

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响

刘淼^{1,2}, 陈开宁^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 将3种常见湖泊沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)组合构建7种沉水植物稳定塘, 分析植物组合对水体氮、磷、有机物去除效果; 在此基础上, 模拟不同碳氮比(C/N)条件下的沉水植物塘对污水的净化效果, 进而探讨碳氮比对沉水植物去污效果的影响。结果表明: ① 7种沉水植物组合对氮、磷均具有一定的净化效果, 其中苦草和轮叶黑藻组成的沉水植物塘净化效果最好。② 3种C/N(1.89、5.93、12.09)条件下, 苦草黑藻植物塘的去污效果有所差异, 当C/N=5.93时, 对污染物的综合去除效果最佳。因此对于沉水植物稳定塘而言, 沉水植物组合能取得比单类植物更好的净水效果, 并且通过添加适量碳源物质, 调整污水的碳氮比, 可以提升沉水植物塘的净水效果, 研究结果对于实际工程构建稳定塘净化污水具有理论指导意义。

关键词: 沉水植物塘; 植物配置; 碳氮比; 氮磷; 污水处理

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2706-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201710209

Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios

LIU Miao^{1,2}, CHEN Kai-ning^{1*}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A submerged macrophyte pond can effectively remove nitrogen and phosphorus from water, with the removal efficiencies for pollutants depending on combinations of submerged macrophytes. Moreover, the material structure of sewage also has a significant impact on the purification effect of the submerged macrophyte system. This experiment selected three submerged plants (*Vallisneria spiralis*, *Hydrilla verticillata*, and *Myriophyllum spicatum*) to examine the purification effect of their combinations on sewage, including nitrogen and phosphorus removal efficiencies. In addition, the effect of influent C/N ratio on the submerged macrophyte pond was also tested and discussed. The results showed the following. ① All plant combinations can decrease concentrations of nitrogen and phosphorus in water, resulting from nutrient deposition along with sedimentation of suspended particles. The combinations of *Vallisneria spiralis* and *Hydrilla verticillata* showed the highest purification efficiency for total nitrogen and total phosphorus with an average removal rate of 32.71% and 22.13%, respectively. ② The purification effects of three C/N ratio (1.89, 5.93, and 12.09) for *Vallisneria spiralis* and *Hydrilla verticillata* system were different. The removal efficiency was highest when the C/N ratio was 5.93, with removal rates for total nitrogen and total phosphorus and a reduction in permanganate index of 81.34%, 68.26%, and 88.65%, respectively. The C/N ratio affected the degradation of nitrogen, phosphorus, and organic matter by influencing the dissolved oxygen concentration of water and changing the anaerobic and aerobic environment of the water. In conclusion, different submerged macrophyte combinations showed better purification effect than a single type of plant in the submerged plant pond system. Changing the influent C/N ratio by placing carbon source materials into the water can greatly increase the removal efficiency of submerged plant pond, providing a practical reference for the use of submerged plant ponds to treat sewage.

Key words: submerged macrophyte pond; plant combinations; C/N ratio; nitrogen and phosphorus; sewage treatment

近年来, 水体污染和富营养化现象严重, 河流、湖泊生态修复已成为政府部门、学术界和社会公众共同关心的资源与环境问题之一^[1,2], 其又以村镇生活污水和农业污水的非点源污染为主要污染源, 因此在污染源头原位收集并消减污染物是河流湖泊治理的主要途径之一^[3,4]。经过改良的稳定塘都以生态可持续发展为目标, 提高了综合利用价值。沉水植物稳定塘就是一种代表性的污水处理处

置系统, 由沉水植物、浮游生物、细菌、沉积物和水体组成, 使得污染物在生物相和非生物相中互相关迁移转化, 最终达到净化水体的目的, 现已广泛用

收稿日期: 2017-10-26; 修订日期: 2017-12-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-005); 国家自然科学基金项目(51409166)

作者简介: 刘淼(1993~), 女, 博士研究生, 主要研究方向是河湖生态修复、物理湖泊与水文学, E-mail: liumiao509@126.com

* 通信作者, E-mail: knchen@niglas.ac.cn

于河流的治理。

沉水植物作为水生系统的初级生产者之一，能够吸收营养盐和吸附水体物质沉降，通过化感作用抑制藻类生长，提高水体透明度、增加水体溶氧和固持沉积物，改善水体光照及生态环境^[5~7]。任文君等^[8]研究了篦齿眼子菜、马来眼子菜、金鱼藻和黑藻白洋淀富营养化水体的净化效果，黑藻的除磷效果最佳，金鱼藻的除氮效果最优，王丽卿等^[9]的研究则显示马来眼子菜和穗状狐尾藻对淀山湖氮磷去除效果最优。另外，污水的物质组成亦会影响沉水植物的净化效果，其中碳氮比就是一项反映污水碳氮平衡特征的重要指标：污水碳氮比表征了反应中可被利用的碳源量，对污水的氮素移除和 N₂O 排放具有关键的影响作用^[10]，段娟婧等^[11]通过对水芹浮床外加碳源，研究显示外加碳源可提高浮床对营养盐的去除率；Xia 等^[12]发现 SCBR 反应器的进水碳氮比影响氨氧化细菌和亚硝化细菌数量进而影响氮的去除效率；赵永军等^[13]发现菖蒲湿地在 C/N 为 2.5:1 时的 TN 去除率最高，而香蒲湿地在 C/N 为 5:1 时对 COD 和总磷的去除效果最佳。目前国内外开展的沉水植物净化水体的研究多为单一条件下某类沉水植物对水体污染物的去除效果，关于不同种沉水植物组合搭配后对污水净化效果的研究鲜见报道，与单种植物构建的稳定塘相比，不同类植物的组合稳定塘是增强还是减弱了净化效果？碳氮比条件改变又将如何影响沉水植物塘的污染物去除效果？

因此，本文选择常见的 3 种沉水植物种类，研究不同植物配置方式的稳定塘的净水效果；同时，探讨碳氮比对其去除效果的影响，以获得特定植物配置条件下的最优的碳氮比参数，以期在实际工程

中运用沉水植物塘进行污水处理时提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验选用 3 种水体常见沉水植物用于实验：苦草（*Vallisneria spiralis*）、轮叶黑藻（*Hydrilla verticillata*）、穗状狐尾藻（*Myriophyllum spicatum*），植株均购于水族馆。植物投入自来水中适应 3 d 后，选择生长情况较好、茎叶保存齐全且性状较为统一的株体用于实验，实验前进行植物的清洗、量长及称重。实验所用基质底泥取自巢湖入湖口南淝河湿地处的氧化塘，使用前将底泥过 20 目筛。实验用水采用人工配水^[14]，这是由于模拟实验中进水浓度需进行较精确的控制，且实验用水量较大。碳源由葡萄糖提供，氮源由硝酸钾和氯化铵提供，磷由磷酸二氢钾提供，由于采用自来水配置，因此未添加微量元素。

1.2 实验方案设计

实验场地选择在开阔的室外空地上，以符合实际温度和光照，并做防雨措施。实验装置主体为 100 L 不透明高强度塑料箱。

将预培养后的苦草、轮叶黑藻、穗状狐尾藻（株长均值分别为 15、25、25 cm）单独种植于填装有 1 kg 底泥的花盆中，每盆种植约 10 g 的植物，初始植物盖度 20%~30% 不等，按照表 1 的 7 种组合方式（A1~A7）放置在实验箱中，设置 3 组重复，另设 1 组对照（CK）只放置底泥，无植物。装置中加入约 60 L 的模拟废水，废水配置参数见表 2。实验时长为 15 d，隔日采集水样测定理化指标，每日向装置中添加补充因采样和蒸发失去的水分。

表 1 植物配置实验组设计

Table 1 Details of the submerged macrophyte combinations							
序号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
植物配置	6 盆苦草	6 盆狐尾藻	6 盆轮叶黑藻	3 盆苦草 3 盆黑藻	3 盆苦草 3 盆狐尾藻	3 盆狐尾藻 3 盆黑藻	2 盆苦草 2 盆狐尾藻 2 盆黑藻

表 2 植物配置实验所用人工废水配置情况/mg·L⁻¹

Table 2 Concentration of pollutants in the experiment/mg·L ⁻¹						
项目	高锰酸盐指数	氨氮	硝氮	总氮	磷酸盐	总磷
范围	45.10~52.60	4.5~5.60	4.10~5.30	10.10~11.00	0.33~0.42	0.37~0.47
均值	48.00	5.10	4.70	10.80	0.35	0.40

1.3 取样与分析方法

每日测定水体理化指标：水体水温、溶解氧

（DO）、pH、氧化还原电位使用 YSI 水质仪测量；用 100 mL 塑料瓶取水样，及时送回实验室分析测定

总氮(TN)、溶解态总氮(DTN)、总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)、高锰酸盐指数、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)和溶解性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)的浓度. TN、TP和高锰酸盐指数使用原水测定,其余指标使用0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤后的水样测定,水样预处理及分析测定方法均采用相应国家标准方法进行^[15].

1.4 数据处理与分析

本研究的数据在 Microsoft Office Excel 2016 中完成;数据的统计分析使用 IBM SPSS 22.0 软件,其中显著性检验采用 t 检验方法,方差分析采用 F 检验方法;最后使用 SigmaPlot 12.5 作图.

2 结果与分析

2.1 不同植物配置对污染物去除效率的影响

2.1.1 实验现象

实验初始时,各组塘内可见明显悬浮物,这是

运行初期系统受进水扰动导致底泥再悬浮;第3 d时,穗花狐尾藻组、苦黑狐组和对照组水体依旧浑浊[图1(a)],TN含量高于初始值,其余5组浊度有所下降;第5 d时,苦狐组和苦黑狐组中的苦草长势不良,苦草组植物长势优良,长度略有增加,苦黑组苦草生长正常,轮叶黑藻生长更优[图1(b)];第7 d时,苦草组和苦黑组水体清澈[图1(c)],狐尾藻组依然浑浊,各组合中的轮叶黑藻长势均优良,有分蘖,新叶长出,苦狐组中苦草生长较之前更差,穗花狐尾藻生长较好,黑狐组中穗花狐尾藻靠近根部位置叶片发黄凋落,黑藻长势良好;第9 d时,穗花狐尾藻组、轮叶黑藻组、狐黑组、苦黑狐组水色略发黄,其余澄清透明;第11 d时,各组水体均已澄清,各组植物有不同程度的凋落,只有轮叶黑藻有明显较长新枝长出,分枝能力最强[图1(d)],实验结束时观察到苦草根部长出较多的不定根.

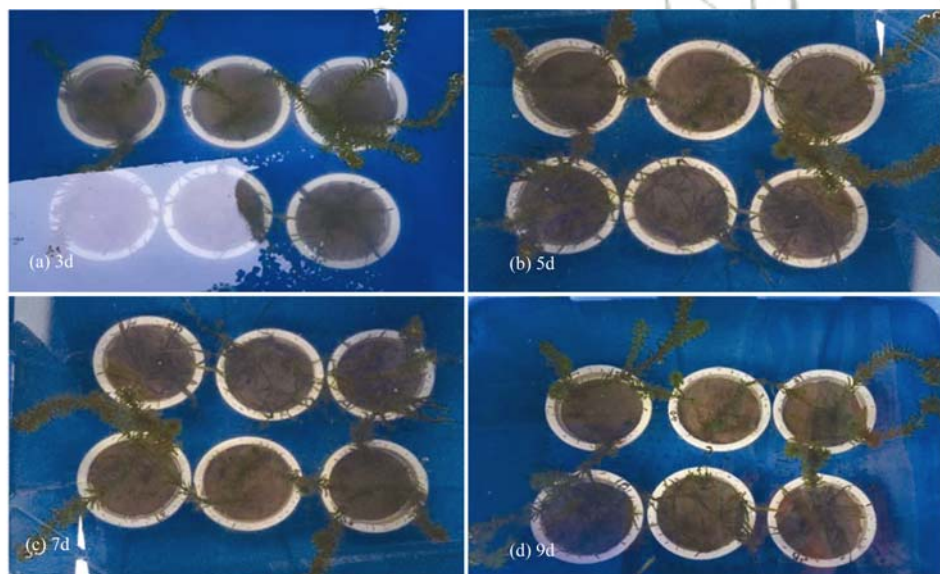


图1 苦草黑藻组植物生长状况

Fig. 1 Growth status of the group of *Vallisneris spiralis* and *Hydrilla verticillata*

2.1.2 营养盐去除效果分析

不同植物配置的稳定塘水质变化如图2所示.对8组数据进行单因素方差检验,结果表明8个实验组的TN、TP浓度分布差异均显著($P < 0.01$),即植物配置对稳定塘营养盐的去除具有显著影响.实验初始,由于大量有机物分解消耗氧气,塘内DO迅速降低到低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平[图2(d)],除苦草组外,TN和TP的去除率基本上为负值(图2),可能是由于塘内底泥向水体释放氮磷,而苦草组初始就对TN有去除效果说明苦草对固持底泥、沉降悬浮物有良好作用.第5 d开始,透明度逐渐

升高,微生物的活性增强数量增加,去除率稳定上升[图2(a)].随着停留时间增加,大多数实验组的TN浓度逐渐降低[图2(a)],第7 d时,苦草组和苦黑组已完全澄清,苦黑组对TN去除效果最优,去除率达到21.93%,其他实验组由于水体浑浊或种间竞争等原因造成去除率为负(穗花狐尾藻组为-12.72%)或较低(6.28%~14.55%).而第7 d时,穗花狐尾藻组的悬浮物才基本得以沉降,TN开始降低,其余实验组对TN的去除趋于平衡,这时高锰酸盐指数含量降低到一定水平[图2(c)],造成碳源不足或者剩余的大分子有机物不易被分解

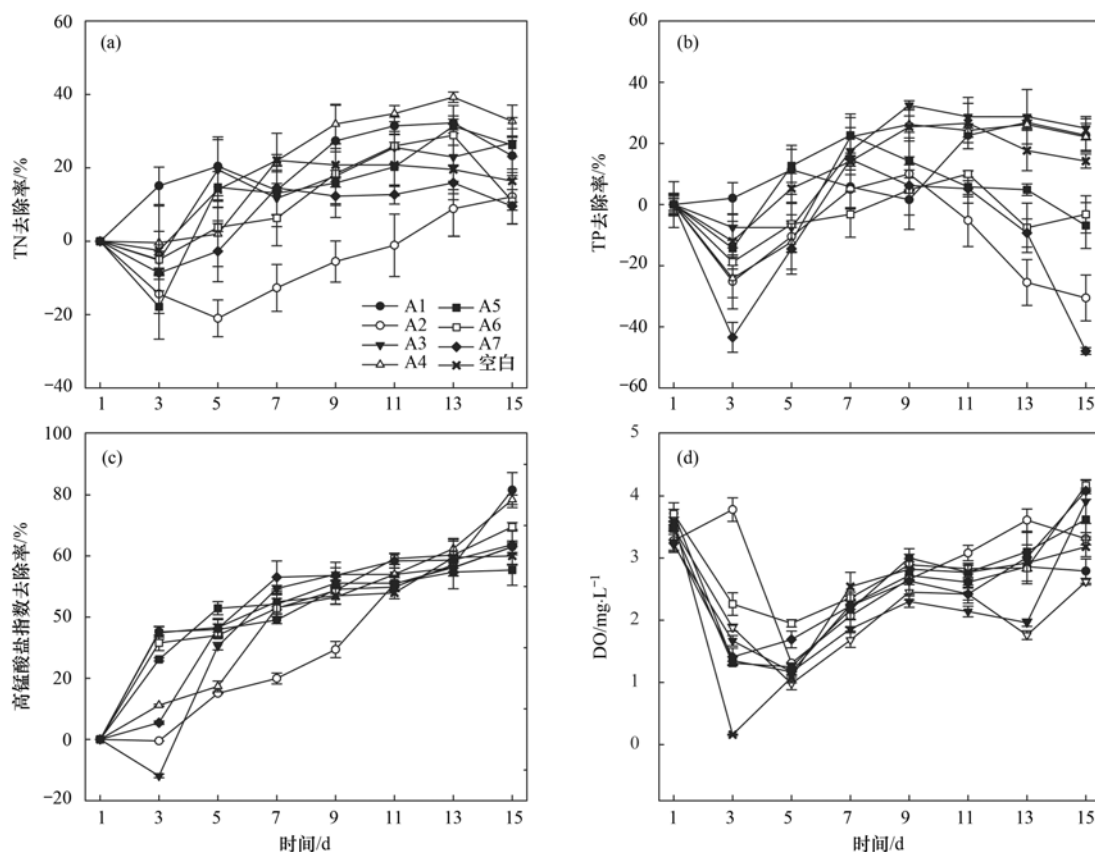


图2 植物配置对总氮、总磷、高锰酸盐指数的去除效果及溶解氧浓度变化

Fig. 2 Effect of submerged macrophyte combinations on the removal of TN, TP, permanganate index and the concentration of DO in water

利用,硝化反硝化反应速率减缓,氮素的去除主要依靠植物吸收无机态氮.第11 d之后,植物的落叶有腐烂分解的现象,释放氮磷营养盐,除轮叶黑藻组和穗花狐尾藻组外,其余实验组的TN浓度较前一天反升高[图2(a)].

实验初始,TP表现出和总氮相同的规律,底泥再悬浮造成向上覆水磷的释放,除苦草组外水体TP浓度均高于初始浓度[图2(b)].从第3 d开始,各组TP浓度有不同程度的降低,主要是化学吸附和沉降的作用,同时植物生长吸收固定了部分磷素[图2(b)].从第7 d开始,水体DO持续升高,达到 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,好氧环境促进了磷的沉降和吸附^[16],去除率逐渐升高.黑藻组和苦黑组的TP去除率在第9 d达到最大,分别达32.45%和26.18%,并且在之后去除率趋于稳定[图2(b)].第9 d以后,穗花狐尾藻组、苦狐组、狐黑组、苦狐黑组的TP去除率持续降低,甚至高于初始值,可能是由于底泥悬浮物未完全沉降继而覆盖到植物叶片表面造成植物生长不良,凋落腐烂分解的残体向水体释放了磷素.

实验结束时,TN去除率由高到低顺序为:苦黑

组(32.71%)>轮叶黑藻组(26.85%)>苦狐组(26.2%)>苦草组(23.28%)>空白组(16.4%)>穗花狐尾藻组(12.16%)>狐黑组(10.88%)>苦狐黑组(9.55%),TP去除率由高到低顺序为:轮叶黑藻组(24.97%)>苦草组(22.64%)>苦黑组(22.13%)>空白组(14.21%)>苦狐组(-3.2%)>苦狐组(-6.86%)>狐尾藻组(-30.55%)>苦狐黑组(-47.89%).综合起来,苦黑组对于TN和TP的平均去除率为27.12%,在7组植物配置中最高,因此苦黑组对于污水营养盐的去除效果最佳.

2.2 碳氮比对沉水植物塘污染物去除效率的影响

2.2.1 实验方案设计

采用第一阶段实验中最优植物组合(苦草、黑藻)模拟沉水植物塘,设置实验组:B1、B2、B3,对应3个碳氮比(以高锰酸盐指数和TN浓度的比值表征C/N)梯度,装置均放置3盆苦草和3盆轮叶黑藻($10 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$),装置中加入约60 L的模拟废水,废水配置参数见表3.设置3组重复.实验总时长为13 d,隔日采集水样分析理化指标,每日向装置中添加因采样和蒸发失去的水分.

表 3 碳氮比实验所用人工废水配置情况/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Concentration of pollutants in the experiment with different C/N ratios/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	高锰酸盐指数	氨氮	硝氮	总氮	磷酸盐	总磷	碳氮比
B1	28.68	4.95	5.19	10.14	0.80	0.97	1.89
B2	63.4	5.58	5.11	10.69	0.85	1.10	5.93
B3	97.48	5.07	5.00	10.06	0.81	1.00	12.09

2.2.2 氮的去除效果

实验初始, 3 个实验组的 TN 浓度均有下降[图 3(a)], B2、B3 组的去除率已超过 60%, B1 组达到 53%. 这是通过化学吸附, 将氮素固定在沉积物表层, 使污染物得以大幅削减, 同时沉水植物光合作用消耗水中 CO_2 , 导致 pH 值升高^[17], OH^- 与 NH_4^+ 结合, 使 NH_4^+ -N 以 NH_3 的形式吹脱, NH_4^+ -N 浓度急剧下降[图 3(c)]. 第 3 d 时, 3 组水面均出现了白色油膜状物质, 水体呈半透明浑浊状, 同时伴随着 DO 浓度低的特征, 其中 3 组实验组水体浑浊程度为 $\text{B3} > \text{B2} > \text{B1}$, 判断白色物质可能为生物膜^[11], 这种现象的出现影响了沉水植物的生长和光合放氧作用, 同时 NH_4^+ -N 和有机物等还原性物质持续耗氧, 水体 DO 的继续下降, 制造了缺氧的水下环境, 此时有利于 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的反硝化过程, 使得水体中 NO_3^- -N 到第 5 d 时去除率已达 90% 以上[图 3(d)]. 但是缺氧环境加剧了底泥中

NH_4^+ -N 的释放^[18], 各实验组 NH_4^+ -N 浓度大幅度升高[图 3(c)]. 第 7 d 时, 植物生长状况表现出差异性, B1 组植物生长最优, B3 组最差, 考虑是高浓度的碳源和 水体浑浊对植物生长造成胁迫, B3 组甚至出现叶片凋落现象, 其分解腐烂亦造成 NH_4^+ -N 含量升高[图 3(c)]. 第 9 d 时, 塘内还原性物质已逐渐减少, 白色物质消失, 水草光合放氧提供氧气, 水体逐渐转化为氧化性, 亚硝化、硝化细菌的活性增强^[19], NH_4^+ -N 浓度逐渐降低并趋于稳定, 最终 B2 组出水 NH_4^+ -N 浓度最低, 而 B1 组由于碳源不足减慢了反应速率, B3 组由于碳源过剩耗氧, 造成缺氧而致反应不完全[图 3(c)]. 通过 Pearson 相关性分析, 得到 DTN 与 NH_4^+ -N 变化呈显著正相关($r = 0.84, n = 21, P < 0.001$), 表明氮素的去除主要受氨氮降解进程的限制. 不同形态氮的去除效果显示[图 3(c) 和 3(d)], NO_3^- -N 的去除较完全, 均达 70% 以上[图 3(d)]. 实验结束时, TN 去除率由高

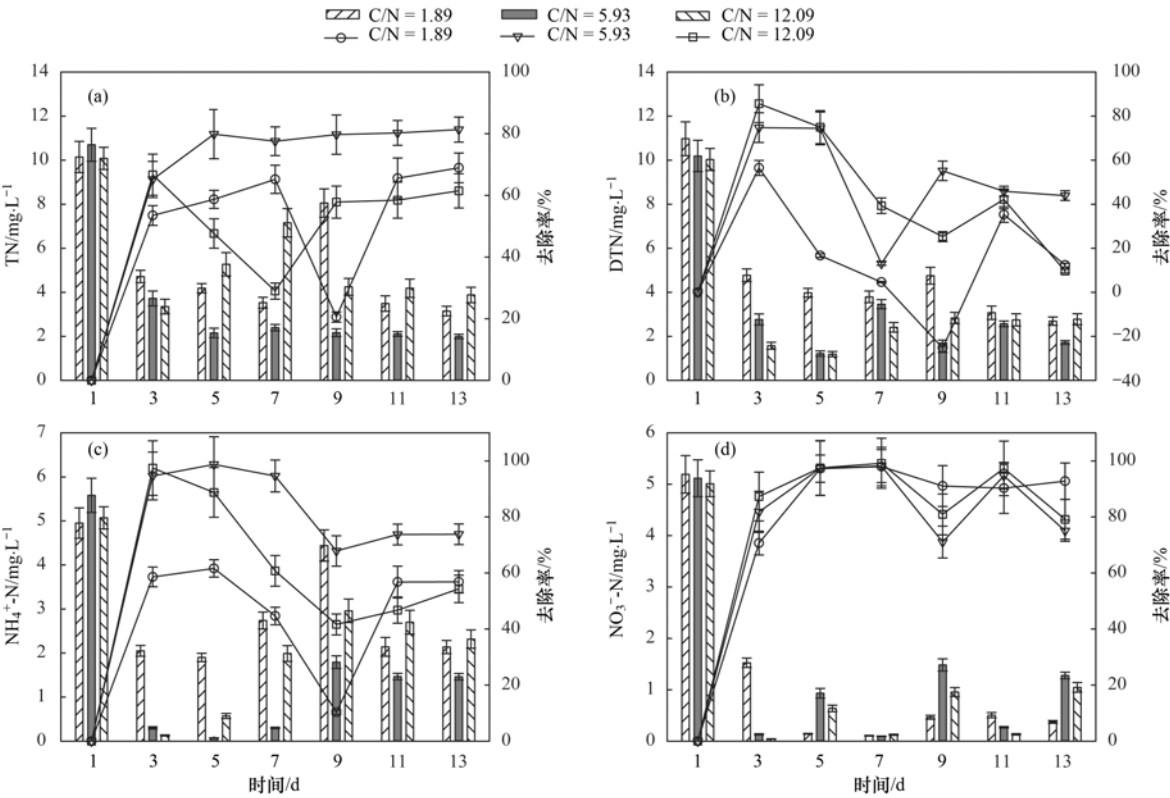


图 3 不同碳氮比下苦草黑藻植物塘对总氮、溶解性总氮、氨氮、硝氮的去除效果

Fig. 3 Effect of different C/N ratios on the removal of TN, DTN, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N from water

到低的顺序为: B2 (81.34%) > B1 (68.94%) > B3 (61.48%), B2 组(碳氮比=5.93)对氮的去除效果最优。

2.2.3 磷的去除效果

实验初期, 磷元素浓度迅速下降, 这是由于最初碳源充足, 且塘内 DO 浓度高[图 4(d)], 聚磷菌在好氧条件下吸收磷, 并以多聚磷酸盐的形式蓄积在体内^[11], TP 浓度迅速降低[图 4(a)], B1、B2 组的去除率超过 60%, B3 组达 33.81%, DTP 浓度去除率高于总磷去除率[图 4(b)], 说明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 被吸附到颗粒物表面被固定。第 5 d 时, 伴随着有机物等还原性物质的降解, 塘内缺氧, 聚磷菌在缺氧

环境下利用碳源释磷, 导致水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度持续上升[图 4(c)], 和第 3 d 相比, B3 组浓度升高最多, 由 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明 B3 组的底泥磷释放最剧烈, 这是由于 B3 组添加的碳源过多, 是 3 组中水体还原性最强的^[20]。第 9 d 时, B1、B2 组随着水中还原性物质的减少和植物释放氧气, 水体 DO 逐渐升高[图 4(d)], 聚磷菌重新吸收磷, B1、B2 组的 TP 浓度降至 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率达 65.67%、67.87%。实验结束时, TP 去除率由高到低的顺序为: B1 (69%) > B2 (68.26%) > B3 (26.13%), 因此 B1 组 (C/N = 1.89) 对磷的去除效果最优。

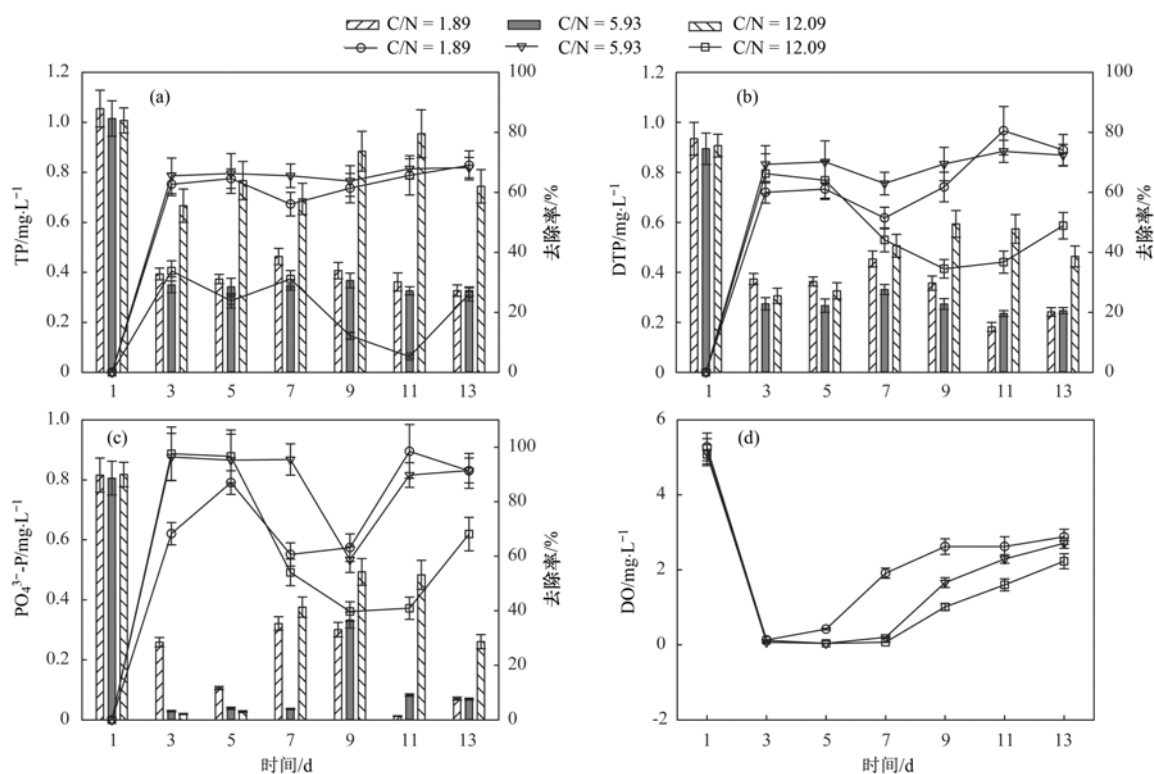


图 4 不同碳氮比下苦草黑藻植物塘对总磷、溶解性总磷、磷酸盐的去除效果及溶解氧浓度的变化

Fig. 4 Effect of different C/N ratios on the removal of TP, DTP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, and the concentration of DO in water

2.2.4 对高锰酸盐指数的去除效果

实验初始, 由于投加的葡萄糖为低分子有机碳源, 容易被氧化分解, 易被反硝化细菌和聚磷菌利用, 所以第 3 d 时, 高锰酸盐指数浓度迅速下降(图 5), 在后期的运行过程中, 高锰酸盐指数缓慢下降, 最终 3 组的高锰酸盐指数浓度相差不大: B1 ($6.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) < B2 ($7.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) < B3 ($9.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), B1、B2、B3 在运行周期内高锰酸盐指数降解量分别为 1301.33、3372.64、5261.9 mg。B1 组在第 7 d 时, 已趋于稳定, 剩余的碳源较难被微生物利用; B2 组对 TN、TP 的去除率高于 B3 组,

然而投加碳源量远低于 B3 组, 说明 B2 组已经为系统提供了足够的碳源, B3 组过量的碳源不仅没有促进氮磷的去除, 反而剩余的耗氧性碳源物质难以被降解造成了水体缺氧。

3 讨论

上述实验结果显示, 几种沉水植物的不同组合方式中, 苦草和黑藻组的综合净水效果最佳, 这可能是由于轮叶黑藻的耐污能力强^[21,22], 生长速度快, 可快速吸收营养盐用于自身生长, 轮叶黑藻对氮、磷的去除能力优于穗状狐尾藻, 该结论与潘保

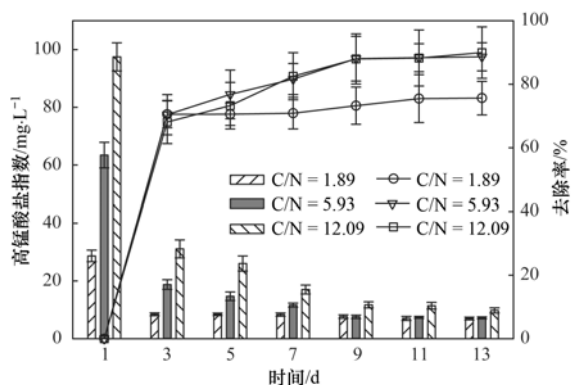


图5 不同碳氮比下苦草黑藻植物塘对有机物的去除效果

Fig. 5 Effect of different C/N ratios on the reduction of permanganate index in the water

原等^[23]的研究结果一致. 苦草发达的根系有利于固定沉积物, 防止颗粒物再悬浮, 提高水体透明度, 为沉水植物的生长提供充足的光照和良好的水下光环境^[24], 其根系泌氧, 改善底泥的厌氧状态, 抑制了底泥磷的释放. 刘玉超等的研究表明^[25], 轮叶黑藻以吸收水体中营养物质为主, 苦草以吸收底泥中营养为主, 利用两者的协同作用可以增加沉水植物自身对氮、磷的吸收作用^[26], 提高沉水植物塘对污染物的去除效果, Han 等^[27]的研究也同样表明多物种水处理系统的净水效果优于单物种. 凡有穗状狐尾藻的植物组合均较浑浊, 水力停留时间达 7 d 以上才逐渐澄清, 较低的透明度极大地影响了沉水植物的生长和净化效果, 在实验后期对水体的去除率才逐渐上升, 需要较长的水体停留时间才能净化水质, 这在实际工程中是难以实现的. 另外穗状狐尾藻有冠层位置的优势, 能够漂浮在水面上遮挡阳光, 使其他植物处于中下层位置, 使其生长受到抑制^[28], 特别是苦草, 甚至出现了叶片枯黄脱落现象. 同时值得注意的是, 空白组对氮、磷均有一定去除效果, 在无植物的水体中同样也进行着硝化反硝化过程和磷沉降, 此外, 实验过程中观察到空白组有较多藻类长出, 藻类通过生长繁殖将一部分氮、磷固定在体内, 提高水体溶解氧. 各实验组均未见明显藻类, 与空白组对比可知沉水植物具有抑藻效应, 表明沉水植物塘适合用于净化富营养化水体^[29]. 另外, 结果显示在实验周期内, TN、TP 的去除率均为先增加后降低的规律, 因此并非停留时间越长越好, 需选择合适的停留时间, 并及时补充氮源, 提高微生物活性, Chen 等^[14]的研究结果显示海菜花的净水效果在前 4 d 的去除率为正, 之后将随时间变化而下降, 水力停留时间不宜超过 4 d.

苦草黑藻组沉水植物塘调节 C/N 为 5.93 时,

对污染物的综合去除效果最佳, 对氮、磷、有机物的去除率分别为 81.34%、68.26%、88.65%. 较高的 C/N 会造成碳源过剩, 引起水体厌氧, 抑制了亚硝化、硝化细菌的活性^[30], 而且酸性环境将会抑制氨的挥发, 不利于 NH_4^+ -N 的去除. 高 C/N 制造的厌氧环境亦加速了底泥的 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 释放, 从而降低了污染物去除率. 系统在较低的 C/N 条件下运行时, 不足以提供氮素的硝化反硝化过程提供必需的碳源, 限制了系统对氮的去除效果. 磷在实验初始时主要通过絮凝吸附和微生物的新陈代谢的作用去除, 实验后期, 在塘内好氧和缺氧的交替环境中, 微生物反复吸、放磷, 使得磷浓度在持续动态变化中^[31]. 低 C/N 对磷的去除效果影响较好, 说明好氧的环境更有利于磷素的吸收沉降. 因此, 适当的 C/N 可以为反应过程提供碳源, 一定数量的碳源还可分解为 CO_2 , 促进植物光合作用, 还可以形成在植物根区的还原态介质中形成氧化态微环境, 使有氧区域和无氧区域共同存在, 有利于充分发挥微生物降解有机污染物的作用^[13]. Pearson 相关性分析显示, PO_4^{3-} -P 的去除效果与 DO 浓度变化呈显著负相关 ($r = -0.7$, $n = 21$, $P < 0.001$), 表明影响 PO_4^{3-} -P 的去除的关键因素是水体氧化还原环境, 因此说明 C/N 主要是通过影响水体氧化环境来影响污染物的降解过程. 本实验只研究了以葡萄糖作为碳源的情况, 在实际工程中有机的种类和比例较为复杂, 不同碳源和 C/N 对沉水植物塘的综合影响需进一步深入探究.

为探究实际工程中沉水植物塘对污水的净化效果, 于 2016 年对巢湖入湖口的南淝河旁路湿地净化系统中的沉水植物稳定塘单元进行长期监测, 共获得有效数据 6 次. 该稳定塘长 40 m, 宽 17 m, 深 1.2 m, 塘内混合种植苦草和黑藻. 进水 TN 浓度为 $8 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 TP 浓度为 $0.3 \sim 0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C/N 为 $0.73 \sim 2.98$, 不同 C/N 条件下的氮磷去除效果如图 6.

结果表明, 随着 C/N 的改变, 氮磷去除率也表现出规律性的变化, 5 月和 9 月的 C/N 分别为 4.96、6.27, 这两个月的氮磷去除率也达到最高值, 约 30%~40%, 在 4 月、6 月、8 月较低或较高 C/N 的条件下, TN 去除率较 5 月、9 月有所降低, 而 TP 去除率有较大幅度的降低. 2 月和 4 月的污染物去除效果较差, 甚至出水浓度高于进水浓度是由于该地区 5~10 月为沉水植物生长茂盛期, 初春时节沉水植物生长暂缓甚至死亡. 因此, 南淝河旁路湿地

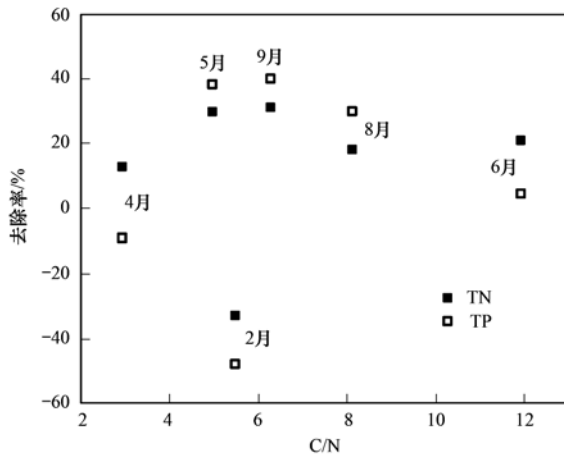


图6 南淝河旁路沉水植物稳定塘在不同碳氮比条件下对总氮、总磷的去除率

Fig. 6 Effect of different C/N ratios on the removal of TN and TP in the submerged macrophyte pond of the Nanfei River

净化系统中的沉水植物稳定塘季节性的监测结果表明, 沉水植物可以显著增强稳定塘的净水效果, 并且在中等水平 C/N ($C/N \approx 5$) 条件下, 对污水的净化效果较优, 与上述模拟实验得到的结论相符合。

4 结论

(1) 3 种常见沉水植物(苦草、轮叶黑藻、穗状狐尾藻)组合构建 7 种沉水植物塘中苦草与轮叶黑藻组合对污水的综合净化效果最佳, 对于 TN 的平均去除率达到 32.71%, TP 的平均去除率达到 22.13%。

(2) 苦草和轮叶黑藻组合构建沉水植物塘中进水设置低、中、高(1.89、5.93、12.09)3 个 C/N 梯度, 中等 C/N 条件下 ($C/N = 5.93$) 对污水的综合净化效果最佳, 对 TN、TP 和高锰酸盐指数的平均去除率达到 81.34%, 68.26%, 90.05%。

(3) 实验结果表明, 不同的沉水植物类型组合构建沉水植物稳定塘能取得比单种植物塘更好的去污效果, 并且 C/N 对于沉水植物塘的去污效果有着显著的影响, 通过投放碳源或氮源物质, 改变污水的碳氮比, 能够有效提升沉水植物塘的去污效果。

参考文献:

[1] 秦伯强, 高光, 胡维平, 等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 9-16.
Qin B Q, Gao G, Hu W P, et al. Reflections on the theory and practice of shallow lake ecosystem restoration [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 9-16.
[2] 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 等. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2514-2520.

Weng B S, Yan D H, Zhao Z X, et al. Roles of constructed wetland system in lake ecological restoration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(12): 2514-2520.
[3] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
Wu X L. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Environmental Science, 1995, 16(3): 83-86.
[4] 陈明利, 吴晓芙, 陈永华, 等. 景观型人工湿地污水处理系统构建及植物脱氮效应研究[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 660-666.
Chen M L, Wu X F, Chen Y H, et al. Construction of a landscaping-type wetland system for wastewater treatment and analysis of plant denitrifying effect[J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 660-666.
[5] Depew D C, Houben A J, Ozersky T, et al. Submerged aquatic vegetation in Cook's Bay, Lake Simcoe: assessment of changes in response to increased water transparency[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37(S3): 72-82.
[6] Carr J, D'Odorico P, McGlathery K, et al. Stability and bistability of seagrass ecosystems in shallow coastal lagoons: role of feedbacks with sediment resuspension and light attenuation [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 115(G3): G03011.
[7] Hicks A L, Frost P C. Shifts in aquatic macrophyte abundance and community composition in cottage developed lakes of the Canadian Shield[J]. Aquatic Botany, 2011, 94(1): 9-16.
[8] 任文君, 田在锋, 宁国辉, 等. 4 种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究[J]. 生态环境, 2011, 20(2): 345-352.
Ren W J, Tian Z F, Ning G H, et al. Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian Lake [J]. Ecology and Environment, 2011, 20(2): 345-352.
[9] 王丽卿, 李燕, 张瑞雷. 6 种沉水植物系统对淀山湖水质净化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1134-1139.
Wang L Q, Li Y, Zhang R L. The purification of Lake Dianshan water quality with six species of submerged macrophyte systems [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1134-1139.
[10] Huang L, Gao X, Guo J S, et al. A review on the mechanism and affecting factors of nitrous oxide emission in constructed wetlands [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(8): 2171-2180.
[11] 段婧婧, 薛利红, 冯彦房, 等. 碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 384-391.
Duan J J, Xue L H, Feng Y F, et al. Effect of carbon/nitrogen ratio in low pollution wastewater on nitrogen and phosphorus removal in a floating-bed *Oenanthe javanica* system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 384-391.
[12] Xia S Q, Li J X, Wang R C, et al. Tracking composition and dynamics of nitrification and denitrification microbial community in a biofilm reactor by PCR-DGGE and combining FISH with flow cytometry[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(3): 370-378.
[13] 赵永军, 田云飞, 黄德英, 等. 四种不同植物湿地对不同 C/

- N 比生活污水的净化效果与季节动态[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 193-200.
- Zhao Y J, Tian Y F, Huang D Y, *et al.* The seasonal variation performance of vertical subsurface flow constructed wetlands with four plants under different influent C/N ratios[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 193-200.
- [14] Chen S Q, Chu Z S. Purification efficiency of nitrogen and phosphorus in *Ottelia acuminata* on four kinds of simulated sewage[J]. Ecological Engineering, 2016, **93**: 159-165.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 等. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(2): 151-154.
- Cai J B, Ding X F, Peng H Y, *et al.* Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, **21**(2): 151-154.
- [17] 赵安娜, 冯慕华, 李文朝, 等. 沉水植物伊乐藻光合放氧对水体氮转化的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 757-761.
- Zhao A N, Feng M H, Li W C, *et al.* Effect of photosynthesis oxygen evolution of submerged macrophyte *Elodea nuttallii* on nitrogen transformation in water[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(4): 757-761.
- [18] 吴群河, 曾学云, 黄钊. 溶解氧对河流底泥中三氮释放的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(1): 21-24, 52.
- Wu Q H, Zeng X Y, Huang Y. The effect of DO on nitrogen releasing from sediments of rivers[J]. Environmental Pollution and Control, 2005, **27**(1): 21-24, 52.
- [19] 王美丽, 刘春, 白璐, 等. 曝气对黑臭河道污染物释放的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(11): 5249-5254.
- Wang M L, Liu C, Bai L, *et al.* Effect of aeration on pollutants release and removal in black-odor river[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(11): 5249-5254.
- [20] 易文利, 王圣瑞, 万红莲, 等. 外加碳源及沉水植物狐尾藻对上覆水中各形态磷浓度的影响[J]. 江西农业学报, 2011, **23**(8): 127-129.
- Yi W L, Wang S R, Wan H L, *et al.* Effects of carbon source addition and submerged plant *Myriophyllum spicatum* on concentration of different phosphorus species in overlying water[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, **23**(8): 127-129.
- [21] 金相灿, 郭俊秀, 许秋瑾, 等. 不同质量浓度氨氮对轮叶黑藻和穗花狐尾藻抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(1): 1-5.
- Jin X C, Guo J X, Xu Q J, *et al.* Effects of different concentrations of NH_4^+ on antioxidant system of *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum* [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(1): 1-5.
- [22] 郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿, 等. 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 118-123.
- Guo J X, Xu Q J, Jin X C, *et al.* Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla verticillata* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(1): 118-123.
- [23] 潘保原, 杨国亭, 穆立蓄, 等. 3 种沉水植物去除水体中氮磷能力研究[J]. 植物研究, 2015, **35**(1): 141-145.
- Pan B Y, Yang G T, Mu L Q, *et al.* Removal ability of three submersed macrophytes on nitrogen and phosphorus from water [J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, **35**(1): 141-145.
- [24] 时志强, 张运林, 王明珠, 等. 长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 517-524.
- Shi Z Q, Zhang Y L, Wang M Z, *et al.* Characteristics of diffuse attenuation coefficient of underwater irradiance in the lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 517-524.
- [25] 刘玉超, 于谨磊, 陈亮, 等. 浅水富营养化湖泊生态修复过程中大型沉水植物群落结构变化以及对水质影响[J]. 生态科学, 2008, **27**(5): 376-379.
- Liu Y C, Yu J L, Chen L, *et al.* Changes of submerged macrophyte community structure and water quality in the process of ecosystem restoration of a shallow eutrophic lake [J]. Ecological Science, 2008, **27**(5): 376-379.
- [26] Ge Y, Han W J, Huang C C, *et al.* Positive effects of plant diversity on nitrogen removal in microcosms of constructed wetlands with high ammonium loading [J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 614-623.
- [27] Han W J, Chang J, Fan X, *et al.* Plant species diversity impacts nitrogen removal and nitrous oxide emissions as much as carbon addition in constructed wetland microcosms [J]. Ecological Engineering, 2016, **93**: 144-151.
- [28] 段德龙, 于金金, 杨静, 等. 伊乐藻与狐尾藻、苦草和金鱼藻的竞争研究[J]. 河南农业科学, 2011, **40**(8): 149-152, 155.
- Duan D L, Yu J J, Yang J, *et al.* Research on competition of *Elodea nuttallii* with *Myriophyllum verticillatum*, *Vallisneria spiralis* and *Ceratophyllum demersum* [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, **40**(8): 149-152, 155.
- [29] 汤仲恩, 种云霄, 吴启堂, 等. 3 种沉水植物对 5 种富营养化藻类生长的化感效应[J]. 华南农业大学学报, 2007, **28**(4): 42-46.
- Tang Z E, Zhong Y X, Wu Q T, *et al.* Allelopathic effects of three submerged macrophytes on five eutrophic algae[J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, **28**(4): 42-46.
- [30] Saeed T, Sun G Z. Enhanced denitrification and organics removal in hybrid wetland columns: comparative experiments [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 967-974.
- [31] 李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 等. 曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3484-3488.
- Li H Z, Yao S J, Xu Z X, *et al.* Research of controlling condition for aeration stabilization pond dealing with sanitary waste of countryside [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3484-3488.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)