

丹江口水库叶绿素 *a* 浓度的时空特征及影响因子分析*

郭诗君¹, 王小军², 韩品磊², 郑保海¹, 蒋叶青¹, 郭 坤^{1,3}, 韩雪梅¹, 李百炼^{1,4}, 高肖飞⁵, 李玉英^{1**}

(1: 南阳师范学院水资源与环境工程学院, 河南省南水北调中线水源区流域生态安全国际联合实验室, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 南阳 473061)

(2: 南水北调中线干线工程建设管理局渠首分局, 南阳 473000)

(3: 奥尔胡斯大学生物科学系, 奥尔胡斯 8000, 丹麦)

(4: 加州大学河滨分校环境科学系, 河滨 CA 92521, 美国)

(5: 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 水生生态健康研究组, 厦门 361021)

摘要: 2017年5月—2019年10月, 对“南水北调”中线水源水库——丹江口水库库区水体7个监测位点、0~20 m间4个水层的垂向叶绿素 *a* (Chl. *a*) 浓度与水质因子进行了季度性调查, 以期了解不同位点、不同水层 Chl. *a* 分布的主要驱动因子。结果表明, 丹江口水库各位点营养状态指数 (TSI) 均为中营养化状态。水体 Chl. *a* 浓度具有逐年增加的趋势, 且极高点有逐渐增加的趋势。营养盐和 Chl. *a* 浓度均存在较大的空间异质性, 入库区具有较高的总磷和氨氮浓度, 汉江库区具有最高的 Chl. *a* 浓度, 源头污染源控制和监测仍然是丹江口水库管理的重中之重。不同位点 Chl. *a* 浓度的驱动因子存在较大差异, 汉江入库和大坝区 Chl. *a* 浓度分别受到硝态氮和 pH 的影响, 而出水口大坝位点主要受到了水深、水温和氨氮的影响。丹江入库区 Chl. *a* 浓度受到了水深、氨氮、总磷和水温的影响, 但丹江库区表现出了与其他生态区较大的区别, 其 Chl. *a* 浓度主要受到水深和有机质输入的影响。因此, 对丹江口水库各位点的管理, 应该分不同生态区采取针对性的管理措施。本研究旨在为南水北调中线工程可持续的生态调度提供基础生态数据支持, 为完善水库水源地的有效管理提供理论支撑。

关键词: 丹江口水库; 叶绿素 *a*; 影响因子; 偏 Mantel 分析; 营养状态指数

Spatiotemporal characteristics of layered chlorophyll-*a* concentration and influencing factors in Danjiangkou Reservoir*

Guo Shijun¹, Wang Xiaojun², Han Pinlei², Zheng Baohai¹, Jiang Yeqing¹, Guo Kun^{1,3}, Han Xuemei¹, Li Bailian^{1,4}, Gao Xiaofei⁵ & Li Yuying^{1**}

(1: School of Water Resources and Environment Engineering, Nanyang Normal University and International Joint Laboratory of Watershed Ecological Security and Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Middle Route Project of South-North Water Diversion in Henan Province, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, P.R. China)

(2: Qushou Branch Bureau of Construction and Administration Bureau of Middle Route Project of South-North Water Division, Nanyang 473000, P.R. China)

(3: Department of Bioscience, Aarhus University, Aarhus 8000, Denmark)

(4: Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, Riverside CA 92521, USA)

(5: Aquatic Ecohealth Group, Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, P.R. China)

* 2020-03-14 收稿; 2020-08-02 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (51879130, U1704124, 41601332) 和河南省重点科技攻关项目 (2016151, 17454, 182102311021) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: lyying200508@163.com.

Abstract: The study was carried out at 4 vertical water layers among the 0–20 m water layer of 7 horizontal monitoring stations seasonally during May 2017–October 2019 in Danjiangkou Reservoir of the Middle Route Project of South to North Water Diversion in China, and explored the key drivers of the changes in chlorophyll-*a* (Chl.*a*) along with different water layers of different sampling stations. Based on the trophic state index (*TSI*), we found that all sites in the Danjiangkou Reservoir were mesotrophic water bodies. We found a trend of increase in Chl.*a* concentration in the Danjiangkou Reservoir, and the extreme concentrations were likely increasing yearly. The nutrient and Chl.*a* concentration showed temporal and spatial changes in the Danjiangkou Reservoir. The upstream of the reservoir area has higher total phosphorus and ammonia nitrogen concentrations, the Hanjiang Reservoir has the highest Chl.*a* concentration. Therefore, source pollution control and monitoring are still the top priority of Danjiangkou Reservoir management. The important drivers of Chl.*a* concentration varied among different sites. The Chl.*a* concentration in the upstream of Hanjiang River and the dam area are affected by nitrate nitrogen and pH, respectively, while the dam site of the outlet is mainly affected by water depth, water temperature and ammonia nitrogen. The Chl.*a* concentration in the upstream of Danjiang Reservoir is affected by water depth, nitrogen nutrients, total phosphorus and water temperature, but the Chl.*a* concentration in the Danjiangkou Reservoir was mainly affected by water depth and organic matter input. Therefore, the management of each site of the Danjiangkou Reservoir should be divided into different ecological zones and adopt the right management measurements. This study aims to provide basic ecological data for the sustainable ecological scheduling of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project and provide a theory for improving the management of reservoirs.

Keywords: Danjiangkou Reservoir; chlorophyll-*a*; environmental factors; principal component analysis; partial Mantel analysis; trophic state index

湖泊、水库等水体资源是社会和经济可持续发展的重要保障。随着经济快速的发展及城镇化的推进,水资源供需矛盾突出,水体“水华”现象频发,水库生态系统健康、水质管理及水体富营养化防治逐渐受到重视^[1-5]。国内外学者通过对分层型湖库藻类分布规律研究发现,藻类数量及群落结构主要受水温、光照强度、透明度、水位波动和水质营养因子等因素影响,藻类多样性和水质因子均存在时空差异性^[6-10]。浮游藻类是水生态系统的初级生产者,叶绿素 *a* (Chl. *a*) 是衡量水体初级生产力的重要指标,也是反映水体富营养化程度的主要指标,是湖沼学和水环境科学中的一项关键的水环境参数^[11-16]。因此,研究 Chl. *a* 浓度的时空分布规律及其与藻类以及环境因子的关系,更能全面地了解水库不同生态区的生态特征,对防控水体富营养化具有重要意义。

南水北调中线工程有效缓解了我国北方水资源严重短缺的局面,其水源地丹江口水库水质安全事关沿线 1.2 亿人饮水安全问题。丹江口水库是一个功能全面的水利枢纽工程,因各种自然和人为因素影响,其水生态安全风险仍然存在^[6]。自丹江口水库建成后,学者们从水文、水环境和水生生物等不同角度对丹江口水库进行水生态学调查研究^[15-19],但以往研究侧重于水域表层空间尺度,在垂向分布上关注较少,尤其在动态调水的持续扰动下^[20-24]。中线工程从水库调出的水是通过从渠首位点(Q)开始的引水渠(2.2 km)经渠首大坝底层水调出,基于调出水的特性从库区不同生态水域垂向尺度研究影响水库水质的关键因子尤为重要。本研究于 2017 年 5 月—2019 年 10 月对丹江口水库汉库和丹库 2 个库区的 7 个水平监测位点,水面下 0.5、5、10 和 20 m 的 4 个垂向水层 Chl. *a* 浓度和常规水质因子按季度进行了连续 3 年监测,采用相关分析、偏门特检验和多元回归分析探讨水库不同水层水质因子间的相关性以及影响不同水层 Chl. *a* 浓度的关键驱动因子,旨在为丹江口水库生态环境保护和水质科学管理提供数据支持,同时为中线工程生态调度和我国水库生态学研究积累重要的资料。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

丹江口水库是由丹库和汉库组成的并联式水库(32°32′~33°22′N, 111°22′~112°01′E),以供水、防洪和发电为主,兼具灌溉和旅游等功能。库区属北亚热带向暖温带过渡的季风性气候,气候温和,四季分明,年均日照时间 2046 h,年均降水量 804 mm,年均气温 15.8℃,无霜期 229 d。2014 年中线工程运行后水库正常蓄水位为 170 m,蓄水量为 290.5 亿 m³,水域面积为 1022.75 km²,最深达 80 多米,水面最宽处 20 多千米,最窄

表1 丹江口水库分层监测位点位置特征
Tab.1 Location characteristics of monitoring sites in Danjiangkou Reservoir

位点	代码	平均水深/m	经纬度	监测点类型
渠首	Q	25	32°39'N, 111°40'E	中线工程引水区
宋岗	S	21	32°45'N, 111°38'E	码头库湾
库心	K	40	32°44'N, 111°34'E	丹库库心
黑鸡嘴	H	38	32°49'N, 111°32'E	丹江入库处
台子山	T	38	32°39'N, 111°31'E	湖北河南交界
坝上	B	57	32°33'N, 111°29'E	汉库库体
浪河口	L	55	32°34'N, 111°25'E	汉江入库处

的变化范围为 1.036~15.350 m^[23]. 基于 Chl. *a* 浓度垂向不均一性分布^[25]、丹江口水库水域季节分层特征^[24]和丹江口水库浮游藻类在水层 20 m 以上分布特征^[13], 本研究将 Chl. *a* 样品采集深度为 20 m 以上, 分别为水面下 0.5 m (表层)、5 m、10 m 和 20 m 的 4 个水层.

1.3 样品采集

2017 年 5 月至 2019 年 10 月间 1 月、5 月、7 月和 10 月上旬, 在 7 个监测位点按照《水与废水监测分析方法(第四版)》^[26] 采集 Chl. *a* 样品和水质理化因子样品. 水温(WT, °C)、电导率(EC, μS/cm)、pH 和溶解氧(DO, mg/L)用 YSI Pro Plus 多参数水质分析仪测定.

1.4 样品分析方法

叶绿素 *a* (Chl. *a*, μg/L)、总磷(TP, mg/L)、总氮(TN, mg/L)、氨氮(NH₃-N, mg/L)、硝态氮(NO₃⁻-N, mg/L)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}, mg/L)参考《水和废水监测分析方法(第四版)》进行测定和分析^[26].

1.5 水质营养状态评价

本文采用营养状态指数(trophic state index, *TSI*)来评价丹江口水库水体营养状态, 该指标基于 Chl. *a*、塞氏盘透明度(SD, m)、COD_{Mn}、TN 和 TP 计算得到^[26]. 当 30 < *TSI* ≤ 50 时, 水体处于中营养状态; 当 50 < *TSI* ≤ 70 时, 水体处于富营养状态.

1.6 数据处理

用 Microsoft Excel 2017 进行数据统计与分析, 所有数据分析及可视化均在 Origin 9.0 和 R 3.5.0 中完成. 使用 vegan 包进行偏 Mantel 分析.

2 结果

2.1 丹江口水库不同分层 Chl. *a* 浓度时空动态变化及营养状态评价

由图 1 可见, 所有 4 个水层的 Chl. *a* 浓度以及 4 个水层该指标的多年平均值皆表现出大坝处最高的现象. 各层规律分别为: 0.5 m 水层, 总趋势是东北向西南递增, 库心和渠首为特殊低值区; 5 m 水层, 总趋势仍是东北向西南递增, 靠近西库岸处为特殊低值区; 10 m 水层, 总趋势为从北向南递减后再递增, 低值区在东库岸附近; 20 m 水层, 本指标的水平分布规律性不强(所以没有为之构建等值线); 就各层平均值来看, 表现为东北向西南递增的趋势, 库心偏东的部位为低值区, 渠首与其他部位相比处于中等水平.

2017 年 5 月至 2019 年 5 月间分布于 2 个库区的 7 个监测位点营养状态、透明度和分层 Chl. *a* 在不同位点之间存在较大差异(图 2). 汉江库区大坝处(B) *TSI* 最高, 而且汉江入库站点 L 和大坝站点 B 的 *TSI* 大于丹库和出水水体, 丹库库心位点 K 的 *TSI* 最低, 但是库区内的丹江入库(H)、台子山(T)以及码头库湾位点(S)的 *TSI* 并没有表现出明显差异, 说明丹库水体 *TSI* 可能并没有太多受到汉江来水高营养的影响, 这可能与水体的引水位置一般位于深层水体位置有关. 而引水区 Q 站点的 *TSI* 是略小于丹库库区以及入库区水体, 但高于丹库库心. 尽管如此, 所有库区位点的 *TSI* 均在 50~60 区间, 表明丹江口水库水体均处于中富营

处不足 300 m. 汉江来水量占总来水量的 90%.

本研究基于研究目标和水库的地理位置特征选择丹江口水库 2 个库区 7 个水平监测位点作为研究位点, 丹库设 4 个监测位点: 渠首(Q)、宋岗(S)、库心(K)和黑鸡嘴(H); 汉库设 2 个监测位点: 坝上(B)和浪河口(L); 湖北和河南两省的交界处设 1 个监测位点: 台子山(T) (表 1); H 和 L 为汇水区. 研究区域底质均为淤泥. 汉江和丹江水库的入库区分别为站点 L 和大坝站点 B 与 H, 库区站点为 S、K 与 T, 出水引水区为站点 Q.

1.2 水层设置

屈月明等研究发现丹江口水库真光层深度

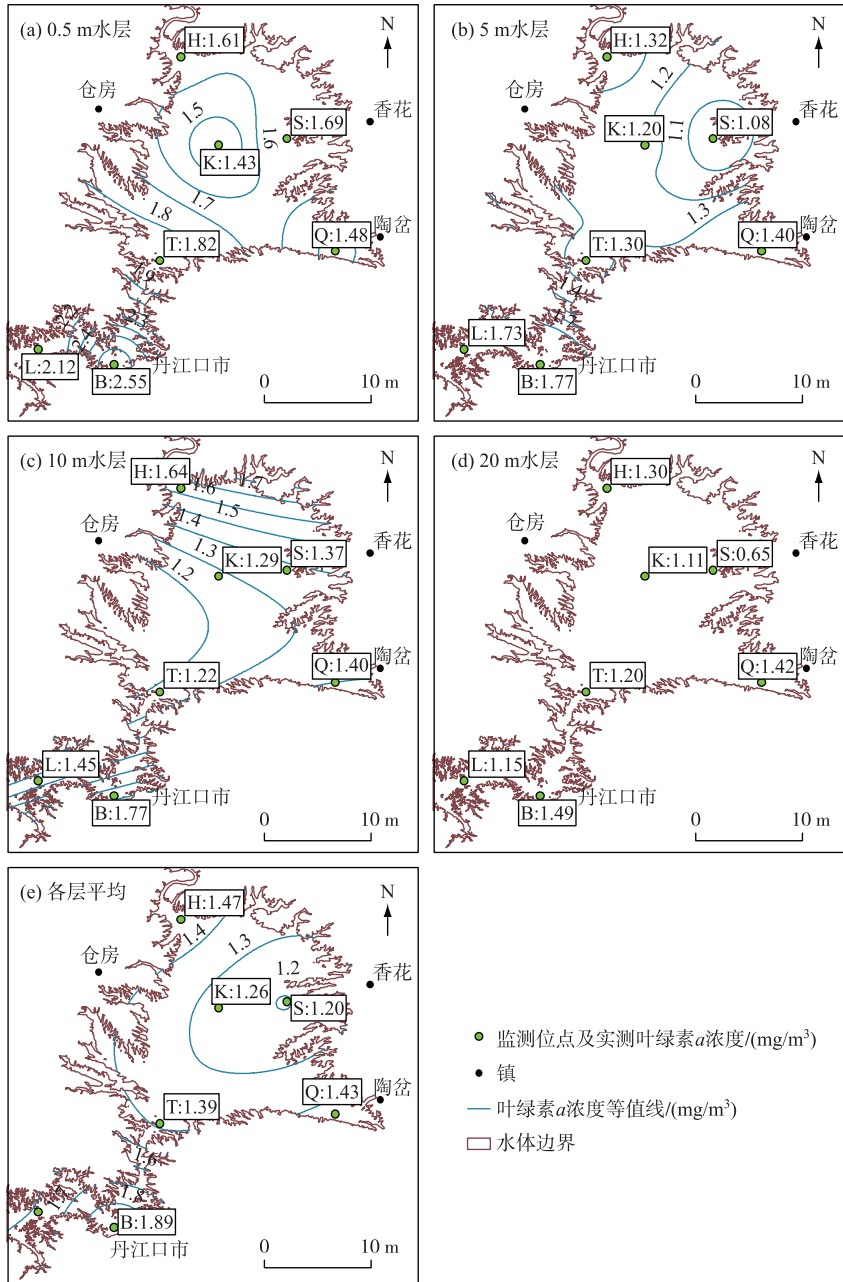


图 1 丹江口水库不同水层叶绿素 a 浓度等值线图

(B:坝上; H:黑鸡嘴; K:库心; L:浪河口; Q:渠首; S:宋岗; T:台子山; 下同)

Fig.1 The counter map of chlorophyll-a concentration of different water levels in Danjiangkou Reservoir

(B: Bashang; H: Heijizui; K: Kuxin; L: Langhekou; Q: Canal head; S: Songgang; T: Taizishan; The same below)

养状态. 此外,丹库库心位点 K 具有最高的平均透明度(4.9 m),透明度较高的则是汉江入库区(L)和坝上站点(B),而丹江入库处位点 H 以及库区位点 Q 和位点 S 具有最低的平均透明度(3.4 m 左右),这可能与丹

江库入区流速及库区水深有关. 图 2 展示了垂直分层上 Chl. *a* 浓度在不同位点之间具有一定的差异性和波动性(图 2), 可以看出随着深度的增加 Chl. *a* 浓度逐渐减小, 0.5 m 深度具有最高的平均 Chl. *a* 浓度. 研究期间在汉库库体位点 B 观察到了最高的 Chl. *a* 浓度(6.56 $\mu\text{g/L}$). 在 0.5 m 和 5 m 深度上, 汉库库体位点 B 具有最高的平均 Chl. *a* 浓度(分别为 2.6 和 1.8 $\mu\text{g/L}$), 其次是汉江入库处位点 L(分别为 2.1 和 1.8 $\mu\text{g/L}$), 且具有较大的波动范围, 丹库库体及引水区 Chl. *a* 浓度均在 1.5 $\mu\text{g/L}$ 或更低浓度范围波动. 而在 10 m 的水深, 坝上 B、汉江入库 L 及丹江入库区 H 的 Chl. *a* 浓度是略高于库区及引水区的. 在 20 m 的水深处, 除汉库库体位点 B 外, 其他站点 Chl. *a* 浓度均小于 1.5 $\mu\text{g/L}$. 综合分析, Chl. *a* 浓度从高到低依次为汉江来源 > 丹江来源 \geq 出水区. 汉江来源水体具有较高的 TSI 和表层 Chl. *a* 浓度, 且各位点 Chl. *a* 浓度存在垂直分层上的差异, 而且除汉江来源水体外, 丹江入库区在 10 m 水深具有较高 Chl. *a* 浓度, 由于 20 m 水深光照少的原因, 光合作用较弱, Chl. *a* 浓度较低, 且许多时间浓度接近 0. 另外, 值得注意的是, 丹库库心在各个分层水体中均具有较低的 Chl. *a* 浓度, 这可能与中线水源区库区周边生态环境有关.

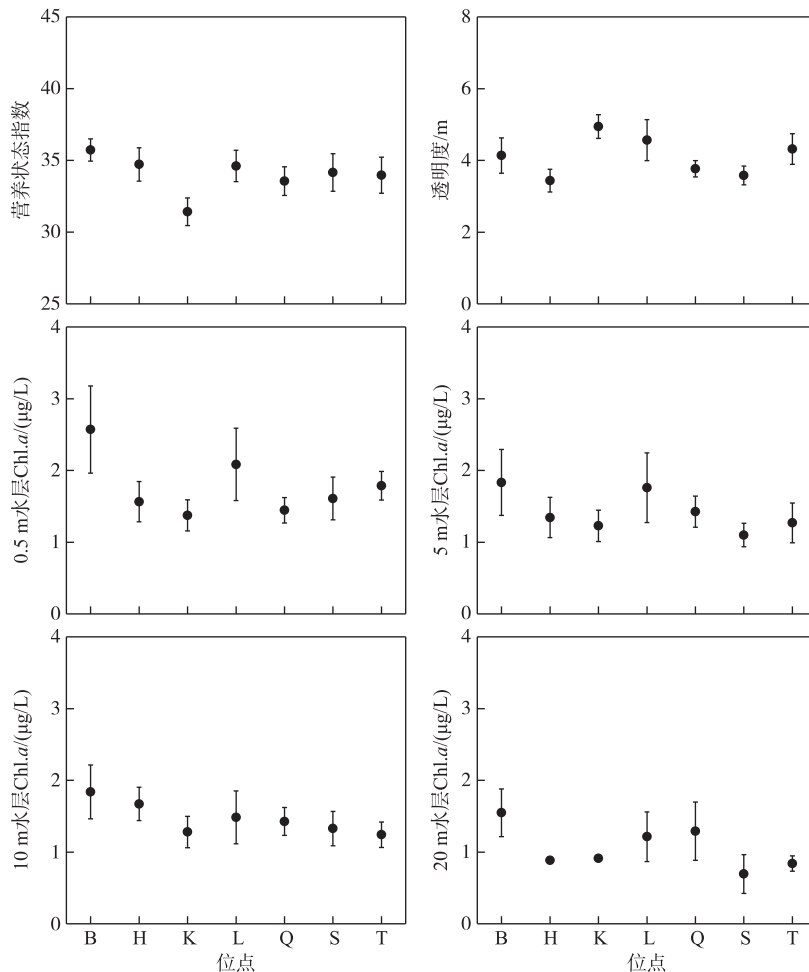


图 2 丹江口水库不同位点的营养状态指数、透明度及不同水层叶绿素 *a* 浓度

Fig.2 The trophic state index (TSI), transparency and chlorophyll-*a* concentration of different water levels in different sites of Danjiangkou Reservoir

Chl. *a* 浓度的时间动态如图 3 所示, 2017—2019 年丹江口水库 Chl. *a* 浓度存在年际差异, Chl. *a* 浓度呈现逐年增加的趋势(图 3). 在垂直水体中, 2019 年 7 月, 在汉库入库区 L 和汉江库区坝上位点 B 各水层均观察

到了 Chl.*a* 浓度极高值. 在 0.5 m 表层水体中, 2017 年和 2018 年具有相似的变化趋势, 且除位点 L 和 B 外, 其他位点的浓度略高于 2019 年. 而在 5 m 深水体中, 2018 年和 2019 年 Chl.*a* 浓度高于 2017 年. 在深层水体 (10 m 和 20 m) 中, 除了位点 L 和 B 外, 2018 年 Chl.*a* 浓度均高于其他年份. 因此, 随着城镇化的进程, 建议应该更多地监测水体中 Chl.*a* 浓度的动态变化. 2017 年 9—10 月中线水源地汉江流域发生明显秋汛, 平均降雨量达 393 mm, 9—10 月水库累计来水量高达 235 亿 m^3 ; 在丹江口水库及上游水库群联合调度情况下, 丹江口水库进行了大坝加高后第二次高水位蓄水 (最高到 167.00 m), 并稳定运行一定时期, 库区水体与上游来水以及库区周边生态环境的综合作用, 由于水域生态过程滞后性, 致使 2018 年的 Chl.*a* 浓度高于 2017 年和 2019 年. 汉库 B 与汇水区 H 直到 2019 年仍然高于前 2 年, 同时也明显高于丹库与渠首; 渠首出水质量明显优于 2018 年和 2017 年. 连续三年的监测结果说明上游来水和高水位的蓄水未影响到中线调水水质.

由图 3 可知, 丹江口水库 Chl.*a* 浓度四季变化明显, 从高到低依次为夏季>秋季>春季>冬季, 与夏季相比, 秋、春、冬季的降幅分别为 63.91%、122.36% 和 136.83%. 夏季 Chl.*a* 浓度在汉库坝上和汉江入库区 2 个监测位点明显高于其他季节和其他位点, 丹库中入库汇区黑鸡嘴位点为第三. 各位点在 2017 年 Chl.*a* 浓度时间上变化并无太大差异, 而在 2018 年, 丹江入库区 H 和汉江坝上 B 在夏季明显高于其他位点, 而且 2018 年之后, 汉江坝上 B 和汉江入库区 L 在夏季均出现了 Chl.*a* 浓度的极高值, 虽然出水点 Q 仅在 2018 年表现出较高 Chl.*a* 浓度, 但汉江 Chl.*a* 浓度的逐年增加应该引起关注. 另外, 所有水层的 Chl.*a* 浓度的极高值有逐年增加的趋势, 而且 2019 年汉江入库和坝上位点的极值最为突出.

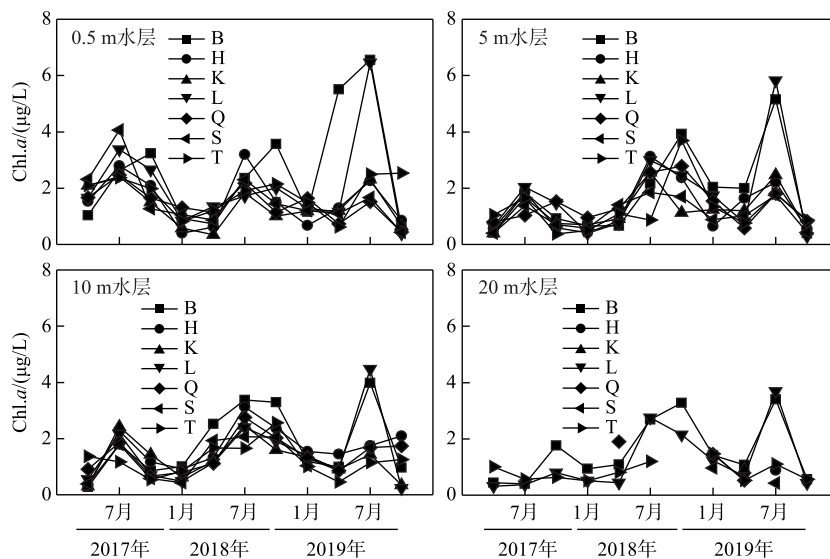


图 3 2017 年 5 月—2019 年 10 月丹江口水库叶绿素 *a* 浓度时空动态

Fig.3 Temporal and spatial dynamic changes of chlorophyll-*a* concentrations in Danjiangkou Reservoir during May 2017 and October 2019

2.2 丹江口水库水质因子动态变化

各位点之间的营养盐浓度的差异如图 4 所示, 位点之间的营养盐浓度存在较大差异. 在所有分层水体中, 丹库库心 K 站点具有最低的平均 TP 浓度. 除丹江口水库库体位点 S 和 T 在 0.5 m 和 10 m 水深较大波动外, 汉江入库区 L 和坝上位点 B 的 TP 浓度始终要高于其他位点. 在表层水体中, 库体码头库湾位点 S 具有最高的 TP 浓度 (0.027 mg/L) 和波动范围, 其次是汉江入库区 L 位点 (0.022 mg/L). 而在 10 m 水层处, 湖北河南交界处位点 T 具有最高的平均 TP 浓度, 同时由于受支流汇水及汉江水源注入的原因, 该位点的波动也是最大的. 位点 S 在所有水体中具有最低的 TN 浓度, 而除了位点 S 之外, 其他位点上层水体 (0.5 m 和 5 m) 的 TN 浓度在位点之间差异较小. 而 NO_3^- -N 浓度与 TN 浓度表现出相同的趋势, 说明 NO_3^- -N 是水库各分层一

个重要氮盐形式. 各位点的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度存在较大差异, 如表层水体中, 其浓度高低分别为位点 $\text{B} > \text{H} > \text{K} > \text{L} > \text{Q} > \text{S} > \text{T}$, 这可能与人类活动及水体的有机质降解有关. 在 5 m 水深水体中, 最高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度出现在引水区位点 Q 处, 且其波动较大, 其次为入库处位点 L 和码头库湾位点 S. 在 10 m 水深水体中, 汉库库体位点 B 和湖北河南交接位点 T 具有最高的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度和波动范围. 而 20 m 水深水体的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度差异并不明显.

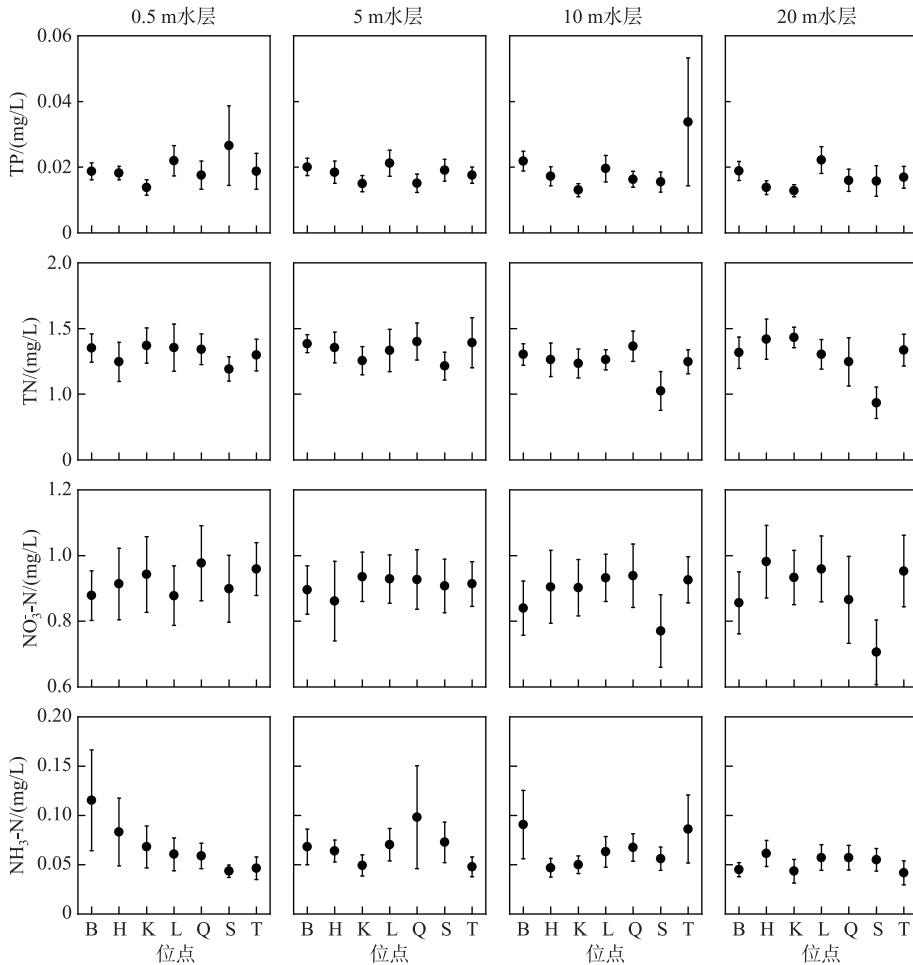


图 4 丹江口水库不同位点不同水层营养盐浓度差异

Fig.4 The difference between the nutrient concentrations in different water levels of different sampling sites in Danjiangkou Reservoir

2.3 丹江口水库叶绿素 *a* 与水质因子的偏 Mantel 分析

利用偏 Mantel 分析对 10 m 以上的水体分层 Chl.*a* 的显著影响因子进行分析. 通过控制协变量, 研究了其他因子对 Chl.*a* 浓度的显著性影响, 结果发现 Chl.*a* 浓度的显著影响因子在位点和分层上具有明显的不同 (表 2). 对整个水柱 Chl.*a* 浓度的 Mantel 分析结果表明, 汉江入库区位点 L 的 Chl.*a* 浓度受到 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的驱动 ($R=0.121, P<0.05$), 而汉库坝上位点 B 的 Chl.*a* 浓度主要受到 pH 的显著性影响 ($R=0.164, P<0.05$), 在引水区位点 Q, 水深、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和水温 (WT) 则变成 Chl.*a* 浓度主要显著驱动因子. 而丹库入库区位点 H 的 Chl.*a* 浓度受水深、TP、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 和 WT 的显著性影响, 丹库库心位点 K 和码头库湾位点 S 的 Chl.*a* 浓度受到水深的显著性影响 ($R=0.325, P<0.01$; $R=0.301, P<0.01$). 在 0.5 m 的表层水体中, 尽管在汉江入库区 L, 并未

发现显著影响 Chl.*a* 的因子,但是 NO_3^- -N 和透明度对 Chl.*a* 浓度有相对较大的影响. 同样的,在出水区 Q,未发现影响 Chl.*a* 浓度的显著因子. 而汉库库区坝上位点 B 的 Chl.*a* 浓度受到了 pH 的显著影响. 而在丹库库心位点 K 和码头库湾位点 S 的 Chl.*a* 浓度均受到了 COD_{Mn} 的显著影响. 丹库汇水区位点 T 的 Chl.*a* 浓度分别受到水温的显著影响. 在 5 m 水体中,Chl.*a* 浓度主要受到含氮营养盐的影响,如丹库入库区位点 H 的 Chl.*a* 浓度受到 TN 和 NO_3^- -N 浓度的显著影响,而出水区位点 Q 的 Chl.*a* 浓度受到 NH_3 -N 浓度的显著影响. 更深水层的 10 m,位点 Q 的 Chl.*a* 浓度受到 WT 和 NO_3^- -N 浓度的显著影响,而其他位点并没有发现显著的影响因子. 由于 20 m 深水体中,许多位点的 Chl.*a* 浓度低于检测限,而且,该水层光照强度低,不足以支撑藻类的光合作用,因此,本研究并未对其 Chl.*a* 浓度进行显著性分析. 另外,尽管 TN/TP 也是驱动 Chl.*a* 浓度变化的重要因子,但因其与 TN 和 TP 具有严重的共线性,因此,在此分析中并没有采用 TN/TP.

表 2 丹江口水库不同水层叶绿素 *a* 浓度与水质因子的偏 Mantel 检验Tab.2 Mantel tests for the correlation between chlorophyll-*a* concentration and environmental factors of different water levels in Danjiangkou Reservoir

水层		B	H	K	L	Q	S	T	
各层平均	Depth	-0.051	0.295 **	0.325 **	-0.013	0.299 **	0.301 **	0.069	
	SD	0.013	-0.048	0.033	0.055	-0.069	0.020	0.024	
	WT	-0.007	0.154 **	0.073	0.018	0.078 *	0.032	0.012	
	pH	0.164 *	0.020	-0.001	0.073	-0.005	-0.043	0.116	
	COD_{Mn}	-0.044	0.071	0.026	0.010	0.018	0.048	-0.012	
	TN	0.005	0.142 *	0.071	-0.022	0.076	0.070	-0.031	
	TP	-0.044	0.193 **	0.023	0.029	0.021	0.046	-0.058	
	NH_3 -N	-0.076	0.094	-0.001	-0.074	0.210 **	-0.039	0.014	
	NO_3^- -N	0.045	0.190 **	0.045	0.121 *	0.092	0.042	0.037	
	0.5 m	SD	0.020	-0.096	-0.095	0.151	-0.259	-0.245	0.107
WT		-0.032	0.241	-0.121	-0.080	0.078	-0.115	0.529 *	
pH		0.370 *	-0.041	-0.011	-0.040	-0.170	-0.305	0.233	
COD_{Mn}		-0.006	0.178	0.429 *	0.039	-0.120	0.422 *	0.051	
TN		0.079	0.009	0.127	-0.015	-0.129	-0.187	-0.149	
TP		-0.099	0.006	0.040	-0.042	-0.161	0.296	-0.115	
NH_3 -N		-0.214	0.244	0.085	-0.251	-0.076	-0.257	0.085	
NO_3^- -N		0.197	0.094	-0.079	0.170	0.079	0.044	-0.295	
5 m		SD	-0.192	-0.161	0.135	-0.049	-0.141	0.240	-0.077
		WT	-0.124	0.145	0.011	-0.029	-0.019	0.122	-0.142
	pH	0.111	0.125	-0.054	0.040	0.031	0.044	0.246	
	COD_{Mn}	0.055	-0.050	-0.275	0.206	-0.077	0.035	-0.185	
	TN	-0.033	0.522 **	-0.084	0.041	0.063	0.204	-0.207	
	TP	0.018	0.222	-0.111	0.169	-0.084	-0.142	-0.190	
	NH_3 -N	-0.109	0.098	-0.103	0.047	0.474 *	0.059	-0.098	
	NO_3^- -N	0.083	0.610 **	0.129	0.247	0.262	0.055	0.004	
	10 m	SD	-0.034	-0.270	-0.087	0.029	-0.086	0.124	-0.144
		WT	-0.117	0.240	0.046	-0.167	0.251 *	0.227	-0.095
pH		-0.071	0.103	-0.150	0.047	0.085	-0.036	0.197	
COD_{Mn}		-0.151	-0.173	-0.021	0.160	-0.070	-0.096	-0.179	
TN		0	0.148	-0.090	-0.296	0.222	-0.050	0.001	
TP		-0.144	0.334	0.112	-0.092	-0.130	-0.021	-0.291	
NH_3 -N		0.065	0.233	-0.033	-0.129	0.238	0.227	0.202	
NO_3^- -N		-0.107	0.272	0.111	0.071	0.279 *	-0.112	0	

* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异极显著, $P < 0.01$.

3 讨论与结论

3.1 讨论

水库富营养化的加剧导致水体水质恶化,有害藻类增加,给饮用水水源区造成了极大的威胁^[1,27]. 本研究结果表明,丹江口水库 Chl. *a* 浓度有逐年增加的趋势,虽然在库区引水区并无发现较高的 Chl. *a* 浓度,但在库区表层及引水区的 5 m 水层均发现了较高的 NH₃-N 浓度和波动,而 NH₃-N 作为藻类主要的氮源,为藻类提供了生长的机会;另外, NH₃-N 多来自于人类活动排放. 因此,对库区 Chl. *a* 浓度和营养盐的长期监测,这将促进学者对丹江口水库污染源及其潜在生态威胁的认识和理解. 而且,大坝静水区位点更有利于藻类的生长及 Chl. *a* 浓度的升高. 研究发现,丹江口水库水体 Chl. *a* 浓度在不同年份间有差异,这可能与 2017 年 9 月开始丹江口水库第二次水位提升有关^[21]. 另外,发现 Chl. *a* 浓度随着年份有增加的趋势,其中 2019 年的多个极值均发生在丹江和汉江入库区及其坝上位点,这可能与丹江和汉江较高浓度 TP 和 NH₃-N 的输入有关. 因此,库区各支流输入的管理是需要重点关注的区域^[28]. 深层水库通常具有季节性分层的特点,而温度是驱动水体分层和分层时间长短的重要因子^[31]. Chl. *a* 浓度在大坝处最高的现象可归因于大坝处流速低,且营养盐滞留,从而造成 Chl. *a* 富集^[20,29-30];在 0.5 m 水层所表现出的渠首为特殊低值区的现象可能与调水有关^[12-13,15]; Chl. *a* 浓度水平分布规律在 20 m 层已不复存在,并且深层的叶绿素 *a* 浓度变异系数也明显低于 0.5 m 层,意味着造成 Chl. *a* 水平分布格局的原因来自水面以上和周边地表的因素和过程,而非来自水体深处^[23,25,30]. 而随着气候变暖,分层期延长及用水量的改变,都将改变水体浮游藻类群落的动态变化^[2,5]. 另外,已有研究表明,湖泊夏季浮游藻类最大值多出现在水面以上 10 m 左右,且存在分层之间较大的差异^[30]. 在丹江口水库深水的库区同样发现类似的情况. 而引水口通常设置在较深水层,因此,对丹江口水库垂向上的 Chl. *a* 浓度及其主要驱动因子的研究,对于下游的水体供应具有重要的意义.

虽然已有学者对分层水体 Chl. *a* 浓度和藻类生物量进行了研究,发现了表层和温跃层浮游藻类生物量主要受水深变化引起的一系列环境变量如水温 and 光照等变化的影响^[29,31]. 而 Chl. *a* 浓度影响因子空间异质性仍然认知不足,这限制了对库区生态系统功能和服务的理解和有效管理. 本研究结果显示,除了 pH、水深和水温等物理因子外, TN、TP、NH₃-N 和 NO₃⁻-N 浓度对丹江口水库 Chl. *a* 浓度的动态变化都具有显著的影响,而且不同位点 Chl. *a* 浓度的重要驱动因子存在较大差异. 比如,汉江入库区 Chl. *a* 浓度受到 NO₃⁻-N 浓度的影响,汉江库区大坝位点 Chl. *a* 浓度主要受到 pH 变化的影响,而出水口大坝位点主要受到了水深、水温和 NH₃-N 的影响. 丹江入库区 Chl. *a* 浓度受到了水深、氮盐、总磷和水温的影响. 但库区表现出了与其他生态区较大的区别,库区 Chl. *a* 浓度主要与水深有较强的关联,另外,库区有机质输入对其表层 Chl. *a* 浓度的变化具有显著的影响,因此,库区需要源头控制等措施以控制 Chl. *a* 和藻类的增加. 通过对不同位点 Chl. *a* 浓度重要驱动因子的研究,有利于对丹江口水库不同生态区区域采取更加科学的管理措施. 而且汉江带来的较高浓度的 TP 和 NH₃-N 为丹江口水库库区提供了更多生物利用性的氮源和磷源,这将加剧库区水库富营养化和藻类水华的风险^[31]. 丹江口水库处于北亚热带和暖温带地区,气候温和,受到亚热带季风气候影响四季分明,不同季节的温度差异明显. 夏秋降雨多,温度高,导致的入库径流季节性变化显著,上游来水量对整个库体扰动增大. 因此,温度相对较高的夏季、秋季丹江口水库 Chl. *a* 浓度和营养状态较高^[32-33],而且,这也可能是导致入库区及汉库库体 NH₃-N 浓度较高的一个重要原因. 因此,夏季是藻类控制的关键季节,需要更多的监测上游有机质及可能的污染来源. 除营养盐外,水位波动和气象条件是水库中藻类和 Chl. *a* 浓度变化的重要驱动因子^[34]. 而且,偏 Mantel 分析表明,目前表层水体的 Chl. *a* 浓度并不受到透明度和营养盐的影响. 因此,对于丹江口水库 Chl. *a* 浓度重要驱动的研究可能需要更多地考虑水文和气象因子.

3.2 结论

- 1) 丹江口水库处于中营养化水平, Chl. *a* 浓度具有逐年增加的趋势,且极高值有逐渐增加的趋势.
- 2) 丹江口水库营养盐和 Chl. *a* 浓度均存在较大的空间异质性,入库区具有较高营养盐和 Chl. *a* 浓度,表明源头污染源控制和监测对于丹江口水库管理的重要性.
- 3) 不同位点 Chl. *a* 浓度的重要驱动因子存在较大差异,对丹江口水库各位点的管理应该区分,不同生态区采取针对性的管理措施.

4 参考文献

- [1] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [2] Dong J, Gao YN, Li GB. A review: Responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 615-623. DOI: 10.7541/2016.83. [董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.]
- [3] Lund JW. Eutrophication. *Nature*, 1967, **214**(5088): 557-558. DOI: 10.1038/214557a0.
- [4] Edmondson WT, Anderson GC, Peterson DR. Artificial eutrophication of lake Washington. *Limnology and Oceanography*, 1956, **1**(1): 47-53. DOI: 10.4319/lo.1956.1.1.0047.
- [5] Hasler AD. Eutrophication of lakes by domestic drainage. *Ecology*, 1947, **29**(4): 383-395. DOI: 10.2307/1931229.
- [6] Gao YJ, Cao Y, Zhao Z *et al.* Study on the eutrophication control standard for eastern lake basing on the chlorophyll-*a* classification. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(S2): 218-220. [高阳俊, 曹勇, 赵振等. 基于叶绿素 *a* 分级的东部湖区富营养化标准研究. 环境科学与技术, 2011, **34**(S2): 218-220.]
- [7] Wang SR, Ni ZK, Xi HY. Management process and strategy of lake eutrophication in China. *Environmental Protection*, 2016, **44**(18): 14-19. [王圣瑞, 倪兆奎, 席海燕. 我国湖泊富营养化治理历程及策略. 环境保护, 2016, **44**(18): 14-19.]
- [8] Cai QH. Yangtze River conservation and watershed ecology. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 70-74. [蔡庆华. 长江大保护与流域生态学. 人民长江, 2020, **51**(1): 70-74.]
- [9] Han BP. Reservoir ecology and limnology in China: A retrospective comment. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 151-160. DOI: 10.18307/2010.0201. [韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.]
- [10] Nalewajko C, Murphy TP. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: An experimental approach. *Limnology*, 2001, **2**(1): 45-48. DOI: 10.1007/s102010170015.
- [11] Lopes NRM, Bicudo CEM, Ferragut MC. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, **542**(1): 235-247.
- [12] Yin DC, Zheng LL, Song LR. Spatio-temporal distribution of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir, a water source area for the South-to-North Water Diversion Project (Middle Route), China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, **29**(3): 531-540. DOI: 10.1007/s00343-011-0120-9.
- [13] Wu ZX, Liu ML, 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 Lake Sci*, 2012, **24**(3): 460-465. DOI: 10.18307/2012.0319. [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. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 460-465.]
- [14] Lin J, Su YP, Zhong HZ *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir(Fujian) during summer stratification. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 244-250. DOI: 10.18307/2010.0214. [林佳, 苏玉萍, 钟厚璋等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.]
- [15] Huang TL, Zeng MZ, Qiu XP *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1157-1166. [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. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1157-1166.]
- [16] Guo JS, Chen Y, Li Z *et al.* Seasonal variation of chlorophyll *a* and its potential relationship with various algal species in Xiaojiang river backwater area, Three Gorges reservoir. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 976-981. DOI: 10.13227/j.hjks.2011.04.001. [郭劲松, 陈园, 李哲等. 三峡小江回水区叶绿素 *a* 季节变化及其同主要藻类的相互关系. 环境科学, 2011, **32**(4): 976-981.]
- [17] Wu HJ, Peng JH, Han DJ *et al.* Composition and ecological changes of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 1996, **8**(1): 43-50. DOI: 10.18307/1996.0106. [邬红娟, 彭建华, 韩德举等. 丹江口水库浮游植物及其演变. 湖泊科学, 1996, **8**(1): 43-50.]
- [18] Tan X, Xia XL, Cheng XL *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2975-2982. DOI: 10.13227/j.hjks.2011.10.008. [谭

- 香, 夏小玲, 程晓莉等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, **32**(10): 2975-2982.]
- [19] Shen HL, Xu YY, Wang L *et al.* Spatial and temporal variations of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its affecting factors. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2011, **29**(6): 683-690. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2011.60683. [申恒伦, 徐耀阳, 王岚等. 丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素. 植物科学学报, 2011, **29**(6): 683-690.]
- [20] Zheng BH, Zhu JY, Xu X *et al.* Community structure of periphyton algae and water quality in the Danjiangkou Reservoir. *Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition*, 2018, **46**(4): 95-101. [郑保海, 朱静亚, 许信等. 丹江口水库着生藻类群落特征及其水质评价. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2018, **46**(4): 95-101.]
- [21] Pan YD, Guo SJ, Li YY *et al.* Effects of water level increase on phytoplankton assemblages in a drinking water reservoir. *Water*, 2018, **10**(3): 256. DOI: 10.3390/w10030256.
- [22] Zhang X, Xiong J, Cheng JX *et al.* Application of fuzzy mathematics for evaluation of eutrophication in Danjiangkou Reservoir. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(3): 99-105. [张煦, 熊晶, 程继雄等. 模糊数学在丹江口水库富营养化评价中的应用. 中国环境监测, 2017, **33**(3): 99-105.]
- [23] Qu YM, Cai QH, Shen HL *et al.* Variation and influencing factors of euphotic depth in Danjiangkou Reservoir in different hydrological periods. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(1): 53-59. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201401008. [屈月明, 蔡庆华, 申恒伦等. 丹江口水库不同水文期真光层深度特征及影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(1): 53-59.]
- [24] Zhu YX, Zhang J, Liu R *et al.* Study on remote sensing monitoring of water quality for Danjiangkou Reservoir by HJ-1 satellite data. *Environmental Science and Technology*, 2014, **27**(5): 52-58. [朱玉霞, 张杰, 刘锐等. 基于 HJ-1 卫星的丹江口库区水质遥感监测研究. 环境科技, 2014, **27**(5): 52-58.]
- [25] Xi Y, Du KP, Zhang LH *et al.* The influence of nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration on apparent optical properties. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(2): 489-494. [席颖, 杜克平, 张丽华等. 叶绿素浓度垂直不均一分布对于分层水体表观光学特性的影响. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(2): 489-494.]
- [26] Editorial Board of "Water and wastewater monitoring and analysis methods," Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. *Water and wastewater monitoring and analysis methods: 4th edition*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [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: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [27] Chen Q, Huang MT, Tang XD. Eutrophication assessment of seasonal urban lakes in China Yangtze River Basin using Landsat 8-derived Forel-Ule index: A six-year (2013–2018) observation. *Science of the Total Environment*, 2019; 135392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135392.
- [28] Zhou C, Yu JJ, Fu L *et al.* Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 873-883. DOI: 10.13227/j.hjlx.2016.03.011. [周川, 蔚建军, 付莉等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系. 环境科学, 2016, **37**(3): 873-883.]
- [29] Niu Y, Kong XH, Yu H *et al.* Spatial distribution of phytoplankton community during summer stratification in Lake Fuxian. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(7): 1865-1871. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201607.019. [牛远, 孔祥虹, 余辉等. 抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征. 生态学杂志, 2016, **35**(7): 1865-1871.]
- [30] Chen QW, Shi WQ, Huisman J *et al.* Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream. *National Science Review*, 2020, **7**(9): 1449-1457. DOI: 10.1093/nsr/nwaa026.
- [31] Marcé R, Moreno-Ostos E, García-Barcina JM *et al.* Tailoring dam structures to water quality predictions in new reservoir projects: Assisting decision-making using numerical modeling. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(6): 1255-1267. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.01.014.
- [32] Wang LQ, Xu L, Lu ZY *et al.* Dynamic of phytoplankton abundance and the relationship with environmental factors in Dianshan lake, Shanghai. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2968-2974. DOI: 10.13227/j.hjlx.2011.10.007. [王丽卿, 许莉, 卢子园等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(10): 2968-2974.]
- [33] Jiang XY, Li CY, Shi XH *et al.* Spatial and temporal distribution of chlorophyll.a concentration and its relationships with environmental factors in Lake Ulansuhai. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **29**(5): 964-973. [蒋鑫艳, 李畅游, 史小红等. 乌梁素海叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 2019, **29**(5): 964-973.]
- [34] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.094.