

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素

张佳磊¹, 郑丙辉^{2*}, 刘德富¹, 王丽婧², 谭纤茹¹

(1. 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; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012)

摘要: 基于大宁河不同水文期(2012-04-27 ~ 2013-01-19)的监测数据, 运用数理统计分析手段, 探索三峡水库支流浮游植物不同水文期演替模式及其影响因素。结果表明: ①研究期间表层叶绿素浓度和藻类细胞密度最大值均出现在汛期, 依次是蓄水期、泄水期和高水位运行期。基于生态功能组原理, 不同水文期大宁河的浮游植物演替模式为: CR-R(高水位运行期)-CS(泄水期)-CR/CS(汛期)-R-CR(蓄水期)。②丰富度指数最大值出现在蓄水期, 最小值出现在高水位运行期和泄水期; 均匀度指数最大值出现在汛期, 最小值出现在高水位运行期和泄水期; 多样性指数最大值出现在汛期, 最小值出现在蓄水期; 演替速率最高值出现在蓄水期, 最低值出现在泄水期。③利用数理统计分析方法, 高水位运行期, 浮游植物生物量与生境参数并不存在显著的相关关系, 水动力参数(RSCW)和光热参数(E_t 和 E_f^*)是影响浮游植物群落结构的关键要素; 泄水期, E_t 和 E_f^* 均与浮游植物生物量呈显著正相关, 营养盐参数(TP)与浮游植物生物量呈显著负相关关系, 营养盐参数(TP)和光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 是影响浮游植物群落结构的关键要素; 汛期, 光热参数(E_f^*)与浮游植物生物量呈显著正相关, 营养盐参数(TP)与浮游植物生物量呈显著负相关关系, 光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 、 E_t 和 E_f^* 和营养盐参数(TP)是影响浮游植物群落结构的关键要素; 在蓄水期, TP与Chl-a浓度呈极显著正相关关系, 光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 是影响浮游植物群落结构的关键要素。

关键词: 浮游植物; 演替模式; 驱动因素; 生态功能组; 三峡水库

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0535-12 DOI: 10.13227/j.hjks.201606137

Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors

ZHANG Jia-lei¹, ZHENG Bing-hui^{2*}, LIU De-fu¹, WANG Li-jing², TAN Qian-ru¹

(1. Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, College of Civil and Environmental, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To elucidate succession pattern of phytoplankton in the Daning River and its driving factors, multivariate statistical analysis was conducted. By using the monitoring data in different seasons of Daning river during April 2012 to January 2013, this paper analyzed the succession pattern of phytoplankton in the Daning River and its driving factors in typical tributaries of river-style reservoirs. According to the characteristics of water level, the operational period of the TGR was classified into following four stages: stage I (pre-November-April), stage II (May-July), stage III (July-September) and stage IV (September-November). ①The results indicated that the values of Chlorophyll-a concentrations and algal density showed similar seasonal variations, with the highest values occurring in stage III, followed by stages IV, II and I. Succession of C-R-S growth strategies was the same generally: CR-R type dominated in stage I, CS, CR/CS and R-CR dominated in stage II, III and IV, respectively. ②The mean values of Margalef index and Pielou index in stage IV and III were significantly greater than those in stage II and I; the value of Shannon-waver index showed that the highest value in stage III, followed in a descending order by stage I, II and IV; the successional rate had the highest value in stage IV, followed in descending order by stage III, I and II. ③The results of Correlation analysis suggested that no significant relationships were observed between the environmental parameters and phytoplankton abundance in stage I. The results indicated that relative water column stability(RWCS), index of feasible energy for phytoplankton (E_t) and index of feasible energy (E_f^*) were key regulatory factors for phytoplankton community in stage I. The results indicated that E_t , E_f^* and total phosphorus (TP) were key regulatory factors for phytoplankton abundance in stage II. The results of the redundancy analysis (RDA) suggested that RWCS, TP and the ratio of euphotic depth $[D_{eu}(\lambda_{PAR})]$ to mixing depth (D_{mix}) $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ were key regulatory factors for phytoplankton community composition in stage II. The results indicated that E_f^* and TP were key regulatory factors for phytoplankton

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51209190, 41401586); 国家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); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-006-001)

作者简介: 张佳磊(1983~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为流域水环境保护, 河流水污染, E-mail: zhangjialei2015@sina.com

* 通信作者, E-mail: zhengbh@craes.org.cn

abundance in stage III. The results of the RDA suggested that $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$, E_t , E_f^* and TP were key regulatory factors for phytoplankton community composition in stage III. The results indicated that TP was key regulatory factor for phytoplankton abundance in stage IV. The results of the RDA suggested that $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ was key regulatory factor for phytoplankton community composition in stage IV.

Key words: phytoplankton; succession pattern; driving factors; ecological functional groups; Three Gorges Reservoir

三峡工程对水生态环境产生显著影响,蓄水成库后,除了产生了巨大的经济、社会和环境等综合效益外,也带来一系列的生态环境问题^[1~3]. 以三峡水库一级支流大宁河为例,自 2003 年蓄水成库以来,因支流水动力条件的改变导致水华频发,同时优势藻种也由蓄水初期河流型的硅、甲藻逐步向湖泊型的有毒蓝、绿藻演替^[4].

相关学者和科研单位通过现场调查、室内实验和数值模拟等方法对三峡水库支流生境特征、浮游植物时空分布规律,水华形成机制等方面开展了一系列的研究. 西南大学张磊等人基于彭溪河支流的监测数据指出: 水库水体热分层是影响水华生消的关键因素^[5]. 陈纯等^[6]基于野外控制实验结果论证营养盐浓度和鱼类密度是影响浮游植物群落结构和多样性的关键因素. 本团队在三峡水库 156 m 蓄水前后香溪河不同季节现场监测结果表明水温分层的季节性生消是浮游植物群落结构演替的主要影响因素,同时也针对性的设计室内控制实验验证这一结论^[7,8]; 水华高发期监测结果表明: 水温、真光层与混合层比值和水体稳定系数是影响浮游植物群落解结构的主要因素^[9]; 三峡水库 175 m 蓄水前后的香溪河监测数据表明: 水位、水位日变幅、表底温差、溶解性硅酸盐浓度、硝酸盐浓度、真光层深度和混合层比值是影响浮游植物群落结构的主要因素^[10]. 中科院水生生物研究所基于三峡水库正常运行阶段的洪水期的监测结果指出洪水顶托作用通过改变支流水动力条件和水质状况来影响浮游植物群落结构^[11,12]. 重庆大学基于在小江回水区 2 年的监测数据表明水库季节性调蓄所形成的不同藻类生境条件是影响藻类演替的关键因素^[13~15].

相关学者和科研团队基于三峡水库多年的研究成果指出: ① 三峡水库蓄水对水动力条件的影响: 三峡蓄水成库后导致支流库湾的水动力条件的显著改变(例如: 支流流速减缓、水体滞留时间延长和分层异重流现象的出现)^[16~19]; ② 三峡水动力条件对水体分层的影响: 支流库湾的水动力特性导致支流库湾存在双“混-斜”型及“半 U”型不同于传统经典湖库水温分层的特殊水体层化模式^[20,21]; ③ 三峡水库水动力条件对营养盐迁移转化规律的影响: 三

峡水库支流营养盐主要来源于长江干流的顶托作用,相关研究团队运用同位素和常量离子示踪技术,确定支流真光层内营养盐的主要来源与长江干流的倒灌作用^[22~27]; ④ 浮游植物演替的影响因素: 本研究团队系统归纳了典型支流库湾水华藻类生态功能组,建立了功能组对环境因子的响应关系,指出库湾水体光热条件控制着浮游植物群落的演替^[28]. 按照生态学中度扰动理论,浮游植物物种多样性主要决定于生境的扰动强度: 浮游植物生境扰动主要由气象变化等自然因素和水库水位波动等人为因素所产生,相对稳定的生境条件易形成单一藻类的疯长形成水华; 生境的适度扰动可维持较高的浮游植物物种的多样性^[29,30]. 基于以上科研成果笔者推测: 蓄水之后水动力背景的改变所带来的水下光热结构的变化、营养盐迁移转化规律的变化是否就是导致三峡水库支流从蓄水初期的河道型藻类水华逐步向湖泊型水华演替的本质原因.

综上所述,近年来在三峡水库一级支流(例如: 香溪河、大宁河、小江等)浮游植物生境特征、浮游植物动态演替过程及其主控因素方面开展了一系列研究,取得了一定的研究结论. 但是不同水文期不同生境要素协同作用下,三峡水库支流浮游植物动态演变过程及其浮游植物群落演替机制仍然尚不明晰,三峡水库的季节性调度作用下其一级支流的不同生境演变模式下浮游植物的演替机制有待进一步探索. 浮游植物的演替过程从本质上讲是生境改变驱动藻种之间彼此替代的过程. 鉴于河道型水库的浮游植物演替受到季节和水库调度的协同影响,因此三峡水库的浮游植物生境条件同物理环境相对稳定的湖泊相比存在显著差别,藻类演替模式也具有独特性. 同时各种藻类的对生境的适应机制也存在显著差别,仅从单一藻类与生境的响应机制很难归纳出河道型水库的演替机制. 藻类功能组分理论的提出以藻种生理生态特征与环境的是影响为基础,对具有相同适应性特征,易于在相同生境条件下共存的藻种进行归类分组,形成面向藻类集群的生态属性的功能组别,为研究生境变化对浮游植物的演替模式提供了有力工具^[32~34].

本研究基于三峡水库一级支流大宁河 2012 年

不同水文期的现场监测数据,确定不同水文期浮游植物群落动态过程及其相关生境参数特征,综合运用中度扰动理论、藻类功能组分理论 and 生境选择学说分析驱动藻类群落动态演替的主控因素,以期构建河道型水库浮游植物演替机制提供基础数据,同时为河道型水库的水环境管理提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 样点布设

从大宁河上游至下游出河口(长江)分别设

置 S1 断面(北纬 $31^{\circ}16'11.76''$, 东经 $109^{\circ}47'28.62''$, 上游区)、S2 断面(北纬 $31^{\circ}11'4.02''$, 东经 $109^{\circ}52'30.6''$, 回水区)、S3 断面(纬度 $31^{\circ}08'40.08''N$, 经度 $109^{\circ}32'17.82''E$, 回水区)、S4 断面(纬度 $31^{\circ}07'17.22''N$, 经度 $109^{\circ}53'58.02''E$, 回水区)和 S5 断面(纬度 $31^{\circ}05'35.28''N$, 经度 $109^{\circ}53'36.66''E$, 巫山县城污染区),采样时使用差分 GPS(GARMIN60csx, 北京)记录各样点的经纬度,其布设点具体位置如图 1 所示。

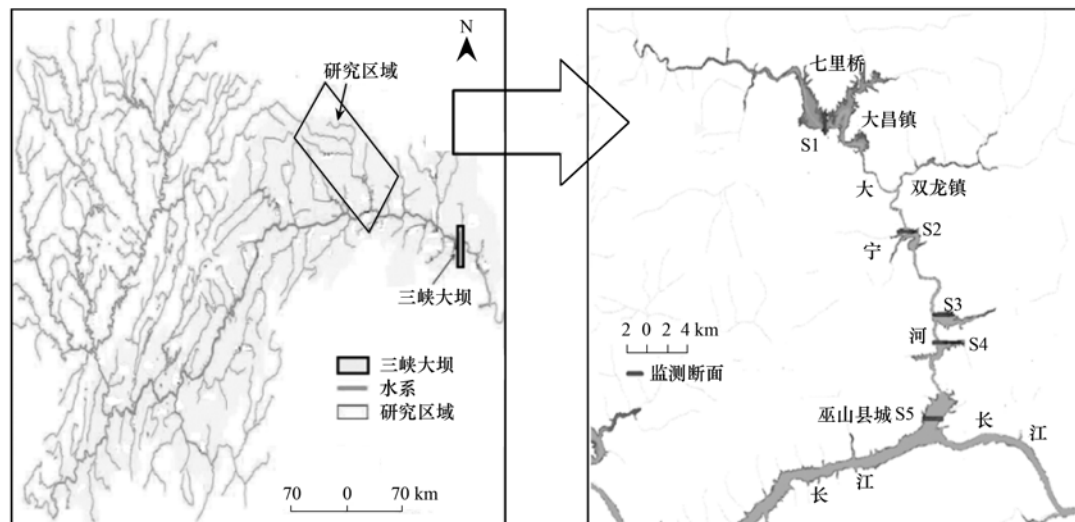


图 1 三峡库区大宁河采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling spots in Daning River

1.2 现场采样和室内分析

调查时间为 2012-04-27 ~ 2013-01-19,其中,根据三峡水库调度方案,以 2012 年 4 月 27 日、2012 年 5 月 17 日和 2012 年 6 月 9 日代表泄水期(Ⅱ),以 2012 年 7 月 7 日和 2012 年 8 月 14 日代表汛期(Ⅲ),以 2012 年 9 月 6 日、2012 年 9 月 17 日和 2012 年 9 月 28 日代表蓄水期(Ⅳ),以 2012 年 10 月 10 日、2012 年 10 月 19 日、2012 年 11 月 8 日、2012 年 12 月 12 日和 2013 年 1 月 19 日代表高水位运行期(Ⅰ)^[35],共选择 5 个断面 13 次采样共计 65 组数据样本进行分析。监测指标包括太阳辐射强度(Radi)、光合有效辐射总量(PAR)、水温(WT)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a 浓度(Chl-a)、藻类细胞密度和群落结构。其中, Radi 直接选取紧邻大宁河的巫山县空气自动站数据; PAR 的测定选用通用的美国 LI-COR 公司的 Li-cor 192SA 水下光量子仪,测定的是向下辐照度,尽量选择天气晴朗的观测期,按水下 0、0.5、1、2、3、4、5、6、7、8 m 共

10 层测定 PAR 强度,每层记录 3 个数据,取平均值^[36,37]; WT 和 Chl-a 指标采用多参数水质检测仪 Hydro lab DS5X(美国,哈希)现场测定; TN 和 TP 浓度现场采样及室内测定方法按照文献[38]进行;藻类的现场采样和室内分析按照文献[38,39]进行。本章主要是侧重于群落生态学的研究,相关学者也认为,藻类鉴定统计至属可以完全反映藻类群落结构的改变和演替,同时也可以避免分析群落演替的复杂性。

1.3 数据处理及分析方法

真光层深度[euphotic depth, $D_{eu}(\lambda_{PAR})$]的定义为水柱中支持净初级生产力的部分,其底部为临界深度,及水柱的日净初级生产力为零值的深度^[40,41]。目前大多数研究用 1% 表面光照强度来代替真光层深度,其与光衰减系数[light attenuation, $K_d(\lambda_{PAR})$]存在一定量的关系,可以表示为:

$$D_{eu}(\lambda_{PAR}) = 4.605/K_d(\lambda_{PAR})$$

式中, $K_d(\lambda_{PAR})$ 为 λ 波长 (400 ~ 700 nm) 辐射强度的垂直衰减系数, 光衰减系数 (m^{-1}), $D_{eu}(\lambda_{PAR})$ 为真光层深度 (m), 按下式计算:

$$K_d = \frac{1}{Z} \ln \frac{E_d(\lambda, Z)}{E_d(\lambda, d)}$$

式中, Z 为从水面到测量处的深度, m; $E_d(\lambda, Z)$ 是 λ 波长水面以下深度 Z 处的辐射强度, $\mu mol \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$; $E_d(\lambda, 0)$ 是在水面处 ($Z=0$) 的辐射强度, $\mu mol \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$. $K_d(\lambda_{PAR})$ 值通过对不同深度实测的水下辐照度进行指数回归得到. $K_d(\lambda_{PAR})$ 值通过对不同深度处水下辐照度进行指数回归得到, 回归效果只有当 $R^2 \geq 0.95$, 深度数 $N \geq 3$ 时, $K_d(\lambda_{PAR})$ 拟合的值才被接受^[40].

真光层深度内总能量指数 (total energy density in euphotic zone, E_t) 反映真光层内单位体积水柱的辐射强度^[42~44], 单位为 $MJ \cdot m^{-3}$, 其计算公式为:

$$E_t = Radi / [D_{eu}(\lambda_{PAR})]$$

式中, Radi 为太阳辐射强度 (solar radiation intensity), $MJ \cdot m^{-2}$, $D_{eu}(\lambda_{PAR})$ 为真光层深度^[42~44].

藻类可利用的能量指数 (index of feasible energy, E_f^*) 反映真光层内供给藻类可利用光热能量的指标^[42~44], 单位为 $MJ \cdot (d \cdot m^3)^{-1}$. 由于水体紊动程度显著影响藻类在真光层中的受光时间, 从而对藻类光合生长产生显著作用^[43,45,46]. 在假设水体滞留时间是影响水体紊动程度唯一因素前提下, E_f^* 计算公式为:

$$E_f^* = [Radi / D_{eu}(\lambda_{PAR})] \times HRT$$

式中, HRT 为水体滞留时间, 单位为 d.

水体滞留时间的计算公式为:

$$HRT = V / Q$$

式中, V 指水库或库湾的有效容积, 亿 m^3 , Q 指入库流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ ^[44].

忽略水体中泥沙对水体密度的影响, 水温对应的水体密度计算公式如下^[45]:

$$\rho_T = 1000 \left[1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2(T + 68.12963)} \times (T - 3.9863)^2 \right]$$

水体稳定系数 (relative water column stability, RWCS) 为无量纲参数, 反映水体紊动程度, 具体公式如下:

$$RWCS = \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_4 - \rho_5}$$

式中, ρ_b 和 ρ_s 分别为水体底部和表层水体的密度,

ρ_4 和 ρ_5 分别是指水在 4℃ 和 5℃ 时的水体密度^[45].

在藻类生态学研究, 多采用 Margalef 丰富度指数 H_s 、Pielou 均匀度指数 E_s 和 Shannon-Waver 多样性指数 H 作为反映藻类群落特征的分析指数. 计算公式如下:

$$H_s = (S - 1) / \ln S$$

$$E_s = H / \ln S$$

$$H = - \sum (b_i / B) \cdot \log_2 (b_i / B)$$

式中, S 为藻类物种数, b_i 为第 i 个物种的生物量, B 为藻类生物量^[47,48].

藻类群落演替被定义为自然发生并且可以辨识的藻类物种间的相互取代的连续变化序列, 是环境条件改变的结果, 并同先期群落物种组成、其生态活动对环境条件改变的响应均有关系. 通常在生境稳定条件下, 群落演替的结果是达到顶级群落. 演替速率是群落结构改变潜势的客观测度. 群落演替速率的计算公式如下:

$$\sigma_s = \sum_{i=1}^S \frac{[b_{2i}/B_2 - b_{1i}/B_1]}{t_2 - t_1}$$

式中, B_2 、 B_1 分别为演替过程中 2 个时间状态 (t_2 、 t_1) 的藻类生物量, 而 b_{2i} 、 b_{1i} 则为上述相应状态下群落中第 i 个藻种的生物量^[39].

皮尔逊相关分析均采用 SPSS 17.0 统计软件处理, 其中皮尔逊相关性分析采用双变量相关性分析, 双尾检验, 显著性水平为 0.05 和 0.01.

先用 CANOCO 软件进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, RDA), 结果显示 “lengths of gradient” (展示每个轴的梯度长度) 为 2.6, 因此选择冗余度分析 (redundancy analysis, RDA) 分析浮游植物的种类组成与环境因子之间的关系比较合适. 为使浮游植物的细胞密度数据获得正态分布, 将其进行 $\lg(x+1)$ 转换.

2 结果与分析

2.1 不同水文期浮游植物生物量和群落结构特征

2.1.1 不同水文期水柱叶绿素浓度总量和表层浮游植物细胞密度变化规律

不同水文期, 大宁河 5 个采样点的水体表层 Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度变化显著 (图 2): 在高水位运行期, Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度处于最低值; 在泄水期, Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度相较于高水位运行期显著增加; 在汛期, Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度持续升高至最高值; 进入

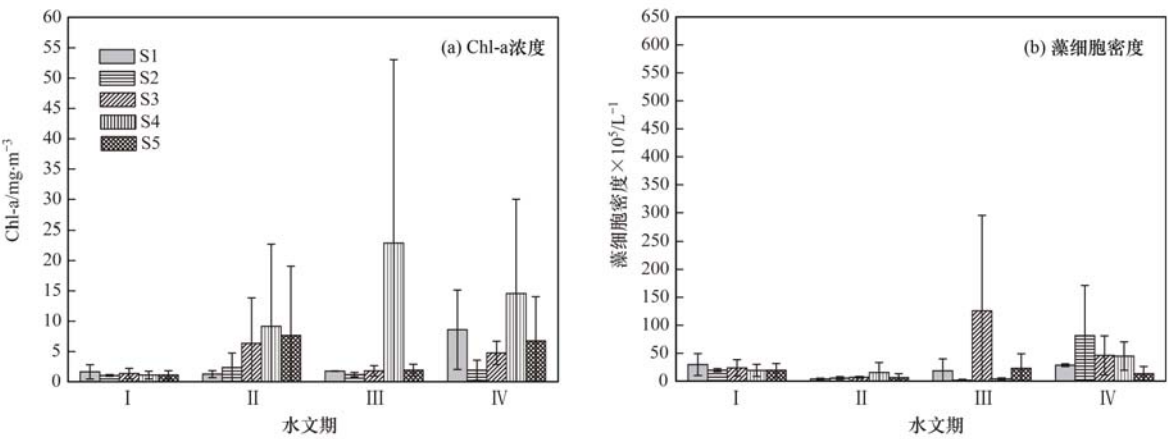


图2 不同水文期大宁河 Chl-a 浓度和水体表层浮游植物细胞密度的时空变化过程

Fig. 2 Spatial-temporal variations of chlorophyll-a and algal density in the Daning River in different hydrological periods

蓄水期后,Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度呈下降趋势.

2.1.2 不同水文期藻类的群落结构演替规律

2012 年对大宁河的浮游植物常规监测结果表明:大宁河浮游植物共检出 8 门类(蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、甲藻门、裸藻门、金藻门和黄藻门)71 属,其中种类最为丰富的是硅藻门、绿藻门和裸藻门,分别为 22 属、16 属和 13 属,分别占总属数的 30.99%、22.54% 和 18.31%;其次是蓝藻门和甲藻门,均为 7 属,占总属数的 9.86%;隐藻门各 4 属,占总属数的 5.63%;金藻门和黄藻门各 1 属,占总属数的 1.41%. 监测的统计结果显示,硅藻门在浮游植物种类组成中占绝大比例,其次是绿藻门和甲藻门. 筛选细胞密度在样品中所占的百分比占优,并且超过在样品相对密度排序中位列第二的藻属 10% 的为优势藻种,最常见的 10 个藻属从多到少分别是:小环藻(*Cyclotella*)、衣藻(*Chlamydomonas*)、实球藻(*Pandorina*)、空球藻(*Eudorina*)、多形裸藻(*Euglena polymorpha*)、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)、光薄甲藻(*Pyrrophyta gymnodinium*)、微囊藻(*Microcystis*)、鱼腥藻(*Anabaena bory*)、平裂藻(*Merismopedia*).

通过对各采样点的藻类群落结构特征进行总结分析如下.

(1)图 3 显示了不同水文期浮游植物种群结构的演替过程:高水位运行期(硅藻门)-泄水期(硅藻门、绿藻门、裸藻门占优)-汛限期(以硅藻门,绿藻门、裸藻门占优)-蓄水期的演替模式为(以硅藻门、绿藻门和甲藻门占优).

(2)如表 1 所示,研究期间,丰富度指数最大值

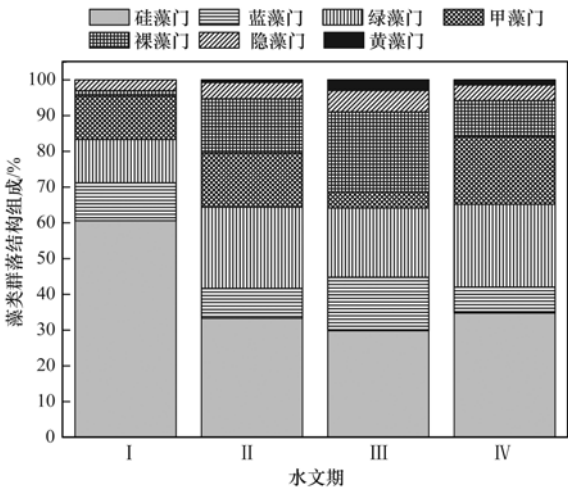


图3 大宁河不同月份浮游植物种类组成

Fig. 3 Monthly variations of structure of phytoplankton community in the Daning River

出现在蓄水期(Ⅲ),最小值出现在高水位运行期(Ⅰ)和泄水期(Ⅱ);均匀度指数最大值出现在汛限期(Ⅲ),最小值出现在高水位运行期(Ⅰ)和泄水期(Ⅱ);多样性指数最大值出现在汛限期(Ⅲ),最小值出现在泄水期(Ⅲ)和蓄水期(Ⅳ);演替速率最高值出现在蓄水期(Ⅲ),最低值出现在泄水期(Ⅱ).

(3) 根据藻类功能组理论,不同水文期的演替过程如下(表 2):①对高水位运行期,多为 CR-R 型藻类,生境稳定维持在稳定状态下,演替速率、丰富度和均匀度指数较低. 中间出现了 CS 型藻类增多的趋势. ②泄水期,多为 CS 型藻类,多样性水平下降,演替速率下降,藻类群落结构达到平衡状态. ③汛限期,多为 CR/CS 型藻类,生物多样性,均匀度均维持在较高水平,而群落的演替速率较低,群落结

构相对稳定. 但是一旦遇到适宜天气情况出现 LM 型水华, 导致多样性和演替速率下降, 接近平衡状态. ④蓄水期, 多为适应流水型的 R-CR 型藻类混生状态, 均匀度均保持在较高水平, 群落演替速率较高.

表 1 研究期间大宁河物种多样性和演替速率的季节变化特征(平均值±标准差)
Table 1 Seasonal variation of species diversity and succession rates in the Daning river

项目	参数	I	II	III	IV
H_s	均值	1.34±0.05	1.39±0.60	1.58±0.83	1.71±0.65
	变化范围	0.63~2.69	0.51~2.50	0.43~2.84	0.80~2.52
E_s	均值	0.33±0.04	0.36±0.55	0.87±0.19	0.85±0.16
	变化范围	0.05~0.91	0.58~1.20	0.12~1.19	0.55~1.00
H	均值	1.24±0.02	1.11±0.48	1.31±0.73	1.11±0.45
	变化范围	0.31~2.02	0.41~1.89	0.21~2.36	0.59~2.03
σ_s	均值	0.31±0.15	0.071±0.05	0.34±0.25	0.40±0.30
	变化范围	0.08~0.55	0.04~0.17	0.05~0.74	0.08~0.88

表 2 大宁河各采样点代表性藻类功能组的季节演替过程
Table 2 Succession series of phytoplankton functional groups among sampling spots

水文期	S1	S2	S3	S4	S5
I	B/P/J	B/W1/LM/G	B/W1/LM/G	B/LM/W1	B/D/P
II	P/LO	G/P/B/W1/LM	X2/LM/W1/X1/MP/D	LM/B/MP/W1/F	X2/LM/MP/W1/W2
III	B/LM	H1/LM/MP	LM/LO/MP/P	X2/F/LM	LM/G/X1/X2
IV	B/J/G	LM/J/MP	B/G/LO	LM/X1/H1	P/B/LM

2.2 不同水文期浮游植物生境要素特征

不同水文期,藻类生境特征的演变模式如图 4.

(1)高水位运行期 基于时间平均值,RWCS 在 4 个水文期最低,变化范围为(4.12±4.18,S5)~(93.75±92.39,S1); $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(2.57±2.72,S1)~(4.76±3.12,S2); E_t 在 4 个水文期最低,变化范围为(82.64±17.57,S5)~(173.31±180.20,S2) $MJ\cdot m^{-3}$; Ef^* 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(2 735.99±3 019.24,S5)~(10 388.50±19 787.85,S2) $MJ\cdot (d\cdot m^3)^{-1}$; TN 浓度在 4 个水文期介于中间,变化范围为(1.33±0.03,S1)~(1.53±0.05,S5) $mg\cdot L^{-1}$; TP 浓度在 4 个水文期介于中间,变化范围为(0.02±0.004,S1)~(0.08±0.06,S5) $mg\cdot L^{-1}$.

(2)泄水期 基于时间平均值,RWCS 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(77.75±22.00,S5)~(240.74±30.40,S1); $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 在 4 个水文期最高,变化范围为(1.17±0.99,S5)~(6.56±4.36,S1); E_t 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(114.85±96.16,S1)~(174.98±152.24,S3) $MJ\cdot m^{-3}$; Ef^* 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(2 386.18±1 958.51,S5)~(4 449.54±5 954.07,S3) $MJ\cdot (d\cdot m^3)^{-1}$; TN 浓度在 4 个水文期最高,变化范围为(1.36±0.03,

S1)~(2.04±0.36,S5) $mg\cdot L^{-1}$; TP 浓度 4 个水文期最高,变化范围为(0.02±0.004,S1)~(0.147±0.05,S5) $mg\cdot L^{-1}$.

(3)汛限期 基于时间平均值,RWCS 在 4 个水文期最高,变化范围为(127.41±93.02,S5)~(268.17±83.39,S1); $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(1.50±0.48,S4)~(2.32±2.06,S5); E_t 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(128.36±7.78,S5)~(356.90±12.89,S3) $MJ\cdot m^{-3}$; Ef^* 在 4 个水文期最高,变化范围为(3 168.71±3 824.84,S5)~(8 264.18±9 892.53,S3) $MJ\cdot (d\cdot m^3)^{-1}$; TN 浓度在 4 个水文期介于中间,变化范围为(1.23±0.02,S1)~(1.57±0.19,S5) $mg\cdot L^{-1}$; TP 浓度在 4 个水文期介于中间,变化范围为(0.017±0.004,S1)~(0.117±0.06,S5) $mg\cdot L^{-1}$.

(4)蓄水期 基于时间平均值,RWCS 在 4 个水文期介于中间,变化范围为(16.38±11.04,S5)~(157.77±19.17,S1); $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 在 4 个水文期最低,变化范围为(0.35±0.21,S2)~(0.71±0.50,S3); E_t 在 4 个水文期最高,变化范围为(174.78±18.34,S5)~(261.77±81.33,S2) $MJ\cdot m^{-3}$; Ef^* 在 4 个水文期最低,变化范围为(1 224.86±332.43,S1)~(1 751.27±234.05,S2) $MJ\cdot (d\cdot m^3)^{-1}$; TN 浓度在 4 个水文期最低,变化范

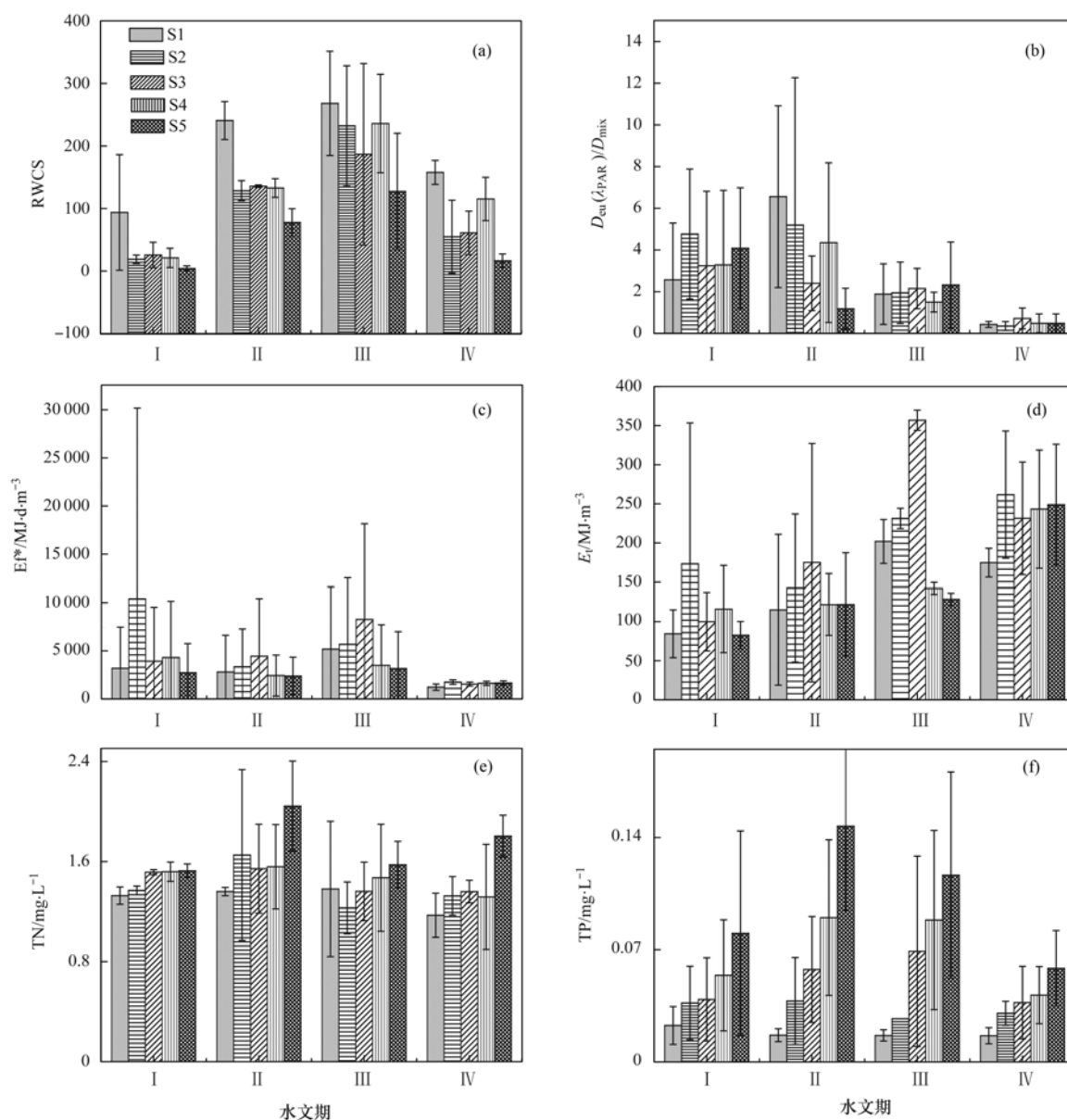


图4 不同水文期大宁河藻类生境特征的时空变化过程

Fig. 4 Spatial-temporal variations of habitat characteristics in the Daning River in different hydrological periods

围为 $(1.17 \pm 0.18, S1) \sim (1.80 \pm 0.17, S5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TP 浓度在 4 个水文期最低, 变化范围为 $(0.02 \pm 0.005, S1) \sim (0.06 \pm 0.02, S5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.3 不同水文期浮游植物与关键环境参数的响应关系

2.3.1 不同水文期浮游植物生物量与关键环境参数的响应关系

不同水文期浮游植物生物量和环境参数的相关分析结果表明: 在高水位运行期, 浮游植物生物量 (Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度) 与环境参数不存在显著的相关关系 ($P > 0.05$); 在泄水期, E_t 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系 ($r = 0.739, P <$

0.01), E_f^* 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系 ($r = 0.831, P < 0.01$), TP 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系 ($r = 0.765, P < 0.01$); 在汛限期, TP 与 Chl-a 浓度呈显著负相关关系 ($r = -0.757, P < 0.05$), E_f^* 与 Chl-a 浓度呈显著正相关关系 ($r = 0.688, P < 0.05$); 在蓄水期, TP 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系 ($r = 0.718, P < 0.01$).

2.3.2 不同水文期藻类群落结构对关键环境参数生态响应关系

RDA 分析结果表明 (图 5), 4 个水文期, 影响浮游植物群落结构的关键因子为光热参数 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 和 E_t] 和水动力参数 (RSCW) ($P <$

0.01), 营养盐参数(TN 和 TP)对浮游植物群落结构的分布影响不显著($P > 0.01$). 在高水位运行期, 群落占优的 B 型藻和水动力参数(RSCW)和光热参数(E_t 和 E_f^*)呈显著正相关; 在泄水期, 群落占优的 X2 与营养盐参数(TP)和光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 呈显著正相关, 群落占优的 LM 与光热参数

$[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 和 E_f^* 呈显著正相关, 群落占优的 G 型藻与水动力参数(RSCW)呈显著正相关; 在汛限期群落占优的 LM 型藻与光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 、 E_t 和 E_f^* 和营养盐参数(TP)呈显著相关; 在蓄水期, 群落占优的 P 型藻与光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 呈显著正相关.

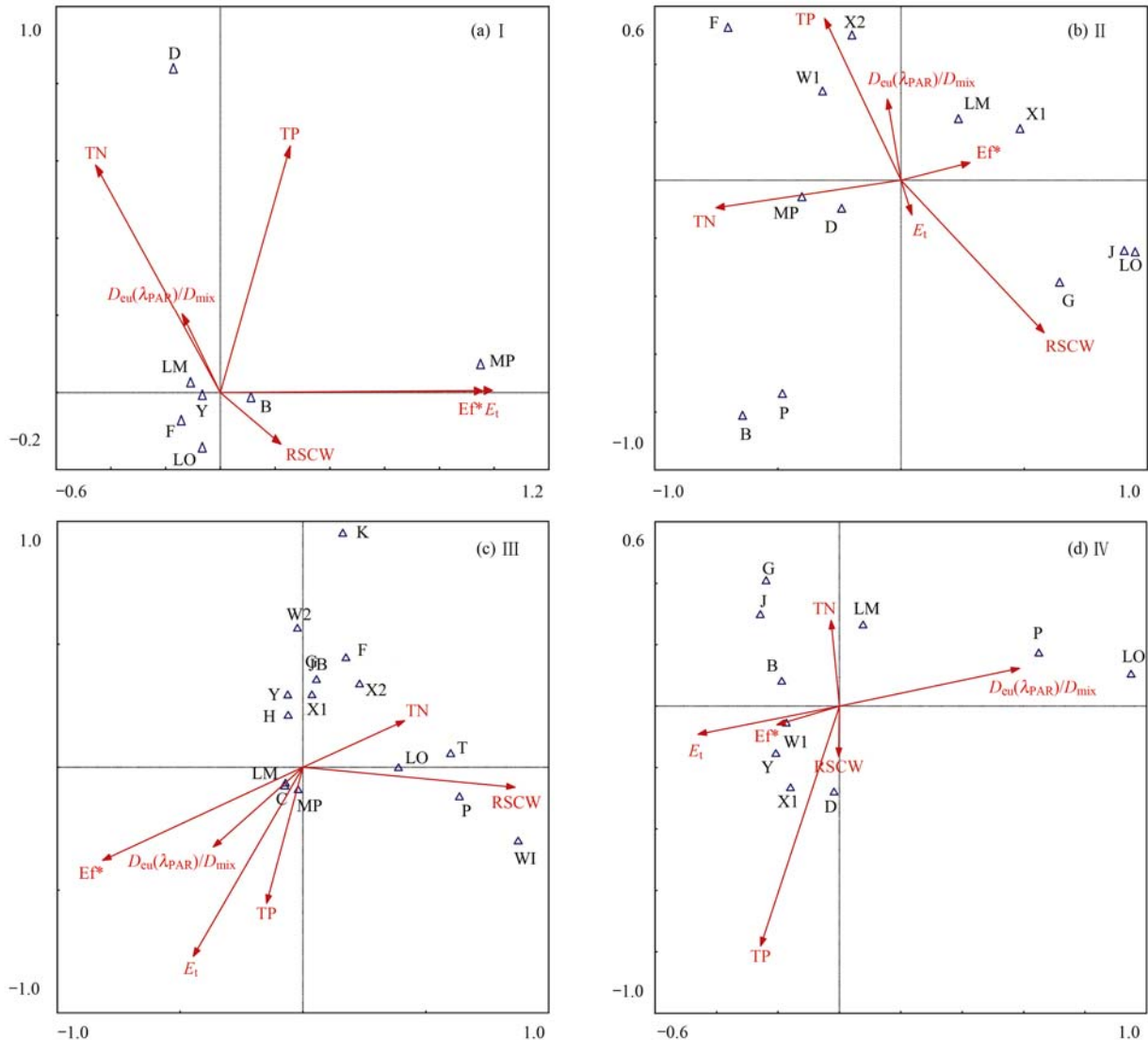


图5 高水位运行期、泄水期、汛限期和蓄水期大宁河常见种与环境参数的 RDA 分析结果

Fig. 5 RDA analysis results of common species and environmental parameters during different periods of water level and inflow discharge of the Three Gorges Reservoir

2.3.3 不同水文期浮游植物与相关环境参数的响应关系

基于前期的研究结果,选取 RSCW、 $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 、 E_t 、 E_f^* 、TN 和 TP 作为反映藻类宏观生境指标的环境变量,结合前期浮游植物生物量和群落结构变化规律,不同水文期藻类生境变化和群落结构演替模式如下.

(1) 高水位运行期 三峡水库稳定在高水位运行, RSCW 和 $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 较低, TN、TP 浓度较低, E_t 最低, E_f^* 较低; 此时生境参数不适宜于藻类生长, 因此藻类生物量在 4 个水文期中达到最低; 相关分析结果表明, 浮游植物生物量与生境参数并不存在显著的相关关系, RDA 分析结果表明浮游植物群落主要受到 RSCW、 E_t 和 E_f^* 影响, 因此此时

以适宜低光照 (E_t 和 E_f^*) 和混合水体 (RSCW) 的 CR-R 型藻类为主, 此时生境相对稳定, 演替速率较低, 多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均达到最低。

(2) 泄水期 随着水位的下降, 水体出现稳定分层 [$RSCW, D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$], 水体可利用光照升高 (E_t 和 E_f^*), 营养盐浓度 (TN 和 TP) 显著升高达到最高值; 相关分析结果表明, 浮游植物生物量与 E_t 和 E_f^* 和 TP 呈显著正相关关系, 此时浮游植物生物量随着光热参数 (E_t 和 E_f^*)、营养盐 (TP) 浓度的升高而升高; RDA 分析结果表明浮游植物群落结构与 RSCW、TP、 E_f^* 和 $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 呈显著正相关, 此时具有鞭毛能适应紊动水体 (RSCW 和 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$]) 中自由活动获取光照能量 (E_f^*) 和营养盐 (TP) 能量的 CS 型藻类为主, 此时浮游植物演替速率达到最低, 多样性指数、均匀度指数和丰富度指数也相对较低。

(3) 汛限期 此时, 水位稳定在低水位运行, RSCW 达到最高值, $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 相对较高, 光热条件 (E_t 和 E_f^*) 和营养盐 (TN 和 TP) 浓度维持在较高水平; 相关分析结果表明浮游植物生物量与 E_f^* 呈显著正相关, 浮游植物生物量与 TP 浓度呈显著负相关, 浮游植物生物量主要受到较高光热条件 (E_f^*) 的影响维持在高值; RDA 分析结果表明浮游植物群落结构主要受到 $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 、 E_t 、 E_f^* 和 TP 呈显著正相关, 此时以适应水体稳定程度 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$] 和较高光热条件 (E_t 和 E_f^*) 的 CR/CS 迅速增长。此时演替速率介于中间值, 多样性指数, 丰富度指数和均匀度指数维持在高值。

(4) 蓄水期 随着水位的急剧上升, RSCW 较低, 光热条件 (E_t) 达到最大值, 但是藻类可利用能量指数 (E_f^*) 达到最低值, 营养盐浓度达到最高值; 相关分析结果表明浮游植物生物量与 TP 浓度正相关, 但是此时水动力条件不适宜浮游植物生长, 浮游植物生物量显著降低; RDA 分析结果表明浮游植物群落结构主要受到 $D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 的影响, 此时适应紊动水体的 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$] R-CR 型藻类占优; 此时生境不稳定, 演替速率达到最高, 丰富度指数和均匀度指数均达到最高。

3 讨论

浮游植物的演替模式作为水域生态学的一个关键科学问题, 受到国内相关学者的广泛关注。在浅水湖泊中, 演替模式为硅藻 (春季)-绿藻 (夏季)-蓝

藻 (夏末秋初)-硅藻 (冬季), 演替模式主要受到水温、水体层化模式和营养盐浓度的影响^[49,50]。广东省 19 个水库和大伙房水库的调查显示, 在丰水期的优势种多为蓝-绿藻类, 而枯水期多为蓝-硅藻类, 其演替模式主要受到水温、水位波动、水体滞留时间和流域营养盐输入的影响^[51]。三峡水库的研究结果表明, 浮游植物演替模式为 CS/S (冬季)-CR/R (春季)-CR/R/C/CS (夏季)-R (秋季), 水位波动、水温、水温分层、水体稳定系数是影响浮游植物群落演替的关键要素^[7~15]。因此, 在相对稳定的湖泊环境中, 影响浮游植物的演替模式的主控因素为气候条件 (水温、光热结构) 和营养盐条件; 但是在人工调蓄的水库中, 除了受到气候条件和营养盐浓度的影响外, 同时也受到人工调蓄的水动力参数 (水位扰动和水体滞留时间) 的影响。本文的研究结果表明: 大宁河的浮游植物演替模式为硅藻门 (高水位运行期)-硅藻门、绿藻门、裸藻门占优 (泄水期)-硅藻门, 绿藻门和裸藻门占优 (汛限期)-硅藻门、绿藻门和甲藻门占优 (蓄水期); 用生态功能组理论, 其演替模式为: CR-R (高水位运行期)-CS (泄水期)-CR/CS (汛限期)-R-CR (蓄水期); 利用数理统计分析方法, 高水位运行期水动力参数 (RSCW) 和光热参数 (E_t 和 E_f^*) 是影响浮游植物群落结构的关键要素, 泄水期, 水动力参数 (RSCW)、营养盐参数 (TP) 和光热参数 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$] 是影响浮游植物群落结构的关键要素, 汛限期群落光热参数 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$ 、 E_t 和 E_f^*] 和营养盐参数 (TP) 是影响浮游植物的关键要素; 在蓄水期, 光热参数 [$D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}$] 是影响浮游植物的关键要素。因此本文的结果和人工调蓄水库的研究结果一致: 浮游植物演替模式受到气候条件和人工调蓄的双重影响。

按照生态学理论: 生境的资源丰度和生境的多样性与藻类的多样性呈正相关关系。在环境稳态条件下, 群落结构向着耐受环境胁迫的 S 型藻类方向演替, 群落多样性在竞争排他作用下逐渐下降, 群落最终达到顶级状态, 演替速率达到最低; 在环境扰动的情况下, 群落结构向着适应于临时资源丰富环境的 R 型藻类演替^[31,32]。在环境呈现中度扰动情况下, 生境出现多样化, 导致物种的多样性达到最大, 演替速率也达到最大^[48]。本研究结果: 高水位运行期为生境稳定期, 演替速率和多样性指数均较低; 蓄水期为生境扰动期, 演替速率和多样性指数均达到最高; 和理论研究结果一致。泄水期为生境

扰动期,但是演替速率和多样性均较低,与理论研究成果不一致,其原因:本文研究结果表明藻类生物量主要受到 E_t 、 E_f^* 和 TP 的影响,而此时光热条件和营养盐条件较为适宜,此时生物量呈显著上升趋势,春季水华暴发,此时浮游植物群落达到平衡状态,因此多样性和演替速率较低. 汛限期为水动力条件相对稳定的时期,但是此时为三峡水库暴雨频发期,本团队的野外围隔实验结果表明此时降雨扰动是影响浮游植物生物量和群落结构的关键要素,因此演替速率上升,多样性指数达到最高值.

浮游植物的生物量受到物理(水动力条件,气候条件等)、化学(营养盐浓度)和生物因素(浮游植物内部竞争因素和浮游植物摄食作用)的多重叠加作用的影响^[30~32,48]. 但是本研究结果表明:在水环境稳定的高水位运行期,能有效代表浮游植物生物量变化的参数 Chl-a 浓度和藻细胞密度与所有的环境参数在数理统计分析方面没有显著的相关关系. 本研究结果表明:在高水位运行期,水动力条件(水体稳定系数)相对稳定,不会对藻类生长产生抑制作用;藻类可利用能量指数充足,也不是藻类生长的抑制作用,TN 和 TP 浓度均高于浮游植物生长量所需的阈值($TN > 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP > 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),表明此时营养盐浓度并不是影响浮游植物生物量的关键因素;因此高水位运行期数理统计分析结果藻类生物量 and 环境参数没有显著的相关关系.

4 结论

(1)在高水位运行期,Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度均为最低值,此时多为 CR-R 型的藻类群落特征,因生境条件维持稳定,此时丰富度指数和均匀度指数最低,演替速率也相对较低,此时群落维持平衡状态;在泄水期,Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度相较于高水位运行期呈上升趋势,此时多为 CS 型的藻类,演替速率达到最低,丰富度指数和均匀度指数相较于高水位运行期呈上升趋势;在汛限期,Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度达到最高值,此时多为 CR/CS 型藻类,演替速率持续升高,均匀度指数和多样性指数达到最高;在蓄水期,此时 Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度呈下降趋势,丰富度指数和演替速率均为较高值.

(2)在高水位运行期,Chl-a 浓度和浮游植物细胞密度与生境参数无明显的相关关系;群落占优的 B 型藻和水动力参数(RSCW)和光热参数(E_t 和

E_f^*)呈显著正相关. 在泄水期, E_t 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系($r = 0.739$, $P < 0.01$), E_f^* 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系($r = 0.831$, $P < 0.01$),TP 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系($r = 0.765$, $P < 0.01$);群落占优的 X2 与营养盐参数(TP)和光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 呈显著正相关,群落占优的 LM 与光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 和 E_f^* 呈显著正相关,群落占优的 G 型藻与水动力参数(RSCW)呈显著正相关. 在汛限期,TP 与 Chl-a 浓度呈显著负相关关系($r = -0.757$, $P < 0.05$), E_f^* 与 Chl-a 浓度呈显著正相关关系($r = 0.688$, $P < 0.05$);在汛限期群落占优的 LM 型藻与光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 、 E_t 和 E_f^* 和营养盐参数(TP)呈显著相关. 在蓄水期,TP 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系($r = 0.718$, $P < 0.01$);群落占优的 P 型藻与光热参数 $[D_{eu}(\lambda_{PAR})/D_{mix}]$ 呈显著正相关.

参考文献:

- [1] Lai X J, Liang Q H, Jiang J H, *et al.* Impoundment effects of the Three-Gorges-Dam on flow regimes in two China's largest freshwater lakes[J]. *Water Resources Management*, 2014, **28** (14): 5111-5124.
- [2] Shen Z Y, Niu J F, Wang Y, *et al.* Distribution and transformation of nutrients in large-scale lakes and reservoirs [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015. 1-10.
- [3] Sha Y K, Wei Y P, Li W P, *et al.* Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three-Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **528**: 230-237.
- [4] Zhang J L, Zheng B H, Liu L S, *et al.* Seasonal variation of phytoplankton in the DaNing River and its relationships with environmental factors after impounding of the Three Gorges Reservoir: a four-year study [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1479-1490.
- [5] 张磊, 蔺建军, 付莉, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36** (6): 2061-2069.
- Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and Chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (6): 2061-2069.
- [6] 陈纯, 李思嘉, 肖利娟, 等. 营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33** (18): 5777-5784.
- Chen C, Li S J, Xiao L J, *et al.* Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (18): 5777-5784.
- [7] 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.
- Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function

- grouping in Xiangxi bay[J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 2014, **23**(5): 700-707.
- [8] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(S2): 45-50. Fang L J, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(S2): 45-50.
- [9] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水华高发期浮游植物群落结构分布特征[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(S2): 211-220. Yao X J, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Distribution characteristics of phytoplankton community structure in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir during spring and summer[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, **44**(S2): 211-220.
- [10] 方丽娟, 刘德富, 张佳磊, 等. 三峡水库 175 m 蓄水前后香溪河库湾浮游植物的群落结构[J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 1-9. Fang L J, Liu D F, Zhang J L, *et al.* Phytoplankton community structure of Xiangxi Bay before and after the 175 m impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2014, **35**(3): 1-9.
- [11] 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. Peng C R, Chen L, Bi Y H, *et al.* Effects of flood regulation on phytoplankton community structure in the Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(7): 1863-1871.
- [12] Peng C R, Zhang L, Zheng Y Z, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton in response to the variation of environmental factors in the Gaolan River, Three Gorges Reservoir, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, **31**(4): 737-749.
- [13] 郭劲松, 李哲, 张呈, 等. 三峡小江回水区藻类集群与主要环境要素的典范对应分析研究[J]. 长江科学院院报, 2010, **27**(10): 60-64, 87. Guo J S, Li Z, Zhang C, *et al.* Canonical correspondence analysis of phytoplankton assemblages and environmental factors in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, **27**(10): 60-64, 87.
- [14] 郭劲松, 盛金萍, 李哲, 等. 三峡水库运行初期小江回水区藻类群落季节变化特点[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1492-1497. Guo J S, Sheng J P, Li Z, *et al.* Seasonal variation of phytoplankton community in Xiaojiang backwater area during the preliminary operation stage of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2010, **31**(7): 1492-1497.
- [15] Li Z, Wang S, Guo J S, *et al.* Responses of phytoplankton diversity to physical disturbance under manual operation in a large reservoir, China[J]. Hydrobiologia, 2012, **684**(1): 45-56.
- [16] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, (2): 49-52, 15.
- [17] Xu Y Y, Zhang M, Wang L, *et al.* Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China[J]. Quaternary International, 2011, **244**(2): 272-279.
- [18] Passarge J, Hol S, Escher M, *et al.* Competition for nutrients and light: stable coexistence, alternative stable states, or competitive exclusion? [J]. Ecological Monographs, 2006, **76**(1): 57-72.
- [19] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2010, **40**(1): 101-112. Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, **40**(1): 101-112.
- [20] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, **45**(1): 1-9, 15. Yang Z J, Liu D F, Ma J, *et al.* Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
- [21] 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. Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [22] 操满, 傅家楠, 周子然, 等. 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换: 以梅溪河为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1293-1300. Cao M, Fu J N, Zhou Z R, *et al.* Nutrient exchange between Meixi River and Yangtze River due to the typical interaction process of the Three Gorges Reservoir and its tributary[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1293-1300.
- [23] Holbach A, Norra S, Wang L J, *et al.* Three Gorges Reservoir: density pump amplification of pollutant transport into tributaries[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(14): 7798-7806.
- [24] 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. Zhang Y, Liu D F, Ji D B, *et al.* Effects of intrusions from three gorges reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay[J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [25] Ran X B, Yu Z G, Chen H T, *et al.* Silicon and sediment transport of the Changjiang River (Yangtze River): could the Three Gorges Reservoir be a filter? [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(4): 1881-1893.
- [26] Ran X B, Chen H T, Wei J F, *et al.* Phosphorus speciation, transformation and retention in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Marine and Freshwater Research, 2016, **67**(2): 173-186.
- [27] Yang L, Liu D F, Huang Y L, *et al.* Isotope analysis of the nutrient supply in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 65-73.
- [28] 杨正健. 基于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. 59-187. Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. 59-187.
- [29] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J].

- Science, 1978, **199**(4335): 1302-1310.
- [30] 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.
- [31] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369**: 11-26.
- [32] 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.
- [33] Litchman E, Klausmeier C A. Trait-based community ecology of phytoplankton [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, **39**(1): 615-639.
- [34] Wilhelm S, Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(2): 226-237.
- [35] 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 等. 三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3382-3389.
- Zhang J L, Zheng B H, Liu L S, *et al.* Comparison of trophic status analysis of the Daning River within the Three Gorges Reservoir before and after experimental impoundment [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3382-3389.
- [36] John T, Kirk O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (3rd ed.) [M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 2010. 28-30.
- [37] Schubert H, Sagert S, Forster R M. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary [J]. *Helgoland Marine Research*, 2001, **55**(1): 12-22.
- [38] 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. 39-107.
- [39] 胡鸿均, 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. 1-902.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006. 1-902.
- [40] 张运林, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, **36**(3): 287-296.
- Zhang Y L, Qin B Q, Hu W P, *et al.* Temporal-spatial variations of euphotic depth of typical lake regions in Lake Taihu and its ecological environmental significance [J]. *Science in China Series D*, 2006, **36**(3): 287-296.
- [41] 张运林, 冯胜, 马荣华, 等. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算 [J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 380-388.
- Zhang Y L, Feng S, Ma R H, *et al.* Spatial pattern of euphotic depth and estimation of phytoplankton primary production in Lake Taihu in autumn 2004 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(3): 380-388.
- [42] Huisman J, Sommeijer B. Population dynamics of sinking phytoplankton in light-limited environments: simulation techniques and critical parameters [J]. *Journal of Sea Research*, 2002, **48**(2): 83-96.
- [43] Huisman J, van Oostveen P, Weissing F J. Species dynamics in phytoplankton blooms: incomplete mixing and competition for light [J]. *The American Naturalist*, 1999, **154**(1): 46-68.
- [44] Holbach A, Wang L J, Chen H, *et al.* Water mass interaction in the confluence zone of the Daning River and the Yangtze River—a driving force for algal growth in the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7027-7037.
- [45] Zhu K X, Bi Y H, Hu Z Y, *et al.* Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**: 169-177.
- [46] Zhou H, Fang F, Li Z, *et al.* Spatiotemporal variations in euphotic depth and their correlation with influencing factors in a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Water and Environment Journal*, 2014, **28**(2): 233-241.
- [47] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al.* Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [48] Reynolds C S. Ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 15-24.
- [49] Sommer U. The periodicity of phytoplankton in lake Constance (Bodensee) in comparison to other deep lakes of central Europe [J]. *Hydrobiologia*, 1986, **138**(1): 1-7.
- [50] Xiao Y, Li Z, Guo J S, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages in response to large-scale reservoir operation: a case study in a tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(3): 153.
- [51] 胡韧. 珠海水库富营养化现状、浮游植物群落特征与蓝藻水华风险分析 [D]. 广州: 暨南大学, 2009. 124.
- Hu R. Eutrophication, phytoplankton assemblage and blue-green algal blooms in Zhuhai reservoirs [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. 124.
- [52] Cui Y J, Liu D F, Zhang J L, *et al.* Diel migration of *Microcystis* during an algal bloom event in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(7): 616.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172