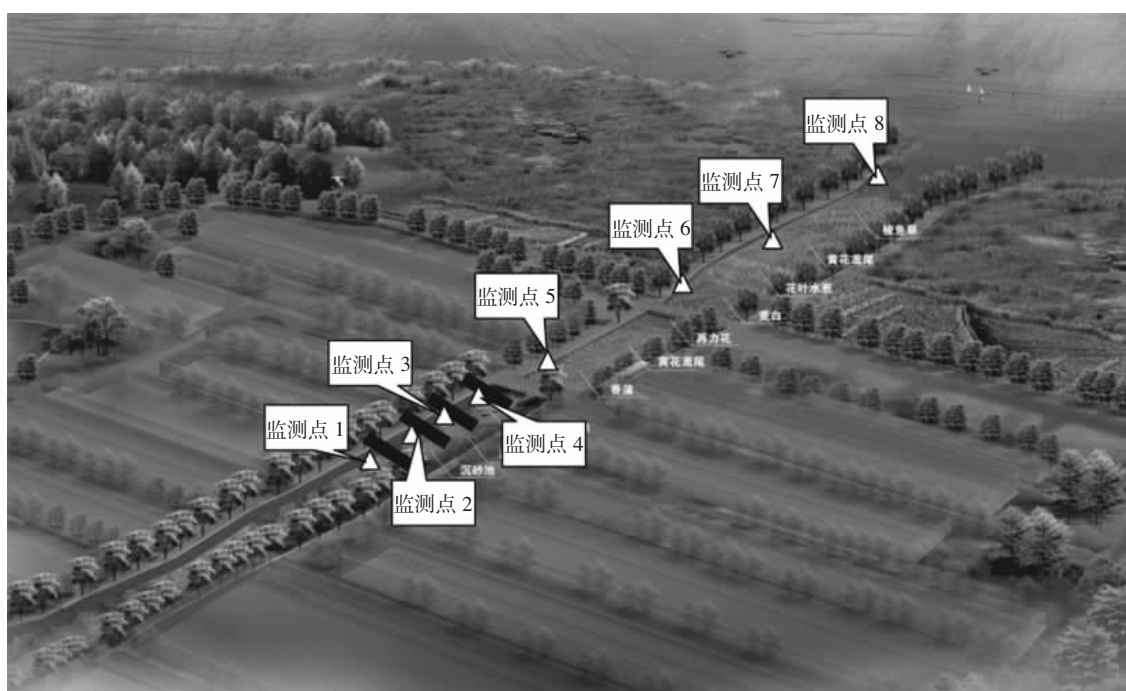


图2 监测点位布置图

Figure 2 The layout map of monitoring situation

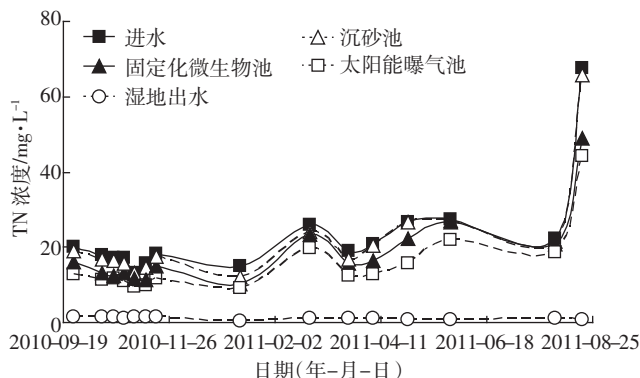
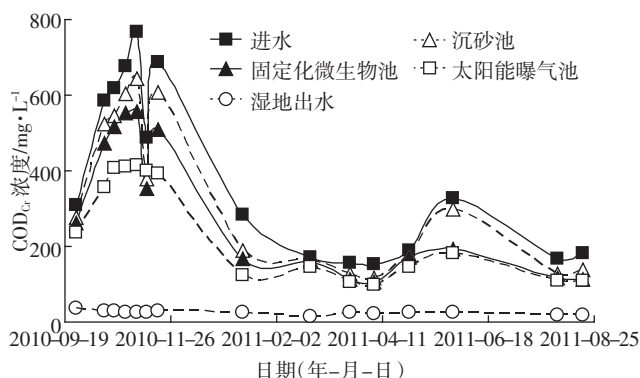


图3 各处理单元进、出水 TN 浓度变化

Figure 3 The concentration of TN at inlet section and outlet section of each treatment unit

图4 各处理单元进、出水 COD_{Cr} 浓度变化Figure 4 The concentration of COD_{Cr} at inlet section and outlet section of each treatment unit

幅度较大,最大值达到 $67.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最小值为 $13.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。造成进水 TN 浓度波动的主要原因是由于示范工程进水为生活污水和初期雨水的混合废水,而初期雨水水质不稳定,污染物浓度受降雨量影响较大。在进水 TN 浓度变化较大的情况下,出水 TN 浓度相对较为稳定,说明本集成工艺对生活污水处理具有非常高的耐冲击负荷能力,系统最终出水稳定在 $0.82 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,达到地表水Ⅳ类水质标准。

由图4可以看出,处理工程进水 COD_{Cr} 浓度变化幅度较大,最大值为 $768 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最小值为 $154 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。造成进水 COD 浓度波动的主要原因与 TN 相同,也是由于示范工程进水为生活污水和初期雨水的混合废水,而初期雨水水质不稳定,污染物浓度受降雨量影响较大;而且工程运行初期,由于沟渠内积存的大量粪便浸泡废水影响,进水 COD 浓度明显高于一般生活污水,随着工程不断运行,沟渠内粪便浸泡废水影响逐渐减小,进水 COD 浓度呈下降的趋势。在进水

COD_{Cr} 浓度变化较大的不利条件下,出水 COD_{Cr} 浓度相对稳定,系统最终出水稳定在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,达到地表水Ⅳ类标准的要求。

从 TN、COD_{Cr} 浓度沿程变化趋势来看,在湿地单元内的下降幅度大,而在沉砂拦污池、固定化微生物滤池和太阳能曝气池内虽然有不同程度的下降,但下降幅度相对较小,说明对 TN、COD_{Cr} 起最终去除作用的主要是湿地单元,其他单元主要是起辅助作用。

沉砂池、固定化微生物滤池和太阳能曝气池虽然对 TN、COD_{Cr} 的最终去除量较小,但在系统中所起的作用也是不可或缺的。其主要作用是将生活污水中的大分子有机物转化为小分子有机物,将有机氮转化为氨氮及硝酸盐氮,从而提高湿地单元对 COD_{Cr} 和 TN 的最终去除。而且沉砂拦污池内 COD_{Cr} 和 TN 也有一定的降低,说明沉砂拦污池除具有物理沉降作用外,也有一定硝化和反硝化功能。但该处理单元水力停留时间较短,微生物量较少,对溶解态污染物的去除能力相对较弱,污染物浓度下降幅度相对较小。

固定化微生物滤池主要是利用兼氧、厌氧性微生物对水体中污染物进行不完全降解,这种不完全降解对提高后续湿地单元对污水中氮污染物的降解作用是极其有利和必要的。固定化微生物滤池中部分氮污染物通过氨的挥发以及硝态氮的反硝化作用得以去除,表现出该单元内 TN 浓度有小幅度的下降。另外,该单元内部分有机污染物通过厌氧菌降解变成 CH₄ 从水体中去除,表现出 COD_{Cr} 浓度也有小幅度的下降。固定化微生物滤池采用厌氧、兼氧形式,极大地减少污水处理过程中的能源消耗,起到节能降耗的效果。

太阳能增氧池的主要作用是补充和提升污水中溶解氧的浓度,为后续湿地单元中好氧微生物提供氧源。本集成技术一方面采用太阳能作为增氧的动力,避免了对不可再生能源的消耗;另一方面采用低强度的微孔曝气技术,增加了曝气过程中对氧的利用率,降低了太阳能的功率,最大限度地节约建设成本。

人工湿地对 TN 的去除包括植物的吸收,也包括微生物的硝化和反硝化作用^[21-22]。一方面,氮是植物生长所必需的营养元素,植物通过同化作用将污水中的氮转化为自身的组成物质,并通过植物体的收割最终带出水体^[23-24];另一方面,湿地中填料表面和植物根系为微生物提供了巨大的吸附界面,在填料表面和植物根区形成高效的微生物膜,将有机污染物分解为 CO₂ 和 H₂O,对 COD_{Cr} 起最终去除作用。同时,湿地单元中同时存在大量的硝化细菌和反硝化细菌,氮污染物通

过微生物的硝化作用和反硝化作用最终去除^[25-26]。从湿地内部的污染物浓度变化来看,对 TN、COD_{Cr} 降低最大的是湿地的前半部分,其主要原因是湿地前半部分有机物浓度高,为微生物活动提供了充足的碳源,因此表现出较强的微生物活性。

各处理单元 TN、COD_{Cr} 去除率变化见图 5、图 6。

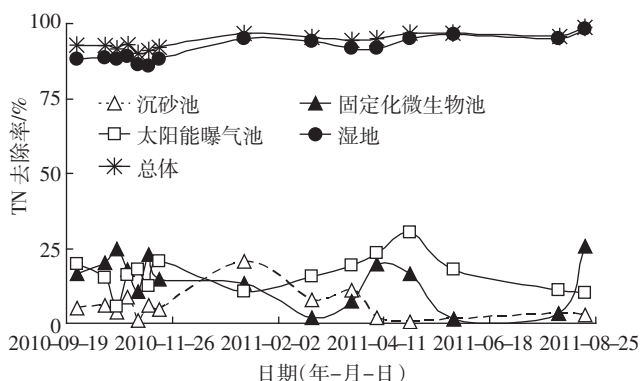


图 5 各处理单元 TN 去除率的变化

Figure 5 The removal of TN in each treatment unit

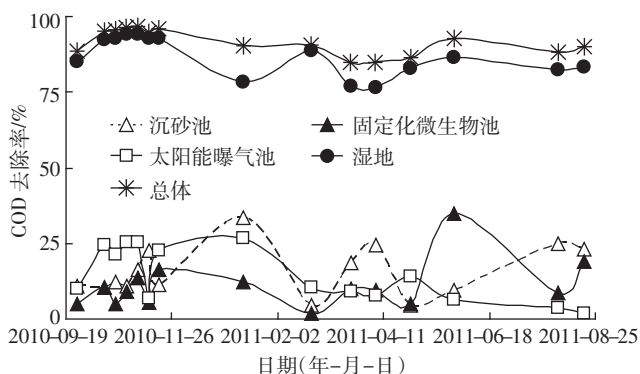


图 6 各处理单元 COD_{Cr} 去除率的变化

Figure 6 The removal of COD_{Cr} in each treatment unit

由图 5 可以看出,处理工程对 TN 的去除率总体达到 90.08%~98.68%。各单元对 TN 的去除率中以人工湿地最大,达到 88.03%~97.98%。太阳能曝气池对 TN 的去除率为 5.65%~30.21%,固定化微生物滤池对 TN 的去除率为 1.88%~25.58%,沉砂拦污池对 TN 的去除率为 0.60%~20.6%。

由图 6 可以看出,处理工程对 COD_{Cr} 的总体去除率达到 84.53%~96.74%。各单元对 COD_{Cr} 的去除率中以湿地单元最大,达到 76.54%~94.17%,太阳能曝气单元对 COD_{Cr} 的去除率达到 1.96%~26.53%,固定化微生物单元对 COD_{Cr} 的去除率达到 1.83%~34.98%,沉砂拦污池单元对 COD_{Cr} 的去除率达到 4.69%~33.32%。

示范工程利用地势差形成自流,利用太阳能增氧,污水处理过程不需消耗电能。水处理规模为 4000 m³·d⁻¹,冬季可正常运行,吨水处理成本为 0.15 元·m³,主要为设备折旧和植物维护费用,对 TP 去除率达到 95.4%~99.59%。

3 结论

通过示范工程长达 1 年的水质监测,可以得出以下结论:

(1)生物生态集成技术在生活污水处理应用中具有投资与运行费用低、处理效果好、TN、COD_{Cr} 去除能力强、景观效果好、运行维护管理方便等诸多优点。

(2)在蓟县刘相营建成了日处理能力为 4000 m³·d⁻¹ 的村镇生活污水生物生态微动力治理示范工程,对 TN 去除率可达到 90.08%~98.68%,对 COD_{Cr} 的去除率达到 84.53%~96.74%,出水水质指标均达到地表水 IV 类标准,截污减排效果明显,有效减轻了于桥水库周边村落污水排放及初期雨水对水库水环境的污染。

参考文献:

- [1] 梁 祝,倪晋仁. 农村生活污水处理技术与政策选择[J]. 中国地质大学学报:社会科学版, 2007, 7(3): 18-22.
LIANG Zhu, NI Jin-ren. Treatment technologies and approaches for rural domestic sewage[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2007, 7(3): 18-22.
- [2] 曹 群,余佳荣. 农村污水处理技术综述[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 118-121.
CAO Qun, SHE Jia-rong. Treatment technologies for rural domestic sewage[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(3): 118-121.
- [3] 田 娇,王玉军,梁小萌,等. 农村污水处理技术现状及发展前景[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(5): 83-85, 142.
TIAN Jiao, WANG Yu-jun, LIANG Xiao-meng, et al. The treatment technology situation and development prospects for the rural sewage[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(5): 83-85, 142.
- [4] 苏东辉,郑 正,王 勇,等. 农村生活污水处理技术探讨[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 81.
SU Dong-hui, ZHENG Zheng, WANG Yong, et al. Discussion on treatment technology of rural domestic wastewater[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(1): 81.
- [5] 王 新,李培军,宋守志,等. 固定化微生物技术在环境工程中的应用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(7): 535-537.
WANG Xin, LI Pei-jun, SONG Shou-zhi, et al. Overview on immobilized microorganism technique in environmental engineering[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2005, 27(7): 535-537.
- [6] 张尊举,李 磊,张一婷,等. 两级曝气生物滤池用于生活污水中的处理与研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(10): 101-103, 112.

- ZHANG Zun-ju, LI Lei, ZHANG Yi-ting, et al. Treatment of the domestic wastewater by two stage biological aerated filter [J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(3): 101-103, 112.
- [7] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 65.
- ZHENG Jun, WU Hao-ting. The theory and engineering application of aeration biological filter process[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2005: 65.
- [8] 刘学功, 李金中, 李学菊. 人工湿地填料结构对水质净化效果影响研究[J]. 海河水利, 2008(4): 40-42.
- LIU Xue-gong, LI Jin-zhong, LI Xue-ju. Study on water purification of different stuffing structure for constructed wetlands[J]. *Haihe River Water Conservancy*, 2008(4): 40-42.
- [9] Hong Y, Hu H Y, Xie X, et al. Responses of enzymatic antioxidants and non-enzymatic antioxidants in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* to the allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) isolated from reed (*Phragmites communis*) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(12): 1264-1273.
- [10] Keskinan O, Goksu M Z L, Yuceer A, et al. Comparison of the adsorption capabilities of *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* for zinc, copper and lead [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2007, 7(2): 192-196.
- [11] Hong Y, Hu H Y. Effects of the aquatic extracts of *Arundo donax* L. on the growth of freshwater algae [J]. *Allelopathy Journal*, 2007, 20(2): 315-326.
- [12] Shaltout K H, Galal T M, Komi T M E. Evaluation of the nutrient status of some hydrophytes in the water courses of Nile Delta, Egypt [J]. *Journal of Botany*, 2009, 2009: 1-11. doi:10.1155/2009/862565.
- [13] Zhang X B, Liu P, Yang Y S, et al. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(8): 902-909.
- [14] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 人工湿地不同填料去污性能比较[J]. 水处理技术, 2007, 33(5): 45-48.
- TANG Xian-qiang, LI Jin-zhong, LI Xue-ju, et al. Comparison between performance of pollutant removal by different packings in constructed wetland [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(5): 45-48.
- [15] 何安吉, 黄勇. 农村生活污水处理技术研究进展及改进设想[J]. 环境科技, 2010, 23(3): 68-71, 75.
- HE An-ji, HUANG Yong. Research progress and improvement of rural wastewater treatment technology [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23(3): 68-71, 75.
- [16] 徐光来, 袁新田. 人工湿地植物的作用与影响因素[J]. 河北农业科学, 2008, 12(2): 63-64.
- XU Guang-lai, YUAN Xin-tian. Functions and influencing factors of macrophytes in constructed wetland [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(2): 63-64.
- [17] 李宝宏, 曹文平. 人工湿地植物在污水处理系统中的作用探讨[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 65-67.
- LI Bao-hong, CAO Wen-ping. Plants function of constructed wet lands in sewage treatment system [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(9): 65-67.
- [18] 崔玉波, 董婵, 赵立辉, 等. 人工湿地填料吸附氮磷性能研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2006, 23(2): 7-8.
- CUI Yu-bo, DONG Chan, ZHAO Li-hui, et al. The performance study on adsorption of the filled material in constructed wetland [J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 2006, 23(2): 7-8.
- [19] David S, Lauchlan F, James B, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent [J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18(4): 429-440.
- [20] 应俊辉. 利用人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1104-1105.
- YING Jun-hui. A study on constructed wetland for treating the rural domestic wastewater [J]. *Anhui Agricultural Science*, 2007, 35(4): 1104-1105.
- [21] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
- JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2004, 24(8): 1720-1725.
- [22] 金卫红, 付融冰, 顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 75-80.
- JIN Wei-hong, FU Rong-bing, GU Guo-wei. Plant growth characteristics and nutrient uptake from eutrophic water in constructed wetlands [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(3): 75-80.
- [23] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000, 12(3): 32-37.
- LIANG Wei, WU Zhen-bin. Progress of studies on the mechanisms of removing nitrogen and phosphorus from sewage in constructed wetland [J]. *Environmental Science Trends*, 2000, 12(3): 32-37.
- [24] 袁东海, 高士祥, 任全进, 等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 77-92.
- YUAN Dong-hai, GAO Shi-xiang, REN Quan-jin, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 77-92.
- [25] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 湿地植物对外源氮、磷输入的响应研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 64-68.
- XU Zhi-guo, HE Yan, YAN Bai-xing, et al. Response of wetland plants to nitrogen and phosphorus inputs [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1): 64-68.
- [26] Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants—the root-zone method [J]. *Water Science and Technology*, 1987, 19: 107-118.