

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苄解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响

刘国锋^{1,2}, 何俊³, 杨轶中⁴, 韩士群^{2*}

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 无锡 214081; 2. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 无锡市农林局水产技术指导站, 无锡 214023; 4. 信阳师范学院, 信阳 464000)

摘要:以凤眼莲为研究对象, 模拟凤眼莲叶绿素和光合作用变化对不同蓝藻水华聚集影响的应答响应。通过深入研究藻华聚集后对水生植物的生理影响, 以揭示藻华规模性暴发引起水生植物消亡的深层机制和更好地发挥植物的水体生态修复功能。结果表明, 藻华聚集后 2 h 内溶氧会耗尽, 水体中氧化还原电位值(ORP)降至 -200 mV, 添加 60 g·L⁻¹ 和 120 g·L⁻¹ 新鲜藻细胞的处理 1、2 中溶解性总氮(DTN)含量分别高达 44.49 mg·L⁻¹、 111.32 mg·L⁻¹, 溶解性总磷(DTP)含量分别高达 2.57 mg·L⁻¹、 9.10 mg·L⁻¹, 植物根区 NH_4^+ -N 含量增加至 32.99 mg·L⁻¹、 51.22 mg·L⁻¹, 形成厌氧、强还原、高营养盐环境而对凤眼莲产生胁迫作用, 植物叶片叶绿素浓度呈现先增加、后降低的变化趋势, 处理 2 的叶片光合能力、气孔导度(以 CO_2 计)则呈现快速下降, 至实验结束时下降为 3.95 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 0.088 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 同期对照组叶片光合能力、气孔导度分别为 22 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 0.78 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 表明凤眼莲对环境胁迫有较强的光合应答响应; 实验中发现处理 1 中老根系脱落、大量白色嫩根长出, 处理 2 中老根系大量死亡、脱落, 无白色新根长出, 同时叶片发黄、枯焦开始死亡, 表明在超过了凤眼莲的抗逆境能力后, 就开始出现根系死亡、光合能力受到抑制, 植物开始死亡, 表明在藻华聚集后形成的水体生态环境恶化对凤眼莲产生重度胁迫, 使植物生理功能受到抑制是导致植物死亡的主要原因之一。

关键词:藻华聚集; 生态效应; 凤眼莲; 叶绿素; 光合作用

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2887-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.08.021

Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth

LIU Guo-feng^{1,2}, HE Jun³, YANG Yi-zhong⁴, HAN Shi-qun^{2*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 3. Fisheries Technical Guidance Station of Wuxi Municipal Bureau of Agriculture & Forestry, Wuxi 214023, China; 4. Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The response of chlorophyll and photosynthesis of water hyacinth leaves in different concentrations of clustered algae cells was studied in the simulation experiment, and the aim was to reveal the mechanism of the death of aquatic plants during algae blooms occurred through studying the physiological changes of the macrophytes, so as to play the full function of the ecological restoration of the plants. And results showed the dissolved oxygen quickly consumed in root zone of aquatic plants after algae blooms gathered and showed the lack of oxygen ($\text{DO} < 0.2$ g·L⁻¹); and the ORP was lower than -100 mV after 1 d, and it declined to -200 mV at the end of the experiment. There were lots of nutrients releasing to the water after the algae cell died and concentration of DTN in treatment 1 and 2 were 44.49 mg·L⁻¹ and 111.32 mg·L⁻¹, and the content of DTP were 2.57 mg·L⁻¹ and 9.10 mg·L⁻¹, respectively. The NH_4^+ -N concentrations were as high as 32.99 mg·L⁻¹ and 51.22 mg·L⁻¹, and the root zone with the anoxia, strong reducing, higher nutrients environment had a serious stress effects to the aquatic plants. The macrophytes photosynthesis reduced quickly and the plant body damaged with the intimidation of higher NH_4^+ -N concentration (average content was 45.6 mg·L⁻¹) and hypoxia after algae cell decomposed. The average net photosynthesis rate, leaf transpiration rate of the treatment 2 reduced to 3.95 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 0.088 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, and only were 0.18 times, 0.11 times of the control group, respectively, at the end of the experiment, the control group were 22 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 0.78 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. Results indicated the algae bloom together had the irreversible damage to the aquatic plants. Also it was found large amounts of new roots and the old roots were dead in the treatment 1, but roots were all died in the treatment 2, and leaves were yellow and withered. Experiment results manifested that the serious environment caused by the algae blooms together was the main reason of the death of aquatic plants during the summer. So in the practice of ecological restoration, it

收稿日期: 2014-11-19; 修订日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41101525); 江苏省自主创新资金项目(CX(12)5057); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005)

作者简介: 刘国锋(1979~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水环境生态及污染生态治理, E-mail: 308390036@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: shiqunh@126.com

should avoid the harm to the plant after the algae bloom cells gathered and decomposed, so as to play the purification function of the plant in the ecological rehabilitation project.

Key words: algae bloom cluster; ecological effects; water hyacinth; chlorophyll; photosynthesis

因营养盐过量累积导致水体富营养化,其外在表现就是蓝藻水华的周期性、大规模暴发^[1],成为当前重要的水环境问题.蓝藻水华大量聚集死亡引起的藻源性黑水团等现象^[2],使得其对水质污染产生了质的变化.因此,只有快速、有效地去除水体中过量的氮磷营养盐,才能从源头上控制蓝藻水华的发生.在多种治理措施中,控制性种养生长和扩繁能力快、适应性强且生物量大、易于机械化打捞的以凤眼莲为代表的漂浮植物,进行污染水体的生态治理,成为当前水体生态修复的热点^[3~5],其实际治理效果也显现出明显的水质净化功能.然而,在没有完全控制住水体及内源氮磷负荷的情况下,蓝藻水华仍然是周期性、规模性发生,而且藻华发生期间正值温度高(气温大于25℃)、光照强烈的夏季.此时水华细胞聚集后将会因水体溶解氧耗尽而快速死亡、分解.在研究逆境胁迫对水生植物的影响时,多采用沉水植物作为研究对象^[6,7].然而,在实际较大水体的生态治理中,采用以凤眼莲为代表的漂浮植物进行水体治理,具有更大的灵活性、显著的治理功效.因此,采用以凤眼莲为代表的漂浮植物对藻华不同聚集程度下的应答响应,可以更为全面了解藻华聚集对水生植物生长的影响.本研究采用模拟实验研究在较高温度(气温大于25℃)、藻华的不同堆积程度下,以凤眼莲为代表的水生植物叶绿素和光合作用对外界的胁迫作用产生的应答响应.通过本研究的结果,探讨蓝藻水华聚集后植物生长乃至消亡原因,以期降低蓝藻聚集不良影响、强化利用以凤眼莲为代表的水生植物修复污染水体和水质净化效果提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验设置

本实验在江苏省农业科学院温室大棚内的400 L的大塑料周转箱内开展,其编号为1~9,其中1~3号为处理实验1,4~6号为处理实验2,7~9号为对照.实验水体采集于江苏省农业科学院的2号池塘,该池塘的上游来水主要是生活污水(实验区水体水温不低于25℃).然后盛放在周转箱内,周转箱底部预先放入过筛的10 cm厚、采自2号塘中的底泥.待水体注入周转箱10 d后,开始放入规格一

致、生长健壮的风眼莲植株,凤眼莲为单株、带有8片新鲜叶片、白色须根的绿色健壮植株,静置10 d后,待凤眼莲适应水体、开始正常生长后,放入从合肥巢湖十五里河口处采集的新鲜藻体.放入前预先用浮游植物生物网过滤掉流动的水分,然后用百分之一天平称量后,处理1中蓝藻细胞加入量为 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8,9](每g新鲜藻体中含有藻细胞数量为 2×10^8 个,与2007年无锡发生藻华黑水团而引起供水危机时的藻密度相同),处理2中蓝藻加入量为 $120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,以模拟蓝藻水华不同聚集程度以及发生藻源性黑水团时其对凤眼莲的影响;对照实验不添加,每个处理3个平行.在蓝藻大量死亡、水体发黑后,凤眼莲生长无明显变化时视为植物受到的损伤为不可逆的,结束实验;实验共持续两周时间.

1.2 样品采集

1.2.1 基本指标测定

实验开始后,用便携式水质监测仪YSI测定水体基本参数[主要测定指标为水温、水体溶解氧(DO)、水体酸碱度(pH)、水体氧化还原电位(ORP)及水体电导率(EC)].每3 d采集一次植物样品和水体样品,然后带回实验室进行处理.采集完好植物顶生叶片4片,无折叠地放入自封袋中用细线缠好,立即置于液氮罐中,留作测定叶绿素浓度.

1.2.2 水体营养盐含量测定

采集的水体样品带回实验室后,采用GF/C滤膜过滤后,用过硫酸钾消解法测定DTN、DTP含量^[10];用GF/C滤膜过滤后的水样用注射式流动分析仪测定水体中 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N含量.

1.2.3 叶片叶绿素浓度测定

参照李合生^[11]的实验方法,在实验室中,取出无折叠、无破损的叶片,用直径为0.6 cm的打孔器打出叶圆片5片,放入10 mL 96%乙醇溶液中,密封,暗处浸提叶绿素.每个处理重复3次.待浸泡48 h后,再以参比作为对照,用紫外分光光度计在665 nm和649 nm波长处测其吸光值,求得叶绿素的浓度,并代入公式求出叶绿素a、叶绿素b的浓度.

$$c_a = 13.95A_{665} - 6.99A_{649}$$

$$c_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665}$$

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{\text{叶绿素浓度} \times \text{提取液总体积}}{\text{叶片面积}}$$

$$\text{叶绿素 a 含量}(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{\text{叶绿素浓度} \times \text{提取液总体积}}{\text{叶片面积}}$$

$$\text{叶绿素 b 含量}(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{\text{叶绿素浓度} \times \text{提取液总体积}}{\text{叶片面积}}$$

1.2.4 叶片净光合速率测定

采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合测定仪,开放系统使用红蓝光源测定,光量子密度为 $1600 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,流速设为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$,室外测定条件为自然晴天上午 09:00 ~ 11:00 当地光温条件,在相同的时间,用 LI-6400 型光合仪测定供试材料 5 片不同叶位叶片的净光合速率^[12]。

1.3 数据分析

用 Excel 2007 对数据进行初步处理,然后应用 SPSS 18.0 和 Origin 8.0 进行数据分析和图件绘图。

2 结果与讨论

2.1 藻细胞聚集后水体基本指标变化

藻华细胞聚集后,很快消耗掉水体中溶氧[图 1(a)、1(c)]. 在本实验中,表现为在藻细胞聚集后 2 h 内就完全消耗掉水体中的溶解氧,植物根区水体中溶解氧从 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降为不超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随后水体中溶氧浓度持续保持较低浓度而呈现缺氧现象. 在较高气温($>25^\circ\text{C}$)[图 1(b)]作用

下,藻细胞出现快速死亡、腐解现象,导致水体缺氧现象更为严重,实验进行 1 d 后,处理 1、2 根区水体中氧化还原电位(Eh)从初始的 200 mV 分别下降为 28.3 mV、-135.9 mV; 在实验进行到第 5 d 时达到最低值,处理 1、2 根区水体中 Eh 分别为 -216.5 mV、-251.0 mV. 实验中发现处理 1、2 的植物根系开始大量发黑、发臭、枯死,同时开始大量脱落. 随后处理 1 中根区水体中 Eh 缓慢增加,至实验结束时根区 Eh 增加了 91 mV,同时也发现处理 1 中植物根部开始长出大量的白色嫩根系,表明此时在处理 1 的藻华聚集程度下(藻细胞添加量为 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,新鲜藻体),凤眼莲抵消藻华细胞前期的不良影响后又慢慢恢复了继续生长的能力. 处理 2 中根区水体的 Eh 值呈持续降低的变化趋势,直至实验结束其含量为 -199.9 mV. 且此时处理 2 中植物大部分叶片呈现干枯、焦黄、发蔫的状态,根系发臭、须根基本脱落掉,表明处理 2 中植物在此种藻华聚集程度(藻细胞添加量为 $120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,新鲜藻体)下的长期不良影响下受到不可逆的毒害作用,植物开始死亡。

2.2 藻华细胞聚集后上覆水体营养盐含量变化

藻华聚集、死亡并腐解后,细胞内含物会释放到周围水体中,从而会显著增加水体中 N、P 等的含量. 在本实验中,藻华细胞聚集后,水体中 N、P 含量均呈现快速增加的变化趋势[图 2(a)、2(b)]. 水体中溶解性 TN、TP(总溶解性氮 DTN、总溶解性磷

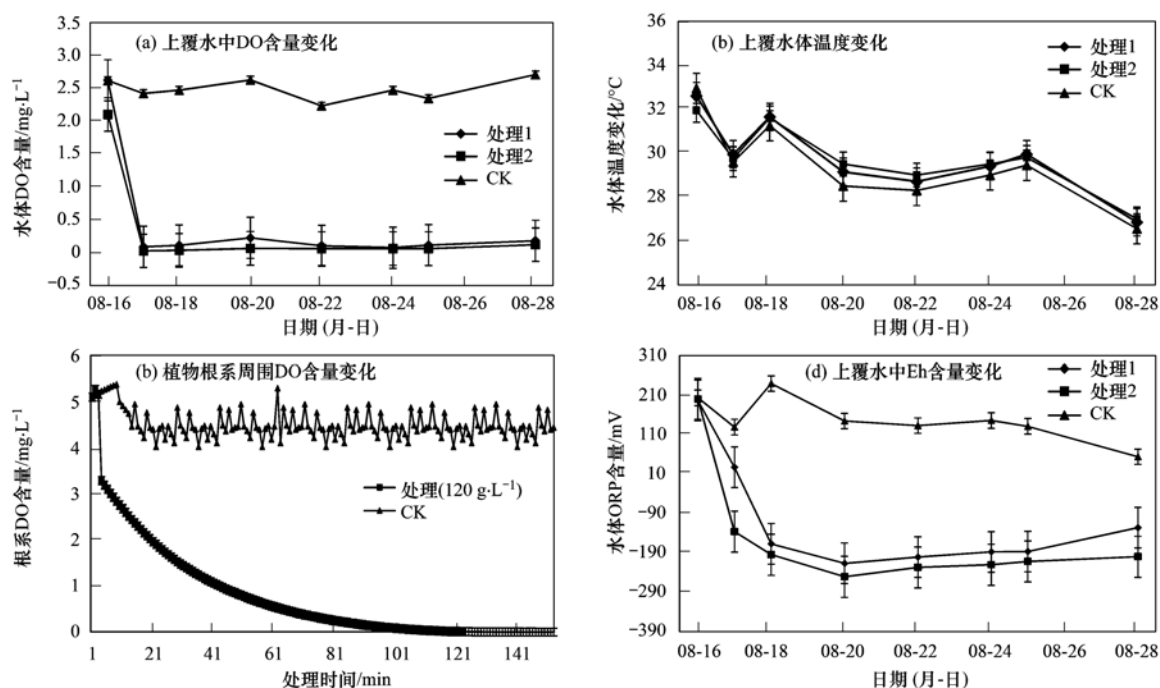


图 1 藻细胞聚集后水体中 DO、WT、Eh 变化

Fig. 1 Changes of DO, WT, Eh concentration in aquatic plant after algae cells gathered

DTP) 含量在藻细胞聚集后不久即出现快速增加, 随后呈现持续增加趋势, 至实验结束时, 处理 1、2 中 DTN 含量分别高达 $44.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $111.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同期对照组中为 $0.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 且处理 2 的变化率 (增加量) 要高于处理 1 的变化率, 处理 1、2 的 DTN 的变化率分别为 276%、470%, 而同期对照实验中水体 DTN 的增加量为 -39% (负值表示水体中 DTN 含量比初始值下降了 39%)。根区水体 DTP 的变化趋势同 DTN, 也表现其含量快速增加趋势, 至实验结束时, 处理 1、2 中 DTP 含量分别高达 $2.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对照组中为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 其变化率分别为 49%、515%、-41%。处理 2 中水体 DTN、DTP 含量增加的幅度和变化量远高于处理 1 中水体的变化量, 表明处理 2 中藻细胞的死亡分解速率要高于处理 1, 在处理 2 的藻华聚集程度下, 水体将会出现更为严重的缺氧现象, 根区水体呈现强还原状态, 这种环境变化加之较高气温作用下反过来加剧了藻细胞的分解, 导致大量细胞内含物释放到水体中, 引起水体中 DTN、DTP 含量快速增加。

藻细胞死亡后其腐解的大量细胞内含物会释放到水体中, 植物根区水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化趋势同水体中 DTN、DTP 的趋势 [图 2(c)、2(d)]。处理 1、处理 2 中根区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在实验进行 3 d 后, 其含量分别高达 $15.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $21.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对照组中水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 随后处理 1 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 开始下降, 至实验结

束时高达 $32.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $51.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别为对照组的根区水体的 54 倍和 84 倍。水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量也出现急剧增加现象, 在实验进行 3 d 后, 处理 1、2 中的含量高达 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同期对照组其含量仅为 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随后其含量持续增加, 至实验结束时, 处理 1 中含量呈现下降趋势, 含量为 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而处理 2 中继续增加, 含量高达 $5.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。快速死亡、腐解的藻细胞导致水体呈现强还原、缺氧环境, 处理 1 的植物在抵消掉初期藻细胞聚集后引起的水环境恶化后, 长出的新根又可以重新吸收、利用藻细胞释放的丰富营养成分; 在处理 2 中植物无法抵抗藻细胞聚集引起的不良环境, 藻细胞死亡后释放大量的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 于水体中, 对植物根系产生毒害作用, 导致植物生长的生态环境恶化, 植物会因外界恶劣的环境而死亡。

蓝藻在厌氧条件下出现快速分解, 其死亡后形成大量的有机碎屑, 分解时可释放大量营养盐和有机物, 一部分沉积到底泥中, 一部分会变成溶解性而存留在水体中, 可供藻类等浮游植物生长。相关研究表明, 蓝藻碎屑分解速率很快 ($0.072 \sim 0.271 \text{ d}^{-1}$), 氮磷释放到水体中, 不但导致水体中 N、P 含量急剧增加^[13], 且有可能引发“黑水团”现象致使水体发黑、发臭^[14,15], 不但影响水体感官变化, 对水体污染产生质的变化, 且可能造成水源地的供水危机^[16]。藻华堆积密度可影响蓝藻衰亡时营养盐释放过程, 随堆积密度增大, 营养盐释放速率和释放量增

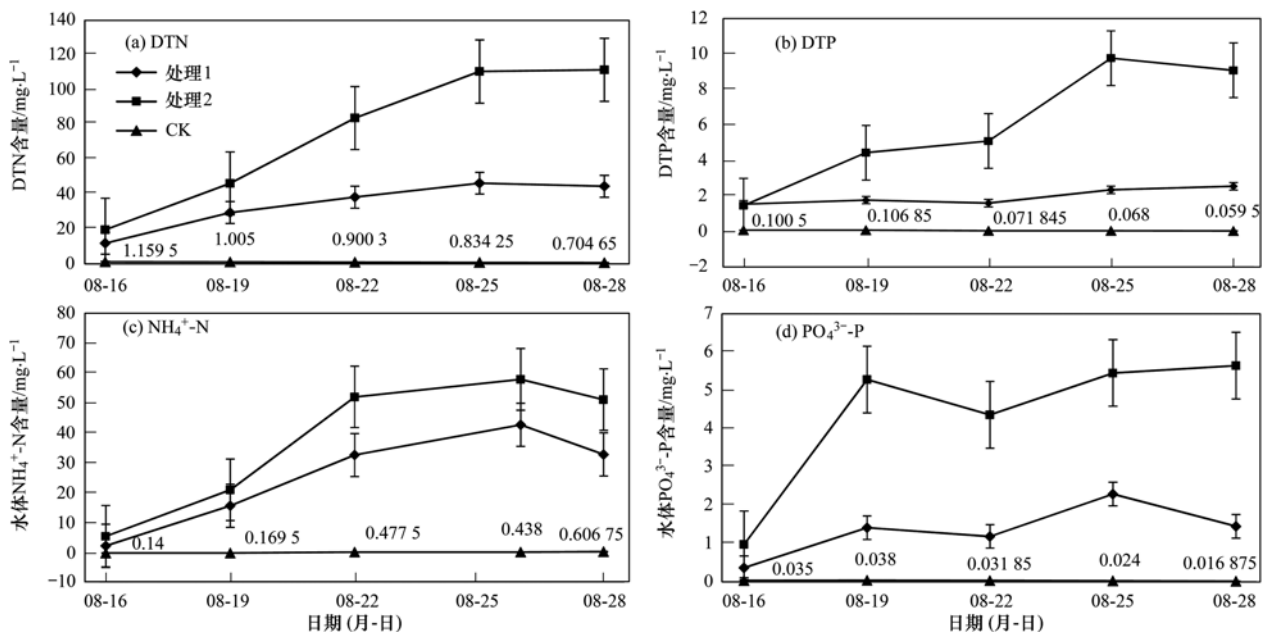


图2 藻细胞聚集后根区水体营养盐含量变化

Fig. 2 Changes of nutrient concentrations in root-zone water after algae cells gathered

加^[16],这与本研究实验结果同.由于在厌氧条件下,大量的含氮化合物分解后以氨氮形态释放,导致植物根区水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量快速升高;而尚丽霞等^[18]研究发现,在厌氧条件下溶解态有机氮逐渐降解为无机氮,且以铵态氮为主.表明在厌氧分解下,水体产生大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 将会对植物根系产生毒害,从而对植物造成伤害.实验中也发现,处理1、2中根系会大量死亡、脱落.

2.3 藻华细胞聚集后叶片中叶绿素浓度变化

光合色素是绿色植物进行光合作用的主要色素,其含量在一定程度上能反映植物同化物质的能力.光合色素指标是植物重要的生理指标,而环境胁迫会对光合色素含量产生严重影响.在本实验中,叶片叶绿素a、b含量在藻细胞聚集后呈现快速增加、随后下降的变化趋势(图3).在实验进行3 d后处

理1、2中叶片的叶绿素a含量均增加到 $1.31\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1.06\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,叶绿素b含量高达 $0.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.42\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,达到实验中的最高值,同期对照组中叶片的叶绿素a、b含量为 $0.66\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.36\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;随后叶绿素a、b含量开始缓慢下降,与对照中叶片的叶绿素a、b含量持平,至实验结束时,处理1、2中叶绿素a含量分别为 $0.98\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.83\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,叶绿素b含量分别为 $0.40\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.39\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,同期对照组叶片叶绿素a、b含量分别为 $0.83\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.39\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.此时处理2中植物叶片已经出现发黄、干枯现象,仅顶生叶片呈现绿色.叶绿素a/b比值呈现类似的变化趋势,表现出随藻细胞聚集程度的加重,其比值产生较大的变化.表明在藻华细胞聚集后,植物叶绿素受到逆境条件的不良影响产生了应答反应.

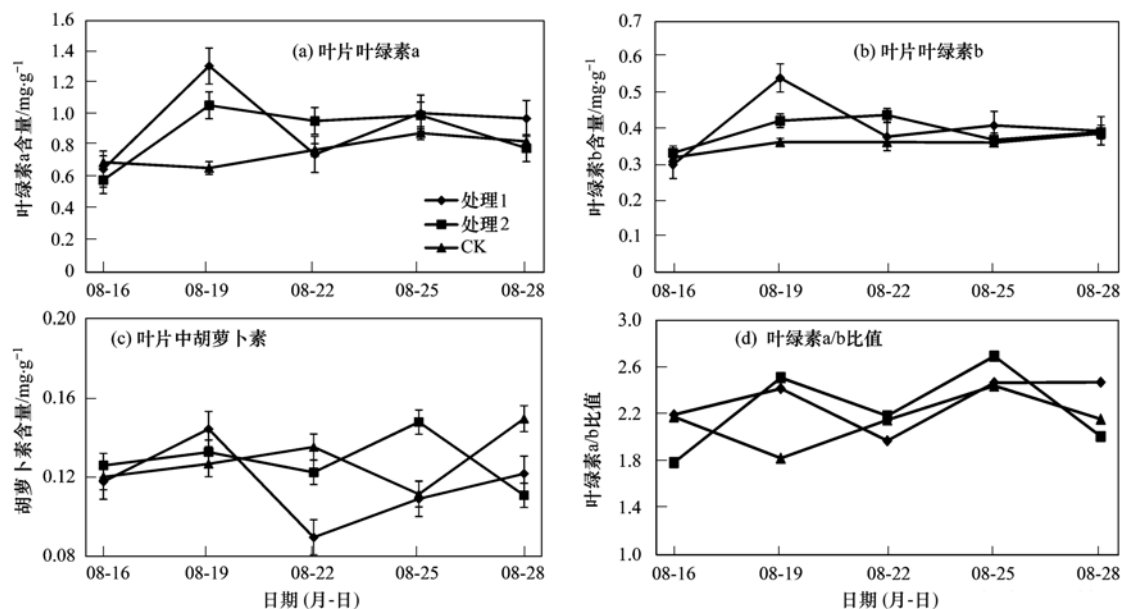


图3 藻细胞聚集后植物叶绿素变化

Fig. 3 Changes of chlorophyll in plant leaves after algae cells gathered

叶片中胡萝卜素含量表现出在实验初始阶段快速增加的趋势,在实验前3 d,处理1、2和对照组中胡萝卜素含量从 0.069 、 0.065 和 $0.058\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加为 0.15 、 0.13 和 $0.13\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.随后处理1、2中的含量呈现不规则的变化,至实验进行第6 d处理1中胡萝卜素含量快速下降为 $0.09\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,随后增加.至实验结束时,处理1、2中含量分别为 $0.12\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.11\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,同期对照叶片中胡萝卜素含量增加为 $0.15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.韦凤杰^[19]对不同生育期烤烟叶片中胡萝卜素含量的变化进行研究,发现上部叶片在发育后期含量增高.在本实验中发现处理1、

2中含量反而下降,可能是受到因藻细胞聚集形成的不良环境影响而引起的.

有研究学者认为环境胁迫会导致植物叶片叶绿素浓度下降,因为叶片水分运输的障碍影响了叶绿素的合成,且促进已形成的叶绿素加速分解,即叶绿素减少合成和加速分解是叶绿素浓度在环境胁迫下降降低的主要原因^[20];但也有研究表明,叶绿素浓度随着胁迫增强而呈增大趋势,李芳兰等^[21]认为干旱胁迫下叶绿素量增加可能与叶片含水量减小有关,因为叶片浓缩导致单位面积叶绿素浓度增加,以此保证植物对光能的充分利用,维持一定的光合速率;

也有研究认为是植物叶片叶绿素与叶绿体蛋白间的结合变得松弛,松弛叶绿素容易被提取,导致植物在逆境胁迫下叶绿素浓度增加^[22].但在逆境胁迫下,植物叶片面积伸展比叶片结构成分更易受到影响^[23],新叶的展开速度和叶片的增长速度都减慢,叶面积变小、叶肉增厚、叶绿体收缩,且植物叶片含水量下降,导致叶绿素浓度增加,产生相对的“浓缩”效应^[24,25].功能叶片光合色素含量在短期(3 d)胁迫下升高,但随后就开始下降,表明叶片光合色素含量受逆境胁迫后,其功能受损、部分分解后,造成其含量下降^[26].

胡萝卜素可吸收叶绿素吸收剩余的光能,又是内源抗氧化剂.当叶绿素分子接收光能变为激发态时,如果能量不能传递出去或用于化学反应,则激发态的叶绿素分子会与分子氧反应,形成非常活跃的激发态氧,也即单线态氧;单线态氧会与多种细胞组分,特别是膜脂起反应破坏光合膜^[27];而胡萝卜素分子则会接受过剩的激发态叶绿素分子的能量,从而避免形成单线态氧,起到保护作用;其在细胞内可吸收剩余光能、淬灭活性氧,防止细胞膜脂过氧化,保护光合机能^[11,28].在本实验中,胡萝卜素含量先升高、后降低,表明在藻细胞聚集后、产生环境胁迫后,为去除活性氧而产生应答反应,其含量表现为先增加、后降低.

2.4 藻细胞聚集后植物光合作用能力变化

由于光合作用是植物生长发育的基础,它为植物的生长发育提供所需的物质和能量^[29];外界胁迫作用会对植物产生伤害作用,抑制生长发育和限制光合作用,从而限制作物产量的提高^[19].叶片某一时刻的光合能力是其形成时间(季节)和叶龄的综合反映,但叶片结构和生理的发育进程与叶龄紧密相连^[20].在藻华细胞加入到凤眼莲生长的水体2 d后,凤眼莲叶片的光合能力呈现下降趋势,其下降的幅度与蓝藻细胞加入量成正相关关系[图4(a)],尤其是处理2在实验3 d后降为 $25.35 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,在实验进行到5 d后,叶片的光合作用能力下降得更为明显,处理1和处理2的叶片光合能力为 $25.48 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $15.76 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,处理2叶片光合能力仅为对照组的65%.随着藻细胞死亡、缺氧持续和胁迫的加重,此后处理2的叶片光合能力一直呈现下降趋势,且在实验进行5 d后,部分凤眼莲开始死亡,表现为叶片发焦、枯黄;实验结束时其光合能力仅为 $3.95 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,为对照实验组的35%,而藻华细胞

添加量为 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理1中,其光合能力呈现出先下降、后增加的变化趋势,这是因为在前期藻细胞的胁迫作用,导致其光合作用能力降低^[30];这可从胞间 CO_2 浓度变化数值得到验证^[31].但在藻华细胞死亡、分解后,植物抵消了这种不良影响后,又重新恢复到以前状态,光合作用能力呈正常状态^[32].

加入藻华细胞3 d后,叶片气孔导度出现明显下降趋势,处理1、2中由初期的 $0.82 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.83 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 降低为 $0.68 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.52 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,同期对照组中为 $0.78 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,表现出藻细胞聚集越严重,其对植物的胁迫作用越明显[图4(b)].实验继续到第5 d时,处理2中叶片的气孔导度急剧下降,为 $0.19 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,仅为同期对照组的21.4%.叶片的气孔导度下降,会导致胞间 CO_2 含量、叶片蒸腾速率均出现下降^[31].

逆境胁迫对植物的危害是多方面的,包括渗透、离子运输、细胞内离子平衡等,是植物的光合速率下降、生长受到抑制、加速衰老^[33].植物光合性能的好坏最终影响植物生长、产量和质量,叶绿体是植物光合作用场所,也是对环境胁迫最敏感的细胞器^[34].在本实验中,植物叶片光合能力表现出在实验进行3 d后就开始出现明显下降现象,且随着胁迫程度加重、光合能力下降越严重的趋势,处理1中叶片的光合能力在后期开始增加、恢复到实验初始水平,实验中也发现此时植物叶片长势较好、根

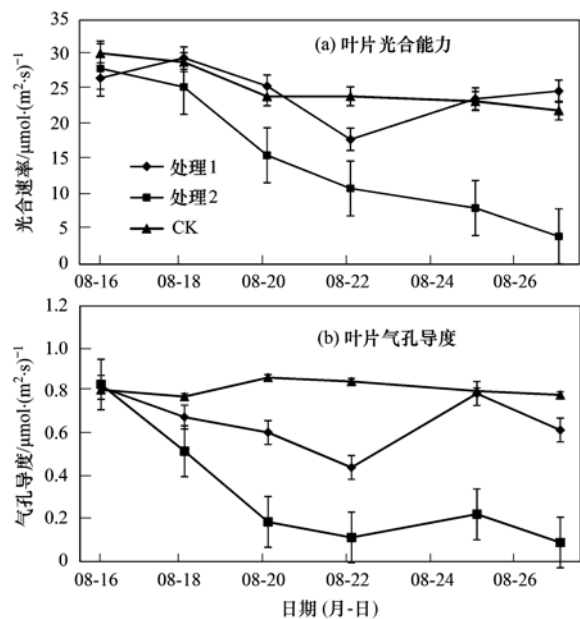


图4 藻细胞聚集后植物光合能力变化

Fig. 4 Changes of photosynthesis in aquatic plant after algae cells gathered

部长出许多白色嫩根,表明在处理 1 的藻细胞聚集水平下,漂浮植物凤眼莲可以抵消短期内的逆境胁迫.但在处理 2 的藻细胞聚集程度下,叶片的光合能力持续下降,气孔导度也表现出类似的变化,至实验结束时,叶片的光合能力、气孔导度分别为 $3.95 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $0.088 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,分别下降了 86%、89% (图 4); 且植物叶片基本表现为干枯现象,根系死亡、脱落,无白色新根生出.表明在此种藻细胞聚集下,植物无法抵消这种不良环境影响,植物内部组织受到伤害而开始死亡.

对水体理化环境因子(选取 WT、DO、ORP、DTN、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等)与水体光合作用相关指标(叶绿素 a、叶绿素 b、叶片光合能力、叶

片气孔导度等)进行相关性分析,分析结果表明(表 1),叶片叶绿素 a、b 的变化与水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量显著正相关,但与水体中 DO、ORP 含量显著负相关($P<0.5$). 叶片光合能力、气孔导度变化与水体中 DTN、DTP 呈极显著负相关,与水体中 DO、ORP 含量正相关性较好.这也表明叶片气孔导度和光合能力受水体理化环境条件影响较大,水体中较高的 WT、DO、ORP 水平有利于提高叶片光合能力和气孔导度,但水体中较高的 DTN、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量会显著抑制叶片光合能力和气孔导度.这也表明藻华细胞衰亡、分解后释放的大量营养盐将会对凤眼莲叶片产生严重的不良环境影响.

表 1 水体理化环境因子与叶片叶绿素、光合能力和气孔导度的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlations between water environmental factors and chlorophyll, Pn and Gs

	WT	DO	ORP	DTN	DTP	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
叶绿素 a	-0.444	-0.856	-0.764	0.405	0.429	0.783	0.495
叶绿素 b	-0.155	-0.779	-0.635	0.286	0.155	0.617	0.617
光合能力	0.603	0.651	0.809	-0.987 **	-0.927 *	-0.697	-0.697
气孔导度	0.529	0.849	0.944 *	-0.944 **	-0.871 *	-0.816	-0.816

1) * 表示在 0.5 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

3 结论

(1)在较高水体温度(>25℃)作用下,藻华聚集后会在 2 h 内消耗掉水体中溶解氧,藻华细胞开始死亡、腐解,形成厌氧(<0.2 g·L⁻¹)、强还原(<-200 mV)的不良环境,对植物根系产生胁迫作用.

(2)藻细胞分解后,会释放大量营养盐到水体中,使得处理 1、2 的根区中 DTN 含量分别高达 44.49 mg·L⁻¹、111.32 mg·L⁻¹, DTP 含量 2.57 mg·L⁻¹、9.10 mg·L⁻¹, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 32.99 mg·L⁻¹、51.22 mg·L⁻¹,较高的营养盐含量(尤其是高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)将对植物根系产生毒害作用.

(3)植物在受到逆境胁迫影响后,植物的光合作用发生显著变化,至实验结束时处理 2 中的光合能力、气孔导度分别下降为 $3.95 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $0.088 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,分别为对照的 0.18 倍、0.11 倍.表明在超过植物抗逆能力后,植物根系死亡、光合功能受损,造成植物营养输送功能障碍而枯萎,这也表明藻华聚集而产生的逆境条件持续胁迫是导致植物死亡的主要原因.

致谢:在样品采集、分析过程中得到顾东祥博士、石祖良博士、孙国峰博士给予的大力帮助和指导,在此表示感谢.

参考文献:

[1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake [J]. Science, 2007, **317**: 1166.

[2] 陆桂华,马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. 水科学进展, 2009, **20**(3): 438-442.

[3] 张振华,高岩,郭俊尧,等. 富营养化水体治理的实践与思考——以滇池水生植物生态修复实践为例[J]. 生态与环境学报, 2014, **30**(1): 129-135.

[4] 严少华,王岩,王智,等. 水葫芦治污试验性工程对滇池草海水体修复的效果[J]. 江苏农业学报, 2012, **28**(5): 1025-1030.

[5] 刘国锋,张志勇,严少华,等. 大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1299-1305.

[6] 赵凤斌,王丽卿,季高华,等. 盐胁迫对 3 种沉水植物生物学指标及叶片中丙二醛含量的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(10): 40-44.

[7] 刘丽贞,秦伯强,朱广伟,等. 太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3154-3159.

[8] 何浪,商兆堂,秦铭荣,等. 太湖蓝藻密度消长的规律分析[J]. 江苏农业科学, 2012, **40**(6): 333-335.

[9] 刘国锋,申秋实,张雷,等. 藻源性黑水团环境效应:对水-沉积物界面氮磷变化的驱动作用[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2917-2924.

[10] 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.

[11] 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.
- [12] 李霞, 任承钢, 王满, 等. 不同地区凤眼莲的光合生态功能型及其生态影响因子[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 823-830.
- [13] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 409-415.
- [14] 盛东, 徐兆安, 高怡. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[J]. 水资源保护, 2010, **26**(3): 41-44.
- [15] 刘国锋, 何俊, 范成新, 等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处 Fe、Mn、S 循环影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2652-2660.
- [16] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.
- [17] Chuai X M, Ding W, Chen X F, *et al.* Phosphorus release from cyanobacterial blooms in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(6): 842-849.
- [18] 尚丽霞, 柯凡, 李文朝, 等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 47-54.
- [19] 韦凤杰. 烤烟叶片发育过程中类胡萝卜素代谢的初步研究[A]. 见: 中国烟草学会 2004 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国烟草学会, 2004.
- [20] 胡梦芸, 李辉, 张颖君, 等. 水分胁迫下葡萄糖对小麦幼苗光合作用和相关生理特性的影响[J]. 作物学报, 2009, **35**(4): 724-732.
- [21] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5406-5416.
- [22] Strogonov B P. Structure and function of plant cells in saline habitats[M]. New Trends in the Study of Salt Tolerance. New York: Halsted Press, 1973.
- [23] Romero A R, Soria T, Cuartero J. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions[J]. Plant Science, 2001, **160**(2): 265-272.
- [24] 王羽梅, 任安祥, 潘春香, 等. 长时间盐胁迫对苋菜叶片细胞结构的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, **40**(3): 289-292.
- [25] García-Valenzuela X, García-Moya E, Rascón-Cruz Q, *et al.* Chlorophyll accumulation is enhanced by osmotic stress in graminaceous chlorophyllous cells [J]. Journal of Plant Physiology, 2005, **162**(6): 650-661.
- [26] 王珊, 赵树欣, 魏长龙, 等. 缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1462-1467.
- [27] 丁俊祥, 邹杰, 唐立松, 等. 沼泽、盐化沙丘过渡带和沙丘生境下芦苇的光合及生理生化特性[J]. 生态学报, 2015, **35**(16), DOI: 10.5846/stxb201404170756.
- [28] Willekens H, Van Camp W, Van Montagu M, *et al.* Ozone, sulfur dioxide, and ultraviolet B have similar effects on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana plumbaginifolia* L. [J]. Plant Physiology, 1994, **106**(3): 1007-1014.
- [29] 宁宇, 邓惠惠, 李清明, 等. 红蓝光质对芹菜碳氮代谢及其关键酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, **51**(1): 112-118.
- [30] 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 等. 围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3398-3404.
- [31] 包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 等. 藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2070-2076.
- [32] 胡楚琦, 刘金珂, 王天弘, 等. 三种盐胁迫对互花米草和芦苇光合作用的影响[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(1): 92-103.
- [33] 刘友良, 毛才良, 汪良驹. 植物耐盐性研究进展[J]. 植物生理学通讯, 1987, (4): 1-7.
- [34] Cheeseman J M. Mechanism of salinity tolerance in plants[J]. Plant Physiology, 1988, **87**: 547-550.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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