

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.005

重度污染源汇入湖泊综合治理工程的实践

张华俊^{1,2}, 李遥洁², 李森², 许玉凤¹, 李秋华³

(1. 黔南民族师范学院 旅游与资源环境学院, 贵州 都匀 558000; 2. 深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518040; 3. 贵州师范大学 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为探索出一套有效的重度污染源汇入湖泊治理技术体系,创新性应用“污染源前处理+湖体水生态系统构建”综合技术体系于工程实践,采用修建初期雨水调蓄池、生活污水截流进污水厂、污水厂尾水人工湿地提标、湖体构建水生态系统等措施对海口市某湖泊进行综合治理,并从化学及生物指标等方面进行全面评价。实践结果表明,前处理工程使外源污染负荷得到极大降低,可为后续生态修复创造条件,直排污水通过污水厂处理后,氨氮和总磷浓度分别降低了63.55%和84.2%,尾水经过人工湿地处理后氨氮浓度降低了59.5%, COD_{Mn} 浓度降低了74.5%。水生态系统构建2个月后,水体清澈见底,主要水质指标明显优于治理前,3个月后水生态系统持续稳定,水体溶解氧浓度逐渐上升,氨氮浓度持续下降,总磷浓度也有一定程度的降低,浮游动物生物量及种类显著增加,实现了污染湖泊治理的目标。此外,配合应急措施构建的水生态系统能在雨季一定雨污溢流后保持较稳定状态,具备一定抵抗外界干扰的能力。

关键词: 富营养化; 污染负荷; 综合治理; 水质提升

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0028-07

Comprehensive Treatment of a Lake with Input of Severe Pollution Source

ZHANG Hua-jun^{1,2}, LI Yao-jie², LI Sen², XU Yu-feng¹, LI Qiu-hua³

(1. School of Tourism and Resource Environment, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China; 2. Shenzhen Techand Ecology & Environment Co. Ltd., Shenzhen 518040, China; 3. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Comprehensive technical system of “contamination source pretreatment and lake water ecosystem construction” was innovatively applied in engineering practice to explore a set of effective heavy polluted lake governance technology system. A series of comprehensive treatment measures such as construction of initial rainwater storage tank, sewage interception into wastewater treatment plant, treatment of tail water by constructed wetland and construction of water ecosystem were used in a lake in Haikou City, and the treatment effect was comprehensively evaluated from chemical and biological indicators. The pretreatment projects greatly reduced the external pollution load and created conditions for

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1612442); 贵州省科技平台及人才团队计划项目(黔科合平台人才[2018]5805); 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2017]032、黔教合 KY 字[2016]055)
通信作者: 李秋华 E-mail: qiu-hua2002@126.com

the subsequent ecological restoration. After the direct discharged wastewater was treated by the wastewater treatment plant, the concentration of $\text{NH}_3 - \text{N}$ and TP was reduced by 63.55% and 84.2%, respectively. The concentration of $\text{NH}_3 - \text{N}$ and COD_{Mn} in tail water decreased by 59.5% and 74.5% after treated by constructed wetland. After 2 months of water ecosystem construction, the water was clear, and the main water quality indicators were significantly better than those before treatment. After three months, the water ecosystem continued to be stable, DO gradually increased, $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration continued to decrease, TP concentration also decreased to a certain extent, and the zooplankton biomass and species increased significantly, indicating that the lake governance goal was achieved. In addition, the water ecosystem built with emergency measures could maintain a relatively stable state after receiving a certain amount of rainwater and sewage overflow in wet season, and had a certain ability to resist external disturbances.

Key words: eutrophication; pollution load; comprehensive treatment; water quality improvement

我国大多数湖泊已出现不同程度的富营养化问题^[1],尤其是城市公园景观湖泊,随着富营养化进程加速,湖泊生态系统结构和功能发生退化,如藻类恶性增长、沉水植物消亡、水生生物多样性丧失、水质恶化等,水体从清水草型生态系统转变为浊水藻型生态系统^[1],严重影响湖泊景观与人居环境质量,降低城市生态旅游形象。富营养化水体治理方法可分为两类,一类是环境工程法,即用水处理技术降低湖泊入水的N、P和有机污染物浓度等,如截污分流和污水集中处理,主要用于控制点源污染;一类为生态修复法,即改善水体生态系统和周围环境、减少不利理化因素,如集水区绿化、改善土地利用方式、前置库、半自然湿地系统、水生植被恢复、生物操纵等,其目的是控制面源污染和加快湖泊生态恢复速度。目前,国内富营养化湖泊治理多为单一工程手段,缺乏综合技术体系。

笔者以生态学为基础^[2],为探索出一套有效的重度污染源汇入湖泊治理技术体系,创新性应用“污染源前处理+湖体水生态系统构建”综合技术于海口某城市湖泊治理中,从化学及生物指标角度,分析了各技术环节实施前后水质的变化特征,探究该技术体系在有污水汇入湖泊治理工程中的作用与效果,旨在为城市同类型湖泊富营养治理提供参考和工程应用示范。

1 材料与方法

1.1 工程湖泊概况

该湖泊位于海口市某公园内,工程湖泊为大湖的前置湖(如图1实线部分所示)。水面面积约为

50 000 m^2 ,平均水深为1.6 m,该湖沿岸存在3处雨水溢流口和1座污水处理厂(3 000 m^3/d)尾水排放口,接纳流域内70%以上入湖外源污染。

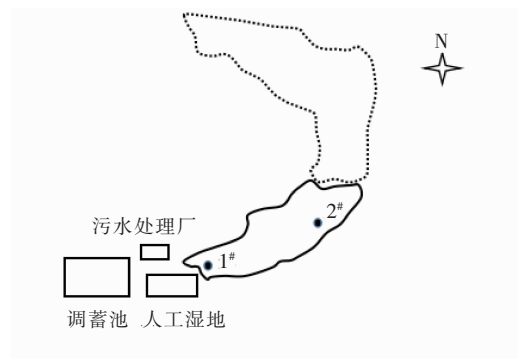


图1 湖体形状与采样点布设

Fig. 1 Sampling points location and shape of lake

治理前水葫芦肆意生长,同时该湖存在鱼类养殖情况,水质为劣V类,水体发绿浑浊,水生植物缺失,具体水质:入湖直排生活污水的氨氮、总磷、 COD_{Mn} 、透明度分别为21.9 mg/L、6.33 mg/L、56.5 mg/L、0.1 m;入湖污水厂排水的相应水质指标分别为8 mg/L、1 mg/L、60 mg/L、清澈透明;入湖湿地出水的相应水质指标分别为3.24 mg/L、1.54 mg/L、15.2 mg/L、清澈透明;修复前1#采样点的相应水质指标分别为4.01 mg/L、0.98 mg/L、33.6 mg/L和0.35 m;修复前2#采样点相应水质指标分别为4.22 mg/L、0.72 mg/L、41.6 mg/L、0.3 m。为恢复湖体健康水生态系统、增强湖泊综合服务功能和价值,于2017年10月开始对湖体进行综合治理。

1.2 工程总体思路、框架及工程量参数

本工程的总体思路是采用修建初期雨污水调蓄

池、生活污水截流、污水厂尾水人工湿地提标入湖、湖体构建清水型水生态系统等技术措施,综合治理污染湖泊,如图2所示。

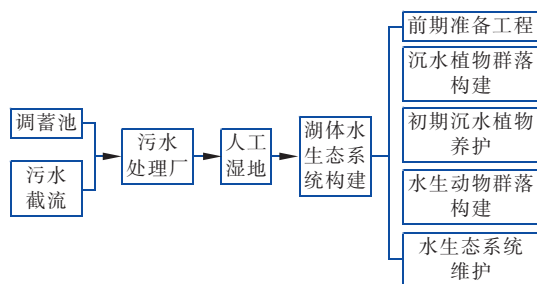


图2 工程设计总体思路

Fig.2 Overall ideas of engineering

修建初期雨污水调蓄池:在上游雨污合流汇合处修建调蓄池来暂时存储初期雨污水(调蓄量按8 mm降雨量设计可储存9 000 m³水量),后期定期泵入污水处理厂处理后排出。

生活污水截流:将上游入湖生活污水截流进污水处理厂,污水量约为600 m³/d。

污水厂尾水提标:污水厂采用混凝沉淀+速分生物处理工艺,尾水(3 000 m³/d)首先进入砾石床,再进垂直流(2 000 m²)—表面流(3 000 m²)人工湿地,最后进水生植物塘(2 000 m²)深度净化后进入湖体。

清水型水生态系统构建:包括前期准备、沉水植物群落构建、初期沉水植物养护、水生动物群落构建及水生生态系统维护。

① 前期准备包括降低水位、移除杂鱼、底泥改良等。工程前期对湖体进行抽水,待水位降到几十厘米后,对黑臭底泥区域采用生石灰(用量为100 g/m²)、微生物菌剂等进行底泥改良,同时为保障前期沉水植物成活,转移水中绝大多数大型杂鱼与食草性鱼类。

② 沉水植物群落构建:本工程选取苦草(100 棵/m²)和水蕴草(3~5 丛/m²,10 棵/丛)作为主要植物品种,并零星种植马来眼子菜、菹草以及穗花狐尾藻(0.1~0.5 棵/m²),种植方法采用扦插法和抛种法。由于湖底地势不同,沉水植物种植存在差异,因此分批、分区域种植以后逐步抬水,最终实现全湖覆盖。

③ 初期植物养护:种植初期需对水生植物进行精心养护,持续关注水质、藻相、水草附着藻、杂鱼

等影响因素,尤其注意水浑、青苔、水绵及藻类暴发情况,出现问题及时处理。

④ 水生动物群落构建:待水生态植物成活后,分批、分区域投放螺类(50 kg,200 个/kg)及肉食性鱼类(黑鱼,共计100 尾,250~500 g/尾),结合湖体原有水生动物构建水生动物群落。

⑤ 水生态系统维护:如遇突发性雨污水涌入导致水质较差时,进行应急处理,快速提高水体透明度,保障沉水植物进行光合作用。

1.3 分析项目及方法

根据湖体大小、地形及地理位置,在湖泊内工程区设2个采样点(1[#]、2[#])。工程实施前后(2017年10月—2018年2月),每天采用黑白盘法测定水体透明度,酸碱度计测定水体pH值。TP、氨氮、COD_{Mn}均按地表水水质标准GB 3838—2002的相关方法进行测定。浮游植物样品采用38 μm浮游生物网于水平及垂直方向进行拖网采集,水体固定后在光学显微镜下进行定性分析。浮游动物定性样品使用64 μm孔径的浮游生物网于水平及垂直方向进行拖网,浮游动物定量样品用5 L的采水器从表层0.5 m处每隔0.5 m采至底部,当场用孔径38 μm的浮游生物网过滤浓缩,样品用5%福尔马林进行固定保存后在光学显微镜下进行鉴定。

2 结果与讨论

2.1 前处理措施工程效果

初期雨水携带地表污染物与污水混合后污染负荷较高,直排入湖加重治理难度,通过初期雨水截流入调蓄池,定期输入污水处理厂处理后再排入湖泊将大大削弱对湖体的污染冲击。同时生活污水直排也加重了对湖泊系统的干扰。浑浊的生活污水(透明度为0.1 m)先通过截流进入污水处理厂进行处理,各项水质指标均有显著降低,其中NH₃-N和TP的浓度分别降低了63.55%和84.2%,出水水质清澈,尾水经过人工湿地以后又大大降低了外源污染负荷对湖泊系统的冲击,其中NH₃-N降低了59.5%,COD_{Mn}降低了74.5%。尤其是对水生植物生长具有毒害作用的NH₃-N浓度大幅降低,经过污水厂及组合人工湿地处理的污水,其水体清澈见底,氨氮及透明度均是水生植物生长抑制的关键因子,对关键因子的改善会增大水生植物的存活概率,对成功构建水生植物群落有利。人工湿地广泛应用于污水深度处理领域,是削减二级出水中氮磷污染物的有效

工艺,可大幅削减进入受纳水体的污染负荷,在一定程度上能保障受纳水体的水质需求^[3]。组合人工湿地是将不同类型的人工湿地串联起来共同发挥作用的一种组合工艺,对尾水中污染物的去除率较高^[4]。本工程采用组合人工湿地处理污水厂尾水能够大大降低湖体外源污染负荷,可为后续湖体水生植物的存活创造条件。

构建后恢复水生植物群落,必须与生态系统结构改造及外部环境改善结合起来,否则水生植物很难恢复成功,难以抵抗外部胁迫^[2]。底泥营养盐可在一定环境条件下向上覆水释放^[5],在富营养化水体中当蓝藻暴发时,由于蓝藻光合作用使水体 pH 值升高,底泥营养盐释放增加^[3]。仅靠沉水植物刚开始难以控制藻类生长,必须先原位削减水体内部营养负荷,改善前期环境条件。原位处理指原地采用物理、化学或生物法对底泥进行处理,减少底泥污染物含量或降低污染物溶解度、毒性和迁移性,并通过一系列方法阻止污染物向上覆水释放。应用较广泛的氧化剂主要有生石灰、过硫酸盐、过氧化钙、双氧水、硝酸钙及硫酸盐等^[5]。本工程主要采用生石灰及过氧化钙对污染严重的黑臭底泥进行处理,杀菌消毒的同时起到抑制污染物释放的作用。

2.2 综合治理前后水质变化

图3为1[#]采样点水质的变化。

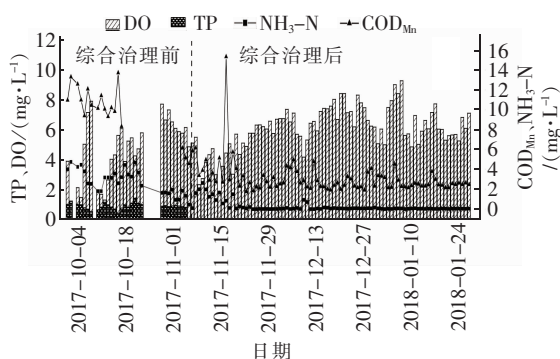


图3 1[#]采样点水质的变化

Fig.3 Change of water quality of 1[#] site

由图3可以看出,较于治理前水体,实施湖体综合治理工程以后(沉水植物种植从2017年11月11日开始),1[#]采样点溶解氧浓度总体上呈增加的趋势,基本在6 mg/L,最高达到9.28 mg/L。水体透明度自工程实施后便大幅提升,由20~40 cm至清澈见底。水生态系统构建完成后,该采样点NH₃-N及COD_{Mn}浓度迅速下降,尤其是NH₃-N浓度从最

高的4.98 mg/L降低至0.01 mg/L左右,达到Ⅰ类水标准;COD_{Mn}浓度从13.7 mg/L降至2.16 mg/L左右,并长期维持在稳定状态。综合指标达到并长期稳定保持在Ⅴ类水标准以上,但TP的变化不明显,由于TP不纳入黑臭水体考核指标,故后期并未进行监测。沉水植物经过3个月的良好生长,受污水体从“藻型浊水态”成功转变为“草型清水态”,全湖清澈见底。

图4为2[#]采样点水质的变化。

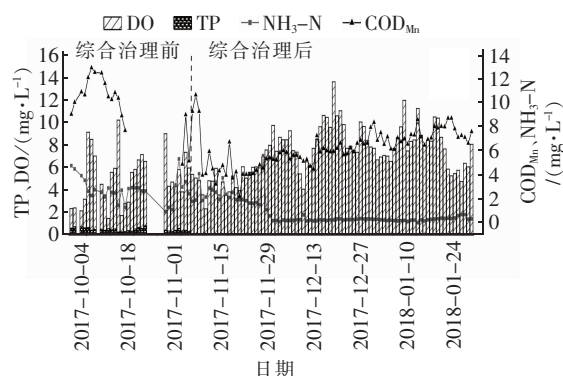


图4 2[#]采样点水质的变化

Fig.4 Change of water quality of 2[#] site

从图4可知,工程运行以后,2[#]采样点溶解氧浓度整体也呈增加的趋势,达到5 mg/L以上并长期保持稳定,最高达到13.53 mg/L,较1[#]采样点高,这与2[#]采样点沉水植物生物量较高有关。水体透明度自工程运行后随着沉水植物的成活慢慢提升至清澈见底,一方面是由于沉水植物对底泥悬浮的固定,另一方面是因为鱼类的移除导致浮游动物生物量增加进而抑制了藻类的生长。水生态系统构建完成后,该采样点NH₃-N浓度也快速下降,从最高的5.32 mg/L降低至0.2 mg/L左右,达到Ⅱ类水标准;采用综合治理后,COD_{Mn}浓度出现一定程度的增加,监测期内从最低值3.73 mg/L增至8.72 mg/L左右,这与水体中沉水植物生物量增加导致的水体有机质浓度增加有关,但也能保持在Ⅳ类水标准,相对于治理前有了较大程度降低。综合指标达到并长期稳定保持在Ⅴ类水标准以上,但TP浓度变化不明显,相对于1[#]采样点有较大程度降低。2[#]采样点水质指标浓度总体上高于1[#]采样点,这与2[#]采样点处有一溢流口有关,治理前长期的污水排入导致该处底泥黑臭后污染物持续释放,加之水体流动性差,致使水体污染程度相对较高。

通过污水前处理加生态修复方法,可在短时间内迅速改善湖泊水质,在流域较难截污和全湖水质短期内难迅速改善的情况下,具有快速见效作用,本工程中水生态系统的构建大大改善了湖泊水质。研究表明,在氮浓度低于 60 mg/L 时,苦草对水体中的氮具有较强的净化作用,去除率高达 10.09%^[6]。在春、夏实验中,30 d 以后金鱼藻对总磷的去除率分别达到 91.75% 和 92.44%,同时苦草和菹草对 TP 也有较好的去除效果^[7]。工程应用表明,植物生态塘对水体中 TN、TP、NO₃⁻-N、COD 的平均去除率分别为 42.5%、42.8%、52.9%、52.6%^[8]。上述研究均表明,通过沉水植物群落的构建,能够大大降低水体中营养物浓度。

2.3 生态修复前后浮游生物组成的变化

生态修复工程运行前,该湖泊由于富营养化严重,水体呈绿色,浮游植物生物量巨大,其中以微囊藻属、二角盘星藻、空星藻属、纤维藻属等蓝绿藻为主。生态修复工程运行以后,由于浮游动物捕食和沉水植物的抑制作用,生物量大大降低,主要以颗粒直链藻、舟形藻属、肋缝藻、曲壳藻属等硅藻组成。工程运行前该湖泊因为鱼类养殖原因,罗非鱼等鱼类数量巨大,作为鱼类饵料的浮游动物生物量较低。生态修复工程运行后,由于鱼类的转移及底泥改良等措施的作用,降低了对浮游动物的捕食,浮游动物丰度显著提升,主要种类有臂尾轮虫、多肢轮虫、异尾轮虫、剑水蚤、秀体蚤、腔轮虫、桡足幼体等,其中轮虫的丰度为 25~1 150 ind./L,枝角类的丰度为 50~3 550 ind./L。在沉水植物茂盛处浮游动物的丰度远远高于开阔水域,主要是由于沉水植物提供了躲避捕食与食物的场所,浮游动物的种类及生物量的增加均说明了水质的好转。生物操纵作为一种措施,在湖泊修复中具有重要作用。经典的生物操纵理论主要是通过调控食物链,即增加肉食性鱼类减少滤食性鱼类来调节浮游动物的结构和种群数量,强调用浮游动物对藻类牧食来控制水体藻含量,从而改善水质^[1]。本工程中由于转移了鱼类,导致浮游动物生物量大幅增加,从而增强了对浮游藻类的牧食,有效控制了藻类暴发。

水生植物对维持淡水生态系统的结构和功能至关重要^[9],其功能主要有与藻类竞争矿质营养、对藻类的遮光作用、释放化感物质以抑制藻类生长、水生植物根际微生物作用^[10]。除上述作用外,还可使

底泥的氧化还原电位(ORP)升高和 pH 值下降,对上覆水和底泥磷起到稳定作用,降低水体悬浮物浓度,有利于底泥再沉降,提高水体透明度。因此水生植被重建已作为富营养化水体生态修复工程的重要手段并具有显著效果^[2,10]。生态修复工程运行前,该湖泊沉水植物缺失,由于沉水植物的强大功能,工程的首要作用是构建水生植物群落,恢复以沉水植物为主的水生植被,可有效降低 N、P 营养素的循环速度,控制浮游植物过度增长^[11-12]。本工程沉水植物群落的构建采用了苦草、水蕴草、马来眼子菜、菹草、金鱼藻等(见表 1),这些沉水植物经过一定时间的生长生物量增加迅速,最后覆盖整个湖泊。前期工程主要种植苦草和水蕴草,两者的种植密度分别为 100 和 30~50 棵/m²,种植面积比为 1:3,覆盖全湖面积 50% 左右,初期各沉水植物生物量较低。冬季气温较低时,零星补种菹草、马来眼子菜、金鱼藻等适合低温的品种,随着时间的推移,各沉水植物生物量逐渐增加。当温度升高后,低温品种生长衰落,加上后期打捞,生物量有所降低。

表 1 沉水植物定性分析结果

Tab. 1 Qualitative analysis results of submerged plants

项 目	2017 年 10 月	2017 年 12 月	2018 年 2 月
苦草	+	++	+++
水蕴草	++	+++	++++
菹草	-	+	+
马来眼子菜	-	+	+
轮叶黑藻	-	+	++
金鱼藻	-	+	-

2.4 水生系统运维的重要性

该湖泊综合治理工程运行后,雨污水的汇入、放生导致的鱼类结构失衡、福寿螺泛滥、青苔滋生等均会对草型系统稳定性产生冲击,突出了对湖泊应急维护的重要性。研究表明,草型和藻型都是湖泊生态系统的稳定状态,当外部环境变化时,将对湖泊生态系统产生胁迫,系统虽然具有一定的自我恢复能力,但当外部环境胁迫增加到一定程度时将导致系统受到破坏,并转化到与新环境相适应的状态,即当污染物负荷过大,超过草型生态系统所能承受的极限时,草型生态系统崩溃,代之以更有竞争力的浮游植物生态系统。对于湖泊综合治理,首先需要研究的是水生植物生长所需要的环境条件和维持一个草型生态系统所需要的外部条件,主要因素包括物理环境(如风浪、光照和透明度、悬浮物等)、化学环境

(如氨氮浓度、根部还原环境强弱等)及生物环境(如鱼类牧食、浮游植物浓度等)^[2]。在治理后期的维护过程中,要不断改善水环境条件,创造适合植物存活且持续发挥作用的环境才能保证草型生态系统的稳定。该湖水生态系统构建以后,经受几次降雨考验,雨后溢流口带来大量污水、垃圾及浮油,造成水体浑浊。经调控,第2天水体逐渐变清,3 d后恢复清澈,表明该水生态系统能够经受住一定程度的降雨考验,对于短时大暴雨的耐受性极好,一般3~7 d水体透明度即可恢复清澈见底。

3 结论

本工程采用修建初期雨污调蓄池、生活污水截流进污水厂、污水厂尾水组合人工湿地提标等措施大大降低了湖体外源污染负荷,可为后续湖体生态修复工程的实施创造良好条件。湖体生态修复工程运行以后,湖体DO浓度显著增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 浓度明显下降,TP也有一定程度的降低,对照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),其主要水质指标达到了Ⅳ类水标准,实现了水质改善的目标。

参考文献:

- [1] 王志强,崔爱花,缪建群,等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J]. 生态学报,2017,37(18):6253-6264.
Wang Zhiqiang, Cui Aihua, Miu Jianqun, et al. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6253-6264 (in Chinese).
- [2] 秦伯强,张运林,高光,等. 湖泊生态恢复的关键因子分析[J]. 地理科学进展,2014,33(7):918-924.
Qin Boqiang, Zhang Yunlin, Gao Guang, et al. Key factors affecting lake ecological restoration[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 918-924 (in Chinese).
- [3] 管策,郁达伟,郑祥,等. 我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展[J]. 农业环境科学学报,2012,31(12):2309-2320.
Guan Ce, Yu Dawei, Zheng Xiang, et al. Removing nitrogen and phosphorus of effluent from wastewater treatment plants by constructed wetlands in China: an overview[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(12): 2309-2320 (in Chinese).
- [4] 徐南军,李向阳,祁琳琳,等. 生化生态组合人工湿地系统对城镇污水处理厂尾水的净化效果研究[J]. 环境工程,2015,33(7):46-50.
Xu Nanjun, Li Xiangyang, Qi Linlin, et al. Study on tail water purification by combined chemical and ecological wetlands from municipal sewage treatment plant[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(7): 46-50 (in Chinese).
- [5] 李安定,张义,周北海,等. 富营养化湖泊沉积物磷原位控制技术[J]. 水生生物学报,2014,38(2):370-374.
Li Anding, Zhang Yi, Zhou Beihai, et al. In-situ control technology of phosphorus in sediment of eutrophic lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(2): 370-374 (in Chinese).
- [6] 王沛芳,王超,王晓蓉,等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学,2008,29(4):890-895.
Wang Peifang, Wang Chao, Wang Xiaorong, et al. Purification effects on nitrogen under different concentration and nitrogen conformation transform principles by *Vallisneria spiralis* L. [J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 890-895 (in Chinese).
- [7] 高镜清,熊治廷,张维昊,等. 常见沉水植物对东湖重度富营养化水体磷的去除效果[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):796-800.
Gao Jingqing, Xiong Zhiting, Zhang Weihao, et al. Removal efficiency of phosphorus in hypertrophic lake Donghu water by common submerged macrophytes[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(6): 796-800 (in Chinese).
- [8] 张小龙,王晓昌,刘言正,等. 多级生态塘植物修复技术用于富营养化水体修复[J]. 中国给水排水,2015,31(4):95-98.
Zhang Xiaolong, Wang Xiaochang, Liu Yanzheng, et al. Application of multi-stage ecological pond phytoremediation technology to remediation of eutrophic water body[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 95-98 (in Chinese).
- [9] 刘顺,桂和荣,洪步林,等. 铜陵翠湖公园水体污染生态治理[J]. 中国给水排水,2018,34(8):110-114.
Liu Shun, Gui Herong, Hong Bulin, et al. Ecological management for water pollution control of Green Lake Park in Tongling City[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 110-114 (in Chinese).
- [10] 姚远,贺锋,胡胜华,等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报,2016,36(4):971-978.
Yao Yuan, He Feng, Hu Shenghua, et al. Effects of

allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 971–978 (in Chinese).

- [11] 李安峰, 徐文江, 潘涛, 等. 公园人工湖水质改善工程 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(14): 90–92.

Li Anfeng, Xu Wenjiang, Pan Tao, *et al.* Project of water quality improvement for artificial lake in a park [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(14): 90–92 (in Chinese).

- [12] 吉琴. 综合生态修复技术用于上海古猗园内景观水体治理 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 86–88, 92.

Ji Qin. Application of comprehensive ecological restoration technology to treat landscape water of Guyi Garden in Shanghai [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 86–88, 92 (in Chinese).



作者简介: 张华俊 (1983 –), 男, 湖北荆门人, 博士, 高级工程师, 主要从事水环境修复工程与技术研究工作。

E-mail: jnuzhanghualun@126.com

收稿日期: 2019-09-20

(上接第27页)

biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization [J]. *Fuel*, 2013, 103: 943–949.

- [23] Danso-Boateng E, Shama G, Wheatley A D, *et al.* Hydrothermal carbonisation of sewage sludge: Effect of process conditions on product characteristics and methane production [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 177: 318–327.

- [24] Jian X, Zhuang X, Li B, *et al.* Comparison of characterization and adsorption of biochars produced from hydrothermal carbonization and pyrolysis [J]. *Environ Technol Innovat*, 2018, 10: 27–35.

- [25] Bernier M H, Levy G J, Fine P, *et al.* Organic matter composition in soils irrigated with treated wastewater: FT-IR spectroscopic analysis of bulk soil samples [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 233–240.

- [26] Paneque M, De la Rosa J M, Kern J, *et al.* Hydrothermal carbonization and pyrolysis of sewage sludges: What happen to carbon and nitrogen? [J]. *J Anal Appl Pyrol*, 2017, 128: 314–323.

- [27] Repo E, Warchol J K, Kurniawan T A, *et al.* Adsorption of Co(II) and Ni(II) by EDTA- and/or DTPA-modified

chitosan: Kinetic and equilibrium modeling [J]. *Chem Eng J*, 2010, 161(1/2): 73–82.



作者简介: 许劲 (1968 –), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事可持续废水废物处理、高盐高浓度难降解工业废水处理、水环境综合治理及水污染控制系统规划的研究与实践。

E-mail: xujinglily@163.com

收稿日期: 2020-02-21