

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

引用本文:

叶磊, 李希, 田日昌, 等. 不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2409–2419.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子

梁启斌, 侯磊, 李能发, 陈鑫, 王克勤

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1585–1593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1324>

植物塘+人工湿地系统对灌溉水净化及稻米镉的阻控效果

刘寿涛, 何钟响, 许蒙, 李丹阳, 罗海艳, 刘孝利, 铁柏清

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1060–1068 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1216>

水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响

李红芳, 刘锋, 肖润林, 何洋, 王迪, 吴金水

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 157–163 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.021>

DFeRB和SRB对冰封期铁与硫还原的影响研究

宋文杰, 石文静, 吕项蒙, 吕思杰, 吕昌伟, 何江

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2015–2025 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0091>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

叶磊, 李希, 田日昌, 等. 不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2409–2419.

YE Lei, LI Xi, TIAN Ri-chang, et al. Characteristics of phosphorus fate in constructed wetlands with different plant combinations[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2409–2419.



开放科学 OSID

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊^{1,2}, 李希², 田日昌⁴, 吴凤平¹, 孟岑², 夏梦华², 郭宁宁^{2,3}, 凡翔^{1,2}, 李裕元², 王辉^{1*}

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410006; 4. 中山市生态环境局, 广东 中山 528403)

摘要: 人工湿地技术是农业面源污染治理的重要技术措施, 而磷的去除是污水治理的主要难点。以亚热带丘陵区为研究区域, 以农村养殖废水、生活污水及农田排水混合形成复合污水为治理对象, 通过野外小区试验, 研究了浮水植物绿狐尾藻 (*Myriophyllum elatinoides*) 与挺水植物黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)、水生美人蕉 (*Canna glauca*)、梭鱼草 (*Pontederia cordata*) 所构建的浮水植物+不同挺水植物种植模式人工湿地, 以探讨不同植物组合模式对人工湿地磷的处理效果与去除途径的影响特征。3—9月结果表明: 植物组合湿地对于农村污水中磷素具有显著的处理效果, 以无机磷的去除为主。湿地进水总磷 (TP) 浓度为 2.16~5.93 mg·L⁻¹, 各植物组合出水 TP 浓度为 0.34~0.48 mg·L⁻¹, 低于城镇污水排放一级 A 标准 (0.5 mg·L⁻¹), 以绿狐尾藻+梭鱼草湿地的除磷效果最好; 不同组合模式人工湿地总磷负荷变化范围为 45.50~47.13 g·m⁻²·a⁻¹, 绿狐尾藻+梭鱼草组合湿地达 47.13 g·m⁻²·a⁻¹, 显著高于对照湿地中的 39.62 g·m⁻²·a⁻¹; 底泥吸附与沉淀是植物组合湿地磷素去除的主要途径, 其占湿地除磷总量的 72.44%~75.62%。水生植物 TP 积累量 9.65~12.51 g·m⁻²·a⁻¹, 占湿地除磷总量的 21.00%~26.54%; 试验中, 植物组合人工湿地比绿狐尾藻湿地底泥吸附占除磷总负荷的比例减少 1.71%~4.89%, 增加植物吸收比例 0.97%~6.28%。较对照湿地底泥吸附占除磷总负荷的比例减少 18.11%~21.29%。植物组合有利于延缓底泥吸附饱和时间和提高植物对磷的吸收率。

关键词: 农业面源污染; 人工湿地; 植物组合; 挺水植物; 浮水植物

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2409-11 doi:10.11654/jaes.2020-0761

Characteristics of phosphorus fate in constructed wetlands with different plant combinations

YE Lei^{1,2}, LI Xi², TIAN Ri-chang⁴, WU Feng-ping¹, MENG Cen², XIA Meng-hua², GUO Ning-ning^{2,3}, FAN Xiang^{1,2}, LI Yu-yuan², WANG Hui^{1*}

(1. School of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. School of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410006, China; 4. Zhongshan Bureau of Ecology and Environment, Zhongshan 528403, China)

Abstract: Constructed wetland (CW) technology is an important method of agricultural non-point source pollution treatment, and phosphorus removal is the main source of difficulty in sewage treatment. This study used a subtropical hilly region as the research area and combined rural farming wastewater, domestic sewage, and farmland drainage to form compound sewage as the treatment object. Through field experiments, wetlands were constructed with floating water plants (*Myriophyllum elatinoides*) alone or *M. elatinoides* in combination

收稿日期: 2020-07-07 录用日期: 2020-08-24

作者简介: 叶磊 (1996—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 从事农业面源污染防控与治理研究。E-mail: 1334312293@qq.com

*通信作者: 王辉 E-mail: wanghuisb@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800100); 河南省重大科技专项 (161100310600); 中山市社会公益科技研究项目 (2018B1029)

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0800100); The Key Science and Technology Project of Henan Province, China (161100310600); Social Public Welfare Science and Technology Research Project of Zhongshan City (2018B1029)

with different emergent aquatic plants (*Iris pseudacorus*, *Canna glauca*, or *Pontederia cordata*), to explore the influence of different plant combinations on the effectiveness of phosphorus treatment and removal in the CWs. The results from March to September showed that the plant combination wetland had a significant effect on phosphorus in rural sewage, and this effect was mainly seen in the removal of inorganic phosphorus. Total phosphorus concentration in wetland inlet water ranged from 2.16~5.93 mg·L⁻¹, and the outlet water concentration ranged from 0.34~0.48 mg·L⁻¹ among the different plant combinations; these values were lower than urban sewage discharge standard Grade A (0.5 mg·L⁻¹). The phosphorus removal effect was greatest in the *M. elatinoides* + *P. cordata* wetland. Total phosphorus load of the CWs varied from 45.50~47.13 g·m⁻²·a⁻¹ among the different plant combinations, and the wetland composed of *M. elatinoides* + *P. cordata* had a total phosphorus load of 47.13 g·m⁻²·a⁻¹, which was significantly higher than the 39.62 g·m⁻²·a⁻¹ value measured in the control wetland. Sediment adsorption and precipitation were the main phosphorus removal mechanisms in the CWs, accounting for 72.44%~75.62% of total phosphorus removal. Total phosphorus accumulation of aquatic plants ranged from 9.65~12.51 g·m⁻²·a⁻¹, and this accounted for 21.00%~26.54% of total phosphorus removal. In the experiment, compared to the *M. elatinoides* wetland, the proportion of total phosphorus removed from plant combination CWs through sediment adsorption decreased by 1.71%~4.89%, and phosphorus adsorption by plants increased by 0.97%~6.28%. Compared to the control wetland, the proportion of total phosphorus removed decreased by 18.11%~21.29%. Utilizing plant combinations in CWs can delay the adsorption saturation time of the sediment and increase the phosphorus absorption rate of plants.

Keywords: agricultural non-point source pollution; constructed wetlands; plant combinations; emergent aquatic plant; floating plants

农业面源污染已经成为我国水环境所面临的主要问题。根据最新《第二次全国污染源普查公报》显示,农业源污染水体中总磷、总氮排放量和化学需氧量分别为21.20万、141.49万、1 067.13万t,分别占全国水体污染物排放总量的67.2%、46.5%和49.8%^[1],农业源的磷排放是水体污染的最主要来源。据研究,进入滇池、巢湖的农业源总磷(TP)污染负荷都超过50%^[2-3],太湖流域高达84%^[4]。农业源污染中TP排放量已接近排放总量的70%,且目前我国各大主要湖泊河流都面临着严重的磷威胁,因此研究如何减轻农业农村污水中磷负荷对于农业面源污染的治理具有重要意义。人工湿地具有良好的生态修复能力且能对废水中磷素进行资源化再利用^[5],现已发展成为面源污染治理的关键技术手段^[6]。人工湿地中磷的去除难度大,除磷机制单一,一般以底泥吸附为主^[7-8],植物吸收为辅,微生物利用相对较弱。湿地底泥将污水中磷素截留,但高磷含量的底泥有成为二次污染源的风险^[9]。因此通过不同植物组合模式以提高植物对磷素的吸收比例,是脱除污水中磷素的有效途径。

目前,对于植物湿地的研究较多。徐寸发等^[10]用水浮莲(*Pistia stratiotes*)和水葫芦(*Eichhornia crassipes*)组合构建生态净化塘对污水中TP和可溶性磷酸盐的去除率分别为78.57%和80.64%。张泽西等^[11]选取水葱(*Scirpus validus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)、小香蒲(*Typha mini-*

ma)和狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*),配置成10种植物组合人工浮岛进行室内试验,结果表明种植水葱+狐尾藻的人工浮岛对水中磷酸盐的去除率最高,为94.07%,种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛对水中TP的去除率最高,为89.73%。刘建伟等^[12]通过对美人蕉、黄菖蒲和水葱3种挺水植物室内试验得出,美人蕉对水体中磷的去除效果相对较好,对TP的去除率为72.4%,对正磷酸盐的去除率为69%。水生植物能增加湿地除磷负荷,多元化除磷机制,稳定和提高出水水质^[13-15]。但目前多数研究主要关注植物湿地对污水中磷的去除效率,在水生植物影响下人工湿地各主要除磷机制的响应及机理少有报道,且废水中磷素资源化利用的目标没有真正落实。绿狐尾藻收割后能加工成饲料进行利用,实现磷资源化的同时还将产生一定经济效益^[16-17]。因此,探讨磷素高效吸收的植物组合模式是实现污染治理生态效益与经济效益有机结合的关键点。基于此,本文通过野外小区试验,选用浮水植物绿狐尾藻和3种大型挺水植物进行组合,筛选出除磷效果较好的植物组合模式,研究植物组合对湿地主要除磷途径的影响,以期对亚热带丘陵区农村污水人工湿地生态治理以及污水磷素资源的高效利用提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙县开慧镇(113°24'20"E、

28°57′80″N),地处东亚季风区,属典型亚热带湿润季风气候区,区内年均气温16~20℃,全年无霜期260~300 d,日照时数1 600~1 800 h,热量充足。年均降水量1 394.60 mm,降水主要集中在4—7月。当地土地利用类型主要为稻田(36.47%)、园地(3.40%)、林地(49.01%)等。区域内分散生猪养殖户较多,养殖废水排放后对地表水所造成的影响较大。

1.2 试验设计

以农村污水为治理对象,通过不同植物组合模式湿地对其进行生态治理。共设置5个处理,分别为绿狐尾藻+黄菖蒲(*Myriophyllum elatinoides* + *Iris pseudacorus*)、绿狐尾藻+水生美人蕉(*Myriophyllum elatinoides* + *Canna glauca*)、绿狐尾藻+梭鱼草(*Myriophyllum elatinoides* + *Pontederia cordata*)、绿狐尾藻(*Myriophyllum elatinoides*)、对照组(不种植水生植物),每种处理模式设置3次重复,共15个小区,小区布置见图1。混合种植小区挺水植物种植密度为2丛·m⁻²,每丛3株。绿狐尾藻覆盖度要求达到80%以上。试验采用三级表面流人工湿地对农村污水进行净化,小区规格为:长×宽×深=18 m×2.4 m×0.5 m,分为3级,水深控制在30 cm。水力停留时间为7 d。

试验水源为附近排水沟渠中的农村污水,为养殖废水、生活污水、农田径流等污水混合。该湿地小区于2018年12月开始建设并种植水生植物,待全部植物成活并进入正常生长阶段以后,于2019年3月正式开始运行,按计划进行相关的监测、采样和分析工作。

1.3 样品采集与指标测定

本研究设定的观测指标主要包括:水样磷[总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解性总磷(DTP)、无机磷(DIP)、有机磷(DOP)]、植物全磷、底泥全磷、水质物理指标[酸碱度(pH)、温度(T)、电导率(EC)、氧化还原电位(Eh)、溶氧量(DO)]。

1.3.1 湿地水样

2019年3—9月,在各小区进水口及出水口取样,每10 d取样1次;用钼锑抗显色法分析水样TP浓度。污水各形态磷含量测定于每月28日取样分析测定,水样经0.45 μm微孔滤膜过滤后用于DTP和DIP的测定,用差减法计算PP、DOP的浓度。

1.3.2 底泥样品

每月28日在各小区内取样。底泥采集方法:在每个植物区内设置3个代表性0.5 m×0.5 m的样方(均匀布置在小区对角线上),在样方内多点采集15 cm深度底泥,均匀混合。带回实验室,风干后混匀、磨碎、过筛(90.25 μm)。底泥中TP的测定用硫酸-高氯酸(H₂SO₄-HClO₄)法。

1.3.3 植物样品

每月28日采集一次植物样品。植物样品采集方法:每个植物区选取植物长势较一致的3个样方,样方选取面积为0.5 m×0.5 m(均匀布置在小区对角线上)。植物带回实验室处理后置于105℃烘箱中杀青30 min,80℃下烘至恒质量,研磨、过筛(60目)后经硫酸-双氧水(H₂SO₄-H₂O₂)消煮,钼锑抗显色后测定TP含量。

1.4 数据计算与分析

采用Excel 2010和SPSS 22软件进行作图和统计分析,所有处理3个重复,结果以平均值±标准差表示。所有测试指标的显著性检验采用Duncan法,当统计检验的显著性水平 $P<0.05$ 时差异显著。相关性检验采用Pearson法,相关性在0.01以上极显著(**,双尾),相关性在0.05以上显著(*,双尾)。

2 结果与分析

2.1 不同植物组合模式湿地对污水中磷的处理效果

对不同植物组合模式下水体磷素含量的动态监

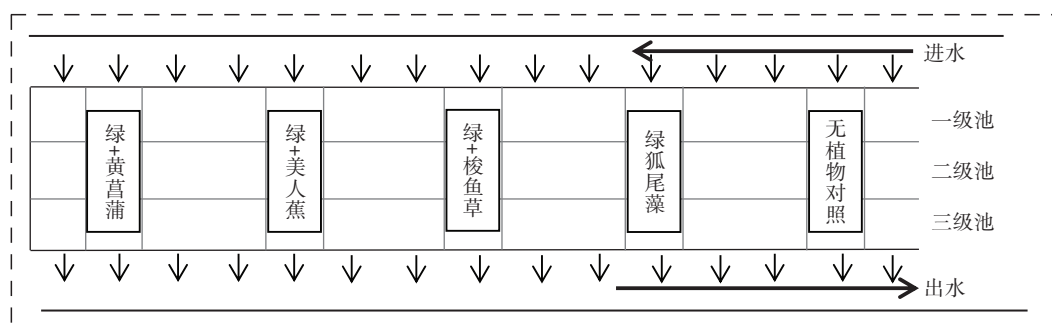


图1 小区布置示意图

Figure 1 Plot layout

测结果(图2)显示,进水TP浓度波动性较大,其中3—5月在 $5.19\sim 5.95\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,6—7月在 $3.37\sim 4.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,8—9月显著降低至 $2.14\sim 2.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但各植物组合模式的出水仍维持在相对稳定状态,7月出水TP浓度相对较高。各植物组合对污水中TP去除率总体较稳定,在80%~95%,显著高于无植物的对照处理。对照处理变化幅度较大(50%~90%),尤其在后期(7—9月)去除率明显下降。

图2显示,各处理出水TP平均浓度较进水浓度均有显著降低($P<0.05$)。植物组合湿地出水TP浓度在 $0.34\sim 0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对污水中TP的平均去除率在89%~92%,显著优于对照处理。绿狐尾藻+梭鱼草湿地处理效果最佳,出水TP平均浓度为 $0.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率达到92%。其余组合无显著差异。整个试验期,绿狐尾藻湿地出水TP平均浓度为 $0.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对污水TP平均去除率为89%。对照组对污水TP平均去除率75%,出水平均浓度 $0.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。9月绿狐尾藻+梭鱼草湿地出水TP浓度达最低值 $0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为87%。

对污水中各形态磷的去除效率如图3所示,对于

污水中PP的去除效率各月份之间差异不显著($P>0.05$),植物组合中PP处理效率随着时间变化无明显规律。各处理组合之间以空白组处理效果明显优于有植物组合,空白组去除率稳定在70%~80%,植物组合在5、7月去除率有两次小幅度上升;各处理组湿地对于污水中DTP的去除率由高到低依次为绿狐尾藻+梭鱼草>绿狐尾藻+黄菖蒲>绿狐尾藻+美人蕉>绿狐尾藻>对照。随着时间的变化,各植物组合对于DTP的去除效率先下降后上升,6月去除率达到最低值,在80%左右。对照组DTP处理效率则表现为随时间变化而下降,8月达到最低值65%。对于DIP的去除率与DTP规律基本一致。各处理组污水中DOP的去除率,各植物组合都维持在80%~90%,其中以绿狐尾藻+黄菖蒲组合表现最佳,对照组最差,其余组合无显著差异($P>0.05$)。整体而言,对各形态磷去除率最好的是绿狐尾藻+梭鱼草组合。对照组对于DTP的去除效率均随时间变化而不断下降,对于PP的处理效率随时间无明显下降趋势。

2.2 不同植物组合模式湿地底泥TP含量

不同组合湿地底泥TP含量的结果(表1)表明,植

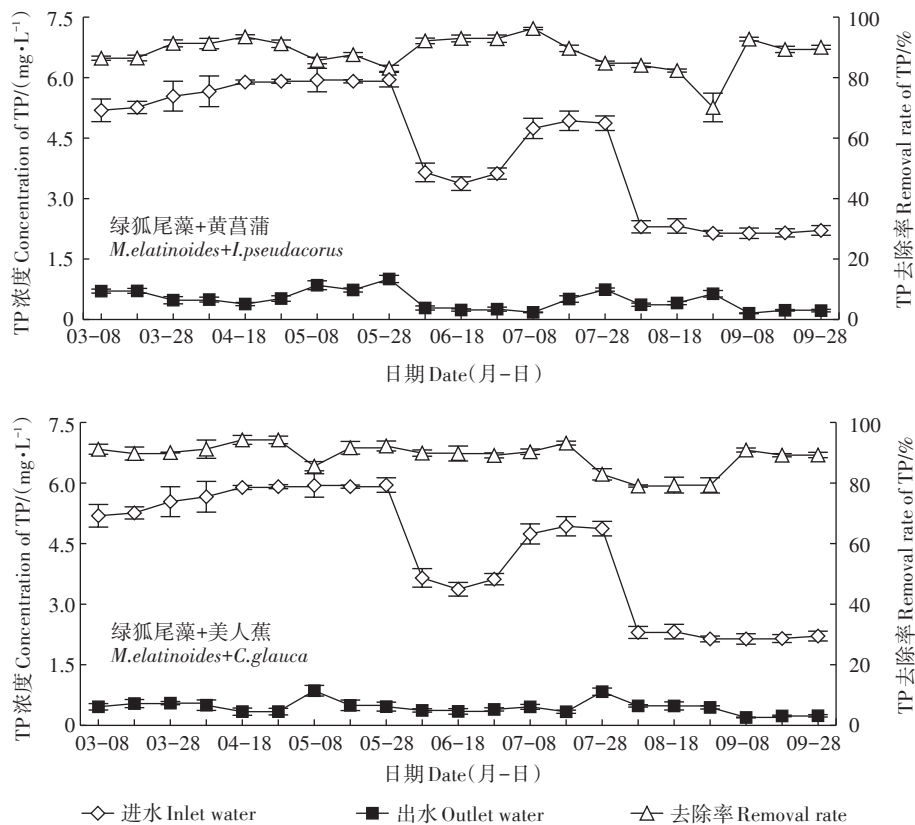
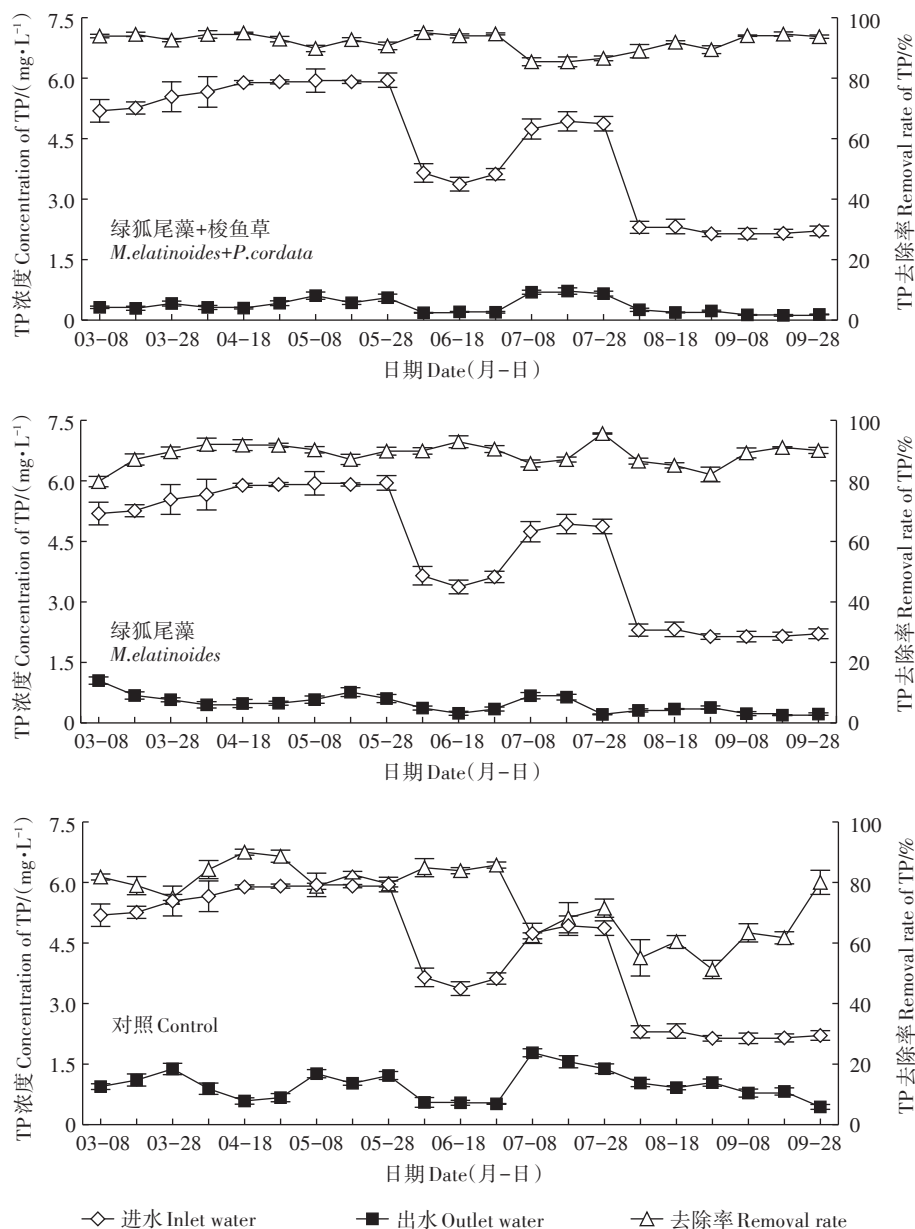


图2 进水和各植物组合出水TP浓度

Figure 2 The concentrations of TP of inlet and outlet water of each plant combination



续图2 进水和各植物组合出水TP浓度

Continued figure 2 The concentrations of TP of inlet and outlet water of each plant combination

表1 不同植物组合湿地中底泥TP含量变化(g·kg⁻¹)Table 1 Changes of TP content in sediments of wetlands with different plant combinations(g·kg⁻¹)

组合名称 Combination name	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
绿狐尾藻+黄菖蒲	0.22±0.05cE	0.33±0.04bD	0.46±0.04cC	0.71±0.11bB	0.75±0.08bA	0.78±0.15bA	0.78±0.15cA
绿狐尾藻+美人蕉	0.21±0.08cE	0.32±0.02bcD	0.64±0.14aC	0.72±0.11bB	0.77±0.13bA	0.78±0.15bA	0.79±0.11cA
绿狐尾藻+梭鱼草	0.31±0.07aE	0.49±0.10aD	0.57±0.17bC	0.74±0.12aB	0.81±0.10aA	0.84±0.17aA	0.87±0.18aA
绿狐尾藻	0.24±0.01bE	0.32±0.03bcD	0.55±0.11bC	0.72±0.15bB	0.77±0.08bA	0.80±0.10bA	0.83±0.08bA
对照	0.22±0.05cE	0.31±0.02cD	0.61±0.11aC	0.68±0.07cB	0.79±0.09aA	0.82±0.09bA	0.85±0.06aA

注:同列数据中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。同行数据中不同大写字母表示月份间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: The different lowercase letters in the same column indicate the significant differences among treatments ($P<0.05$). The different capital letters in the same row indicate the significant differences among months ($P<0.05$). The same below.

植物组合湿地、绿狐尾藻湿地和对照湿地间差异显著 ($P<0.05$), 说明植物组合能直接影响底泥 TP 含量。植物组合湿地中, 绿狐尾藻+梭鱼草湿地与其余两组植物组合湿地中底泥 TP 含量具有显著差异 ($P<0.05$)。同组合不同月份底泥 TP 含量的比较分析结果表明, 各植物组合底泥 TP 含量在 3—7 月快速增加, 表现出显著差异性 ($P<0.05$)。其中, 7 月最高, 各处理底泥 TP 在 $0.75\sim 0.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 3 月最低, 仅为 $0.21\sim 0.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而 7—9 月缓慢上升, 差异性不明显 ($P>0.05$)。9 月, 各组合底泥 TP 含量均到达最大值。绿狐尾藻+梭鱼草组合底泥 TP 含量最高, 达 $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 绿狐尾藻+黄菖蒲组合最低, 仅为 $0.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。低于同期绿狐尾藻湿地 ($0.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和对照湿地 ($0.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 底泥 TP 含量。

2.3 湿地植物磷含量与生物量

不同组合湿地水生植物 TP 含量变化见图 4, 各植物组合中挺水植物体内 TP 含量均与绿狐尾藻 TP 含量具有显著差异。各组合中绿狐尾藻 TP 含量 5—9 月出现差异性, 5 月最高, 6 月最低。单一绿狐尾藻处理中 TP 含量略高于各植物组合, 其 TP 含量变化范围在 $2.31\sim 4.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随时间变化, 绿狐尾藻植株 TP

含量呈“M”型变化趋势, 挺水植物表现为“V”型。除梭鱼草外, 其余水生植物体内 TP 含量在 6 月均达到最低值。6 月, 美人蕉最低为 $2.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 绿狐尾藻最高 $3.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。9 月收割时, 梭鱼草 TP 含量最高, 达到 $3.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。美人蕉最低, 仅 $3.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水生植物 TP 含量与植株生长状况有一定关系。

各阶段收割水生植物生物量如表 2 所示, 各组合中绿狐尾藻分别于 4、6、9 月收割 3 次, 挺水植物于 9 月一次收割。植物组合湿地总生物量相对于绿狐尾藻均有所提高。其中绿狐尾藻+黄菖蒲组合提升幅度最小。绿狐尾藻+梭鱼草组合最为明显, 单位面积梭鱼草生物量达到 $1.56\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。后期 (7—9 月) 植物组合中绿狐尾藻生长受到一定抑制作用, 绿狐尾藻生物量随着时间变化呈现递减趋势, 以绿狐尾藻+梭鱼草组合中绿狐尾藻生物量递减程度最明显。

2.4 湿地磷去向分析

湿地磷去向如表 3 所示, 试验期间各处理湿地的单位面积除磷量为 $39.62\sim 47.13\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。植物组合能有效降低底泥吸附比例。试验中, 不同湿地底泥除磷量在 $33.54\sim 37.13\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 占除磷总负荷的 $72.44\%\sim 93.73\%$, 对照湿地底泥贡献高达 93.73% , 绿狐尾藻湿

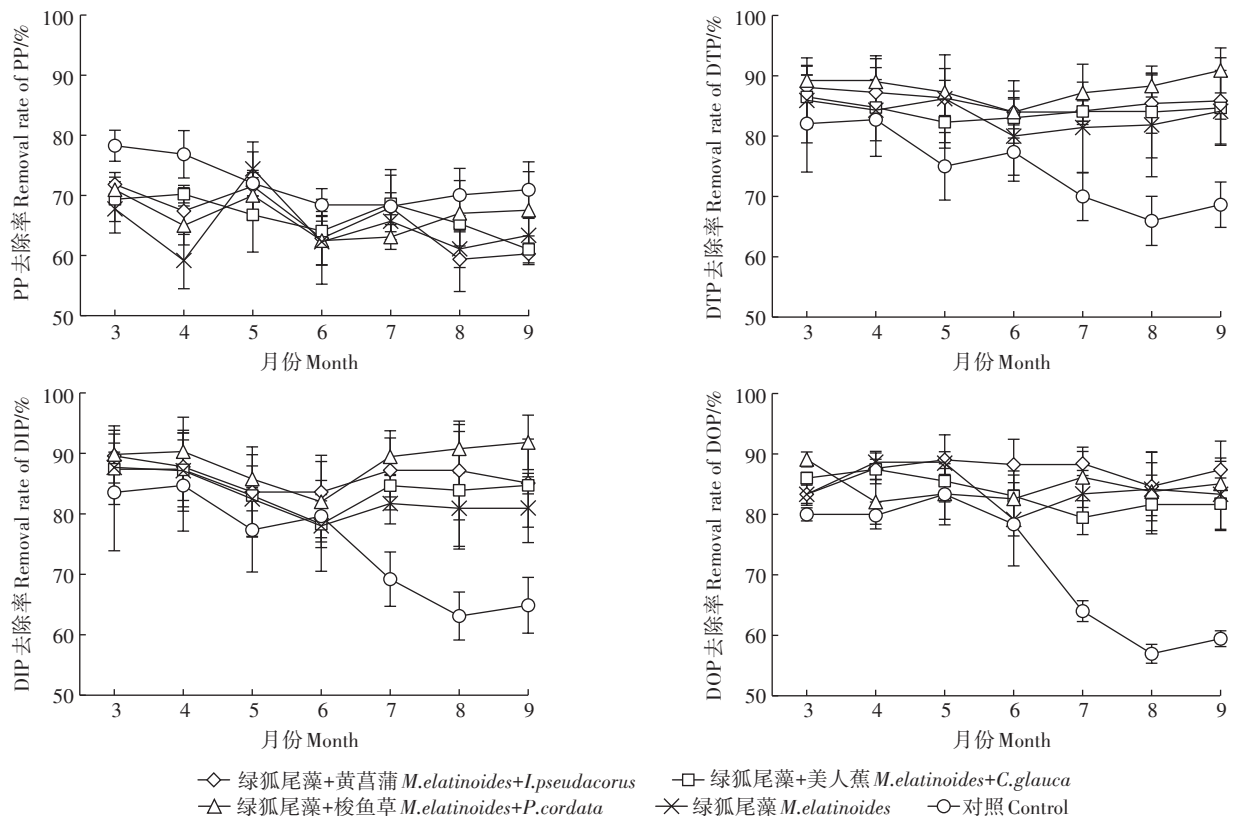


图3 污水中各形态磷的去除率

Figure 3 Removal rates of various forms of phosphorus in sewage

地次之为77.33%,绿狐尾藻+梭鱼草湿地最低72.44%,低于对照近21%。植物除磷量在9.26~12.51 g·m⁻²,植物吸收占湿地除磷总负荷的20.26%~26.54%。植物组合湿地植物贡献有不同幅度提升,均高于单一绿狐尾藻湿地(1%~6%)。绿狐尾藻+梭鱼草湿地最高为26.54%,绿狐尾藻+美人蕉湿地次之,占比21.94%。其余组合差异不显著($P>0.05$)。

2.5 湿地水环境因子与污水TP去除率相关性分析

分析湿地主要水环境因子与去除率相关性(表4)得出,去除率与Eh变化呈极显著正相关关系,与温度

(T)变化呈极显著负相关关系,与pH呈显著正相关关系。表明湿地氧化还原电位及pH在一定范围内的升高,有助于湿地对于磷素的消纳。湿地各个水环境因子之间也相互影响,Eh、DO与pH、 T 之间相关性均显著,与EC值变化均不显著。

3 讨论

3.1 湿地底泥除磷贡献

底泥吸附是湿地运行前期的主要除磷途径,本研究中底泥吸附贡献占湿地除磷总负荷的72.44%~

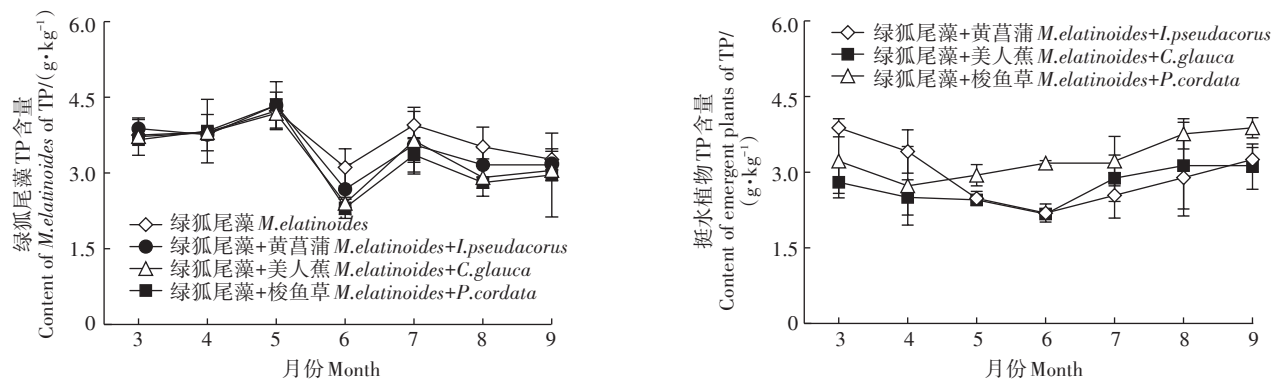


图4 水生植物TP含量
Figure 4 The content of TP in the aquatic plants

表2 不同水生植物组合生物量及除磷量

组合名称 Combination name	生物量 Plant biomass/(kg·m ⁻²)			植物单位面积除磷量 Phosphorus removal per unit area/(g·m ⁻²)			植物总除磷量(3—9月) Total plant dephosphorization/ (g·m ⁻²)
	4月	6月	9月	4月	6月	9月	
绿狐尾藻	0.90±0.03a	0.75±0.04a	0.54±0.07c	4.29±0.11a	3.22±0.13a	1.75±0.22c	9.26±0.85b
绿狐尾藻+黄菖蒲	0.81±0.05b	0.76±0.04a	0.51±0.02c	3.84±0.19b	3.12±0.11a	1.71±0.07c	9.66±0.94b
			0.27±0.02e			0.98±0.06e	
绿狐尾藻+美人蕉	0.81±0.02b	0.68±0.04b	0.41±0.04d	3.74±0.06b	2.79±0.11b	1.26±0.11d	10.08±1.31b
			0.62±0.06b			2.29±0.24b	
绿狐尾藻+梭鱼草	0.89±0.05a	0.41±0.02c	0.19±0.01f	4.20±0.20a	1.68±0.04c	0.57±0.04f	12.51±1.22a
			1.56±0.07a			6.05±0.25a	

表3 不同植物组合湿地中磷的去向

组合名称 Combination name	湿地总除磷量 Total removal in wetland/ (g·m ⁻²)	植物除磷量 Phosphorus removal by plant/ (g·m ⁻²)	底泥吸附量 Sediment adsorption/ (g·m ⁻²)	植物比例 Plant scale/ %	底泥比例 Sediment scale/ %
绿狐尾藻+黄菖蒲	45.50±4.26b	9.66±0.94b	33.54±4.03c	21.23±211b	73.72±2.07d
绿狐尾藻+美人蕉	45.94±1.22b	10.08±1.31b	34.74±1.70b	21.94±2.38b	75.62±1.90c
绿狐尾藻+梭鱼草	47.13±2.94a	12.51±1.22a	34.14±3.86c	26.54±4.19a	72.44±5.17d
绿狐尾藻	45.70±1.70b	9.26±0.85b	35.34±3.27b	20.26±1.22b	77.33±5.70b
对照	39.62±4.99c	0	37.13±3.74a	0	93.73±6.73a

表4 湿地水环境与污水TP去除率相关性
Table 4 Correlation between wetland water environment and TP removal rate

环境因子 Environmental factors	EC	pH	T	Eh	DO	去除率 Removal rate
EC	1.00	0.47	-0.48	0.26	0.64	0.22
pH		1.00	-0.98**	0.96**	0.94*	0.95*
T			1.00	-0.94*	-0.96**	-0.96**
Eh				1.00	0.88*	0.97**
DO					1.00	0.87
去除率						1.00

注:**为相关性在0.01水平上显著(双尾)。*为相关性在0.05水平上显著(双尾)。
Note:** indicates the correlation is significant at 0.01 level(double-tailed). * indicates the correlation is significant at 0.05 level(double-tailed).

93.73%,与大部分研究中的70%~87%基本一致^[7-8]。各处理底泥吸附容量在33.54~37.13 g·m⁻²,对照湿地底泥吸附容量最高(37.13 g·m⁻²),绿狐尾藻+黄菖蒲湿地最低(33.54 g·m⁻²)。对照组中缺少植物的吸收作用,主要通过物理吸附和沉淀来去除水中磷素,当底泥将污水中的磷素沉淀吸附之后无法通过植物来进行资源化利用。而底泥贡献量取决于底泥的吸附能力,张树楠等^[9]研究表明当地土壤吸附能力S_{max}大约在0.39~0.56 g·kg⁻¹。李红芳等^[18]研究中当地部分池塘底泥TP可达到0.83 g·kg⁻¹,底泥磷含量与此次试验结果接近。但湿地底泥吸附量在湿地运行的各阶段差异显著。由表1可以看出,3—6月底泥TP迅速积累。底泥吸附分为快吸附和慢吸附两个阶段,快吸附阶段吸附量大、时间短^[9]。绿狐尾藻湿地中底泥吸附量大于其他浮水+挺水植物组合,原因在于不同类型的植物对营养元素的利用方式不同,浮水植物直接吸收废水中氮磷等物质^[10,19]。而挺水植物则更多是通过根系来利用基质底泥中的磷素^[20-21]。因此通过挺水植物自身吸收利用能在一定程度上降低底泥TP含量和底泥TP释放风险,延长人工湿地运行寿命^[22]。各植物组合中,绿狐尾藻+黄菖蒲组合腾空底泥磷库效果最明显,绿狐尾藻+梭鱼草组合相对较弱。可能黄菖蒲根系发达、酶活力强,有助于从底泥中汲取营养物质^[12],而梭鱼草根系细小密集,扎根表层土壤,起到机械滤清作用,能截留污水中的磷素^[23]。在多级人工湿地中,一般以第一级湿地底泥磷素最先达到动态平衡状态,末端湿地具有延迟效应^[16]。因此,绿狐尾藻+黄菖蒲组合适宜湿地前端种植,绿狐尾藻+梭鱼草组合应用于末端处理可强化出水水质。

3.2 湿地植物的除磷贡献

如表3所示,试验期间各组合中通过多次收割植物的除磷总量在9.26~12.51 g·m⁻²,植物组合湿地较

绿狐尾藻湿地中植物贡献提高1%~6%。植物除磷量与植物生物量和植株磷含量密不可分,而且植物磷含量与其生长状况相关。图4中绿狐尾藻植株磷含量呈“M”且后期峰值低于前期,挺水植物表现为“V”型趋势,后期含量有所升高。这可能是由于绿狐尾藻以直接利用废水中磷素为主,后期进水磷浓度下降限制了磷素供应。挺水植物以底泥中磷素为主要来源,底泥磷含量后期达到一定水平,供给充足,利于其生长。绿狐尾藻能在高氨氮环境中较好地生存,具有生长迅速和吸收高浓度氮磷等特点^[17]。挺水植物凭借发达的根系能吸收基质底泥中的营养与水分,对外界恶劣环境具有较强的抵御能力^[24]。绿狐尾藻在夏季高温季节生长迟缓,甚至进行休眠,还易受虫害影响^[17],物种多样性越高生态功能也随之越完善,相应地对外界刺激的耐受能力越强。植物组合中植物除磷贡献均有不同程度的提升,绿狐尾藻+梭鱼草组合提升效果最为明显,植物除磷量达12.51 g·m⁻²,而美人蕉组和黄菖蒲组提升效果较弱。梭鱼草在绿狐尾藻生长迟缓时发挥种间优势,使得湿地系统保持高效率的植物吸收机制。7—9月是梭鱼草旺盛生长的时节,期间梭鱼草进行大量分蘖,使其生物量快速增加且植株体内TP含量能达到全年最大值^[23]。本次试验梭鱼草的除磷量低于刘霄等^[25]盆栽试验中的25.42 g·m⁻²,高于王丽莎等^[26]试验中的4.69 g·m⁻²,可能与进水浓度有关。植物组合对于低浓度废水处理效果优于高浓度污水^[15]。试验中植物吸收占湿地除磷量的20.26%~26.54%,高于李林峰等^[27]研究中利用植物湿地处理低浓度污水(进水TP浓度0.15 mg·L⁻¹)的0.8%~9.6%,但低于吴晓^[16]利用绿狐尾藻处理中低负荷的养殖废水(进水TP浓度25.5~44.5 mg·L⁻¹)试验中的22.5%~59.6%。说明浮水+挺水植物种植模式生态位分化合理,能提高湿地除磷量,有利于农村污水中磷素的资

源化利用。

3.3 湿地除磷效果影响因素分析

植物组合通过对湿地中各除磷机制直接或间接的影响,对湿地的整体除磷效率有着不同程度的提升。植物组合对于PP的处理效率低于对照组,且对照组的处理效率没有随湿地运行时间变化而发生明显的下降。分析原因在于PP主要通过物理沉淀而被去除^[28],所以当湿地底泥磷含量升高,底泥吸附能力减弱时,对照组的PP处理效率没有很大的浮动。PP难以被植物利用,且试验中观察到绿狐尾藻湿地由于其自身生长代谢会产生许多植物组织残渣,这可能是造成植物湿地PP处理效率低于对照组的主要原因^[17]。当4、6月收割完绿狐尾藻,次月湿地对于PP的处理效率明显回升,也为该推测提供了佐证。湿地进水中DIP是DTP的主要组分,所以两者有相近的趋势^[24]。前期湿地对于DTP的消纳以基质吸附为主要途径,当底泥磷含量不断升高,吸附能力减弱,处理效率也随之下降^[9,18]。但是后期(6—9月)进水TP浓度大幅降低,此期间为挺水植物生长的主要阶段,水生植物对于无机磷的需求变大,促使植物组合湿地维持较高的处理效率而对照组明显下降^[23]。在湿地短期运行过程中以基质吸附为主要除磷途径,在长期过程中植物吸收将起到主要作用^[27]。前人研究表明黄菖蒲具有发达的根系活力,这可能是其植物组合湿地对DOP的利用高于其他植物组合的主要原因^[12]。7月,各组合出水浓度上升,处理效率下降。由于底泥磷含量的积累使其吸附能力衰减,且受进水磷浓度回升的影响,进一步导致处理效率的下浮。

浮水+挺水植物组合湿地对于农村污水中TP处理效果优于单种绿狐尾藻湿地及对照湿地。以梭鱼草组合处理效率提升最为明显,其余2种植物组合之间差异不显著($P<0.05$)。于对照组而言,以绿狐尾藻为主的浮水+挺水植物组合通过植物自身吸收利用是使湿地处理效率提升的直接原因。且植物能改善湿地微环境,进一步促进湿地生态系统的除磷效率。分析湿地各环境因子与磷去除效率之间的相关性,结果如表5所示,污水TP去除效率与水环境中温度(T)显著负相关,与酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)正相关。pH值的变化规律与溶解氧呈极显著正相关。这与王荣等^[28]研究结论一致,温度过高会导致底泥中内源的磷释放,从而增加湿地水体磷浓度。pH值8~12的碱性条件有利于基质对TP的吸附^[29]。溶解氧直接决定湿地内部的氧化还原条件,但植物一般对根区周

围局部溶氧影响较大,往往形成根区富氧环境,而对于整个湿地系统溶氧水平可能影响较小。湿地内部以缺氧、厌氧环境为主,但植物能在一定程度上改善这种情况,好氧环境有利于湿地除磷^[30]。由此,可以得出植物主要通过改善湿地环境因子而间接影响底泥对于污水TP的吸附与解吸。另外,植物能为微生物提供生存繁殖场所和通过改善湿地微环境而影响微生物活性,从而增加湿地除磷效率^[31]。

4 结论

(1)植物组合模式下湿地单位面积除磷负荷在 $45.50\sim 47.13\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,底泥TP积累量在 $33.54\sim 34.73\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,底泥吸附贡献占湿地除磷负荷的72.44%~75.62%。相较于绿狐尾藻湿地,绿狐尾藻与挺水植物混种模式能增加湿地单位面积除磷负荷 $0.21\sim 1.42\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,且能降低底泥吸附磷贡献比例1.71%~4.89%,能延缓底泥吸附饱和,降低底泥磷释放风险。

(2)植物组合湿地中单位面积植物TP积累量在 $9.65\sim 12.51\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,绿狐尾藻+梭鱼草湿地最大为 $12.51\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。植物吸收占湿地除磷贡献比例为21.23%~26.54%。采用浮水植物+挺水植物组合模式能增加湿地磷素去除。相较于单一种植绿狐尾藻湿地,增加了植物吸收磷贡献比例0.97%~6.28%。

(3)各植物组合湿地出水平均浓度为 $0.34\sim 0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,绿狐尾藻+梭鱼草湿地对污水处理效果最好,平均去除率为92.0%。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境部. 第二次全国污染源普查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境部, 2017: 5~6.
Ministry of Environment of the People's Republic of China. The second state pollution source survey[R]. Beijing: Ministry of Environment of the People's Republic of China, 2017: 5~6.
- [2] He J, Wu X, Zhang Y, et al. Management of water quality targets based on river-lake water quality response relationships for lake basins: A case study of Dianchi Lake[J]. *Environmental Research*, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109479.
- [3] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年)[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 791~798.
ZHANG Min, KONG Fan-xiang. The process spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chao-hu (1984—2013)[J]. *Lake Sci*, 2015, 27(5): 791~798.
- [4] 吴玲, 秦红益, 朱梦圆, 等. 太湖富营养化湖区秋季水体和沉积物中硝化微生物分布特征及控制因素[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1312~1323.
WU Ling, QIN Hong-yi, ZHU Meng-yuan, et al. Distribution charac-

- teristics and controlling factors of nitrifying microorganisms in freshwater and sediment of eutrophic zones in Lake Taihu in Autumn[J]. *Lake Sci*, 2017, 29(6): 1312-1323.
- [5] Zhao Z M, Zhang X W, Zhu F, et al. Enhancing the pollutant removal performance and biological mechanisms by adding ferrous ions into aquaculture wastewater in constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122003.
- [6] 李峰平, 魏红阳, 马喆, 等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J]. *湿地科学*, 2017, 15(6): 849-854.
LI Feng-ping, WEI Hong-yang, MA Zhe, et al. Research progress of selection of plants for constructed wetlands and effect of plants' purification on sewage[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(6): 849-854.
- [7] Ma Y H, Dai W Q, Zheng P R, et al. Iron scraps enhance simultaneous nitrogen and phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 395: 122612.
- [8] Shi X F, Jin L, Zhang J, et al. Enhanced phosphorus removal in intermittently aerated constructed wetlands filled with various construction wastes[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(28): 22524-22534.
- [9] 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 等. 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 1101-1106.
ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, et al. Study on phosphorus adsorption characteristic of sediments in an ecological ditch[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 1101-1106.
- [10] 徐寸发, 闻学政, 张迎颖, 等. 漂浮植物组合生态处理污水处理厂尾水的效果及植物生理响应[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(11): 1335-1340.
XU Cun-fa, WEN Xue-zheng, ZHANG Ying-ying, et al. Ecological treatment effect of tail water from sewage treatment plant by combination with floating macrophytes and their physiological response[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11): 1335-1340.
- [11] 张泽西, 刘佳凯, 张振明, 等. 种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较[J]. *湿地科学*, 2018, 16(2): 273-278.
ZHANG Ze-xi, LIU Jia-kai, ZHANG Zhen-ming, et al. Comparison of removal efficiency of nitrogen and phosphorus by artificial floating islands with different plants[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(2): 273-278.
- [12] 刘建伟, 周晓, 吕臣, 等. 三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J]. *湿地科学*, 2015, 13(1): 7-12.
LIU Jian-wei, ZHOU Xiao, LÜ Chen, et al. Purification effect of eutrophication landscape water by 3 kinds of emerged plants[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(1): 7-12.
- [13] Wang T T, Ying G G, He L Y, et al. Uptake mechanism, subcellular distribution, and uptake process of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid by wetland plant *Alisma orientale*[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 139383.
- [14] Huang X B, Lei S T, Wang G Q, et al. A wetland plant, *Phalaris arundinacea*, accumulates nitrogen and phosphorus during senescence[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 38928-38936.
- [15] 朱金格, 张晓姣, 刘鑫, 等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 405-411.
ZHU Jin-ge, ZHANG Xiao-jiao, LIU Xin, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 405-411.
- [16] 吴晓. 绿狐尾藻人工湿地对养殖废水除磷效应的研究[D]. 长沙: 华中农业大学, 2017: 26-28.
WU Xiao. Study of phosphorus removal from swine wastewater by surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* [D]. Changsha: Huazhong Agricultural University, 2017: 26-28.
- [17] 李裕元, 李希, 吴金水, 等. 绿狐尾藻区域适应性与生态竞争力研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2252-2261.
LI Yu-yuan, LI Xi, WU Jin-shui, et al. Regional adaptability and ecological competitiveness of *Myriophyllum elatinoides* in mainland China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2252-2261.
- [18] 李红芳, 刘锋, 杨凤飞, 等. 农业小流域源头区池塘底泥磷形态和吸附特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(5): 634-639.
LI Hong-fang, LIU Feng, YANG Feng-fei, et al. Forms and adsorption behavior of phosphorus in pond sediments in the headwater area of an agricultural watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5): 634-639.
- [19] 刘娅琴, 刘福兴, 宋祥甫, 等. 农村污染河道生态修复中浮游植物的群落特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(1): 162-169.
LIU Ya-qin, LIU Fu-xing, SONG Xiang-fu, et al. Characteristics of phytoplankton community in country contaminated ditches during ecological restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 162-169.
- [20] Landman M J, Ling N. Fish health changes in Lake Okaro, New Zealand: Effects of nutrient remediation, season or eutrophication[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 661(1): 65-79.
- [21] Wang Z, Zhang Z, Zhang Y, et al. Nitrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(2): 177-183.
- [22] 李红芳, 刘锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 157-163.
LI Hong-fang, LIU Feng, XIAO Run-lin, et al. Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 157-163.
- [23] 余红兵, 杨知建, 肖润林, 等. 梭鱼草(*Pontederia cordata*)拦截沟渠中氮、磷的效果研究[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(4): 508-512.
YU Hong-bing, YANG Zhi-jian, XIAO Run-lin, et al. Research of ditch interception effect of nitrogen and phosphorus of *Pontederia Cordata*[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(4): 508-512.
- [24] 张冉, 徐红新. 垂直流人工湿地系统中植物对除磷效果的影响研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(增刊1): 308-311.
ZHANG Ran, XU Hong-xin. Effect of plants on the removal phosphorus in vertical flow constructed wetland system[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(Suppl 1): 308-311.

- [25] 刘霄, 黄岁樑, 唐婷芳子, 等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5):1-5.
LIU Xiao, HUANG Sui-liang, TANG Ting-fang-zi, et al. Growth characteristic and nitrogen phosphorous accumulation ability of artificial wetland plants[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, 22(5):1-5.
- [26] 王丽莎, 李希, 甘蕾, 等. 亚热带丘陵区湿地水生植物组合模式拦截氮磷的研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9):1577-1583.
WANG Li-sha, LI Xi, GAN Lei, et al. Study on the aquatic plant combination patterns for intercepting nitrogen and phosphorus in wetland of subtropical hilly region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9):1577-1583.
- [27] 李林锋, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3):337-342.
LI Lin-feng, NIAN Yue-gang, JIANG Gao-ming. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorous removal[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(3):337-342.
- [28] 王荣, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊1):12-18.
WANG Rong, HE Feng, XU Dong, et al. The study on the mechanisms and influencing factors of substrates in constructed wetlands removing phosphorus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(Suppl 1):12-18.
- [29] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):894-898.
CHUN Li-hua, ZHU Xi-zhen, LUO Shi-ming, et al. The characteristic of phosphorous adsorption on different substrates used in constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):894-898.
- [30] Jin Z J, Wu W Z, Li J H, et al. Simulation and engineering demonstration of the advanced treatment of rainy overflow wastewater using a combined system of storage tank-wastewater treatment plant-wetland[J]. *Water Environment Research*, 2020, 92(7):1057-1069.
- [31] 闫春妮, 黄娟, 李稹, 等. 湿地植物根系及其分泌物对土壤脲酶、硝化-反硝化的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2):303-308.
YAN Chun-ni, HUANG Juan, LI Zhen, et al. Effect of plant roots and its exudates on urease activity, nitrification and denitrification in wetland soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2):303-308.