

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应

高敏^{1,2}, 胡维平¹, 邓建才^{1*}, 胡春华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: 沉水植物叶片生理指标能指示水质变化, 为了弄清二者间的相关关系, 本文采用原位监测与室内分析相结合的方法, 研究了太湖不同营养条件下马来眼子菜 (*Potamogeton wrightii* Morong) 和菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 叶片中叶绿素、游离脯氨酸 (PRO) 含量以及过氧化物酶 (POD) 活性的差异. 结果表明: ①马来眼子菜与菹草分布区水体的理化因子、综合营养指数 (TLI) 存在显著差异, 马来眼子菜主要分布于中营养水体, 菹草则分布在富营养水体; ②马来眼子菜与菹草叶片内叶绿素 a + b 含量、叶绿素 a/b、POD 活性及 PRO 含量在其各自分布的湖区间差异显著, 且叶绿素 a + b 含量、POD 活性均与 TLI 呈显著相关; ③水体透明度、营养盐 (氮、磷) 是引起马来眼子菜与菹草叶片内叶绿素含量、POD 活性变化的重要因素. 本实验说明, 马来眼子菜、菹草叶片的生理变化特征受到水体营养状态及理化性质支配.

关键词: 水质; 马来眼子菜; 菹草; 生理; 相关分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4570-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201602092

Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake

GAO Min^{1,2}, HU Wei-ping¹, DENG Jian-cai^{1*}, HU Chun-hua¹

(1. State Key Laboratory of Lake 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: It was well known that physiological indices of submerged macrophytes could reflect change of water quality. The correlation between physiological indices of submerged macrophytes and change of water quality was studied under the cooperation of in-situ monitoring and lab analysis, combined with measuring Chlorophyll and free proline (PRO) contents as well as peroxidase (POD) activities in the leaves of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. under different water quality and nutrition status. The results showed: ①there were significant spatial differences among water factors and the comprehensive eutrophication index (TLI) of distribution areas of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. Mesotrophic water was more suitable for the growth of *Potamogeton wrightii* Morong, while *Potamogeton crispus* L. grew well in eutrophic water. ②there were significant spatial differences among physiological indices of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. in Taihu Lake. Besides, there were significant relationships between Chlorophyll contents, POD activities of two species and TLI. ③water transparency as well as nitrogen and phosphorus nutrition were important factors leading to changes in Chlorophyll contents and POD activities of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. The findings from this study indicate that physiological properties of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. have a very close correlation with nutrition status and physiochemical properties of water.

Key words: water quality; *Potamogeton wrightii* Morong; *Potamogeton crispus* L.; physiology; correlation analysis

沉水植物是湖泊生态系统的重要组成部分, 在维持湖泊生态系统结构、功能稳定以及降低氮磷营养盐、提高水体透明度、促进悬浮物沉降及抑制藻类生长等方面发挥了极其重要的作用^[1~5]. 沉水植物的生长状况影响其对水体净化功能的同时, 水体营养盐、透明度、藻类等对沉水植物的兴衰亦有不可忽视的影响, 导致沉水植物在生理上对水质的变化十分敏感^[6,7]. 近 30 年来, 由于我国工业和经济的迅速发展, 导致湖泊富营养化程度不断加重, 随之而来的是许多湖泊中的水生植物尤其是沉水植物种类不断减少, 分布面积也逐年递减, 沉水植物衰退及消失机制成为国内外研究的热点^[8,9], 但仍一直存在分歧. 部分学者认为, 沉水植物对于富营养化的

敏感性受到水体透明度和植物生长型的影响, 但不受水体氮、磷营养盐浓度变化所引起的生理反应的影响^[10]; 另一些学者则认为光衰减和生长型并不能完全解释目前所观察到的沉水植物衰减现象, 过高的氮、磷浓度也会影响植物正常的生理活动^[11]. 目前国内外研究大多采用中小尺度控制实验, 关注某种水体因子在一定浓度范围内沉水植物的生理反应^[12,13]. 宋玉芝等^[14]通过室内模拟实验研究了苦

收稿日期: 2016-02-26; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41230853, 41271213); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07101-011); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-10)

作者简介: 高敏 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生物与生态, E-mail: mgao_921@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jcdeng@niglas.ac.cn

草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应,发现过高浓度的氮、磷浓度可抑制苦草的光合生理活动,进而影响苦草的生长. 鉴于湖泊生态系统的复杂性,本文研究原位不同水质条件下沉水植物主要生理指标的变化特征,考虑到多因子的综合作用,对于认识湖泊水体污染修复及水生植物恢复具有非常重要的理论与实践意义.

马来眼子菜(*Potamogeton wrightii* Morong)和菹草(*Potamogeton crispus* L.)是眼子菜科多年生沉水草本植物,在长江中下游湖泊中分布极其广泛. 马来眼子菜冬芽越冬,春季进入缓慢生长期,夏天高速增长,到10月下旬基本停止生长^[15]. 菹草秋季发芽,冬春季节生长,越冬生长,7月后逐渐衰败腐烂,是冬春季节的优势种^[16]. 马来眼子菜和菹草对湖泊水质都有着较广的耐受范围,在太湖水环境持续恶化的情况下,其分布面积未出现明显减少,是研究湖泊水质对沉水植物影响的理想材料. 本实验采用原位监测和室内分析相结合的方法,研究不同水质条件下马来眼子菜和菹草叶片内叶绿素、游离脯氨酸含量以及过氧化物酶活性的差异,分析其生理变化特征,以期揭示湖泊水生植物消亡机制提供科学依据.

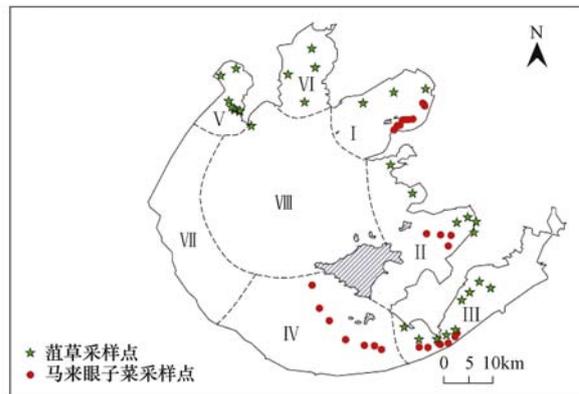
1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖是中国五大淡水湖之一,平均水深 1.89 m,水域面积约为 2 338 km²,水资源丰富,水网密集,水流关系错综复杂. 近年来,人类活动对太湖自然水体的干扰加剧,水体富营养化逐年恶化,蓝藻水华暴发频率增多,影响范围增大,导致其不同湖区水生植物种类及其分布面积不断减少与生态系统失衡. 目前,太湖水生植物主要分布在贡湖湾、镇湖湾、光福湾、胥口湾、东山湾、东太湖、东西山相连水域以及东太湖与南太湖相连水域.

1.2 样品采集与处理

考虑到马来眼子菜和菹草生长季节差异,分别于 2014 年 10 月下旬和 2015 年 5 月上旬进行沉水植物和水质调查. 通过 GPS 定位,确定马来眼子菜采样点位 28 个、菹草采样点位 31 个(图 1). 在采样点 10 m² 范围内,使用采草夹随机进行 3 次采样,用湖水洗净后,随机选取部分目标沉水植物. 同时采集采样点水样,所有样品用便携式冷藏箱(0℃)保存,采样结束后尽快运回实验室进行处理分析.



I. 贡湖湾; II. 湖东区; III. 东太湖; IV. 南太湖;
V. 竺山湾; VI. 梅梁湾; VII. 湖西区; VIII. 湖心区

图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Taihu Lake

1.3 检测指标及其分析方法

1.3.1 水质指标测定

水体透明度(SD)采用塞式圆盘法进行现场测定. 总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数测定方法参照湖泊富营养化调查规范^[17],叶绿素 a(Chla)采用热乙醇提取法进行测定^[18].

1.3.2 沉水植物生理指标测定

随机选取沉水植物的新生完全展开叶,用自来水洗干净,然后用去离子水冲洗 3 次,再用滤纸将叶片表面的水分吸干,样品保存于 -80℃ 冰箱进行生理指标的测定. 叶绿素含量测定采用 95% 乙醇提取法^[19],游离脯氨酸(PRO)含量的测定采用磺基水杨酸-酸性茚三酮-甲苯比色法^[20]. 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,以每分钟 A₄₇₀ 变化 0.01 为一个过氧化物酶活性单位(U),计算叶片中过氧化物酶活性[U·(mg·min)⁻¹]^[21].

1.3.3 湖泊富营养化评价指标

采用综合营养状态指数(TLI)评价水体富营养化程度,评价因子包括 Chla、TP、TN、SD、高锰酸盐指数等^[22]. 采用 0~100 的连续数字对湖泊营养状态进行分级: TLI < 30 为贫营养(Oligotropher), 30 ≤ TLI ≤ 50 为中营养(Mesotropher), TLI > 50 为富营养(Eutropher), 其中 50 < TLI ≤ 60 为轻度富营养(Light eutropher), 60 < TLI ≤ 70 为中度富营养(Middle eutropher), TLI > 70 为重度富营养(Hyper eutropher). 同一营养状态下,TLI 值越大,其营养程度越重.

1.4 数据处理

实验数据均取 3 次实验的平均值. 原始数据处理采用 Excel 2013; 运用 SPSS 19.0 统计软件进行

方差分析及相关性分析, $P < 0.05$ 为显著差异, $P < 0.01$ 为极显著差异.

2 结果与分析

2.1 马来眼子菜与菹草生长水质差异

太湖沉水植物调查结果显示, 马来眼子菜主要集中分布在湖东区、东太湖、贡湖湾、南太湖等湖区; 除在上述湖区外, 菹草还在竺山湾、梅梁湾有较大面积的分布. 马来眼子菜与菹草分布区水体 SD 变化范围分别为 $0.150 \sim 1.500 \text{ m}$ 和 $0.150 \sim 1.400 \text{ m}$, TN 变化范围分别为 $0.180 \sim 1.337 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.869 \sim 4.749 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 变化范围分别为 $0.037 \sim 0.112 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.085 \sim 0.326 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高锰酸盐指数变化范围分别为 $1.469 \sim 5.799 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.133 \sim 5.453 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Chla 变化范围分别为 $1.088 \sim 54.991 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2.344 \sim 18.749 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 由表 1 可知, 马来眼子菜分布各湖区水体 SD、TN、TP 和高锰酸盐指数均值存在显著差异 ($P < 0.05$), 湖东区 SD 显著高于其他湖区, TN 浓度在南太湖达到最高, 而在湖东区为最低, 湖东区和东太湖 TP 浓

度显著低于其他两个湖区, 湖东区高锰酸盐指数显著低于南太湖. 菹草分布各湖区水体 SD、TN、高锰酸盐指数和 Chla 均值呈显著差异 ($P < 0.05$), 贡湖湾和梅梁湾 SD 显著高于贡湖湾和梅梁湾, 湖东区和东太湖 TN 浓度显著低于其他湖区, 竺山湾高锰酸盐指数高于其他湖区, 贡湖湾 Chla 浓度显著高于湖东区. 从营养状态来看, 马来眼子菜分布区 TLI 的变化范围为 $31.06 \sim 64.86$, 各湖区 TLI 均值间存在显著差异 ($P < 0.05$), 湖东区、东太湖和贡湖湾 TLI 均值较低, 水体处于中营养程度, 南太湖相对较高, 水体达到富营养化, 南太湖 TLI 值分别比湖东区、东太湖、贡湖湾高 43.1% 、 27.3% 、 15.2% . 菹草分布区 TLI 均值在 $43.040 \sim 66.473$ 之间变化, 大多数采样点水体营养状态达到富营养程度 ($TLI > 50$), 各分布湖区间存在显著差异 ($P < 0.05$), 其分布湖区中, 水体 TLI 均值在湖东区、东太湖与贡湖湾、梅梁湾、竺山湾之间存在显著差异, 前者 TLI 值较低, 营养状态为中营养程度, 而后者 TLI 均值较高, 水体营养状态达到轻度富营养. 以上分析表明, 马来眼子菜和菹草对水质均具有较广的耐受范围.

表 1 两种沉水植物分布湖区水质状况¹⁾

Table 1 Comparison of water quality between two submerged macrophytes areas

植物	湖区	水质参数					TLI	营养状态
		SD/m	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Chla/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$		
马来眼子菜	湖东区	1.025 ± 0.386^a	0.273 ± 0.065^a	0.041 ± 0.003^a	1.927 ± 0.151^a	2.462 ± 1.770^a	35.430 ± 4.134^a	中营养
	东太湖	0.771 ± 0.406^b	0.383 ± 0.116^{ab}	0.051 ± 0.007^a	2.570 ± 0.570^{ab}	2.656 ± 1.987^a	39.837 ± 5.533^b	中营养
	贡湖湾	0.580 ± 0.148^b	0.586 ± 0.195^{bc}	0.053 ± 0.006^b	2.827 ± 0.492^{bc}	4.713 ± 2.964^a	44.013 ± 4.232^{bc}	中营养
	南太湖	0.371 ± 0.498^b	0.721 ± 0.308^c	0.071 ± 0.015^b	3.388 ± 1.130^c	12.292 ± 18.918^a	50.716 ± 7.338^c	轻度富营养
菹草	湖东区	0.890 ± 0.281^b	1.370 ± 0.749^a	0.092 ± 0.007^a	2.565 ± 0.532^a	4.892 ± 2.753^a	46.469 ± 4.301^a	中营养
	东太湖	0.833 ± 0.243^b	1.105 ± 0.129^a	0.100 ± 0.010^a	3.202 ± 0.680^a	7.136 ± 3.048^{ab}	48.801 ± 1.999^a	中营养
	贡湖湾	0.320 ± 0.121^a	2.320 ± 0.173^b	0.121 ± 0.008^a	2.959 ± 0.140^a	11.913 ± 1.790^b	56.480 ± 2.319^b	轻度富营养
	梅梁湾	0.275 ± 0.065^a	2.533 ± 0.017^b	0.128 ± 0.005^a	2.866 ± 0.103^a	10.259 ± 3.120^{ab}	56.687 ± 0.785^b	轻度富营养
	竺山湾	0.512 ± 0.350^{ab}	2.720 ± 1.022^b	0.157 ± 0.087^a	4.001 ± 0.738^b	10.562 ± 6.716^{ab}	57.257 ± 5.393^b	轻度富营养

1) 数据表示方式为平均值 \pm 标准差; 同植物的不同小写字母表示该指标在各湖区之间差异显著 ($P < 0.05$)

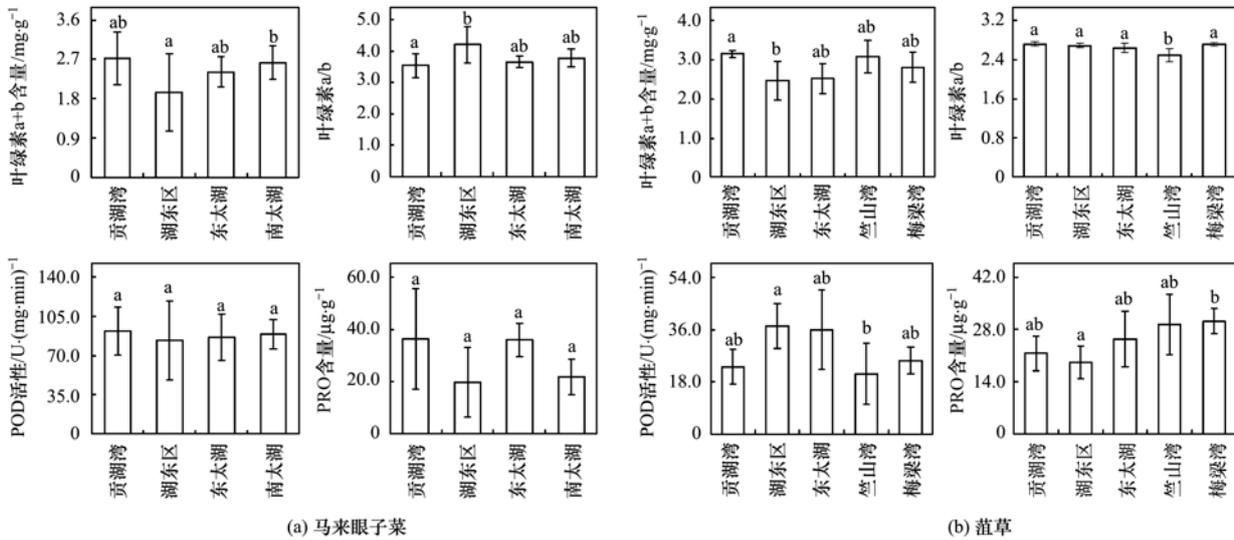
2.2 马来眼子菜与菹草生理特征空间差异

马来眼子菜和菹草叶片内叶绿素 a + b 含量变化范围分别为 $0.911 \sim 3.459 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.727 \sim 3.793 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 叶绿素 a/b 比值变化范围分别为 $3.009 \sim 4.760$ 和 $2.192 \sim 2.776$, 过氧化物酶活性变化范围分别为 $42.127 \sim 126.985 \text{ U} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $7.237 \sim 57.396 \text{ U} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$, 游离脯氨酸含量变化范围为 $9.078 \sim 73.294 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $13.805 \sim 46.121 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 图 2 比较了马来眼子菜和菹草叶片内的主要生理指标在其各自分布湖区之间的差异. 由图 2(a) 可以看出, 湖东区马来眼子菜叶片内叶绿

素 a + b 含量显著低于与南太湖的 ($P < 0.05$), 仅为南太湖平均值的 65.6% ; 叶绿素 a/b 比值在贡湖湾和湖东区之间差异性显著 ($P < 0.05$), 湖东区比贡湖湾高 18.8% ; 湖东区 POD 活性均值最低, 过氧化物酶活性和游离脯氨酸含量差异不明显 ($P > 0.05$). 如图 2(b) 所示, 菹草叶绿素 a + b 含量在湖东区与贡湖湾之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 贡湖湾叶绿素 a + b 含量比湖东区的高 27.3% ; 竺山湾叶绿素 a/b 比值显著低于其他 4 个湖区的, 分别占贡湖湾、湖东区、东太湖、梅梁湾叶绿素 a/b 比值的 91.5% 、 92.5% 、 94.3% 、 91.6% ; 菹草

POD 活性在湖东区和竺山湾之间存在显著差异, 湖东区 POD 活性比竺山湾的高 78.4%; PRO 含量则在湖东区和梅梁湾之间差异显著, 梅梁湾 PRO

含量比湖东区的高 57.4%. 以上分析表明, 马来眼子菜与菹草叶片内主要生理指标存在显著空间差异性.



同种沉水植物的不同小写字母表示该指标在各个湖区之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 马来眼子菜与菹草在各湖区中的生理指标比较

Fig. 2 Comparison of physiological indices of *Potamogeton wrightii* Morong and *Potamogeton crispus* L. in different zones in Taihu Lake

2.3 沉水植物叶片生理指标与水质因子的相关分析
表 2 给出了沉水植物叶片内主要生理指标与水体理化因子间的相关关系. 从综合评价指标来看, 马来眼子菜叶绿素 a + b 含量与 TLI 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), POD 活性与 TLI 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 菹草叶绿素 a + b 也与 TLI 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 而 POD 活性与 TLI 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 两种沉水植物叶绿素 a/b、PRO 含量与 TLI 的相关性不显著 ($P > 0.05$). 从 5 种水质因子来看, 马来眼子菜叶绿素 a + b 含量与 TN 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与 SD 呈极显著负相

关 ($P < 0.01$); POD 活性与 SD 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 叶绿素 a/b、PRO 含量与水质因子的相关性不显著 ($P > 0.05$). 菹草叶片内叶绿素 a + b 含量与 TN 呈正相关, 与 SD 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 叶绿素 a/b 与高锰酸盐指数、Chla 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$); POD 活性随 TN、TP 而显著降低 ($P < 0.05$), 而与 SD 呈显著正相关 ($P < 0.05$); PRO 含量与水质因子的相关性不显著 ($P > 0.05$). 以上分析可知, 马来眼子菜和菹草的区别体现在叶绿素 a/b、POD 活性与水质指标之间的相关关系.

表 2 两种沉水植物生理指标与水质指标的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson correlations between physiological indices of two submerged macrophytes and water quality indices

植物	指标	SD	TN	TP	高锰酸盐指数	Chla	TLI
马来眼子菜	叶绿素 a + b	-0.481 **	0.421 *	0.291	0.362	0.173	0.502 **
	叶绿素 a/b	0.269	-0.205	-0.099	-0.135	-0.032	-0.256
	POD	-0.461 *	0.234	0.120	0.220	0.044	0.407 *
	PRO	0.151	-0.125	-0.236	-0.132	-0.195	-0.156
菹草	叶绿素 a + b	-0.632 **	0.547 **	0.216	0.241	0.114	0.531 **
	叶绿素 a/b	-0.129	-0.306	-0.268	-0.733 **	-0.519 **	-0.361
	POD	0.461 *	-0.529 **	-0.406 *	-0.352	-0.227	-0.550 **
	PRO	-0.053	0.247	0.081	0.322	0.256	0.26

1) * 表示为 $P < 0.05$, ** 表示为 $P < 0.01$

2.4 马来眼子菜与菹草分布区水质因子的主成分分析

将马来眼子菜与马来眼子菜和菹草分布区的 5

个水质因子做主成分分析, 其结果如图 3 所示. 从中可以看出, 马来眼子菜样点集中分布于水体透明度较高, 氮磷营养盐浓度、高锰酸盐指数和叶绿素 a

浓度较低的区域. 菹草样点分布的水质范围较广, 在氮磷浓度较高的地区也有广泛的分布. 从水质因子之间的关系上可以看出, 水体透明度与总氮、总磷之间呈显著的负相关关系. 分析发现, 菹草对富营养化水体的耐受性较马来眼子菜更高.

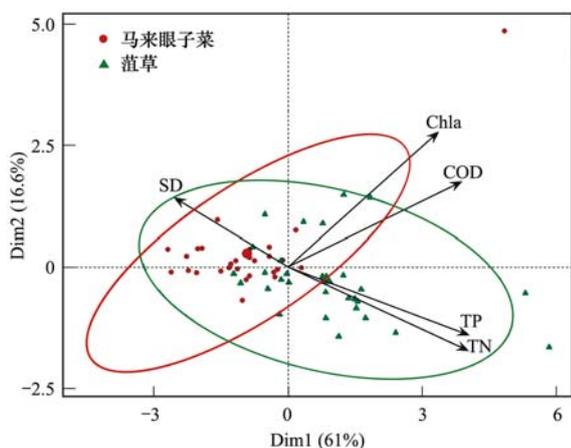


图3 两种沉水植物分布区水质因子的主成分分析

Fig. 3 Ordination plot of principal component analysis for water factors of distribution areas of two macrophytes in Taihu Lake

3 讨论

氮磷等营养物质的大量排放直接导致湖泊富营养化的产生, 藻类等低等水生生物大量繁殖, 导致水体透明度下降, 将造成水环境质量的恶化, 破坏湖泊生态系统的功能. 沉水植物由于茎叶完全沉水生活的特性, 也会受到很大的影响. 有研究发现, 植物细胞内固有的平衡在逆境胁迫中遭到破坏, 会影响植物的光合、呼吸等其他生理代谢过程^[23].

3.1 太湖典型沉水植物的空间分布和水质评价

受太湖地形、沿湖流域不同程度污染源排放、湖体自净能力以及湖区内农业、养殖业等多种因素的复合影响, 太湖各湖区出现水体营养状态综合指数及其关键影响水质因子时空分布不均衡的现状. 朱广伟^[24]对太湖水质的时空分异特征研究发现, 湖心区和西南湖区等区域由于水体透明度很难超过 0.5m, 导致沉水植被不可能在这些区域出现. 由于太湖的主要入湖河流在西南地区, 而主要的出水在东太湖的太浦河, 就造成了太湖南部湖区交换快、北部湖区交换相对缓慢的现象, 尤其是北部的梅梁湾和竺山湾承担了主要的外源污染但水量交换缓慢, 水体自净能力较差, 加剧了水质的空间分异.

马来眼子菜与菹草对水质的耐受范围不同. 对马来眼子菜分布区域的水质监测发现, 其在太湖的分布大多数处在中营养程度水体中, 少数在富营养

程度水体中. 调查中还发现, 马来眼子菜分布区水质有极少数达到中度富营养程度的状况, 这可能与水位、风浪扰动等其他因素的影响有关, 导致一段时间的水质超过其生长耐受范围. 春季是农耕开始的季节, 据研究发现, 春季化肥的污染排放所占比例超过了污水排放的权重^[25], 造成太湖春季氮营养盐含量高于其他季节. 菹草作为冬春季的优势种, 监测结果发现其在太湖中分布的范围较广, 适应水质的营养范围也十分广泛, 在富营养化程度严重的竺山湾和梅梁湾仍然存在大面积暴发的趋势, 且竺山湾在氮磷浓度较高的水体中, 其分布区域水体仍然保持较高的透明度, 进一步说明菹草的耐污性和其强大的水质净化功能.

3.2 沉水植物生理指标对水质的响应

光合作用是植物对环境变化反应最为敏感的生理过程之一, 叶片中叶绿素含量是衡量光合作用强弱的重要因素, 有研究认为, 叶绿素 a/b 代表类囊体的垛叠程度, 其比值越大表示垛叠程度越大而光合活性越强^[26], 因而植株叶片叶绿素 a/b 的变化可能是水生植物光适应及衰老的主要机制^[27]. 光是影响植物叶绿素合成的一个主要条件, 氮是叶绿素分子的重要组成部分^[28]. 大多数植物的叶绿素含量在一个较为集中的范围内波动^[29]. 本研究中, 马来眼子菜叶绿素 a + b 含量在水体 TLI 显著较高的南太湖高于湖东区的, 贡湖湾中菹草叶绿素 a + b 含量和 TLI 亦是显著高于湖东区, 并且二者叶绿素 a + b 含量与 TLI 呈显著正相关. 此外, 湖东区中马来眼子菜叶绿素 a/b 显著高于 TLI 较高的贡湖湾, 而菹草在 TLI 较高的竺山湾中叶绿素 a/b 显著低于其他湖区. 以上表明水体营养条件对马来眼子菜和菹草叶片叶绿素均有胁迫作用.

相关性分析中马来眼子菜和菹草叶绿素 a + b 含量与 TN 呈显著的正相关, 验证了氮营养盐对植物叶绿素的重要因素, TN 浓度的增高有利于叶绿素含量的提高, 也可能是植物正在耐受环境胁迫而通过提高叶绿素含量来抵制, 还有待进一步研究证明. 丁玲等^[30]通过室内研究透明度胁迫对菹草生长的影响发现, 不同透明度下菹草的生长均符合逻辑斯谛曲线. 本研究中, 马来眼子菜叶绿素 a + b 与 SD 呈显著负相关, 这与控制实验中提高透明度有利于植物光合作用的情况相反, 这可能是由于天然水体中氮磷浓度与 SD 呈显著的负相关, 在 SD 较高的水体中 TN 浓度却较低, 影响植物叶绿素的合成, 也可能是低光条件下, 植株会增加叶片中叶绿素的含量

以获得最大的光合能力。

植物在逆境胁迫中会促进过氧自由基的产生,当自由基增加到超过歧化能力极限时,会启动膜脂过氧化反应,是造成酶系统破坏、植株伤害或死亡的重要原因。过氧化物酶(POD)是植物防御过氧化的重要保护酶,能起到酶促降解 H_2O_2 的作用^[31],植物叶片内的 POD 活性在正常情况下维持一定的水平,与活性氧含量达到一定的平衡^[32]。熊汉锋等^[33]研究表明,苦草、伊乐藻和金鱼藻的 POD 活性随氮、磷浓度的增加而上升。曹加杰等^[34]则指出,苦草幼苗的 POD 活性通过水下光照补偿后有所升高。本实验中,马来眼子菜叶片 POD 活性与 TLI 呈显著正相关,菹草 POD 活性与 TLI 呈显著负相关,且菹草 POD 活性在 TLI 值较高的竺山湾低于湖东区,说明马来眼子菜可以通过提高 POD 活性来抵御水体富营养化的胁迫,而菹草 POD 活性已经受到过重水体营养程度的损害。马来眼子菜 POD 活性与 SD 呈显著负相关,菹草 POD 活性与 TN、TP 呈显著负相关,而与 SD 呈显著正相关,可能说明氮磷浓度过高会对 POD 活性产生伤害,当 SD 高而氮磷浓度低时也会受到抑制。

脯氨酸(PRO)是植物蛋白质的组成成分之一,以游离状态广泛存在于植物体内,当植物受到不同环境胁迫时,其体内的游离脯氨酸含量会发生很大的变化,是植物抗逆性的重要指标^[35]。菹草分布湖区中梅梁湾综合营养状态指数显著高于湖东区的,而菹草叶片中 PRO 含量在梅梁湾显著高于湖东区的,可能是因为菹草受到水体富营养化的胁迫,因而通过提高其叶片中 PRO 含量来适应过高的水体营养程度。

4 结论

太湖马来眼子菜主要分布在贡湖湾、湖东区、东太湖和南太湖;菹草则分布于贡湖湾、湖东区、东太湖、竺山湾和梅梁湾;马来眼子菜适合生长于中营养水体,而菹草对富营养水体具有更强的耐受性;马来眼子菜和菹草叶片内叶绿素含量、过氧化物酶活性受水体富营养化的胁迫,并受氮磷浓度及水体透明度制约,菹草游离脯氨酸含量也受到水体富营养化程度的胁迫。

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquatic Botany, 1986, **26**: 341-370.
- [2] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland)[J]. Water Research, 2003, **37** (18): 4468-4474.
- [3] 孔祥龙,叶春,李春华,等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 539-549.
- [4] Kong X L, Ye C, Li C H, et al. Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans* (Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 539-549.
- [5] 庞翠超,吴时强,赖锡军,等. 沉水植被降低水体浊度的机理研究[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 498-504.
- [6] Pang C C, Wu S Q, Lai X J, et al. Water flow with submerged vegetation and its effect on water turbidity [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(5): 498-504.
- [7] 姚远,贺锋,胡胜华,等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 971-978.
- [8] Yao Y, He F, Hu S H, et al. Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(4): 971-978.
- [9] Pieterse A H, Murphy K J. Aquatic weeds: the ecology and management of nuisance aquatic vegetation [M]. New York: Oxford University Press, 1990.
- [10] Kolada A. The use of aquatic vegetation in lake assessment: testing the sensitivity of macrophyte metrics to anthropogenic pressures and water quality[J]. Hydrobiologia, 2010, **656**(1): 133-147.
- [11] Duarte C M, Kalff J, Peters R H. Patterns in biomass and cover of aquatic macrophytes in lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986, **43**(10): 1900-1908.
- [12] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management [J]. Hydrobiologia, 1999, **395**: 181-190.
- [13] Istvánovics V, Honti M, Kovács Á, et al. Distribution of submerged macrophytes along environmental gradients in large, shallow Lake Balaton (Hungary)[J]. Aquatic Botany, 2008, **88** (4): 317-330.
- [14] Thomaz S M, Chambers P A, Pierini S A, et al. Effects of phosphorus and nitrogen amendments on the growth of *Egeria najas*[J]. Aquatic Botany, 2007, **86**(2): 191-196.
- [15] Song Y Z, Wang J Q, Gao Y X, et al. The physiological responses of *Vallisneria natans* to epiphytic algae with the increase of N and P concentrations in water bodies [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(11): 8480-8487.
- [16] 赵温. 苦草和伊乐藻对水体铵态氮、磷浓度的响应[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [17] Zhao W. Responses of *Vallisneria spiralis* and *Elodea nuttallii* to ammonium nitrogen and phosphorus concentrations in water environment [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [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.
- [19] 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.
- [20] 蒲云海,李伟. 中国竹叶眼子菜的生态学研究[J]. 武汉植

- 物学研究, 1999, **17**(S1): 65-72.
- Pu Y H, Li W. Ecological studies on *Potamogeton Malaianus* Miq. in China[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1999, **17**(S1): 65-72.
- [16] 尹传宝, 张翠英, 张敏, 等. 三种营养物质急性胁迫下菹草的生理生化特性[J]. 湿地科学, 2015, **13**(1): 129-134.
- Yin C B, Zhang C Y, Zhang M, *et al.* Physiological and biochemical characteristics of *Potamogeton crispus* under acute stress of three nutrients[J]. Wetland Science, 2015, **13**(1): 129-134.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 史树德, 孙亚卿, 魏磊. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [21] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. (第二版). 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [22] 中华人民共和国环境保护部. 地表水环境质量评价办法(试行)(环办[2011]22号)[R]. 北京: 环境保护部办公厅, 2011.
- [23] 王晋, 林超, 张毅敏, 等. 水体浊度对沉水植物菹草生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(3): 353-358.
- Wang J, Lin C, Zhang Y M, *et al.* Impact of water turbidity on growth of submerged plant *Potamogeton crispus* [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(3): 353-358.
- [24] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5): 439-445.
- Zhu G W. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(5): 439-445.
- [25] Townsend-Small A, McCarthy M J, Brandes J A, *et al.* Stable isotopic composition of nitrate in Lake Taihu, China, and major inflow rivers[J]. Hydrobiologia, 2007, **581**(1): 135-140.
- [26] Kouril R, Ilík P, Naus J, *et al.* On the limits of applicability of spectrophotometric and spectrofluorimetric methods for the determination of chlorophyll a/b ratio [J]. Photosynthesis Research, 1999, **62**(1): 107-116.
- [27] Henley W J. Measurement and interpretation of photosynthetic light-response curves in algae in the context of photoinhibition and diel changes[J]. Journal of Phycology, 1993, **29**(6): 729-739.
- [28] 王平荣, 张帆涛, 高家旭, 等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, **29**(3): 629-636.
- Wang P R, Zhang F T, Gao J X, *et al.* An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, **29**(3): 629-636.
- [29] Pintado A, Valladares F, Sancho L G. Exploring Phenotypic plasticity in the lichen *Ramalina capitata*: morphology, water relations and chlorophyll content in north-and south-facing populations[J]. Annals of Botany, 1997, **80**(3): 345-353.
- [30] 丁玲, 李巍, 施蓓, 等. 透明度胁迫对菹草 (*Potamogeton crispus*) 生长的定量影响及其生长动力学模型[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 92-96.
- Ding L, Li W, Shi B, *et al.* Effects of water transparency on *Potamogeton crispus* growth and its dynamic model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(1): 92-96.
- [31] 曹锡清. 脂质过氧化对细胞与机体的作用[J]. 生物化学与生物物理进展, 1986, (2): 845-850.
- Cao X Q. The effect of lipid prooxidation on cell and organism [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 1986, (2): 845-850.
- [32] 尹颖, 孙媛媛, 郭红岩, 等. 莠对苦草的生物毒性效应[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1528-1533.
- Yin Y, Sun Y Y, Guo H Y, *et al.* Bio-toxic effect of pyrene on *Vallisneria spiralis* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18**(7): 1528-1533.
- [33] 熊汉锋, 谭启玲, 李伟, 等. 不同营养状态下 3 种沉水植物的生理响应[J]. 海洋湖沼通报, 2009, (4): 62-66.
- Xiong H F, Tan Q L, Li W, *et al.* Physiological responses of submerged macrophyte under different nutritional conditions [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009, (4): 62-66.
- [34] 曹加杰, 陆俊安, 阮宏华. 水下光照补偿对沉水植物苦草生长及主要生理指标的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38**(5): 102-106.
- Cao J J, Lu J A, Ruan H H. Effects of underwater illumination compensation on growth and physiological indices of submerged macrophyte *Vallisneria natans* L. [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, **38**(5): 102-106.
- [35] 汤章城. 逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义[J]. 植物生理学通讯, 1984, (1): 15-21.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行