

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 08. 004

我国尾水湿地的应用现状分析

岳冬梅, 赵东华, 吴耀, 叶文瑾

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 统计分析表明,我国尾水湿地的应用发展迅速,尤其是近4年受国家和各省市发布的相关水环境治理政策的影响,尾水湿地数量呈爆发式增长。我国260座尾水湿地主要是由一种以上类型的人工湿地组合而成的复合湿地,以垂直潜流为主的尾水湿地对COD、氨氮、总磷的处理效果均较好且稳定,采用曝气、生物填料等强化措施的预处理系统,能大幅削减进入主体湿地的COD、氨氮污染负荷。为提高尾水湿地的处理效果,将其他强化脱氮除磷技术与人工湿地耦合联用已成为近年来的研究热点,多种强化净化技术已成功用于尾水湿地工程。

关键词: 尾水湿地; 垂直流湿地; 处理效果; 强化净化措施

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0022-06

Constructed Wetlands for Treatment of Effluent from Wastewater Treatment Plants in China

YUE Dong-mei, ZHAO Dong-hua, WU Yao, YE Wen-jin

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: According to the survey, the applications of constructed wetlands (CWs) used to treat effluent from wastewater treatment plants in China has increased rapidly, and it has exploded in the past four years, which may be due to the impact of relevant water environment governance policies issued by the country and various provinces and cities. Most of the 260 CWs were hybrid systems consisting of more than one type of CWs. The vertical subsurface flow system is very effective in the removal of chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen and total phosphorous (TP), and it is more reliable than the other two systems. Pretreatment systems with enhanced measures, such as aeration and biofilm packing, can effectively remove COD and ammonia nitrogen. In order to achieve better nitrogen and phosphorus removal, integrating intensified nitrogen and phosphorus removal technologies with CWs has been drawing more and more attention and has been successfully applied in many engineering projects.

Key words: constructed wetland; vertical subsurface flow systems; treatment performance; strengthening purification measures

大量研究表明,污水厂的尾水直接排放河道会导致其氮磷营养盐浓度升高^[1]。研究表明,滇池流域尾水排放已经成为该流域入湖污染负荷的主要来源之一,其贡献的总氮(TN)占滇池流域TN入湖总量的59%,部分子流域尾水的贡献率占80%以上^[2]。洱海流域尾水排放对流域低污染水TN、总磷

(TP)负荷的贡献率分别为44.1%和62.3%^[3]。南淝河流域污染源分析表明,尾水排放对COD、氨氮、TP的入河污染负荷贡献比例分别达51%、35%、38%^[4]。环巢湖小流域尾水对入河COD、氨氮、TN、TP污染负荷的贡献率分别为15.8%、15%、29.8%、14%^[5]。Qi等^[6]研究发现,尾水长期排放对受纳水体底泥氮

磷累积效应及底泥释磷速率的影响显著,TN、TP含量比对照断面分别高4倍和1倍,磷释放速率高出8倍左右。

尾水深度净化不仅能降低受纳水体的富营养化风险,还能实现水资源的再生利用。人工湿地因其投资低、运营成本低、维护管理简单等特点,在全球范围内被广泛应用。近年来,人工湿地技术也获得飞速发展,研究人员针对不同气候、不同类型污水开发了多种类型的人工湿地。将人工湿地用于尾水深度净化一直备受关注,并将其用于越来越多的工程实践,获得了较好的处理效果。但是我国尾水湿地的应用情况尚缺乏系统统计分析。

通过收集公开发表或发布的尾水湿地案例,对我国尾水湿地的地理分布、工艺参数等进行统计分析,并结合典型尾水湿地的处理效果,分析我国尾水湿地的应用情况、存在的问题及其发展趋势,以期为我国尾水湿地的应用与发展提供借鉴。

1 数据收集与分析

尾水湿地指处理尾水或同时处理尾水和地表混合水的人工湿地。本次统计的尾水湿地为我国大陆地区,截至2018年12月31日完成施工招标且处理规模不小于1 000 m³/d的尾水湿地。

中文资料通过中国知网、维普数据库和百度搜索“尾水+湿地”“中水+湿地”“再生水+湿地”等关键词,其中通过百度搜索引擎搜索到的信息若来源于政府公告、环保类报纸杂志或中标公告,则直接引用,若是其他来源,则进一步查证其官方来源;英文资料通过SpringerLink、Elsevier ScienceDirect数据库搜索“wetland/tail water/project”“wetland/wastewater treatment plant/project”“reed bed system/ tail water/project”和“vegetation filter bed/ wastewater treatment plant/project”等关键词,共收集到260座尾水湿地资料。

污染物去除率 R 的计算公式如下:

$$R=(C_0-C_1)/C_0\times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为湿地进水口污染物浓度; C_1 为湿地出水口污染物浓度。

各功能单元污染物去除贡献率 r 的计算公式如下:

$$r=(C_{in}-C_{out})/(C_0-C_1)\times 100\% \quad (2)$$

式中: C_{in} 为功能单元进水口污染物浓度; C_{out} 为

功能单元出水口污染物浓度。

2 调查结果与讨论

2.1 尾水湿地区域分布及应用趋势

通过对收集到的尾水湿地案例进行统计分析,发现除上海、江西、重庆、贵州、黑龙江、海南、西藏等地外,我国其他地区均有尾水湿地分布,覆盖率达77%。其中,山东、安徽、浙江三省尾水湿地数量最多,分别为52、35和28个,占比分别为20%、13%和11%(见图1)。

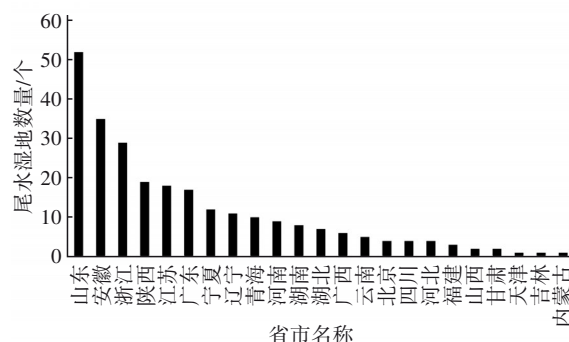


图1 各省市尾水湿地数量

Fig.1 Quantity of CWs for treating effluent from wastewater treatment plants in different provinces

我国尾水湿地应用起步较晚,主要开始于2005年之后,从2012年开始,每年新增尾水湿地数量快速增加,尤其是近4年,平均每年新增尾水湿地37.5个(见图2)。安徽省每年新增尾水湿地数量在2013年出现一个爆发式增长,浙江从2014年开始迅速增加,山东省则从2015年开始呈爆发式增长。安徽省2013年新增尾水湿地数量突增,主要源于2013年安徽省启动了一大批环巢湖流域城乡污水处理厂+湿地建设项目。浙江省从2014年开始实施“五水共治”,并且2015年国务院发布了《水污染防治行动计划》,多地提倡实施“污水处理厂+湿地”模式。因此,浙江、山东以及我国总体的尾水湿地数量突增,受环保政策的驱动影响较大。

我国尾水湿地处理规模范围较广(1 000~40×10⁴ m³/d),其中1×10⁴ m³/d及以上规模占68%。尤以山东省尾水湿地规模较大,1×10⁴ m³/d及以上规模占92%;安徽省尾水湿地虽然数量较多,但规模相对较小,0.5×10⁴ m³/d及以下的占77%,主要源于环巢湖流域城乡污水处理厂的处理规模较小。对尾水进行深度净化处理主要源于两个目的:一是避免尾水直排造成地表水污染,尤其是在水质要求较高的特

殊水功能区,如洱海、太湖、巢湖等流域,该种情况下尾水湿地处理能力主要受污水处理厂的尾水排量影响;另一个是作为补水水源,补给地表水体以保障其生态基流,尤其在北方水资源紧缺地区,该种情况下尾水湿地处理规模主要由所需的补水水量来决定。

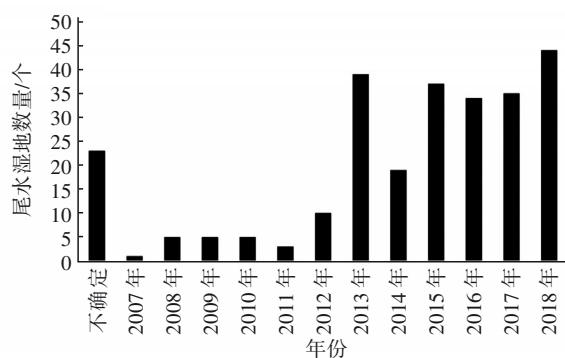


图2 我国每年新增尾水湿地数量

Fig.2 Annual quantity of new CWs for treating effluent from wastewater treatment plants in China

2.2 尾水湿地的工艺类型

对处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 及以上的尾水湿地工艺类型进行统计分析,结果见图3。我国尾水湿地主要由一种以上类型的湿地组合而成,其中水平潜流湿地占比最大,达31%,其次为垂直潜流湿地,占比27%,由表流或塘系统组成的尾水湿地只占12%。

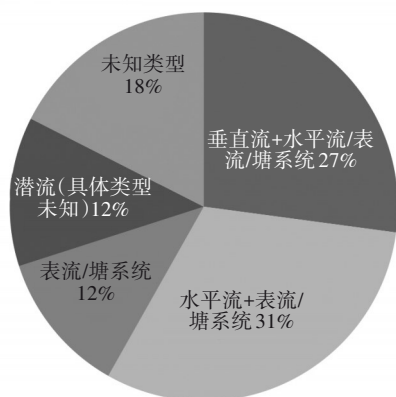


图3 我国不同类型尾水湿地所占比例

Fig.3 Percentages of different types of CWs for treating effluent from wastewater treatment plants in China

华北、东北地区以潜流湿地为主,占比达90%,其中,以垂直潜流湿地为主导的分别占20%、50%,以水平潜流湿地为主导的分别占70%和40%;华东地区是尾水湿地数量最多的地区,其尾水湿地的类

型分布相对均匀,以垂直流、水平潜流、表流为主导的湿地分别占19%、31%、18%;华中、华南、西南地区以垂直流为主导的湿地占比较高,分别达42%、53%、50%;西北地区以垂直流、水平潜流、表流为主导的湿地分别占16%、32%、8%。

尾水湿地类型的选择受处理效率、可利用土地、气候、经济等多种因素的影响。研究表明,由一种以上类型的湿地组合而成的复合湿地,因其能够提供不同的氧化还原条件,可弥补单一类型湿地对特定污染物去除能力不足的问题,因此其对COD、氮、磷等污染指标的去除效果优于单一类型的湿地^[7]。虽然我国尾水湿地的应用起步较晚,但是我国以及欧美等国已有很多处理其他类型污水的人工湿地可供参考。因此,我国尾水湿地多采用这种处理效果相对较好的复合湿地^[8-9]。研究表明,在2010年及之前,由于垂直流湿地的建设成本较高,我国的垂直流湿地主要分布于华南及北方沿海等经济较发达地区,但现在以垂直流为主的尾水湿地几乎分布于所有省份(市),且均占较高比例,说明随着我国经济的发展,各地在选择湿地工艺类型时的灵活性越来越大。

2.3 处理效果分析

对典型尾水湿地工程处理效果进行了分析^[8-18],结果见表1。由表1可知,以垂直潜流为主导的湿地不仅水力负荷最高,达 $0.31 \sim 1.11 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而且其对COD、氨氮、TP的处理效果均较好且最稳定,其他两种类型的湿地因其具体工艺流程的差别,对氨氮、TP的处理效果差异较大。但是这三种类型的湿地对COD的处理效果均较好,去除率主要为40%~70%,除个别湿地外,出水COD浓度基本满足地表水Ⅳ类标准。氨氮的去除效率因湿地类型的不同而有较大差异,以垂直流为主导的湿地对氨氮的去除率最高,达44%~92%,且出水氨氮浓度满足地表水Ⅲ类标准,以水平潜流和表流为主导的湿地对氨氮的去除率因具体工艺流程的差异而不同。TP的去除效果与氨氮类似,以垂直流为主导的湿地去除率较高且稳定(达50%~83%),出水浓度满足地表水Ⅳ类标准;以水平潜流为主导的湿地对TP的处理效果受具体的工艺流程影响较大,去除率为23%~90%;表流湿地对TP的处理效果是三者中最好的,达56%~90%,这可能也与本次统计数据中表流湿地较低的水力负荷有关。

表 1 典型尾水湿地工程对污染物的处理效果

Tab.1 Performance of typical CWs for treating effluent from wastewater treatment plants

人工湿地名称	工艺流程	规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	水力负荷/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	污染物去除率/%		
				COD	氨氮	TP
北京园博园人工湿地	复合垂直流湿地+表流湿地	10	0.31	30.05	73.17	49.5
辽宁莲花湖人工湿地	下行垂直流湿地+上行垂直流湿地+水平流湿地	5	0.65	40~60		51
成都肖家河中水湿地	垂直流湿地	10	1.11	58	77	75
东莞生态产业园人工湿地	生态氧化池+垂直流湿地	10	0.56	52.7	76.6	74
深圳观澜河人工湿地	曝气生态氧化池+生态砾石床+垂直流湿地	2	0.56	70.3	91.9	83.1
东阳市污水处理厂尾水湿地	生态氧化池+生态砾石床+下行垂直流湿地+水平流湿地+表流湿地	6	0.59	65.36~74.15	35.82~53.85	50~60
临安污水处理一厂尾水湿地	强化塘处理系统+水平潜流湿地	6	0.74	35~50	75	77~94
东汶河人工湿地	生态滞留塘+跌水复氧+两级水平潜流湿地+表流湿地	3			15~51	17.65~48
山东稻屯洼湿地	滞留塘+生态砾石床+表流湿地+水平潜流湿地	5	0.31	63	90	
洪泽尾水湿地北线	曝气塘+表流+兼性塘+水平潜流湿地+生态塘	6	0.097	72.99	32.8	23.40
洪泽尾水湿地南线	曝气塘+兼性塘+表流湿地+生态塘	4	0.067	60.45	7.6	96.43
山东平阴中水湿地	表流	4	0.016	46.85	50.35	56.64
南通市益民污水厂尾水生态湿地	兼氧生态塘+好氧生态塘+表流湿地	4.8		60.1	76.60	57.80

为了进一步了解复合湿地各功能单元对整个湿地各功能单元对污染物的去除贡献率^[8,11,13-14,19-20], 湿地污染物去除的贡献情况,分析了部分典型尾水结果见表2。

表 2 典型尾水湿地工程各功能单元对污染物的去除贡献率

Tab.2 Removal rate of contribution of each subsystem in typical CWs for treating effluent from wastewater treatment plants

湿地名称	规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	工艺单元	水力负荷/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	污染物去除贡献率/%			
				COD	氨氮	TN	TP
临安污水处理一厂尾水湿地	6	大棚系统(强化塘系统)	3.75	75	84	62	75
		多级串联生态廊道	1.2	16	8.4	18	14
		水平潜流湿地	4	9	7.6	20	11
东莞生态产业园人工湿地	10	生态氧化池	160	31.53	33.2		6.94
		垂直流湿地	0.57	68.47	66.8		93.06
深圳观澜河人工湿地	2	曝气生态氧化池	31.25	27.99	54.27		3.49
		生态砾石床	13.89	18.66	6.71		58.14
		垂直流湿地	0.60	53.35	39.02		38.37
辽宁莲花湖人工湿地	5	下行垂直流湿地	2.13	21.89		4.88	46.03
		上行垂直流湿地	2.09	21.79		19.57	6.98
		水平流湿地	2.14	14.17		20.97	-3.81
		表流湿地	0.11	42.14		54.54	50.79
桂林某污水厂尾水湿地	0.2	垂直流湿地	0.95	53.78	42.60	42.12	26.98
		水平潜流湿地	0.5	31.32	30.60	31.69	33.56
		氧化塘	0.09	15.33	27.52	25.99	39.68
深圳福田河尾水湿地	0.09	垂直流湿地	0.55	72.23	82.6	20.3	86.5
		生态塘	0.11	27.77	17.4	79.7	13.5

由表2可知,垂直流单元对COD、氨氮、TP的去26%~94%;位于水流末端的表流/塘系统,采用较低除贡献率均较高,分别达43%~73%、39%~83%、的水力负荷[约0.1 m³/(m²·d)]时,其对各污染物的

去除贡献率也较高,这与表1中低负荷的表流湿地/塘系统的污染物去除率较高相一致。在尾水进入主体湿地之前设置曝气、生物膜系统等强化氧化池预处理系统^[13-14],虽然其水力负荷很高,但能削减大量COD、氨氮,减轻进入主体湿地单元的污染负荷。

本次统计分析发现,我国关于尾水湿地运行效果的监测数据比较缺乏,且针对尾水湿地处理效果的研究多集中在湿地建成后的1~2年内,缺乏系统、长期的跟踪研究数据。为保证人工湿地的处理效果,将其他强化脱氮除磷技术与人工湿地技术耦合联用已成为近年来人工湿地去除污染物的研究热点,很多强化技术已用于尾水湿地。浙江临安、佛堂、义亭、苏溪、大陈等污水处理厂尾水湿地及洪泽尾水湿地中的表流单元均采用了仿生填料、人工曝气等强化系统的处理效果,且取得了较好的处理效果^[8-9]。

3 结语

人工湿地因其投资低、运营成本低、维护管理简单等特点,被广泛用于尾水深度净化处理。我国尾水湿地的应用虽然起步较晚,但受近几年国家及各省市发布的水环境治理政策驱动,其数量增长迅速。我国77%以上的省(市)有尾水湿地分布,其中山东、安徽、浙江尾水湿地的数量最多。

我国尾水湿地主要是由一种以上类型的湿地组合而成的复合湿地,以垂直潜流为主导的尾水湿地对COD、氨氮、TP的处理效果均较好且稳定,出水COD、氨氮、TP浓度满足地表水Ⅳ类标准。在尾水进入主体湿地之前设置采用了曝气、生物填料等进行强化净化的预处理系统,能大幅削减进入主体湿地的COD、氨氮污染负荷。但是,我国关于尾水湿地运行效果的监测数据比较缺乏,已有的监测数据主要集中在湿地建成后的1~2年内。为提升人工湿地脱氮除磷效率,将其他强化脱氮除磷技术与人工湿地技术耦合联用已成为近年来人工湿地的研究热点,多种强化技术已广泛应用于尾水湿地。

参考文献:

- [1] 汪锋,钱庄,张周,等. 污水处理厂尾水对排放河道水质的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(14): 65-68.
- WANG Feng, QIAN Zhuang, ZHANG Zhou, *et al.* Impact of effluent from municipal sewage plant on the water qualities of receiving river [J]. Journal of Anhui

Agricultural Sciences, 2016, 44 (14) : 65-68 (in Chinese).

- [2] 吴雪,何佳,徐晓梅,等. 滇池流域污水厂尾水污染负荷特征分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 69-73.
- WU Xue, HE Jia, XU Xiaomei, *et al.* Pollution characteristics of tail water from wastewater treatment plants in Dianchi watershed [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 69-73 (in Chinese).
- [3] 白献宇,胡小贞,庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 200-207.
- BAI Xianyu, HU Xiaozhen, PANG Yan. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 200-207 (in Chinese).
- [4] 潘宝. 南淝河主要水体污染物时空分布特征与污染源解析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- PAN Bao. Spatial Distribution Characteristics and Pollution Source Analysis of the Main Pollutants in Nanfei River [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [5] 谭茜. 环巢湖支流污染结构及治理方向[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 77-82.
- TAN Qian. Pollution structure and pollution control ideas of Chaohu Lake tributaries [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44 (17) : 77-82 (in Chinese).
- [6] QI C B, ZHU L, WU Y H, *et al.* Effect of sewage effluent on cumulative environmental effects in the receiving water [C]//Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of 2011 International Conference on Ecological Protection of Lakes-Wetlands-Watershed and Application of 3S Technology. Nanchang: Intelligent Information Technology Application Association, 2011.
- [7] WANG M, ZHANG D Q, DONG J W, *et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—a review [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57: 293-311.
- [8] 张长宽. 冬季保温和组合填料提高复合生态湿地去除尾水氮磷效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- ZHANG Changkuan. Study on the Effects of Heat Preservation in Winter and Complex Substrate on the Removal of Nitrogen and Phosphorus from Tail Water [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).

- [9] 杨峰, 曹勋, 李冬梅, 等. 生态工程在尾水深度处理中的应用——以洪泽尾水生态工程为例[J]. 四川环境, 2019, 38(1):132-139.
YANG Feng, CAO Xun, LI Dongmei, *et al.* Application of ecological engineering in advanced treatment of tailwater—taking Hongze tailwater ecological project as an example[J]. Sichuan Environment, 2019, 38(1):132-139(in Chinese).
- [10] 席婧. 北京园博湖人工湿地系统水质净化功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2015.
XI Jing. Research on Water Purification of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015 (in Chinese).
- [11] 张姝, 尚佰晓, 周莹. 莲花湖人工湿地对污水的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9):25-28.
ZHANG Shu, SHANG Baixiao, ZHOU Ying. Study on purification effect of sewage by constructed wetland in Lianhua Lake [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(9):25-28(in Chinese).
- [12] 朱卫. 垂直流人工湿地技术在中水回用工程中的应用实例[J]. 轻工科技, 2018(7):89-90, 92.
ZHU Wei. Application example of vertical flow constructed wetland in water reuse [J]. Light Industry Science and Technology, 2018 (7) : 89-90, 92 (in Chinese).
- [13] 廖波, 林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水, 2013, 29(16):74-77.
LIAO Bo, LIN Wu. Application of enhanced vertical flow constructed wetland to advanced treatment of effluent from wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (16) : 74-77 (in Chinese).
- [14] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水, 2009, 25(18):41-43.
YANG Lijun. Application of vertical flow constructed wetland to advanced treatment of tailwater from municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(18):41-43(in Chinese).
- [15] 苏展. 南方地区尾水人工湿地处理技术研究及应用[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
SU Zhan. Study and Application of Constructed Wetland Tailwater Treatment Technology in Southern China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [16] 邓培进. 人工湿地对城市生活污水处理厂尾水再净化研究[D]. 青岛:青岛大学, 2017.
DENG Peijin. Constructed Wetlands for Tailwater Discharged from Sewage Treatment [D]. Qingdao: Qingdao University, 2017(in Chinese).
- [17] 丁厚胜. 山东省典型人工湿地的调查与分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
DING Housheng. The Research and Analysis of the Classic Constructed Wetland in Shandong Province [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).
- [18] 孙久振, 刘志军, 贾西成. 人工湿地系统在二级污水处理厂尾水深度处理中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2009(21):121-122.
SUN Jiuzhen, LIU Zhijun, JIA Xicheng. Constructed wetlands for treatment of effluent from wastewater treatment plants in China [J]. China High Technology Enterprises, 2009(21):121-122(in Chinese).
- [19] 曹大伟, 沙玥, 金秋, 等. 多级复合型人工湿地工艺对污水厂尾水处理净化效果的试验研究[J]. 环境科技, 2019, 32(3):12-16.
CAO Dawei, SHA Yue, JIN Qiu, *et al.* Study on purification efficiency of multistage composite constructed wetland process on tail water of wastewater treatment plants [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(3):12-16 (in Chinese).
- [20] 段田莉, 成功, 郑媛媛, 等. 高效垂直流人工湿地+多级生态塘深度处理污水厂尾水[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11):5828-5835.
DUAN Tianli, CHENG Gong, ZHENG Yuanyuan, *et al.* Advanced treatment of tail water from sewage plant by high-efficiency vertical flow constructed wetland-multistage ecological ponds [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (11) : 5828-5835 (in Chinese).

作者简介:岳冬梅(1986—),女,河南商城人,博士,高级工程师,主要从事环境微生物污染控制技术研究工作。

E-mail:yuedongmei@shiw.com.cn

收稿日期:2019-10-28

修回日期:2019-11-15

(编辑:丁彩娟)