

丹江口水库浮游植物功能群季节演替特征及水生态健康评价

张俊芳¹, 黄玄敏², 倪雪峰², 陈威¹, 周连凤¹, 彭晓然², 马沛明¹

(1.水利部中国科学院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室;
长江水利委员会流域河湖生态系统修复关键技术创新团队,武汉 430079;
2.南水北调中线水源有限责任公司,湖北 丹江口 442700)

摘要:丹江口水库是南水北调中线工程重要的水源地,为了解其浮游植物功能群的季节演替特征及其生态健康状况,于2021年对丹江口水库2个库区的浮游植物和环境因子进行季度调查研究,并利用2种指数综合评价水质状况.结果显示该区域共检测出浮游植物7门35科69属114种(变种),总丰度变化范围为 $1.40 \times 10^6 \sim 183.33 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$,平均丰度为 $1.53 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,夏季浮游植物丰度明显高于其他季节,且各季节优势门类明显不同.全年优势种有5种,分别是小环藻、细小平裂藻、细小隐球藻、微囊藻和尖尾蓝隐藻,各季节优势种不同,共有优势种2种:小环藻和尖尾蓝隐藻.共划分出27个功能类群,其中优势功能群11个,功能群C、X2是各季节共有优势功能群,浮游植物功能群季节演替明显:C/X2(冬季)→X2/P/C(春季)→K/L₀/M(夏季)→X2/M/C(秋季).通过综合营养状态指数(TSI_M)和Q指数对丹江口水库的水质进行评价,整体为中营养状态,处于“好”的级别,由高到低为:春季、冬季、夏季、秋季,丹库好于汉库.冗余分析(RDA)分析表明不同季节环境因子对浮游植物功能群的影响不同,整体关键驱动环境因子有水温、电导率、亚硝酸盐、溶解氧,其中水温、溶解氧是冬季和秋季的主要驱动因子,电导率是夏季的主要驱动因子,亚硝酸盐在冬季、春季和夏季对浮游植物功能群影响均较大.

关键词:浮游植物;功能群;季节演替;生态健康评价;丹江口水库

中图分类号:Q948.8

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)02-0079-09

丹江口水库位于汉江中上游,其水域横跨鄂、豫两省,承担着南水北调中线工程的关键水源角色.作为国家一级水源保护区,库区水质状况密切关系到广大受水区人民群众的饮水安全.丹江口大坝加高工程实施后蓄水位由157 m提高到170 m,水库面积由745 km²增加到1 050 km².新增淹没土地,尤其是较为肥沃的耕地、林地,土壤中的有机质和营养元素向水库扩散迁移,同时由于各入库河段流速减缓,自净能力下降,水环境容量有所减少,水文情势的变化等都对水库浮游植物产生较大影响^[1].

浮游植物功能群是REYNOLDS等^[2]和PADISÁK等^[3]根据浮游植物的生理特征和适应环境的机制,将在相同环境条件下共存的浮游植物进行归类.功能群分类法揭示了浮游植物的生态学功能和价值,主要用于研究浮游植物的生态位以及评估水体的环境状况.自水库筹建至今,学者对丹江口水库库区和库湾开展了大量研究,研究主要集中在浮游植物物种组成、现存量、多样性等群落结构特征的时空变化及其与环境因子的

收稿日期:2024-10-26;修回日期:2025-01-17.

基金项目:国家自然科学基金(52200231);湖北省重点研发项目(2024BCB064);南水北调中线水源有限责任公司科研专项(ZSY/YG-ZX(2023)022).

作者简介:张俊芳(1983-),女,山西临汾人,水利部中国科学院水工程生态研究所工程师,研究方向为浮游植物生态. E-mail:zjf2003316034@163.com.

通信作者:马沛明, E-mail:pabloomaming@gmail.com.

引用本文:张俊芳,黄玄敏,倪雪峰,等.丹江口水库浮游植物功能群季节演替特征及水生态健康评价[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(2):79-87.(Zhang Junfang, Huang Xuanmin, Ni Xuefeng, et al. Seasonal succession characteristics of phytoplankton functional groups and water ecological health assessment in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(2): 79-87. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.10.26.0001.)

相关关系^[4-5],而对浮游植物功能群的研究甚少.本研究通过分析 2021 年 4 个季度丹江口水库 2 个库区不同断面浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系,并运用综合营养状态指数法和 Q 指数法对水质状况进行评价,以期对丹江口水库的水质安全和生态系统健康提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样断面与采样时间

根据整体性、代表性、可行性原则,结合丹江口水库流域地理特征,本研究在丹江库区设置 5 个断面,分别是:D1(太平洋 1)、D2(太平洋 2)、D3(太平洋 3)、D4(陶岔)、D5(台子山);汉江库区设置 8 个断面,分别是:D6(杨溪铺)、D7(安阳库湾)、D8(泗河库湾)、D9(莫家河)、D10(太极湖)、D11(浪河口)、D12(浪河口下)、D13(坝前).于 2021 年 1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)和 10 月(秋季)进行样品采集和分析测试.由于突发事件,2021 年 1 月丹江库区 D1(太平洋 1)断面浮游植物定量样品未采集.

1.2 样品采集与分析方法

浮游植物定性样品用 25# 浮游生物网采集,将网口上端入水面下 0~0.3 m 处进行“∞”形循环拖动,然后将网底浓缩的水样放入标本瓶中,立即用 4% 甲醛溶液固定.定量样品用采水器从表层采集 1.5 L 水样,加入体积分数 1.0%~1.5% 鲁戈试剂(Lugol's)固定后带回实验室,样品静置 48 h 虹吸,再静置 24 h 浓缩至 30 mL.在镜检计数前,用快速混匀器充分摇匀水样,迅速吸取 0.1 mL 置于 0.1 mL 浮游生物计数框内,在显微镜下进行鉴定并计数^[6].浮游植物功能群划分依据文献^[2-3].浮游植物生物量测量采用体积测量,然后将体积换算成生物量^[7].

在采集浮游植物样品的同时,同步进行理化样品的采集.水温(WT)、水深(H)、溶解氧(DO)、pH 和电导率(EC)用多功能便携式水质分析仪现场测定,透明度(SD)用塞式透明度盘现场测定,总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 *a* (Chl *a*)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、铵盐(NH₄⁺-N)、硝酸盐(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐(NO₂⁻-N)、硅酸盐(SiO₃²⁻-Si)、总溶解性氮(TDN)、总溶解性磷(TDP)指标的测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[8].

1.3 数据处理及分析

优势度指数(*Y*)计算公式为: $Y = (N_i / N) \cdot f_i$,其中, N_i 表示第 *i* 种(功能群)的细胞数, N 表示样品中全部种类(功能群)的总细胞数, f_i 表示第 *i* 种(功能群)在所有采样断面中出现的频率,当 $Y \geq 0.02$ 时,该种(功能群)为优势种(功能群)^[9],当 $Y \geq 0.2$ 时,该种(功能群)为绝对优势种(功能群).

采用 CARLSON^[10] 提出的营养状态指数法评价丹江口水库的富营养化状态,经修订后采用加权平均法计算,其计算公式分别为:

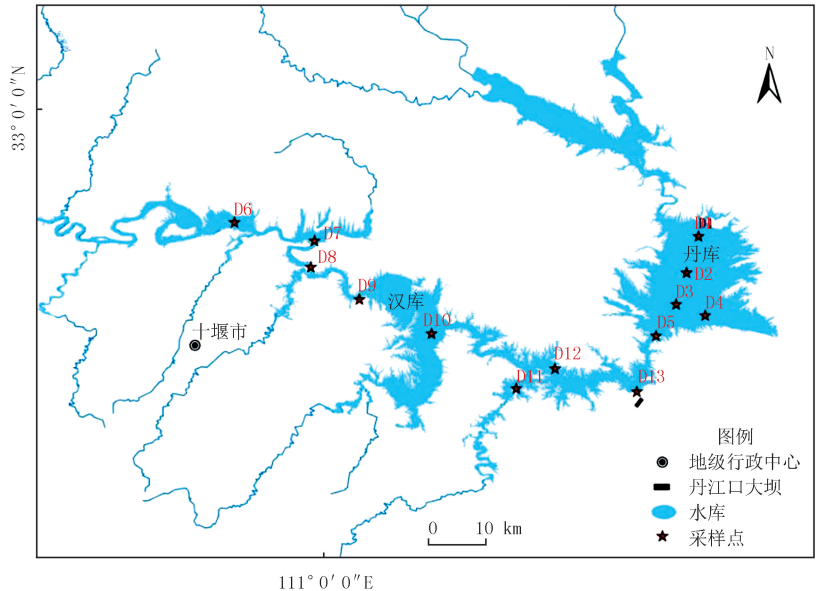


图1 丹江口水库调查断面分布

Fig. 1 Distribution of investigation section in Danjiangkou Reservoir

$$TSI_{M(\text{Chl } a)} = 10 \times (2.46 + \ln(\text{叶绿素 } a) / \ln 2.5),$$

$$TSI_{M(\text{TP})} = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(\text{总磷})) / \ln 2.5),$$

$$TSI_{M(\text{SD})} = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(\text{透明度})) / \ln 2.5),$$

$$TSI_M = W_{(\text{Chl } a)} \times TSI_{M(\text{Chl } a)} + W_{(\text{TP})} \times TSI_{M(\text{TP})} + W_{(\text{SD})} \times TSI_{M(\text{SD})},$$

其中, TSI_M 为综合营养状态指数, $W_{(X)}$ 为上述 3 个参数的权重, $W_{(\text{Chl } a)} = 54.0\%$, $W_{(\text{SD})} = 29.7\%$, $W_{(\text{TP})} = 16.3\%$ ^[11]. 评价标准为: $TSI_M < 37$ 为贫营养, $37 \leq TSI_M < 53$ 为中营养, $TSI_M \geq 53$ 为富营养.

Q 指数(浮游植物群落指数, phytoplankton assemblage index)由 PADISÁK 等^[3]推广,用于评估水体生态健康状态,计算方法如下:

$$Q = \sum_{i=1}^s P_i \cdot F_i,$$

其中, s 为浮游植物功能群的总数, P_i 为第 i 个浮游植物功能群生物量在总生物量中所占的比例, F_i 为第 i 个浮游植物功能群的赋值. Q 指数为 0~5 时分别表示: [0, 1) 差; [1, 2) 耐受; [2, 3) 中等; [3, 4) 好; [4, 5] 极好.

采样断面图用 ArcGIS 10.6 软件绘制;数据分析、统计和表格利用 Excel 2023 软件;其他图通过微科盟生科云(<https://www.bioincloud.tech/task-meta>)绘制,分析前对群落(功能群)数据及环境因子(除 pH 值外)进行对数转换.

2 结果与分析

2.1 主要环境因子特征

丹江口水库主要环境因子时空变化特征见附录表 S1. 调查期间水库水温范围为 8.6~30.2 °C, 均值为 18.8 °C;透明度范围为 0.1~8.6 m, 春季最高, 秋季最低; pH 范围为 7.9~9.1, 整体呈弱碱性; DO 质量浓度范围为 7.3~12.9 mg/L, 均值为 9.7 mg/L; 电导率范围为 183.2~308.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 均值为 224.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$; H 范围为 13.0~73.0 m, 均值为 40.4 m; TN 和 TP 质量浓度范围分别为 0.85~2.08 mg/L, 0.002~0.176 mg/L, 均值分别为 1.35、0.031 mg/L; NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 质量浓度范围分别为 0.011~0.306 mg/L、0.76~1.82 mg/L、0~0.048 mg/L; $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2--}\text{Si}$ 质量浓度范围分别为 0.001~0.035 mg/L、2.17~11.13 mg/L; TDN、TDP 质量浓度范围分别为 0.83~2.06 mg/L、0~0.046 mg/L; COD_{Mn} 质量浓度范围为 1.06~5.60 mg/L, 均值为 2.58 mg/L. 环境因子经标准化处理后, 进行排序分析, 结果显示, 第 1 轴解释度为 55.02%, 第 2 轴解释度为 26.91%, 不同季节差异明显, 不同库区差异不明显(附录图 S1).

2.2 浮游植物特征

2.2.1 浮游植物群落结构特征

共检测出浮游植物 7 门 35 科 69 属 114 种(变种). 其中绿藻门物种数最多, 为 41 种, 占浮游植物总物种数的 35.96%; 其次是硅藻门, 占 31.58%; 蓝藻门占 18.42%; 甲藻门、裸藻门、金藻门、隐藻门物种数占比较低. 浮游植物平均丰度为 $1.53 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$, 夏季莫家河断面丰度最高, 为 $1.83 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$, 春季的浪河口下断面丰度最低, 为 $1.40 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$. 全年优势种有 5 种, 分别是小环藻(*Cyclotella* sp.)、细小小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*)、微囊藻(*Microcystis* sp.)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*).

从时间上看, 丹江口水库浮游植物季节差异性明显, 夏季浮游植物丰度明显高于其他季节, 且各季节优势门类明显不同(图 2). 冬季平均丰度为 $5.88 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 硅藻门种类占优势, 优势种有 3 种, 分别是小环藻、微囊藻和尖尾蓝隐藻; 春季平均丰度为 $2.79 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 隐藻门和硅藻门占优势, 优势种有 5 种, 分别是克洛脆杆藻(*Fragilaria crotoneisis*)、小环藻、长锥形锥囊藻(*Dinobryon bavaricum*)、尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*); 夏季平均丰度为 $4.88 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$, 蓝藻门占绝对优势, 优势种有 6 种, 分别是小环藻、细小小平裂藻、微囊藻、细小隐球藻、栅藻(*Scenedesmus* sp.)和尖尾蓝隐藻; 秋季平均丰度为 $3.01 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 蓝藻门、隐藻门和硅藻门占优势, 优势种有 5 种, 分别是小环藻、铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)、小席藻(*Phormidium tenue*)、尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻.

从空间上看, 汉库平均丰度稍高于丹库, 优势种类相似. 丹库平均丰度为 $8.40 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 优势种有 4 种, 分别是小环藻、微囊藻、细小隐球藻和尖尾蓝隐藻; 汉库平均丰度为 $1.94 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$, 优势种有 5 种, 分别是小

环藻、细小平裂藻、微囊藻、细小隐球藻和尖尾蓝隐藻。

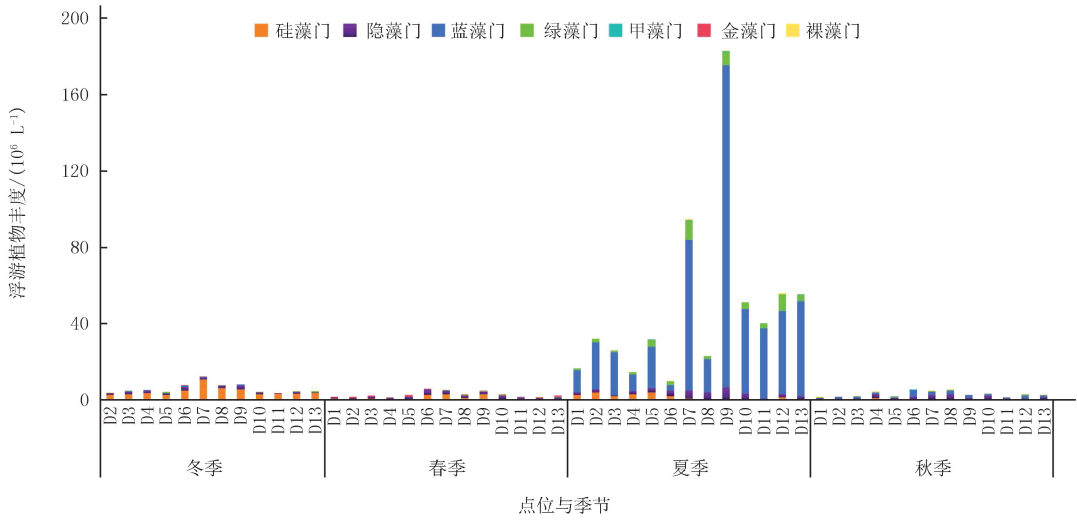


图2 丹江口水库浮游植物丰度

Fig.2 Phytoplankton abundance in Danjiangkou Reservoir

2.2.2 浮游植物功能群特征

通过对丹江口水库浮游植物物种进行功能群划分,共有 27 个功能类群,分别是 A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、LM、LO、M、MP、P、S1、S2、T、TB、TC、TD、W1、W2、X1、X2、X3、Y。根据优势度,优势功能群($Y \geq 0.02$)有 11 个,分别是 C、E、F、J、K、LO、M、P、S2、X2、Y。优势功能群随时间变化为 C/X2/M(冬季)→X2/P/C/E/Y(春季)→K/L₀/M/X2/C/J/F(夏季)→X2/M/C/Y/S2(秋季)(附录表 S2),与功能群相对丰度时间变化(图 3)趋势基本一致。从时间上看,C、X2 是 4 个季节共有优势功能群。从空间上看,丹库和汉库共有优势功能群有 4 个,分别是 C、K、M、X2。其中,C 功能群包含代表性种属为小环藻的硅藻种属,对水体分层敏感,耐低温、低光照;X2 功能群包含代表性种属为尖尾蓝隐藻、衣藻等小型有鞭毛种属;其他各优势功能群特征见附录表 S3。

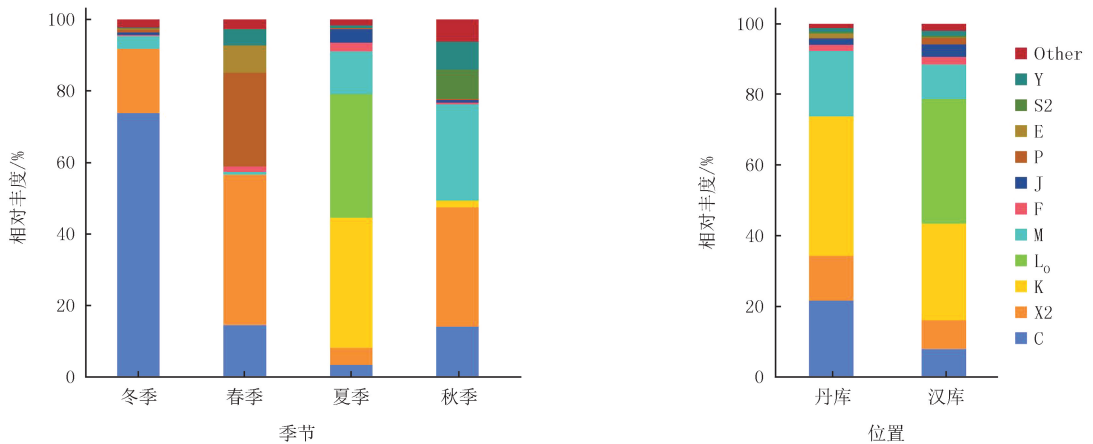


图3 丹江口水库浮游植物功能群相对丰度的时空格局

Fig.3 Spatiotemporal patterns of phytoplankton functional groups relative abundance in Danjiangkou Reservoir

2.3 水质评价

基于浮游植物功能群 Q 指数和综合营养状态指数(TSI_M)对丹江口水库的水质状况进行评价(图 4)。Q 指数的范围为 1.99~4.67,冬季、春季、夏季、秋季的 Q 指数分别为 4.18 ± 0.13 、 3.52 ± 0.54 、 3.25 ± 0.42 、 2.85 ± 0.44 ,结果显示冬季水质处于“极好”的级别,春季和夏季处于“好”的级别,秋季处于“中等”的级别。

TSI_M 范围为 25.22~61.35,均值为 40.03,根据评价标准,丹江口水库整体处于中营养状态,其中春季($TSI_M = 33.10 \pm 4.47$)处于贫营养状态,冬季($TSI_M = 40.77 \pm 3.37$)、夏季($TSI_M = 39.82 \pm 6.87$)、秋季

($TSI_M = 46.42 \pm 3.62$)处于中营养状态。

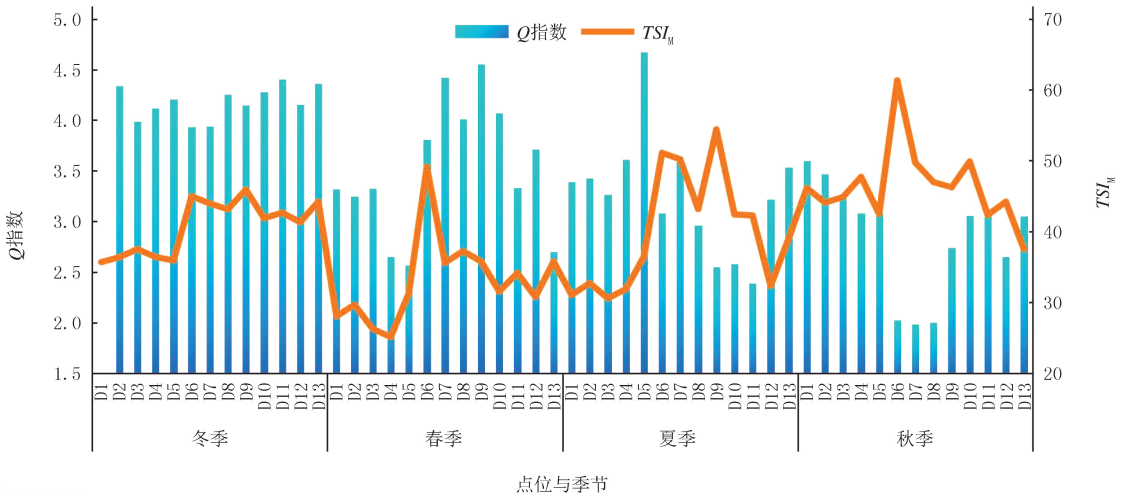


图4 丹江口水库Q指数和综合营养状态指数(TSI_M)的时空分布

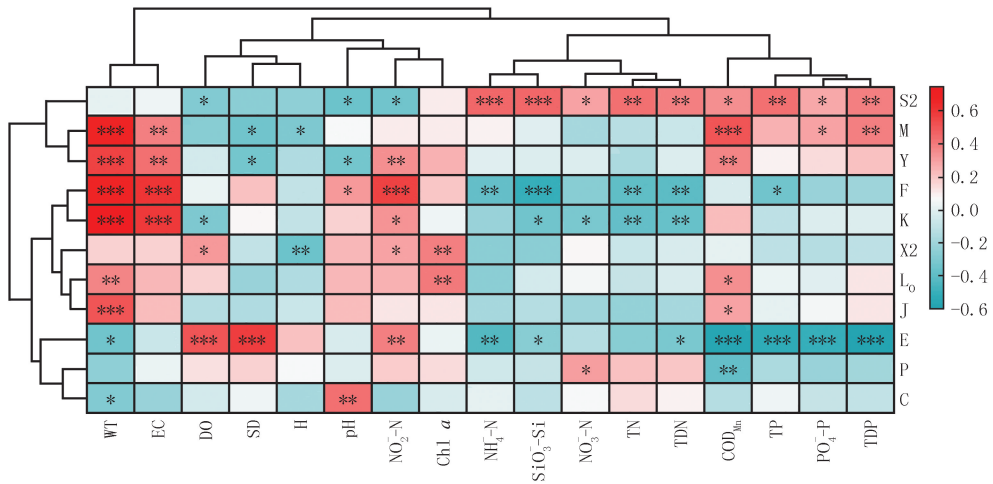
Fig.4 Spatial and temporal distribution of Q index and integrated trophic state index in Danjiangkou Reservoir

空间上,丹库、汉库 Q 指数分别为 $3.51 \pm 0.42, 3.39 \pm 0.68$,水质均处于“好”的级别.丹库、汉库 TSI_M 分别为 $35.51 \pm 5.30, 42.85 \pm 5.19$,分别处于贫营养和中营养状态.两种指数均显示丹库水质稍好于汉库.

2.4 浮游植物功能群与环境因子的相关分析

2.4.1 优势功能群与环境因子的关系

通过 Pearson 相关性分析探究浮游植物优势功能群与环境因子之间的关联性(图 5),结果表明优势功能群 E 与 COD_{Mn} 、TP、 $PO_4^{3-}-P$ 、TDP 显著负相关,与 SD、DO 显著正相关;优势功能群 J、Y 与 WT 显著正相关;优势功能群 K 与 WT、EC 显著正相关;优势功能群 F 与 WT、EC、 $NO_2^- -N$ 显著正相关,与 $SiO_3^{2-}-Si$ 显著负相关;优势功能群 M 与 WT、 COD_{Mn} 显著正相关;优势功能群 S2 与 $NH_4^+ -N$ 、 $SiO_3^{2-}-Si$ 显著正相关.



注:***表示相关性在0.001水平显著(双尾检验),**表示相关性在0.01水平显著(双尾检验),*表示相关性在0.05水平显著(双尾检验).

图5 丹江口水库浮游植物优势功能群与环境因子的相关性热图

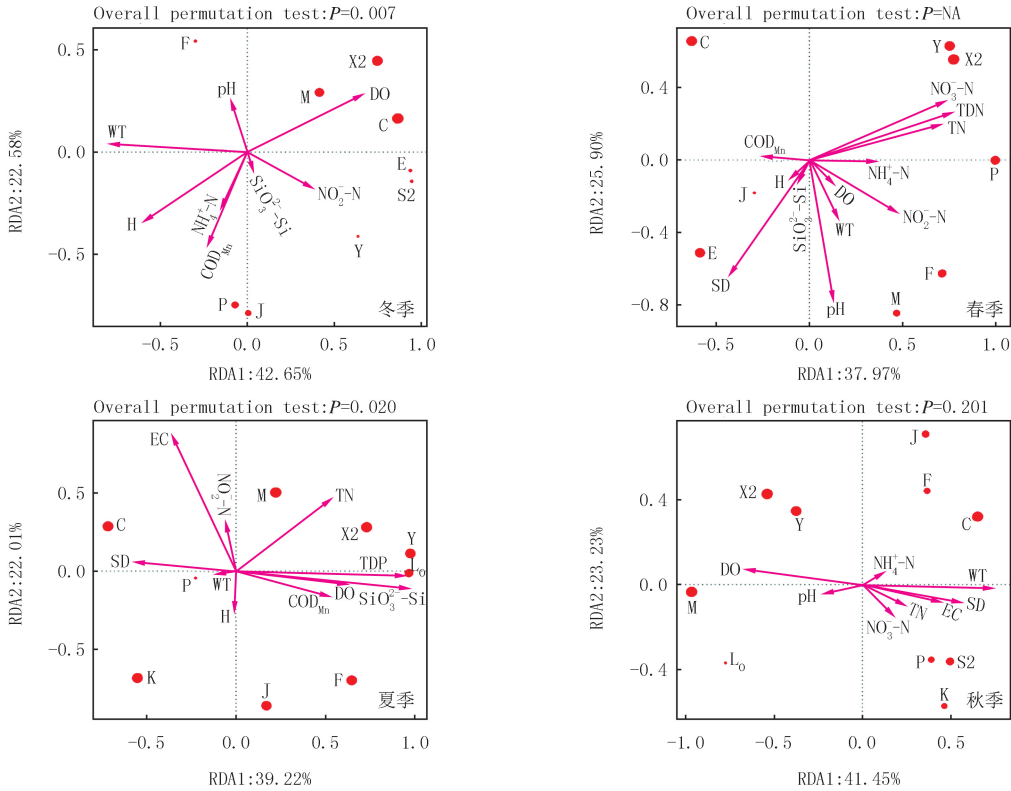
Fig.5 Correlation heatmap between dominant functional groups of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir

2.4.2 冗余分析

将功能群密度进行去除趋势对应分析(PCA),结果显示排序轴长度小于 3,表明功能群分布可使用线性模型,再将功能群密度与环境因子进行冗余分析(RDA),通过共线性分析进行筛选,选出 13 个环境因子,第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释了 35.96%、17.72%的功能群变化(附录图 S2).从图 S2 中可以看出,功能群季节变化明显,冬季各断面主要分布在第四象限,春季主要分布在第三象限,夏季各断面分布较分散,在第

一、二象限,秋季主要分布在围绕原点周围的第一、二、四象限.另外,从图 S2 中还可以看出,主导季节变化的主要环境因子是 WT、EC、NO₂⁻-N、DO.

为了进一步探究影响不同季节浮游植物功能群的关键环境因子,将各季节优势功能群密度与环境因子进行冗余分析(RDA),通过共线性分析进行筛选,选择不同环境因子(图 6),从图中可以看出各季节的优势功能群和关键环境因子.其中,冬季优势功能群为 C、M、X2,影响关键环境因子有 DO、WT、H、COD_{Mn};春季优势功能群为 C、E、P、X2、Y,影响关键环境因子有 TDN、NO₃⁻-N、pH、SD、TN;夏季优势功能群为 C、F、J、K、L₀、M、X2,影响关键环境因子有 SiO₃²⁻-Si、TDP、EC、TN、SD、DO、COD_{Mn};秋季优势功能群为 C、M、S2、Y、X2,影响关键环境因子有 DO、WT、SD、EC.



注:红色圆面积代表各浮游植物优势功能群密度, NA表示无数据.

图6 丹江口水库不同季节浮游植物功能群与环境因子RDA分析

Fig.6 RDA analysis of phytoplankton functional groups and environmental factors in Danjiangkou Reservoir in different seasons

3 讨论

3.1 丹江口水库浮游植物功能群季节演替特征

浮游植物功能群演替主要由营养盐、光照条件、水动力学特征、浮游动物觅食压力、热稳定性、浮游植物的形态、生理适应特征(悬浮机制、营养盐吸收利用效率、捕获光的能力、固碳速率等)相互作用的结果,这些成为特定生境中浮游植物出现或消失的选择机制^[5,12].本次调查丹江口水库浮游植物功能群季节演替明显,与作者之前研究调查的汤浦水库功能群季节演替稍有差异^[12].

从丹江口水库浮游植物功能群演替来看,冬季以 C 功能群为绝对优势功能群,其次是 X2 功能群, M 功能群虽然也占优势,但优势度不高. C 功能群代表性种类为小环藻、美丽星杆藻等硅藻,生长繁殖需要大量硅元素,该功能群对硅元素缺乏、水体分层敏感,指示混合水体,耐受弱光、低温,适宜生长温度低于 18 °C^[13]. X2 功能群代表性种类为尖尾蓝隐藻、衣藻等有鞭毛的藻类,该类群对营养缺乏、滤食作用敏感,适宜生长在较弱扰动水体^[14].冬季因光照、水温(平均 10.4 °C)均比较低,降雨少,水体稳定不分层,且硅元素充足,这样的生境正适宜 C、X2 功能群的生长繁殖.经 RDA 分析得出,春季绝对优势功能群 C 与 WT 呈负相关、与

SiO_3^{2-} -Si 呈正相关,这与上述分析一致.M 功能群以微囊藻为典型种类,微囊藻的悬浮机制能调节其在水体中的上浮和下沉,水体稳定是 M 功能群适宜生存的条件之一^[15],可能是由于冬季水体较稳定使得 M 功能群占一定优势.

春季绝对优势功能群为 X2,其次是 P、C 功能群,E、Y 功能群优势度较低.春季随着水温升高、光照增强以及硅含量的下降,C 功能群优势度逐渐降低,X2 功能群通过鞭毛运动于真光层捕获光照,同时较高的比表面积能快速吸收营养盐而大量繁殖占第一优势,这与 RDA 分析一致,春季绝对优势功能群 X2 与 NO_3^- -N、TDN、TN 质量浓度呈正相关.P 功能群(以大型群体硅藻为代表)中的种类多具硅质外壳,密度较大,易在静水条件下沉降,但在扰动水体中能抵抗水流冲刷而占据优势地位,该功能群具有很强的捕获光的能力和光合作用能力,并且对外界光照强度的变化反应迅速^[16].春季降雨量逐渐增多,水体扰动增强,地表径流也使水体营养更丰富,给 P 功能群的快速生长繁殖提供了一系列关键条件.E 功能群(以锥囊藻为代表种类)一般仅在春季占优势,适应于低温,低营养的水体环境,一般该功能群占优势指示水体环境特别好,这与 TSI 指数(春季处于贫营养状态)和 Q 指数(春季水质处于“好”的级别)的评价结果一致.Y 功能群(以隐藻为典型代表)同 X2 功能群一样,可通过鞭毛运动在光充足的水表面及营养充足的底部进行垂直迁移,适宜生长在较低光照、低扰动水体中.

夏季绝对优势功能群为 K,其次是 L_0 、M 功能群,X2、C、J、F 功能群优势度相对较低.K 功能群以细小隐球藻为代表种类,细胞体积微小,直径只有 $1 \mu\text{m}$ 左右,比表面积大,一般以群体出现,适宜生长在高温、营养丰富的夏季,这与高国敬等^[17]对海南省赤田水库丰水期调查分析结果一致. L_0 功能群(以细小平裂藻、拟多甲藻为代表种类)适应的生境较为广泛(贫到富营养、中到大、深水和浅水水体),夏季水温较高,水体分层现象明显,营养盐在水体中分布不均,下层水体的营养盐不易到上层水体,而甲藻具有较强的运动能力,可以通过垂直迁移充分利用水体营养盐,因此在分层现象明显的水体中,一般 L_0 功能群占优势^[18].M 功能群(以微囊藻为代表种类)耐受高温、高光照,在夏季大量繁殖占优势地位.J 功能群(以栅藻为典型代表)和 F 功能群(以卵囊藻、月牙藻等为代表种类)都耐受高浑浊水体^[19],丹江口水库夏季雨量丰富,以及藻类的大量繁殖,使得水体浑浊、透明度相对较低,易于功能群 J、F 的生长,同时夏季 RDA 分析也表明,功能群 J、F 与 SD 呈负相关.

秋季绝对优势功能群为 X2、M,其次是 C 功能群,Y、S2 功能群优势度较低.研究发现功能群 X2 对水体营养贫富程度不敏感,从中到富营养水体均可生存,因而生境范围广泛,而且也不受温度直接影响,冬季较冷的水体或炎热的夏季水体都可能大量暴发^[18],因为较高的比表面积能快速吸收营养并生长,同时鞭毛也能增加该群体的竞争力,使得在每个季节均为优势功能群.然而它更适应于中等光照和水温、高有机质含量、宽范围辐射照度的水体环境,因而在春季和秋季占第一优势,冬季和夏季优势度相对较低.M 功能群中微囊藻的悬浮机制能调节其在水体中的上浮和下沉,另外,促进微囊藻占优势的因子很多,包括资源竞争、高光及高温耐受力、形成群体因而不易被捕食、较强的对微量元素的竞争力、超强的胞内营养储存能力以及铵盐利用率等,都会导致 M 功能群占绝对优势^[19].随着秋季水温的降低,C、Y 功能群优势度又逐渐升高成为优势功能群.S2 功能群(以小席藻为代表种类)适宜生境为浑浊的浅水,在秋季也占一定优势.

3.2 Q 指数和 TSI 指数比较

在对水库水质评价上,本研究采用 TSI 指数和基于浮游植物功能群的 Q 指数进行综合评价,评价结果与前人对丹江口水库的相关评价^[6]稍有差异,可能是因为评价方法不同导致.另外,本研究中 Q 指数和 TSI 指数两者评价结果也存在一定差异.TSI 指数以叶绿素 *a* 的状态指数为基准,再根据 TN、TP、SD 情况对其进行加权综合,因而常常会受到环境理化因子变化的影响,如降雨会使透明度降低和营养盐质量浓度升高,从而影响 TSI 指数结果.Q 指数是基于浮游植物功能群(不同功能群对水环境因子的适应性和敏感性不同,因而能够反映水体的营养状态和生态特征)在不同水体类型中的影响因子 *F*,通过加权平均得到所有功能群的总值,它主要通过浮游植物的功能群组成和数量(生物量)来反映水体的营养状态,这与水体富营养的表征,即浮游植物的过度繁殖密切相关,Q 指数作为一种综合评价工具,能更全面地解释水体环境质量.虽然 Q 指数在水质评价上的适用性和有效性已经得到了初步证实,但仍有需要改进的地方,如 PADISÁK 等^[3]在计算 Q 指数时仅定义了 8 种水体类型,划分不够精细,使得功能群的划分以及影响因子 *F* 值的确定易受主观

因素干扰^[20].总的来说,Q指数在水质评价中具有较高的可信度,但也需要结合具体情况进行综合分析和判断.在实际应用中可以与其他水质评价方法(如单因子水质评价法、TSI指数等)相结合,形成更为全面的水质评价体系,同时,随着水质评价技术的不断发展和完善,Q指数也需要不断更新和优化以适应新的水质评价需求.

4 结 论

1)丹江口水库2021年夏季浮游植物丰度明显高于其他季节,且各季节优势门类明显不同,全年优势种有5种,分别是小环藻、细小平裂藻、微囊藻、细小隐球藻和尖尾蓝隐藻.各季节优势种不同,共有优势种两种:小环藻和尖尾蓝隐藻.

2)丹江口水库浮游植物功能群季节演替明显:C/X₂(冬季)→X₂/P/C(春季)→K/L₀/M(夏季)→X₂/M/C(秋季).

3)通过综合营养状态指数和Q指数对丹江口水库的水质进行评价,整体为中营养状态,处于“好”的级别由高到低为:春季、冬季、夏季、秋季,丹库好于汉库.

4)驱动浮游植物功能群季节演替的关键环境因子有WT、EC、NO₂⁻-N、DO,其中WT、DO是冬季和秋季的关键因子,EC是夏季的关键因子,NO₂⁻-N在冬季、春季和夏季对浮游植物功能群影响均较大.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.10.26.0001).

参 考 文 献

- [1] 董磊,吴敏,林莉,等.南水北调中线工程对丹江口水库浮游植物群落结构影响[J].环境科学与技术,2021,44(S1):1-7.
- [2] REYNOLDS C S, HUSZAR V, KRUK C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. *Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [3] 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): 1-19.
- [4] 宋高飞,张春梅,朱宇轩,等.南水北调中线浮游植物群落分布特征及其影响因子[J].河南师范大学学报(自然科学版),2023,51(4):17-26.
- [5] SONG G F, ZHANG C M, ZHU Y X, et al. Distribution characteristics of phytoplankton communities and their influencing factors along the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2023, 51(4): 17-26.
- [6] 肖玉娜,程靖华,莫晓聪,等.丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2023,35(3):821-832.
- [7] XIAO Y N, CHENG J H, MO X C, et al. Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factor in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 821-832.
- [8] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [9] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991.
- [10] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [11] LAMPITT R S, WISHNER K F, TURLEY C M, et al. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. *Marine Biology*, 1993, 116(4): 689-702.
- [12] CARLSON R E. Trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [13] 蔡庆华,刘建康,LORENZ K.评价湖泊富营养化的一个综合模型[J].应用生态学报,2002(12):1674-1678.
- [14] CAI Q H, LIU J K, LORENZ K. A comprehensive model for assessing lake eutrophication[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(12): 1674-1678.
- [15] 张俊芳,胡晓红,马沛明,等.汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子[J].水生态学杂志,2021,42(3):55-62.
- [16] ZHANG J F, HU X H, MA P M, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and key driving factors in Tangpu Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 55-62.
- [17] CLAUDINEIA A D S, TRAIN S, RODRIGUES L C. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 537(1/2/3): 99-109.
- [18] BARONE R, NASELLI-FLORES L. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in Sicilian water bodies[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 502(1): 325-329.
- [19] YOSHINAGA I, HITOMI T, MIURA A, et al. Cyanobacterium *Microcystis* bloom in a eutrophicated regulating reservoir[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2006, 40(3): 283-289.
- [20] 张怡,胡韧,肖利娟,等.南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较[J].生态环境学报,2012,21(1):11.

- ZHANG Y, HU R, XIAO L J, et al. Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 11.
- [17] 高国敬, 肖利娟, 林秋奇, 等. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价[J]. 生态科学, 2013, 32(2): 144-150.
- GAO G J, XIAO L J, LIN Q Q, et al. Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province [J]. Ecological Science, 2013, 32(2): 144-150.
- [18] MARIA R M L, BICUDO C E D M, FERRAGUT M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. Hydrobiologia, 2005, 542(1): 235-247.
- [19] 董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 735-742.
- DONG J, LI G B, SONG L R. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(5): 735-742.
- [20] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1833-1840.
- YANG W, ZHU J Y, LU K H, et al. The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1833-1840.

Seasonal succession characteristics of phytoplankton functional groups and water ecological health assessment in Danjiangkou Reservoir

Zhang Junfang¹, Huang Xuanmin², Ni Xuefeng², Chen Wei¹,
Zhou Lianfeng¹, Peng Xiaoran², Ma Peiming¹

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources; Innovation Team of the Changjiang Water Resources Commission for River and Lake Ecosystem Restoration Key Technology, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China;
2. Mid-Route Source of South-to-North Water Transfer Co., Ltd., Danjiangkou 442700, China)

Abstract: As a key water source for the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, it is essential to understand the seasonal succession of phytoplankton functional groups and the ecological health status of the Danjiangkou Reservoir. A quarterly sampling survey was conducted in 2021 on phytoplankton and environmental factors in two reservoir areas of Danjiangkou Reservoir. Two indices were used to comprehensively evaluate the water quality status. The results showed that 114 species(varieties) of phytoplankton in 7 phylums, 35 families and 69 genera were detected in the area, with the total abundance varying from 1.40×10^6 to $183.33 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, and the average abundance was $1.53 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$. The abundance of phytoplankton in summer was significantly higher than that in other seasons, and the dominant phyla in each season were obviously different. There were five dominant species throughout the year, namely *Cyclotella* sp., *Merismopedia tenuissima*, *Microcystis* sp., *Aphanocapsa elachista* and *Chroomonas acuta*, the dominant species differed from season to season, and there were two common dominant species: *Microcystis* sp. and *Chroomonas acuta*. A total of 27 functional groups were classified, including 11 dominant functional groups, C and X2 were the common dominant functional groups in each season, and the seasonal succession of phytoplankton functional groups was obvious: C/X2(winter) → X2/P/C(spring) → K/L₀/M(summer) → X2/M/C(autumn). The water quality of Danjiangkou Reservoir, evaluated by the integrated trophic state index(TSI_M) and Q index, was overall mesotrophic state and in the "good" level. The ranking by season(best to worst) was: spring, winter, summer, autumn. The Danku section quality was superior to the Hanku section. RDA analysis showed that the effects of environmental factors on the phytoplankton functional groups were different in different seasons, and the overall key drivers were water temperature, conductivity, nitrite and dissolved oxygen, of which water temperature and dissolved oxygen were the main drivers in winter and autumn, conductivity was the main driver in summer, and nitrite had a greater impact on phytoplankton functional groups in winter, spring and summer.

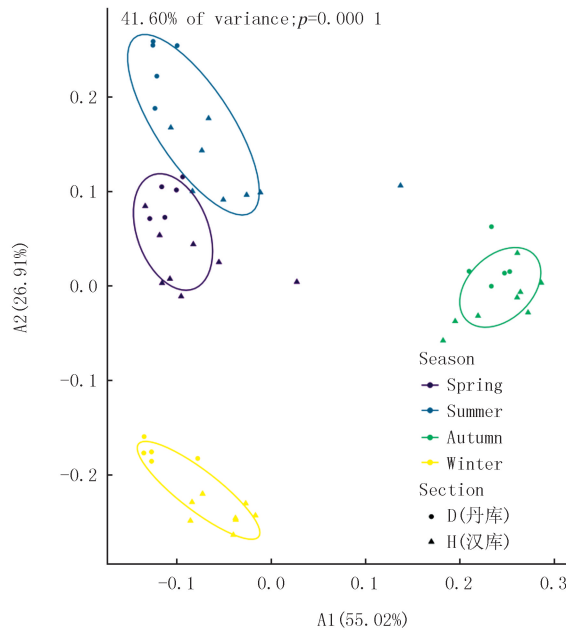
Keywords: phytoplankton; functional groups; seasonal succession; ecological health assessment; Danjiangkou Reservoir

附录

表 S1 丹江口水库环境因子均值时空变化

Tab. S1 Spatial and temporal change of mean environmental factors in Danjiangkou Reservoir

因子	冬季	春季	夏季	秋季	丹库	汉库
水温/°C	10.4	16.7	29.0	19.2	19.3	18.5
透明度/m	2.7	5.8	3.1	1.2	4.4	2.5
pH	8.8	8.5	8.6	8.0	8.5	8.5
溶解氧/(mg · L ⁻¹)	10.2	10.5	9.7	8.5	9.3	10.0
电导率/(uS · cm ⁻¹)	193.3	228.0	256.1	188.8	234.4	218.2
H/m	39.5	47.8	33.8	40.4	40.3	40.4
$\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ /(mg · L ⁻¹)	0.123	0.045	0.052	0.216	0.111	0.108
$\rho_{\text{NO}_3^--\text{N}}$ /(mg · L ⁻¹)	1.16	1.02	1.02	1.05	0.95	1.13
$\rho_{\text{NO}_2^--\text{N}}$ /(mg · L ⁻¹)	0.003	0.014	0.018	0.002	0.009	0.010
ρ_{TN} /(mg · L ⁻¹)	1.61	1.18	1.18	1.42	1.22	1.43
$\rho_{\text{PO}_4^{3--\text{P}}}$ /(mg · L ⁻¹)	0.009	0.004	0.006	0.029	0.011	0.013
ρ_{TP} /(mg · L ⁻¹)	0.023	0.007	0.012	0.083	0.029	0.032
ρ_{Chl_a} /($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.72	2.46	4.36	2.06	1.93	3.50
$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ /(mg · L ⁻¹)	1.85	1.57	2.56	4.33	2.54	2.60
ρ_{TDN} /(mg · L ⁻¹)	1.41	1.10	1.13	1.34	1.12	1.33
ρ_{TDP} /(mg · L ⁻¹)	0.013	0.004	0.010	0.036	0.013	0.017
$\rho_{\text{SiO}_3^{2--\text{Si}}}$ /(mg · L ⁻¹)	7.64	5.42	4.70	10.04	6.18	7.43



图S1 丹江口水库环境因子排序

Fig.S1 Ranking of environmental factors in Danjiangkou Reservoir

表 S2 丹江口水库浮游植物优势功能群及优势度

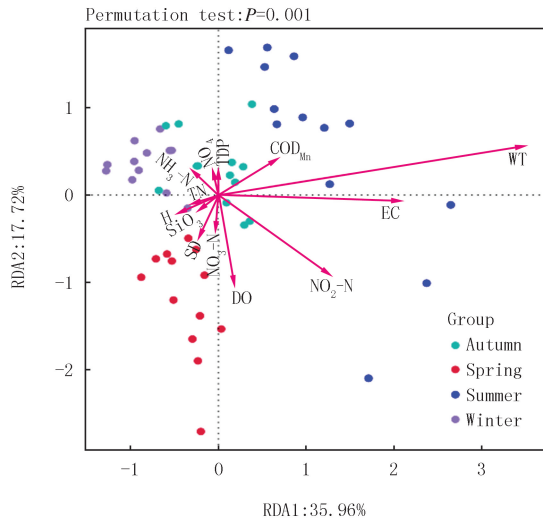
Tab. S2 Phytoplankton dominant functional groups and dominance degree in Danjiangkou Reservoir

功能群	冬季	春季	夏季	秋季	丹库	汉库	全年
C	0.738	0.145	0.033	0.140	0.217	0.079	0.108
E	—	0.071	—	—	—	—	—
F	—	—	0.025	—	—	—	—
J	—	—	0.032	—	—	—	—
K	—	—	0.309	—	0.166	0.051	0.082
L _O	—	—	0.186	—	—	0.088	0.044
M	0.030	—	0.119	0.268	0.146	0.078	0.092
P	—	0.182	—	—	—	—	—
S2	—	—	—	0.038	—	—	—
X2	0.180	0.421	0.047	0.334	0.126	0.082	0.091
Y	—	0.046	—	0.078	—	—	—

表 S3 丹江口水库浮游植物优势功能群特征

Tab. S3 Characteristics of dominant phytoplankton functional groups in Danjiangkou Reservoir

优势功能群	主要代表性种(属)	生境特征	耐受性	敏感性
C	小环藻、美丽星杆藻(<i>Asterionella formosa</i>)	富营养的中小型水体	低光照、低温、碳缺乏	硅耗竭、水体分层
E	长锥形锥囊藻	贫营养或异养型的小型水体	低营养	二氧化碳缺乏
F	浮球藻(<i>Planktosphaeria gelatinosa</i>) 单生卵囊藻(<i>Oocystis solitaria</i>) 湖生卵囊藻(<i>O. lacustis</i>)	中至富营养的水体	低营养、高浑浊	二氧化碳缺乏
J	网状空星藻(<i>Coelastrum reticulatum</i>)、 十字藻(<i>Crucigenia apiculata</i>)、栅藻	富营养、混合、浅水		弱光
K	细小隐球藻	富营养的浅水		深层混合
L _O	细小分裂藻、拟多甲藻(<i>Peridiniopsis</i> sp.)	中营养水体的夏季变温层	隔离营养	持续的或深度的水层混合
M	铜绿微囊藻、微囊藻	小至中型的富营养、超富营养水体	高光照	冲刷作用、低光照
P	克洛脆杆藻、颗粒沟链藻极狭变种 (<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>)	2~3 m 持续或半持续的混合水层, 富营养变温层	弱光、碳缺乏	水体分层、硅耗竭
S2	小席藻	浑浊的浅水	低光照	冲刷作用
X2	尖尾蓝隐藻、衣藻(<i>Chlamydomonas</i> sp.)	中至富营养浅水水体的清洁混合层	水体分层	水层混合、滤食
Y	嗜蚀隐藻	静水环境	低光照	吞噬作用



图S2 丹江口水库浮游植物功能群与环境因子RDA分析

Fig.S2 RDA analysis of phytoplankton functional groups and environmental factors in Danjiangkou Reservoir