

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.070

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微曝气强化人工湿地处理生活污水试验研究

翟俊, 李岳

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:传统人工湿地的自然复氧速率较低,对N、P营养元素的去除效率普遍不高。设计开发了一种微曝气系统,以期强化人工湿地对生活污水中C、N和P的去除。通过改变曝气量(气水比)以及在不同气温条件下检测该人工湿地处理生活污水效果,详细分析了经微曝气系统强化后的人工湿地对COD、TP以及各氮素污染物在系统的沿程去除情况。结果表明,微曝气系统能显著增强湿地对生活污水的处理效果。随着气水比由0:1升高至4:1,该湿地系统对污水中的COD和TP的去除率分别从约80%和60%提高到约93%和79%,而在3:1时TN的去除率达到最高水平75%。低温对系统除碳脱氮影响较大,COD及TN去除率分别降低了约7%和8%。湿地污染物浓度沿程变化状况显示,污染物的去除过程主要发生在第2湿地系统。

关键词:人工湿地;微曝气;气水比;生活污水;污水处理

中图分类号:TU992.3;X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)06-0178-07

The effects of domestic wastewater treatment by micro-aerated hybrid constructed wetland

Zhai Jun, Li Yue

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The traditional constructed wetland is considered to have a low natural oxygen enrichment rate and low removal efficiency of N and P nutrients. Therefore, a micro-aerated constructed wetland was designed and developed to enhance the removal of C, N and P from domestic sewage in constructed wetlands. By changing the aeration amount (gas-water ratio) and detecting the effect of the constructed wetland on domestic sewage treatment under different temperature conditions, the COD, TP and various nitrogen pollutants along the system in the artificial wetland enhanced by the micro-aeration system were analyzed in detail. The results show that the micro-aeration system can significantly enhance the treatment effect of wetland on domestic sewage. With the gas-water ratio rising from 0:1 to 4:1, the COD and TP removal rate in the wetland increased from 80% and 60% to 93% and 79%. TN removal rate decreased after reaching the top of 75% at gas-water ratio of 3:1 condition. The low temperature also shows a great impact on the removal of carbon and nitrogen. Compared with high temperature, the remove rate of COD and TN decreased by 7% and 8% in the low temperature. The change of pollutant concentration along the wetland

收稿日期:2020-03-19

基金项目:国家自然科学基金(51878093)

作者简介:翟俊(1977-),男,教授,博士生导师,主要从事废水处理理论与技术研究,E-mail:zhaijun99@126.com.

Received:2020-03-19

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51878093)

Author brief:Zhai Jun (1977-), professor, doctoral supervisor, main research interests: theory and technology of wastewater treatment, E-mail:zhaijun99@126.com.

shows that the removal process of pollutants mainly occurs in the second wetland system.

Keywords: constructed wetland; micro-aeration; gas-water ratio; domestic sewage; sewage treatment

人工湿地作为一种高效、低成本的污水处理技术而备受关注,其主要通过湿地内植物、基质以及微生物的复杂物理、化学和生物过程来达到污水净化的效果^[1-2]。研究表明,人工湿地对污水中的悬浮颗粒和有机物的去除率可达到80%以上^[3-4]。

然而,由于传统人工湿地主要通过植物以及自然复氧,氧气传输速率极低,造成人工湿地对N、P营养元素的去除效率不高^[5],同时,占地面积也较大。研究表明,虽然目前垂直流人工湿地的氧气传输速率(17~25 g/m²d^[6])与水平潜流湿地(氧气传输速率1~8 g/m²d^[7-8])相比更高,但仍无法满足湿地系统中碳氧化和硝化等微生物过程对氧气的要求。Ye等^[9]发现垂直流人工湿地对N等营养元素的去除率仍很低,仅30%~40%左右。研究表明,增设曝气系统提高人工湿地污染物去除率是一种可行的方法。马剑敏等^[10]研究了曝气对垂直流和水平潜流人工湿地对污染物去除的影响,发现曝气显著提高了COD、TN、NH和NH₃-N的去除效率。Fan等^[11]在间歇曝气的条件下,发现潜流人工湿地可以高效去除污染物,其COD、NH₃-N和TN去除率与未曝气相比分别提高了12%、71%和52%。然而,目前该方面研究通常仅探讨了曝气人工湿地处理污水的效能,并未详细考察污染物沿程的去除规律,且大部分研究将人工湿地作为污水处理厂的后处理或者在人工湿地系统前端外接预处理构筑物,而对实际高浓度生活污水的处理效果研究较少。

笔者在传统垂直流人工湿地中增加微曝气系统,研究了不同气水比和温度条件下人工湿地处理生活污水的效能及污染物沿程去除规律,以期对微曝气人工湿地的相关研究和设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 生活污水来源及水质特征

污水来源为重庆大学学生宿舍污水,该污水未经化粪池,只经过沉淀池沉淀后直接通过水泵进入人工湿地处理系统,污水水质见表1。

表1 人工湿地进水水质

Table 1 The influent water quality of constructed wetland

水质指标	范围	平均值
COD/(mg·L ⁻¹)	195~248	215.4
TN/(mg·L ⁻¹)	60.92~71.35	66.06
TP/(mg·L ⁻¹)	5.16~6.46	5.90
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	50.32~58.42	54.96
NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	0.69~1.01	0.84
NO ₂ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	0.01~0.21	0.014
DO/(mg·L ⁻¹)	0.20~4.76	0.64
pH值	6.54~8.10	7.24
水温/°C	8.0~28.8	

1.2 试验装置

采用的曝气系统为微量曝气系统,曝气量较传统曝气减少约50%。图1为采用微曝气复合人工湿地系统,主要包括调节池、垂直流湿地主体、曝气系统、填料和植物。设立A、B两组系统,每组微曝气湿地由直径为1.3 m、高为1.5 m的3个加厚型塑料水桶串连组成,其有效水深为1 m。以普通碎石作为基质填料,粒径为1~2 cm,孔隙率为50%,每个塑料桶填充有1.1 m厚的砾石基质层。各桶均设取样口(A1~A9、B1~B9),水管位于桶底呈“王”字型排布,通过控制相应阀门调整桶内流态为下进上出。仅在第2湿地系统添加曝气装置,曝气采用穿孔曝气管,距水面1 m呈“王”字型排布,管径DN25,曝气孔孔径2~4 mm,孔间距1 cm,试验装置实物图如图2所示。A、B两组系统湿地植物分别采用风车草(*Cyperus alternifolius* L.)和黄花鸢尾(*Iris wilsonii* C. H. Wright),风车草取自于白市驿清河污水处理厂,黄花鸢尾购于花卉市场。

1.3 装置运行策略及水质分析方法

微曝气人工湿地采用连续流进水,装置水力停留时间4 d,进水流量21.08 L/h,曝气方式为连续曝气,不设置回流,每两天于8:00—10:00取水样进行分析测定DO、温度、pH、COD、TN、氨氮、亚硝氮、硝氮以及TP。测定方法均参考《水和废水监测分析方法》^[12]。有机氮浓度由TN浓度与无机氮(氨氮、

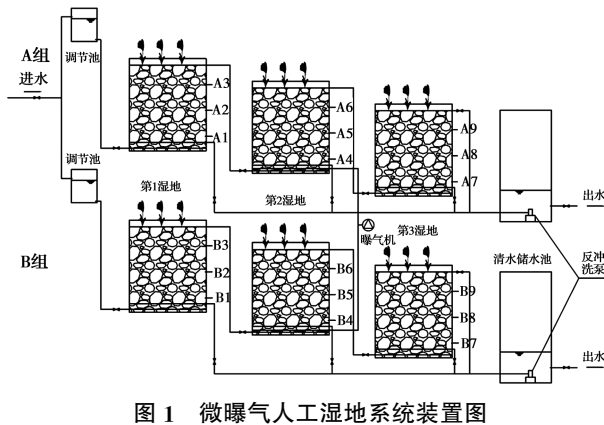


图 1 微曝气人工湿地系统装置图

Fig. 1 The micro-aerated hybrid constructed wetland



图 2 微曝气人工湿地系统实物图

Fig. 2 The physical map of micro-aerated hybrid constructed wetland

亚硝氮、硝氮)浓度相减所得。

2 结果与讨论

2.1 气水比对垂直流人工湿地去除污染物的影响

2.1.1 COD 的去除 图 3 为湿地系统出水 COD 浓度以及去除率随曝气量增加的变化情况。曝气显著增加了人工湿地对有机物的去除效果,随着曝气量的增加,A、B 两组 COD 去除率从未曝气条件下的 76.5%(A 组)和 79.1%(B 组)稳步增加到 92.7%(A 组)和 93.6%(B 组)。此外,黄花鸢尾组与风车草组的 COD 去除效率在各气水比条件下差异较小。一般来说,人工湿地对有机物的去除可通过基质过滤与截留、沉淀以及微生物降解等过程协同完成,但从动力学来看,微生物的降解速率远大于其他物理效应,因此,有机物在好氧条件下去除的速率更快。

许多研究也发现了曝气显著增强了人工湿地去除有机污染物的能力。Dong 等^[13]研究发现了垂直流人工湿地在连续曝气的条件下 COD 去除率较未曝气提高了约 15%。Fan 等^[11]研究了表面流人工湿地在间歇曝气与不曝气条件下污染物的去除状况,与未曝气相比间歇曝气的策略使得湿地 COD 去

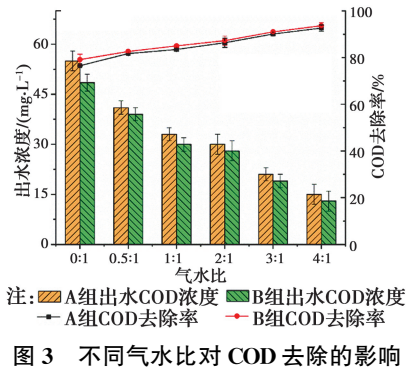


图 3 不同气水比对 COD 去除的影响

Fig. 3 The effects of different gas-water ratios on COD removal

除率提高了 13%。

2.1.2 除磷 图 4 为不同气水比条件下系统 TP 的去除情况。与 COD 相似,黄花鸢尾组去除效率略优于风车草组,且 TP 去除率随着曝气量的增加而上升。在未曝气的情况下湿地 TP 出水浓度高达 2 mg/L 左右(A、B 两组相应去除率为 59.4%和 61.6%),而随着气水比的升高,出水浓度逐渐降低,当气水比升高到 4:1 时,出水 TP 浓度降低至 1.2 mg/L(A 组)和 1.1 mg/L(B 组),此时去除率为 78.1%(A 组)和 80.0%(B 组)。由于曝气直接增加了湿地的溶解氧浓度,曝气使系统除磷能力提高,使得聚磷菌在好氧条件下过量吸收磷,此外,也有研究表明,溶解氧也能促进磷对底物的吸附和沉淀。Wang 等^[6]研究发现,与没有曝气相比,添加了曝气系统的人工湿地对 TP 的去除率从 3.5%提高到 70%左右,且去除率在时间跨度上表现得更加稳定。

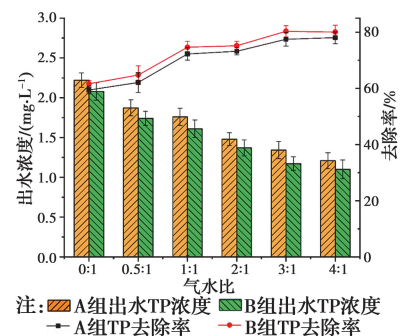


图 4 不同气水比对 TP 去除的影响

Fig. 4 The effects of different gas-water ratios on TP removal

虽然曝气可以增强系统对磷的去除,但对于连续流反应器来说,其各断面 TP 浓度在水流方向逐渐减小,在浓度差异驱动下基质对磷的吸附会减弱。所以,这是传统连续流反应器 TP 去除率无法进一

步提高的根本原因。普遍来看,传统连续流反应器对磷的去除效率维持在40%~80%之间^[14],主要随着反应器进水TP浓度波动。虽然TP去除率(60%~80%)处于较高水平,但从出水TP来看,即使气水比高达4:1,其TP出水浓度(>1.0 mg/L)仍未达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准(1.0 mg/L)。

2.1.3 脱氮 污水处理系统氮元素的去除主要包括微生物的氨化、硝化和反硝化及厌氧氨氧化和植物的吸收作用^[14]。由于研究的规模较小且植物数量有限,因此,植物的吸收作用可以忽略。另外,由于曝气系统的存在,厌氧氨氧化细菌很难存活,研究中的湿地系统氮元素的去除主要以微生物的氨化、硝化和反硝化作用为主。

如图5所示,在系统未曝气时,由于各反应器均处于缺氧状态(DO<0.5 mg/L),而缺少好氧/缺氧交替状态,体系硝化和反硝化效率偏低,此时人工湿地的TN去除率较低仅为46.1%(A组)和52.1%(B组)。随着曝气量的增加,系统TN的去除率显著提升,且在气水比为3:1时达到最高,TN去除率分别为75.0%(A组)和75.3%(B组)。再继续增大曝气量,TN去除率呈现下降趋势。

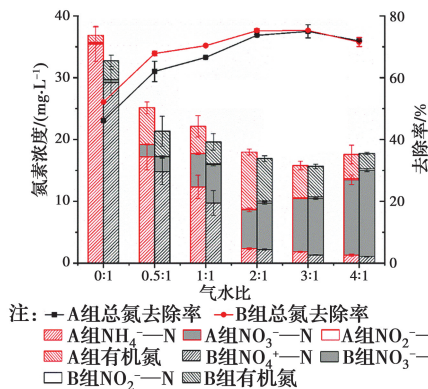


图5 不同气水比对各氮素去除的影响

Fig. 5 The effects of different gas-water ratios on nitrogen removal

曝气能显著影响依赖好氧的硝化作用,随着气水比的升高,人工湿地出水氨氮浓度持续下降,当气水比为3:1时,出水氨氮仅为1.85 mg/L(A组)和1.32 mg/L(B组),而在未曝气时出水氨氮高达35.5 mg/L(A组)和29.2 mg/L(B组)。Ouellet-Planmondon等^[15]研究发现,在对水平潜流人工湿地曝气后,曝气口处的可溶性氨氮较对照组(未曝

气)少,湿地末端硝氮含量与对照组没有显著差异。这说明人工湿地在曝气的情况下通过提高硝化反应提升了系统的TN去除效率。

与Ouellet-Planmondon等的研究不同的是,笔者发现,过量的溶解氧会严重影响人工湿地后部反硝化过程的进行。由图5可见,随着曝气量的增加,反应器出水硝态氮以及亚硝态氮发生累积。未曝气时出水亚硝氮和硝氮浓度占总氮浓度的1%左右,气水比达4:1时高达70%。传统污水生物处理中的氮素去除依赖厌氧条件下的反硝化过程。监测体系内部溶解氧显示,当气水比为4:1时,第3湿地下部进水DO高达2.0 mg/L,严重破坏了其厌氧环境,从而抑制微生物反硝化的过程进行使得出水亚硝氮和硝氮的累积。

因此,合适的气水比是微曝气人工湿地保持高效率去除氮素污染物的基础,过低无法达到去除预期,而过高会影响系统的反硝化效率,笔者以气水比3:1作为最优条件进行后续试验。

2.2 温度对垂直流人工湿地去除污染物的影响

前述研究表明,当气水比为3:1时,湿地对污染物的去除效率最高。选取最佳气水比3:1作后续研究条件。由于季节温度变化对人工湿地系统对污染物的净化影响较明显,监测比较了该人工湿地在6月(温度22~25℃)和12月(温度9~11℃)两月的运行情况,其结果如图6所示。

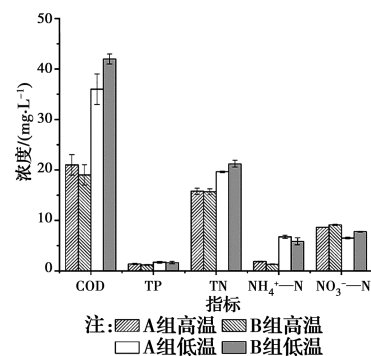


图6 温度对微曝气人工湿地的影响

Fig. 6 The effects of temperature on micro-aerated hybrid constructed wetland

由图6可以看出,温度对系统去除污染物效率影响较显著,尤其以脱氮除碳较为明显。与高温时候相比,低温出水COD和TN浓度分别升高了15 mg/L(A组COD)、23 mg/L(B组COD)和

3.84 mg/L(A 组 TN)、5.54 mg/L(B 组 TN),相应去除率下降了 6.37%(A 组 COD)、9.99%(B 组 COD)和 6.20%(A 组 TN)、8.99%(B 组 TN),虽然低温 TP 出水浓度较高温升高了 4.9 mg/L(A 组)、4.5 mg/L(B 组)但其去除率仅降低了 1.75%(A 组)和 1.94%(B 组),表明温度对 TP 影响较小。温度影响微生物的生长速率,进而对污染物去除率产生影响。从低温和高温的出水氨氮浓度的差异以及硝氮浓度的相近可以看出,温度对总氮的去除主要影响硝化过程。对于不同植物来说,风车草组对温度的影响没有黄花鸢尾组明显,其对低温的适应能力更强一些,因此,部分低温地区的人工湿地可以多种植风车草。

2.3 最佳工况条件下微曝气垂直流人工湿地污染物沿程去除规律

为了探究最佳气水比条件下污染物的沿程去除规律,在最佳气水比(3:1)的条件下监测了该湿地沿程的各污染物浓度。

图 7(a)为湿地在最佳气水比下的沿程 COD 浓度变化。A1/B1 至 A3/B3 取样点为第 1 湿地,A4/B4 至 A6/B6 取样点为第 2 湿地,A7/B7 至 A9/B9 取样点为第 3 湿地。由图可知,COD 浓度沿程逐渐降低,COD 浓度在第 1 与第 2 湿地的降解速率较快,6 号取样点 COD 去除率已达到 73.2%(A 组)和 79.6%(B 组),占总 COD 去除的 80%以上,而第 3 湿地对总 COD 去除仅贡献了 20%。焦义利等^[16]比较了垂直流人工湿地采取起端曝气和不曝气的情况下对 COD 的去除情况,发现 COD 的去除集中发生在安置有曝气器的底部,且与未曝气相比,COD 在反应器底部的去除率提升了 17%。值得注意的是,试验中曝气系统安装于第 2 湿地,经测量 DO 处于 1.5~3 mg/L 之间,而第 1 湿地 DO 小于 0.5 mg/L,处于缺氧状态,因此,有机污染物在第 1 湿地的去除主要以基质的拦截作用为主。而第 2 湿地由于曝气作用,溶解氧大于 1.2 mg/L,此时,有机物在好氧细菌的作用下被快速分解。而当污水进入第 3 湿地时 COD 浓度已较低,去除效率不高。

湿地在最佳气水比条件下的 TP 沿程去除情况如图 7(b)所示。可以看出,TP 沿程浓度逐渐降低,且在第 2 湿地处下降最为明显,约 40%~45%的

TP 均在第 2 湿地去除,而第 1、3 湿地对 TP 的去除作用较小。污水处理系统中磷元素的去除主要通过聚磷菌、植物和基质的吸收和吸附。Wang 等^[6]研究发现,TP 去除速率随着水流方向呈现降低的趋势,其在曝气口附近 TP 的去除较其他部分效率高。由此可以看出,TP 主要通过聚磷菌在第 2 湿地的好氧条件下过量吸磷而得到去除的,第 1、3 湿地由于缺乏溶解氧,TP 主要通过植物和基质去除,去除效果较微生物作用低,仅占总体 TP 去除的 20%左右。

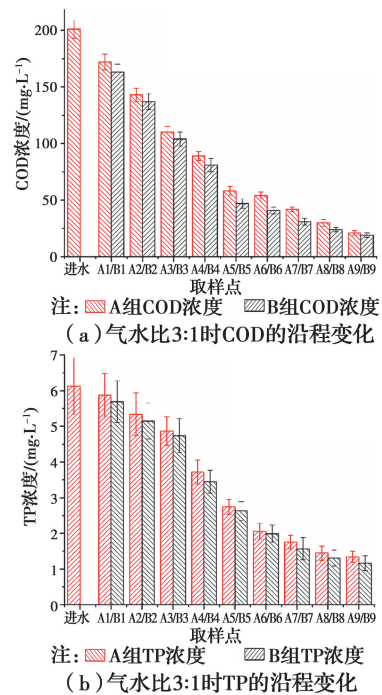


图 7 气水比 3:1 时 COD 和 TP 的沿程变化

Fig. 7 The variation of COD and TP along the wetland in gas-water ratio of 3:1

湿地氮元素的沿程分布及去除情况如图 8 所示。氮素去除过程较复杂,整体来看,TN 浓度沿程逐渐降低。第 1 湿地中 TN 去除主要以基质吸附,植物吸收等作用为主,因此,TN 去除效率较低,仅占总体的 10%~14%,其随湿地植物不同而波动。第 2 湿地是持续曝气状态,池体 DO 处于 1.5~3 mg/L 之间,氨氮去除、硝氮累积明显,表明其中硝化反应占据主导地位。一般来说,DO 会抑制反硝化细菌的生长,从而表现出较低的 TN 去除率,但在处于好氧条件下的第 2 湿地观察到了较高的 TN 去除率,其 TN 去除占总体去除的 75%~83%,具体随植物不同而不同。有研究也发现了曝气提高了 TN 去除率^[17-18],使得系统 TN 明显减少。蒲帅等^[17]研

究发现,当曝气系统位于下层时,TN去除率比其位于中层和上层时的高。钱涌^[18]发现,垂直流曝气人工湿地 TN 去除在底部 20 cm 处就已去除完毕。试验中的曝气系统就是位于下层,因此,推测可能在系统中发生了好氧反硝化过程。此外,由于人工湿地基质以及植物的存在,池体内部流态较为复杂,造成 DO 分布不均,可能出现部分缺氧区域发生反硝化反应,造成了 TN 的减少。第 3 湿地出水硝氮略有减少,虽然有反硝化过程,但由于 COD 和 TN 浓度仅 42.0 mg/L(A 组 COD)、31.0 mg/L(B 组 COD)和 14.9 mg/L(A 组 TN)、16.9 mg/L(B 组 TN),系统处于碳源缺乏状态,导致反硝化效率偏低,其 TN 去除仅占总去除率的约 7%~12%,随湿地植物不同而波动。

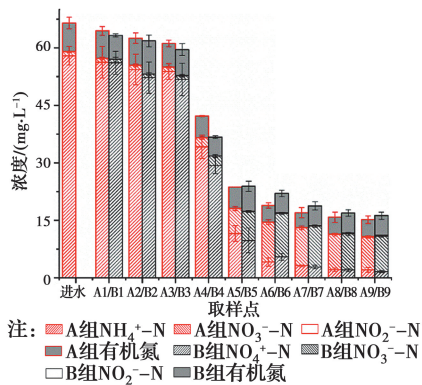


图 8 气水比 3:1 时氮素浓度的沿程变化

Fig. 8 The variation of nitrogen concentration along the wetland in gas-water ratio of 3:1

3 结论

设计的微曝气系统能够有效提高人工湿地内的 C、N 和 P 的去除效果。合理的气水比是系统保持高效率去除污染物的基础,过度的曝气影响系统的反硝化过程,造成 TN 去除率的下降。在气水比为 3:1 的优化条件下,湿地系统对 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 90.1%(A 组)和 91.0%(B 组)、75.0%(A 组)和 75.3%(B 组)、77.5%(A 组)和 80.3%(B 组)。种植黄花鸢尾的湿地组在各气水比的条件下的污染物去除率均略优于风车草组。低温对 COD 和 TN 的去除率影响显著,而对 TP 的去除率影响相对较小。该人工湿地系统中 COD、TP 和 TN 的沿程去除特性具有相似规律,即在增设微曝气装置的第 2 湿地去除率最高。

参考文献:

- [1] 曹笑笑, 吕宪国, 张仲胜, 等. 人工湿地设计研究进展 [J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 121-128.
- CAO X X, LU X G, ZHANG Z S, et al. Research progress on the design of constructed wetlands [J]. Wetland Science, 2013, 11(1): 121-128. (in Chinese)
- [2] 梁康, 王启烁, 王飞华, 等. 人工湿地处理生活污水的研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 422-428.
- LIANG K, WANG Q S, WANG F H, et al. Research progresses in domestic wastewater treatment by constructed wetlands [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 422-428. (in Chinese)
- [3] TANG X Q, HUANG S L, 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, 2008, 197(1-4): 61-73.
- [4] ZHAI J, XIAO J, RAHAMAN M H, et al. Seasonal variation of nutrient removal in a full-scale artificial aerated hybrid constructed wetland [J]. Water, 2016, 8(12): 551.
- [5] FOLADORI P, RUABEN J, ORTIGARA A R C. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater [J]. Bioresource Technology, 2013, 149: 398-405.
- [6] WANG X O, TIAN Y M, ZHAO X H, et al. Effects of aeration position on organics, nitrogen and phosphorus removal in combined oxidation pond-constructed wetland systems [J]. Bioresource Technology, 2015, 198: 7-15.
- [7] ROSSMANN M, MATOS A T, ABREU E C, et al. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128: 912-919.
- [8] COOPER P. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates [J]. Water Science and Technology, 2005, 51(9): 81-90.

- [9] YE F X, LI Y. Enhancement of nitrogen removal in wetery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1043-1050.
- [10] 马剑敏, 张永静, 马顷, 等. 曝气对两种人工湿地污水净化效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(2): 315-321.
MA J M, ZHANG Y J, MA Q, et al. Effects of aeration on sewage purification in two kinds of constructed wetlands [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(2): 315-321. (in Chinese)
- [11] FAN J L, ZHANG B, ZHANG J, et al. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141: 117-122.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
SEPA. Determination methods for examination of water and wastewater [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)..
- [13] DONG H Y, QIANG Z M, LI T G, et al. Effect of artificial aeration on the performance of vertical-flow constructed wetland treating heavily polluted river water [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4): 596-601.
- [14] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Science of The Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [15] 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.
- [16] 焦义利, 张荣新, 傅金祥, 等. 起端曝气对垂直潜流人工湿地运行效果的研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(4): 401-407.
JIAO Y L, ZHANG R X, FU J X, et al. Research on the effect of vertical flow constructed wetlands at front aeration [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(4): 401-407. (in Chinese)
- [17] 蒲帅, 徐栋, 童伟军, 等. 曝气位置对垂直潜流人工湿地脱氮效率研究[J]. *工业水处理*, 2019, 39(1): 91-95.
PU S, XU D, TONG W J, et al. Research on the influence of aeration position on the denitrification rate of the vertical flow constructed wetlands [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(1): 91-95. (in Chinese)
- [18] 钱涌. 人工增氧型湿地反硝化机理初步研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2018.
QIAN Y. A preliminary study on denitrification mechanism of artificial aerated wetlands [D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

(编辑 胡玲)