Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.5
第41卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

目 次

上海大气 $PM_{2.5}$ 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 …… 周敏(1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 …… 吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏(2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 …… 张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军(2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 …… 李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向锌鹏, 武文琪, 殷子渊(2026)
临沂市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素分布特征及来源解析 …… 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽(2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 …… 谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏(2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 …… 何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军(2050)
基于随机森林模型的中国 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析 …… 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富(2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 $PM_{2.5}$ 关联关系时空变异特征分析 …… 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华(2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 …… 王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦有俊(2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 …… 唐春雷, 郑秀清, 梁永平(2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 …… 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹(2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素a垂向分布特征 …… 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰(2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 …… 付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠(2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 …… 刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇(2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 …… 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜(2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 …… 张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳(2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价 …… 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣(2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 …… 王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超(2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 …… 周石磊, 孙悦, 岳哿丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升(2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 …… 张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜(2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 …… 郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞(2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 …… 林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社(2210)
长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 …… 贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬(2221)
太湖水体中NSAIDs的时空分布规律和生态风险评价 …… 廉杰, 李祎飞, 王晓暄, 叶彬, 邹华, 史红星(2229)
8种典型PhACs在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 …… 徐鑫磊, 刘建超, 陆光华(2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 …… 朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰(2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 …… 李永新, 王威, 何姝, 申泰铭(2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系 …… 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊(2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 …… 聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱弈, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋(2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 …… 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君(2281)
不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 …… 王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛(2292)
向日葵秸秆生物炭强化Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^{2-}$ 体系降解苯甲酸 …… 孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣(2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶:动力学及机制 …… 丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利(2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 …… 杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋(2320)
新型填料A/O生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 …… 赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇(2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 …… 文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业(2339)
连续流SNAD工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 …… 秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元(2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异 …… 姜滢, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧枫, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良(2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 …… 陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中(2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用 …… 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿(2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 …… 王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋(2381)
还原增溶强化EGTA淋洗修复重金属污染土壤 …… 张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩莹, 葛嘉琦(2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 …… 付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉(2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 …… 王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李娇, 高明(2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 …… 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(2416)
施用生物炭对墁土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 …… 王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光(2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N_2O 排放的影响 …… 张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇(2434)
缙云山森林植被类型对土壤产 N_2O 相关功能微生物的影响 …… 王鋆燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明(2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N_2O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 …… 郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 闵伟(2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 …… 储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉(2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 …… 王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌(2476)
海洋沉积物中细菌DNA和RNA水平群落差异 …… 李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓(2485)
2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 …… 周婷, 马姣娇, 徐颂军(2496)
《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响

王晨旭[1,2], 黄廷林[1,2*], 李楠[1,2], 齐允之[3], 徐金兰[1,2], 司凡[1,2], 张晗[1,2], 路林超[1,2]
(1. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 3. 西安水务集团黑河金盆水库管理公司, 西安 710401)

摘要: 为探明人工强制混合过程对水体藻类群落演替的作用影响机制,本研究利用扬水曝气系统对金盆水库主库区水体进行原位人工强制混合,对系统运行过程中水库水体理化参数及藻类进行原位定点监测. 结果表明,金盆水库水体藻类共 6 门 28 属 51 种,扬水曝气系统的人工强制混合作用可显著抑制水体藻类的生长,并对其群落结构产生显著影响:扬水曝气系统运行前,藻类主要分布在表层水体,其中以小球藻(*Chlorella vulgaris*)为优势种属;扬水曝气系统运行后,表层水体藻密度大幅降低,藻密度垂向分布趋于均匀,优势种属有向小环藻属(*Cyclotella* sp.)演替的趋势. 本研究利用冗余分析(RDA)方法,结合临界层理论(critical depth theory)和藻类生长特性,分析了人工强制混合过程中金盆水库水体藻类群落结构时空演替和主要理化参数变化之间的关系. 分析结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用主要通过迅速破坏水体热分层稳定性和显著增加水体混合深度(Z_{mix})来影响藻类群落结构的时空演替.

关键词:控藻; 人工强制; 混合; 扬水曝气系统; 藻类群落; 峡谷分层型水源水库
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2166-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201910036

Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir

WANG Chen-xu[1,2], HUANG Ting-lin[1,2*], LI Nan[1,2], QI Yun-zhi[3], XU Jin-lan[1,2], SI Fan[1,2], ZHANG Han[1,2], LU Lin-chao[1,2]
(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Xi'an Water Group Heihe Jinpen Reservoir Management Company, Xi'an 710401, China)

Abstract: To explore the effect mechanism of the artificial mixing process on the temporal and spatial succession of algae community structure in a water body, this study used water-lifting aerators to induce in-situ artificial mixing of the water body of Jinpen Reservoir, and in-situ spot physical-chemical parameters and algae of the water body of the reservoir were observed during an artificial mixing process. A total of 51 species of 28 genera of 6 families of algae were identified in the water body of the Jinpen Reservoir. The artificial mixing effect of the water-lifting aerators significantly inhibited the growth of algae in the water, and had a significant impact on the community structure. Before activation of the water-lifting aerators, algae were mainly distributed in the surface water body, and *Chlorella vulgaris* was the dominant species. With the operation of the water-lifting aerators, the algal density of surface water body decreased significantly, and the vertical distribution of the algae density in the water body tended to be uniform. The dominant species tended to succeed in *Cyclotella* sp. This study used the method of redundancy analysis, combined with critical depth theory and the characteristics of algae growth, to analyze the relationship between the spatial-temporal succession of algae community structure and the changes in the main physical-chemical parameters in Jinpen Reservoir during the artificial process. The analysis results showed that the artificial mixing of the water-lifting aerators mainly affects the temporal and spatial succession of the algae community structure by rapidly destroying the thermal stratification stability of the water body and significantly increasing the water mixing depth.

Key words: algae control; artificial; mixing; water-lifting aerators; algae community; valley stratified water source reservoir

近年来,随着地下水开采被严格限制,我国大部分地区已经将水库作为主要的饮用水供水水源[1]. 然而水库极大地改变了天然河流原有的水动力条件,具有水体水力停留时间长、水动力条件弱等特点[2],在温度、光照和营养盐等条件适宜时,水体藻类会过量生长,甚至造成水华现象[3]. 水体水华现象的产生会导致鱼类大量死亡、水体嗅味以及有机质大幅增加等水质严重恶化问题,破坏水体生态健康,增加后续水厂水处理难度和成本[4]. 目前,大量国内外学者已经对藻类原位控制技术进行了研究[4~7],其中,扬水曝气技术通过直接对水体进行强制混合来达到控制水体藻类生长的目的[8]. 一些学者对扬水曝气系统的控藻过程进行了研究,Sun

收稿日期: 2019-10-08; **修订日期**: 2019-12-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51979217);陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-020)
作者简介: 王晨旭(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为水处理与微污染控制,E-mail: wcx1154729747@163.com
* 通信作者,E-mail:huangtinglin@xauat.edu.cn

等[4]从水动力和数值模拟的角度对金盆水库不同类型扬水曝气系统的原位控藻效果进行了研究，巨拓等[9]初步探讨了扬水曝气系统对金盆水库水质的改善作用，黄廷林等[10]研究了扬水曝气系统对周村水库水体藻类的控制效果. 此外，也有大量国内外学者对自然条件下湖库藻类群落结构时空演替进行了研究，Otu 等[11]研究了加拿大萨斯喀彻温省迪芬贝克湖的藻类群落结构季节性演替和年际变化特性，Cao 等[12]、夏莹霏等[13]和彭凯等[14]对国内天然湖泊中藻类群落结构的季节演替特征及其影响因素进行了研究，俞焰等[15]研究了特大山谷深水型新安江水库热分层期间藻类群落结构的垂向分布特征. 然而，目前对扬水曝气系统的人工强制混合作用下水库水体藻类群落结构时空演替的研究却鲜见报道.

本文以金盆水库为研究对象，采用原位定点监测的方法，对该水库扬水曝气系统的人工强制混合过程中水体藻类群落结构时空演替进行分析，探究扬水曝气系统的人工强制混合作用对水体藻类群落结构时空演替的影响机制，以期为扬水曝气系统控藻和水库水质管理提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　水库概况

金盆水库地处陕西省西安市周至县境内，是西安市的主要饮用水水源地，水库有效库容 1.77 亿 m^3，水域面积 4.55 km^2，水库坝高 130 m，底宽 100 m，正常蓄水时水面宽约 500 m，最大水深为 95 m，上宽下窄，属于典型的峡谷深水型水库. 金盆水库属暖温带半干燥、半湿润大陆性气候，年内气温变化较大，水体在夏季存在明显的热分层结构.

针对热分层期水体藻类过量繁殖的问题，金盆水库主库区安装 8 台扬水曝气器(图 1)对库区水体进行原位人工强制混合控藻. 扬水曝气器能够持续将底部低温水体提至表层，形成自下向上的水流，同时，被提至表层的低温水体不断向下掺混，促进表层水体混合，从而实现对水体的人工强制混合[8]. 2018 年扬水曝气系统运行周期为 6 月 19 日 ~7 月 5 日和 8 月 21 日 ~11 月 4 日.

1.2　采样点和采样时间

8 台扬水曝气器在主库区均匀分布，扬水曝气系统的人工强制混合过程中，主库区所有点的水体理化参数和藻类时空变化规律基本一致，因此，本研究在主库区选取靠近①号扬水曝气器 50 m 处的采样点，该采样点位于水库主库区库心最深处以及引水塔取水口前，能够很好地反映主库区水体藻类群落结构垂向分布变化特点和供水水质情况(图 1). 本研究于 2018 年扬水曝气系统运行期间对该采样点的垂向断面进行原位监测，根据水体热分层特征和藻类垂向分布特点，垂向设置 9 个采样点，水深分别为：表层水体(0.5、2、5、7 和 10 m)，中层水体(20 m 和 40 m)，底层水体(60 m 和 80 m). 采样监测频率为 1 周 1 次.

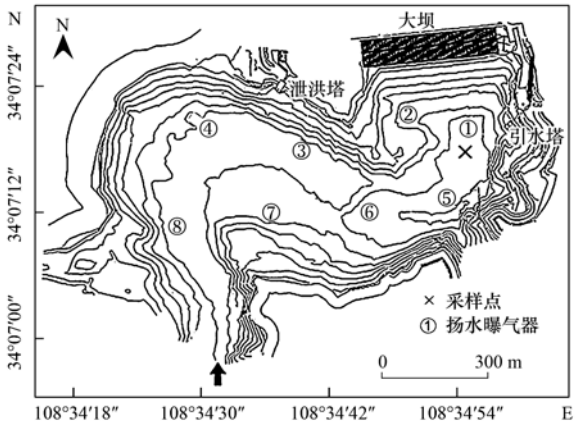

图 1　金盆水库主库区采样点及扬水曝气器分布示意

Fig. 1　Distribution of sampling site and water-lifting aerators in Jinpen Reservoir

1.3　样品采集与分析鉴定

(1)水体理化参数测定　水体垂向水温和叶绿素 a(Chl-a)等参数用 HACH Hydrolab DS5 型多参数水质测定仪(美国哈希公司)进行原位测定，深度间隔为 1 ~5 m. 水下光照强度用 MODEL ZDS-10W-2D 照度计原位测定，深度间隔为 0.5 m. 用直立式有机玻璃采样器在藻类能够进行光合作用的表层水体(水深 0.5 m 处)采集 500 mL 水样，装入高密度聚乙烯瓶中立即运回现场实验室，保存于 4℃冰箱，在 24 h 内完成对溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、硝酸盐氮(NO_3^--N)和氨氮(NH_4^+-N)等参数的测定[16].

(2)水体藻类采集与鉴定　用直立式有机玻璃采样器从各水层采样点均采集 500 mL 水样，装入高密度聚乙烯瓶中，现场加入 7.5 mL 鲁戈试剂固定，带回现场实验室静置沉淀浓缩至 10 mL，然后取 0.1 mL 样品放入藻类计数框，在 10 × 40 倍的 OLYMPUS-CX31 生物显微镜下对藻类种属进行鉴定与计数[17].

1.4　RWCS/H 指数计算

RWCS/H 指数能够表征水体热分层稳定性，m^{-1}. RWCS/H 指数越低，水体热分层稳定性越差. 按以下公式计算[18]：

$$RWCS/H = [(D_h - D_s)/(D_4 - D_5)]/H$$

式中，D_h 为底层水体密度，$kg \cdot m^{-3}$；D_s 为表层水体

密度,kg·m^{-3};D_4 和 D_5 分别为纯水 4℃和 5℃时的密度,kg·m^{-3};H 为水深,m.

水体密度主要由水温决定,由水温(T)计算水体密度(ρ_T)的公式[18]:

$$\rho_T = 1\,000 \times \left[1 - \frac{(T + 288.941\,4)(T - 3.986\,3)^2}{508\,929.2 \times (T + 68.129\,36)}\right]$$

式中,ρ_T 为水体密度,kg·m^{-3};T 为水体温度,℃.

1.5 真光层深度(Z_{eu})和混合深度(Z_{mix})计算

真光层深度(Z_{eu})是指藻类能够有效进行光合作用的水体深度,一般取 1% 水面光照强度所对应的水深[19],由光照强度数据按照朗伯比尔定律拟合得出,即水下光照强度随水深衰减计算公式[20]:

$$E(h) = E(0)\exp(-K \times h)$$

式中,$E(0)$和 $E(h)$分别为水深 0 m 处和 h 处的光照度,lx;K 为水下光衰减系数;h 为水深,m.

混合深度(Z_{mix})是指垂向混合充分的水体深度,m,根据水温估计,本研究取与表层水温相差 1℃所对应的水深[3,21].

1.6 数据收集与处理

气温数据从水库现场气象站获得;采用 Microsoft Excel 2007 软件导出和处理数据;采用 ORIGIN 2018 软件作图及进行线性回归拟合;采用 CANOCO 4.5 软件进行去趋势对应分析(DCA),梯度长度为 2,所以选用线性模型中的冗余分析(RDA)方法对藻类群落主要种属和理化参数之间的关系进行多元统计分析,排序筛选出影响藻类群落主要种属的主要理化参数.

2 结果与分析

2.1 温度及 RWCS/H 指数变化

扬水曝气系统的人工强制混合作用对金盆水库水温和水体热分层稳定性产生显著影响. 由图 2 可知,自然状况下,水库水温和 RWCS/H 指数变化与气温变化趋势大致相同;扬水曝气系统第一次运行期间,气温高于水温,介于 20.64 ~ 27.94℃之间,而水温和 RWCS/H 指数不断降低,水温由 23.18℃降至 19.63℃,RWCS/H 指数由 3.93 m^{-1}降至 2.23 m^{-1};扬水曝气系统第二次运行后的 3 周内(8 月 21 日 ~9 月 11 日),大多数时间内气温高于水温,介于 19.30 ~ 29.79℃之间,而水温和 RWCS/H 指数不断降低,水温由 27.07℃降至 22.65℃,RWCS/H 指数由 5.16 m^{-1}降至 2.76 m^{-1}. 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用能够迅速降低金盆水库表层水温和破坏水体热分层稳定性,进而影响水体藻类的生长分布状况.

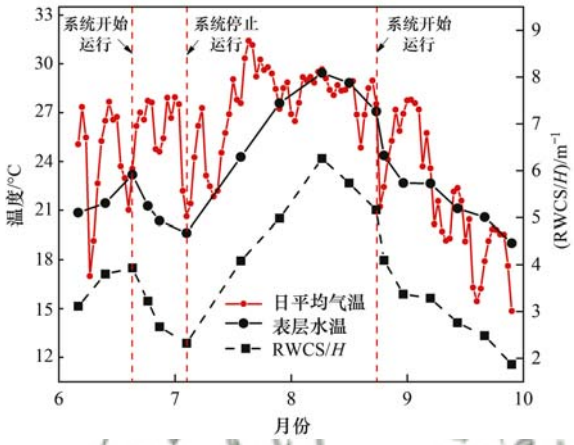

图 2 金盆水库气温、水温和 RWCS/H 时间变化

Fig. 2 Temporal changes in air temperature, water temperature, and RWCS/H in Jinpen Reservoir

2.2 水体真光层、混合深度变化

Z_{eu}/Z_{mix}值是临界层理论(critical depth theory)中的主要参数,能够反映水体中藻类对光的可利用性[22]. 由图 3 可知,金盆水库水体真光层深度(Z_{eu})随时间变化较小,介于 4.90 ~ 7.38 m 之间. 在扬水曝气系统运行期间,人工强制混合作用迅速降低表层水温,增大表层水体密度,导致表层水体不断下潜,水体持续被混合,因此,水体混合深度(Z_{mix})随时间迅速增大,Z_{eu}/Z_{mix}值迅速减小. 扬水曝气系统第一次运行期间,水体混合深度(Z_{mix})由 0.67 m 增至 12.22 m,平均增加速率为 0.83 m·d^{-1},Z_{eu}/Z_{mix}

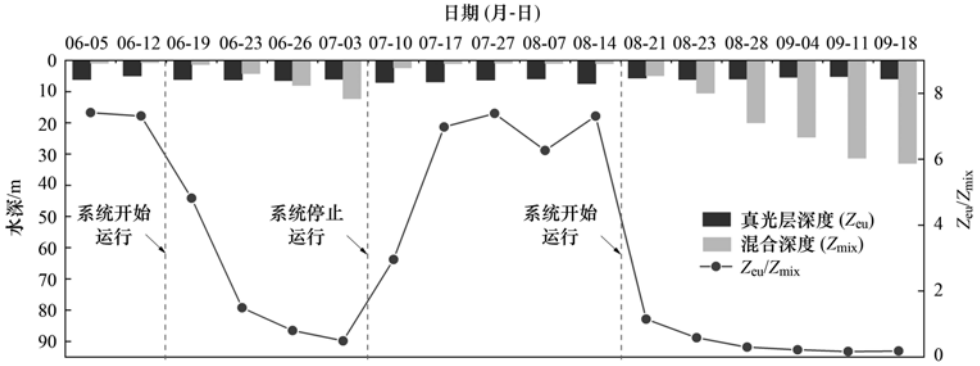

图 3 金盆水库真光层深度(Z_{eu})、混合深度(Z_{mix})和 Z_{eu}/Z_{mix}时间变化

Fig. 3 Temporal changes in the euphotic zone, mixing zone, and Z_{eu}/Z_{mix} ratio in Jinpen Reservoir

值由 7.31 减至 0.49；扬水曝气系统第一次运行停止后，水体混合深度（Z_{mix}）迅速减小，Z_{eu}/Z_{mix} 值迅速增大，Z_{eu}/Z_{mix} 值介于 6.27 ~ 7.39 之间；扬水曝气系统第二次运行后的 3 周内（8 月 21 日 ~ 9 月 11 日），水体混合深度（Z_{mix}）由 1.07 m 增至 31.26 m，平均增加速率为 1.44 m·d^{-1}，Z_{eu}/Z_{mix} 值由 7.30 减至 0.17. 结果表明，扬水曝气系统的人工强制混合作用能够迅速增大水体混合深度（Z_{mix}），进而影响藻类的垂向分布及其对光的可利用性.

2.3　叶绿素 a 及藻密度垂向分布

叶绿素 a 含量和藻密度是表征藻类数量的主要指标，并且二者变化规律大致相同. 由图 4（a）和 4（b）可知，扬水曝气系统第一次运行前（6 月 12 日和 6 月 19 日），水体叶绿素 a 浓度和藻密度的垂向分布存在显著差异，表层水体（水深 5 m 以上）叶绿素 a 浓度和藻密度显著高于中、底层水体，并随时间逐渐增大，水体垂向上叶绿素 a 浓度的峰值由 13.59 μg·L^{-1}增至 16.57 μg·L^{-1}，藻密度的峰值由 7.06 × 10^6 cells·L^{-1}增至 8.39 × 10^6 cells·L^{-1}，中、底层水体叶绿素 a 浓度和藻密度较低；扬水曝气系统第一次运行后，表层水体叶绿素 a 浓度和藻密度显著降低，底层水体叶绿素 a 浓度和藻密度略有升高，水体叶绿素 a 浓度和藻密度的垂向分布趋于均匀，扬水曝气系统第一次运行停止前（7 月 3 日），水体垂向上叶绿素 a 浓度和藻密度的峰值分别降至为 7.37 μg·L^{-1}和 4.06 × 10^6 cells·L^{-1}. 由图 4（c）和 4（d）可知，扬水曝气系统第二次运行前（8 月 14 日和 8 月 21 日），水体叶绿素 a 浓度和藻密度的垂向分布存在显著差异，表层水体（水深 5 m 以上）叶绿素 a 浓度和藻密度显著高于中、底层水体，并随时间逐渐增大，水体垂向上叶绿素 a 浓度的峰值由 13.84 μg·L^{-1}增至 15.91 μg·L^{-1}，藻密度的峰值由 7.05 × 10^6 cells·L^{-1}增至 7.69 × 10^6 cells·L^{-1}，中、底层水体叶绿素 a 浓度和藻密度较低；扬水曝气系统第二次运行后，表层水体叶绿素 a 浓度和藻密度显著降低，底层水体叶绿素 a 浓度和藻密度略有升高，水体叶绿素 a 浓度和藻密度的垂向分布趋于均匀，扬水曝气系统第二次运行 4 周后（9 月 18 日），水体垂向上叶绿素 a 浓度和藻密度的峰值分别降至为 7.82 μg·L^{-1}和 4.17 × 10^6 cells·L^{-1}. 结果表明，扬水曝气系统的人工强制混合作用能够显著降低表层水体的叶绿素 a 浓度和藻密度，并改变其垂向分布特征.

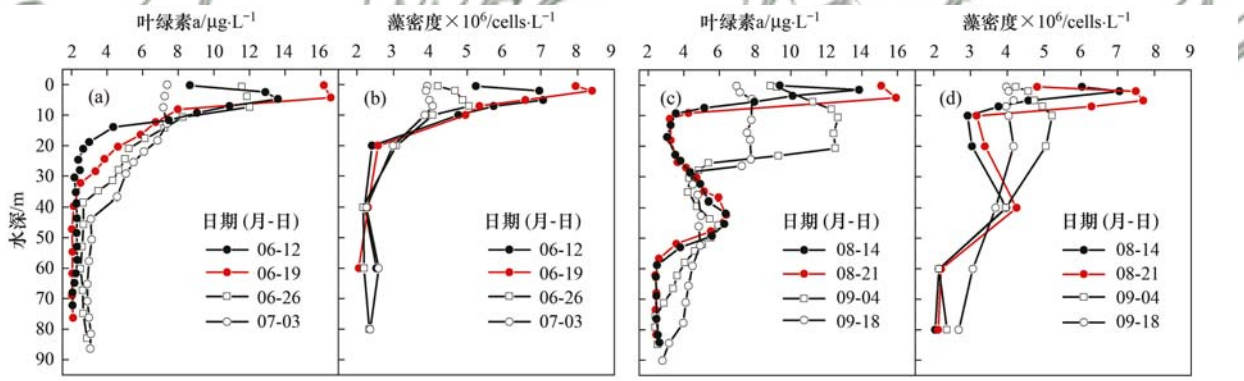

图 4　金盆水库人工强制混合过程中叶绿素 a 和藻密度垂向分布

Fig. 4　Vertical distribution of chlorophyll-a and algae density during artificial mixing in Jinpen Reservoir

2.4　藻类群落结构时空分布

2.4.1　藻类群落种属构成

金盆水库水体中共鉴定出藻类 6 门 28 属 51 种，其中绿藻门种属最多，13 属 24 种，占总种数 47%；其次为硅藻门，9 属 21 种，占 41%；蓝藻门 3 属 3 种，占 6%；裸藻门 1 种、甲藻门 1 种、金藻门 1 种（表 1）. 相比于绿藻门和硅藻门种属，蓝藻门种属的最适生长温度较高，为 30 ~ 35℃[23]，金盆水库全年表层水温均处于 30℃以下，因此，金盆水库水体藻类群落主要由绿藻门和硅藻门种属组成. 扬水曝气系统运行前，金盆水库表层水温较高，水体热分层稳定性较强，因此，水体中绿藻门种属最多. 扬水曝气系统运行后，表层水体温度迅速降低，水体热分层稳定性被破坏（图 2），因此，绿藻门种属数量逐渐减少，硅藻门种属数量逐渐增加.

2.4.2　藻类群落主要种属时间变化

由图 5 可知，扬水曝气系统第一次运行前，金盆水库表层水体藻密度迅速增加，水体藻类群落主要种属包括小球藻（*Chlorella vulgaris*）、栅藻属（*Scenedesmus* sp.）、蹄形藻属（*Kirchneriella* sp.）、微小四角藻（*Tetraedron minimum*）和小环藻属（*Cyclotella* sp.）等，其中小球藻（*Chlorella vulgaris*）密度和相对丰度不断增加，小环藻属（*Cyclotella* sp.）密度和相对丰度不断减少；扬水曝气系统第一次运行后，金盆水库表层水体藻密度迅速减少，由 7.06 × 10^6 cells·L^{-1} 减至 3.95 × 10^6 cells·L^{-1}，

表 1 金盆水库藻类群落结构

Table 1 Algae community structure in Jinpen Reservoir

门	属	种	各门占比
绿藻门(Chlorophyta)	小球藻属(*Chlorella* sp.)	1	47%
	角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)	3	
	鼓藻属(*Cosmarium* sp.)	2	
	四角藻属(*Tetraedron* sp.)	1	
	盘星藻属(*Pediastrum* sp.)	2	
	卵囊藻属(*Oocystis* sp.)	2	
	栅藻属(*Scenedesmus* sp.)	6	
	蹄形藻属(*Kirchneriella* sp.)	2	
	壳衣藻属(*Phacotus* sp.)	1	
	胶网藻属(*Dictyosphaerium* sp.)	1	
	空星藻属(*Coelastrum* sp.)	1	
	顶棘藻属(*Chodatella* sp.)	1	
	粗刺藻属(*Acanthosphaera* sp.)	1	
硅藻门(Bacillariophyta)	小环藻属(*Cyclotella* sp.)	3	41%
	针杆藻属(*Synedra* sp.)	2	
	卵形藻属(*Cocconeis* sp.)	1	
	直链藻属(*Melosira* sp.)	2	
	舟形藻属(*Navicula* sp.)	3	
	短缝藻属(*Eunotia* sp.)	2	
	菱形藻属(*Nitzschia* sp.)	2	
	桥弯藻属(*Cymbella* sp.)	4	
	双菱藻属(*Surirella* sp.)	2	
蓝藻门(Cyanophyta)	微囊藻属(*Microcystis* sp.)	1	6%
	色球藻属(*Chroococcus* sp.)	1	
	颤藻属(*Oscillatoria* sp.)	1	
裸藻门(Euglenophyta)	扁裸藻属(*Phacus* sp.)	1	2%
金藻门(Chrysophyta)	鱼鳞藻属(*Mallomonas* sp.)	1	2%
甲藻门(Dinophyta)	角甲藻属(*Ceratium* sp.)	1	2%

其中,小球藻(*Chlorella vulgaris*)密度大幅减少,由 5.28×10^6 cells·L^{-1} 减至 2.20×10^6 cells·L^{-1},相对丰度由 74.69% 减至 55.63%,小环藻属(*Cyclotella* sp.)密度不断增加,由 0.81×10^6 cells·L^{-1} 增至 1.00×10^6 cells·L^{-1},相对丰度由 11.50% 增至 30.22%,栅藻属(*Scenedesmus* sp.)密度略有减少,由 0.24×10^6 cells·L^{-1} 减至 0.10×10^6 cells·L^{-1},蹄形藻属(*Kirchneriella* sp.)和微小四角藻(*Tetraedron minimum*)密度较少,并维持一定数量. 扬水曝气系统第一次运行停止后,金盆水库表层水体藻密度不断增加,水体藻类群落主要种属包括小球藻(*Chlorella vulgaris*)、角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)、微小四角藻(*Tetraedron minimum*)、小环藻属(*Cyclotella* sp.)和扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)等,其中小球藻(*Chlorella vulgaris*)密度和相对丰度不断增加,小环藻属(*Cyclotella* sp.)密度和相对丰度不断减少;扬水曝气系统第二次运行后,金盆水库表层水体藻密度迅速减少,由 6.14×10^6 cells·L^{-1} 减至 3.77×10^6 cells·L^{-1},其中,小球藻(*Chlorella vulgaris*)密度大幅减少,由 4.14×10^6 cells·L^{-1} 减至 1.49×10^6 cells·L^{-1},相对丰度由 67.49% 减至 39.59%,小环藻属(*Cyclotella* sp.)密度不断增加,由 0.65×10^6 cells·L^{-1} 增至 1.52×10^6 cells·L^{-1},相对丰度由 10.55% 增至 40.19%,角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)密度逐渐减少,由 0.63×10^6 cells·L^{-1} 减至 0.29×10^6 cells·L^{-1},微小四角藻(*Tetraedron minimum*)和扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)密度较少,并维持一定数量. 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用能够迅速降低表层水体藻密度,促使藻类群落的优势种属逐渐由小球藻(*Chlorella vulgaris*)向小环藻属(*Cyclotella* sp.)演替.

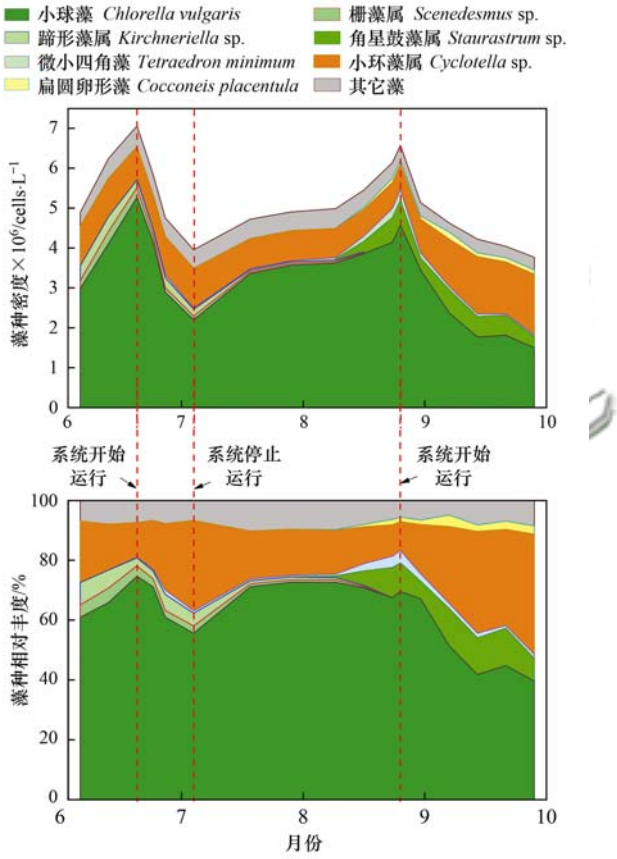

图 5 金盆水库藻类群落主要种属时间变化

Fig. 5 Temporal variations in main species of algae community in Jinpen Reservoir

2.4.3 藻类群落主要种属垂向分布变化

扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水体藻类群落主要种属密度垂向分布如图 6 所示. 扬水曝气系统第一次运行前(6 月 19 日),水体藻类群落主要种属密度的垂向分布存在显著差异,均呈现出“表层水体高、底部水体低”的特点;扬水曝气系统第一次运行后,水体中藻类群落主要种属密度的垂向分布趋于均匀,扬水曝气系统第一次运行停止前(7 月 3 日),水深 10 m 以上水体藻类群落主要种属密度垂向分布较为均匀. 扬水曝

气系统第一次运行停止后，表层水体藻类数量逐渐增多，底层水体藻类数量变化较小，水体藻类群落主要种属密度的垂向分布再次呈现出差异性，直至扬水曝气系统第二次运行前（8 月 21 日），水体藻类群落主要种属密度的垂向分布存在显著差异，均呈现出“表层水体高、底部水体低”的特点；扬水曝气系统第二次运行后，水体中藻类群落主要种属密度的垂向分布趋于均匀，扬水曝气系统第二次运行 4 周后（9 月 18 日），水深 40 m 以上水体藻类群落主要种属密度垂向分布较为均匀. 结果表明，扬水曝气系统的人工强制混合作用能够显著改变水体藻类群落主要种属密度的垂向分布，使其垂向分布趋于均匀.

2.5　营养盐条件

金盆水库表层水体中营养盐浓度如表 2 所示，氮营养盐的主要形态为氨氮（NH_4^+-N）和硝酸盐氮（NO_3^--N），二者之和在溶解性总氮（DTN）中的占比介于 65.2% ~ 96.0% 之间. 其中，氨氮（NH_4^+-N）浓度介于 0.030 ~ 0.110 mg·L^{-1} 之间，硝酸盐氮（NO_3^--N）和溶解性总氮（DTN）浓度分别介于 0.710 ~ 1.170 mg·L^{-1} 和 0.967 ~ 1.380 mg·L^{-1} 之间，能够为藻类生长提供充足的氮营养盐. 磷营养盐浓度较低，溶解性总磷（DTP）浓度介于 0.001 ~ 0.013 mg·L^{-1} 之间.

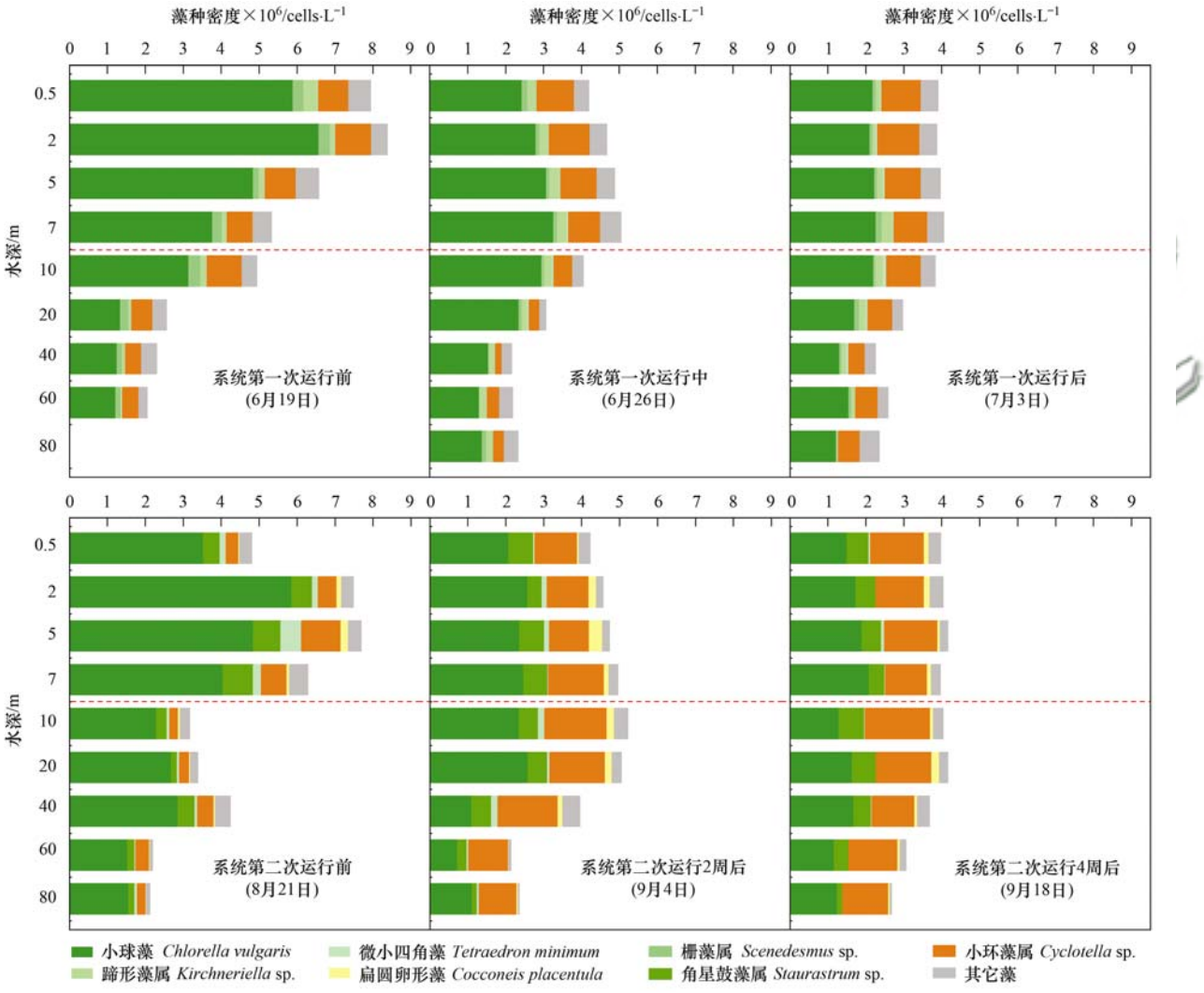

图 6　金盆水库人工强制混合过程中藻类群落主要种属垂向分布

Fig. 6　Vertical distribution of main species of algae community during artificial mixing in Jinpen Reservoir

表 2　金盆水库人工强制混合过程中表层水体（水深 0.5 m 处）营养盐因子

Table 2　Nutrient factors of surface water (0.5 m depth) during artificial mixing in Jinpen Reservoir

营养盐因子	日期（月-日）									
	06-19	06-23	06-26	07-03	08-21	08-23	08-28	09-04	09-11	09-18
硝酸盐氮（NO_3^--N）/mg·L^{-1}	1.170	1.130	1.130	1.060	0.730	0.710	0.760	0.860	1.060	0.893
氨氮（NH_4^+-N）/mg·L^{-1}	0.030	0.050	0.030	0.110	0.040	0.040	0.040	0.053	0.050	0.053
溶解性总氮（DTN）/mg·L^{-1}	1.250	1.370	1.330	1.380	1.050	1.150	0.967	1.145	1.270	1.146
溶解性总磷（DTP）/mg·L^{-1}	0.002	0.010	0.001	0.004	0.005	0.010	0.001	0.002	0.006	0.013

2.6 藻类群落主要种属与理化参数的 RDA 分析

根据金盆水库水体藻类群落中各种属密度和出现频率,选取主要种属与理化参数进行冗余分析(RDA).结果显示,4 个排序轴种属和理化参数的相关系数均为 1.000,表明藻类群落主要种属和理化参数之间相关性很强,轴 1 和轴 2 为主排序轴,特征值分别为 0.883 和 0.043,对藻类群落变化的解释度达到 92.6%.水体混合深度(Z_{mix})、Z_{eu}/Z_{mix} 和 RWCS/H 是影响金盆水库水体藻类群落主要种属的最主要理化参数.其中,总藻密度、小球藻(*Chlorella vulgaris*)、栅藻属(*Scenedesmus* sp.)和蹄形藻属(*Kirchneriella* sp.)与 Z_{eu}/Z_{mix}、RWCS/H 和水温呈正相关,与水体混合深度(Z_{mix})呈负相关;小环藻属(*Cyclotella* sp.)和扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)与水体混合深度(Z_{mix})呈正相关,与 Z_{eu}/Z_{mix}、RWCS/H 和水温呈负相关;角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)与水体混合深度(Z_{mix})呈正相关(图 7).

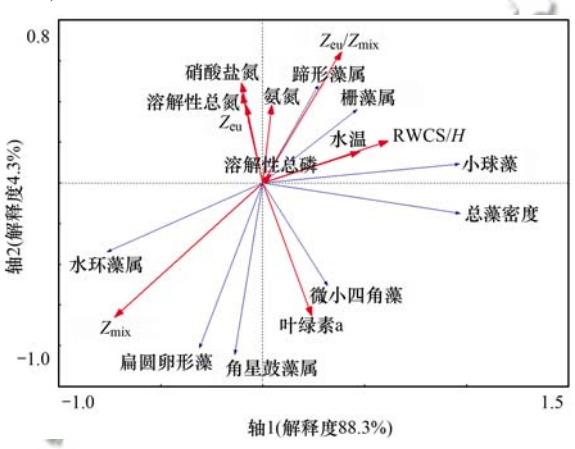

图 7 金盆水库藻类群落主要种属和理化参数之间的 RDA 排序

Fig. 7 RDA sequencing of the relationship between major species of algae community and physical-chemical parameters in Jinpen Reservoir

3 讨论

3.1 温度对藻类生长的影响

温度能够通过影响藻类细胞内酶的活性来影响其光合作用和生长代谢活动的强弱[23],金盆水库水体藻密度与水温呈正相关关系(图 8),结果表明,水温升高导致藻类生长活性升高,会促进藻类的生长繁殖,反之,会抑制藻类的生长繁殖,与目前众多湖库藻类相关研究的结论一致[24~28].扬水曝气系统的人工强制混合作用对金盆水库水温和水体藻密度影响显著.两次扬水曝气系统运行过程中,金盆水库表层水温和表层水体藻密度均迅速降低(图 2 和图 5),结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用能够迅速降低金盆水库表层水温,进而抑制藻类的生长繁殖过程.但是,通过对金盆水库两次扬水曝气系统运行过程中的表层水温和表层水体藻密度变化进行比较可知,第一次系统运行过程中的表层水温低于第二次系统运行过程中的(图 2),然而第一次系统运行过程中的表层水体藻密度却多于第二次系统运行过程中的(图 5).结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水温并不是影响水体藻类的最主要理化参数,与 RDA 分析结果一致(图 7).

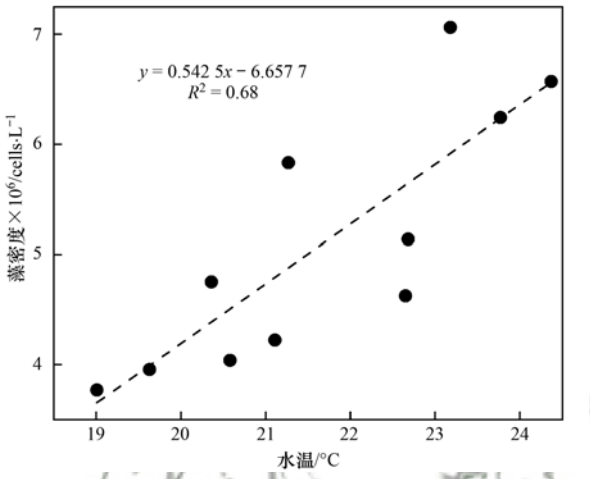

图 8 金盆水库藻密度与水温的关系

Fig. 8 Relationship between algal density and water temperature in Jinpen Reservoir

3.2 混合深度对藻类垂向分布的影响

Sverdrup[22]为解释海洋水体春季藻类暴发建立了临界层理论(critical depth theory),该理论认为,假设水温和营养盐条件适宜,当海洋水体出现热分层结构时,$Z_{mix} \leqslant Z_{eu}$(即 $Z_{eu}/Z_{mix} \geqslant 1$),表层水体水动力条件较稳定,藻类在真光层水体中停留时间较长,因此藻类可以充分进行光合作用,引起藻类暴发.近年来,一些研究[7,21,25,29~33]表明临界层理论可以较好地用于解释淡水湖库水体热分层结构对水体藻类生消的影响.金盆水库水体藻密度与水体混合深度(Z_{mix})呈负相关关系(图 9),结果表明,水体混合深度(Z_{mix})增大会减少表层水体藻密度,反之,会增加表层水体藻密度,进而影响水体藻类垂向分布.扬水曝气系统的人工强制混合作用对金盆水库水体混合深度(Z_{mix})影响显著,扬水曝气系统运行后,水体混合深度(Z_{mix})随时间迅速增大,Z_{eu}/Z_{mix} 值随时间迅速减小至 1 以下(图 3).一方面,水体混合深度(Z_{mix})迅速增大导致水体垂向掺混能力迅速增加,表层水体大量的藻类在垂向上迅速消散,有效降低了表层水体中的藻密度,使水体藻类垂向分布逐渐趋于均匀(图 5 和图 6);另一方面,水体混合深度(Z_{mix})不断增大会导致藻类在真光层水体中的停留

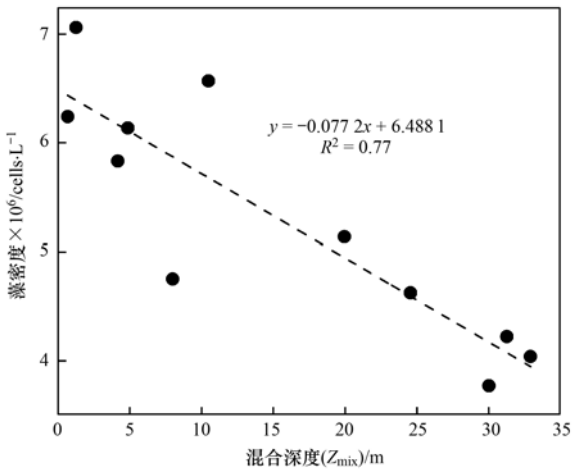

图 9　金盆水库藻密度与混合深度(Z_{mix})的关系

Fig. 9　Relationship between algal density and mixing depth in Jinpen Reservoir

时间降低,减弱藻类对光的可利用性,从而有效地抑制水体中藻类的光合作用,降低水体的初级生产力,水体藻类不断减少(图 5 和图 6). 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用能够显著增大金盆水库水体混合深度(Z_{mix})和减小 Z_{eu}/Z_{mix} 值,降低表层水体藻密度,进而改变水体藻类的垂向分布,当 Z_{eu}/Z_{mix} 值≤1 时,水体中藻类的光合作用被抑制. 通过对金盆水库两次扬水曝气系统运行过程中的水体混合深度(Z_{mix})和水体藻类群落主要种属密度变化进行比较可知,第一次系统运行过程中的水体混合深度(Z_{mix})增加速率显著低于第二次系统运行过程中的(图 3),第一次系统运行过程中的水体藻类群落优势种属演替速率也显著低于第二次系统运行过程中的(图 5). 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水体混合深度(Z_{mix})是影响水体藻类的最主要因素,与 RDA 分析结果一致(图 7).

3.3　营养盐对藻类生长的影响

氮、磷营养盐是藻类生长不可或缺的物质[20],然而,目前已有研究的结论表明[27,34],营养盐并不是影响水库藻类群落的主要理化参数. 由图 10 可知,扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水体藻密度与水体营养盐浓度不存在显著相关关系($R^2 \leq 0.33$). 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库营养盐对藻类的影响很小,不是影响藻类的最主要理化参数,与 RDA 分析结果一致(图 7).

3.4　藻类群落结构演替特性

藻类群落结构演替受其生长环境影响[20],大量

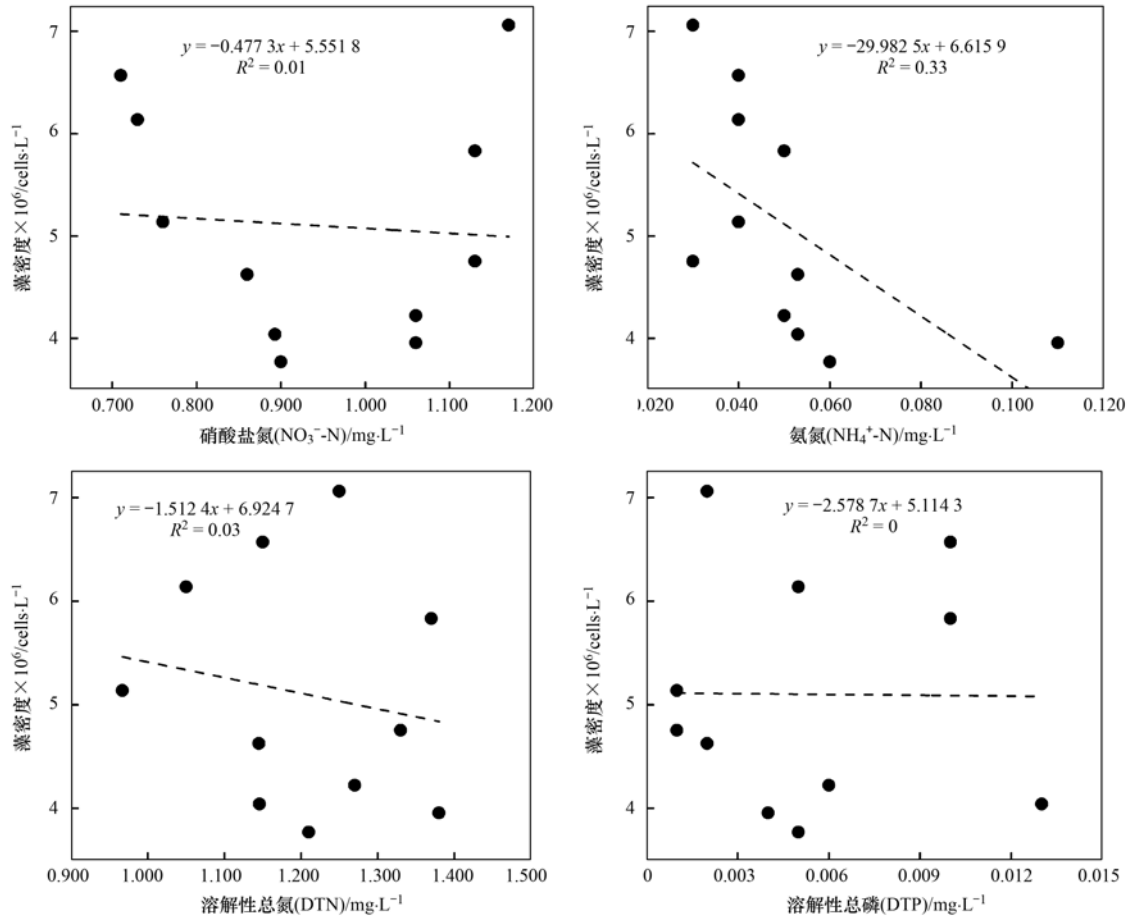

图 10　金盆水库藻密度与营养盐的关系

Fig. 10　Relationship between algal density and nutrient salt in Jinpen Reservoir

关于藻类群落结构演替的研究表明[24,34~36],水温、光照、水动力和营养盐等理化参数是影响藻类群落结构演替的主要因素. 以上讨论结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水动力参数(水体混合深度 Z_{mix}、Z_{eu}/Z_{mix} 和 RWCS/H)是影响水体藻类群落结构演替的最主要理化参数. 扬水曝气系统的人工强制混合过程中,金盆水库水体中小球藻(*Chlorella vulgaris*)和小环藻属(*Cyclotella* sp.)始终存在,其中,小球藻(*Chlorella vulgaris*)数量迅速减少,小环藻属(*Cyclotella* sp.)数量不断增加(图 5 和图 6). 小球藻(*Chlorella vulgaris*)为广布种属,对环境适应性较强,适宜在水体热分层条件下生长[27],并且小球藻(*Chlorella vulgaris*)的最适生长温度介于 25~30℃之间[23]. 小环藻属(*Cyclotella* sp.)为硅藻,硅藻个体较大且表面有一层硅质,易于沉降,适宜在垂向混合、分层较弱的水体中生长[24,26],并且小环藻属(*Cyclotella* sp.)能够较好地适应低温和弱光条件[27]. 扬水曝气系统第一次运行前,由于气温高于水温,表层水温不断升高,水体热分层结构稳定存在(图 2),水体混合深度(Z_{mix})较小,Z_{eu}/Z_{mix} 值较大(图 3),更适合小球藻(*Chlorella vulgaris*)生长,因此,小球藻(*Chlorella vulgaris*)的相对丰度不断增大,小环藻属(*Cyclotella* sp.)的相对丰度不断减小,小球藻(*Chlorella vulgaris*)为优势种属(图 5 和图 6);扬水曝气系统第一次运行后,虽然气温高于水温,但是由于扬水曝气系统的人工强制混合作用,表层水温迅速降低,水体热分层稳定性被破坏(图 2),水体混合深度(Z_{mix})显著增大,Z_{eu}/Z_{mix} 值迅速降低(图 3),此时更适合小环藻属(*Cyclotella* sp.)生长,因此,小球藻(*Chlorella vulgaris*)的相对丰度不断减小,小环藻属(*Cyclotella* sp.)的相对丰度不断增大,优势种属有向小环藻属(*Cyclotella* sp.)演替的趋势(图 5 和图 6);扬水曝气系统第一次运行停止后,由于气温高于水温,表层水温回升,水体热分层稳定性增强(图 2),水体混合深度(Z_{mix})迅速减小,Z_{eu}/Z_{mix} 值迅速增大(图 3),更适合小球藻(*Chlorella vulgaris*)生长,因此,小球藻(*Chlorella vulgaris*)的相对丰度再次不断增大,小环藻属(*Cyclotella* sp.)的相对丰度再次不断减小(图 5 和图 6);在扬水曝气系统第二次运行 4 周后(9 月 18 日),小环藻属(*Cyclotella* sp.)数量高于小球藻(*Chlorella vulgaris*),此时小环藻属(*Cyclotella* sp.)占优(图 5 和图 6). 扬水曝气系统第二次运行过程中,角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)密度维持有一定数量(图 5 和图 6),主要由于角星鼓藻属(*Staurastrum* sp.)适合在持续或半持续混合水体中生长[34]. RDA 结果显示,小球藻(*Chlorella vulgaris*)与 Z_{eu}/Z_{mix}、RWCS/H 和水温呈正相关,与水体混合深度(Z_{mix})呈负相关;小环藻属(*Cyclotella* sp.)与水体混合深度(Z_{mix})呈正相关,与 Z_{eu}/Z_{mix}、RWCS/H 和水温呈负相关(图 7). 结果表明,扬水曝气系统的人工强制混合作用能够显著影响藻类群落结构,促使金盆水库水体藻类群落的优势种属由小球藻(*Chlorella vulgaris*)逐渐向小环藻属(*Cyclotella* sp.)演替.

4 结论

(1) 人工强制混合过程中,金盆水库水体藻类共 6 门 28 属 51 种,藻类群落主要由绿藻门和硅藻门种属组成,随着扬水曝气系统运行,绿藻门种属数量逐渐减少,硅藻门种属数量逐渐增加.

(2) 人工强制混合过程中,金盆水库水体藻类群落结构发生了明显的时空演替. 在藻类垂向分布方面:扬水曝气系统运行前,表层水体藻密度高于中层和底层水体,扬水曝气系统运行后,表层水体藻密度不断降低,藻密度垂向分布趋于均匀. 在藻类群落结构演替方面:藻类群落优势种属由小球藻(*Chlorella vulgaris*)逐渐向小环藻属(*Cyclotella* sp.)演替.

(3) RDA 分析可知,水体混合深度(Z_{mix})是影响金盆水库水体藻类群落结构时空演替的关键要素,扬水曝气系统的人工强制混合作用通过迅速破坏水体热分层稳定性和显著增加水体混合深度(Z_{mix})来影响藻类群落结构的时空演替,显著抑制了藻类生长.

参考文献:

[1] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3049-3057.
Xu J, Huang T L, Li K, *et al*. Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe Reservoir[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3049-3057.

[2] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库-周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al*. Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir-Zhoucun Reservoir in north of China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1337-1344.

[3] Liu M Z, Ma J R, Li K, *et al*. Strong turbulence benefits toxic and colonial cyanobacteria in water: a potential way of climate change impact on the expansion of Harmful Algal Blooms[J]. Science of the Total Environment, 2019, **670**: 613-622.

[4] Sun X, Li X L, Zhang M D, *et al*. Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified source water reservoirs[J]. Ecological Engineering, 2014, **73**: 624-634.

[5] Chen S Y, Carey C C, Little J C, *et al*. Effectiveness of a bubble-plume mixing system for managing phytoplankton in lakes

and reservoirs[J]. Ecological Engineering, 2018, **113**: 43-51.
[6] Heo W M, Kim B. The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir[J]. Hydrobiologia, 2004, **524**(1): 229-239.
[7] 张小璐, 何圣兵, 陈雪初, 等. 扬水造流技术控藻机制研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(12): 2058-2064.
Zhang X L, He S B, Chen X C, *et al*. Studies on algal control mechanism of air circulation technology [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(12): 2058-2064.
[8] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 水体修复装置—扬水曝气器的开发[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(3): 41-45.
Cong H B, Huang T L, Miao J G, *et al*. Development of rehabilitation device for water body-water lifting aerator[J]. China Water & Wastewater, 2005, **21**(3): 41-45.
[9] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 819-828.
Ju T, Huang T L, Ma W X, *et al*. Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(5): 819-828.
[10] 黄廷林, 朱倩, 邱晓鹏, 等. 扬水曝气技术对周村水库藻类的控制[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2255-2260.
Huang T L, Zhu Q, Qiu X P, *et al*. Algae control by water-lifting aerator in Zhoucun Reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(4): 2255-2260.
[11] Otu M K, Zhang J, Raper J D, *et al*. Seasonal and inter-annual variability of phytoplankton in central Lake Diefenbaker (Saskatchewan, Canada) proximal to a large commercial aquaculture farm[J]. Journal of Great Lakes Research, 2017, **43**(2): 265-279.
[12] Cao J, Hou Z Y, Li Z K, *et al*. Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake[J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 1127-1137.
[13] 夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄, 等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 134-146.
Xia Y F, Hu X D, Xu J X, *et al*. Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(1): 134-146.
[14] 彭凯, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 183-191.
Peng K, Li T M, Liu L, *et al*. Community structure of phytoplankton and bio-assessment of water quality in Lake Luoma, northern Jiangsu Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 183-191.
[15] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1393-1402.
Yu Y, Liu D F, Yang Z J, *et al*. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-Island Lake and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1393-1402.
[16] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
[17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科技出版社, 2006.
[18] 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2258-2264.
Liu X Q, Huang T L, Li N, *et al*. Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe Reservoir during thermal stratification [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2258-2264.
[19] Zhou Q C, Zhang Y L, Li K D, *et al*. Seasonal and spatial distributions of euphotic zone and long-term variations in water transparency in a clear oligotrophic Lake Fuxian, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **72**: 185-197.
[20] 李哲. 三峡水库运行初期小江回水区藻类生境变化与群落演替特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
[21] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 774-782.
Liu X Y, Song L X, Ji D B, *et al*. Effect of the rainfall on extinction of Cyanobacteria bloom and its mechanism analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 774-782.
[22] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton[J]. ICES Journal of Marine Science, 1953, **18**(3): 287-295.
[23] 张晶晶. 不同营养条件对铜绿微囊藻和小球藻生长及竞争的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
[24] 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2688-2697.
Zheng C, Lu K H, Xu Z, *et al*. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Simianghu Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2688-2697.
[25] 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.
[26] 向蓉, 李巧玉, 喻燚, 等. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3290-3301.
Xiang R, Li Q Y, Yu Y, *et al*. Functional group characteristics of planktonic diatoms and their relationship with environmental factors in the Ruxi River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3290-3301.
[27] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 等. 温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1157-1166.
Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P, *et al*. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1157-1166.
[28] 赵巧华, 孙国栋, 王健健, 等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 385-393.
Zhao Q H, Sun G D, Wang J J, *et al*. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 385-393.
[29] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 460-465.
Wu Z X, Liu M L, Lan J, *et al*. Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 460-465.
[30] Liu L, Liu D F, Johnson D M, *et al*. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges

Reservoir: Implications for management[J]. Water Research, 2012, **46**(7): 2121-2130.

[31] Niu L X, van Gelder P H A J M, Zhang C K, *et al*. Physical control of phytoplankton bloom development in the coastal waters of Jiangsu (China)[J]. Ecological Modelling, 2016, **321**: 75-83.

[32] 张磊, 蔚建军, 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.

[33] Gray E, Mackay E B, Elliott J A, *et al*. Wide-spread inconsistency in estimation of lake mixed depth impacts interpretation of limnological processes[J]. Water Research, 2020, **168**: 115136.

[34] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 403-416.
Hu Y M, Li Q H, Zhu C C, *et al*. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 403-416.

[35] Du H B, Chen Z N, Mao G Z, *et al*. Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: a new non-equilibrium statistical approach[J]. Ecological Indicators, 2019, **102**: 686-692.

[36] Zhou B T, Shang M S, Zhang S, *et al*. Remote examination of the seasonal succession of phytoplankton assemblages from time-varying trends[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **246**: 687-694.

HUANJING K0EXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 41 No. 5
May 15, 2020

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Shanghai: Using Hourly Resolved $PM_{2.5}$ Chemical Composition Data ····· ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles ····· WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, *et al.* (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Mircro-scale Single Particle Analysis ····· ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, *et al.* (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas ····· LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, *et al.* (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Linyi ····· LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, *et al.* (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China ····· XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, *et al.* (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants ····· HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, *et al.* (2050)
$PM_{2.5}$ Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model ····· XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, *et al.* (2057)
Spatio-temporal Variation of $PM_{2.5}$ Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention ····· YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, *et al.* (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data ····· WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, *et al.* (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment ····· TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir ····· TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, *et al.* (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir ····· YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, *et al.* (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation ····· FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, *et al.* (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake ····· LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, *et al.* (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China ····· SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios ····· ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, *et al.* (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir ····· LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir ····· WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period ····· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, *et al.* (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir ····· ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, *et al.* (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River ····· GUO Yan-ni, LI Yuan-peng, SHI Yu, *et al.* (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer ····· LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, *et al.* (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China ····· JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, *et al.* (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ····· LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, *et al.* (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on *Daphnia magna* ····· XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with *Eucalyptus* Plantation, Southern China ····· ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, *et al.* (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning ····· LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, *et al.* (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed ····· LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, *et al.* (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff ····· NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, *et al.* (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments ····· BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions ····· WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, *et al.* (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^-$ System for Degradation of Benzoic Acid ····· SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, *et al.* (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations ····· DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, *et al.* (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou ····· YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, *et al.* (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers ····· ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, *et al.* (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers ····· WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, *et al.* (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR) ····· QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, *et al.* (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions ··· JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, *et al.* (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitritation and Anaerobic Ammonium Oxidation ····· CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, *et al.* (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity ····· LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, *et al.* (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils ····· WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, *et al.* (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization ····· ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, *et al.* (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties ····· FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, *et al.* (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland ····· WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration ····· WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, *et al.* (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil ····· WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, *et al.* (2425)
N_2O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills ····· ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, *et al.* (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain ····· WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, *et al.* (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields ····· GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, *et al.* (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils ····· CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, *et al.* (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest ····· WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, *et al.* (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments ····· LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, *et al.* (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013 ····· ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)