

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骁鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响

周裔文^{1,2}, 许晓光², 韩睿明², 周晓红^{1*}, 冯德友¹, 李致春², 王国祥²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013; 2. 南京师范大学环境学院, 南京 210008)

摘要: 以沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 为对象, 通过室内控制实验, 研究营养盐负荷对苦草净化水体氮磷能力的影响; 利用水下饱和脉冲荧光仪 (Diving-PAM) 研究营养盐负荷对苦草光合荧光特性的影响. 结果表明, 在本实验设置的氮磷浓度范围内 ($TN \leq 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 随营养盐浓度的升高, 苦草对水体氮磷的净化能力逐渐增强; 在高浓度营养盐组 ($TN = 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP = 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 水体氮磷去除率可达 95% 以上, 当铵态氮含量较高时, 苦草优先吸收铵态氮; 中高浓度营养盐组 ($TN: 8 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP: 0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对苦草叶片 F_v/F_m 无显著影响; 低浓度营养盐组 ($TN = 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP = 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 能够提高苦草叶片的 F_v/F_m , 有利于苦草生长. 在本实验条件下, 水体氮磷营养盐浓度越高, 对苦草叶片的光合活性和光耐受能力抑制作用越明显; 随着水体营养盐逐步下降, 苦草叶片的光合活性逐渐恢复, 捕光能力无明显变化.

关键词: 水体氮磷; 营养盐负荷; 苦草; 光合荧光特性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1180-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705111

Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by *Vallisneria natans* and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics

ZHOU Yi-wen^{1,2}, XU Xiao-guang², HAN Rui-ming², ZHOU Xiao-hong^{1*}, FENG De-you¹, LI Zhi-chun², WANG Guo-xiang²

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210008, China)

Abstract: Submerged macrophytes are an important component of aquatic ecosystems. During the growing period, submerged macrophytes can absorb nitrogen and phosphorus nutrients to reduce pollution loadings. Shoots of submerged macrophytes can also promote the adhesion of suspended substances in water, reducing the turbidity. The release of nutrients in sediments can be suppressed by its root system, and the resuspension of sediments caused by disturbance of winds and waves can also be resisted. The role of submerged macrophytes in ecological restoration of eutrophic lakes has attracted widespread attention. In 1960, the submerged plants *Vallisneria natans* and *Potamogeton malaiianus* had been the dominant species in East Taihu. However after 2002, *Nymphaoides peltatum*, *Elodea nantali*, *P. malaiianus*, etc. have gradually taken over the dominant roles along with significant elevations of nitrogen and phosphorus levels. Nutrients in water are not the only key factors causing eutrophication of water bodies; the nutrient source for submerged plant growth affect both the purification efficiency and the photosynthetic characteristics of submerged macrophytes. Excessive nitrogen and phosphorus concentrations can inhibit the photosynthetic physiological activities of submerged macrophytes, affecting the succession of aquatic vegetation. In addition, under high nutrient conditions, the competition from periphytic algae and planktonic algae may also directly poison submerged macrophytes, leading to its degradation and disappearance. Systematic studies on the regulation and photosynthetic fluorescence response mechanism of submerged macrophytes to varied nutrient loadings are helpful in revealing their relationships. The seedlings of submerged macrophyte *V. natans* were transplanted in a laboratory mesocosm to study the effect of nutrient loadings on its regulation of water nitrogen and phosphorus. Three nitrogen and phosphorus loadings from low, medium, and high levels derived from nitrate, ammonium, and phosphate were setup as the aquatic medium for the plant growth. Twelve harvests were carried out to determine the evolution of nutrient removal performance of *V. natans*. Its photosynthetic fluorescence characteristics were measured by a pulse-amplitude modulated fluorometer (Diving-PAM). Results showed that the nitrogen and phosphorus adsorption abilities of *V. natans* were gradually enhanced with the increase of nutrient concentrations in the range of $TN \leq 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $TP \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the treatment of high nutrient concentrations ($TN = 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $TP = 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the removal rates of nitrogen and phosphorus reached more than 95%. *V. natans* preferentially absorbed ammonium nitrogen when its concentration was high. The medium nutrient concentrations ($TN: 8 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $TP: 0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) did not

收稿日期: 2017-05-12; 修订日期: 2017-09-05

基金项目: 江苏省水利科技项目(2016050); 国家自然科学基金项目(41403064); 江苏省教育厅基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20140922); 江苏省教育厅高校自然科学研究项目(14KJB610007); 江苏省科技厅科技支撑重点项目(BE2016324)

作者简介: 周裔文(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: ahzhoull@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: xhzhou0214@163.com

significantly affect the F_v/F_m ratio of leaves. However, the low nutrient concentrations ($TN = 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $TP = 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) could improve the F_v/F_m ratio of leaves and were beneficial for the growth of *V. natans*. The inhibition of photosynthetic activity and light tolerance were enhanced with the increase in nutrient concentrations. The photosynthetic activity of *V. natans* gradually recovered with no significant changes in the capacity for light harvesting, when the nutrient concentrations gradually decreased in the water. Our results indicate that the high nitrogen and phosphorus loadings indeed hamper the photosynthetic capacity, which may subsequently restrain the maintenance of the dominance of *V. natans* in the submerged macrophyte communities.

Key words: water nitrogen and phosphorus; nutrient loadings; *Vallisneria natans*; photosynthetic fluorescence characteristics

当前, 随着我国工农业的快速发展以及城市化进程的迅猛发展, 大量含氮、磷的工业及生活污水的排放, 造成水体氮磷元素严重超标, 由此导致湖泊等自然水体发生严重的富营养化^[1, 2]. 目前, 利用沉水植物修复重污染河道^[3]和富营养化湖泊生态系统受到普遍关注^[4-8]. 沉水植物作为水生生态系统中重要的组成部分^[9], 其生长过程中可吸收水体氮、磷等营养盐, 从而降低水体氮磷污染负荷. 此外, 沉水植物可以通过体表来附着水体中的悬浮物, 降低水体浊度^[10], 并通过其根系抑制沉积物中营养物质向水体中的再释放^[11], 同时还可以抵抗因风浪扰动引起沉积物的再悬浮^[12], 故沉水植物在水环境生态修复过程中发挥着巨大的作用.

赵凯等^[13]的研究发现 1960 年东太湖沉水植物优势种为苦草和马来眼子菜, 到 2002 年后逐渐演变成荇菜、伊乐藻、马来眼子菜等成为优势种, 苦草不再成为优势种. 水域环境中水生植被的演替受多种因素影响. 有学者认为沉水植物生长过程中极易受生物因素和非生物因素等各种因子的影响^[14-16]. 其中非生物因素中营养盐既是导致水体富营养化的关键因素, 又是沉水植物生长的营养来源, 而研究发现营养盐水平不仅影响沉水植物的净化效率^[10, 17], 还对沉水植物的光合特性产生影响^[18], 过高的氮、磷浓度可以抑制沉水植物的光合生理活动^[18], 而光合作用是沉水植物进行生命活动的关键环节. 此外, 有学者认为沉水植物在高营养条件下, 由于与附着藻类和浮游藻类之间的竞争关系而导致沉水植物消亡^[19], 但也有学者认为营养盐能够直接毒害沉水植物^[20]. 可见, 系统性研究不同营养条件下沉水植物对水体营养盐的调控和光合荧光响应机制有助于揭示两者之间的关联.

近年来, 水下饱和调制荧光仪 (Diving-PAM) 的出现, 使得原位无损测定沉水植物的光合作用成为可能^[21, 22]. 苦草 (*Vallisneria natans*) 作为常见的水鳖科多年生沉水植物, 具有耐污性强, 分布广泛的特点, 常作为修复富营养化水体的物种^[23]. 本研究重点关注沉水植物苦草在自然水体中可能存在的营

养环境, 研究在一个营养盐衰减周期内, 不同营养盐负荷下成年苦草对水体营养盐的净化能力, 并通过原位测定苦草叶片的光合荧光参数和快速光响应曲线, 探讨水体营养盐对苦草叶片光合系统的影响, 以为沉水植物修复污染河道和富营养化水体提供实验依据, 并为水生生态系统持续健康发展提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 实验材料与设计

实验所用沉积物采集自东太湖 ($31^{\circ}24'42''\text{N}$, $120^{\circ}00'38''\text{E}$), 经自然风干, 去除粗大颗粒及动植物残体后备用, 沉积物氮磷背景值分别为: $TN = (1047.86 \pm 87.65) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $TP = (590.84 \pm 15.05) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 2016 年 4 月 20 号从南京师范大学仙林校区采月湖采集苦草运回实验室后选取生长相近的苦草 (约 35 cm), 洗净之后种植于盛有 2/3 体积沉积物的塑料花盆 ($20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$) 内, 每盆种植 8 株, 将其移置到 120 L 的聚乙烯蓝色塑料水桶 ($60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 75 \text{ cm}$) 中, 每桶移种 3 盆, 置于南京师范大学生态修复平台玻璃温室中培养 ($32^{\circ}06'27''\text{N}$, $118^{\circ}54'19''\text{E}$), 温室内光照充足.

待苦草逐渐适应实验系统生长至水面后 (2016 年 8 月 10 号), 抚育期间水体中 TN 和 TP 分别为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 向不同处理组中投加不同量的 KNO_3 、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 , 使水体中的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 TP 浓度达到设计浓度 (表 1), 其中 T0 为不投加营养物对照组. 实验期间根据水面基线 (约 70 cm), 每 3 d 补足蒸发和取样造成的水量损失, 实验结束后 (2016 年 9 月 16 号) 破坏性采样, 同时测定各实验组苦草的生物量.

表 1 各实验水体中投加 N、P 的质量浓度

Table 1 Concentration of N and P nutrients in each experimental water

处理组	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	
T0 (对照组)	—	—	—
T1 (低浓度)	2	1	0.3
T2 (中浓度)	6	2	0.6
T3 (高浓度)	8	4	1.0

1.2 样品采集与测定

1.2.1 水样指标及测定方法

利用虹吸法采集水样,共采集12次,水质分析指标包括TN、TP、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N. TN采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定(GB 11894-1989); TP采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11894-1989);将水样预先经过0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤后,用连续流动水质分析仪(Auto Analyzer3,德国)测定 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的浓度.

1.2.2 叶绿素荧光参数

分别于实验开始的第0、3、10、25 d上午06:00~08:00测定苦草的叶绿素荧光参数,用水下饱和脉冲荧光仪 Diving-PAM(WALZ,德国)和数据采集软件 Wincontrol 进行测定. 连体叶片使用叶夹遮光处理(暗适应)5 min后,打开叶夹,开启检测光[0.15 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],测得初始荧光(F_0),随后开启饱和脉冲光[4000 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,0.8 s],测得最大荧光值(F_m),根据 F_0 和 F_m 可计算出PS II最大量子产量[F_v/F_m , $F_v/F_m = (F_0 - F_m)/F_m$].

1.2.3 苦草叶片快速光响应曲线

分别于实验开始的第0、3、10、25 d上午10:00~11:00测定苦草叶片快速光响应曲线,光化光强度梯度为:0、24、143、276、418、615、832、1047、1236 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,在任一光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)强度下照射后,测得打开饱和脉冲前的荧光值(F),打开饱和脉冲得到 F'_m ,由此测得PS II的有效量子产率(effective quantum yield, Y): $Y = (F'_m - F)/F'_m$,根据 Y 和PAR计算出相对电子传递速率(relative electron transport rate, rETR)^[24]: $\text{rETR} = Y \times 0.5 \times 0.84$.

1.2.4 快速光曲线拟合

采用SPSS19.0软件进行快速光曲线拟合,曲线拟合采用最小二乘法,快速光曲线的拟合Platt等^[24,25]的公式,其方程式为:

$$\text{rETR} = \text{rETR}_{\max} [1 - \exp(-\alpha \cdot \text{PAR}/\text{rETR}_{\max})] \cdot \exp(-\beta \cdot \text{PAR}/\text{rETR}_{\max})$$

式中, rETR_{\max} 为无光抑制时最大潜在相对电子传递速率; α 为rETR曲线的初始斜率,反映了植物对光能的利用能力; β 为光抑制参数.由此可以得出半饱和光强($I_k = \text{rETR}_{\max}/\alpha$).

1.3 数据处理与讨论

采用Excel 2010对实验数据的处理与分析,用Origin 8.6软件绘制图件,利用SPSS 19.0软件进行

Duncan 统计分析,比较处理组之间以及天数之间的差异, $P < 0.05$ 表示差异显著.

2 结果与讨论

2.1 苦草生长及对营养盐的吸收和利用

苦草主要依靠根系和茎叶吸收环境中的氮、磷营养盐^[26-28],实验末期各处理组中单株苦草根冠比、茎叶重和单株重如图1中所示,从中可知,在T0和T1处理组中的苦草根冠比要低于T2和T3处理组,研究认为沉积物中营养丰富度对植物的根冠比无明显的影响^[29],而实验中沉积物营养丰富,水体中的不同营养状况导致苦草根冠比的变化.随着营养盐上升,苦草的单株株重表现出先升高后下降的趋势,其中T1处理组中苦草的株重最高为0.55 $\text{g}\cdot\text{ind}^{-1}$,T3处理组株重最小为0.40 $\text{g}\cdot\text{ind}^{-1}$,显著低于其他处理组($P < 0.05$).同时苦草的茎叶干重也表现先升高后下降的趋势,其中T1处理组中苦草的茎叶重为0.37 $\text{g}\cdot\text{ind}^{-1}$,要显著高于另外3个处理组($P < 0.05$).实验表明随着水体中营养逐渐升高,苦草的生物量受到显著影响,低浓度营养盐有利于促进苦草生物量的累积,而过高的营养盐抑制苦草的生长,这与文明章等^[30]关于水体营养盐对苦草生长的影响的结论一致.

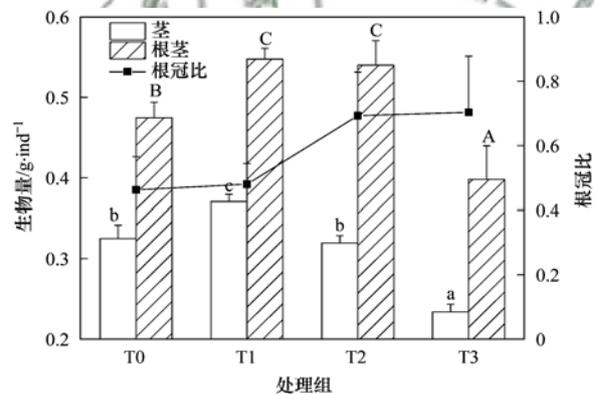


图1 实验末期各处理组苦草生物量和根冠比

Fig. 1 Change of dry weight and root-shoot ratio of *V. natans* in each group

各处理组水体营养盐变化如图2所示.由图2(a)和2(b)可知,实验期间各实验组TN和TP均有不同程度的下降,表现为以负指数的形式衰减[图2(a)和2(b)].熊剑等^[17]认为营养盐的衰减过程可以利用指数方程: $c_t = c_0 e^{-bt}$ 拟合,式中, c_0 表示实验开始时TN和TP的初始浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_t 表示 t 时TN和TP的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); b 为TN和TP的衰减系数(d^{-1}); t 表示天数(d),各拟合参数

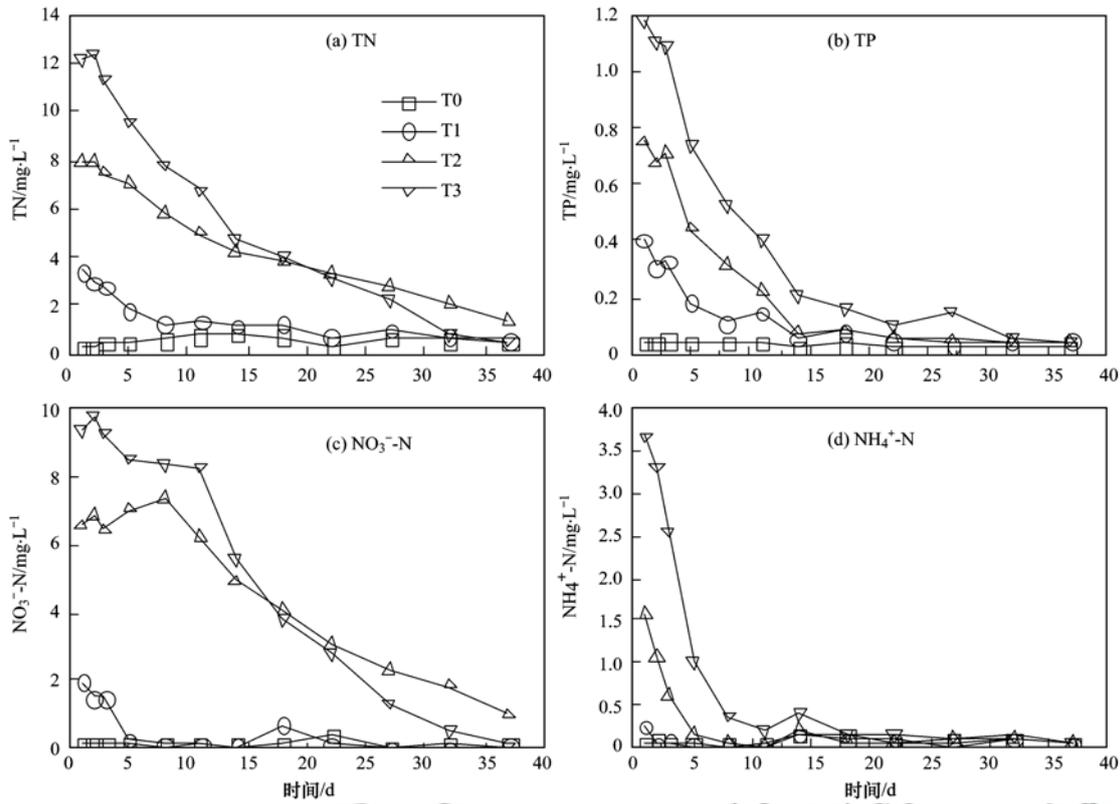


图2 实验期间各处理组营养盐的变化曲线

Fig. 2 Variations of the nutrients in the water column during the experiments

如表 2 所示, 从中可知, 随着处理组初始 TN 和 TP 的浓度升高, 营养盐衰减指数 b 值逐渐升高, 表明苦草系统能够有效去除水体中的 N 和 P, 并且在实验浓度范围内去除能力随着 TN、TP 浓度升高而增强. 实验结束后, 各处理组中 TN、TP 的衰减率均达到 80% 以上, 其中高浓度处理组 TN 和 TP 衰减率达到 95% 以上. 这与金树权等^[31] 研究苦草系统中水体氮磷的衰减率相似, 其研究认为在水生系统中沉水植物的存在可加速水体中氮磷的消减, 一方面沉水植物可以利用根茎和茎叶吸收水体的氮磷营养盐, 另一方面沉水植物可以改善水体中 DO 和 pH, 促进氨的挥发^[32], 董彬等^[33] 的研究发现随着水体营养盐浓度的升高, 沉水植物菹草茎叶附着物逐渐上升. 另外沉水植物的茎叶界面上的附着物

表 2 各处理组 TN 和 TP 随时间变化的拟合方程中的参数

Table 2 Fitted regression equation of TN and TP as a function of experimental time for each treatment

项目	组别	c_0	b	R^2
TN	T1	2.602	0.043	0.833
	T2	8.545	0.046	0.985
	T3	15.500	0.084	0.967
TP	T1	0.279	0.064	0.811
	T2	0.630	0.089	0.883
	T3	1.15	0.092	0.947

可为硝化和反硝化细菌提供生存环境, 提高了水体的脱氮能力^[34]. 因此苦草通过直接吸收作用和间接作用降低水体中的氮磷营养盐含量.

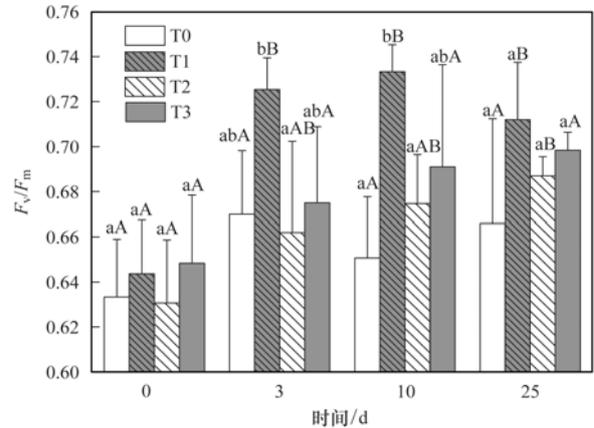
实验水体中的氮主要以 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 形式存在. 由图 2(c) 和 2(d) 中可知 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 均呈现下降趋势, 但在实验开始前 10 d, 处理组 T2 和 T3 中 NO_3^- -N 衰减过程不明显, 水体中 NH_4^+ -N 快速下降. 在第 5 d 时 T2 和 T3 处理组中 NH_4^+ -N 的下降超过 70%, 在第 8 d 超过 90%. 从第 8 d 开始处理组 T2 和 T3 中 NO_3^- -N 开始出现明显的下降过程. 处理组 T1 在实验开始阶段 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 均表现出明显的下降, 在第 5 d 时水体中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 均下降 80% 以上. 以上结果表明, 水体 NH_4^+ -N 的浓度较高时, 苦草优先吸收环境中的 NH_4^+ -N, 待水体中 NO_3^- -N 为主要 N 形态时, 苦草开始吸收 NO_3^- -N. 这与金送迪等^[28] 报道的当 NH_4^+ -N 的浓度高于 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沉水植物优先吸收 NH_4^+ -N 的结果一致.

2.2 水体营养盐质量浓度对苦草 PS II 的影响

PS II 是植物进行光合作用的重要单元, F_v/F_m 指标反映所有 PS II 反应中心均处于开放态时的量子产量, 可以指示光化光的反应效率^[35]. 宋玉芝等^[18] 认为苦草 F_v/F_m 对水体营养盐的响应很快(2

h), 但是苦草可以通过自身调节使 F_v/F_m 恢复到处理前水平. 实验期间各处理组苦草在不同营养浓度梯度下 F_v/F_m 的变化情况如图 3 所示, 在投加营养盐后第 3 d, 各组 F_v/F_m 均出现不同程度上升, 其中 T1 处理组 F_v/F_m 显著上升 ($P < 0.05$), T1 处理组中 F_v/F_m 为 0.725, 要显著高于 T0 和 T2 处理组 ($P < 0.05$), 而其它组 F_v/F_m 上升不显著 ($P > 0.05$); 在第 10 d 时, T1 组苦草 F_v/F_m 最高为 0.733, 显著高于 T0 组 ($P < 0.05$), T2、T3 组与 T0 差异不显著 ($P > 0.05$); 在整个实验期间 T0 组的 F_v/F_m 相对稳定无显著变化 ($P > 0.05$), 而其他各组总体呈上升趋势. 这是由于实验开始阶段水中氮磷相对匮乏, T0 组中苦草主要营养由沉积物提供, 生长环境没有明显变化, 但随着苦草的生长导致叶片 F_v/F_m 出现波动变化, 但是变化并不显著. 实验结束时, 各组 F_v/F_m 差异均不显著 ($P > 0.05$). 在不利生境中, 当光能吸收量超过光化学反应的反应量, 且过剩的光能量得不到散失时, 就会引起光合机构的破坏, 其原初损伤部位在 PS II 上, 胁迫条件下该参数明显下降^[36]. 本实验显示, 在对照组 (T0) 和中高浓度的营养水平 (T2、T3) 对苦草 F_v/F_m 影响不大, 而添加营养盐后, 在低浓度营养盐 (T1) 可以提高苦草的 F_v/F_m , F_v/F_m 的上升表明沉水植物苦草的生长没有受到抑制, 而 F_v/F_m 是表

植物光化光的反应效率, 因此有利于植物进行光合作用, 而光合作用是植物积累生物量的重要途径之一, 因此有利于苦草生长.



小写字母表示组间差异; 大写字母表示组内差异

图 3 实验期间各处理组苦草 F_v/F_m 的变化

Fig. 3 The F_v/F_m change of *V. natans* in four groups during the experiments

2.3 不同营养条件对苦草快速光响应曲线和光合参数的影响

水体营养条件对苦草光合作用的影响还体现在苦草叶片对光的响应能力. 快速光响应曲线表示电子传递速率随光强的变化, 能够反映苦草叶片的实际光化学效率^[35]. 实验第 0、3、10、25 d 测定的各组苦草叶片快速光响应曲线如图 4 所示. 在第 0 d,

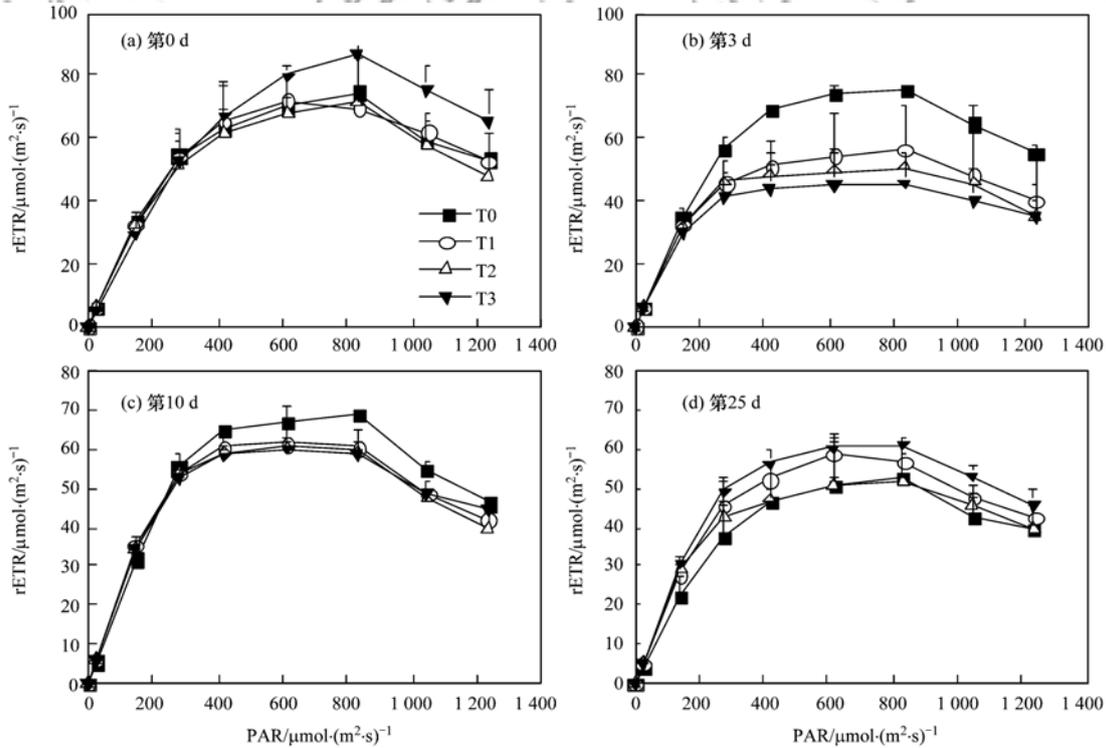


图 4 实验期间各处理组苦草的快速光响应曲线

Fig. 4 Rapid-light curves of *V. natans* in four groups during the experiments

各处理组快速光响应曲线差异不显著; 投加营养盐后的第 3 d, T0 对照组的光响应能力高于其他 3 组, 而 T1、T2、T3 的光响应能力较开始时下降, T3 处理组下降最快; 第 10 d 后 T1、T2 和 T3 光响应能力均有恢复; 在第 25 d 后, 又略有下降. 表明低浓度营养条件下苦草的光响应能力增强, 电子传递速率增大, 合成更多的光合产物积累生物量(图 1); 而高浓度(T3)营养盐会降低苦草叶片的响应能力, 导致苦草吸收的光子供给 PS II 反应中心的效率下降, 吸收的光子不能全部用于光合作用, 导致光合作用下降. 苦草作为一种耐污沉水植物, 随着苦草自身调节机制发挥作用, 使得对 N、P 营养环境的主动适应, 加之水体中营养盐的逐渐消减, 叶片的光响应能力逐渐恢复.

如图 5 所示, 将苦草快速光响应曲线进行拟合, 得到苦草叶片的最大电子传递速率($rETR_{max}$)、初始斜率(α)和半饱和光强(I_k). 最大电子传递速率($rETR_{max}$)反映苦草叶片的光合活性^[25]. 由图 5 (a)可知, 在实验开始前, 各组苦草叶片的 $rETR_{max}$ 差异不显著($P > 0.05$), 但在投加营养盐后第 3 d, 除 T0 外其他 3 组叶片 PS II 的 $rETR_{max}$ 均有显著下降($P < 0.05$): 处理组 T0 苦草叶片的 $rETR_{max}$ 最高, 其次是处理组 T1 和 T2, 处理组 T3 最小. 与处理组 T0 相比, T1、T2、T3 组苦草叶片 PS II 的 $rETR_{max}$ 分别是 T0 组的 74.98%、69.50%、61.81%, 相较开始时下降了 20.98%、23.63%、40.87%. 在第 10 d 时, T1、T2 和 T3 处理组苦草叶片的 $rETR_{max}$ 均有回升, 但该三组的 $rETR_{max}$ 差异均不显著($P > 0.05$), 第 25 d 时, T0、T1、T2 和 T3 处理组苦草叶片均有下降, 但各组之间的 $rETR_{max}$ 无显著差异($P > 0.05$). 苦草叶片的 $rETR_{max}$ 与快速光响应曲线的变化一致, 在投入营养盐后的初始阶段, 随着营养盐的浓度升高, 苦草叶片的光合活性逐渐受到抑制, 但随着水体营养盐的下降, 苦草叶片的光合活性逐渐恢复.

光合参数-光曲线的初始斜率(α)能够反映植物叶片对光能的利用效率, 指示植物叶片的捕光能力^[25]. 由图 5(b)可见, 在第 3 d 时, T1、T2 和 T3 处理组的初始斜率(α)相对 T0 有略微下降, 但差异不显著($P > 0.05$), 表明立即投加营养盐后不会显著改变苦草叶片的捕光能力; 在第 10 d 时 T1、T2 和 T3 相较于第 3 d 略有上升, 分别上升了 13.43%、5.75% 和 11.81%; 第 25 d 时, 各组(T0、T1、T2 和 T3)的初试斜率(α)相较之前有显著下降

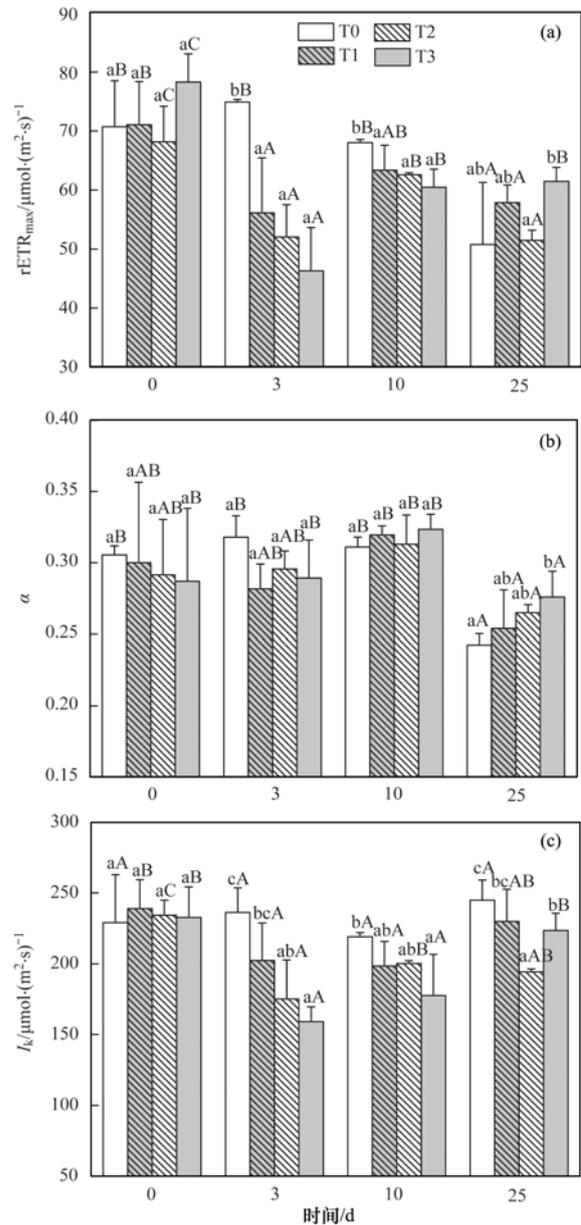


图 5 实验期间各处理组苦草最大电子传递速率($rETR_{max}$)、初始斜率(α)和半饱和光强(I_k)

Fig. 5 Maximum electron transport rates, initial slopes and half saturation point of light intensity of *V. natans* in four groups during the experiments

($P < 0.05$), 但彼此之间差异不显著($P > 0.05$), 可能受苦草自身的生长状态的影响, 而沉水植物对光的捕获能力与植物叶片叶绿素的含量、环境的光照条件以及水体透光率等条件密切相关^[18]. 以上分析说明, 投加营养盐对苦草叶片的捕光能力影响较小.

半饱和光照强度(I_k)反映了植物耐受强光的能力^[23], 各处理组中苦草叶片的半饱和光照强度(I_k)在实验期间的变化情况如图 5(c)所示. 在投

入营养盐后, T1、T2 和 T3 的 I_k 相较开始时下降了 15.35%、25.23% 和 31.61%, 但在第 10 d 时, T1、T2 和 T3 的 I_k 升高, 而且三组之间 I_k 差异不显著 ($P > 0.05$). 宋玉芝等^[18]和蔡炜等^[35]也认为在不同营养条件下苦草对光的耐受能力不同. 表明在投入营养盐后, 短时间内苦草的光耐受能力会下降, 且营养盐水平越高下降越显著, 随着苦草对环境的主动适应, 以及氮磷营养盐的下降, 叶片对光的耐受能力逐渐恢复.

3 结论

(1) 苦草能够有效吸收水体中的 N、P 营养盐. 本实验设置的浓度范围内, 随营养盐浓度升高, 苦草对水体净化能力逐渐增强, 并且苦草优先吸收水体中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

(2) 高 N、P 营养盐浓度 (T3) 对苦草叶片 F_v/F_m 影响不显著, 但低浓度的 N、P 营养盐 (T1) 能够提高苦草叶片的 F_v/F_m , 有利于苦草生长.

(3) 本实验中, N、P 营养盐浓度对苦草叶片的捕光能力无显著影响; 随着水体营养盐浓度下降, 苦草叶片的光响应能力、光合活性和耐光能力逐渐恢复.

参考文献:

- [1] 曹金玲, 许其功, 席北斗, 等. 我国湖泊富营养化效应区域差异性分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1777-1783.
Cao J L, Xu Q G, Xi B D, et al. Regional heterogeneity of lake eutrophication effects in China [J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 1777-1783.
- [2] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1303-1307.
Wang C, Zou L M, Wang P F, et al. Relation between distribution of phosphorus form in the sediment of typical urban shallow lakes and eutrophication [J]. Environmental Science, 2008, **29**(5): 1303-1307.
- [3] 李婉, 张娜, 吴芳芳. 北京转河河岸带生态修复对河流水质的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 80-87.
Li W, Zhang N, Wu F F. Influence of ecological restoration of riparian zone on water quality of Zhuanhe river in Beijing [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 80-87.
- [4] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, et al. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes—a guideline and state of the art in Germany [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2006, **36**(3): 155-171.
- [5] Liu J T. Nutrient removal capacities of four submerged macrophytes in the Poyang Lake Basin [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2016, **14**(2): 107-124.
- [6] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1351-1353.
Wu Z B, Qiu D R, He F, et al. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(8): 1351-1353.
- [7] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 385-392.
Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, et al. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 385-392.
- [8] 王华, 逢勇, 刘申宝, 等. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3958-3968.
Wang H, Pang Y, Liu S B, et al. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(8): 3958-3968.
- [9] 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 407-412.
Fang Y Y, Yang X E, Chang H Q, et al. In-situ remediation of polluted water body by planting hydrophytes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(2): 407-412.
- [10] 林超, 韩翠敏, 游文华, 等. 不同水体营养条件对刺苦草和密刺苦草生长的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(8): 2117-2121.
Lin C, Han C M, You W H, et al. Effect of different water nutrient conditions on growth of *Vallisneria spinulosa* and *V. denseserrulata* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(8): 2117-2121.
- [11] 童昌华, 杨肖娥, 濮增民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(6): 673-676.
Tong C H, Yang X E, Pu P M. Effects and mechanism of hydrophytes on control of release of nutrient salts in lake sediment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(6): 673-676.
- [12] 胡小贞, 刘倩, 李英杰. 滇池福保湾植被重建对底泥再悬浮及营养盐释放的控制[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1288-1292.
Hu X Z, Liu Q, Li Y J. The controlling of plants rebuild engineering on sediment resuspension and nutrient salts release in Fubao Bay of the Dianchi Lake [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(7): 1288-1292.
- [13] 赵凯, 周彦锋, 蒋兆林, 等. 1960 年以来太湖水生植被演变[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 351-362.
Zhao K, Zhou Y F, Jiang Z L, et al. Changes of aquatic vegetation in lake Taihu since 1960s [J]. Journal of Lake Science, 2017, **29**(2): 351-362.
- [14] Cai X L, Gao G, Tang X M, et al. Photosynthetic response of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara (Hydrocharitaceae) to increasing nutrient loadings [J]. Photosynthetica, 2012, **50**(3): 437-446.
- [15] Wu G, Wei Z K, Wang Y X, et al. The mutual responses of higher plants to environment: Physiological and microbiological aspects [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007, **59**(2): 113-119.
- [16] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(6): 570-573.

- Su S Q, Yao W Z. A brief review on mutual relationship between submerged macrophytes and environment [J]. *Argo-environmental Protection*, 2002, **21**(6): 570-573.
- [17] 熊剑, 黄建团, 聂雷, 等. 不同营养条件对金鱼藻净化作用及其生理生态的影响[J]. *水生生物学报*, 2013, **37**(6): 1066-1072.
- Xiong J, Huang J T, Nie L, *et al.* The effects of nutrient concentration on purification ability and eco-physiology of *Ceratophyllum demersum*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(6): 1066-1072.
- [18] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2569-2575.
- Song Y Z, Yang M J, Qin B Q. Physiological response of *Vallisneria natans* to nitrogen and phosphorus contents in eutrophic waterbody[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2569-2575.
- [19] Li W, Zhang Z, Jeppesen E. The response of *Vallisneria spirulosa* (Hydrocharitaceae) to different loadings of ammonia and nitrate at moderate phosphorus concentration; a mesocosm approach[J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(11): 2321-2330.
- [20] Nimptsch J, Pflugmacher S. Ammonia triggers the promotion of oxidative stress in the aquatic macrophyte *Myriophyllum matogrossense*[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(4): 708-714.
- [21] 王立志, 王国祥, 葛绪广, 等. 底质营养盐负荷对轮叶黑藻生长和光合荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(2): 473-480.
- Wang L Z, Wang G X, Ge X G, *et al.* Influence of different sediment nutrients on growth and photosynthesis fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata* (L. f) royle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 473-480.
- [22] 欧媛, 韩睿明, 李强, 等. 城市河道黑臭底泥对挺水植物光合荧光特性的影响[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(4): 643-648.
- Ou Y, Han R M, Li Q, *et al.* Impact of black odor sediment on photosynthetic fluorescence of three emergent plant species[J]. *Journal of Lake Science*, 2015, **27**(4): 643-648.
- [23] 朱丹婷, 李铭红, 乔宁宁. 正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(23): 6451-6459.
- Zhu D T, Li M H, Qiao N N. Effects of environmental factors and their interaction on *Vallisneria natans* by orthogonal test[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6451-6459.
- [24] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquatic Botany*, 2005, **82**(3): 222-237.
- [25] Platt T, Gallegos C L, Harrison W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton [J]. *Publications-Astronomical Society of Japan*, 1980, **57**(57): 341-345.
- [26] Carignan R. An empirical model to estimate the relative importance of roots in phosphorus uptake by aquatic macrophytes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, **39**(2): 243-247.
- [27] Rattray M R, Howard-Williams C, Brown J M A. Sediment and water as sources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 1991, **40**(3): 225-237.
- [28] 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 等. 菹草(*Potamogeton crispus*)对水中氮、磷的吸收及若干影响因素[J]. *生态学报*, 1994, **14**(2): 168-173.
- Jing S D, Li Y H, Ni C H, *et al.* Uptake by *Potamogeton crispus* of nitrogen and phosphorus from water and some affecting factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(2): 168-173.
- [29] 范国兰, 李伟. 穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)在不同程度富营养化水体中的营养积累特点及营养分配对策[J]. *武汉植物学研究*, 2005, **23**(3): 267-271.
- Fan G L, Li W. Response of nutrient accumulation characteristics and nutrient strategy of *Myriophyllum spicatum* L. under different eutrophication conditions [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005, **23**(3): 267-271.
- [30] 文明章, 李宽意, 王传海. 水体的营养水平对苦草(*Vallisneria atans*)生长的影响[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(1): 74-77.
- Wen M Z, Li Y K, Wang C H. Effects of nutrient level on growth of *Vallisneria atans* in water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(1): 74-77.
- [31] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 156-161.
- Jin S Q, Zhou J B, Bao W H, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 156-161.
- [32] Zhou Y W, Zhou X H, Han R M, *et al.* Reproduction capacity of *Potamogeton crispus* fragments and its role in water purification and algae inhibition in eutrophic lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 1421-1428.
- [33] 董彬, 陆全平, 王国祥, 等. 菹草(*Potamogeton crispus*)附着物对水体氮、磷负荷的响应[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(3): 359-365.
- Dong B, Lu Q P, Wang G X, *et al.* The impact of periphyton attached on *Potamogeton crispus* on nitrogen and phosphorus loads in water [J]. *Journal of Lake Science*, 2013, **25**(3): 359-365.
- [34] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 沉水植物茎叶微界面及其对水体氮循环影响研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(22): 6409-6416.
- Wang W L, Liu B, Han R M, *et al.* Research advancements and perspectives on leaf and stem micro-interfaces in submerged macrophytes and its effect on water nitrogen cycling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(22): 6409-6416.
- [35] 蔡炜, 宋玉芝. 水体营养盐质量浓度对苦草光合荧光特性的影响[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(8): 907-912.
- Cai W, Song Y Z. Effect of water nutrient concentration on photosynthetic fluorescence characteristics of *Vallisneria natans* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(8): 907-912.
- [36] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. *西北植物学报*, 2006, **26**(10): 2186-2196.
- Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(10): 2186-2196.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)