

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振标 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响

贡丹丹^{1,2}, 刘德富^{1,2*}, 张佳磊², 杨正健², 朱晓明³, 谭纤茹²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 3. 三峡大学科技学院, 宜昌 443002)

摘要: 为了研究水库生境扰动对藻类水华的作用机制, 以中度扰动理论为基础, 结合藻类群落生境选择学说和藻类生态功能组, 开展了不同温度扰动周期、相同扰动幅度下藻类多样性变化特性和群落结构演替特征的室内控制实验。结果表明: ①适度的扰动会促进藻类的生长且增加其多样性。中度扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{h}$ 藻类生物量最大, 但多样性最高, 不存在绝对占优藻种, 而高频次扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 生物多样性较小, 但可降低藻类生物量。②温度的周期性变化对浮游藻类群落的演替有明显的影响, 优势种也呈现一定的差异性。藻类优势功能组演替基本规律为: X_1 (小球藻) \rightarrow J (栅藻) \rightarrow S_1 (席藻) 或 X_2 (衣藻), 群落结构呈现出 C/CR 型藻类先行占优向 R 型演替的趋势。高温扰动频繁时, R 型藻类 (S_1) 明显占优; 无扰动或低扰动时, 群落结构组成特点以 C/R 策略为主。适度的扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{h}$ 形成了多种生长策略的藻类共存的格局, 且耐受高温胁迫的 S 策略藻类 (L_0) 开始出现。

关键词: 温度扰动; 周期性变化; 藻类群落结构; 生态功能组; 演替特征

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2149-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.018

Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure

GONG Dan-dan^{1,2}, LIU De-fu^{1,2*}, ZHANG Jia-lei², YANG Zheng-jian², ZHU Xiao-ming³, TAN Qian-ru²

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, School of Civil Architecture and Environmental Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. College of Science and Technology of China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to study the mechanism of the habitat disturbance of reservoir on algae blooms, some interior control experiments about the feature of algal diversity and the succession of community structure under different temperature disturbance cycle but the same amplitude condition were conducted, based on the intermediate disturbance hypothesis and combined with algal community habitat selection theory and ecological functional groups of algae. The results showed that: ①the intermediate disturbance would accelerate the growth of algae and increase their diversity. Under the gradient of the intermediate disturbance group $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{h}$, the diversity of phytoplankton was the highest, and the biomass reached the maximum, however, without absolute dominant algal species. While in the high frequency disturbance group $\Delta 22^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ the biodiversity was relatively lower, but the algae biomass was reduced. ②the periodical change of temperature had obvious influence on the succession of the phytoplankton community, and the dominant species also presented certain differences. The succession of the algal advantageous function group followed the basic rule of X_1 (*Chlorella*) \rightarrow J (*Scenedesmus*) \rightarrow S_1 (*Phormidium*) or X_2 (*Chlamydomonas*), and the community structure also presented a trend that the C/CR type algae took advantage and the superiority was gradually replaced by R type algae. When the high temperature disturbance was frequent, the R type algae (S_1) was distinctly ascendant. During the experiment, the community structure was given priority to the C/R strategy algae with no or low disturbance. However, the coexistence of algae with different growth strategies was evident in group $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{h}$. Meanwhile, the S strategy algae (L_0) resistant to high temperature stress began to emerge.

Key words: temperature disturbance; periodic variation; structure of algae community; ecological functional groups; succession characteristics

水华是指水体中优势藻类在群落演替过程中占表层为肉眼所见过程^[1]。水华的发生将导致水体优并迅速生长, 积累一定的生物量上浮聚集到水体透明度下降, 溶解氧降低, 造成水质恶化, 从而破坏

收稿日期: 2015-09-28; 修订日期: 2016-01-15

基金项目: 国际科技合作与交流专项(2014DFE70070); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2014CB460601); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51209190, 51509086); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-006-001); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2013-12)

作者简介: 贡丹丹(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工学, E-mail: ctgugd@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dfliu@189.cn

水体生态系统功能。自 2003 年蓄水以来,三峡水库支流水华暴发频次高,涉及范围广,已有不少国内学者从光照^[2]、水温^[3,4]等环境条件,氮、磷等营养条件^[5]以及水动力条件^[6]对支流水环境问题展开研究,普遍认为水动力条件的改变是支流水华暴发的主要诱导因子^[7]。

实际上,藻类水华是某种“有害”藻类疯长形成绝对优势的现象,其本质是浮游植物生物多样性的降低导致生态严重失衡^[8]。Connell^[9]在 1978 年提出的“中度扰动理论”,即中等程度的干扰能维持高多样性。这一论述为抑制绝对优势种水华,维持浮游植物种类多样性提供了理论支撑。藻类多样性是藻类种群生态结构的重要特征,其变化特性反映藻类种群对生境条件改变的生态响应^[10]。在特定时间下,扰动影响着资源在生境中的分布状况,从而改变优势藻种及物种多样性^[11]。

Reynolds^[12]的生境选择学说与后来发展的藻类生态功能分组是近 20 年藻类群落生态学研究的重要理论成果。生境选择学说^[12]总结藻类自身生理生长特点(预适应性)和生态功能特性(生长策略),合理阐释藻类的栖息环境特点及其变化的环境机制。Reynolds 从藻类生境能量、物质供给梯度变化与扰动程度两方面,完善了藻类生长策略及其环境适应机制。3 种生长策略具体如下^[13]: ①C 型竞争者:在充足物质、能量供给条件下,能够迅速吸收利用营养快速繁殖,在竞争中获得优势;②R 型冗余者:耐受干扰,能在短时间内将资源转化为自身生物量;③S 型胁迫耐受者:在物质短缺条件下,有效地调整需求应对有限的资源,对资源获取能力很强。在 C-R-S 框架下,生境的能量、物质特征同藻类生长策略实现了初步的匹配。Reynolds 进一步对藻类生长策略进行了细化,提出藻类生态功能组概念。藻类功能分组^[13]以藻类形态、生理特性及其环境适应性机制为基础,对具有相似适应性的藻种进行归类分组,形成具有特定生态属性的功能集群,更合理地揭示生境变化对藻类集群的选择机制和藻类群落的动态演变过程。各主要藻类功能组在物质、能量梯度变化下的分布情况如图 1 所示。

温度不仅影响藻类的季节性演替,而且直接影响藻类在水体中的时空分布和组成变化^[14]。本课题拟通过室内模拟控制实验,基于中度扰动理论研究了不同温度扰动周期、相同扰动幅度下藻类多样性变化特性和群落结构特征,试图从藻类自身对环境的适应及调节方面来探讨水华暴发的关键过程,

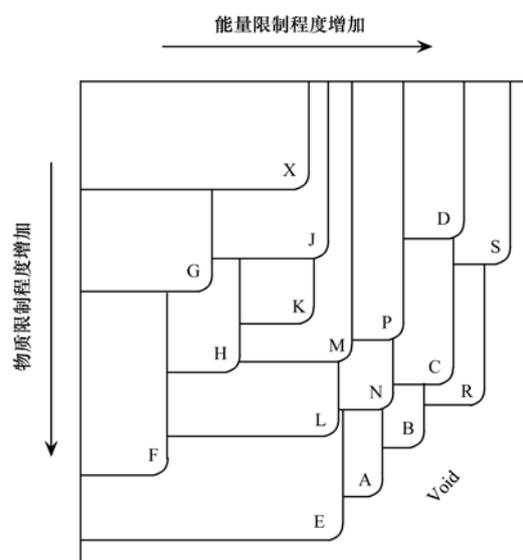


图 1 主要功能组随能量、物质梯度变化的分布^[12]

Fig. 1 Distribution of functional groups along the gradients of energy and nutrients

并以此为出发点,从维持浮游植物多样性角度入手,进一步论证以通过水位波动促进环境因子的适度扰动来实现藻类共存为机制^[15]的水华应急调度方案的有效性和可行性。前期水华研究主要关注藻类生物量与相关环境因子的关系,而本研究从藻类群落动态变化过程(包括藻类生物量和群落结构)关注其与温度扰动的关系,并验证利用中度扰动理论来进行调度的可行性。

1 材料与方法

1.1 藻种来源

小球藻为购自中科院水生生物研究所的蛋白核小球藻,混合藻种取自于湖北工业大学巡司河原水,采用 BG-11 培养基进行扩大培养。实验前,取上述扩大培养后的藻液,在 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 10 min,弃去上清液,用 $15\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液洗涤藻细胞 2~3 次,除去附着在藻细胞上的营养盐,得到实验用藻(有小球藻、多棘鼓藻、栅藻、隐藻、小环藻和极少量的十字藻)。

1.2 实验装置

水温用可调式绝缘电热棒控制,精确度为 $\pm 1^\circ\text{C}$;光照系统采用日光灯组连续提供,确保平均光强分布均匀且稳定在 $(4\ 500 \pm 150)\ \text{lx}$,此生长条件与三峡库区典型藻类生长的最适宜光照条件相适应^[16]。

实验装置如图 2 所示,将外径为 60 mm、内径 55 mm、高 90 cm 的圆底玻璃管,置于 $40\ \text{cm} \times 25\ \text{cm} \times 60\ \text{cm}$ (长 \times 宽 \times 高)的有机玻璃箱中,采用水浴

加热,并在水箱中放入微型水泵,用以扰动水体,使之受热均匀. 插入高度为 1 m、内径为 5 mm 的空心玻璃管,外接硅胶软管通过空气压缩机通入空气;进气前端设有孔径为 0.2 μm 的空气过滤器用以除尘除菌,另设置空气开关用以控制进气量大小.

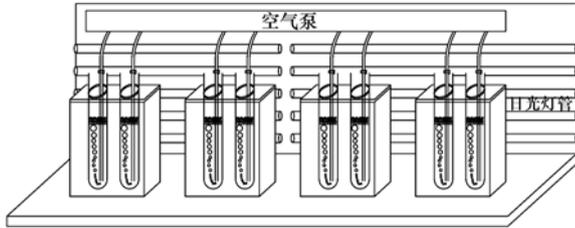


图 2 实验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device

1.3 实验方法

实验设置温度变化范围为 40 ~ 18 $^{\circ}\text{C}$,即扰动幅度为 $\Delta 22^{\circ}\text{C}$,共设置 5 个周期变化梯度,分别记为 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ 、 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/36\text{ h}$ 、 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 、 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/60\text{ h}$ 和 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$;每个梯度均设置两个平行样. 实验过程中温度变化稳定,与设定值的最大温差为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,如图 3 所示.

监测时段为 2014-12-18 ~ 2014-12-27,采样频次为每天 1 次. 初始时向培养液中投入一定量的混合均匀藻种,培养液中 DTN 浓度为 4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DTP 浓度为 0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其余成分与 BG-11 培养基相同,满足藻类生长所需的氮、磷营养阈值. 每天采用即时滴灌的方法补充高浓度培养液,以保证圆底玻璃管中培养液 DTN、DTP 的浓度相差在 10% 左右;24 h 不间断曝气,促进营养物质循环,尽量避免藻类沉降,曝气高度为 6 cm.

1.4 测定指标及方法

实验开始后,每天上午 09:30 左右取样. 光照强度和水体温度分别用 TES-1339 照度计(台湾泰仕)和玻璃棒煤油温度计(河北光华)测定,DTN、DTP 和叶绿素 a 浓度利用 UV-1700 紫外分光光度计(上海美析)进行分析测定,藻密度利用 Algacount S300 藻类智能鉴定计数仪(杭州迅数)进行鉴定和计数.

其中,将水样经直径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,参照文献[17]测定 DTN 和 DTP. 叶绿素 a 浓度以丙酮萃取提法测定. 藻类根据文献[18]进行鉴定,藻种统计至属即可完全反映藻类群落特征及演替过程,因此本研究藻类鉴定数据统计到属^[19]. 通过查阅 Reynolds 等^[20]、Padisák 等^[21]研究的结果对所检出的藻种(属)进行功能组分类.

淡水水体中藻类世代周期一般为 3 ~ 4 d ^[22],而在

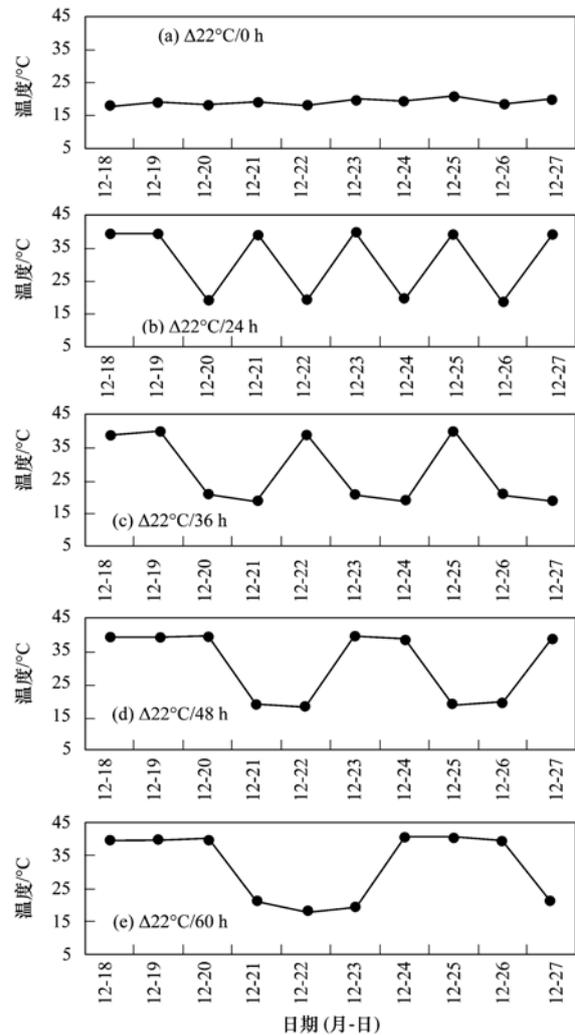


图 3 不同扰动周期下水温分布特性

Fig. 3 Water temperature distribution characteristics under different disturbance cycle

中等扰动假设下的实验研究中,3 ~ 4 倍于藻类世代周期(10 ~ 15 d)是外部扰动对藻类群落演替与物种多样性影响较为显著的时期^[13,23]. 因此本研究中藻类鉴定时间间隔为每 3 天 1 次,且着重分析了第 10 d(即 2014-12-27)的藻类群落结构的多样性与演替特征.

1.5 数据处理

1.5.1 比增长率

绝大多数藻类种群增长符合指数增长模型:

$$N_t = N_0 e^{\mu t}$$

式中, N_t 是 t 时刻藻类生物量; N_0 是初始藻类生物量,本研究选择叶绿素 a 作为藻类生物量估算的测量指标, μ 为比增长率. 比增长率的极大值 μ_{\max} 是在一定条件下藻类潜在增长率的最高表现,也就是最佳生态位的条件^[24]. 则:

$$\mu_{\max} = \ln(X_t/X_0)/t$$

式中, μ_{\max} 为比增长率的极大值(d^{-1}); X_t 为叶绿素 a

峰值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); X_0 为对数期初始时叶绿素 a 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); t 为从对数期开始时到峰值的时间(d).

1.5.2 多样性指数

常用的多样性指数^[25~28]有 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数. Margalef 指数主要反映群落物种的丰富度,浮游植物种类愈多, S 越大. Shannon-Wiener 指数反映群落结构的复杂程度,是衡量种类数和均匀度的综合指标. Simpson 指数表示随机取样的两个个体属于不同种的概率,则 D 越高,群落丰富度越高. Pielou 均匀度指数反映群落中个体的分布均匀性. J 值越大,则多样性越高.

(1) Margalef 丰富度指数(S)

$$d_{\text{Mca}} = (S - 1) / \ln N$$

(2) Shannon-Wiener 指数(H)

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

(3) Simpson 指数(D)

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

(4) Pielou 均匀度指数(J)

$$J = H / H_{\text{max}} = H / \ln S$$

式中, S 为群落中物种总数, $P_i = N_i / N$; N_i 为第 i 种藻的个数, N 为观察到的总个数.

2 结果与分析

2.1 藻类的生物量和比增长率的分析

叶绿素 a (Chl-a) 是植物光合作用中的重要光合色素,常作为度量藻类生物量的指标. 图 4 中显示了藻类生长中比较明显的3个阶段:迟滞期、对

数期和稳定期,且在稳定期时藻类生物量达到最大. 实验期间,扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 、 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 的水体中藻类均在第 5 d 开始迅速繁殖,而对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 和扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 也分别在第 4 d 和第 6 d 进入对数生长期,藻类生物量剧增. 不同周期的扰动组的 $\rho(\text{Chl-a})$ 先后达到最大值,且扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 的 $\rho(\text{Chl-a})$ 增加最快,且始终高于其它组的 $\rho(\text{Chl-a})$. 至实验结束,各组的 $\rho(\text{Chl-a})$ 从大到小依次为: $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$.

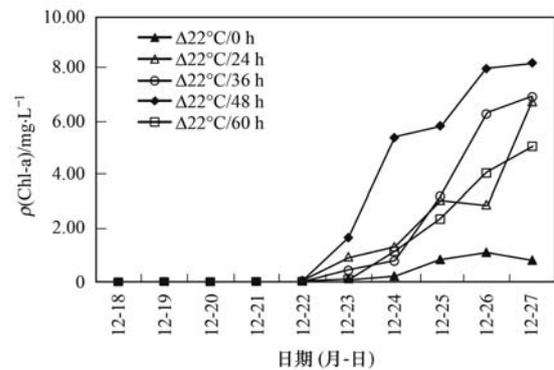


图 4 不同扰动周期下叶绿素 a 的变化特性

Fig. 4 Characteristics for concentration change of chlorophyll a under different disturbance cycle

比增长率是指在某一时间间隔内藻类的生长速率. 从表 1 可以看出,扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 的藻类生长速率最快, $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 次之,而 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 生长最为缓慢. 其余扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 的增长速率相差较小. 所以温度扰动的周期过长或者过短,都会影响藻类的生长,而适度的扰动会促进藻类的生长.

表 1 不同扰动周期下的最大比增长率

Table 1 Maximum specific growth rate under different disturbance cycle

实验组别	$\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$	$\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$	$\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$	$\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$	$\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$
最大比增长率 $\mu_{\text{max}}/\text{d}^{-1}$	0.915	1.013	0.972	1.094	0.964

2.2 浮游植物的群落结构特征

经形态鉴定,实验期间浮游植物共检出藻种 5 门 15 属. 其中种类最为丰富的是绿藻门 (Chlorophyta) 8 属,其次是硅藻门 (Bacillariophyta) 3 属,蓝藻门 (Cyanophyta) 2 属,裸藻门 (Euglenophyta) 和隐藻门 (Cryptophyta) 各 1 属.

温度的周期性变化对浮游藻类群落的演替有明显的影 响,不同扰动组的优势种也随之呈现一定的差异性. 初始时的浮游植物群落结构由绿藻、隐藻和硅藻组成,其中各藻属所占百分比为:小球藻

(59.21%)、多棘鼓藻 (19.55%)、栅藻 (7.93%)、十字藻 (0.57%)、隐藻 (7.37%) 和小环藻 (5.38%),而小球藻为绝对优势藻种. 藻类达到生长稳定期时 (图 5),对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 的浮游植物均为绿藻门,以衣藻、多棘鼓藻和栅藻为主,而扰动组也呈现出多棘鼓藻、席藻和弓形藻共存的群落结构. 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 、 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 均由绿藻、蓝藻和硅藻组成,但主要优势种明显不同,其中 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 分别为席藻和衣藻,次优势藻种分别为多棘鼓藻、弓形藻和席藻,

而扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/36\text{ h}$ 主要由多棘鼓藻、席藻和弓形藻组成。扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 的群落结构较为复杂,由绿藻、蓝藻、硅藻、裸藻和隐藻组成,其中席藻占优,栅藻、色球藻次之,较其他扰动组而言,新增新月藻、色球藻、桥弯藻、隐藻和裸藻。

不同扰动周期下,尤以衣藻、多棘鼓藻、栅藻、小球藻、弓形藻和席藻共存的群落结构为主,其中席藻明显增多,相对占优,优势种地位随着扰动周期的增加逐渐体现出来。而对照组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$ 的藻类组成较少,含量较均匀,且同属于绿藻门。这是因为

蓝藻耐高温,绿藻适宜生长的温度范围较广。多棘鼓藻在扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ 和 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/36\text{ h}$ 中含量较高,生长状态良好。衣藻的适宜生长温度在 $18\sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间,因而衣藻在扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/60\text{ h}$ 和对照组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$ 即相对稳定的高低温环境中更具竞争力。相比于对照组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$,扰动组中新增了弓形藻,且含量相对较高,在高温扰动时表现其优势,同时喜高温的小环藻也相应出现。栅藻在对照组中含量高于其余组,较适合低温培养。其中,扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 的藻类组成较为丰富,多样性较高,无绝对占优藻种,有利于该环境下的生态平衡。

在演替的中后期,实验各组的 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数变化趋势大致相同,在扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 中多样性指数值最高,而在 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$ 中最低。各梯度下 Pielou 均匀度指数无明显变化规律,分布相对均匀。综上可知,各组藻类多样性的大小依次为: $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h} > \Delta 22^{\circ}\text{C}/36\text{ h} > \Delta 22^{\circ}\text{C}/60\text{ h} > \Delta 22^{\circ}\text{C}/24\text{ h} > \Delta 22^{\circ}\text{C}/0\text{ h}$ 。结合图 4 和图 6 可以看出 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 梯度下,藻类多样性最高,生物量也最大;但不存在单一藻种绝对占优的情况,故认为 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 梯度为本实验中最适合的温度扰动周期组。

2.3 浮游植物的群落演替过程

根据 Reynolds 等^[20] 及 Padisák 等^[21] 的后续补充完善,对实验期间出现的藻属进行功能分组,归纳出 12 个生态功能组,分别为: B、F、J、L₀、N、P、S₁、T_B、W₁、X₁、X₂、Y。其中 B、J、N、S₁、X₁、X₂、Y 等较为常见,出现频率较高,而 F、T_B、W₁ 在实验期间不同组别中较少出现。藻类生态功能群的代表性藻种及其 C-R-S 生长策略具体参见表 2。

表 2 藻类生态功能群的代表性藻种及其 C-R-S 生长策略^[20,21]

Table 2 Representative species (genera) of phytoplankton functional groups and their growth strategies

功能组	代表性藻种(属)	生存策略
X ₂	衣藻 <i>Chlamydomonas</i>	C
N	多棘鼓藻 <i>Xanthidium</i>	R
J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> 、十字藻 <i>Crucigenia</i>	CR/C
X ₁	小球藻 <i>Chlorella</i> 、弓形藻 <i>Schroeder</i>	C
P	新月藻 <i>Closterium</i>	R
S ₁	席藻 <i>Phormidium</i>	R
L ₀	色球藻 <i>Chroococcus</i>	S
B	小环藻 <i>Cyclotella</i>	CR
T _B	桥弯藻 <i>Cymbella</i> 、曲壳藻 <i>Achnanthes</i>	R
W ₁	裸藻 <i>Euglena</i>	R
Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i>	CRS
F	并联藻 <i>Quadrigula</i>	CS

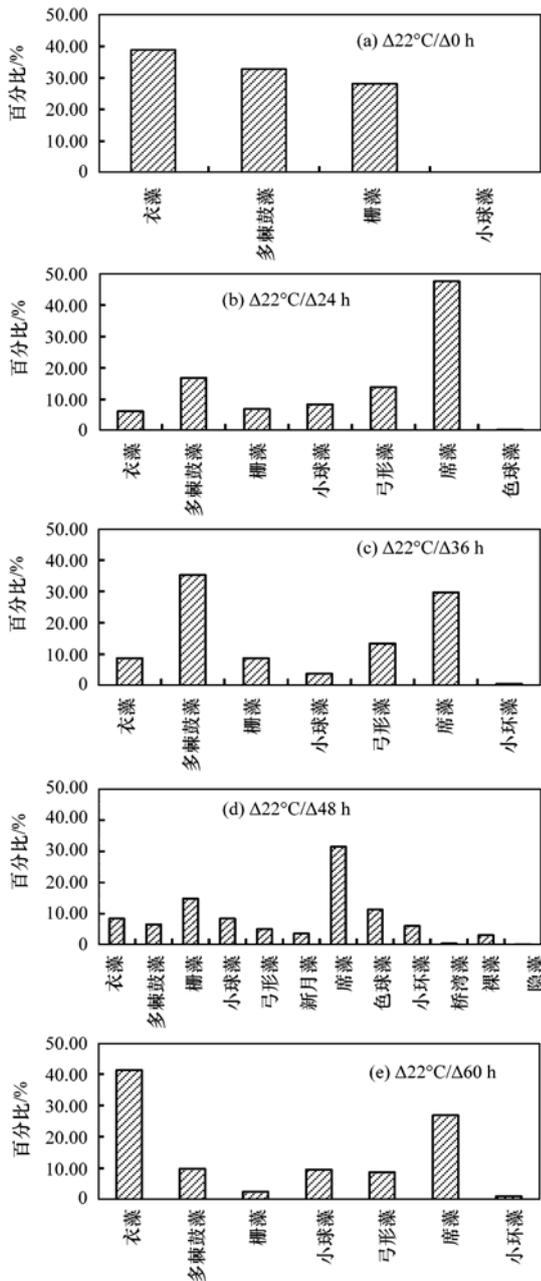


图 5 12 月 27 日不同扰动周期下浮游植物种类含量百分比
Fig. 5 Percentage of phytoplankton species under different disturbance cycle on Dec. 27th

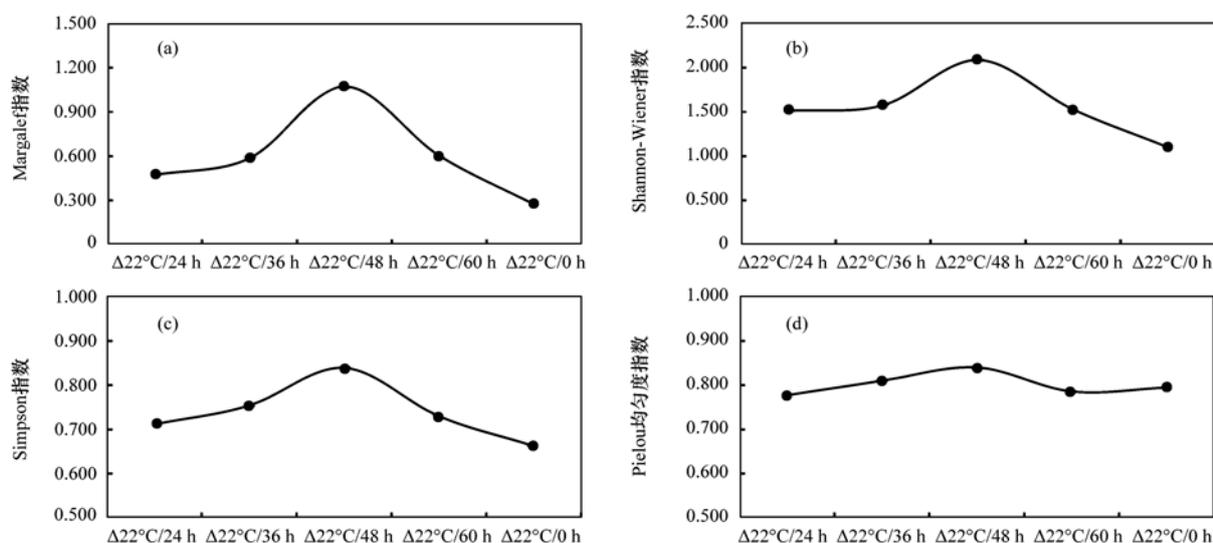


图6 12月27日不同扰动周期下浮游植物多样性分析

Fig. 6 Analysis of the phytoplankton diversity under different disturbance cycle on Dec. 27th

研究发现(表3),不同扰动周期下,藻类优势功能组演替规律基本为: X_1 (小球藻) \rightarrow J (栅藻) \rightarrow S_1 (席藻) 或 X_2 (衣藻). 初始时 X_1 组(小球藻)的相对丰度为 59.2%, 为绝对优势功能组. 在演替初期时, 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 中 J 组(栅藻)取代 X_1 组占据优势, 而扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 和对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 则分别以 $X_1/N/B/X_2/J$ 、 $J/T_B/X_1/X_2$ 为主要功能组. 在中期时, J 组(栅藻)逐渐成为主要优势功能组, 所占比重较大, 其中扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$ 中 J/S_1 相对丰度超过 80%. 至实验结束时, 即演替的中后期, 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 、 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 分别以 S_1 (席藻)、 S_1 (席藻)、 X_2 (衣藻) 为优势, 而扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$

和对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 分别形成了代表性功能组组合 $N/S_1/X_1$ 和 $X_2/N/J$.

在扰动发生后藻类演替的中后期, 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 形成了多种生长策略的藻类共存的格局, 耐受高温胁迫的 S 策略藻类开始出现. 对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 群落结构呈现 C/R/CR 策略为主的群落组成特点, 这是因为在较低温度下小球藻和栅藻生长迅速表现出竞争优势. 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$ 中, 出现的低温和高温环境相对稳定, 分别适合 C/R 策略藻类的生存. 而扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 和 $\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$ 由于生长环境相对频繁波动, 喜高温的席藻和耐干扰的多棘鼓藻能在短时间内将资源转化为自身生物量, 因此 R 策略藻类显著占优.

表3 实验期间藻类群落主要代表性生态功能组及生长策略的演替序列¹⁾

Table 3 Succession series of the main representative phytoplankton functional groups and growth strategies during the experiment

实验组别	日期(月-日)			
	12-18	12-21	12-24	12-27
$\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$	X_1/N	$J/X_1/S_1/N$	$J/N/X_1$	$S_1/X_1/N$
	C/R/CR	CR/C/R	CR/R/C	R/C
$\Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h}$	X_1/N	$X_1/J/B/N$	J/S_1	$N/S_1/X_1$
	C/R/CR	C/CR/R	R/CR	R/C
$\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$	X_1/N	$J/X_1/N$	$J/X_1/N$	$S_1/J/L_0/X_1$
	C/R/CR	CR/R/C	CR/R/C/S	R/C/CR/S
$\Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h}$	X_1/N	$X_1/N/B/X_2/J$	$J/X_2/X_1$	$X_2/S_1/X_1$
	C/R/CR	C/CR/R	CR/C	C/R
$\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$	X_1/N	$J/T_B/X_1/X_2$	J/X_2	$X_2/N/J$
	C/R/CR	CR/C/R	CR/C	C/R/CR

1) 功能组和生长策略序列按照相应的藻类数量所占比例降序排列, 且具有相应的代表性

3 讨论

3.1 温度周期性变化对藻类群落结构的演替规律 水温作为重要的生态因子, 通过影响藻类的酶

促反应和水中营养物质的溶解度从而直接、间接地影响藻类的代谢与增殖^[29]. 而不同的浮游藻类温度的适应范围有所不同. 硅藻在 $15 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间均可生长良好, 绿藻最适水温为 $20 \sim 30^\circ\text{C}$, 蓝藻为

25 ~ 35℃. Briand 等^[30] 在研究混合藻类的河流时发现, 温度 20℃ 时硅藻占优势; 30℃ 时绿藻占优势; 35 ~ 40℃ 时蓝藻占优.

在自然水体中, 水温的变化具有一定的周期性, 会呈现昼夜变化和季节变动. 杜晓明等^[31] 研究发现水体增温对藻类生长的影响程度与水温及温度增幅有关, 对浮游藻类的种类组成也产生影响, 可引起水体的优势藻种发生更替. 也有研究表明^[32,33], 温度变化在蓝藻水华形成的过程中发挥着重要作用, 而且其作用可能大于平均温度的升高.

室内实验初始添加的藻液是以绿藻为绝对优势的混合藻种, 设置的温度扰动范围为 40 ~ 18℃, 适合绿藻、蓝藻和硅藻的生长. 实验结束时绿藻出现了不同程度的优势度, 硅藻、裸藻和隐藻含量很少, 而蓝藻在高温扰动的情况下随着扰动周期的增加, 生物量逐渐增大, 可见温度对蓝藻的生长起着重要的催生作用, 因而蓝藻的优势确立是达到一定温度条件才形成的^[34].

Reynolds^[13] 总结了水体分层与浮游植物群落结构演替的规律, 提出了富营养深水分层湖泊藻类群落经典演替模式. 香溪河作为三峡库首第一大支流, 在水库调蓄和光热条件季节协同作用下, 浮游植物群落结构符合此演替模式^[35]. 库湾中春季主要以胁迫性藻种(S型)先行占优向杂生型藻种(R型)和竞争型藻种(C型)演替的趋势, 夏季与春季相反, 主要以竞争型藻种(C型)先行占优向杂生型藻种(R型)和胁迫性藻种(S型)演替的趋势, 秋季为多藻种混生的季节, 冬季以胁迫性藻种(S型)为主^[36].

本实验梯度的设置主要是为了拟合自然水体中水温的季节性变化, 尤其是藻类水华易暴发的春夏季温度的变化, 从而探究温度周期性扰动下浮游植物的生长规律和种群演替特征. 不同扰动周期下, 藻类功能组演替规律基本为: $X_1/N \rightarrow J/X_1/N$ 或 $J/X_2 \rightarrow S_1/X_1$ 或 X_2/S_1 或 $X_2/N/J$. 其中 S_1 在高温扰动组中表现出一定的优势度, 而在演替中后期, 耐干扰的 L_0 也相应出现. 从 C-R-S 生长策略来看, 群落结构整体呈现出 C/CR 型藻类先行占优向 R 型演替的趋势, 环境相对稳定时, 藻类以 C 型为主.

3.2 基于中度扰动理论防控支流水华的新思路

浮游植物领域中的生态学理论——中度扰动理论由 Connell 在 1978 年提出^[9], 并由 Reynolds 等^[37] 在 1993 年结合浮游植物悖论发展和应用的. 基本含义^[9] 是在特定的时间尺度, 当种群在中等强度及

频次的扰动下, 大部分藻类都能适宜生长, 不会形成绝对优势藻种. 何爱政等^[38] 通过原位围隔实验得出存在适中的扰动强度使得水体浮游藻类生物多样性水平最高; 李哲等^[39] 研究发现澎溪河回水区的蓄水前后所构建的藻类生境变化过程可能是藻类物种多样性改变的主要驱动因素.

三峡水库的运行管理对库区水环境产生短期的外在干扰, 水位波动能改变香溪河库湾水体的光照、营养以及相对稳定性^[40,41]. 郭劲松等^[42] 提出三峡水库水位波动可能是决定小江浮游植物种群结构四季变化的重要因素; 田泽斌等^[35] 认为三峡水库季节调蓄改变香溪河水温分层状态是诱使藻类群落演替和水华发生的关键; 彭成荣等^[43] 发现洪水调度可改变支流的藻类群落结构, 有助于抑制和延缓支流水华的发生.

根据“中度扰动理论”, 可以将三峡水库支流水华的防控划分为两个层次, 即当支流无显著水华时, 保证生境因子的适度变化以提高浮游植物多样性^[39], 实现藻类水华的预防; 当支流暴发藻类水华时, 加大三峡水库水位波动频次和幅度, 产生较强的环境扰动, 进而抑制藻类生物量^[44].

目前有关水库生态调度的研究尚处于定性论述及实践探索阶段^[45], 并没有完全上升到理论层面. 调蓄导致的水动力对生境因素的作用机制、生境对浮游植物及生态系统的影响尚不明确, 这将是后期从理论上研究水库生态调度改善水库生态环境的重点, 亦需对环境扰动的阈值进行更深入地研究^[46].

4 结论

(1) 不同温度扰动周期下, 扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 藻类生长速度最快, $\rho(\text{Chl-a})$ 达到最大, 且始终高于其它组. 对照组 $\Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$ 藻类生长较为缓慢, $\rho(\text{Chl-a})$ 最小. 实验结束时各梯度下 $\rho(\text{Chl-a})$ 大小顺序为: $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$.

(2) 结合多样性指数综合分析可知, 各组藻类多样性的大小依次为: $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/36\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/60\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h} > \Delta 22^\circ\text{C}/0\text{ h}$. $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 梯度下, 浮游植物多样性最高, 生物量达到最大, 但在该扰动环境中, 不存在绝对占优藻种. 高频次扰动组 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 多样性相对较小, 但藻类生物量相对较低. 因此在本实验中, $\Delta 22^\circ\text{C}/48\text{ h}$ 为最适温度扰动周期, 而 $\Delta 22^\circ\text{C}/24\text{ h}$ 作为高频次扰动组可以降低藻类生物量.

(3)不同的扰动组,优势种也呈现一定的差异性.藻类到达生长稳定期时,尤以衣藻、多棘鼓藻、栅藻、小球藻、弓形藻和席藻共存的群落结构为主,且蓝藻的优势种地位随着高温扰动周期的增加逐渐体现出来.

(4)温度的周期性变化对浮游藻类群落的演替有明显的影 响,群落结构呈现出 C/CR 型藻类先行占优向 R 型演替的趋势.无扰动或低扰动时,群落结构呈现 C/CR/R 策略为主的组成特点;生境波动频繁时,耐受干扰的 R 策略藻类明显占优.适度的扰动组 $\Delta 22^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ 形成了多种生长策略的藻类共存的格局,且耐受高温胁迫的 S 策略藻类开始出现.

(5)实验期间藻类群落分为 12 个生态功能组,其中 B、J、N、S₁、X₁、X₂、Y 等较为常见,占较大比重,且为主要代表性功能组,而 F、T_B、W₁ 较少出现.不同扰动周期下,藻类优势功能组演替基本规律为: X₁(小球藻)→J(栅藻)→S₁(席藻)或 X₂(衣藻).

参考文献:

- [1] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [2] 张佳磊, 郑丙辉, 熊超军, 等. 三峡大宁河水体光学特征及其对藻类生物量的影响[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 492-497.
- [3] Xu Y Y, Cai Q H, Ye L, *et al.* Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a spatial heterogeneity bay of Three-Gorges Reservoir, China [J]. *Limnologia- Ecology and Management of Inland Waters*, 2011, **41**(3): 174-180.
- [4] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [5] 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [6] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010, **41**(6): 691-696, 702.
- [7] 曾辉, 宋立荣, 于志刚, 等. 三峡水库“水华”成因初探[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(3): 336-339.
- [8] 王浩. 湖泊流域水环境污染治理的创新思路与关键对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. *Science*, 1978, **199**(4335): 1302-1310.
- [10] Gao X L, Song J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(3): 327-335.
- [11] Sousa W P. Disturbance in marine intertidal boulder fields: the nonequilibrium maintenance of species diversity[J]. *Ecology*, 1979, **60**(6): 1225-1239.
- [12] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369-370**: 11-26.
- [13] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [14] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季浮游植物演替规律及其原因[J]. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(2): 234-240.
- [15] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [16] 龙天渝, 周鹏瑞, 吴磊. 环境因子对香溪河春季藻类生长影响的模拟实验[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 327-331.
- [17] 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.
- [18] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] Hubble D S, Harper D M. Phytoplankton community structure and succession in the water column of Lake Naivasha, Kenya: a shallow tropical lake[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **488**(1-3): 89-98.
- [20] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [21] Padišák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [22] Reynolds C S. Scales of disturbance and their role in plankton ecology[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1-3): 157-171.
- [23] Grover J P, Chrzanowski T H. Limiting resources, disturbance, and diversity in phytoplankton communities [J]. *Ecological Monographs*, 2004, **74**(3): 533-551.
- [24] 陈德辉, 章宗涉, 陈坚. 藻类批量培养中的比增长率最大值[J]. 水生生物学报, 1998, **22**(1): 26-32.
- [25] Margalef D R. Information theory in ecology [J]. *General Systems*, 1958, **3**: 36-71.
- [26] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [27] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [28] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(4): 231-239.
- [29] Zhang M, Duan H T, Shi X L, *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change [J]. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452.
- [30] Briand J F, Robillot C, Quiblier-Llobéras C, *et al.* Environmental context of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) blooms in a shallow pond in France[J]. *Water Research*, 2002, **36**(13): 3183-3192.
- [31] 杜晓明, 刘厚田, 沈英娃, 等. 水体增温对浮游植物群落结

- 构及其生态学特性影响的研究[J]. 环境科学研究, 1992, **5**(3): 35-41.
- [32] Jöhnk K D, Huisman J, Sharples J, *et al.* Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(3): 495-512.
- [33] 覃宝利, 扬州, 张民. 温度波动对浮游藻类生长及多糖组成的影响[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 432-440.
- [34] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 2083-2089.
- [35] 田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(5): 700-707.
- [36] 姚绪姣. 三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构演替规律研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
- [37] Reynolds C S, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: a synthesis [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1-3): 183-188.
- [38] 何爱政, 刘德富, 杨正健, 等. 不同扰动强度对浮游藻类群落结构演替的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(5): 53-58, 77.
- [39] 李哲, 王胜, 郭劲松, 等. 三峡水库 156 m 蓄水前后彭溪河回水区藻类多样性变化特征[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 227-231.
- [40] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay [J]. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(2): 197-212.
- [41] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* An eco-environmental friendly operation: an effective method to mitigate the harmful blooms in the tributary bays of Three Gorges Reservoir [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, **56**(6): 1458-1470.
- [42] 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.
- [43] 彭成荣, 陈磊, 毕永红, 等. 三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1863-1871.
- [44] Valdespino-Castillo P M, Merino-Ibarra M, Jiménez-Contreras J, *et al.* Community metabolism in a deep (stratified) tropical reservoir during a period of high water-level fluctuations [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6505-6520.
- [45] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 169-177.
- [46] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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