

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)

南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)

南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)

长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)

贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 朱兆洲,李军,王志如(1952)

北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)

北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)

燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)

Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)

办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 李岫雯,曹辉,倪宏刚(1989)

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)

北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)

气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)

深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)

小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 黄莹,李永霞,高甫威,徐民民,孙博,王宁,杨健(2046)

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)

三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 张磊,蔚建军,付莉,周川, Douglas G. Haffner(2061)

藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)

巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)

贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)

植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 丁春生,马海龙,傅洋洋,赵世督,李东兵(2116)

三维花状结构 α-FeOOH 协同 H₂O₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)

UV/H₂O₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)

钼掺杂 TiO₂ 光催化降解全氟辛酸 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)

低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)

纳米 Fe₃O₄/CeO₂-H₂O₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)

流变相法制备包覆型 CMC-Fe⁰ 及降解水中 TCE 的研究 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)

Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 祁文智,王凡,王辉,施钦,逢磊,卞兆勇(2168)

锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)

铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)

聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 张奕奕,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)

污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 孙衍卿,孙震,张景来(2210)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)

基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 雍佳君,成小英(2232)

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 王润芳,王琴,张红,齐嵘(2239)

石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)

Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 司友斌,孙林,王卉(2252)

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉沙星的影响 马微,鲍艳宇(2259)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 禄兴丽,廖允成(2266)

城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 李晓燕,张舒婷(2274)

中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征
..... 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)

经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟
..... 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)

生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)

蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)

焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)

《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

藻华聚集的环境效应：对漂浮植物水葫芦光合作用的影响

包先明¹, 顾东祥², 吴婷婷³, 石祖良², 刘国锋^{4*}, 韩士群², 周庆²

(1. 淮北师范大学生命科学院, 淮北 235000; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 南京理工大学化工学院, 南京 210094; 4. 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)

摘要: 利用适应性强、生物量大的水生植物来净化污染水体, 已成为目前水体生态修复的一种快捷有效的方法。然而, 在夏季蓝藻水华严重聚集的水体, 藻华聚集后对水生植物的生理生态影响及其环境效应, 尚缺乏系统研究。本研究以水葫芦为代表, 模拟在高温阶段(水温 $WT > 25^{\circ}\text{C}$)、水华严重聚集时, 对水葫芦的光合作用的影响进行研究, 以揭示蓝藻水华聚集后造成的浅水生态系统中水生植物消亡的深层机制, 并为减轻藻华聚集对水生植物的不良影响、充分发挥水生植物的水体净化功能提供理论依据。结果表明, 藻华聚集会很快消耗掉水生植物根区内的溶氧, 呈现缺氧状态 ($\text{DO} < 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 植物根区内 ORP 出现明显下降现象, 实验进行 1 d 后低于 -100 mV , 实验结束时达 -200 mV , 水体呈现强还原环境。与对照相比, 根区内 pH 值低 0.7 个单位。藻华细胞在死亡、分解后释放大量的无机营养盐于水体中, 植物根区内的 NH_4^+ -N 含量比对照实验中高 102 倍; 较高的 NH_4^+ -N 含量(平均为 $45.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 加之缺氧的胁迫作用, 导致植物机体受到破坏, 植物的光合作用能力严重下降。叶片的平均净光合速率仅为对照的 0.6 倍, 实验结束时其光合速率 P_n 为 $3.96 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 而同期对照实验的叶片净光合速率 P_n 为 $22.0 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 叶片蒸腾速率仅为对照的 0.55 倍, 至实验结束时其蒸腾速率为 $1.38 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 同期对照实验的叶片蒸腾速率为 $7.61 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 表明藻华长期的聚集对植物产生了不可逆的伤害作用。在实际生产中, 要避免蓝藻的严重堆积和快速消亡, 以减轻藻华暴发对植物的伤害, 充分发挥植物的水体净化功能。

关键词: 藻华聚集; 漂浮植物; 水葫芦; 环境效应; 光合作用

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2070-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.021

Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis

BAO Xian-ming¹, GU Dong-xiang², WU Ting-ting³, SHI Zu-liang², LIU Guo-feng^{4*}, HAN Shi-qun², ZHOU Qing²

(1. College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 3. College of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 4. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: It is an efficient and effective ecological restoration method by using the adaptability, large biomass of aquatic plants to purify the polluted water at present. However, there is a lack of systematic research on the impact on the physiological ecology of aquatic plants and its environmental effects of algae blooms cluster in summer. The aim of this paper is to reveal the mechanism of macrophytes demise in a shallow ecosystem by studying the influence on photosynthesis of water hyacinth caused by the cyanobacterial blooms gathered, and also to provide the theoretical basis for full effects of purification function of macrophytes to reduce the negative effects on the aquatic plants after algae blooms gathered during the higher temperature (not lower 25°C) through simulating experiments. Results showed the dissolved oxygen quickly consumed in root zone of aquatic plants after algae blooms gathered and showed a lack of oxygen ($\text{DO} < 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); and the ORP was lower than -100 mV after 1 d, and it declined to -200 mV at the end of the experiment, and pH declined 0.7 unit compared with that of control group (CK). There were lots of nutrients releasing to the water after the algae cell died and the NH_4^+ -N concentration was 102 times higher than that of the control group root zone. And the macrophytes photosynthesis reduced quickly and the plant body damaged with the intimidation of higher NH_4^+ -N concentration (average content was $45.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and hypoxia after algae cell decomposed. The average net photosynthesis rate, leaf transpiration rate were

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41101525); 江苏省自主创新基金项目(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: 包先明(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: xmbao96@126.com

* 通讯联系人, E-mail: 308390036@qq.com

0.6 times, 0.55 times of the control group, and they reduced to $3.96 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, $1.38 \text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, respectively. At the end of the experiment, they were $22.0 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ and $7.61 \text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ for the control group. Results also showed the algae bloom together had the irreversible damage to the aquatic plants. So in the practice of ecological restoration, it 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; floating plant; water hyacinth; environmental effects; photosynthesis

近年来因污水(生活污水、畜禽养殖废水、工业废水等)的排放、农业径流及点源污染等多重因素影响,导致湖泊、水库等交换周期长、流动性差的水体中积累了大量营养盐,水体呈现富营养化^[1]。水体富营养化的外在表现之一就是蓝藻水华的周期性、大规模暴发,尤其是2007年太湖蓝藻水华发生,造成无锡市200多万人饮用水的缺乏,造成了极大的不良影响。富营养化水体中蓝藻聚集死亡引起的藻源性黑水团等水污染事件^[2,3],使得其对水质污染产生了质的变化,对当地居民的生产、生活和国民经济发展都造成了极大的影响。因此,如何快速、有效地修复污染水体,已经成为当前水环境保护的迫切需求。针对这种情况,目前已采取了多种治理方式,如底泥疏浚^[4,5]、引江济太工程^[6]、种植水生植物修复水体^[7]等,在一定范围内取得了相应的效果。其中,以生长和扩繁能力快、适应性强,生物量大、易于机械化打捞的风眼莲,成为当前水体治理的热点^[8,9],其实际治理效果也显现出明显的水质净化功能^[10]。然而,即使采用水生植物进行水体修复,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 $>25^\circ\text{C}$)、光照强烈的夏季。针对这种情况,研究在较低温度水平下(气温 $<25^\circ\text{C}$ 下),蓝藻水华聚集后对植物生理生态的影响,结果表明不会对植物造成较大损伤,蓝藻降解后释放的营养盐可以为植物生长提供丰富的物质^[11]。本文通过模拟实验重点研究在藻华的不同堆积程度下,在较高的温度条件下(气温 $>25^\circ\text{C}$ 下),藻华聚集后对植物将产生哪些不良影响。通过本研究的结果,探讨水生植物在蓝藻水华聚集后的消亡原因,以期减轻蓝藻水华聚集的危害、强化利用以水葫芦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

本实验在江苏省农科院的温室大棚内的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科院的2号池塘,该池塘的上游来水主要是生活污水(实验区水体TN为 $3.90 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP为 $0.15 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水温不低于 25°C)。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、生长健壮的水葫芦中等苗,水葫芦为单株(去除掉分蘖植株)、带有8片新鲜叶片、白色须根的绿色健壮植株(每个周转箱中放入50株,栽植密度等同于 $120 \text{株}\cdot\text{m}^2$),静置10 d后,待水葫芦适应水体、开始正常生长后,放入从太湖梅梁湾采集的新鲜藻体。放入前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 $60 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (每g新鲜藻体中含有藻细胞数量为 2×10^8 个),处理2中蓝藻加入量为 $120 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[12,13],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水葫芦的影响;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,水葫芦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 样品采集与分析

基本指标测定:实验开始后,在实验前3 d每天用便携式水质监测仪YSI测定水体的基本指标[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)];第4 d后,因水体基本指标较为稳定,每2 d测定一次。水体样品每3 d采集一次,然后带回实验室测定 NH_4^+-N 的含量。

水体叶绿素测定:水样带回实验室后,取一定量的水体用GF/C滤膜过滤后,用改进的热乙醇方法测定叶绿素a^[14]。

1.3 外界光照和温度等环境条件测定

测定光合作用时,选取上午09:00~11:00时阳光照射、温度条件较为一致时于室外测定光温条件,用LI-6400型(美国LI-COR公司)便携式光合仪同时连续测定不同叶片连体材料的光强、温度和相对湿度等环境条件,重复3次,每材料的测定在5

min 内完成. 测定结束后,用标签纸对所测定的材料进行标记,以确保以后每次都能测定同一叶片.

1.4 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 $1\ 600\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,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.

1.5 数据分析

采用 SPSS 19 软件对实验数据进行统计分析,显著性检验采用 LSD 法. 数据处理和图表绘制用 Excel 10.0 与 Origin 8.5 进行.

2 结果与分析

2.1 蓝藻聚集后对上覆水体基本参数的影响

蓝藻细胞会消耗掉水体大量的溶解氧,且在高温

温作用下,常会表现为快速消亡、分解,从而加剧水体缺氧现象. 在本实验的周转箱中加入蓝藻细胞后,水体 DO 含量急剧下降,直至实验结束其含量仍不超过 $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈现缺氧现象(图 1). 同时水体中 pH 呈现下降的趋势,与对照组中相比,处理组中水体的 pH 下降了 0.7 个单位. 蓝藻在生长过程中,通过光合作用吸收水体中 CO_2 ,致使水体中 H^+ 离子减少,pH 值升高^[15]. 然而,在缺氧、高温作用下,蓝藻细胞很快就会出现死亡,导致其无法利用水体中 CO_2 ,致使水体 pH 值出现下降现象. 与对照组相比,处理组中水体 EC 含量呈现不断上升的变化趋势,这可能是因为调节水体 pH 值的 NaHCO_3 溶解平衡, $\text{NaHCO}_3 = \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$ ^[16]; 但与刘丽贞等^[17]研究结果不同的是,水体 pH 值变化幅度并没有超过 1 个单位. 同时加入的藻华细胞中含有大量的氮磷物质,在其死亡分解后释放到水体中,造成了水体电导率升高^[18].

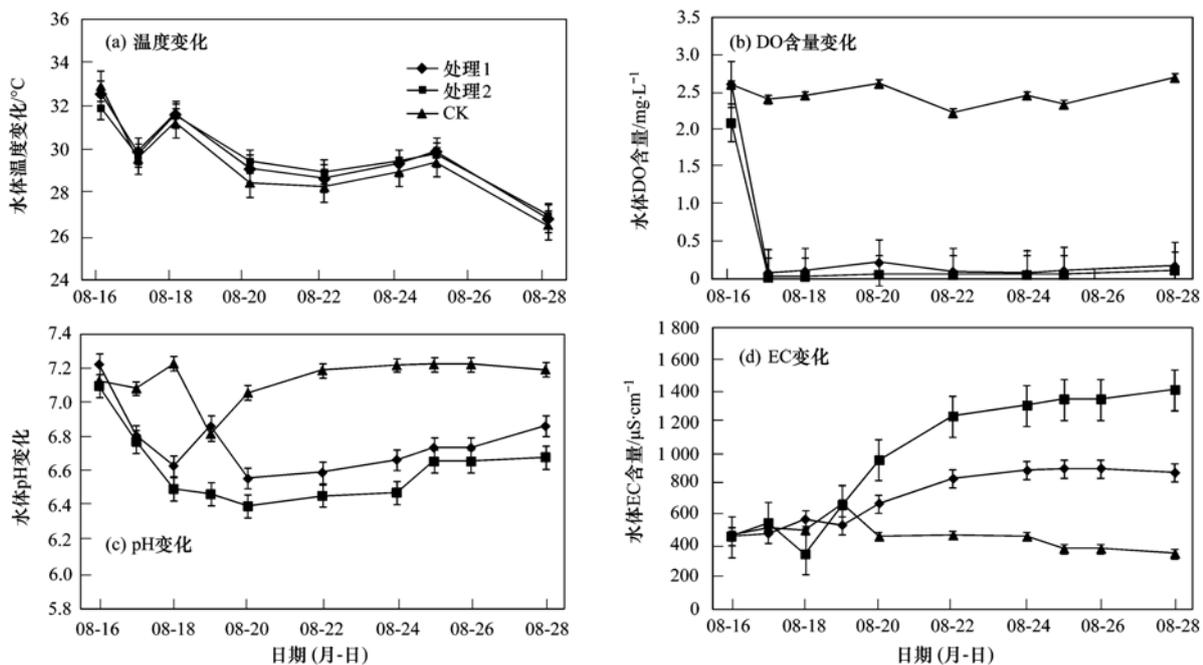


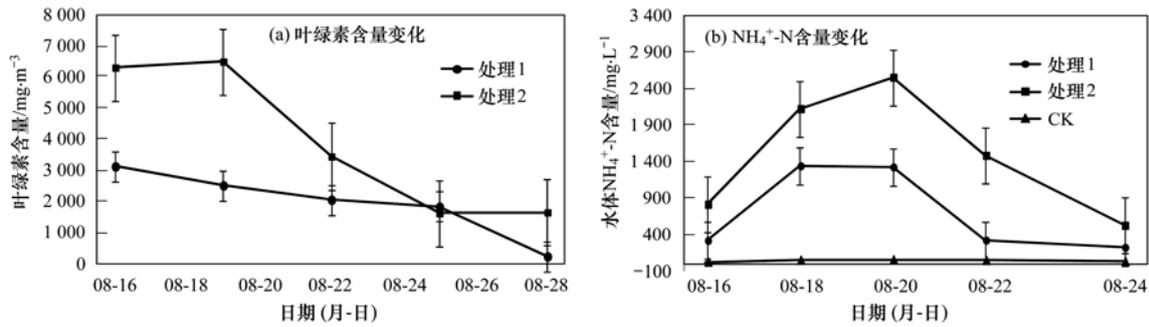
图 1 加入藻华细胞后上覆水体基本理化指标变化

Fig. 1 Changes of water basic physical and chemical indexes after injected algae cells

2.2 藻华聚集后水体 NH_4^+ -N 含量变化

藻华细胞聚集后,很快在高温影响下出现死亡、分解(图 2),处理 1、2 中水体叶绿素含量在实验结束时仅为初始值的 7%、26% (对照实验组中没有检测出叶绿素含量,因此在图中未显示),表现出在高温影响下,藻细胞快速死亡现象;而处理 2 中因初始添加量较高,基数较大,出现实验结束时含量仍较高的现象. 藻细胞死亡后腐解的大量细胞内含物

会释放到水体中,造成水体 NH_4^+ -N 含量出现快速增加现象^[19]. 在本实验中,处理 1、处理 2 中根区 NH_4^+ -N 含量在实验进行 3 d 后,其含量分别高达 $15.90\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $21.18\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 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. 快速死亡、腐解的藻细胞导致水体呈现强还原、缺氧环境,藻细胞死亡后释放大量的 NH_4^+ -N 于水体中,对植物根系产生毒害作

图2 水体中叶绿素和NH₄⁺-N含量变化Fig. 2 Concentration changes of Chl-a and NH₄⁺-N in overlying water

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。

2.3 蓝藻聚集后对植物光合作用的影响

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;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^[20]。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^[21]。在藻华细胞加入到水葫芦生长的水体2 d后,水葫芦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3(a)],尤其是在处理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的更为明显,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,部分水葫芦开始死亡,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 $60 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理组1中,其光合能力呈现出先下降、后又增加的变化趋势,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;这可从胞间CO₂浓度变化数值得到验证[图3(b)]。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。

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 $0.8208 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $0.8348 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 降低为

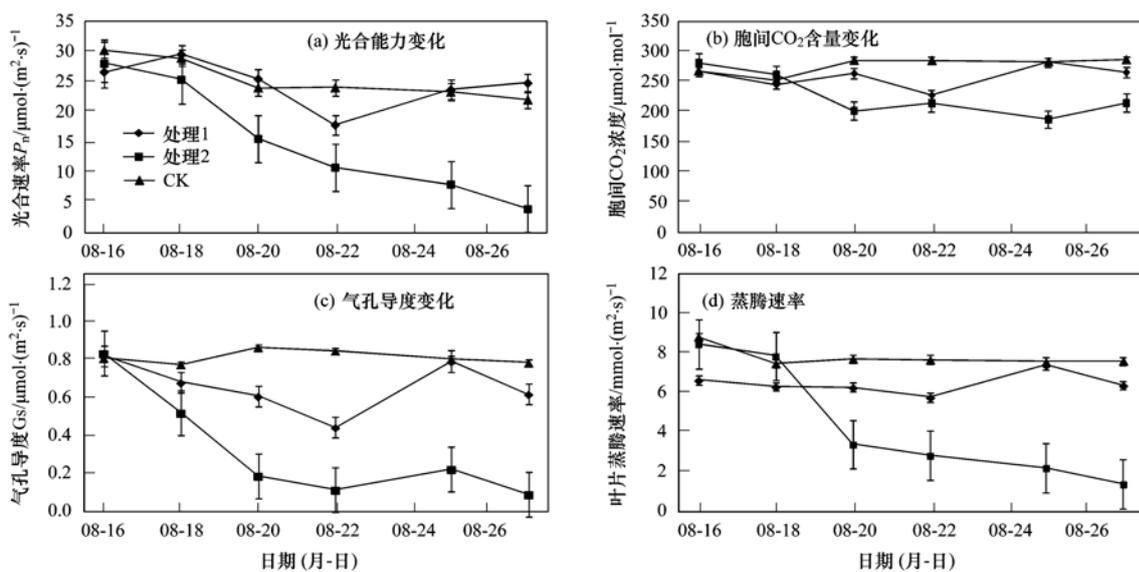


图3 藻华细胞聚集对叶片光合作用变化的影响

Fig. 3 Changes of leaf photosynthesis after algae bloom cells gathered

$0.6805 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $0.5195 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 同期对照组中为 $0.7764 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 表现出藻细胞聚集越严重, 其对植物的胁迫作用越明显[图 3(c)]. 实验继续到第 5d 时, 处理 2 中叶片的气孔导度急剧下降, 为 $0.1859 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 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[图 2(b)、2(d)].

胞间 CO_2 浓度(c_i)是光合生理生态研究中经常用到的一个参数, 特别是在光合作用的气孔限制分析中, c_i (细胞间的 CO_2 的浓度)的变化方向是确定光合速率变化的主要原因和是否为气孔因素的必不可少的判断依据^[22]. 藻华细胞聚集后, 因溶氧消耗、高温作用引起藻细胞的快速死亡(图 1), 加重了水葫芦根区水环境的恶化, 加剧了对植物的胁迫作用, 植物气孔关闭[图 3(b)]. 在本研究中可以发现, 叶片气孔导度、胞间 CO_2 含量与叶片净光合速率呈正相关关系. 这种正相关说明, 光合速率的降低是气孔导度降低引起的 c_i 降低的结果, 所以叶片光合速率的降低应当主要归因于气孔因素, 而不是非气孔因素^[23]. 这也表明在藻华细胞聚集后产生的胁迫作用下, 植物叶片的气孔关闭后, 植物体内部仍在进行光合作用, 会消耗掉细胞内的 CO_2 , 因此而导致叶片胞间 CO_2 含量降低.

2.4 藻华细胞聚集后对叶片温度变化的影响

在一定范围内较高温度作用下, 植物叶片随气温增加, 光合作用变强; 同时, 较高的气温作用下, 植物会出现叶片温度升高现象, 导致气孔关闭, 光合作用可利用的光合底物 CO_2 减少而积累较高水平的活性氧, 造成 P_n 降低[图 3(a)]; 在本实验中, 处理组中叶片的温度明显高于对照组, 且高于外界气温(图 4). 出现这种现象, 除了上文讲到的因阳光照射、外界气温影响等因素外, 还有可能水葫芦较短的根茎, 通过蒸腾作用输送水分并带走部分热量的通道也较短^[24]; 在藻细胞聚集后对植物形成胁

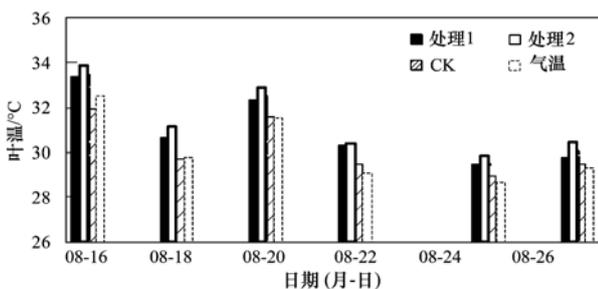


图 4 藻华细胞聚集后叶温变化

Fig. 4 Changes of leaf temperature after algae cells gathered

迫, 植物体内产生了大量还原性物质积累在植物叶片处, 热量无法有效的排散而致使叶温升高. 但其深层叶片升温异常的深层原因仍有待深入研究.

3 讨论

受水体营养盐过度积累作用, 蓝藻水华的暴发已不受水体营养盐的限制^[25], 每年发生的水华现象、尤其是在高温作用下的快速死亡、以至形成湖泛现象^[26], 对湖泊等水体的影响产生了质的变化. 而在以水生植物进行水体治理的生态修复过程中, 不可避免地要面对蓝藻水华问题. 在本实验中, 水华快速聚集后在 2 h 内就会消耗掉水体溶氧(图 5), 同时, 在高温作用下, 藻华细胞会出现快速死亡、分解, 反过来加剧了水体缺氧现象, 造成水体呈现缺氧、还原的环境条件[图 1(b)], 对水葫芦产生了严重的环境胁迫作用, 导致水葫芦气孔导度、蒸腾速率下降, 从而使得水葫芦的光合作用能力下降. 已有实验结果表明, 植物在外界胁迫作用下, 会大大增强呼吸作用强度, 使得呼吸作用的电子传递速率提高, 导致植物体内积累的物质大量消耗, 加之环境条件的恶化, 从而加速了植物的死亡^[27].

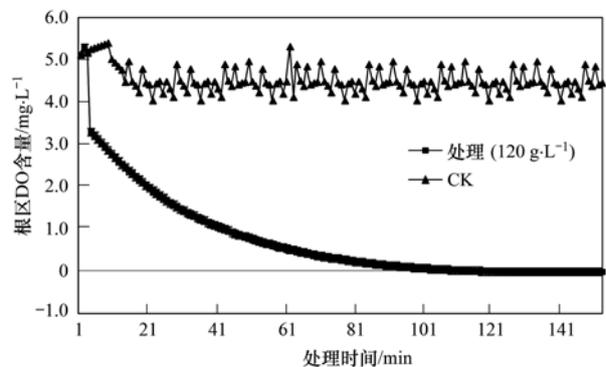


图 5 藻华聚集后根区 DO 含量变化

Fig. 5 Concentration changes of DO in root zone after algae cells gathered

刘丽贞等^[17]通过蓝藻腐解液对狐尾藻的影响研究, 结果表明蓝藻死亡腐解后产生的一系列化感物质与水体水质的剧变(如浊度增加、溶解氧降低等)的协同作用, 是致使沉水植物狐尾藻快速死亡的原因. 而在本实验中以漂浮植物为材料, 其根系在水体中, 叶片直接可从空气中呼吸 CO_2 , 其适应能力和抗胁迫能力较强, 虽然没有在 2 d 内出现植物死亡现象, 但从植物的光合作用效果来看, 仍出现了光合效果快速下降现象, 表明植物受到了严重的伤害. 通过研究藻华聚集对植物胁迫乃至造成植物死

亡的现象的发现具有重大生态意义。本研究表明藻华细胞大量聚集后,引起的水体缺氧、物质分解、还原性物质的产生而造成的水生态的恶化及藻华死亡后释放的细胞内含物,对植物产生了严重胁迫作用,从而导致植物无法抵消这种不良影响而死亡。因此,本研究结果可以让研究者从新的角度考虑,水体营养盐过量累积引起的蓝藻暴发导致水生植物消亡,其对水体中溶氧消耗、腐解液及造成的生态环境恶化对水生植物的生理变化起着极其重要的破坏作用。

因此,在当前太湖、滇池等重污染水体中开展的以控养水葫芦为代表的水生植物进行水体生态净化工程实践中,必须要考虑到在高温下受风向、湖流等作用下蓝藻水华的严重聚集造成的环境恶化,从而对水葫芦产生损伤作用,弱化了污染水体的生态净化功能和效率。如何减轻或避免水华蓝藻聚集乃至其引起的植物不可逆的伤害,充分发挥植物的生态修复和水体净化功能,是环境工作者需要进行考虑的一个问题。

4 结论

(1)藻华聚集后,会在 2 h 内消耗掉水体中溶解氧,并受高温影响会出现快速腐解现象,实验结束时处理 1、2 实验组水体叶绿素含量仅为初始含量的 7%、26%,水体 ORP 达 -200 mV、pH 比对照组低 0.7 个单位。

(2)藻细胞分解释放了大量细胞内含物于水体中,导致水体电导率 EC 比对照组高 2.76 倍,水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量高达 $32.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $51.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别为对照组根区水体的 54 倍和 84 倍,藻华聚集导致水体呈缺氧、强还原环境,造成水生植物生长的水环境严重恶化。

(3)藻华聚集对水葫芦产生了严重的环境胁迫,在实验结束时,处理 1、处理 2 实验组水葫芦的气孔导度、蒸腾速率仅为对照的 84%、18%;处理 1 基本恢复到正常状态,处理 2 中水葫芦受到不可逆的伤害,其光合作用能力仅为 $3.95 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,为同期对照组的 18%。表明因藻华聚集后溶氧消耗、高温作用及藻细胞分解释放的内含物等多重作用,对植物产生了不可逆的损伤,从而造成植物死亡。

(4)在较高温度(不低于 25°C)下,藻华聚集后 5 d 内即可对水葫芦造成不可逆的损伤,导致植物出现死亡,揭示了严重富营养化水体中蓝藻严重聚

集造成的环境恶化是植物消亡的一个重要机制。

参考文献:

- [1] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, **58**(10): 855-864.
- [2] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [3] Lucie G. Doing battle with the green monster of Taihu Lake [J]. Science, 2007, **317**(5842): 1166.
- [4] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: II. 内源氮释放控制作用 [J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 335-344.
- [5] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: I. 内源磷释放控制作用 [J]. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 84-93.
- [6] 贾锁宝, 尤迎华, 王嵘. 引江济太对不同水域氮磷浓度的影响 [J]. 水资源保护, 2008, **24**(3): 53-56.
- [7] 陈荷生. 太湖生态修复治理工程 [J]. 长江流域资源与环境, 2001, **10**(2): 173-178.
- [8] 张文明, 王晓燕. 水葫芦在水生态修复中的研究进展 [J]. 江苏环境科技, 2007, **20**(1): 55-58.
- [9] Imaoka T, Teranishi S. Rates of nutrient uptake and growth of the water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (mart.) Solms] [J]. Water Research, 1988, **22**(8): 943-951.
- [10] 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.
- [11] 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 等. 蓝藻水华聚集对漂浮植物水葫芦生理生态的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 114-120.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉, 等. 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.
- [15] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析 [J]. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1561.
- [16] 黄钰铃, 纪道斌, 陈明曦, 等. 水体 pH 值对蓝藻水华生消的影响 [J]. 人民长江, 2008, **39**(2): 63-65.
- [17] 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.
- [18] 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响 [J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 16-20.
- [19] 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.
- [20] 张娟, 姜闯道, 平吉成. 盐胁迫对植物光合作用影响的研究进展 [J]. 农业科学研究, 2008, **29**(3): 74-80.
- [21] Kitajima K, Mulkey S S, Wright S. Decline of photosynthetic capacity with leaf age in relation to leaf longevities for five tropical

- canopy tree species[J]. *American Journal of Botany*, 1997, **84**(5): 702-708.
- [22] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. *植物生理学通讯*, 1997, **33**(4): 241-244.
- [23] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. *植物生理学通讯*, 2010, **46**(1): 64-66.
- [24] 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.
- [25] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy [J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [26] 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.
- [27] 张其德. 盐胁迫对植物及其光合作用的影响(中)[J]. *植物杂志*, 2000, **2**(1): 28-29.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前本刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shevanelia oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smeectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人