

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区锶元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析

温成成^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 孔昌昊^{1,2}, 张志刚³, 田鹏飞³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 3. 李家河水库管理有限公司, 西安 710016)

摘要: 季节性藻类水华严重威胁供水安全, 为探明北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制, 以李家河水库为例, 于2017~2020年开展长期连续高频监测, 采用传统藻群和功能藻群分类法, 并耦合局部加权回归法和边界分析模型, 提炼藻华季节性(春季和夏季)演替规律及暴发环境因子阈值。结果表明: ① 春季和夏季藻华演替规律及响应机制不同, 春季以绿藻、硅藻和甲藻为主, 而夏季以绿藻、硅藻和蓝藻为主; 其中, 春季以低温、小型且高比表面积藻为主, 而夏季以高温、大型或团状且低比表面积藻为主; 藻类生理和形态特征差异是造成季节性藻华的主要内因; ② 春季和夏季藻华主要驱动因子不同, 春季藻华主要为水温、混合层深度(Z_{mix})和光利用率(Z_{eu}/Z_{mix})控制, 而夏季藻华主要受水温、 Z_{mix} 、 Z_{eu}/Z_{mix} 和总磷(TP)的共同影响; 主驱动因子的变化差异是诱发季节性藻华的主要外因; ③ 春季和夏季藻华暴发的水环境阈值不同, 春季藻类暴发的水温、 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 阈值分别为 $>9.4^{\circ}\text{C}$ 、 $<10.9\text{ m}$ 和 >0.24 ; 而夏季藻华启动的水温、 Z_{mix} 、 Z_{eu}/Z_{mix} 和TP阈值分别为 $>16.0^{\circ}\text{C}$ 、 $<11.6\text{ m}$ 、 >0.16 和 $>0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。通过丰富藻华季节性暴发和环境阈值机制研究, 为下一步藻华控制提供了依据。

关键词: 水源水库; 富营养; 分层; 藻类水华; 暴发机制; 环境阈值

中图分类号: X171.1; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1452-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202205012

Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir

WEN Cheng-cheng^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, KONG Chang-hao^{1,2}, ZHANG Zhi-gang³, TIAN Peng-fei³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Lijiahe Reservoir Management Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Seasonal algal blooms produce a high risk for water supply safety. To explore the mechanism of seasonal algal blooms in northern eutrophic stratified reservoirs, the combination of taxonomic and functional classifications, local weighted regression (LOWESS), and Boundary line analysis (BLA) were employed to obtain the succession features and environmental thresholds of seasonal (e.g., spring and summer) algal blooms, based on the long-term and high-frequency monitoring from 2017 to 2020 in Lijiahe Reservoir. The results showed that: ① the succession and response mechanisms of algal blooms were different in spring and summer. In detail, Chlorophyta, Bacillariophyta, and Dinoflagellates (e.g., low-temperature, small, high surface-to-volume genera) dominated in spring, whereas Chlorophyta, Bacillariophyta, and Cyanobacteria (e.g., high-temperature, large or colonial, low surface-to-volume genera) dominated in summer. The differences in physiological and morphological characteristics of algae were the internal cause triggering seasonal algal blooms. ② The main drivers of algal blooms were different in spring and summer. Spring blooms were controlled by water temperature (WT), mixing depth (i.e., Z_{mix}), and light availability (i.e., Z_{eu}/Z_{mix}), whereas summer blooms were jointly influenced by WT, Z_{mix} , Z_{eu}/Z_{mix} , and total phosphorus (TP). The differences in the changes of the major drivers were external causes triggering seasonal algal blooms. ③ The water environment thresholds starting seasonal algal blooms were different in spring and summer. The thresholds of WT, Z_{mix} , and Z_{eu}/Z_{mix} in spring were $>9.4^{\circ}\text{C}$, $<10.9\text{ m}$, and >0.24 , respectively, whereas the thresholds of WT, Z_{mix} , Z_{eu}/Z_{mix} , and TP in summer were $>16.0^{\circ}\text{C}$, $<11.6\text{ m}$, >0.16 , and $>0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Based on the research on the mechanism of seasonal algal blooms and related thresholds, this work will provide a reference for the control of subsequent algal blooms.

Key words: drinking water reservoir; eutrophication; stratification; algal blooms; blooming mechanism; environmental thresholds

河流坝化(即“人工水库”)解决了水量问题,却诱发了诸多水质问题^[1~3],具体如:①流速降低,造成水体中污染物累积^[4~7],富营养化加剧;②水深加大,伴生水体自然分层,水动力条件更为稳定^[8,9],易于藻类繁殖。以上2个改变,为季节性(春季和夏季)藻华创造了有利条件^[10,11]。学者在藻华及环境因子关系方向做了大量工作^[12~14],但涉及暴发机制的报道相对少。因此,考虑到该问题在富营养分层型水体存在的普遍性和重要性,需深入探究。

就藻类季节性暴发机制的问题,涉及3个层面:

① 季节性藻华的规律和特征(藻类层面:响应问题); ② 季节性藻类暴发的关键驱动因子(生境层面:驱动问题); ③ 季节性藻华暴发的环境阈值(激发层面:响应与驱动间的关系)。针对层面①,研究指出,春季藻华多为绿藻、硅藻和甲藻,夏季以蓝藻

收稿日期: 2022-05-02; 修订日期: 2022-05-30

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(2019ZDLSF06-01, 2019ZDLSF06-02, 2022ZDLSF06-08)

作者简介: 温成成(1991~),男,博士研究生,主要研究方向为水源水库藻类演替及控制, E-mail: hitchengchengwen@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

和绿藻为主^[10],但现有门水平藻华演替规律无法有效概括藻类集体响应特征. 而藻华作为坝化水环境季节性更替的表达,反映了不同生理和形态藻类对生境变化的总体选择^[15~18],这一事实常被忽略. 例如,蓝藻的最适温度普遍高于绿藻,其次为硅藻^[19~22];更为重要的是(表 1),细胞形态(如大小和比表面积)可引发藻生长-沉降速率和被牧食的压力-速率存在差异^[23,24]. 在此背景下,生态学概念的引入,如“浮游植物功能分类法(functional groups):以藻类生理和形态特性为核心^[25~30]”,有助于该层面问题的探究. 针对层面②,已证实水温、光照、水动力条件、营养盐和浮游动物是控制藻华的主导因素^[31~37],但需进一步厘清各因子在季节藻类暴发中的具体作用. 其中,水温和光照对藻类的影响较为明确,但营养盐、水动力条件和牧食作用往往呈现多种说法. 例如,富营养和贫营养条件下均报道过藻类

水华^[38];水动力条件对藻类的影响也出现矛盾,如流速增加有利于藻类对营养盐摄取从而诱发藻华^[39],另有研究则认为流速增加削弱了藻类对光的利用率,可抑制其生长^[8]. 事实上,以上结论均合理,但涉及营养盐-水动力条件阈值^[40]和藻类差异化的生长策略问题^[16,17],这需要进一步研究. 而浮游动物牧食作用与藻类大小和季节有关^[41],这关乎易于牧食的藻类尺寸和不同季节下其生物量与活性. 因此,后续研究需建立不同季节驱动因子与藻华的关系. 针对层面③,层面②中已指出环境因子阈值研究在季节性藻类暴发中的重要性及不足,指出了不同季节不同阈值条件可催生出差异的藻华. 本研究发现 Xu 等^[42]对营养盐和蓝藻水华及 Song 等^[43]对水动力条件和甲藻水华明确了阈值条件,有助于藻华暴发机制的认知,但就不同季节藻类暴发阈值条件需进一步探究.

表 1 以个体大小为基础的浮游植物分类

Table 1 Classification of phytoplankton based on individual morphological features

| 类群 | 最大直径 D 或长度 $L/\mu\text{m}$ | 代表藻属 | 浮游植物特征 |
|-----|------------------------------|-------------------|---|
| 超微型 | <2 | 400 × 倍率下难以鉴定种类 | 生态学家及相关从业研究的重点,非水质研究和关注的重点 |
| 微型 | 2 ~ 10 | 绿藻中小球藻等 | 高生长潜力,很低沉降速率,受浮游动物牧食压力较大 |
| 小型 | 10 ~ 70 | 含蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻大部分种属 | 较高的生长潜力,无运动能力的低($<30\ \mu\text{m}$) ~ 中等($>30\ \mu\text{m}$)沉降速率,受浮游动物牧食($<70\ \mu\text{m}$)压力大 |
| 中大型 | >70 | 部分蓝藻,如铜绿微囊藻 | 生长速率中等,高沉降速率,受浮游动物牧食压力小 |

针对以上 3 个科学问题,本文以李家河水库为研究对象,就 4 a 监测中发现的藻华问题,结合传统/功能藻群分类法和边界分析模型,探究北方富营养分层型水体藻类季节性暴发机制,揭示不同季节主要环境因子对藻类暴发的驱动机制和环境阈值条件.

1 材料与方法

1.1 研究点概况

李家河水库(Lijiahe Reservoir, LJHR)位于陕西省西安市蓝田县境内(图 1),于 2015 年建成蓄水,是西安市供水水源之一. 该水库起源秦岭北麓,处于辋川河支流中段,流域面积为 362 km²,最大库容为 5.7 × 10⁷ m³,平均水深和最大水深分别为 56 m 和 80 m,水体平均滞留时间达 160 d,属暖温带半湿润大陆性气候区,年均气温为 13.1℃.

李家河水库研究期 ρ [总氮(TN)]和 ρ [总磷(TP)]分别在 2.0 ~ 4.0 mg·L⁻¹ 和 0.02 ~ 0.25 mg·L⁻¹,自然分层期从 3 月中持续至 12 月底,是典型的富营养[ρ (TN) > 1.0 mg·L⁻¹; ρ (TP) > 0.02 mg·L⁻¹]分层型水库.

为解决该水库藻华及等温层厌氧问题,于 2018

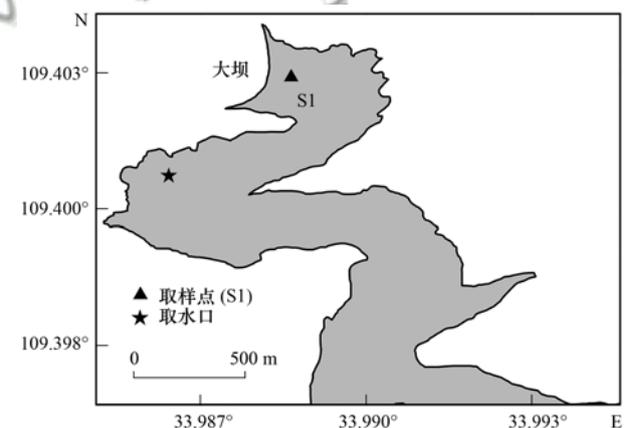
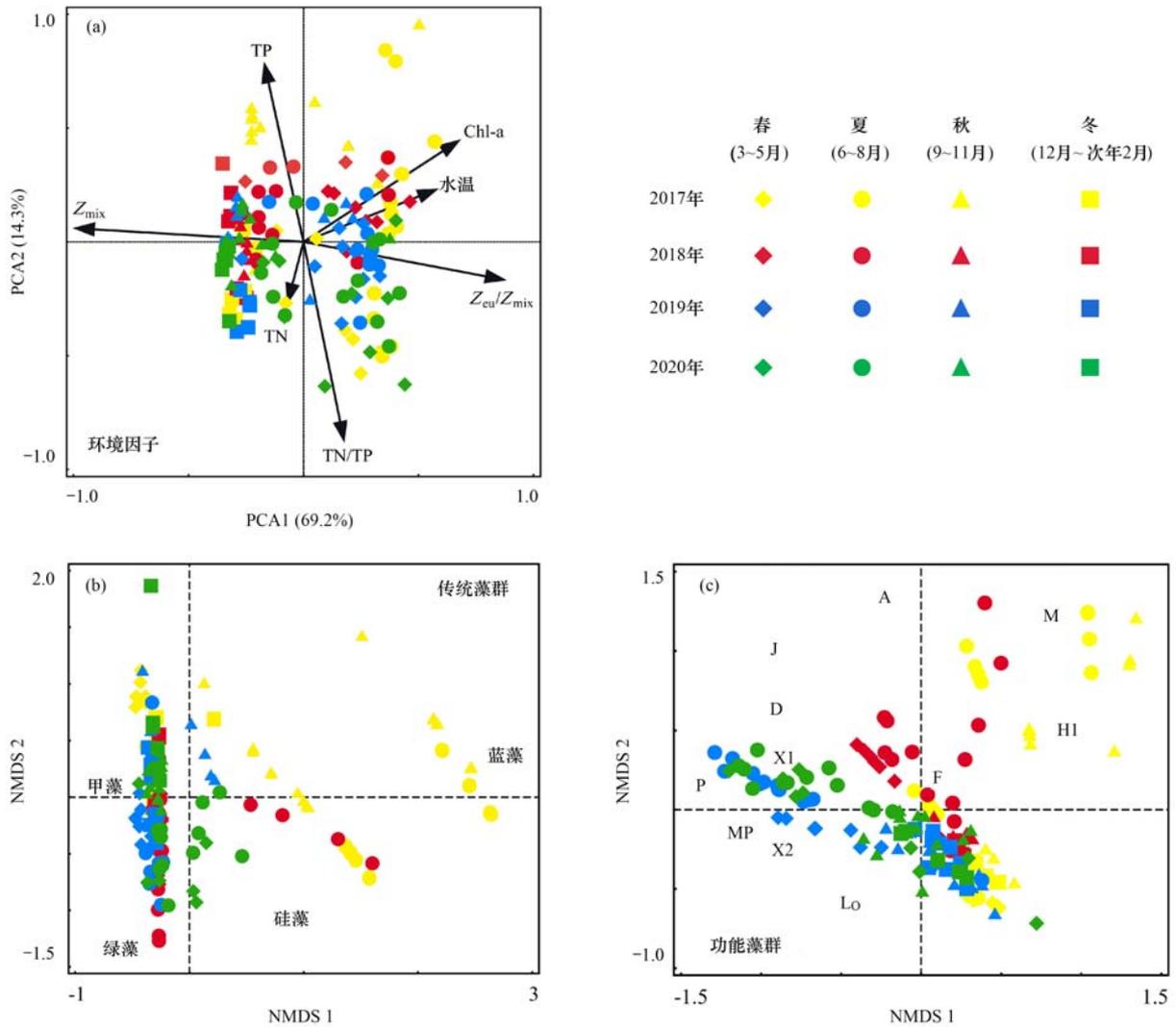


图 1 李家河水库取样点示意

Fig. 1 Location of sampling site in LJHR

年引进扬水曝气系统(water-lifting aerators, WLAs)^[44],其中 2018 ~ 2020 年运行周期分别为 6 月 20 日至 9 月 30 日、7 月 28 日至 10 月 14 日和 4 月 24 日至 9 月 17 日. 需要注意的是,系统均为间歇运行,这也是导致藻类和环境因子振荡的原因.

监测点 S1 设置于坝前深水区(见图 1),垂向设置 3 个取样深度:表层(水下 0.5 m)、中层(分层期为温跃层中部)和底层(沉积物上 0.5 m),可反映主库区水质及藻类时空变化^[8].



功能藻群: A、D、F、H1、J、L₀、M、MP、P、X1 和 X2 的具体表述见表 2

图 2 2017 ~ 2020 年环境因子 PCA 分析和传统/功能藻群 NMDS 分析

Fig. 2 PCA of environmental variables and NMDS of taxonomic and functional groups from 2017 to 2020

表 2 2017 ~ 2020 年优势藻群及代表藻种生理和形态特征¹⁾

Table 2 Dominant algal groups and physiological and morphological features of representative species from 2017 to 2020

| 功能藻群 | 优势种 | 优势群组和活跃期 | | 藻种的生理和形态特征 | | | | | 说明 | |
|----------------|-------------------------------------|----------|-------|------------|-----|-----|----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| | | 传统藻群 | 优势存在期 | 适温范围 /°C | 形态 | 运动性 | 最大尺寸 /μm | V/μm ³ | | S/V |
| A | 科曼小环藻 <i>Cyclotella</i> sp. | 硅藻 | | 10 ~ 25 | 单细胞 | 否 | < 10 | < 10 ³ | 1 ~ 2 | |
| D | 尖针杆藻, 肘状杆藻 <i>Synedra</i> sp. | 硅藻 | | 10 ~ 16 | 单细胞 | 否 | 9 ~ 75 | < 10 ³ | 1 ~ 2.5 | 春季: 以低温、小 V 且高 S/V 型藻为主 |
| L ₀ | 二角多甲藻 <i>Peridinium</i> sp. | 甲藻 | 春季 | 10 ~ 22 | 单细胞 | 是 | 10 ~ 50 | 10 ³ ~ 10 ⁴ | < 0.5 | |
| X1 | 小球藻 <i>Chlorella</i> sp. | 绿藻 | | 10 ~ 20 | 单细胞 | 否 | < 10 | < 10 ³ | 1 ~ 2 | |
| P | 微小新月藻, 纤细新月藻 <i>Closterium</i> sp. | 绿藻 | | 5 ~ 25 | 丝状 | 是 | 10 ~ 100 | < 10 ³ | 1 ~ 4 | |
| F | 颗粒直链藻 <i>Melosira</i> sp. | 硅藻 | | 20 ~ 27 | 团状 | 是 | 50 ~ 600 | 10 ³ ~ 10 ⁶ | < 1 | |
| | 蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp. | 绿藻 | | 18 ~ 37 | 团状 | 否 | 30 ~ 80 | > 10 ⁴ | < 1 | |
| H1 | 水华束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp. | 蓝藻 | | 20 ~ 28 | 丝状 | 是 | > 100 | 10 ⁴ ~ 10 ⁵ | < 0.2 | |
| J | 微小四角藻, 三叶四角藻 <i>Tetraedron</i> sp. | 绿藻 | | 17 ~ 30 | 单细胞 | 否 | 6 ~ 20 | < 10 ⁴ | 0.5 ~ 1.5 | 夏季: 以高温、大 V 或团状且低 S/V 型藻为主 |
| | 双对栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp. | 绿藻 | | 10 ~ 30 | 团状 | 否 | 16 ~ 24 | 10 ³ ~ 10 ⁴ | < 1 | |
| M | 铜绿微囊藻 <i>Microcystis</i> sp. | 蓝藻 | 夏季 | 25 ~ 30 | 团状 | 是 | > 100 | 10 ⁴ ~ 10 ⁵ | < 0.2 | |
| | 简单舟形藻, 瞳孔舟形藻 <i>Navicula</i> sp. | 硅藻 | | 4 ~ 30 | 单细胞 | 否 | 15 ~ 45 | 10 ³ ~ 10 ⁴ | 0.5 ~ 1.0 | |
| MP | 筐形短缝藻 <i>Eunotia</i> sp. | 硅藻 | | 27 ~ 31 | 单细胞 | 否 | 26 ~ 140 | 10 ³ ~ 10 ⁵ | 0.5 ~ 1.0 | |
| | 弯羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp. | 硅藻 | | 17.5 ~ 35 | 单细胞 | 否 | 50 ~ 140 | 10 ³ ~ 10 ⁶ | 0.5 ~ 1.0 | |
| X2 | 布朗衣藻, 德巴衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp. | 绿藻 | | 15 ~ 30 | 单细胞 | 是 | 14 ~ 30 | 10 ³ ~ 10 ⁵ | 0.5 ~ 1.0 | |

1) V: 体积, S/V: 表面积/体积

1.2 水样采集与测定

本研究于 2017~2020 年实施原位监测, 频率为每月 2~4 次. 此外, 2020 年因新冠疫情影响, 2 月仅

采样 1 次且 2~3 月无藻类数据. 利用 5 L 取水器分别采集不同深度水样. 水温 (WT) 和叶绿素 a (Chl-a) 采用 HACH Hydrolab DS5 原位监测; 透明度

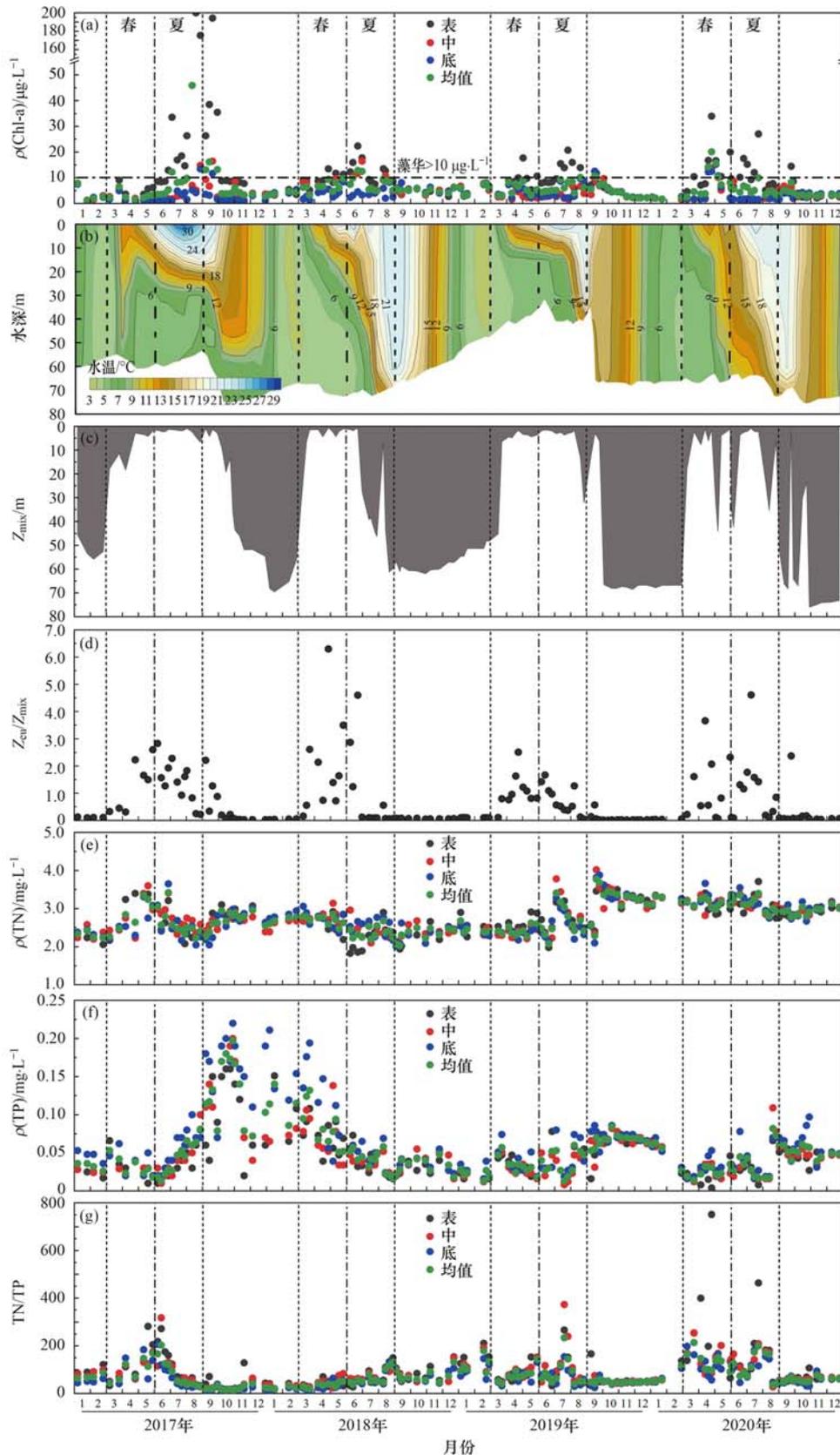


图 3 2017~2020 年 Chl-a 和环境因子时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal variations in Chl-a and environmental variables from 2017 to 2020

(SD)采用塞氏盘原位测定; TN 和 TP 测定参照文献[8].

1.3 藻类的鉴定与分类

为探明不同生理和形态藻类的季节响应特性,本研究采用传统和功能藻群这 2 种分类法(表 2). 浮游植物在显微镜 400 倍下进行藻细胞计数和种类鉴定,鉴定到种水平,以此进行传统藻组(taxonomic groups, 门水平)和功能藻组(functional groups)^[25,26]分类. 相对丰度高于 1% 纳入藻群分类,高于 5% 定为优势藻群^[8].

1.4 数据分析与绘图

按照春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月~次年2月)进行季节划分^[45]. 采用混合层深度(Z_{mix})表征水动力条件变化,即小于 1°C 表层水体深度;采用真光层及混合层深度比值(Z_{eu}/Z_{mix})反映水体光可利用率, Z_{eu} 为 2.7 倍的 SD 深度^[8].

研究中,主成分分析(PCA)、非度量多维标度(NMDS)和冗余分析(RDA)中逐步判别分析采用 Canoco 5.0 软件;局部加权回归法(LOWESS)、同

步分析(synchronous analysis, SA)和边界分析(boundary line analysis, BLA)^[43]采用 OriginPro 2022 软件;皮尔逊相关性结构模型(Pearson's correlation model, PCM)和显著性分析($P < 0.05$)采用 SPSS 20.0 软件. 值得注意的是,为了屏蔽 WLAs 运行对自然条件下藻类暴发机制研究的干扰,统计分析去除了这部分数据.

此外,定义 $\rho(\text{Chl-a})$ 高于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为藻华事件^[43]. 建立藻密度(algal cell density, ACD)与 Chl-a 线性关系($\text{ACD} = 153.06\text{Chl-a} - 577.51$, $R^2 = 0.9573$),当 $\rho(\text{Chl-a})$ 为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ACD 为 $9.53 \times 10^6 \text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 以此值在 BLA 分析中反演不同季节藻类暴发的环境条件阈值.

2 结果与分析

2.1 藻类主要影响因子时空变化

图 2~4 分别为 2017~2020 年 Chl-a 和环境因子的 PCA 分析、月际和季节性变化. 如图 2(a) 所示,环境因子呈现明显的季节性演替特征,这可能是诱发季节性藻华的重要原因. 作为结果,除 2017 年,

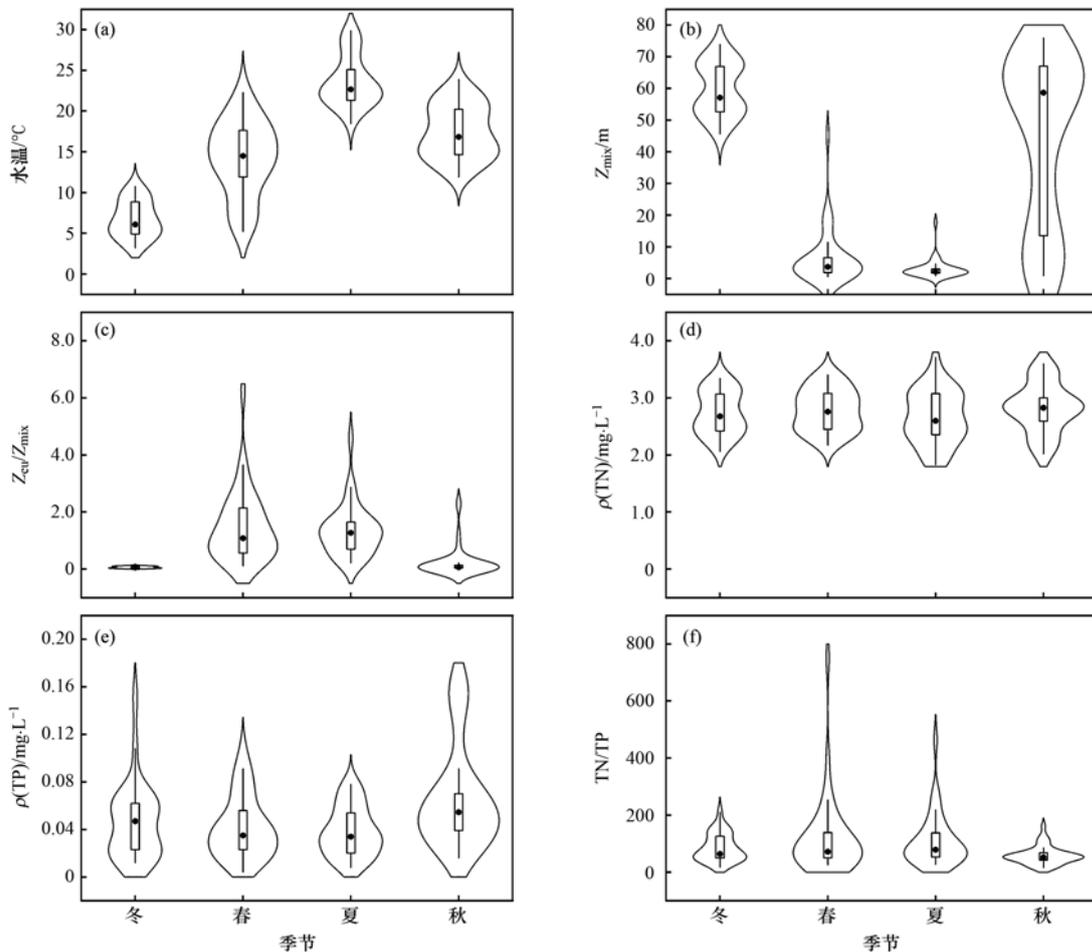


图 4 2017~2020 年环境因子季节性变化

Fig. 4 Seasonal variations in environmental variables from 2017 to 2020

每年均出现两季(春季和夏季)水华[图 3(a)].

如图 3(b)所示,该水库于 3~12 月底为自然分层期,其中 3~5、6~8 和 9~12 月分别对应分层形成期(春季)、稳定期(夏季)和衰亡期(秋季).春季后,分层的形成使水体更为稳定,伴随表层水温、 Z_{eu}/Z_{mix} 升高和 Z_{mix} 降低, $\rho(TN)$ 呈上升趋势但 $\rho(TP)$ 呈下降趋势;夏季后,分层达到最稳定状态,表层水温、 Z_{eu}/Z_{mix} 继续升高且 Z_{mix} 降低,除 2018 年外, $\rho(TN)$ 均呈下降趋势, $\rho(TP)$ 均呈上升趋势[图 3(b)~3(f)]. 研究期 $TN/TP > 16$,表明该水库为 P 限制性水体[图 3(g)].

如图 4 所示,水温、 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 随季节变化(冬→秋)分别呈先升高后降低、先降低后升高和先升高后降低的趋势,在春季和夏季分别为(14.2 ± 4.6) $^{\circ}C$ 和(23.6 ± 3.1) $^{\circ}C$; (6.5 ± 8.6)m和(3.0 ± 3.0)m; 1.5 ± 1.3 和 1.3 ± 0.9 [图 4(a)~4(c)]. $\rho(TN)$ 、 $\rho(TP)$ 和 TN/TP 随季节分别呈无明显变

化、先降低再升高和无明显变化的趋势,在春季和夏季分别为(2.8 ± 0.4) $mg \cdot L^{-1}$ 和(2.7 ± 0.5) $mg \cdot L^{-1}$; (0.04 ± 0.03) $mg \cdot L^{-1}$ 和(0.04 ± 0.02) $mg \cdot L^{-1}$; 120 ± 137 和 110 ± 92 [图 4(d)~4(f)]. 显然,春季和夏季环境条件存在差异,春季具有低水温、低混合层深度、高光利用率和较高营养水平的特征;相较于春季,夏季水温和光可利用率更高,混合层深度更低,但两季营养盐无差异($P > 0.05$).

2.2 藻类水华季节性演替特征

图 2、图 5 和图 6 分别为藻群 NMDS 分析、月际和季节变化.如图 2(b)~2(c)所示,传统和功能群组呈现季节性演替,证实了春季和夏季藻华的差异性.图 5(a)显示,藻密度每年出现 2 个高峰(除 2017 年春),即春季和夏季藻华,春季和夏季水华高峰分别出现在 2020 年和 2017 年,藻密度分别达 $1.02 \times 10^8 cells \cdot L^{-1}$ 和 $2.97 \times 10^8 cells \cdot L^{-1}$.

本研究共获得藻类 8 门 57 属 75 种,含优势传

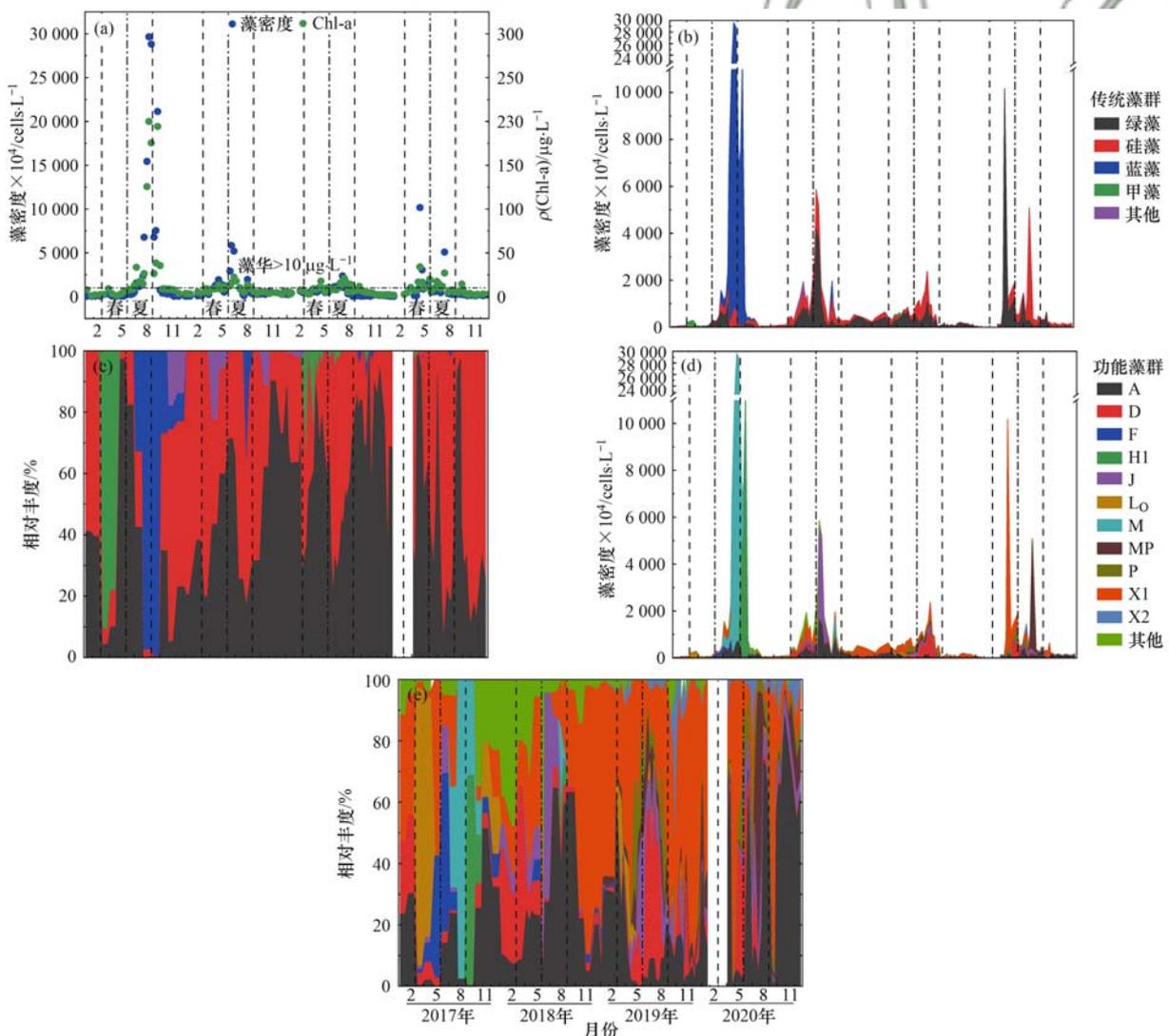


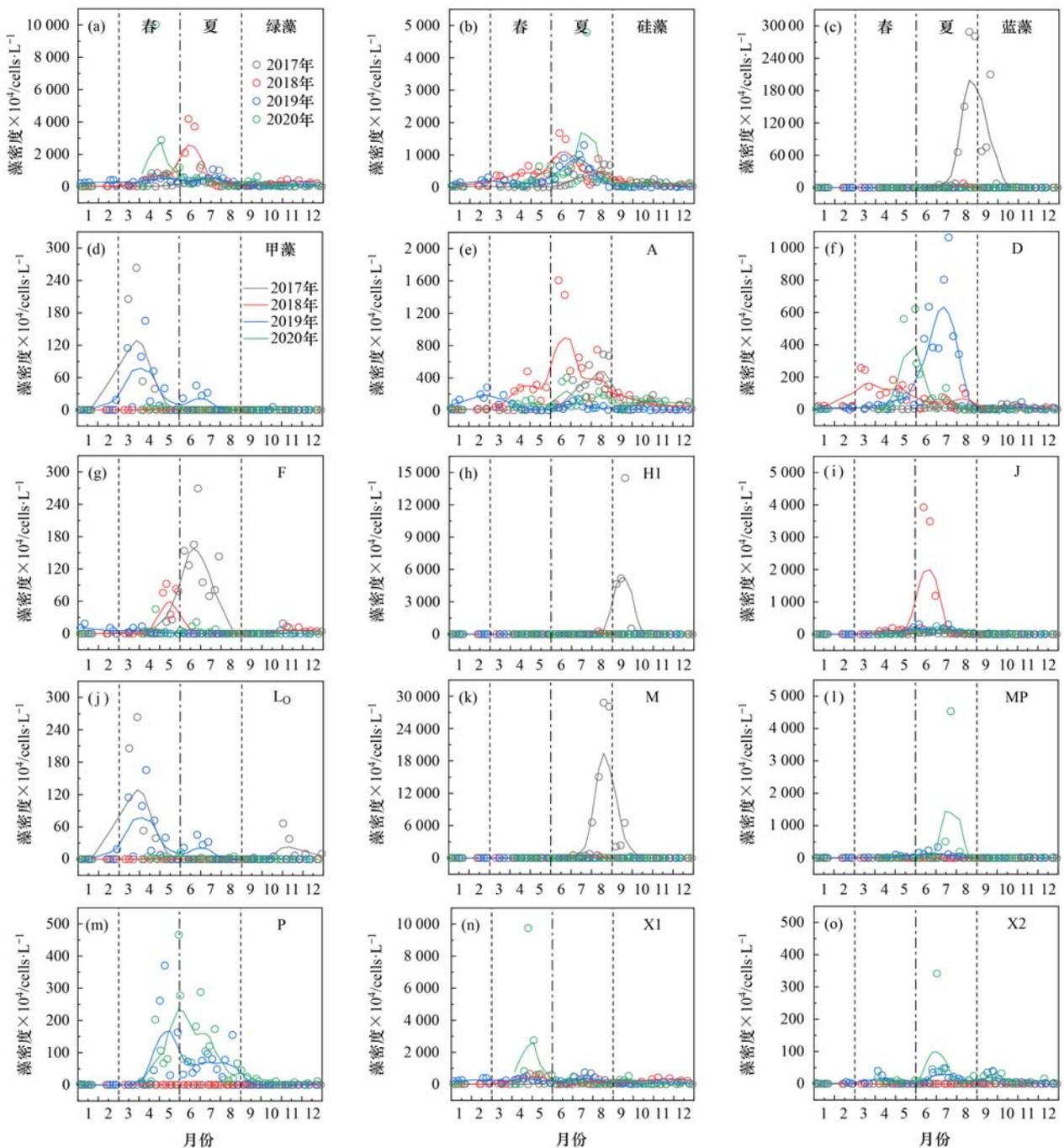
图 5 2017~2020 年总藻密度、叶绿素、传统和功能藻群藻密度和相对丰度变化

Fig. 5 Variations in total cell density, cell density, and relative abundance of taxonomic and functional groups from 2017 to 2020

统藻群 4 个,即绿藻、硅藻、甲藻和蓝藻;优势功能藻群 11 个,含 A、D、F、H1、J、L₀、M、MP、P、X1 和 X2(表 2). 如图 5(b)~5(c)和图 6(a)~6(d)所示,春季研究期 4 a 演替模式为绿藻-甲藻($2.96 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻($1.95 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻-甲藻($8.59 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻($1.02 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$);夏季演替模式为绿藻-蓝藻($2.97 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻($5.85 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻($2.38 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)→绿藻-硅藻($5.09 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$). 显然,春季水华以绿

藻、硅藻和甲藻为主,而夏季水华以绿藻、硅藻和蓝藻为主.

如图 5(d)~5(e)和图 6(e)~6(o)所示,就功能藻群而言,春季演替特征为 A-D-L₀(2017 年)→A-D-X1(2018 年)→A-P(微小新月藻和纤细新月藻)-X1(2019 年)→A-X1(2020 年);夏季的功能藻年际变化趋势为 F-H1-M(2017 年)→J(2018 年)→J-P(颗粒直链藻)(2019 年)→J-MP-X2(2020 年). 综上所述,结合优势藻种生理和形态分析,发现春季以低温、小型且高比表面积藻为主,而夏季以高温、



(a)~(d)为传统藻群; (e)~(o)为功能藻群

图 6 2017~2020 年传统和功能藻群季节性演替模式

Fig. 6 Seasonal patterns of the biomass of taxonomic and functional groups from 2017 to 2020

大型或团状且低比表面积藻为主(表 2)。

2.3 季节性藻华驱动机制分析

为探究藻华的季节性驱动机制,首先识别春季和夏季水华藻群演替的主要驱动因子,并建立了不同季节主要驱动因子和不同藻群的相关性(图 7),最后采用同步分析解析水华随生境变化的响应机制(图 8)。

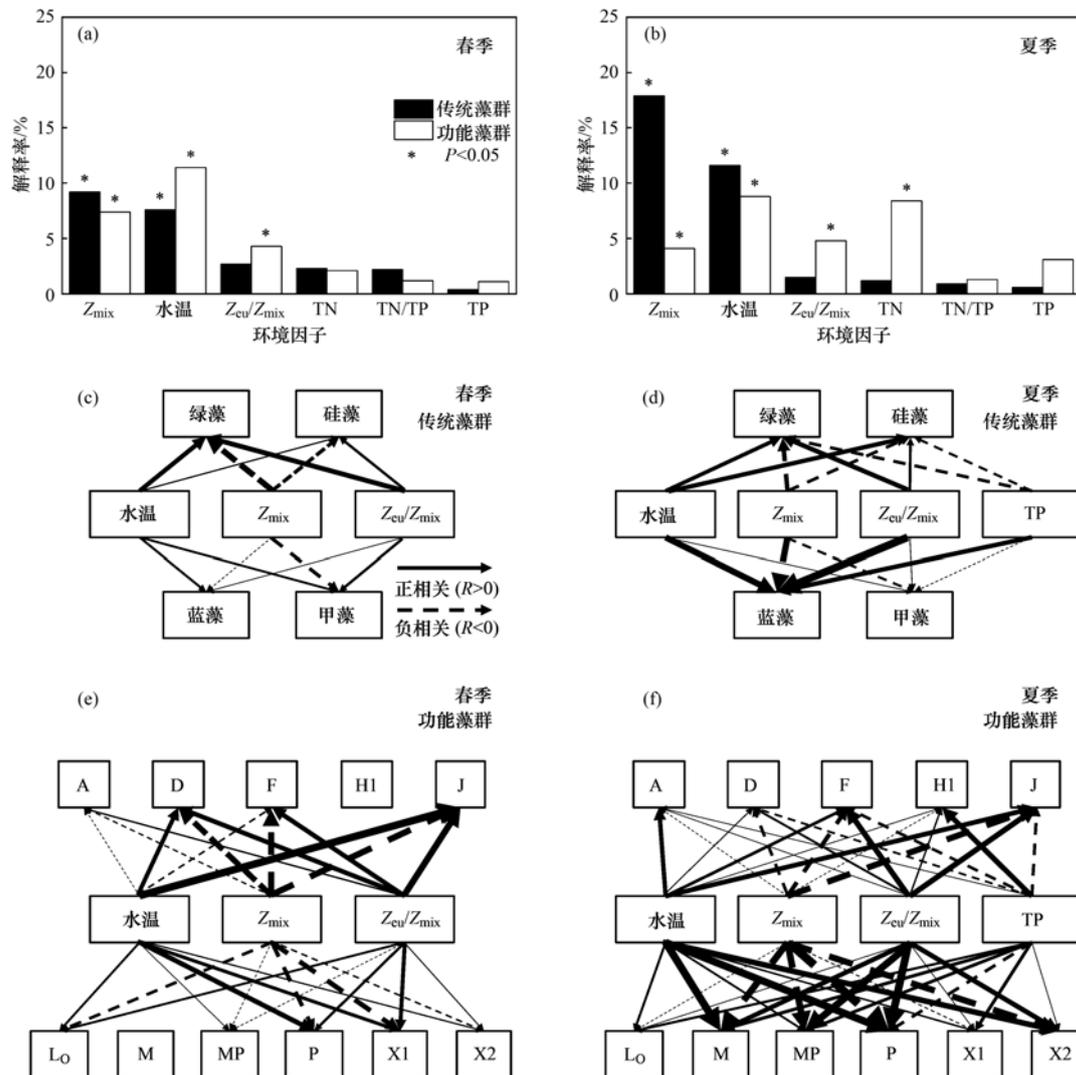
如图 7(a)~7(b)所示,春季和夏季主导驱动因子($P < 0.05$)存在差异,春季以水温、 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 为主,相较而言,水温、 Z_{mix} 解释率高于 Z_{eu}/Z_{mix} ;而夏季增加了 TP,其中水温和 TP 的影响略大于 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 。显然,主要驱动的不同是诱发水华季节性差异的主要原因。如图 7(c)~7(f)所示,水温、 Z_{eu}/Z_{mix} 和 TP 总体对藻群呈正影响($R > 0$),而 Z_{mix} 对多数藻群呈负影响($R < 0$)。具体地,春季主要因子对藻群 D/P 的影响大于 A/X1/L₀;夏季主要驱动对藻群 M/MP/P 影响高于 H1/F/J/X2。综上发

现,藻群 D/P(春季)和 M/MP/P(夏季)在同一季节尺度下具有相对尺寸大且比表面积低的特征(表 2),说明环境因子的演替对大尺寸且低表面积型藻的影响更大。

水温、 Z_{eu}/Z_{mix} 和 TP 与藻密度变化呈同步[图 8(a)~8(c)],而 Z_{mix} 与藻密度变化总体呈相反趋势[图 8(d)],进一步佐证了环境因子变化是季节性藻类演替的主要外因。此外,TP 与春季藻密度变化同步关系不显著,暗示 TP 不是这一时期的关键驱动,尤其在富营养水库。

2.4 季节性藻华环境阈值分析

图 9 为不同季节藻密度和主导因子的边界分析。从中可知,春季藻类暴发的水温、 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 阈值分别为 $>9.4^{\circ}\text{C}$ 、 $<10.9\text{ m}$ 和 >0.24 ;而夏季藻华涉及的水温、 Z_{mix} 、 Z_{eu}/Z_{mix} 和 $\rho(\text{TP})$ 阈值分别为 $>16.0^{\circ}\text{C}$ 、 $<11.6\text{ m}$ 、 >0.16 和 $>0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相



(c)~(f)中线宽越大表明驱动因子和藻群的相关性越高

图 7 2017~2020 年春季和夏季藻群主要驱动因子识别和藻群与主要因子的相关性分析

Fig. 7 Identification of main drivers for group succession and PAM between main factors and groups in spring and summer from 2017 to 2020

较于春季水华,夏季水华启动的水温阈值更高且对 TP 水平有一定要求.

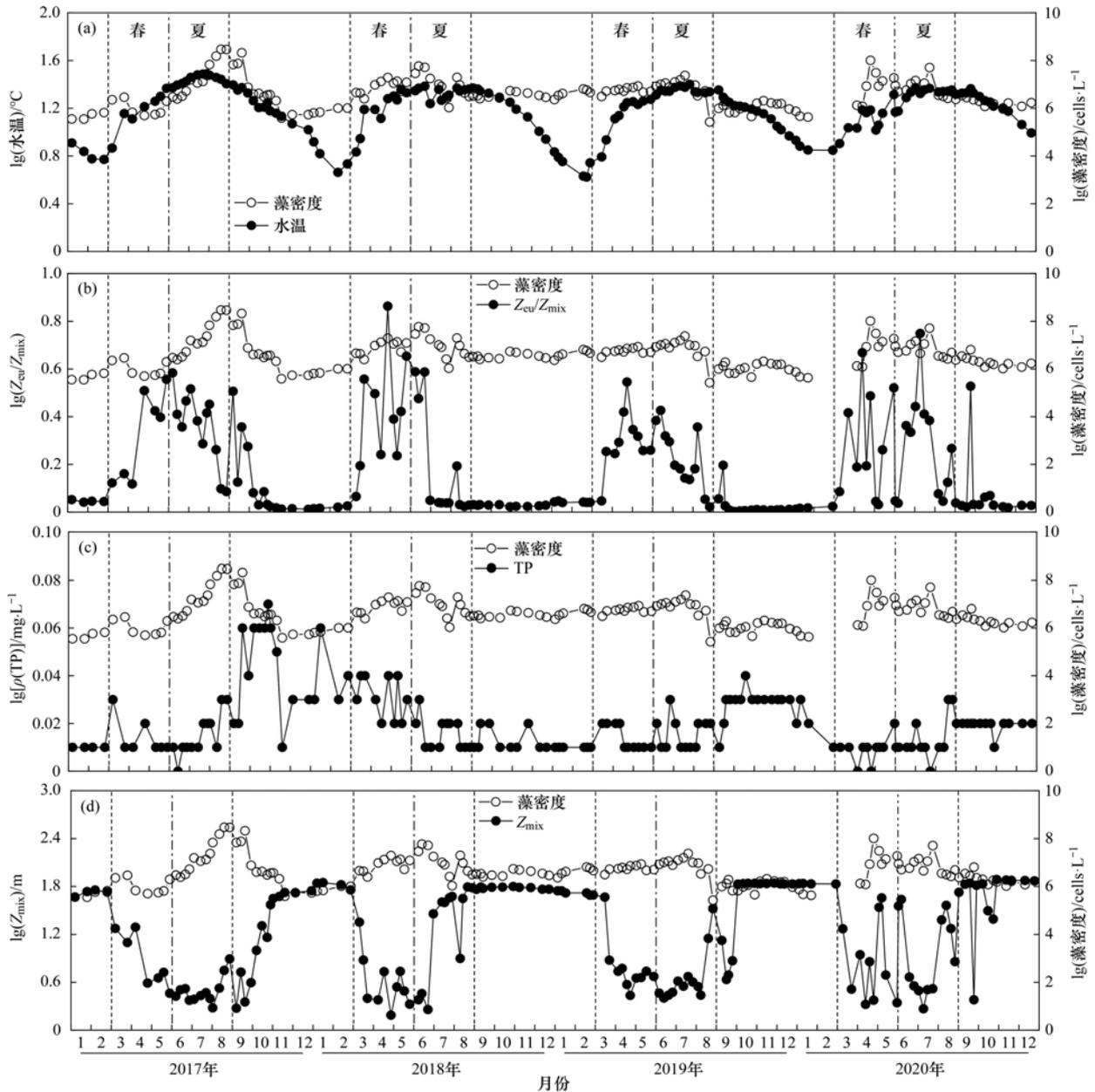


图 8 2017 ~ 2020 年藻密度与水温、 Z_{eu}/Z_{mix} 、TP 和 Z_{mix} 季节性同步变化分析

Fig. 8 SA between cell density and WT, Z_{eu}/Z_{mix} , TP, and Z_{mix} at a seasonal scale from 2017 to 2020

3 讨论

3.1 分层型水库季节性藻华演替特征及原因分析

藻华季节性演替是水体生境季节性变化的外在体现.从藻类层面,除季节性演替规律外,更要探究不同季节占优藻类的集体特征和背后映射的响应机制(图 10).本研究中,春季以绿藻、硅藻和甲藻(多为低温、小型且高比表面积型藻,代表藻群 A-D-L₀-X1-P)为主,而夏季以蓝藻、绿藻和硅藻(多为高温、大型或团状且低比表面积型藻,代表藻群 F-H1-J-M-MP-X2)为主(表 2).

该现象可能代表了季节性藻类暴发的一个普遍

规律.首先,就最适温度而言,蓝藻 > 绿藻 ≈ 甲藻 > 硅藻^[20],这解释了就温度而言藻类应激层面导致的春季和夏季藻华差异,与本研究一致(图 5 和图 6).然而,这无法解释两季藻华在生理和形态特征方向的差异.就生境而言,春季作为混合与分层的衔接期,是一个从温度升高(低→高)、水动力环境向稳(Z_{mix} ,高→低)且光照增强(Z_{eu}/Z_{mix} ,低→高)的过渡期,有利于小型且高比表面积型藻生存(图 10).原因是:① 更利于适低温型藻生存;② 小型藻在同等温度和营养条件下更具生存竞争优势;③ 高比表面积型藻在低光条件下更具捕获光的能力^[23];④ 更为重要的是,春季初期低温下浮游动物密度和

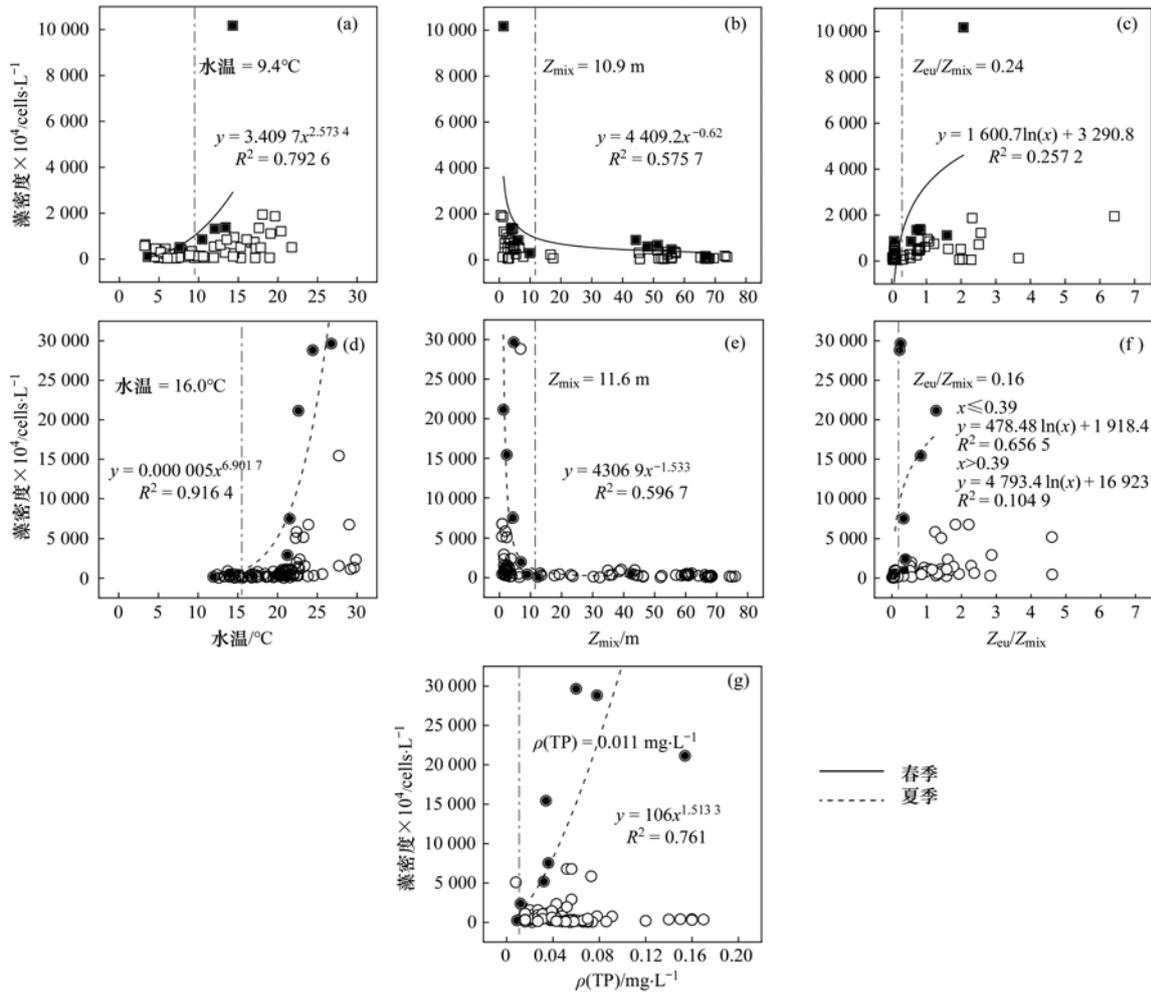
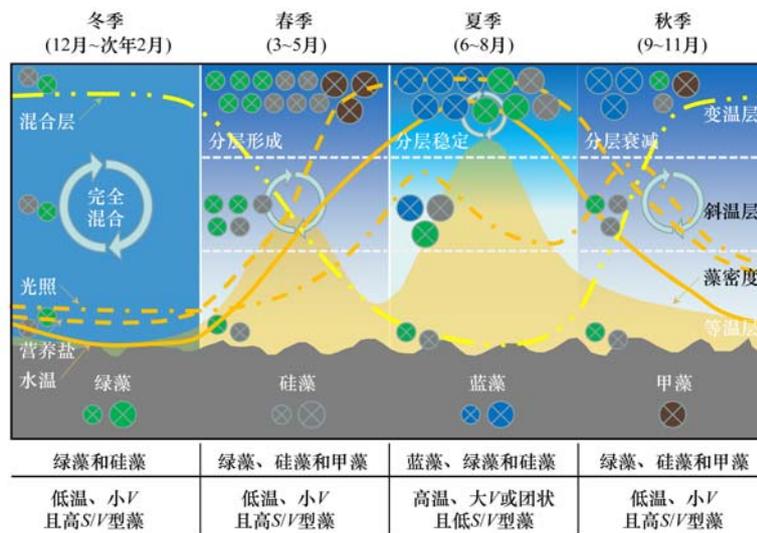


图 9 2017~2020 年春季和夏季藻密度与主要驱动因子的边界分析

Fig. 9 BLA between cell densities of phytoplankton groups and key drivers in spring and summer from 2017 to 2020



V: 体积, S/V: 表面积/体积

图 10 分层型水库季节性藻华演替特征概念模型

Fig. 10 Conceptual model of succession features of seasonal algal blooms in stratified reservoirs

活性低,也有利于小型且高比表面积型藻生存^[41]. 夏季,分层持续稳定,是一个水温由“高→更高”、 Z_{mix} 由“低→更低”和 Z_{eu}/Z_{mix} 由“高→更高”的时期,

有利于大型或团状且低比表面积型藻生存(图 10). 原因是:① 更利于适高温型藻生存;② 外界生境不再是大型或团状且低比表面积型藻生存的限制条

件; ③ 夏季高温期浮游动物活性高, 小型且高比表面积型藻是其主要牧食对象 ($< 70 \mu\text{m}$), 间接突出了大型或团状且低比表面积型藻的生存优势^[41].

3.2 季节性藻华驱动机制及暴发阈值分析

在讨论这一节前, 首先要解释该研究冠以“北方”“富营养”和“分层型”限制词的目的. 原因有三: ① 相较于南方, 北方低温导致分层期出现晚, 相应藻华出现的时机也不同; ② 相较于贫营养, 富营养水体更易出现水华但类型存在差异; ③ 相较于弱分层型水体 (水深 $< 10 \text{ m}$), 分层型水体藻华出现的时期更为固定且研究较易. 因此, 针对具体类型的水库, 需要就驱动机制具体分析.

从生境角度, 季节性水环境不同是诱发春季和夏季藻华差异的外因. 本研究证实水温、 Z_{mix} 、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 和 TP 是诱发藻华的主要驱动, 但两季主导因子及各因子贡献率存在差异 [图 7(a) ~ 7(b)]. 原因是: ① 作为富营养水体, $\rho(\text{TP})$ 较高 ($> 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 对于多数藻不构成限制, 且春季藻华峰值低且多为低 P 需求型藻, 这是导致春季 TP 非限制性因素的原因; 但夏季相反, 藻华峰值高且含高 P 需求藻 (如蓝藻), 因此 P 会成为限制^[8], 以上是两季驱动因子不同的原因; ② 春季是混合向分层过渡时期, 该过程最剧烈的变化是: 水温及水动力环境^[44], 因此水温和 Z_{mix} 的作用会强于 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$, 这一时期高光捕获型藻的活跃证实了这一情况; 然而夏季是弱分层向稳定分层的强化期, 最剧烈变化的因子是: 水温, 加之大型或团状藻的高 P 需求, 因此该时期水温和 TP 的影响会略高于 Z_{mix} 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$, 以上是两季驱动因子解释率不同的原因. 显然, 春季和夏季特殊且差异的水环境是导致两季藻华不同的根本原因.

本研究推演了春季和夏季藻类暴发的环境阈值, 就温度而言, 春季和夏季分别为 9.4°C 和 16.0°C , 基本符合两季藻最佳适温范围的下限 (表 2); 就 Z_{mix} , 春季和夏季分别为 10.9 m 和 11.6 m , 该数值 (10 m) 是弱-强分层型水体和光获得限制-非限制条件重要的分界线^[8], 这也是南方水体冬季会暴发藻华的原因, 如太湖^[14]; 就 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$, 春季和夏季分别为 0.24 和 0.16 , 基本符合光限制临界值 ($0.20 \sim 0.35$)^[8]; 就 TP, 针对夏季大型或团状藻的高 P 需求型藻, 阈值为 $0.011 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这与已有报道一致^[31].

4 结论

(1) 李家河水库春季和夏季分别对应分层形成期和稳定期, 两季水温、 Z_{mix} 、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、

$\rho(\text{TP})$ 和 TN/TP 分别为 (14.2 ± 4.6) $^\circ\text{C}$ 和 (23.6 ± 3.1) $^\circ\text{C}$; (6.5 ± 8.6) m 和 (3.0 ± 3.0) m ; 1.5 ± 1.3 和 1.3 ± 0.9 ; (2.8 ± 0.4) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (2.7 ± 0.5) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; (0.04 ± 0.03) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.04 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 120 ± 137 和 110 ± 92 . 春季和夏季水物理环境 (水温、 Z_{mix} 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$) 存在明显差异 ($P < 0.05$), 但营养盐条件 (TN、TP 和 TN/TP) 无显著差异 ($P > 0.05$). 水环境差异是诱发季节性水华的外因.

(2) 该水库藻华存在季节性演替特征, 春季以绿藻、硅藻和甲藻为主, 属低温、小型且高比表面积型藻 (功能藻群 A-D-L₀-X1-P); 而夏季水华以绿藻、硅藻和蓝藻为主, 属高温、大型或团状且低比表面积型藻 (功能藻群 F-H1-J-M-MP-X2). 藻类生理和形态的不同是导致季节性水华差异的内因.

(3) 该水库藻华驱动存在季节性差异, 春季以水温、 Z_{mix} 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 为主要驱动, 对以低温、小型且高比表面积为特征的水华呈现显著的影响 ($P < 0.05$), 诱发水华的阈值分别为 $> 9.4^\circ\text{C}$ 、 $< 10.9 \text{ m}$ 和 > 0.24 ; 夏季以水温、 Z_{mix} 、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 和 TP 为主要驱动, 对高温、大型或团状且低比表面积型藻影响显著 ($P < 0.05$), 阈值分别为 $> 16.0^\circ\text{C}$ 、 $< 11.6 \text{ m}$ 、 > 0.16 和 $> 0.011 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 显然, 季节性藻华是水环境差异与藻类生理和形态特征差异共同作用的结果.

参考文献:

- [1] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 1-3, 69.
- [2] Li N, Huang T L, Li Y, et al. Inducing an extended naturally complete mixing period in a stratified reservoir via artificial destratification [J]. Science of the Total Environment, 2020, 745, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140958.
- [3] Huang Y W, Yang C, Wen C C, et al. S-type Dissolved Oxygen Distribution along water depth in a canyon-shaped and algae blooming water source reservoir: reasons and control [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(6), doi: 10.3390/ijerph16060987.
- [4] Winton R S, Calamita E, Wehrli B. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification [J]. Biogeosciences, 2019, 16(8): 1657-1671.
- [5] Znachor P, Nedoma J, Hejzlar J, et al. Changing environmental conditions underpin long-term patterns of phytoplankton in a freshwater reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2020, 710, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135626.
- [6] Zuo Q T, Han C H, Liu J, et al. Quantitative research on the water ecological environment of dam-controlled rivers: case study of the Shaying River, China [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(16): 2129-2140.
- [7] Maavara T, Chen Q W, van Meter K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(2): 103-116.
- [8] Wen C C, Huang T L, Wen G, et al. Controlling phytoplankton

- blooms in a canyon-shaped drinking water reservoir via artificial and induced natural mixing; taxonomic versus functional groups [J]. *Chemosphere*, 2022, **287**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131771.
- [9] Li N, Huang T L, Mao X J, *et al.* Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 497-507.
- [10] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2016, **47** (3): 443-454.
- Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47** (3): 443-454.
- [11] Li X, Huang T L, Ma W X, *et al.* Effects of rainfall patterns on water quality in a stratified reservoir subject to eutrophication; implications for management [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 27-36.
- [12] 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.
- [13] Guo C X, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Climate exerts a greater modulating effect on the phytoplankton community after 2007 in eutrophic Lake Taihu, China; evidence from 25 years of recordings [J]. *Ecological indicators*, 2019, **105**: 82-91.
- [14] Deng J M, Zhang W, Qin B Q, *et al.* Winter climate shapes spring phytoplankton development in non-ice-covered lakes; subtropical Lake Taihu as an example [J]. *Water Resources Research*, 2020, **56** (9), doi: 10.1029/2019WR026680.
- [15] Naselli-Flores L, Padisák J, Albay M. Shape and size in phytoplankton ecology; do they matter? [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **578**: 157-161.
- [16] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55** (3): 614-627.
- [17] Kruk C, Segura A M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698** (1): 191-202.
- [18] Zohary T, Flaim G, Sommer U. Temperature and the size of freshwater phytoplankton [J]. *Hydrobiologia*, 2021, **848** (1): 143-155.
- [19] Singh S P, Singh P. Effect of temperature and light on the growth of algae species; a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **50**: 431-444.
- [20] Paerl H W, Otten T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls [J]. *Microbial Ecology*, 2013, **65** (4): 995-1010.
- [21] Chorus I, Fastner J, Welker M. Cyanobacteria and cyanotoxins in a changing environment: concepts, controversies, challenges [J]. *Water*, 2021, **13** (18), doi: 10.3390/w13182463.
- [22] Reim K L, Brookes J D, Carey C C, *et al.* Cyanobacterial blooms in oligotrophic lakes; shifting the high-nutrient paradigm [J]. *Freshwater Biology*, 2021, **66** (9): 1846-1859.
- [23] Sieburth J M, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions [J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, **23** (6): 1256-1263.
- [24] Kruk C, Devercelli M, Huszar V L. Reynolds functional groups: a trait-based pathway from patterns to predictions [J]. *Hydrobiologia*, 2021, **848** (1): 113-129.
- [25] 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.
- [26] Padisák 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**: 1-19.
- [27] Reynolds C S, Bellinger E G. Patterns of abundance and dominance of the phytoplankton of Rostherne Mere, England; evidence from an 18-year data set [J]. *Aquatic Sciences*, 1992, **54** (1): 10-36.
- [28] Kruk C, Devercelli M, Huszar V L M, *et al.* Classification of Reynolds phytoplankton functional groups using individual traits and machine learning techniques [J]. *Freshwater Biology*, 2017, **62** (10): 1681-1692.
- [29] Abonyi A, Descy J P, Borics G, *et al.* From historical backgrounds towards the functional classification of river phytoplankton sensu Colin S. Reynolds; what future merits the approach may hold? [J]. *Hydrobiologia*, 2021, **848** (1): 131-142.
- [30] Amorim C A, do Nascimento Moura A. Habitat templates of phytoplankton functional groups in tropical reservoirs as a tool to understand environmental changes [J]. *Hydrobiologia*, 2022, **849** (5): 1095-1113.
- [31] Bergström A K, Karlsson J. Light and nutrient control phytoplankton biomass responses to global change in northern lakes [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25** (6): 2021-2029.
- [32] Song K S, Fang C, Jacinthe P A, *et al.* Climatic versus anthropogenic controls of decadal trends (1983-2017) in algal blooms in lakes and reservoirs across China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (5): 2929-2938.
- [33] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s [J]. *Nature*, 2019, **574** (7780): 667-670.
- [34] Yang Y, Pan J Y, Han B P, *et al.* The effects of absolute and relative nutrient concentrations (N/P) on phytoplankton in a subtropical reservoir [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106466.
- [35] Huang Y N, Li Y P, Ji D B, *et al.* Study on nutrient limitation of phytoplankton growth in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138062.
- [36] Hofmann P, Clark A, Hoffmann P, *et al.* Beyond nitrogen: phosphorus-estimating the minimum niche dimensionality for resource competition between phytoplankton [J]. *Ecology Letters*, 2021, **24** (4): 761-771.
- [37] Li M X, Yu R H, Cao Z X, *et al.* Analysis of optimal environmental conditions for *Microcystis* blooms in large, shallow, eutrophic lakes [J]. *All Life*, 2021, **14** (1): 340-354.
- [38] Wentzky V C, Tittel J, Jäger C G, *et al.* Seasonal succession of functional traits in phytoplankton communities and their interaction with trophic state [J]. *Journal of Ecology*, 2020, **108** (4): 1649-1663.
- [39] Liu M Z, Ma J R, Kang L, *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.
- [40] 张海涵, 王娜, 宗容容, 等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35** (1): 181-

190.
Zhang H H, Wang N, Zong R R, *et al.* Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35** (1): 181-190.
- [41] Visser P M, Ibelings B W, Bormans M, *et al.* Artificial mixing to control cyanobacterial blooms; a review[J]. *Aquatic Ecology*, 2016, **50**(3): 423-441.
- [42] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [43] Song Y, Shen L, Zhang L L, *et al.* Study of a hydrodynamic threshold system for controlling dinoflagellate blooms in reservoirs [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116822.
- [44] 温成成, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- Wen C C, Huang T L, Li N, *et al.* Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- [45] 笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2019, **31** (5): 1320-1333.
- Da W Y, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, Southeast China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1320-1333.



CONTENTS

| | | |
|--|--|--------|
| Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition | CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i> | (1201) |
| Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) | SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i> | (1214) |
| Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters | WANG Si-meng, QIN Bo-qiang | (1228) |
| Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment | ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i> | (1244) |
| Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt | WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i> | (1258) |
| Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China | LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i> | (1267) |
| Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model | LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i> | (1277) |
| Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis | TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> | (1287) |
| Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province | ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> | (1297) |
| Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing | XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i> | (1310) |
| Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution | YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i> | (1319) |
| Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019 | SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i> | (1328) |
| Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds | SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i> | (1336) |
| Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020 | SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i> | (1346) |
| Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory | XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i> | (1357) |
| Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model | OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> | (1368) |
| Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin | CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i> | (1378) |
| Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin | YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i> | (1387) |
| Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province | CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i> | (1397) |
| Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo | XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i> | (1407) |
| Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area | WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i> | (1416) |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River | LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i> | (1429) |
| Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area | DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i> | (1440) |
| Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir | WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i> | (1452) |
| Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin | SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i> | (1465) |
| Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang | GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i> | (1475) |
| Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs | DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i> | (1484) |
| Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River | TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i> | (1497) |
| Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau | GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i> | (1508) |
| Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline | ZENG Shao-yi, LI Kun-quan | (1519) |
| Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper | MIN Bing-kun, LI Kun-quan | (1528) |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes | LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui | (1537) |
| Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis | YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i> | (1542) |
| Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation | DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i> | (1553) |
| Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region | LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i> | (1562) |
| CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain | SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i> | (1572) |
| Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types | ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i> | (1583) |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang | LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i> | (1593) |
| Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China | YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> | (1602) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section) | SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i> | (1611) |
| Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou | KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> | (1620) |
| Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province | WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> | (1636) |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia | LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i> | (1646) |
| Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range | WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i> | (1657) |
| Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil | MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang | (1668) |
| Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process | LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i> | (1678) |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin | LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i> | (1686) |
| In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation | ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i> | (1698) |
| Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland | FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i> | (1706) |
| Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i> | CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i> | (1714) |
| Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning | WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i> | (1727) |
| Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City | AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i> | (1735) |
| Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area | TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i> | (1748) |
| Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities | ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i> | (1758) |
| Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality | WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> | (1768) |
| Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure | ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i> | (1780) |
| Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland | ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i> | (1792) |