

## 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\*

肖玉娜<sup>1,2</sup>, 程靖华<sup>3</sup>, 莫晓聪<sup>1</sup>, 李永蓉<sup>1,2</sup>, 刘晓娟<sup>1,2</sup>, 毕 胜<sup>1\*\*</sup>

(1: 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

(2: 武汉长江科创科技发展有限公司, 武汉 430010)

(3: 南水北调中线水源有限责任公司, 十堰 442700)

**摘要:** 研究丹江口水库在完成高水位蓄水期间浮游植物群落的时空动态特征可为丹江口水库的水质保护与生态系统结构优化及健康管理提供一定科学依据。本研究基于 2018—2020 年的水库浮游植物监测数据, 结合同期水库水体的理化参数, 分析了丹江口水库浮游植物在不同年度、季度及空间的变化特征, 以及影响浮游植物群落结构变化的主要环境因子。结果显示该区域共检测出浮游植物 7 个门类, 其中蓝藻门、硅藻门、绿藻门、隐藻门为优势类群。2018—2020 年浮游植物年均密度分别为  $1.96 \times 10^6$ 、 $2.55 \times 10^6$  和  $5.07 \times 10^6$  cells/L, 呈现出逐年增高趋势。浮游植物季度密度表现为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季, 在夏秋季节蓝藻门和绿藻门占优势, 春冬季节硅藻门和隐藻门占优势, 同时硅藻门在四季中均占据生长优势。空间上库区浮游植物密度明显高于支流, 且汉江库区浮游植物密度高于丹江库区, 其中蓝藻门和绿藻门主要在库区大量出现, 而支流则以硅藻门和隐藻门为主。RDA 分析显示, 影响丹江口水库浮游植物的主要环境因子是水温, 其次为化学需氧量、氨氮和总磷。在不同季节和不同库区影响浮游植物群落分布的主要环境因子有所不同, 春季总氮为主要影响因子, 夏季浮游植物群落受多个环境因子的共同作用, 秋季总磷对浮游植物群落影响最大, 冬季高锰酸盐指数为主要影响因子, 丹江库区则主要受水温、pH、溶解氧等影响, 汉江库区还受到总氮和总磷等营养元素的干扰。

**关键词:** 丹江口水库; 浮游植物; 环境因子; 时空变化

## Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir\*

Xiao Yuna<sup>1,2</sup>, Cheng Jinghua<sup>3</sup>, Mo Xiaocong<sup>1</sup>, Li Yongrong<sup>1,2</sup>, Liu Xiaojuan<sup>1,2</sup> & Bi Sheng<sup>1\*\*</sup>

(1: *Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China*)

(2: *Wuhan Changjiang Kechuang Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430010, P.R.China*)

(3: *South-to-North Water Diversion Project Midline Water Source Co. Ltd., Shiyan 442700, P.R.China*)

**Abstract:** Research on the spatio-temporal dynamics characteristics of phytoplankton community in the Reservoir during the high-water storage period can provide a scientific basis for water quality protection, ecosystem structure optimization and health management in Danjiangkou Reservoir. Based on the monitoring data of phytoplankton and physical and chemical parameters of reservoir water from 2018 to 2020, this study analyzed the variation characteristics of phytoplankton in different years, seasons and spaces, together with the main environmental factors affecting the structure of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir. The results showed that there were seven phyla in this region, among which the Cyanophyta, Bacillariophyta, Chlorophyta and Cryptophyta had relatively high abundance. The annual average density of phytoplankton showed an increasing trend from  $1.96 \times 10^6$  cells/L in 2018, and  $2.55 \times 10^6$  cells/L in 2019, to  $5.07 \times 10^6$  cells/L in 2020. The seasonal density of phytoplankton was autumn > summer > spring > winter, and the Bacillariophyta had great advantages in the four seasons. In summer and autumn, Cyanophyta and Chlorophyta were dominant, while in spring and winter, Bacillariophyta and Cryptophyta were dominant. Spatially, the density of phytoplankton in the reservoir area was significantly higher than that in the tributaries, and in Hanjiang Reservoir was significantly higher than that in Danjiang Reservoir, in which Cyanophyta and Chlorophyta mainly appeared in the reservoir area, while the tributaries

\* 2022-08-21 收稿; 2022-10-10 收修改稿。

中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2021466/TG8) 资助。

\*\* 通信作者; E-mail: bs20040715@126.com。

were dominated by Bacillariophyta and Cryptophyta. The RDA analysis showed that the main environmental factor affecting phytoplankton in Danjiangkou Reservoir was water temperature, followed by chemical oxygen demand, ammonia nitrogen and total phosphorus, which respectively played major roles in different seasons, for example total nitrogen in spring, total phosphorus in autumn, permanganate index in winter and many environmental factors together in summer. Spatially, the phytoplankton in Danjiang and Hanjiang Reservoirs were both affected by water temperature, pH, dissolved oxygen, that in Hanjiang Reservoir was also affected by nutrient elements such as total nitrogen and total phosphorus.

**Keywords:** Danjiangkou Reservoir; phytoplankton; environmental factors; temporal and spatial patterns

随着人们对饮用水源关注程度的提高, 准确掌握饮用水源健康状况已成为保障饮水安全的重要基础。我国目前对饮用水环境质量的监测主要通过水体理化性质和微生物指标来反映, 对水源生态系统健康的持续监测还比较缺乏<sup>[1]</sup>。浮游植物作为湖库生态系统主要的初级生产者之一, 在整个生态系统的物质循环、能量流动以及信息传递中扮演着重要角色。浮游植物的种类组成、群落结构和细胞密度等往往会受到多种环境因素(如水温、pH、溶解氧、营养盐、水动力条件等)的共同影响<sup>[2-4]</sup>, 既可以反映水环境的质量状况, 同时也能指示湖库生态系统的健康状况<sup>[1]</sup>。因此, 从生态学角度出发, 采用浮游植物进行水环境生态监测, 可为水库型饮用水源健康评估与水环境保护提供更多科学支撑。

丹江口水库是南水北调中线工程水源地, 承担着向华北地区城市供水、同时兼顾农业和生态用水的任务, 库区水质状况不仅直接影响中线工程的效率和效益, 而且密切关系到广大受水区人民群众的饮水安全。丹江口水库分初期工程(1958—2005年)和加高工程(2005—2013年)两期建设, 丹江口大坝加高工程实施后大坝由162 m加高至176.6 m, 蓄水水位由157 m提高到170 m<sup>[5]</sup>。2014年通水后水库水位很长时间保持在154~158 m, 在2017年水库首次完成了枢纽164 m和167 m阶段蓄水试验。高水位蓄水后水库的水文情势发生了新的变化<sup>[6]</sup>, 如水位和蓄水面积发生变化使水库水动力条件变得更加复杂<sup>[5]</sup>, 水库消落带内大量的土地处于淹没和非淹没的交替状态, 淹没的农田土壤中氮磷营养盐和有机污染物等释放进入水体改变了水库的局部水质和营养水平<sup>[5,7-8]</sup>, 这些新的变化可能会对丹江口水库浮游植物的数量分布、群落结构和多样性等产生较大影响。

从大坝建成后至今, 学者们已经对丹江口水库库区和库湾开展了大量研究, 大多集中于大坝加高前<sup>[9-13]</sup>或大坝加高后高水位蓄水前<sup>[14]</sup>, 虽然贾海燕<sup>[15]</sup>、董磊<sup>[5]</sup>、熊满堂<sup>[16]</sup>等在高水位蓄水后对库湾或库区进行了一些研究, 但库区的相关研究重点关注了浮游植物群落密度和结构特征变化, 且这些研究的时间跨度也相对较短<sup>[5,16]</sup>。因此, 本研究于2018—2020年对丹江口水库库区和两条主要支流入库点的浮游植物和水环境质量状况进行了为期三年的连续监测, 分析了浮游植物群落结构和多样性的时空变化特征, 以及其与环境因子之间的相关关系, 并对水质状况进行生态评价, 以期对丹江口水库在完成高水位蓄水期间或蓄水后水库水质的安全保障和生态系统的健康管理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

丹江口水库位于汉江上游, 控制流域面积9.52万 km<sup>2</sup>, 主库区核心区分布于湖北丹江口市和河南省南阳市淅川县。水库呈“V型”, 由1973年建成的丹江口大坝截汉江、丹江形成汉江库区和丹江库区两大库区<sup>[6]</sup>, 回水长度汉江为194 km, 丹江为93 km, 水库库容达到290.5亿 m<sup>3</sup>, 水库面积为1050 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。

### 1.2 采样与分析方法

根据典型性和代表性原则, 结合本单位在丹江口水库的长期监测情况, 本研究选取丹江口水库库区中心断面和藻类易发生的控制断面以及典型支流入库断面进行监测, 采样点位布置如图1所示, 分别为: 丹江库区中心断面(S1)、汉江库区中心断面(S2)、汉江库区藻类易发生的控制断面(S3)、丹江库区典型入库断面(S4)和汉江库区典型入库断面(S5)。在2018—2020年对该区域5个点位进行为期3年的连续监测, 分别于每年的3月(春)、6月(夏)、9月(秋)、12月(冬)进行样品采集和分析测试。

浮游植物样品采集和测试方法参照《水库渔业资源调查规范》(SL167—2014)和《内陆水域浮游植物监测技术规程》(SL733—2016)进行。浮游植物定性样品采集, 现场用25号浮游生物网在水下0.5 m处

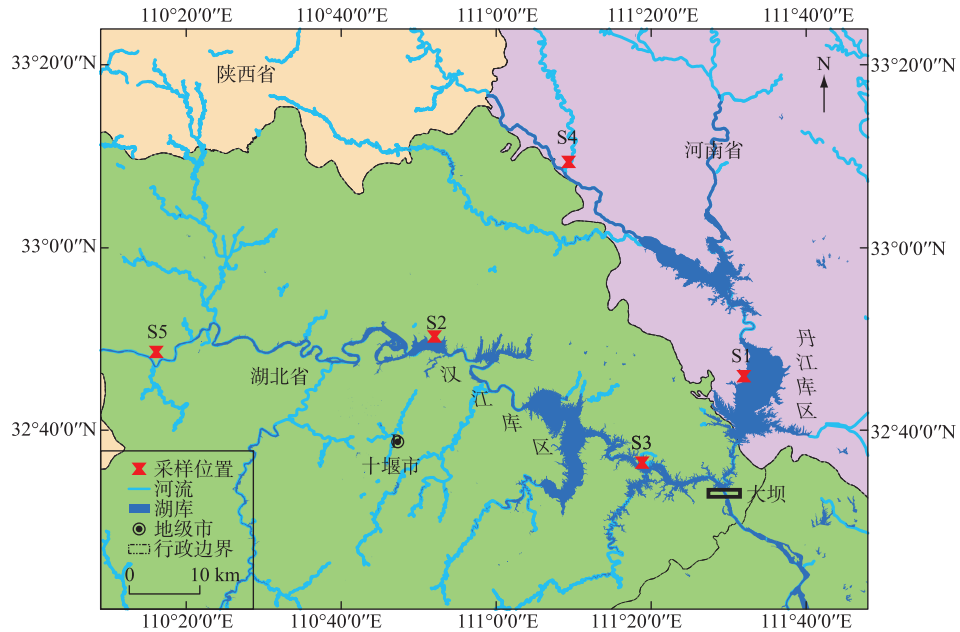


图1 研究区域及采样点位置

Fig.1 Studying area and sampling sites

做“∞”字形反复拖曳,再将收集到的样品置于 50 mL 样品瓶中,用 4% 的甲醛固定;浮游植物定量样品采集,用有机玻璃采水器采集水样 1 L,现场加 10% 的鲁哥氏液固定,低温保存至实验室,水样静置沉淀 48 h,采用虹吸法浓缩至 50 mL,加入福尔马林保存,后期用于浮游植物的鉴定和检测。浮游植物样品的鉴定和计数参照联合国教科文组织推荐的《浮游植物手册》和《中国淡水藻类:系统、分类及生态》进行。浮游植物的计数方法采用目镜视野法,用 0.1 mL 的浮游植物计数框在光学显微镜(10×40 倍)下进行计数。计数时摇匀浓缩液,立即取 0.1 mL 样品放入计数框中全片计数,细胞数在 300 以上,每个样品至少计数 2 片,取其平均值作为最终结果。根据细胞浓缩倍数换算为每升水样中的细胞数(cells/L),该细胞数即为浮游植物密度。

水体的理化参数采用便携式多参数监测仪 YSI EX01 现场测定 pH、水温和溶解氧,并采集表层 0.5 m 处水样低温保存至实验室,参照《水和废水监测分析方法》(第四版),对水体中高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总磷和总氮进行分析。

### 1.3 数据处理与分析

浮游植物的多样性度量采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )、Margalef 丰富度指数( $d$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ ),计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^N \left( \frac{N_i}{N} \right) \ln \left( \frac{N_i}{N} \right) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s \left( \frac{N_i}{N} \right)^2 \quad (2)$$

$$d = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

式中, $S$  为浮游植物种类数, $N_i$  为第  $i$  种的个体数, $N$  为所有种类的总个体数。

本研究中浮游植物密度和多样性分析统计图采用 Origin 2018 绘制;采用 IBM SPSS Statistic 19.0 软件对浮游植物的多样性和环境因素进行 Spearman 等级相关分析;采用 R 4.2.1 的“vegan”包进行相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM; 置换次数  $n=999$ ), 对浮游植物进行组间差异性检验;采用 Canoco 5 软件对浮游植物和环境因子进行 RDA (redundancy analysis) 分析, 分析前先对浮游植物数量进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 以确定其属于线型分布或单峰型分布。

## 2 结果

### 2.1 丹江口水库水体理化特征

丹江口水库水体理化指标见表 1。水温 (WT) 和 pH 值变化范围分别为 8.2~30.0℃ 和 7.7~8.6;溶解氧 (DO) 变化范围为 6.7~14.5 mg/L, 春季平均浓度最高, 为 12.0 mg/L, 秋季最低, 为 8.2 mg/L;高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>) 和化学需氧量 (COD) 的变化范围分别在 1.00~3.00 和 2.40~12.00 mg/L 之间, 秋季平均浓度最高, 分别为 2.21 和 7.27 mg/L, 春季最低, 分别为 1.75 和 4.54 mg/L;生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>) 浓度变化范围为 0.50~2.20 mg/L, 夏季平均浓度最高, 为 1.03 mg/L, 冬季平均浓度最低, 为 0.84 mg/L;总磷 (TP) 浓度变化范围为 0.01~0.07 mg/L, 秋季平均浓度最高, 为 0.03 mg/L, 其余季节平均浓度均为 0.02 mg/L;氨氮 (NH<sub>3</sub>-N) 和总氮 (TN) 浓度范围分别为 0.03~0.29 和 0.23~4.80 mg/L, 春季平均浓度均最高, 分别为 0.11 和 1.72 mg/L。依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 在总氮不参与评价的情况下, 丹江口水库水质维持在地表水水质 I 或 II 类标准, 水质状况优良, 满足水源地供水功能的要求。

表 1 2018—2020 年丹江口水库水体理化参数年均值统计

Tab.1 Annual mean statistics of physicochemical parameters of Danjiangkou Reservoir during 2018—2020

	WT/ ℃	pH	DO/ (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> / (mg/L)	COD/ (mg/L)	BOD <sub>5</sub> / (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)
S1	20.6	8.1	9.5	1.86	5.24	0.67	0.09	0.01	1.20
S2	18.7	8.2	10.2	2.12	6.63	1.05	0.13	0.02	1.41
S3	20.0	8.2	10.0	1.98	5.70	1.04	0.12	0.02	1.40
S4	19.8	8.1	10.1	1.67	6.00	0.98	0.07	0.02	1.62
S5	17.9	8.1	9.8	1.83	5.08	0.99	0.06	0.03	1.55
春季	12.4	8.0	12.0	1.75	4.54	0.93	0.11	0.02	1.72
夏季	23.9	8.2	10.0	1.85	5.20	1.03	0.09	0.02	1.23
秋季	27.4	8.2	8.2	2.21	7.27	1.01	0.10	0.03	1.29
冬季	13.8	8.0	9.4	1.76	5.25	0.84	0.08	0.02	1.51

### 2.2 浮游植物特征

2.2.1 浮游植物群落种类组成 2018—2020 年在丹江口水库共检测出 7 个门类的浮游植物, 包括硅藻门 (Bacillariophyta)、蓝藻门 (Cyanophyta)、隐藻门 (Cryptophyta)、绿藻门 (Chlorophyta)、甲藻门 (Pyrrophyta)、金藻门 (Chrysophyta) 和裸藻门 (Euglenophyta)。2018 年共检测出浮游植物 7 门 80 属 194 种, 其中种类数最多的为绿藻 79 种, 其次分别为硅藻 62 种、蓝藻 36 种、裸藻 5 种、金藻 5 种、甲藻 4 种和隐藻 3 种; 2019 年共检测出浮游植物 7 门 80 属 217 种, 其中种类数最多的为硅藻 89 种, 其次分别为绿藻 74 种、蓝藻 33 种、裸藻、金藻和甲藻均为 6 种, 隐藻 3 种; 2020 年共检测出浮游植物 7 门 81 属 168 种, 其中种类数最多的为硅藻 73 种, 其次分别为绿藻 46 种、蓝藻 30 种、金藻 6 种、隐藻 5 种、裸藻和甲藻各 4 种。整体上, 隐藻门的卵形隐藻 (*Cryptomonas ovata* Ehr.), 硅藻门的梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana* Kütz.)、加氏双菱藻 (*Surirella capronii*)、变异直链藻 (*Melosira varians* Ag.)、尖针杆藻 (*Synedra acus* Kütz.)、脆杆藻 (*Frsgilaria* sp.), 绿藻门的具孔盘星藻点纹变种 (*Pediastrum clathratum* var. *Poputatum*), 蓝藻门的鱼腥藻 (*Anabaena* sp.) 和巨颤藻 (*Oscillatoria princeps* Vauch.) 出现频率较高, 为该区域的优势藻种。

2.2.2 浮游植物群落密度及群落结构时空变化 1) 浮游植物年度密度及群落结构变化趋势。年度分析显

示,2018—2020年丹江口水库浮游植物密度年均值分别为 $1.96 \times 10^6$ 、 $2.55 \times 10^6$ 和 $5.07 \times 10^6$  cells/L,呈现出逐年增高趋势。参照前人利用浮游植物细胞密度评价水质的标准<sup>[18]</sup>,当浮游植物细胞密度 $\leq 5 \times 10^5$  cells/L,水体为极贫营养状态,细胞密度 $\leq 1 \times 10^6$  cells/L为贫营养状态,细胞密度介于 $1 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6$  cells/L之间为贫中营养状态,介于 $1 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$  cells/L之间为中营养状态,介于 $4 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7$  cells/L之间为中富营养状态。故2018—2020年丹江口水库水体状况评价为贫中营养状态。在群落结构方面,蓝藻门(32.14%)、硅藻门(24.69%)、绿藻门(23.72%)、隐藻门(15.74%)相对丰度较高,为该区域的优势类群(图2a)。通过ANOSIM分析进行组间差异性检验,得到 $R$ 为-0.01, $P$ 为0.622,表明浮游植物年间差异不显著。

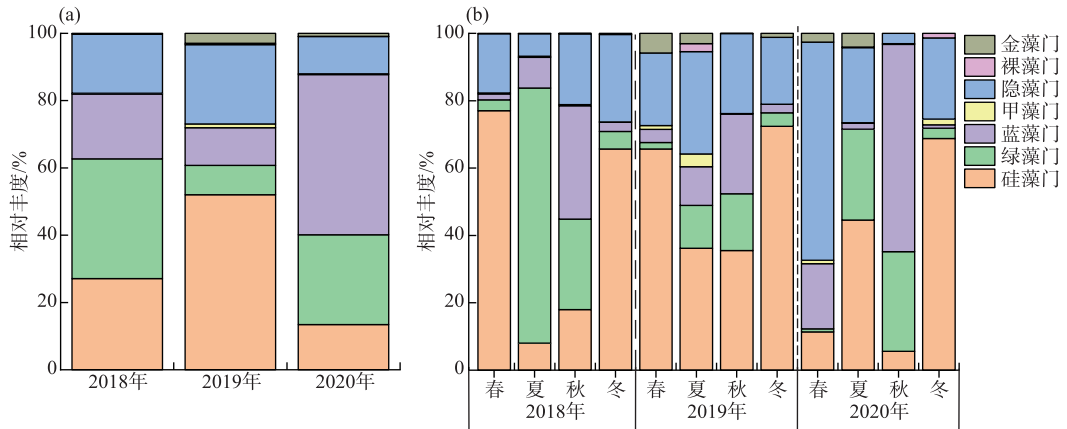


图2 丹江口水库浮游植物群落结构年度(a)、季节(b)变化

Fig.2 Annual (a) and seasonal (b) changes of phytoplankton community structure in Danjiangkou Reservoir

2)浮游植物季度密度及群落结构变化趋势。季度分析显示,2018—2020年浮游植物平均密度表现为秋季最高( $7.35 \times 10^6$  cells/L),其次为夏季( $2.46 \times 10^6$  cells/L),春季次之( $1.97 \times 10^6$  cells/L),冬季最低( $0.99 \times 10^6$  cells/L)(表2)。参照浮游植物细胞密度评价水质的标准<sup>[18]</sup>,丹江口水库水体冬季为极贫营养状态,春季、夏季和秋季均为贫中营养状态。在群落结构方面,不同季节的浮游植物群落结构波动较大(图2b)。春季,2018年和2019年以硅藻门(76.96%和65.68%)为主,其次为隐藻门(17.55%和21.54%),而在2020年则演变为隐藻门(64.72%)占据绝对优势,蓝藻门(19.37%)和硅藻门(11.35%)次之;夏季,2018年绿藻门占绝对优势(75.73%),2019年硅藻门(36.18%)和隐藻门(30.39%)比例较高,2020年以硅藻门(44.54%)、绿藻门(27.03%)和隐藻门(22.32%)为主;秋季,2018和2019年蓝藻门(33.65%和23.68%)、绿藻门(26.86%和16.83%)、隐藻门(21.03%和23.75%)和硅藻门(18.00%和5.55%)均较为丰富,2020年秋季蓝藻门占据绝对优势(61.53%),绿藻门(29.62%)次之;冬季的群落结构相似,硅藻门占据绝对优势(2018—2020年分别占65.65%、72.40%、68.78%),其次为隐藻门(25.96%、19.85%、24.12%)。整体上,丹江口水库春季和冬季浮游植物优势类型主要为

表2 丹江口水库浮游植物细胞密度( $\times 10^6$  cells/L)时空变化统计

Tab.2 Spatial-temporal variation of phytoplankton cell density ( $\times 10^6$  cells/L) in Danjiangkou Reservoir

时间	点位	春季	夏季	秋季	冬季	空间均值
2018年	S1	0.05	0.57	4.53	1.16	1.58
	S2	0.83	0.62	3.99	4.09	2.38
	S3	0.32	9.41	6.71	0.79	4.31
	S4	0.29	0.29	1.91	0.63	0.78
	S5	0.79	0.30	1.57	0.34	0.75
2019年	S1	2.11	0.34	1.42	1.03	1.22
	S2	4.24	6.69	5.51	3.09	4.88
	S3	8.12	0.68	8.48	1.04	4.58
	S4	5.04	0.44	0.31	0.66	1.61
	S5	0.36	0.62	0.23	0.59	0.45
2020年	S1	1.77	3.43	2.37	0.24	1.95
	S2	0.71	2.72	50.32	0.25	13.50
	S3	2.41	5.22	19.57	0.17	6.84
	S4	0.86	2.16	2.45	0.62	1.52
	S5	1.69	3.34	0.92	0.19	1.53

硅藻门和隐藻门,夏季以绿藻门、硅藻门、隐藻门为主,秋季蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门大量出现,群落结构较为丰富。其中,春冬季节出现频率较高的有舟形藻(*Navicula* sp.)、美丽星杆藻(*Asterionella formosa* Hassall.)、普通等片藻(*Diatoma vulgare*)、变异直链藻、嗜蚀隐藻(*Chroomonas erosa* Ehr.)等,夏秋季有颗粒直链藻(*Melosira granulata* (Ehrenberg) Ralfs.)、具孔盘星藻点纹变种、梅尼小环藻和卵形隐藻等。通过 ANOSIM 分析进行组间差异性检验,得到  $R$  为 0.106,  $P$  为 0.002,浮游植物季节间差异显著。

3) 浮游植物空间密度及群落结构变化趋势。空间分析显示,丹江口水库浮游植物密度在库区和支流分布呈现明显差异性(表 2),库区(S1~S3)浮游植物密度明显大于支流(S4 和 S5),丹江库区(S1)浮游植物密度明显低于汉江库区(S2 和 S3),除 2019 年 S4 高于 S5 之外,支流的浮游植物密度相近且呈升高趋势。参照浮游植物细胞密度评价水质的标准<sup>[18]</sup>,丹江口水库库区水体除 2020 年 S2 为中营养状态之外,其余点位均为贫中营养状态,支流由 2018 年的极贫营养状态到 2020 年演变为贫中营养状态。在群落结构方面(图 3),丹江库区(S1),2018 年以蓝藻门(43.33%)和绿藻门(26.84%)为主,2019 年优势类群转变为硅藻门(35.63%)和隐藻门(29.03%),2020 年硅藻门(30.31%)、绿藻门(25.36%)、隐藻门(23.1%)、蓝藻门(16.84%)均大量出现;汉江库区,S2 在 2018 和 2019 年以硅藻门(50.27%和 50.87%)为主,其次为隐藻门(23.75%和 20.97%),2020 年蓝藻暴发占据绝对优势地位(75.00%)。S3 在 2018 和 2020 年均以绿藻门(63.34%和 62.93%)为主,其次为蓝藻门(19.84%和 18.61%),在 2019 年主要以硅藻门(48.64%)为主,其次是隐藻门(27.95%);支流 S4 和 S5 2018—2020 年群落结构相似,硅藻门所占比例最高,其次为隐藻门。整体来看,蓝藻门和绿藻门主要在库区大量出现,而支流主要以硅藻门和隐藻门为主。其中巨颤藻、栅藻(*Sceaedsmus* sp.)、小刺凹顶鼓藻无刺变种(*Euastrum spinulosum* var. *inermius* Nordst.)等主要在库区被检测到,而华彩双菱藻(*Surirella splendida* Kutz.)、奥克尼颤藻(*Oscillatoria okni*)、异极藻属(*Gomphonema* Ag.)等主要在支流被检测到。通过 ANOSIM 组间差异性检验,得到  $R$  为 0.108,  $P$  为 0.002,各采样点空间差异显著。

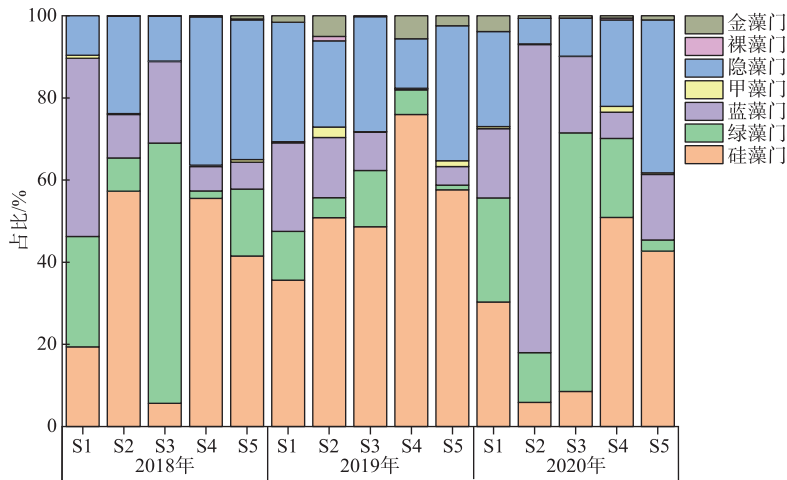


图 3 丹江口水库浮游植物群落结构空间变化

Fig.3 Spatial variation of phytoplankton community structure in Danjiangkou Reservoir

2.2.3 浮游植物群落多样性评价 群落物种多样性指数反映了群落特有的物种组成和个体密度特征,是判断湖库营养状况的常用指标之一<sup>[14]</sup>。丹江口水库浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数介于 0.12~1.46 之间, Simpson 多样性指数介于 0.04~0.74 之间, Pielou 多样性指数介于 0.11~0.92 之间, Margalef 丰富度指数介于 0.08~0.41 之间。年度分析显示(图 4),2019 年丹江口水库浮游植物多样性指数均值最高,2018 年最低。季度分析显示(表 3),夏季和秋季的浮游植物多样性高于春季和冬季。空间分析显示(表 3),库区浮游植物多样性高于支流。通常认为 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数值越大,浮游植物的群落结构越复杂,稳定性越高,水质越好。反之,多样性指数越小,表明群落结构越趋于简单,生态稳定性越差,水质变差<sup>[15]</sup>。由此可

知,丹江口水库夏季和秋季浮游植物群落结构稳定,水质状况较好,春季和冬季节较差,同时库区整体水质状况优于支流。

### 2.3 浮游植物与环境因子的相关性分析

2.3.1 浮游植物密度与环境因子的相关性分析 将浮游植物密度与环境因子进行 RDA 分析,结果显示轴 1 和轴 2 共解释了浮游植物变量的 28.82% (图 5),解释了浮游植物与环境因子之间关系的 91.94% (表 4),表明浮游植物与环境因子之间存在显著的相关性。其中 WT 对浮游植物影响最大,解释了总变异率的 50.7% ( $P < 0.01$ ),其次为 COD (13.6%)、 $\text{NH}_3\text{-N}$  (14.6%) 和 TP (9.0%) ( $P < 0.05$ ),而  $\text{BOD}_5$  (5.4%)、pH (2.2%)、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  (2.1%)、TN (1.6%) 和 DO (0.8%) 对浮游植物的整体差异性贡献不显著。RDA 分析整体显示 (图 5),WT 与蓝藻门和绿藻门呈显著正相关,与硅藻门和隐藻门等其它藻类呈负相关;COD 与绿藻门和硅藻门呈正相关,与隐藻门和金藻门呈显著的负相关; $\text{NH}_3\text{-N}$  与金藻门、隐藻门和蓝藻门呈正相关,与硅藻门和绿藻门呈负相关;TP 与硅藻门呈显著正相关,与蓝藻门、绿藻门呈负相关。

RDA 季度分析显示 (图 6),春季,轴 1 和轴 2 解释了 76.54% 的浮游植物变量,TN 为主要影响因素,解释了总变异的 30.9% ( $P < 0.05$ )。2018 和 2019 年影响优势类群硅藻门的主要环境因子为 TN、COD 和  $\text{BOD}_5$ ,2020 年影响优势类群隐藻门的主要环境因子为 WT、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ;夏季,轴 1 和轴 2 解释了 77.86% 的浮游植物变量,浮游植物群落受多个环境因子的共同作用。2018 年影响优势类群绿藻门的环境因子主要为 WT、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 pH。2019 和 2020 年,硅藻门主要受 TP 和 DO 的影响,隐藻门主要受  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN 影响;秋季,轴 1 和轴 2 解释了 58.53% 的浮游植物变量,其中 TP 对浮游植物群落影响最大,总变异率为 41.3% ( $P < 0.05$ )。2018—2020 年,蓝藻门主要受 WT 和 pH 影响,隐藻门受  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  影响,绿藻门主要受 DO 和 WT 影响,硅藻门主要受 TP 影响;冬季,轴 1 和轴 2 解释了 54.50% 的浮游植物变量, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为主要影响因素,总变异率为 44.6% ( $P < 0.05$ )。2018—2020 年优势类群均为硅藻门,主要受  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 WT 的影响。

在空间上影响浮游植物群落结构的主要因素有所不同 (图 5),2018 和 2020 年库区优势类群绿藻门和蓝藻门主要受 WT、pH 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的影响,2019 年库区和支流优势类群硅藻门主要受 TN 和 TP 的影响,隐藻门主要受  $\text{NH}_3\text{-N}$  的影响。

表 3 浮游植物多样性指数季节和空间分布统计

Tab.3 Seasonal and spatial distribution of phytoplankton diversity index

	Shannon-Wiener	Simpson	Pielou	Margalef
春季	0.761	0.420	0.536	0.248
夏季	0.879	0.485	0.578	0.261
秋季	1.035	0.586	0.670	0.257
冬季	0.808	0.471	0.611	0.210
S1	0.974	0.552	0.707	0.232
S2	0.945	0.503	0.581	0.278
S3	0.913	0.507	0.611	0.254
S4	0.744	0.407	0.494	0.239
S5	0.778	0.484	0.601	0.217

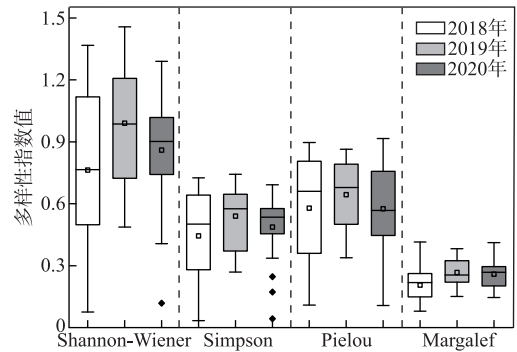


图 4 浮游植物多样性指数统计

Fig.4 Diversity index of phytoplankton statistics

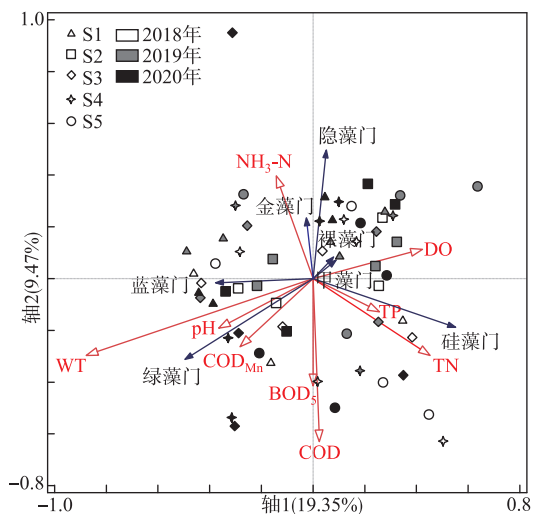


图 5 浮游植物与环境因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis of phytoplankton and environmental factors

表4 浮游植物与环境因子的相关关系

Tab.4 Correlation between phytoplankton and environmental factors

统计	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.1935	0.0947	0.0237	0.0015
累计方差物种数据	19.35%	28.82%	31.20%	31.40%
物种-环境因子相关性	0.6182	0.5287	0.4136	0.3318
累计方差物种-环境关系	61.73%	91.94%	99.50%	99.97%

2.3.2 浮游植物多样性指数与环境因子的相关性分析 将环境因子与多样性指数进行 Spearman 等级相关分析,结果显示(表5):WT 与 Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著的正相关关系,TN 与 Simpson 和 Shannon-Wiener 呈显著负相关关系,其余环境因子对浮游植物多样性影响不显著。

表5 浮游植物多样性指数与环境因子的 Spearman 等级相关分析( $n=60$ )Tab.5 Spearman rank correlation between phytoplankton diversity index and environmental factors ( $n=60$ )

环境参数	Shannon-Wiener	Simpson	Pielou	Margalef
WT	0.331 *	0.318 *	0.120	0.166
pH	0.153	0.154	0.120	0.021
DO	-0.134	-0.165	-0.116	0.127
COD <sub>Mn</sub>	0.122	0.162	0.054	0.006
BOD <sub>5</sub>	0.138	0.073	0.129	0.116
NH <sub>3</sub> -N	0.109	0.078	0.075	0.138
TP	-0.045	-0.032	-0.108	0.063
TN	-0.276 *	-0.337 **	-0.194	-0.205

\* 表示  $P<0.05$  (双尾检验); \*\* 表示  $P<0.01$  (双尾检验)。

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落分布特征分析

本研究中 2018—2020 年丹江口水库浮游植物密度年度均值分别为  $1.96 \times 10^6$ 、 $2.55 \times 10^6$  和  $5.07 \times 10^6$  cells/L,呈现逐年增高趋势,其中优势类群为蓝藻(32.14%)、硅藻(24.69%)、绿藻(23.72%)和隐藻(15.74%)。近 10 年来前人对丹江口水库的库区和库湾也开展了相关的调查研究,例如 2007—2008 年调查显示丹江口库区浮游植物的年度密度为  $4.17 \times 10^6$  cells/L,群落相对丰度依次为甲藻(40.92%)、硅藻(22.46%)、隐藻(16.73%)和蓝藻(13.16%)<sup>[9]</sup>;2009—2010 年库区浮游植物年均密度为  $1.11 \times 10^6$  cells/L,群落相对丰度依次为硅藻(60.42%)、蓝藻(13.86%)、绿藻(12.33%)和隐藻(9.84%)<sup>[10]</sup>;2014—2015 年对库湾浮游植物调查研究显示年均密度为  $9.08 \times 10^5$  cells/L,群落相对丰度依次为硅藻(38.60%)、绿藻(35.39%)和蓝藻(20.53%)<sup>[14]</sup>;2017 年库湾浮游植物的年度密度为  $7.71 \times 10^6$  cells/L,群落相对丰度依次为绿藻(34.66%)、蓝藻(26.23%)、隐藻(25.42%)和硅藻(13.50%)<sup>[16]</sup>。参照浮游植物细胞密度评价水质的标准<sup>[18]</sup>,近几次的调查结果显示,除 2014—2015 年水体为贫营养状态之外,其余年份均为贫中营养状态。从浮游植物结构来看,近 10 年来蓝藻和绿藻相对丰度逐年升高,尤其在 2014 年之后,蓝藻和绿藻的相对丰度已超过 50%,表明丹江口水库富营养化的风险加大。2014 年丹江口大坝加高后,库区水流变缓,水体交换性能变差<sup>[19-20]</sup>,易于库区水体营养盐的积累,从而为蓝藻和绿藻等浮游植物的生长创造了条件<sup>[21]</sup>。与之前研究不同的是,本研究中由于 2020 年秋季蓝藻暴发,导致其平均密度已超越其它藻类成为丹江口水库的首要类群。

浮游植物的密度和群落结构随季节变化也表现出一定差异,本研究除 2019 年为春季浮游植物密度最大之外,其余年份整体表现为秋季和夏季密度较高,春季和冬季密度较低。与近几年研究结果对比,发现浮



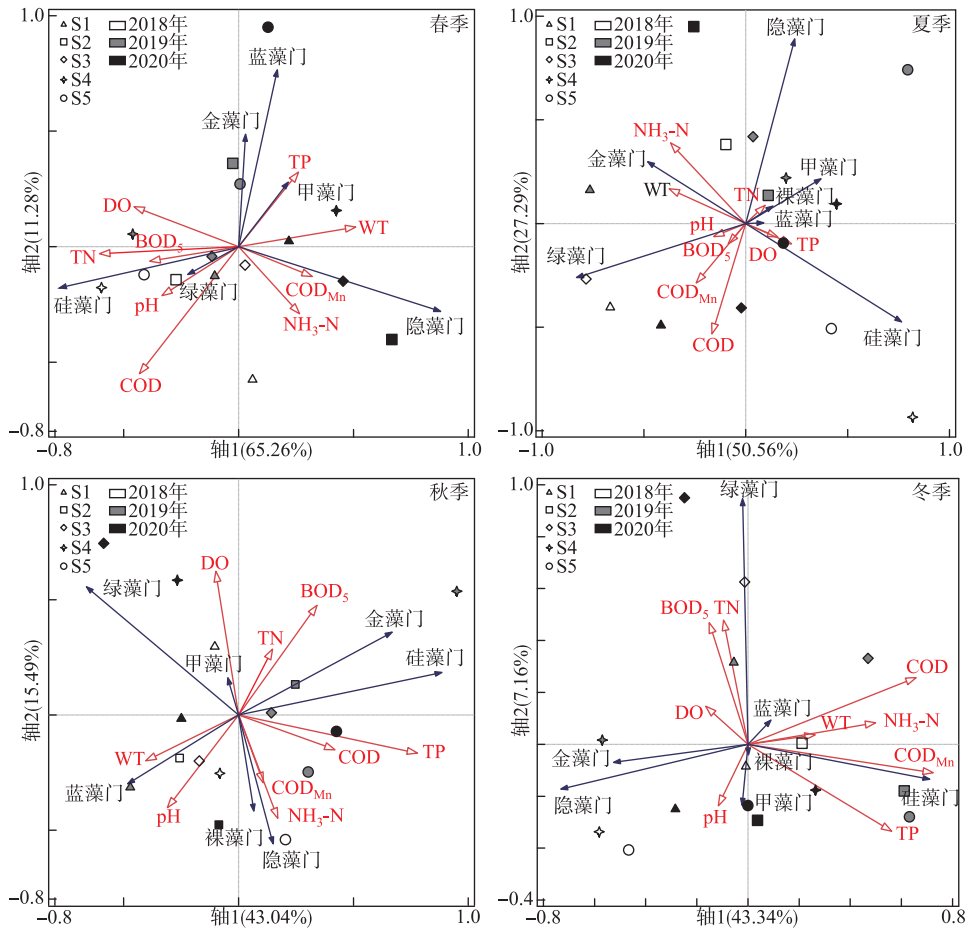


图 6 不同季节浮游植物与环境因子的 RDA 分析

Fig.6 RDA analysis of phytoplankton and environmental factors in different seasons

游植物密度在不同季节变化并无明显规律,比如在 2007—2008 年<sup>[9]</sup>冬季浮游植物密度最高,春、夏和秋季较低。在 2009—2010 年<sup>[10]</sup>显示夏季密度最高,秋季最低,2014—2015 年<sup>[14]</sup>浮游植物生物量表现为春季最高,冬季最低,2017 年<sup>[16]</sup>则为夏秋较高,春季最低。这可能由于不同研究采样的位置、数量、频次和时间及水位变化等不同所致。在群落结构方面,近几年研究显示库区浮游植物在春季主要以硅藻为主,夏秋季蓝藻、绿藻和硅藻均较多,冬季以硅藻和隐藻占优势<sup>[9,10,14,16]</sup>。本研究中 2018—2020 年浮游植物优势类型在春季和冬季主要为硅藻和隐藻,蓝藻和绿藻在夏季和秋季比例最高,硅藻则在四季中均占据较大的生存优势。这与近 10 年来丹江口水库浮游植物群落结构的波动趋势基本一致。

丹江口水库库区的浮游植物密度呈现出明显的空间差异性,汉江库区(S2 和 S3)的浮游植物密度明显高于丹江库区(S1)。丹江库区浮游植物结构以硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻为主,群落结构相对稳定,而汉江库区浮游植物优势类群的变化较大,蓝藻、绿藻和硅藻在不同年份的优势类群结构变化较大。大坝加高前,2007—2008 年调查显示两库区浮游植物的密度差异较小,硅藻、蓝藻种类由汉江库区到丹江库区逐渐减少,甲藻和隐藻在汉江库区逐渐增加<sup>[9]</sup>,2009—2010 年显示两库区细胞密度差异不大,丹江库区硅藻为优势类群,汉江库区蓝藻和隐藻为优势类群<sup>[10]</sup>。大坝加高后,2014—2015 年,汉江库区浮游植物生物量大于丹江库区,丹江库区以硅藻为主,而汉江库区以绿藻为主<sup>[14]</sup>;大坝加高以高水位运行后,2017 年调查显示汉江库区绿藻、隐藻和硅藻种类数均高于丹江库区,但蓝藻的种类数和密度在丹江库区更高<sup>[16]</sup>。虽然丹江库区和

汉江库区库容接近,但两者的回水长度和库形有很大区别。丹江库区为湖泊型,水面宽阔、库岸线短,汉江库区为峡谷型,库面狭长,支流多且库岸曲折,接受地表径流带来的外源性营养面广<sup>[10]</sup>,当蓄水周期变长时,汉江库区更利于不同类型藻类的生长繁殖。由此可见,大坝加高后汉江库区的浮游植物密度明显高于丹江库区,库区之间浮游植物的群落结构差异可能存在周期性演替模式,后续可开展相关研究进一步探讨。

### 3.2 环境因素对浮游群落结构特征的影响

营养盐是浮游植物生长的物质基础,不同季节水体中营养盐对浮游植物的影响不同<sup>[4,22]</sup>。大量研究指出丹江口水库中磷元素是影响浮游植物密度和群落结构的主要营养元素之一<sup>[9-10,15]</sup>。在2007—2008年对丹江口水库浮游植物开展的调查研究中显示磷浓度是影响丹江口水库浮游植物密度的主要环境因子<sup>[9]</sup>。而在2009—2010年的调查则显示总磷并非影响浮游植物群落分布的主要驱动力,仅在秋季可溶性反应磷才为浮游植物的主要影响因素<sup>[10]</sup>。在2017年对丹江口库湾的研究中认为磷元素为丹江口库湾富营养化的限制因子<sup>[15]</sup>。本研究中总磷为影响浮游植物的生物量的因素之一,且在秋季对浮游植物的影响最为显著(图6),这与2009年的研究结果一致<sup>[10]</sup>;Redfield定律认为氮磷比超过藻类细胞组成的原子比例16/1时,磷会被认为限制因子,而当氮磷比例小于10/1时,氮通常被考虑为限制因素<sup>[23]</sup>。但由于不同藻类对氮、磷的吸收率存在差异,氮磷营养元素对藻类的生长影响也需要综合考虑<sup>[24-25]</sup>。本研究中,氮磷比值范围在11.5~294.0之间,且总氮与浮游植物多样性指数呈负相关关系(表5),故推测本研究中当磷元素供应不足时,氮含量过多可能会对浮游植物的生长产生一定的抑制效果。

本研究RDA分析表明(图5)温度是影响浮游植物结构的首要因素,解释了总变异率的50.7%。温度具有明显的季节特性,浮游植物直接与温度相关<sup>[26]</sup>,可直接影响浮游植物的代谢过程来影响其生长<sup>[27-28]</sup>,同时也会影响浮游动物和鱼类的生长以及其它物理化学条件使得浮游植物的密度和群落结构发生变化<sup>[22]</sup>。研究发现蓝绿藻适宜生长的温度为25~35℃,在该温度下蓝绿藻形成了耐高温的代谢机制,对温度的耐受能力强于其它藻类<sup>[23]</sup>。丹江口水库夏季和秋季温度较高,满足蓝绿藻生长的温度需求,同时具备了充足的营养盐,为蓝绿藻的适宜生长创造了条件。除2019年,在本研究中浮游植物的优势类群均为蓝藻和绿藻(图2a)。当春、冬季水温较低,光照不充分时,硅藻对水温和光照有着很好的适应能力,往往能够获得生长优势<sup>[29-30]</sup>,整体在春季和冬季的浮游植物群落结构中均占据优势地位(图2b)。其次,2019年全年年均水体温度相较2018和2020年更低,硅藻则在全年处于优势地位(图2a)。此外,空间上库区优势类群绿藻门和蓝藻门主要受水温和pH的影响,而支流优势类群硅藻门主要受总氮和总磷的影响(图5)。研究报道丹江口水库入库支流的污染程度高于库区<sup>[31]</sup>,支流由于受农业面源污染和生活人类活动的影响,未被利用的化肥农药以及生活污水等随径流进入河道增加了氮磷等污染物的含量<sup>[32-33]</sup>。综合以上分析可知水温变化在丹江口水库库区藻类的生长及群落演替方面起着重要的驱动作用,这与其它研究中大多认为总磷<sup>[9,14-15]</sup>、总氮<sup>[15]</sup>、电导率<sup>[10]</sup>等是影响丹江口水库浮游植物的主要因素不同,可能由于近年来对丹江口水库的监管加强,库区的氮磷等营养元素含量及比例在一个稳定的范围内波动,对浮游植物的生长的综合影响相对变弱,从而使得水温的影响力度上升<sup>[4]</sup>。

## 4 结论

1) 2018—2020年在丹江口水库共检测出浮游植物7个门类,其中蓝藻门、硅藻门、绿藻门、隐藻门为优势类群,在种类组成上隐藻门的卵形隐藻,硅藻门的梅尼小环藻、加氏双菱藻、变异直链藻、尖针杆藻、脆杆藻,绿藻门的具孔盘星藻点纹变种,蓝藻门的鱼腥藻和巨颤藻出现频率较高。

2) 丹江口水库浮游植物密度呈逐年升高趋势,季度密度统计显示为秋季>夏季>春季>冬季,空间上库区密度明显高于支流,且汉江库区高于丹江库区。浮游植物群落结构时空差异显著,春季和冬季浮游植物优势类型主要为硅藻门和隐藻门,夏季主要为绿藻门、硅藻门和隐藻门,秋季蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门均较为丰富。空间上蓝藻门和绿藻门主要在库区大量出现,而支流则以硅藻门和隐藻门为主。浮游植物多样性评价显示,夏秋季的浮游植物多样性高于春冬季,库区浮游植物多样性高于支流。

3) RDA分析表明不同季节环境因子对浮游植物群落的影响有所不同,整体影响丹江口浮游植物的环境因子有水温、化学需氧量、氨氮和总磷。其中水温是影响丹江口水库浮游植物群落结构和多样性的主要驱

动力,但由于本研究中季节水温梯度较大,未能得到丹江口水库不同类型藻类生长的水温阈值,后续可进一步开展相应的研究工作,为准确掌握和预测丹江口水库浮游植物的演变趋势和水质保护提供更加科学的依据。

致谢:感谢南水北调中线水源有限责任公司提供丹江口水库浮游植物监测数据及相关资料。

## 5 参考文献

- [1] Yang MZ, Xia JH, Cai WW *et al.* Distribution of phytoplankton functional groups in a drinking water reservoir and analysis of environmental driving factors. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(2): 37-44. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202005160127. [杨萌卓, 夏继红, 蔡旺炜等. 饮水型水库浮游植物功能群分布特征及环境驱动因子. *水生态学杂志*, 2022, **43**(2): 37-44.]
- [2] Fornarelli R, Antenucci JP, Marti CL. Disturbance, diversity and phytoplankton production in a reservoir affected by inter-basin water transfers. *Hydrobiologia*, 2013, **705**(1): 9-26. DOI: 10.1007/s10750-012-1351-2.
- [3] Xin X, Li K, Finlayson B *et al.* Evaluation, prediction, and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China. *Water Science and Engineering*, 2015, **8**(1): 30-39. DOI: 10.1016/j.wse.2014.11.001.
- [4] 杨东方, 陈生涛, 胡均等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序. *海洋环境科学*, 2007, **26**(3): 201-207.
- [5] 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. *环境科学与技术*, 2021, **44**(S1): 1-7.
- [6] Wang YS, Zhang LQ, Huang Z *et al.* Analysis of water quality changes and pollution prevention countermeasures for water source region of the middle route of South to North Water Diversion Project. *China Water*, 2018, **23**: 27-30. [万育生, 张乐群, 黄茁等. 南水北调中线水源地高水位蓄水水质变化及污染防治对策. *中国水利*, 2018, **23**: 27-30.]
- [7] Wang XC, Wu M. Considerations on strengthening protection and management of water source area for the middle route of South-to-North Water Transfer Project. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(9): 1-5. DOI: 10.11988/ckyyb.20190297. [王新才, 吴敏. 关于加强南水北调中线水源地保护和管理的思考. *长江科学院院报*, 2019, **36**(9): 1-5.]
- [8] Yin W, Zhu D, Lei JS *et al.* Distribution of nitrogen, phosphorus in the soils of different land uses from the representative water-level-fluctuating zone of Dangjiangkou Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(7): 1185-1191. DOI: 10.11870/cjlyzyy-hj201507015. [尹炜, 朱惇, 雷俊山等. 丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(7): 1185-1191.]
- [9] Shen HL, Xu YY, Wang L *et al.* Spatial and temporal variations of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its affecting factors. *Plant Science Journal*, 2011, **29**(6): 683-690. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2011.60683. [申桓伦, 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.]
- [10] 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): 2875-2882. DOI: 10.13227/j.hjlx.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): 2875-2882.]
- [11] Wu HJ, Peng JH, Han DJ *et al.* Composition and ecological changes of phytoplankton in Dangjiangkou 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.]
- [12] 杨广, 杨干荣, 刘金兰. 丹江口水库浮游生物资源调查. *湖北农学院学报*, 1996, **1**: 38-42.
- [13] Zhang NQ, Wang ZD, Du MH *et al.* Phytoplankton and water quality of water source area of the Middle Line Project of South to North Water Diversion. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, **12**(4): 506-510. [张乃群, 王正德, 杜敏华等. 南水北调中线水源地浮游植物与水质研究. *应用与环境生物学报*, 2006, **12**(4): 506-510.]
- [14] Wang YH, Chen L, Niu Y *et al.* Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1057-1065. DOI: 10.18307/2016.0516. [王英华, 陈雷, 牛远等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征. *湖泊科学*, 2016, **28**(5): 1057-1065.]
- [15] Jia HY, Xu JF, Lei JS. Relationship of community structure of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir bay. *Yangtze River*, 2019, **50**(5): 52-58. [贾海燕, 徐建锋, 雷俊山. 丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究. *人民长江*, 2019, **50**(5): 52-58.]
- [16] Xiong MT, Wang PZ, Ye SW *et al.* Spatio-temporal characteristics of the phytoplankton community and assessment of fish productivity in the Danjiangkou Reservoir. *J Fishery Sci China*, 2021, **28**(6): 715-727. DOI: 10.12264/JFSC2021-0242. [熊满堂, 王普泽, 叶少文等. 丹江口水库浮游植物群落时空特征及其鱼产力评估. *中国水产科学*, 2021, **28**(6): 715-727.]
- [17] Pan Y, Guo S, Li Y *et al.* Effects of water level increase on phytoplankton assemblages in a drinking water reservoir. *Water*, 2018, **10**(3): 256. DOI: 10.3390/w10030256.
- [18] 胡征宇, 周广杰, 况琪军等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. *安全与环境学报*, 2005, **5**(2): 87-91.
- [19] Yin W, Shi ZH, Lei AL. Research on water environment of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2011, **42**(13): 90-94. [尹炜, 史志华, 雷阿林. 丹江口水库水环境问题分析研究. *人民长江*, 2011, **42**(13): 90-94.]

- [20] 张俊, 闵要武, 段唯鑫. 丹江口水库汛期水位动态控制关键技术研究与实践. 长江技术经济, 2019, 3(2): 81-90.
- [21] 王顺天, 雷俊山, 贾海燕等. 三峡水库浮游植物群落特征及水体富营养化评价. 三峡生态环境监测, 2020, 5(1): 32-41.
- [22] Da WY, Zhu GW, Wu ZX *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China. *J Lake Sci*, 2019, 31(5): 1320-1333. DOI: 10.18307/2019.0522. [ 笄文怡, 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. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1320-1333.]
- [23] 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.
- [24] Wu FC, Jin XC, Zhang RY *et al.* Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment. *J Lake Sci*, 2010, 22(1): 1-7. DOI: 10.18307/2010.0101. [ 吴丰昌, 金相灿, 张润宇等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.]
- [25] 丰茂武, 吴云海, 冯仕训等. 不同氮磷比对藻类生长的影响. 生态环境, 2008, 17(5): 1759-1763.
- [26] 方丽娟, 刘德富, 杨正健等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 45-50.
- [27] Dupuis AP, Hann BJ. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies: potential implications for phytoplankton and zooplankton. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(5): 489-502. DOI: 10.1093/plankt/flp001.
- [28] Wang LP, Zhen BH. Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 1011-1017. DOI: 10.5846/stxb201204100500. [ 王丽平, 郑丙辉. 洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素. 生态学报, 2013, 33(3): 1011-1017.]
- [29] Deng JM, Cai YJ, Chen YW *et al.* Structure of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Lake Honghu. *J Lake Sci*, 2010, 22(1): 77-78. DOI: 10.18307/2010.0110. [ 邓建明, 蔡永久, 陈宇炜等. 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, 22(1): 77-78.]
- [30] 盛肃, 徐海升, 邓培雁等. 深圳石岩水库浮游植物群落时空动态特征及其影响因素分析. 生态科学, 2016, 35(1): 17-26.
- [31] Zhang LQ, Fu X, Bai FP. Influence of representative input tributaries on total nitrogen in Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2020, 51(7): 40-45. [ 张乐群, 付昕, 白凤朋. 丹江口水库典型支流对水库总氮浓度的影响. 人民长江, 2020, 51(7): 40-45.]
- [32] 吴德文, 常乐. 丹江口流域总氮时空分布特征研究. 科技与创新, 2019, 7: 84-85.
- [33] Lu JY, Lin L. Problems and countermeasures on water eco-environment in Hangjiang River Ecological Economic Belt. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1179-1186. [ 卢金友, 林莉. 汉江生态经济带水生态环境问题及对策. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1179-1186.]