

人工强化组合技术深度净化塘西河上游地表径流

钱涌^{1,2}, 潘继征³, 柯凡³, 路学军⁴, 季宏康^{1,2}, 范帆³,
马书占³, 张浏⁵

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州科技大学 江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215011; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 4. 连云港市环境监测中心站, 江苏 连云港 222001; 5. 安徽省环境科学研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 针对合肥塘西河上游经开区地表径流水质较差的问题, 利用河道及两侧沟塘对其进行蓄纳, 同时建立中试工程, 运用人工强化的组合技术净化河流水质, 实现低污染水营养盐高效移出。2016年8月—11月对中试工程预处理和生物处理两个单元的进出水水质进行监测, 分析污染物的去除效果。结果表明, 系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 和 SS 的去除率较高, 分别为 73.54%、68.91% 和 77.02%; 对 TN 和 COD 的去除率较低, 分别为 51.99% 和 50.31%。

关键词: 塘西河; 地表径流; 预处理; 生物处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0085-06

Artificial Enhanced Combination Process for Purification of Surface Runoff in Upstream Area of Tangxi River

QIAN Yong^{1,2}, PAN Ji-zheng³, KE Fan³, LU Xue-jun⁴, JI Hong-kang^{1,2},
FAN Fan³, MA Shu-zhan³, ZHANG Liu⁵

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Lianyungang Environmental Monitoring Station, Lianyungang 222001, China; 5. Anhui Institute of Environmental Science, Hefei 230001, China)

Abstract: In view of the poor water quality of surface runoff in the upstream area of Tangxi River in Hefei, the river channel and ditches on both sides were used to store the runoff. Meanwhile, a pilot project was established to purify the water, aiming to efficiently remove nutrients from the lowly polluted water by the combined technology. From August to November in 2016, the influent and effluent quality of the pretreatment and biological treatment units of the pilot project was continuously monitored, and the removal efficiency of pollutants was analyzed. The system had high removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP and

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-003); 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心项目

通信作者: 柯凡 E-mail: 28612267@qq.com

SS, which were 73.54%, 68.91% and 77.02%, respectively. However, the removal rates of TN and COD were only 51.99% and 50.31%, respectively.

Key words: Tangxi River; surface runoff; pretreatment; biological treatment

塘西河是巢湖西半湖污染最为严重的人湖河流之一^[1],其上游流经合肥经济开发区后经地下转输管流入十五里河,雨季地表径流携带大量的污染物汇入,给十五里河、巢湖带来巨大的污染压力。目前,城市地表径流汇集处理技术主要有:雨水调节池、生物滞留池和人工湿地^[2]。雨水调节池对于固体颗粒物具有很好的去除效果,但对溶解性有机物的去除效果不理想;目前生物滞留池在国内的应用还不成熟,去除效果依赖于自身设计与运行条件,对于氮的去除效果不稳定;人工湿地技术多用于处理生活污水、工业废水和农业径流^[3]等方面,对各类污染物都有一定的去除效果,但是针对城市地表径流污染物去除方面的相关研究较少。可见,关于地表径流净化的研究相对较少,所涉及的处理手段也相对有限。

鉴于此,笔者应用地表径流深度净化一体化装置处理蓄纳起来的塘西河上游初期地表径流,并对装置的去除效果及影响因素进行分析,以期对地表径流净化一体化装置的进一步优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

1.1.1 中试工程概况

塘西河上游地表径流深度净化中试工程位于合肥市包河区观海路以北、京台高速以西,见图1。降雨初期,塘西河上游部分地表径流截流后通过塘西河—十五里河转输管进入某废弃塘蓄纳起来,然后通过地表径流深度净化一体化装置净化后排出。



图1 中试工程区范围示意

Fig.1 Sketch map of pilot project

1.1.2 径流水质特征

本课题组研究发现^[4],地表径流前期污染物浓度波动较大,变化趋势相对一致。径流中SS的次降雨径流平均浓度(EMC)为161.05 mg/L, COD和TP的EMC分别为85.82和0.59 mg/L, TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的EMC虽未超过合肥地表水体水质控制目标(准IV类标准),但瞬时浓度分别达到14.05和7.80 mg/L。其中,SS和TP、COD之间呈显著正相关关系,表明TP和COD大部分以颗粒态形式存在。因此,在净化地表径流时应以SS、COD和TP为重点去除对象。

1.2 处理工艺

地表径流深度净化一体化装置(见图2)主要由两部分组成:以絮凝、沉淀、过滤等手段来削减污染物浓度的预处理单元;以微曝气生态浮床系统为核心,通过生物膜和漂浮植物共同净化污染物的生物处理单元。

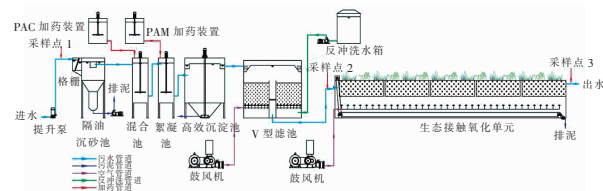


图2 地表径流深度净化一体化装置

Fig.2 Integrated device for deep purification of surface runoff

预处理单元:地表径流经人工格栅拦截粗大漂浮物以后通过提升泵提升至沉砂池,在沉砂池中去除水中夹带的泥沙等无机颗粒后进入高效沉淀池中,并通过投加混凝剂与助凝剂进行泥水分离,然后上层水体进入V型滤池,利用石英砂等粒状滤料进行进一步的过滤以达到截留水中有机物、悬浮固体和部分细菌、微生物等目的,从而使水体的浊度降低,然后进入生物处理单元。具体工况参数如下:混凝剂聚合氯化铝(PAC)的投加量为 21.53 g/m^3 ,助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)的投加量为 3.02 g/m^3 ,隔油沉砂池的水力停留时间(HRT)为 $0.47 \sim 0.94 \text{ h}$,沉淀池的水力停留时间为 $4.87 \sim 9.74 \text{ h}$,V型滤池的水力停留时间为 $0.89 \sim 1.78 \text{ h}$,反冲洗工序为2

min 水洗 + 3 min 气洗,每 10 d 进行一次反冲洗,每 30 d 排一次泥。

生物处理单元:生态接触氧化池的长为 11 m、宽为 3 m、高为 1.5 m,正常运行时蓄水容量为 39.6 m³,布设 3 个长为 3 m 的网架,网架上每隔 0.6 m 布设生物膜填料。植物插植在网架上自然生长后覆盖载体水面,底部布设 T 型纳米曝气管强化该单元的氧化功能。池底装有刮泥器,当沉淀物较多时通过刮泥器排出生态接触氧化池。

本研究中选择既有净化效果又有经济价值的空心菜作为种植植物,生物膜填料为碳纤维填料和脱氮填料,这两种填料耐负荷冲击、比表面积大,能为微生物提供附着点。

1.3 进水水质

进水流量为 15 ~ 30 m³/d,生物单元水力负荷为 0.45 ~ 0.91 m³/(m² · d),具体进水水质:TN 为 10.02 ~ 18.03 mg/L,均值为 (14.15 ± 2.61) mg/L; TP 为 0.35 ~ 2.17 mg/L,均值为 (1.09 ± 0.50) mg/L; NH₄⁺ - N 为 2 ~ 16.97 mg/L,均值为 (11.09 ± 4.88) mg/L; NO₃⁻ - N 为 0.14 ~ 0.58 mg/L,均值为 (0.35 ± 0.19) mg/L; NO₂⁻ - N 为 0.06 ~ 0.21 mg/L,均值为 (0.14 ± 0.06) mg/L; COD 为 16.05 ~ 90.3 mg/L,均值为 (45.43 ± 18.64) mg/L; pH 值为 6.86 ~ 8.07,均值为 7.5 ± 0.3; DO 为 1 ~ 2.21 mg/L,均值为 (1.66 ± 0.63) mg/L; SS 为 17 ~ 98 mg/L,均值为 (43.76 ± 21.44) mg/L。

1.4 采样与分析

设置 3 个采样点,分别是进水、预处理单元出水、生物单元出水。采样时段为 2016 年 8 月—11 月,每周采集 1 ~ 2 次。监测指标包括 TN、TP、COD、NH₄⁺ - N 等,测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)。

2 结果与分析

2.1 对 SS 和 COD 的削减效果

2.1.1 对 SS 的去除

系统对 SS 的去除效果较好,具有较强的缓冲能力,平均去除率为 77.02%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为 79.16% 和 20.84%,如图 3 所示。系统运行初期 SS 的出水浓度较高,这是由于预处理单元的投药量较小,为了保证后续生物单元顺利挂膜。挂膜完成后,出水 SS 基本在 6 mg/L 以下,优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB

18918—2002)一级 A 标准。

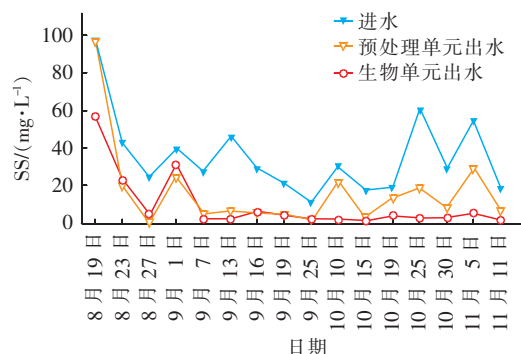


图3 SS浓度的变化

Fig. 3 Change of SS concentration

2.1.2 对 COD 的去除

系统对 COD 的去除效果相对较好,出水水质稳定,平均去除率为 50.31%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为 90.28% 和 9.72%,如图 4 所示。COD 主要通过预处理单元的沉淀和过滤作用而去除,这与马书占等^[5]的研究结果相似。

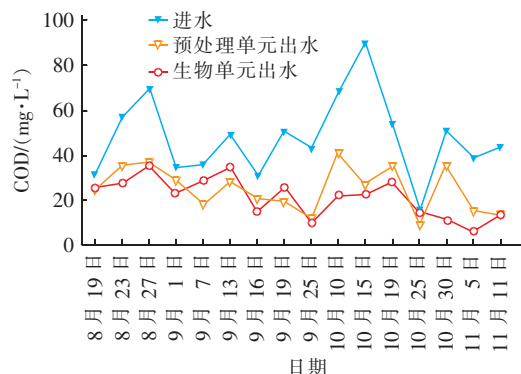


图4 COD浓度的变化

Fig. 4 Change of COD concentration

系统运行初期,生物单元对 COD 的去除率出现过负值的情况,这是因为进水流量与曝气量较大,使得生物膜脱落,导致出水 COD 浓度升高;此外,在植物生长初期,枝叶枯萎和根部腐烂也会影响出水 COD 浓度。适当降低进水流量和曝气量有利于提高 COD 的去除效果,例如当进水流量变为 15 m³/d 时,曝气量减小后,生物单元对于 COD 的去除贡献率有所提高。从总体运行情况来看,系统中 COD 平均出水浓度为 21.16 mg/L,优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。

2.2 对氮的削减效果

2.2.1 对总氮的去除

系统在 9 月 13 日—25 日和 10 月 25 日—11 月

11日两个时间段运行相对稳定。装置运行阶段对TN的平均去除率为51.99%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为21.75%和78.25%,如图5所示。从贡献率来看,生物单元对于TN的去除起主要作用,通过微生物硝化/反硝化和植物根系的吸收^[6]等作用来削减污染物。

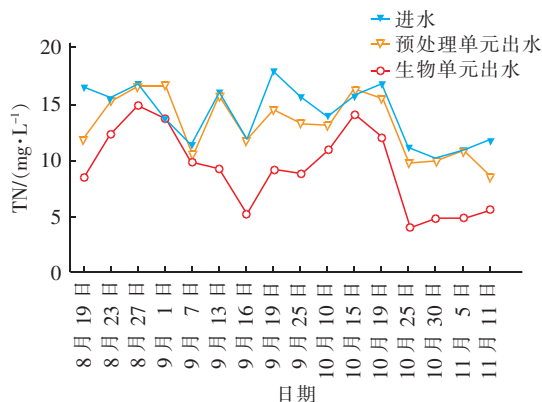


图5 TN浓度的变化

Fig. 5 Change of TN concentration

硝化与反硝化反应的适宜温度为20~40℃,8月—11月温度正适合微生物硝化/反硝化反应。从图5可以看出,系统在8月19日—9月7日和10月10日—19日两个时段运行不稳定,对TN的去除波动较大。第一个时段是由于处于运行初期,曝气量过大;第二个时段系统刚从断电条件下恢复运行,填料表面还未生成足够厚的生物膜^[7],硝化/反硝化作用受到限制。系统在稳定运行期间,对TN的去除率有所提高,但仍有较大提升空间。生物单元采用间歇供氧方式实现硝化/反硝化反应,但DO浓度偏高(3#采样点的DO浓度约为6 mg/L),无法满足反硝化需要的缺氧条件,这是不利于去除TN的原因之一。此外,生物单元的COD/N值下降为1.67,碳源不足是总氮去除率受影响的又一个因素。研究表明,当污水的COD/N值<10或C/N值<5^[8]时,会限制微生物的反硝化反应,进而影响氮的去除。从总的运行情况来看,系统稳定运行时TN的平均出水浓度为6.47 mg/L,低于标准要求的10 mg/L。

2.2.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果良好,平均去除率为73.54%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为12.24%和87.76%,如图6所示。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除的相似之处在于当温度适宜时,微生物活性均提高,植物生长量增加,去除效果好;不同之

处在于高浓度DO不利于微生物的反硝化作用,却利于硝化作用,促进 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除。此外,氨氮去除率在预处理单元出现过负值的情况,这是由于预处理单元截留的有机氮会在厌氧条件下转化为铵态氮,使预处理单元出水氨氮浓度升高,这与徐芝芬等^[9]的研究结果一致。从总的运行情况来看,系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均出水浓度为2.1 mg/L,满足《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)的要求。

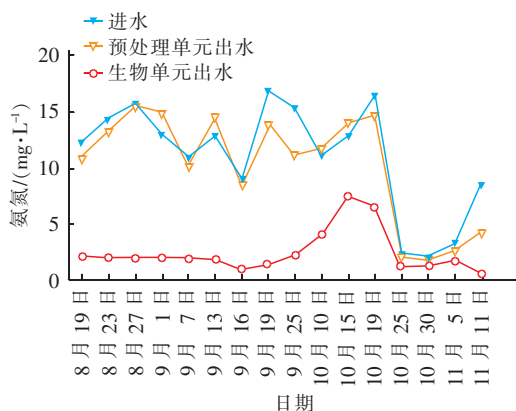


图6 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 6 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration

2.3 对总磷的削减效果

系统对TP的去除效果较好,出水水质稳定,如图7所示。可知,在8月19日—10月19日时段,对TP的平均去除率为74.39%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为102.4%和-2.4%;在10月25日—11月11日时段,对TP的平均去除率为59.33%,预处理单元和生物单元的平均贡献率分别为26.61%和73.39%。8月19日—10月19日时段,预处理单元对TP的去除起主要作用,进水中的颗粒态磷会与PAC、PAM发生吸附沉淀作用,磷酸盐会与游离态钙、铝发生反应,生成难溶性磷酸盐而沉淀下来,V型滤池的基质有足够的容量吸附和沉淀磷^[10]。生物单元会出现TP去除率为负值的情况,这与COD去除率为负值的原因一致。10月25日—11月11日时段,生物单元对TP的去除起主要作用。其原因主要有以下3个方面:系统中进水TP浓度较低,颗粒态磷减少,预处理单元的去除效果降低;石英砂作为基质的吸附能力有限,系统运行一段时间后,基质已经饱和,有机质阴离子和磷竞争吸附点致使除磷效率下降;生物单元曝气量减少与曝气时间延长对生物膜产生了影响,且生物单元出口处

投加了钙质除磷材料,使得除磷效果增强。从总的运行情况来看,TP 平均出水浓度为 0.26 mg/L,低于标准要求的 0.3 mg/L。

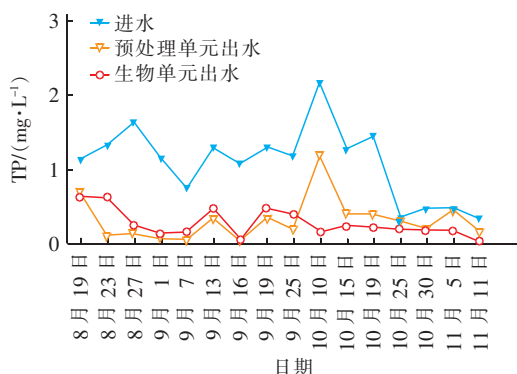


图7 TP 浓度的变化

Fig. 7 Change of TP concentration

2.4 影响因素分析

2.4.1 水力停留时间

8月19日—9月7日和9月13日—25日的HRT分别为1.58 d和3.11 d,气水比均为3:1,生物单元对污染物的去除效果如图8所示。可知,当HRT为3.11 d时,对TN和COD的平均去除率较高,不同HRT下系统对TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率差异不大。研究表明^[11],适当延长HRT可以提高系统对有机物、含氮化合物的去除效果。当HRT为1.58 d时,停留时间过短,TN和COD还未来得及降解就被带出系统,但此时已能去除大部分TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,因此当HRT增加时,TN和COD去除率有所增加,但对TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率影响不大。

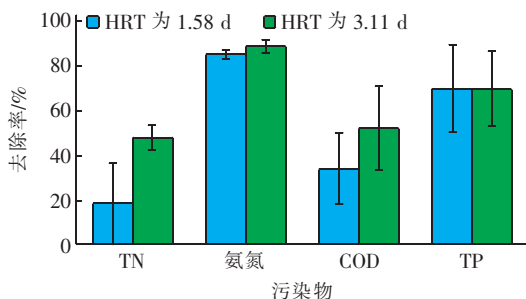


图8 HRT 对污染物去除率的影响

Fig. 8 Effect of HRT on removal rate of pollutants

2.4.2 气水比

9月13日—25日和10月25日—11月11日的气水比分别为3:1和2:1,HRT均为3.11 d,生物单元对污染物的去除效果如图9所示。可知,两种气水比下,对TN的去除效果相差不大,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

的去除率在气水比为3:1时更高,不过此时对TP和COD的去除率为负值。在两种气水比下,反硝化作用都被过高的DO浓度限制,而DO浓度越高越利于硝化作用,因此当气水比减小至2:1时,对TN的去除率变化不大,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率变低。而导致TP和COD在气水比为3:1条件下去除率是负值的原因如下:TP和COD经预处理单元削减后进入生物单元时浓度很低,而此时曝气量相对过大,会有生物膜脱落,导致TP和COD去除率为负值。这与方焰星等^[12]的研究结果相似。

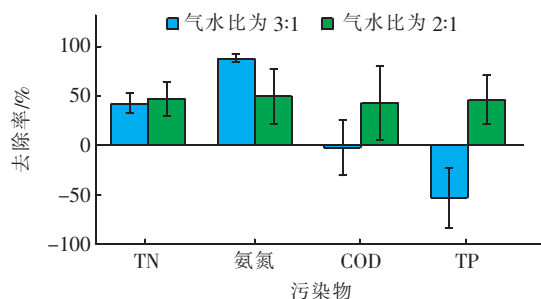


图9 气水比对污染物去除率的影响

Fig. 9 Effect of air-water ratio on removal rate of pollutants

3 结论

① 地表径流深度净化一体化装置具有较强的缓冲能力,对初期地表径流污染物的去除效果显著,其中对SS的平均去除率为77.02%,对COD的平均去除率为50.31%,对TP的平均去除率为68.91%,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率为73.54%,对TN的平均去除率为51.99%。

② 预处理单元和生物单元对污染物的去除效果存在差异性。对COD的去除主要发生在预处理单元,其贡献率为90.28%;系统运行初期,TP主要在预处理单元得以去除,其贡献率为102.4%;系统运行后期,TP主要在生物单元得以去除,其贡献率为73.39%;TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除主要发生在生物单元,其贡献率分别为78.25%和87.76%。

③ 该试验装置的最佳运行工况:水力停留时间为3.11 d、气水比为2:1。进一步的优化可以从不同的基质组合、气水比、曝气间歇时间等方面考虑,此外还可以通过改造生态接触氧化池来进一步分析对高污染地表径流的净化效果。

参考文献:

[1] 金玥. 巢湖污染现状分析与治理研究[J]. 巢湖学院

- 学报,2013,15(1):21-26.
- Jin Yue. Analysis of pollution situation about Chaohu Lake and management countermeasure [J]. Journal of Chaohu College,2013,15(1):21-26(in Chinese).
- [2] 胡爱兵,张书函,陈建刚. 生物滞留池改善城市雨水径流水质的研究进展[J]. 环境污染与防治,2011,33(1):74-77,82.
- Hu Aibing, Zhang Shuhan, Chen Jiangang. Progress on the improvement of urban stormwater runoff quality by bioretention [J]. Environmental Pollution & Control, 2011,33(1):74-77,82(in Chinese).
- [3] 邓磊,王成端,张莹,等. 不同结构稳定表流人工湿地对生活污水的处理研究[J]. 水处理技术,2012,38(1):69-71.
- Deng Lei, Wang Chengduan, Zhang Ying, et al. Comparative study of the stable surface flow wetland for differential structure [J]. Technology of Water Treatment,2012,38(1):69-71(in Chinese).
- [4] 周峰,曹明明,柯凡,等. 巢湖流域塘西河上游分流制系统降雨径流污染特征及初期冲刷效应[J]. 湖泊科学,2017,29(2):285-296.
- Zhou Feng, Cao Mingming, Ke Fan, et al. Analysis of pollution characteristics and first flush effect in rainfall runoff in separate storm sewer system in upstream of Tangxi River, Chaohu Catchment [J]. Journal of Lake Sciences,2017,29(2):285-296(in Chinese).
- [5] 马书占,潘继征,吴晓东,等. 旁路多级人工湿地对巢湖流域南淝河水的净化效果[J]. 湖泊科学,2016,28(2):303-311.
- Ma Shuzhan, Pan Jizheng, Wu Xiaodong, et al. Purification efficiencies of a multi-stage bypass constructed wetland for treating polluted water from Nanfei River, Chaohu Catchment [J]. Journal of Lake Sciences,2016,28(2):303-311(in Chinese).
- [6] Misiti T M, Hajaya M G, Pavlostathis S G. Nitrate reduction in a simulated free-water surface wetland system [J]. Water Res,2011,45(17):5587-5598.
- [7] 冯冲凌,李科林,李芸. 人工湿地中微生物群落特征及其净化机理[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(12):42-45,56.
- Feng Chongling, Li Kelin, Li Yun. Characteristics of microbial communities in constructed wetlands and their purification mechanisms [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(12):42-45,56(in Chinese).
- [8] 朱文玲,郑离妮,崔理华,等. 不同碳氮比条件下4种可控因素对垂直流人工湿地总氮去除的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(6):1187-1192.
- Zhu Wenling, Zheng Lini, Cui Lihua, et al. Vertical-flow constructed wetland de-nitrification impact of four controllable factors with different C/N [J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(6):1187-1192(in Chinese).
- [9] 徐芝芬,李金城,莫德清,等. 组合工艺对农村生活污水中氮磷的去除效果[J]. 桂林理工大学学报,2011,31(2):252-257.
- Xu Zhifen, Li Jincheng, Mo Deqing, et al. Nitrogen and phosphorus removal from rural domestic wastewater in combined process [J]. Journal of Guilin University of Technology,2011,31(2):252-257(in Chinese).
- [10] Arias C A, Bubba M D, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds [J]. Water Res,2001,35(5):1159-1168.
- [11] Sim C H, Yusoff M K, Shutes B, et al. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya City, Malaysia [J]. J Environ Manage, 2008, 88(2):307-317.
- [12] 方焰星,何池全,梁霞,等. 曝气对人工湿地氮去除效果的影响[J]. 湿地科学,2011,9(3):270-276.
- Fang Yanxing, He Chiquan, Liang Xia, et al. Influence of aeration on nitrogen removal of constructed wetlands [J]. Wetland Science, 2011, 9(3):270-276(in Chinese).



作者简介:钱涌(1992-),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为人工湿地与环境技术。

E-mail:602243745@qq.com

收稿日期:2019-05-06