

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.016

表面流人工湿地提升河道水体感官品质研究

刘 洁¹, 袁文璟¹, 唐 利², 何圣兵^{1,2}

(1. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海生态景观水环境工程技术研究中心, 上海 200031)

摘 要: 采用黄菖蒲表面流人工湿地处理河道水体,探究表面流湿地在三个水深(25、45、65 cm)条件下对河道水感官品质提升效果的影响。结果表明,黄菖蒲湿地出水浊度由 35 NTU 降至 5 NTU 以下,色度由 23 度降至 1 度以下,透明度由 35 cm 提升至 160 cm 以上,且河道进水 TN 和 TP 均得到有效削减。在水深为 45 cm 时,湿地出水感官品质较好,营养盐去除率较高,因此选择 45 cm 为表面流湿地最佳水深。在此水深条件下,对湿地进出水进行粒径分析、三维荧光分析可知,河道水体中的颗粒粒径范围较广,且颗粒粒径较大,而湿地出水中颗粒物粒径基本小于 1 100 nm。原水色度较高时,原水中富里酸和类蛋白的含量较高,在湿地出水中这些物质得到了较好的削减。综合粒径分析、三维荧光分析得到,20 株/m² 是本研究中黄菖蒲湿地的最佳种植密度。

关键词: 河水; 表面流人工湿地; 色度; 透明度; 感官品质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0095-07

Research on Improving Sensory Quality of River Water by Surface Flow Constructed Wetland

LIU Jie¹, YUAN Wen-jing¹, TANG Li², HE Sheng-bing^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Landscape Water Environment, Shanghai 200031, China)

Abstract: River water was treated by a surface flow constructed wetland planted with yellow iris, and effect of water depth (25 cm, 45 cm and 65 cm) on water sensory quality improvement was explored. Effluent turbidity of yellow iris wetland decreased from 35 NTU to less than 5 NTU, chromaticity decreased from 23 degree to less than 1 degree, transparency increased from 35 cm to more than 160 cm, and the influent TN and TP were both effectively reduced. When water depth was 45 cm, the sensory quality of the wetland water was better, and the removal efficiency of nutrient was higher. Therefore, 45 cm was selected as the optimal water depth of the surface wetland. Under this water depth, water quality of the influent and effluent was analyzed by particle size analysis and three-dimensional fluorescence analysis. It was found that the particle size range of the raw water was wider and the particle size was larger, but the particle size in effluent of the wetland was less than 1 100 nm. When the original chromaticity was high, fulvic acid and proteinoid in the raw water were high, and they could be

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205003-03); 上海市科委科技创新行动计划(18DZ2254000)

通信作者: 何圣兵 E-mail: heshengbing@sjtu.edu.cn

effectively reduced in the wetland. Considering the results of particle size analysis and three-dimensional fluorescence analysis, 20 plants/m² was chosen to be the optimal yellow iris planting density in this study.

Key words: river water; surface flow constructed wetland; chromaticity; transparency; sensory quality

近年来,国家对环境保护投入的力度越来越大,也加强了对城市河道的治理,一些城市河道的水质也逐渐提升到了Ⅴ类水及以上的水平。在这些河道水体中,有机物、氮、磷和重金属的含量并不高,但是水体的感官效应不佳^[1],与民众的期望值有较大的差距,还有待于进一步提升。

水体感官效应差主要是因为河水的浊度、悬浮物和色度较高,导致水体看起来浑浊、有颜色且透明度不高^[2]。针对此类现象,目前国内外的处理方法主要是采用絮凝沉淀或絮凝气浮技术,即通过投加絮凝剂来去除水中的悬浮物质,从而降低其浊度,改善其感官品质。化学法的优点是去除污染见效快,但缺点是投加的絮凝剂有可能造成二次污染,具有一定的生态风险,且消耗大量的化学药剂增加了运行成本^[3]。因此寻求绿色环保、经济有效的处理方法非常必要。

人工湿地作为一种新型的生态净化技术,因其具有处理效果好、工艺简单、维护方便等特点^[4],在水处理领域得到了广泛的关注和应用。目前,国内外对于人工湿地技术的应用主要集中在雨水径流、污水厂尾水、生活污水、有机废水、氨氮废水和重金属废水处理,且主要研究人工湿地对这类污水中的无机盐、有机物和营养盐的去除^[5]。但是对于人工湿地改善河道水体感官品质的研究还很少。由于表面流人工湿地具有投资少、运行成本低且不存在堵塞问题等优点,因此本研究采用表面流湿地对低品质河道水进行处理,着重关注其对水体感官品质的提升,以期寻求合适的工艺运行条件,为全国具有类似实施条件地区的河道水体品质提升提供借鉴和参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置与工艺流程

试验在上海交通大学植物园河道水体中开展,试验装置为表面流人工湿地反应器及贮水箱,均放置于自然环境中。试验装置如图1所示,一共设置4组单体水槽来模拟表面流人工湿地,反应器高度

为1.0 m,每个反应器的平面尺寸为30 cm × 100 cm,反应器前端设有进水区,平面尺寸为30 cm × 10 cm,反应器后端设有不同高度的出水口,以设置不同水深条件。

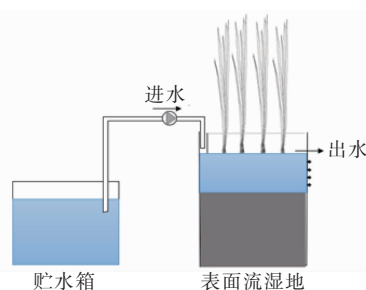


图1 试验装置

Fig.1 Experimental device

试验处理对象为植物园内河道水,将河道水用水泵打到贮水箱中,然后再通过蠕动泵将水送入模拟湿地反应器中。

1.2 试验运行

本试验为期1年(2018年7月—2019年7月)。试验期间河水的主要水质:浊度为16~35 NTU,色度为20~35 度,透明度为32~36 cm,叶绿素a为12~20 μg/L。湿地植物采用挺水植物黄菖蒲,4个反应器依次为空白对照组,种植4、6、8株黄菖蒲的试验组,水力停留时间为3 d。本试验的主要考察工况条件为水深,通过调节不同水深(25、45、65 cm),测量进出水的各项指标,通过对比分析来寻求适宜水深与种植密度,并研究此水深条件下湿地提升水体感官品质指标的作用机理。

1.3 分析仪器与分析方法

试验中总磷和各形态氮的测定均按照国标分光光度法,仪器为岛津UV-1800紫外分光光度计;浊度测定仪器为HACH-2100Q;色度测定仪器为陆恒生物台式色度仪LH-SD500;温度和DO的测定仪器为HACH-HQ40d;叶绿素a测定仪器为植物分类荧光仪PHYTO-PAM;TN和TOC测定仪器为Analytik Jena multi N/C TOC/TN分析仪;粒径分析测定仪器为Beckman纳米粒度分析仪Delsa Nano

C;三维荧光光谱图测定仪器为日立荧光分光光度计 F-7000;透明度采用塞氏圆盘法测定。

2 结果与讨论

2.1 系统对感官指标及营养盐去除效果

2.1.1 对色度的去除效果

水体色度较高时,会严重影响水体的感官效果。水中色度又可分为表色度与真色度^[6],表色度主要由水中悬浮颗粒物形成,与水体浊度有关。而真色度主要由水中的叶绿素 a 及腐殖酸类物质产生。图 2 为不同水深时进水与各组反应器出水色度。可以看出,进水色度范围为 22~23 度,在水深为 25 cm 时,空白反应器出水色度为 2.4 度,4、6、8 株黄菖蒲反应器出水色度约为 0.7~0.8 度;水深为 45 cm 时,空白反应器出水色度为 2.2 度,4、6、8 株黄菖蒲反应器出水色度约为 0.5~0.9 度;水深为 65 cm 时,空白反应器出水色度为 3 度,4、6、8 株黄菖蒲反应器出水色度约为 0.9~1.2 度。从去除率来看,水深为 25 cm 和 45 cm 时,种植黄菖蒲反应器去除率均可达到 97%,略高于空白对照组(90%);水深为 65 cm 时,空白对照组去除率为 86%,黄菖蒲试验组去除率均为 95% 以上。可以看出,当把水深从 25 cm 升至 45 cm 时,对出水色度及色度去除率并无多大影响。将水深升至 65 cm 后,出水色度会有所增加,去除率也会有所下降。

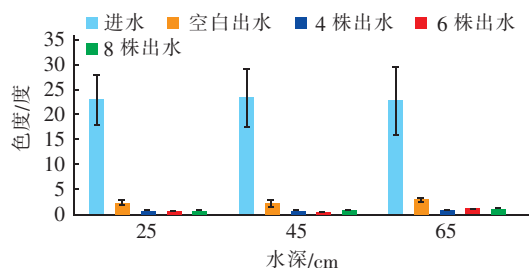


图 2 不同水深下表面流湿地进、出水色度

Fig. 2 Influent and effluent chromaticity of surface flow constructed wetland under different water depths

2.1.2 对透明度的改善效果

水体透明度直接影响水体的感官效果,当水体中泥砂、胶体、微生物、悬浮物、有机质等物质含量较高时就会产生浑浊现象,水的透明度便会降低。图 3 为不同水深时进水与各组反应器出水透明度。可以看出,进水透明度均为 35 cm 左右,当水深为 25、45、65 cm 时,空白反应器出水透明度分别为 75、105、95 cm,即水深为 45 cm 时空白反应器出水透明

度最高;而对于种植植物的反应器出水来说,水深为 25、45、65 cm 时,出水透明度均能达到 160 cm。

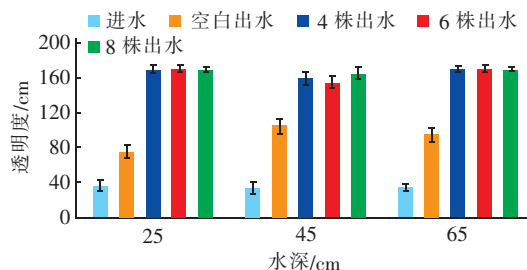


图 3 不同水深下表面流湿地进、出水透明度

Fig. 3 Influent and effluent transparency of surface flow constructed wetland under different water depths

2.1.3 对浊度的去除效果

浊度是水体重要的感官指标,是由于不溶性物质的存在而引起水体透明度降低的一种量度^[7]。主要与水中悬浮物质及胶体物质的含量有关,不同水深条件下进、出水浊度如图 4 所示。

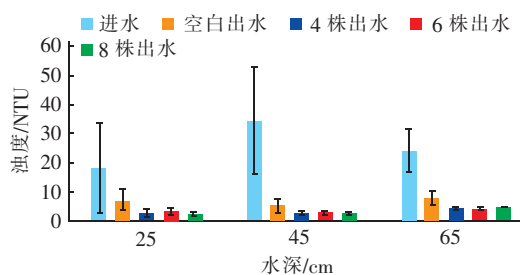


图 4 不同水深下表面流湿地进、出水浊度

Fig. 4 Influent and effluent turbidity of surface flow constructed wetland under different water depths

当水深为 25、45、65 cm 时,4 组反应器出水浊度都较低,其中空白反应器出水浊度在 6~7 NTU 左右,湿地出水浊度在 2~5 NTU 范围内波动。提高水深后,尽管进水浊度变化较大,但出水浊度都维持在较低水平。比较不同水深条件下种植黄菖蒲的反应器,水深为 45 cm 时,进水浊度为 35 NTU,出水为 5 NTU 以下,浊度去除率最高,可达 90%;水深为 25 cm 和 65 cm 时,浊度去除率均为 80% 左右。

2.1.4 对叶绿素 a 的去除效果

叶绿素是植物光合作用中的重要光合色素,通过测定浮游植物叶绿素,可掌握水体的初级生产情况,在环境检测中,可将叶绿素 a 含量作为水体富营养化的指标之一^[8]。叶绿素 a 指标能衡量水中藻类含量,当水中藻类含量多时,水的色度也会受到影响。图 5 为不同水深时进水与各组反应器出水叶绿

素 a 含量。可以看出,进水叶绿素 a 含量约为 12 ~ 18 $\mu\text{g/L}$,水深为 25 cm 时,空白反应器出水叶绿素 a 含量约为 4 $\mu\text{g/L}$,其余黄菖蒲反应器出水叶绿素 a 含量为 2 ~ 4 $\mu\text{g/L}$ 不等;水深为 45 cm 时,空白反应器出水叶绿素 a 含量约为 6 $\mu\text{g/L}$,其余菖蒲反应器出水叶绿素 a 含量为 3 ~ 4 $\mu\text{g/L}$ 不等;水深为 65 cm 时,空白反应器出水叶绿素 a 含量约为 6 $\mu\text{g/L}$,其余菖蒲反应器出水叶绿素 a 含量约为 4 $\mu\text{g/L}$ 。可见,种植植物对降低水中叶绿素 a 有较好的正向作用,这是因为水生植物会影响水中藻类的光照条件,且植物会产生化感物质,从而抑制藻类的生长^[9]。

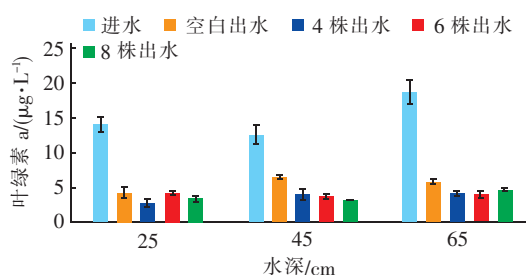


图5 不同水深下表面流湿地进、出水叶绿素 a 含量

Fig. 5 Influent and effluent Chl-a of surface flow constructed wetland under different water depths

2.1.5 对 TN 的去除效果

图6为不同水深时进水与各个反应器出水 TN。可见,进水 TN 为 1.2 ~ 1.3 mg/L ,当水深 25 cm 时,空白反应器出水 TN 为 0.72 mg/L ,其余黄菖蒲反应器出水 TN 为 0.5 ~ 0.6 mg/L ;水深为 45 cm 时,空白反应器出水 TN 为 0.6 mg/L ,各组黄菖蒲反应器出水 TN 都较低,约为 0.4 ~ 0.5 mg/L ;当水深为 65 cm 时,出水 TN 较前两者稍高,空白反应器出水为 0.93 mg/L ,其余黄菖蒲反应器出水约为 0.7 mg/L 。

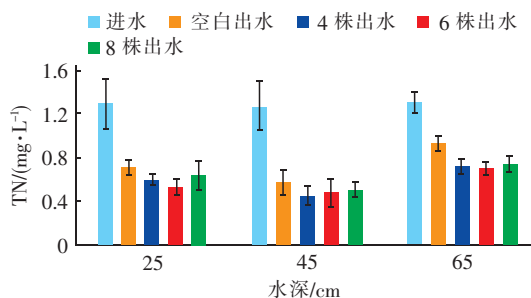


图6 不同水深下表面流湿地进、出水 TN

Fig. 6 Influent and effluent TN of surface flow constructed wetland under different water depths

计算不同水深下各个反应器的 TN 去除率,水深为 25 cm 时,空白反应器的 TN 去除率为 44.6%,

其余黄菖蒲反应器的 TN 去除率为 50.6% ~ 58.8%;水深 45 cm 时,空白反应器的 TN 去除率为 53.8%,其余黄菖蒲反应器的 TN 去除率为 60.0% ~ 63.9%;水深 65 cm 时,空白反应器的 TN 去除率为 28.8%,其余黄菖蒲反应器 TN 去除率为 42.8% ~ 45.8%。有研究表明种植芦苇的表面流人工湿地的 TN 去除率为 34.3% ~ 42%^[10]。在本研究中,水深 45 cm 时,黄菖蒲反应器的 TN 去除率最高。

2.1.6 对 TP 的去除效果

图7为不同水深时进水与各组反应器出水 TP。可见,进水 TP 为 0.3 ~ 0.4 mg/L 、水深为 25 cm 时,4 组反应器出水 TP 为 0.1 ~ 0.15 mg/L ,去除率为 52.7% ~ 65.9%;当水深为 45 cm 时,4 组反应器出水 TP 为 0.1 ~ 0.18 mg/L ,去除率为 44.8% ~ 63.6%;当水深为 65 cm 时,4 组反应器出水 TP 较高,为 0.2 ~ 0.3 mg/L ,去除率为 20.9% ~ 46.4%。有研究表明,种植菖蒲的人工湿地对磷的平均去除率为 63.2%^[11]。对比空白组与种植黄菖蒲的试验组,水深较小时,空白反应器出水 TP 较低,这是因为此时空白反应器中的溶解氧高于其他种植植物的系统,这有利于系统内好氧微生物对水中磷的吸收^[12];水深较大时,种植菖蒲反应器出水 TP 比水深小时稍高,但数值也较低,这是因为植物根系能够向水中分泌一定的溶解氧,有利于泥水界面处好氧微生物对水中磷的吸收^[13]。对比不同水深时出水 TP,可以看出水深为 25 cm 和 45 cm 时,出水 TP 较低,65 cm 时出水 TP 最高。

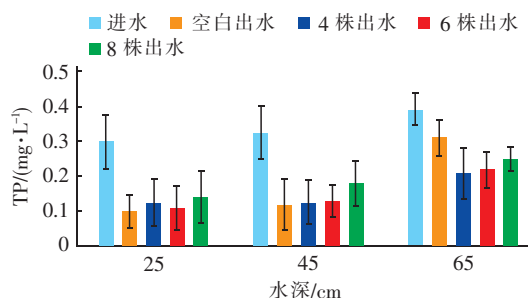


图7 不同水深下表面流湿地进、出水 TP

Fig. 7 Influent and effluent TP of surface flow constructed wetland under different water depths

2.2 去除浊度和色度的机理分析

综合以上数据分析,综合比较得出,表面流湿地的最佳水深为 45 cm,在此基础上,进一步开展进出水中颗粒物粒径分布和三维荧光分析,来探究湿地系统对河道原水浊度和色度的去除机理。

2.2.1 颗粒物粒径分布

对 45 cm 水深下的河道进水与 4 组反应器出水进行粒径分析,结果如图 8 所示。可以看出,进水中颗粒物粒径全部分布在 600 ~ 1 900 nm,大部分颗粒物粒径为 750 ~ 1 550 nm,占总体颗粒物的 83.6%;空白反应器出水颗粒物粒径大部分分布在 800 ~ 1 300 nm,占总体颗粒物的 98.5%;4 株黄菖蒲反应器出水颗粒物粒径全部分布在 400 ~ 1 400 nm,大部分颗粒物粒径大小为 500 ~ 1 000 nm,占总体颗粒物的 84.9%;6 株黄菖蒲反应器出水颗粒物粒径全部分布在 450 ~ 1 600 nm,大部分颗粒物粒径大小为 500 ~ 1 100 nm,占总体颗粒物的 79.6%;8 株黄菖蒲反应器出水颗粒物粒径全部分布在 450 ~ 1 300 nm,大部分颗粒物粒径大小为 500 ~ 1 000 nm,占总体颗粒物的 92.3%。进水中的颗粒物粒径范围较广,且颗粒物粒径较大,其次是空白出水。对比空白组和种植黄菖蒲的试验组,看出空白组出水颗粒物粒径较大,这也解释了原水浊度较高,而黄菖蒲反应器出水浊度较低的现象。因为悬浮在水中的固体颗粒物和胶体会阻碍光线透过水体,从而形成浊度指标^[14]。当原水进入反应器后,一些粒径较大的颗粒物可以通过沉淀作用与水体分离,因此出水颗粒物粒径比进水粒径要小。当水中种植黄菖蒲时,植物茎叶会对颗粒物有吸附拦截作用,且菖蒲茎叶在水中并不是完全直立状态的,因此种植黄菖蒲的反应器就类似于斜板沉淀池^[15],加速了颗粒物沉淀效率,所以种植植物反应器的出水浊度较低。

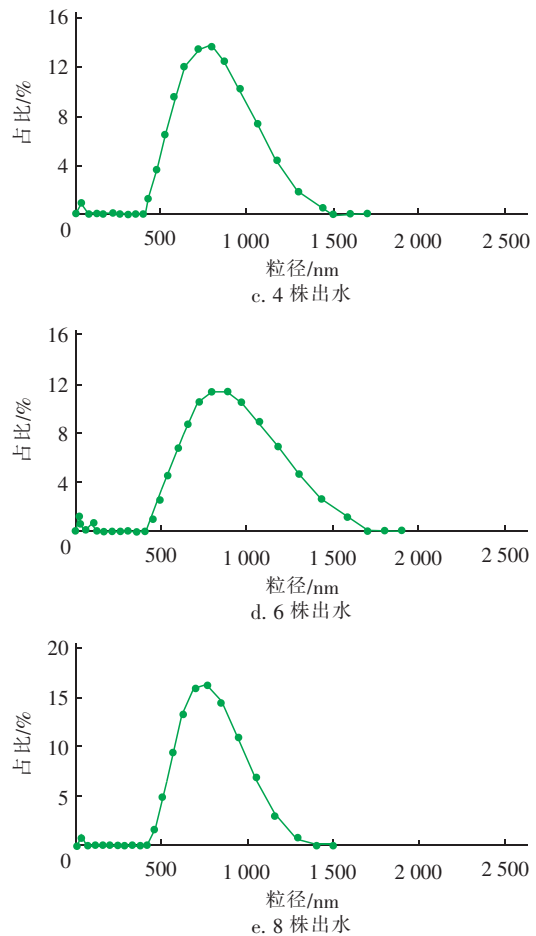
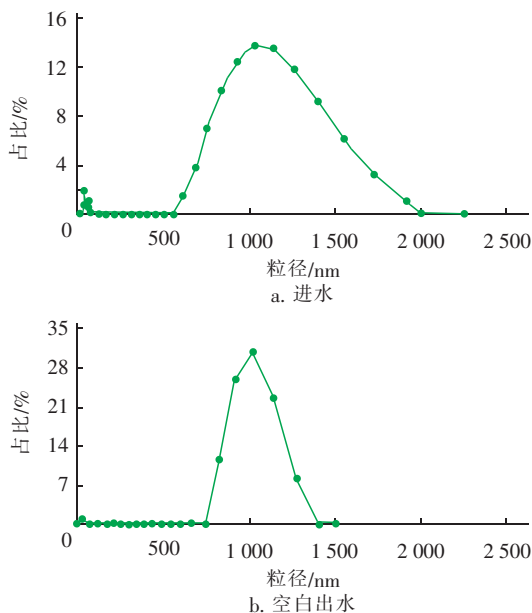


图 8 进水与各组反应器出水颗粒物粒径分布

Fig. 8 Particle size distribution of influent and effluent of each reactor

2.2.2 三维荧光分析

对 45 cm 水深下的河道进水与 4 组反应器出水进行三维荧光分析,分析其中富里酸和类蛋白的荧光强度^[16]。选用与富里酸(激发波长 E_x /发射波长 E_m 为 310 ~ 360 nm/370 ~ 450 nm)和类蛋白(激发波长 E_x /发射波长 E_m 为 240 ~ 270 nm/300 ~ 350 nm)相关性较好的区域,显示其三维荧光光谱图,结果如图 9 所示。可见,进水中富里酸含量较高,其次是空白反应器出水,而种植黄菖蒲的反应器出水中富里酸含量较低。对于类蛋白来说,也有相应的规律。水的真色度与水中腐殖酸、富里酸和类蛋白含量有关,原水经过反应器时,植物的存在及水中微生物作用能使一部分大分子富里酸和类蛋白转变为小分子物质,进而降低水的真色度。同时对比 3 组种植黄菖蒲的反应器可知,种植 6 株黄菖蒲的反应器(折算种植密度为 20 株/ m^2)出水富里酸和类蛋白

含量都最低。通过颗粒物粒径分析可知,水中颗粒物经过反应器会沉淀且被植物拦截吸附,从而出水中颗粒物减少,进而使水的表色度降低,因此进水色度较高而出水色度较低。

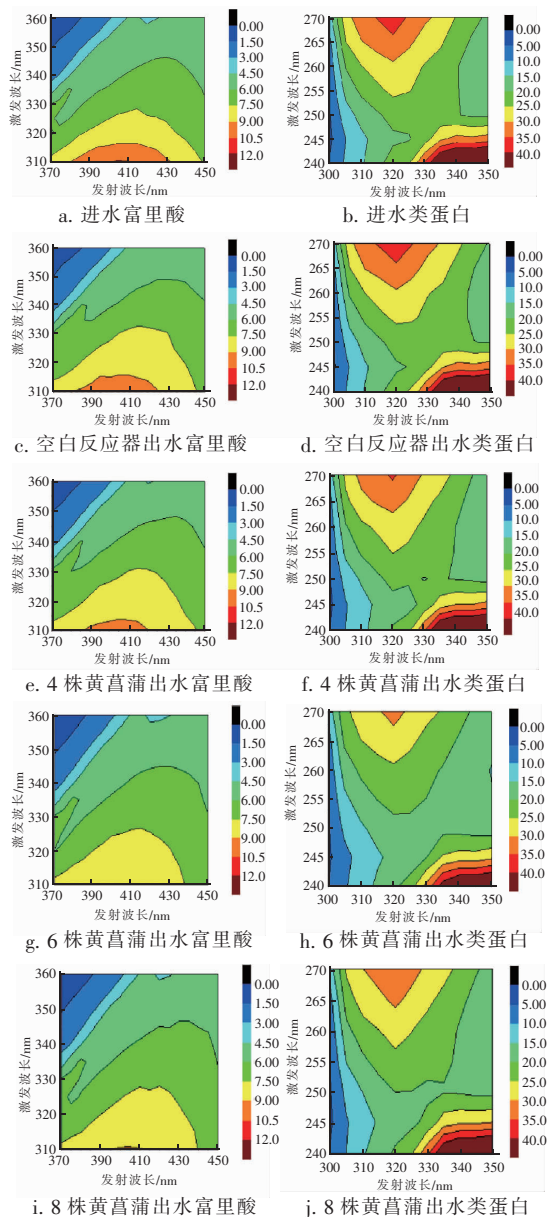


图9 进水与各组反应器出水三维荧光光谱图

Fig. 9 Three-dimensional fluorescence spectrum diagram of influent and effluent of each reactor

3 结论

① 采用种植黄菖蒲的表面流人工湿地处理河道水时,出水浊度由35 NTU降至5 NTU以下,色度由23度降至1度以下,Chl-a降至 $5 \mu\text{g/L}$ 以下,透明度由35 cm提升至160 cm以上,水体感官品质有了较大幅度的提升。

② 对比研究了黄菖蒲表面流湿地水深在25、45、65 cm条件下的出水感官品质指标和营养盐去除效率,选择45 cm为最佳水深条件。

③ 在水深45 cm下,对湿地进出水进行颗粒物粒径分析和三维荧光分析可知,黄菖蒲对水中的颗粒物有吸附拦截作用,出水中的颗粒物粒径相比原水更小,从而体现出对浊度的去除效果;黄菖蒲对原水中的富里酸和类蛋白也有较好的去除,从而体现出对色度的去除效果。综合颗粒物粒径分布、三维荧光分析结果,20株/ m^2 黄菖蒲为较为合适的表面流人工湿地植物的种植密度。

参考文献:

- [1] 王航. 浅谈城市河道水环境综合整治[J]. 环境工程, 2018, 36(6): 42-46.
WANG Hang. Discussion on comprehensive improvement of water environment in urban river[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(6): 42-46 (in Chinese).
- [2] 郭红兵, 陈荣, 王晓昌. 基于感官指数的城市水体景观功能评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6229-6234.
GUO Hongbing, CHEN Rong, WANG Xiaochang. Evaluation of landscape function of urban lakes based on sensory index[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6229-6234 (in Chinese).
- [3] ZHAO C, ZHENG H, GAO B, et al. Ultrasound-initiated synthesis of cationic polyacrylamide for oily wastewater treatment enhanced interaction between the flocculant and contaminants[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 42: 31-41.
- [4] VITOR C, DANIELE V V, DIEDERIK P L, et al. Influence of recirculation over COD and $\text{N} - \text{NH}_4$ removals from landfill leachate by horizontal flow constructed treatment wetland[J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21(10): 1-7.
- [5] 丘好华. 人工湿地及其在生活污水氮磷去除方面的应用分析[J]. 节能与环保, 2019(6): 105-106.
QIU Haohua. Constructed wetlands and their application in nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2019(6): 105-106 (in Chinese).
- [6] 卫聪, 徐喆, 吴剑勇. 原水色度测定的研究[J]. 给水排水, 2017, 43(增刊): 13-14.
WEI Cong, XU Zhe, WU Jianyong. Study on the

- determination of colorimetry of raw water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43 (S1): 13 - 14 (in Chinese).
- [7] 刘伟,潘杨,黄勇,等. 浊度与悬浮颗粒携带污染物之间的规律研究[J]. 环境工程, 2016, 34(6): 14 - 17, 22. LIU Wei, PAN Yang, HUANG Yong, *et al.* Regularity between turbidity and pollutants carried by suspended particles[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(6): 14 - 17, 22 (in Chinese).
- [8] LEVASSEUR W, TAIDI B, LACOMBE R, *et al.* Impact of seconds to minutes photoperiods on *Chlorella vulgaris* growth rate and chlorophyll a and b content[J]. Algal Research, 2018, 36: 10 - 16.
- [9] 谢树莲,王捷,刘琪,等. 植物化感作用控藻研究进展[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 652 - 660. XIE Shulian, WANG Jie, LIU Qi, *et al.* Research progresses on plant allelopathic effects for algal control[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 652 - 660 (in Chinese).
- [10] 张葆华,吴德意,叶春,等. 不同水深条件下芦苇湿地对氮磷的去除研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 4 - 6, 39. ZHANG Baohua, WU Deyi, YE Chun, *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus by reed wetland under different hydrologic conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(7): 4 - 6, 39 (in Chinese).
- [11] 赵杨,周素颖,罗晓,等. 水生植物对北方城市人工湿地中氮磷净化效果的研究[C]//中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集. 深圳: 中国环境科学学会, 2015: 241 - 249. ZHAO Yang, ZHOU Suying, LUO Xiao, *et al.* Study on purification effect of aquatic plants on nitrogen and phosphorus in constructed wetlands in northern cities [C] // Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of 2015 Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences. Shenzhen: Chinese Society of Environmental Sciences, 2015: 241 - 249 (in Chinese).
- [12] BOUGARNE L, ABBOU M B, HAJI M E, *et al.* Consequences of surface water eutrophication: remedy and environmental interest [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 13: 654 - 662.
- [13] WANG J L, FU Z S, QIAO H X, *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1392 - 1402.
- [14] SLOMBERG D, OLLIVIER P, MICHE H, *et al.* Nanoparticle stability in lake water shaped by natural organic matter properties and presence of particulate matter[J]. Science of the Total Environment, 2019, 656: 338 - 346.
- [15] ZHANG R J, SUN Z M, CUI B, *et al.* Improvement on algae and turbidity removal in an integrated flotation and sedimentation unit using side flow-inclined plate settlers: evidence from a full-scale field experiment[J]. Journal of Water Supply Research and Technology, 2018, 67(1/2): 84 - 98.
- [16] COLIN A S, STIG M, RASMUS B. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, 82(3/4): 239 - 254.

作者简介:刘洁(1996 -),女,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail:liu-jiehq@sjtu.edu.cn

收稿日期:2019-08-30

修回日期:2019-09-28

(编辑:孔红春)

弘扬宪法精神,树立宪法权威