

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.010

曝气氧化塘 + 人工湿地组合工艺处理农村污水

王晓云¹, 付爱民², 李启明³

(1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350008; 2. 福建宁德核电有限公司, 福建 宁德 355200; 3. 台湾自来水公司 第七区管理处, 台湾 高雄 000833)

摘要: 以台湾省台东县关山人工湿地系统为研究对象,探讨了曝气氧化塘 + 人工湿地组合工艺处理农村污水的效果。2008年8月—2018年12月,每月采集1次数据,共收集125组数据。结果表明,人工湿地系统对 BOD_5 的平均去除率为 $(61.55 \pm 16.71)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.23 \pm 0.52) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 SS 的平均去除率为 $(63.39 \pm 11.18)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(2.62 \pm 2.36) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率为 $(82.21 \pm 12.11)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.98 \pm 0.34) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 TN 的平均去除率为 $(67.88 \pm 13.89)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.78 \pm 1.01) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 TP 的平均去除率为 $(71.31 \pm 12.31)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(0.13 \pm 0.05) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。该工艺运行稳定,处理效果好,出水水质满足台湾省相关水质标准要求。整个系统结合生态景观,构建亲水环境,表现出良好的环境效益。

关键词: 农村污水; 曝气氧化塘; 人工湿地; 表面负荷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0064-05

Combined Process of Aeration Pond and Constructed Wetland for Treatment of Rural Sewage

WANG Xiao-yun¹, FU Ai-min², LEE King-ming³

(1. College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350008, China; 2. Fujian Ningde Nuclear Power Company Limited, Ningde 355200, China; 3. 7th District Office, Taiwan Water Corporation, Kaohsiung 000833, China)

Abstract: The effect of a combined process of aeration pond and constructed wetland on the treatment of rural sewage was explored in Guanshan Constructed Wetland, Taidong County, Taiwan Province. From August 2008 to December 2018, a total of 125 groups of data were collected through the data collection for once a month. The removal efficiencies of BOD_5 , SS, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP by the constructed wetland system were $(61.55 \pm 16.71)\%$, $(63.39 \pm 11.18)\%$, $(82.21 \pm 12.11)\%$, $(67.88 \pm 13.89)\%$ and $(71.31 \pm 12.31)\%$, respectively, and the average surface pollutant loading rates of BOD_5 , SS, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP were $(1.23 \pm 0.52) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(2.62 \pm 2.36) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(1.98 \pm 0.34) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(1.78 \pm 1.01) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $(0.13 \pm 0.05) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively. The process operated stably with a good treatment performance, and the effluent quality met the requirements of relevant water quality standards of Taiwan Province. The whole system was combined

with the ecological landscape to build a hydrophilic environment, and showed good environmental benefits.

Key words: rural sewage; aeration pond; constructed wetland; surface loading

我国农村人口众多,每年产生生活污水达 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,由于居住点分散,给污水处理带来较大的困难^[1]。农村污水粗放型排放情况十分常见,村庄环境受到影响,水体造成污染,而且农村饮用水处理设施相对落后,从而进一步影响到农村饮用水水质安全^[2-3]。农村生活污水具有氮、磷含量高,可生化性好,水质、水量波动大的特点^[4-5]。由于农村土地资源相对充足,采用以人工湿地为主体的生态污水处理系统可以实现出水水质好、运行管理方便、投资及运行费用低、脱氮除磷效果好的目标^[6-7]。

关山湿地位于台湾省台东县关山镇亲水公园西北侧,占地 6.4 hm^2 ,是台东县第一座自然污水处理系统。该湿地系统于2008年8月1日投入使用,至今已运行13年。设计处理污水量为 $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,截至目前实际平均处理量为 $2\,619 \text{ m}^3/\text{d}$,相当于水力负荷为 $0.11 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。湿地主要处理来自关山镇的生活污水、农业回归水及达标排放的畜牧业废水,处理流程如下:进水(截流设施出水)→曝气氧化塘(A0)→表面流密植湿地(A1、A2)→表面流开放水域湿地(A3、A4)→水平潜流湿地(A5)→植草沟(A6)→生态景观池(A7)→公园水景。

1 各处理单元介绍

湿地现场利用地形高差,污水在各单元之间顺序流动,与亲水公园共同营造成休闲水景公园。湿地现场布置如图1所示。

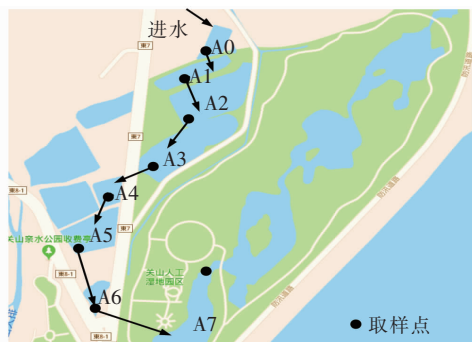


图1 人工湿地现场布置

Fig. 1 Layout of constructed wetland

1.1 截流设施

包含活动式挡水堰、渠道、排泥闸门、拦污闸、系统进水口5部分,主要作用是将关山1号排水渠的

水体引入处理系统。在关山1号排水渠设置活动式挡水堰,采用截流方式将污水引入30 m长的渠道中,在渠道末端设置排泥闸门,平时依靠排泥闸提升水位,从而促进污水以重力方式进入曝气氧化塘。渠道也兼有初沉功能,截流的污水仅上清液进入湿地系统,部分淤泥则沉积于底层,根据污泥沉积厚度开启排泥闸。

1.2 曝气氧化塘

面积为 $2\,000 \text{ m}^2$ 、平均水深为1.5 m,采用鼓风机曝气,目的是强化氧化塘的稳定性,借此去除水体中部分有机物,同时还有均化作用,可以避免高浓度污水进入而危害系统内微生物。水力停留时间(HRT)为0.66 d,水力负荷为 $2.27 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.3 表面流密植湿地

设有A1、A2两个单元,主要依靠沉淀、拦截、厌氧作用等机制去除污染物,通过种植高密度水生植物,使水中有机物及营养盐得以去除,并借此抑制藻类生长。

A1单元的面积为 $3\,200 \text{ m}^2$,平均水深为0.62 m,空隙率为0.9,密植湿地区域约占80%、平均水深为0.3 m,开放水域约占20%、平均水深为1.5 m。主要植物为:柳叶水蓑衣(*Hygrophila salicifolia*)、香蒲(*Typha orientalis*)、荇菜(*Eleocharis dulcis*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)。HRT为0.36 d,水力负荷为 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

A2单元的面积为 $8\,500 \text{ m}^2$,平均水深为0.75 m,空隙率为0.9,密植湿地区域约占70%、平均水深为0.3 m,开放水域约占30%、平均水深为1.5 m。主要植物为:轮伞莎草(*Cyperus alternifolius*)、空心菜(*Ipomoea aquatica forsk*)、鸭趾草(*Commelina communis*)。HRT为1.12 d,水力负荷为 $0.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.4 表面流开放水域湿地

设有A3、A4两个单元,各单元设计参数一致,之所以设置两个单元主要是为了景观需要。总面积为 $9\,000 \text{ m}^2$,平均水深为0.96 m,空隙率为0.95。主要依靠沉淀与生物好氧氧化、硝化去除污染物。其中浅水区域约占30%、水深为0.3 m,中水深区域

约占20%、水深为0.6 m,深水区域约占50%、水深为1.5 m。浅水区域种植美人蕉(*Canna indica*)、香蒲(*Typha orientalis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、空心菜(*Ipomoea aquatica forsk*)、水蓊(*Cleistocalyx operculatus*)等挺水性植物;中水深区域种植睡莲(*Nymphaeateragona*)等漂浮植物;深水区域主要提供水生生物栖息的空间,水面散布水芙蓉(*Limnophila aromatica*)、凤眼莲(*Eichornia crassipes*)等漂浮植物,并设置两座人工浮岛,营造生物多样性的友好环境。A3、A4两个单元的HRT共计1.64 d,水力负荷为 $0.56 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.5 水平潜流湿地

面积为 $1\,000 \text{ m}^2$,平均水深为0.8 m,空隙率为0.45,是一个以砾石床为基底的高密度植生地带,主要植物为芦苇(*Phragmites australis*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、香根草(*Vetivera zizanioides*)。污水在砾石表层下流动,污染物在充满植物根系的砾石间隙通过过滤、吸收及微生物的分解作用加以截留或去除。HRT为0.072 d,水力负荷为 $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.6 植草沟

植草沟共3条,中间以步道间隔,搭配路旁绿地,每条长为32 m、宽为5.2 m,流速为0.75 m/s。主要利用沟内香根草(*Vetivera zizanioides*)、细叶芒(*Achnatherum pekinense*)、蝴蝶兰(*Phalaenopsis aphrodita*)、纸莎草(*Cyperus papyrus*)等植物强化吸收污染物,并利用沟底砾石产生水跃、跌水,以增加水中溶解氧,进而达到削减污染物的目的。

1.7 生态景观池

面积为 $12\,000 \text{ m}^2$,采用暗涵与亲水公园水景湖泊连通。主要用于储存经前述单元处理后的出流水,作为后续生态景观营造亲水环境以吸引生物聚集繁殖。经前述单元处理的出流水经排水暗涵以跌水方式进入生态池,以增加水中DO浓度。沿岸种植水黄皮(*Pongamia pinnata*)、地毯草(*Axonopus compressus*)、美人蕉(*Canna indica*)、莲雾(*Syzygium samarangense*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)、水石榕(*Elaeocarpus hainanensis*)等耐湿植物,吸引昆虫、鸟类栖息;池中放养花鲢(*Aristichthys nobilis*)、锦鲤(*Cyprinus carpio haematopterus*)等鲤科鱼类,借助花鲢的觅食特性,控制藻类数量,避免因藻类过度繁殖而影响水质。搭配环湖步道,创造休憩环境,是人工湿地处理系统中最能让民众感受到生态工法效果的

单元。

2 分析方法

该系统共设置9个采样点:截流设施出水口、曝气氧化塘出水口A0、表面流密植湿地出水口A1、表面流密植湿地出水口A2、表面流开阔水域湿地出水口A3、表面流开阔水域湿地出水口A4、水平潜流湿地出水口A5、植草沟出水口A6、生态景观池A7。自2008年8月开始,每月采集水样1次,共累计采样125次。分别测定流量(Q)、水温(T)、DO、pH值、 BOD_5 、SS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP等指标,单个水样每项指标测定4次。采样及分析方法采用台湾省《河川、湖泊及水库水质采样通则》(NIEA W104.51C)及《水质检测方法总则》(NIEA W102.51C)。通过归纳分析,以便了解自然生态处理系统对农村生活污水、农业回归水和畜牧业废水的处理效果。

3 运行效果分析

3.1 流量

流量(Q)为人工湿地的重要操作参数,流量的大小影响HRT、污染物负荷率、水力负荷率等操作参数,操作条件不足可能会使污染物无法去除,过大则会使出水污染物浓度过高、降低处理效率。监测数据显示,湿地进水流量最高为 $5\,040 \text{ m}^3/\text{d}$,出现在2017年1月;最低为 $1\,260 \text{ m}^3/\text{d}$,出现在2010年7月;平均进水流量为 $(2\,962 \pm 569) \text{ m}^3/\text{d}$ 。湿地出水流量最高为 $4\,284 \text{ m}^3/\text{d}$,出现在2017年1月;最低为 $865 \text{ m}^3/\text{d}$,出现在2010年7月;平均出水流量为 $(2\,271 \pm 521) \text{ m}^3/\text{d}$ 。系统处理流量(进出水平均流量)在 $1\,058 \sim 4\,662 \text{ m}^3/\text{d}$ 之间,系统平均处理流量为 $(2\,619 \pm 727) \text{ m}^3/\text{d}$,平均水力负荷为 $(0.11 \pm 0.03) \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,平均HRT为 $(7.91 \pm 2.52) \text{ d}$ 。

3.2 水温

水温可能影响气体溶解度、微生物活性及代谢速率、化学反应速率等。水温低时DO浓度高,夏季水温升高则DO浓度降低,而温度升高导致生物活性加快,进一步消耗DO,将不利于改善水质。监测结果表明,系统进出水最高水温均出现在2010年7月,分别为 29.1 、 $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$,最低水温均出现在2017年1月,均为 $16.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。进水平均水温为 $(23.7 \pm 3.1) \text{ }^\circ\text{C}$,出水平均水温为 $(24.3 \pm 3.7) \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过各采样点平均水温变化数据发现,进水经曝气氧化塘后水温略微升高,再经过A1~A4处理单元后,水温有所降低,但仍比进水温度高。主要原因是,水体在

曝气氧化塘受到机械搅拌加之日光照射而使得水温升高,但在密植湿地、开阔水域湿地及水平潜流湿地由于水面挥发、植物遮阴及土壤比热容大等原因而使得水温受到一定的调节。

3.3 pH 值

影响水体 pH 值的因素有很多,水中碳源的变化、底泥微生物的活动、水中藻类的光合作用都会使 pH 值发生变化。监测数据显示,系统进水 pH 值最高为 7.9、最低为 5.9,平均为 7.4 ± 0.4 ; 系统出水 pH 值最高为 8.2、最低为 5.9,平均为 7.5 ± 0.4 。台湾省《水污染防治事业放流水标准》《地面水体分类及水质标准》规定的丙类陆域水体的 pH 值为 6~9。系统进出水 pH 值变化不大,大致上都是呈中性至弱碱性范围,这可能是由于进水来源单一,多为生活污水、农业回归水及畜牧业排水等,没有工业废水,使得进出水 pH 值大部分保持在 7 以上。分析各采样点 pH 平均值变化发现,进水经曝气氧化塘后 pH 值升高,而在后续处理单元则基本没有变化。

3.4 DO 浓度

当水体受到有机物污染时,水中微生物分解有机物消耗 DO,使得水体中 DO 浓度下降甚至呈现缺氧状态。若 DO 浓度 < 4 mg/L,对水生生物可能造成危害,台湾省《地面水体分类及水质标准》规定丙类陆域水体的 DO 浓度不低于 4.5 mg/L。监测数据显示,系统进水 DO 最高浓度为 7.2 mg/L、最低为 2.0 mg/L,平均为 (4.9 ± 1.1) mg/L; 出水 DO 浓度最高为 7.6 mg/L、最低为 3.4 mg/L,平均为 (6.3 ± 0.9) mg/L。各采样点数据显示,DO 浓度有逐渐升高的趋势,这与湿地水面开阔,且利用自然高差产生水跌、水跃有关。

3.5 对BOD₅ 的去除效果

系统进水 BOD₅ 浓度最高为 41.5 mg/L,最低为 4.2 mg/L,平均为 (13.8 ± 3.9) mg/L; 出水 BOD₅ 浓度最高为 15.3 mg/L,最低为 1.9 mg/L,平均为 (5.4 ± 2.3) mg/L,低于台湾省《水污染防治事业放流水标准》的规定值 30 mg/L。系统对 BOD₅ 的去除率最高为 84.98%,最低为 5.2%,平均为 $(61.55 \pm 16.71)\%$; BOD₅ 表面污染物负荷最高为 3.89 g/(m²·d),最低为 0.13 g/(m²·d),平均为 (1.23 ± 0.52) g/(m²·d)。各采样点数据显示,BOD₅ 在各单元均可以稳定去除,在系统进水浓度较低时,总体去除率较低。

3.6 对SS 的去除效果

系统进水 SS 浓度最高为 178 mg/L,最低为 6.5 mg/L,平均为 (26.2 ± 18.1) mg/L; 出水 SS 浓度最高为 16.3 mg/L,最低为 2.0 mg/L,平均为 (7.9 ± 3.0) mg/L,低于台湾省《水污染防治事业放流水标准》的规定值 30 mg/L。系统对 SS 的去除率最高为 94.99%,最低为 34.67%,平均为 $(63.39 \pm 11.18)\%$; SS 表面污染物负荷最高为 19.66 g/(m²·d),最低为 0.52 g/(m²·d),平均为 (2.62 ± 2.36) g/(m²·d)。各采样点数据显示,曝气氧化塘去除了大部分 SS,后续各单元虽有一定的去除效果,但由于进水 SS 浓度过低而去除效果不显著。

3.7 对氨氮的去除效果

系统进水氨氮浓度最高为 39.4 mg/L,最低为 2.34 mg/L,平均为 (12.9 ± 6.34) mg/L; 出水氨氮浓度最高为 7.94 mg/L,最低为 0.05 mg/L,平均为 (2.54 ± 1.23) mg/L。系统对氨氮的去除率最高为 99.80%,最低为 50.12%,平均为 $(82.21 \pm 12.11)\%$; 氨氮表面污染物负荷最高为 3.99 g/(m²·d),最低为 0.13 g/(m²·d),平均为 (1.98 ± 0.34) g/(m²·d)。各采样点数据显示,氨氮在系统各单元中均可稳定去除。

3.8 对TN 的去除效果

系统进水 TN 浓度最高为 52.6 mg/L,最低为 3.92 mg/L,平均为 (19.31 ± 9.33) mg/L; 出水 TN 浓度最高为 23.9 mg/L,最低为 0.51 mg/L,平均为 (7.22 ± 3.59) mg/L,低于台湾省《水污染防治事业放流水标准》的规定值 15 mg/L。系统对 TN 的去除率最高为 96.15%,最低为 20.44%,平均为 $(67.88 \pm 13.89)\%$; TN 表面污染物负荷最高为 5.78 g/(m²·d),最低为 0.23 g/(m²·d),平均为 (1.78 ± 1.01) g/(m²·d)。各采样点数据显示,TN 在曝气氧化塘去除效果不明显,主要依靠后续 A1~A6 单元去除,表明人工湿地中的植物对去除 TN 具有明显优势。

3.9 对TP 的去除效果

系统进水 TP 浓度最高为 4.56 mg/L,最低为 0.12 mg/L,平均为 (1.14 ± 0.34) mg/L; 出水 TP 浓度最高为 0.92 mg/L,最低为 0.04 mg/L,平均为 (0.31 ± 0.17) mg/L,低于台湾省《水污染防治事业放流水标准》的限值 2.0 mg/L。系统对 TP 的去除率最高为 99.31%,最低为 18.02%,平均为 $(71.31 \pm$

12.31)% ; TP 表面污染物负荷最高为 $0.45 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 最低为 $0.01 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均为 $(0.13 \pm 0.05) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。各采样点数据显示, TP 在系统各单元中均可稳定去除。

4 结论

台东县关山人工湿地已运行 13 年, 检测结果显示, 系统处理流量为 $1\,058 \sim 4\,662 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均水力负荷为 $(0.11 \pm 0.03) \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均水力停留时间为 $(7.91 \pm 2.52) \text{ d}$ 。人工湿地系统对 BOD_5 的平均去除率为 $(61.55 \pm 16.71)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.23 \pm 0.52) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 SS 的平均去除率为 $(63.39 \pm 11.18)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(2.62 \pm 2.36) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率为 $(82.21 \pm 12.11)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.98 \pm 0.34) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 TN 的平均去除率为 $(67.88 \pm 13.89)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(1.78 \pm 1.01) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对 TP 的平均去除率为 $(71.31 \pm 12.31)\%$, 平均表面污染物负荷为 $(0.13 \pm 0.05) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。曝气氧化塘尽管只占到水域面积的 8.4%, 但削减了 80% 的 SS, 53% 的 BOD_5 , 成功扮演了人工湿地前处理单元的角色, 但仅能削减 20% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、40% 的 TN 以及 27.5% 的 TP。N、P 的去除主要依靠人工湿地。

台东县关山人工湿地一直作为台湾省污水自然处理系统的典范工程, 不仅实现了污水处理功能, 也给关山镇居民提供了休闲娱乐场所, 在处理农村污水方面表现出显著的环境效益。

参考文献:

- [1] 张曼雪, 邓玉, 倪福全. 农村生活污水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 5-10.
ZHANG Manxue, DENG Yu, NI Fuquan. Research progress of rural domestic sewage treatment technology [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6): 5-10 (in Chinese).
- [2] 邱俊, 陈玺茜, 郭若彬, 等. 组合式人工湿地用于处理江西地区农村污水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 84-86.
QIU Jun, CHEN Xixi, GUO Ruobin, et al. Combined constructed wetland for treatment of rural sewage in Jiangxi Province [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24): 84-86 (in Chinese).
- [3] 朱泽民. 生态沟+厌氧+人工湿地用于农业面源污染综合治理[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 96-99.
ZHU Zemin. Application research on ecological ditch, anaerobic treatment and constructed wetland in comprehensive control of agricultural non-point source pollution [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 96-99 (in Chinese).
- [4] 葛秋易, 梁冬梅, 肖尊东, 等. 人工湿地治理东北地区典型农村面源污染工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 61-65.
GE Qiuyi, LIANG Dongmei, XIAO Zundong, et al. Design of constructed wetland for treatment of typical rural non-point source pollution in Northeast China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24): 61-65 (in Chinese).
- [5] 李红芳, 刘锋, 黎慧娟, 等. 生物滤池/人工湿地/稳定塘工艺处理农村分散污水[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 84-87.
LI Hongfang, LIU Feng, LI Huijuan, et al. Combined process of biofilter, constructed wetland and stabilization pond for treatment of rural decentralized sewage [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(2): 84-87 (in Chinese).
- [6] 潘傲, 张智, 孙磊, 等. 种植不同植物的表面流人工湿地净化效果和微生物群落差异分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1918-1929.
PAN Ao, ZHANG Zhi, SUN Lei, et al. Purification effects and microbial community differences of the surface-flow constructed wetlands with different vegetation plantation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1918-1929 (in Chinese).
- [7] 黄小龙, 郭亮, 汪尚朋, 等. 表面流-垂直流复合湿地去除低碳氮比河水中氨氮[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 70-74.
HUANG Xiaolong, GUO Liang, WANG Shangpeng, et al. Removal of ammonia nitrogen from river water with low C/N ratio using surface flow-vertical flow integrated constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(15): 70-74 (in Chinese).

作者简介: 王晓云 (1978-), 女, 河北保定人, 硕士, 副教授, 主要从事水质净化及安全研究工作。

E-mail: 541981557@qq.com

收稿日期: 2019-07-23

修回日期: 2019-11-02

(编辑: 任莹莹)