

DOI: 10.12264/JFSC2021-0242

## 丹江口水库浮游植物群落时空特征及其鱼产力评估

熊满堂<sup>1,3</sup>, 王普泽<sup>1</sup>, 叶少文<sup>1</sup>, 虞功亮<sup>2</sup>, 苑晶<sup>1</sup>, 刘家寿<sup>1</sup>, 张堂林<sup>1</sup>

1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 中国科学院水生生物研究所, 中国科学院藻类生物学重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 为了解丹江口水库在完成高位水蓄水期间浮游植物群落的时空动态特征, 于2017年5月、8月、11月对丹江口水库浮游植物的种类组成、密度、生物量及生物多样性指数进行了调查分析, 并对其鱼产力进行了评估。结果表明, 丹江口水库共记录浮游植物7门114种属(包含变种), 以绿藻门种类最多(65种); 浮游植物的平均密度为 $7.71 \times 10^6$  ind/L, 平均生物量为3.37 mg/L; 绿藻、蓝藻及隐藻门藻类密度合计占比达86.31%, 且均超过硅藻门藻类(占比13.50%); 浮游植物的Margalef丰富度指数( $D_m$ )和Shannon-Wiener多样性指数( $H_N$ )都主要分布在1~2之间, Pielou均匀度指数( $J_N$ )主要介于0.4~0.7之间, 平均值依次为1.35、1.78、0.58; 据估算, 浮游植物所能提供的鱼产力为101.1 kg/hm<sup>2</sup>。相似性分析(ANOSIM)、多元置换方差分析(PERMANOVA)及相似性百分比分析(SIMPER)表明, 库区浮游植物群落结构存在显著的季节差异, 且基本都是由优势种丰度的变化引起的; 空间上差异不显著, 不同库区间具有一定的同质化趋势。对比以往的研究发现, 目前丹江口水库库区藻类密度与生物量有所增加; 硅藻占比明显下降, 蓝藻门、绿藻门藻类已成为库区主要种类; 多样性指数处于较低水平, 群落结构较为简单, 稳定性不高。本研究结果为丹江口水库生态系统结构与功能优化及健康管理提供了重要的依据。

**关键词:** 丹江口水库; 浮游植物; 群落结构; 鱼产力

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)06-0715-13

浮游植物是食物网的重要组成部分, 不仅是水域生态系统的初级生产者, 还是滤食性鱼类等渔业生物的重要饵料来源, 在水域生态系统的物质循环和能量流动中扮演着不可或缺的角色, 是水域生态系统服务功能的关键支撑者<sup>[1]</sup>。浮游植物的生物量、物种组成、群落结构及生物多样性的变化都可能直接或间接影响到生态系统生物生产力水平, 进而影响渔业产量; 同时, 因其具有生命周期短、分布范围广、对环境变化敏感等特点, 相关方面的研究可为生态系统的水质保护、健康状态评估、渔业资源的合理开发利用、管理措施优化等提供重要基础资料<sup>[2]</sup>。此外, 对天然饵

料潜在鱼产力的评估, 可为鱼类的科学合理放养提供理论依据, 从而使之更有效地滤食浮游生物, 在充分利用饵料资源的同时, 又达到保护水质、维持生态系统平衡的目的<sup>[3]</sup>。

丹江口水库是国家一级水源保护区, 其主要功能为供水、防洪和发电, 同时还是长江流域重要的渔业生产基地之一。作为南水北调中线工程的水源地, 丹江口水库自2014年正式向北方供水以来, 已累计向北方输水300多亿m<sup>3</sup>, 惠及河南、河北、北京和天津4个省市沿线约6900万居民<sup>[4]</sup>。建坝后水体流速减慢<sup>[5]</sup>和滞留时间增长<sup>[6]</sup>等环境变化为有害藻类增殖所提供的良好环境、库区及

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-05-21.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900601); 国家科技支撑计划项目(2015BAD13B02); 淡水生态与生物技术国家重点实验室自主研究项目(2019FBZ02).

作者简介: 熊满堂(1993-), 男, 博士研究生, 研究方向为渔业生态学. E-mail: xiongmantang@qq.com

通信作者: 张堂林, 研究员, 研究方向为渔业生态学与水产养殖. E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn

入库河流水体理化指标的变化<sup>[7-8]</sup>、水位波动<sup>[9-10]</sup>、库区周边土地利用类型的变化<sup>[11]</sup>等问题都可能直接或间接地影响库区浮游植物的群落结构。鉴于丹江口水库生态系统服务功能的重要性,对库区浮游植物变动及时、科学而准确的监测、分析与评价在该水库水质保护、生态系统健康维护、渔业可持续发展等方面有着重要意义。因而,学者们于建坝前(1958年)<sup>[12]</sup>,大坝建成后的1986—1987年<sup>[13]</sup>、1992—1993年<sup>[14-15]</sup>和2003—2012年<sup>[7-8,16-19]</sup>及在大坝加高后的2014—2016年<sup>[10,20-21]</sup>对丹江口水库浮游植物进行了大量的相关研究,但大多都集中在丹江口水库高水位蓄水之前。目前,高水位蓄水后仅贾海燕等<sup>[22]</sup>对库湾的浮游植物群落结构进行过研究。

为了解丹江口水库首次完成164 m和167 m高水位蓄水试验<sup>[23]</sup>后,包含大量农田的新的淹没区以及水文情势改变对库区水体浮游植物所产生的影响,本研究于2017年5月、8月、11月对库区浮游植物进行了监测,对库区浮游植物的组成、密度、生物量、群落结构及季节空间变化特征进行了分析,并对库区浮游植物多样性和鱼产力进行了探讨,以期对丹江口水库浮游植物资源的合理开发利用、生态系统结构与功能优化及健康管理积累基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与采样点设置

丹江口水库(32°33'~32°49'N, 110°59'~111°49'E)位于长江最大支流汉江的上游,横跨河南省、湖北省,于1973年建成蓄水,由狭长的汉库和宽广的丹库在坝前汇集而呈现“V”字形,集水区面积为9.52万km<sup>2</sup>。水库大坝于2012年加高至176.6 m,加高后库区正常蓄水位从157 m升至170 m,水域面积达1050 km<sup>2</sup>,总库容为290.5亿m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>。该流域气候属于亚热带季风气候,降雨多集中于夏季,多年平均降雨量为881 mm,多年平均入库流量为394.8亿m<sup>3</sup>,年均气温15~16℃<sup>[23]</sup>。

依据丹江口水库的形状特点及水文特征,在库区选取10个样点,具体采样点分布见图1。其中,汉江库区(Hanjiang reservoir zone, HR): D8、D11~D15;丹江库区(Danjiang reservoir zone, DR): D1~D3;坝前(reservoir zone before dam, BD): D6。根据季节和库区水位变化,分别于5月、8月、11月进行了监测。采样期间丹江口水库的水位变化及降雨情况见图2,库区水位在3月上旬降至最低后开始逐步上涨,并在10月164 m和167 m阶段蓄水试验工作完成后达到最高值;降雨主要集中在6—10月,以9月降雨量最大,高出该月份多年平均降雨量的89%<sup>[23]</sup>。

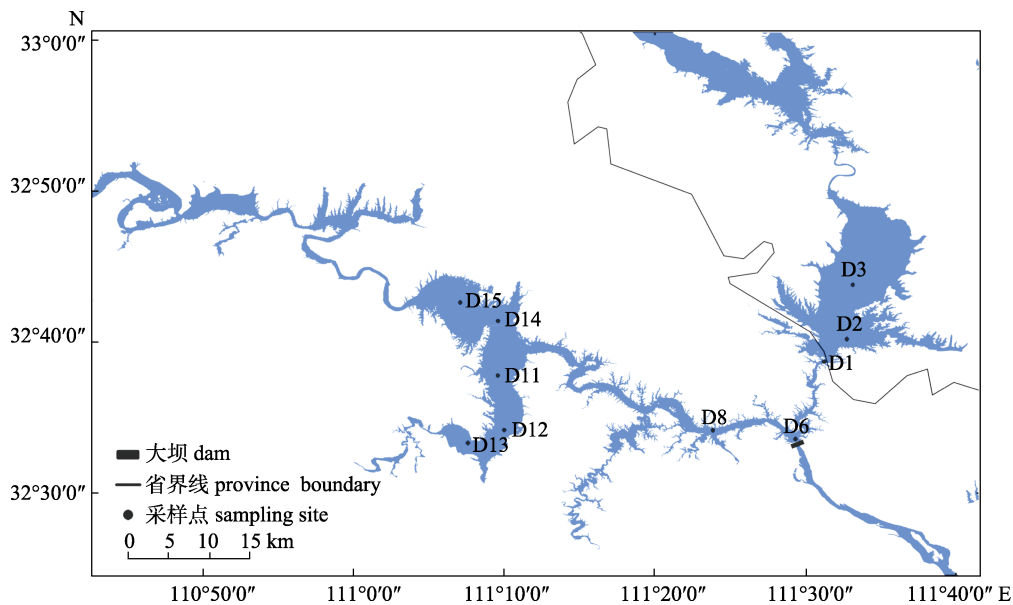


图1 丹江口水库采样位点分布图

Fig. 1 Sampling sites for the Danjiangkou Reservoir

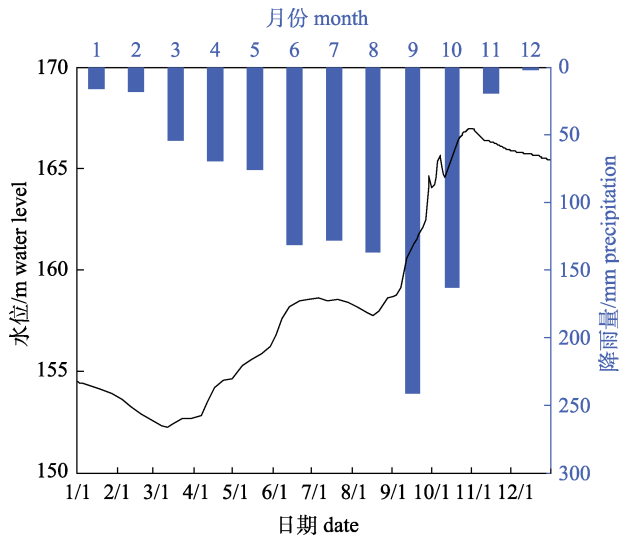


图 2 2017 年丹江口水库水位及降雨量变化  
Fig. 2 Variation of the water level and precipitation in the Danjiangkou Reservoir in 2017

## 1.2 采样方法与处理

浮游植物定性样品用 25<sup>#</sup>浮游生物网在水体表层(0~0.5 m)以“∞”形来回拖动 5 min, 再将采集到的样品置于 50 mL 样品瓶中, 加入 40%甲醛固定, 用量为水样体积的 4%; 定量样品用 5 L 采水器采集表层水 1 L 装入广口瓶, 加 10 mL 鲁哥氏液固定, 摇匀避光保存。样品带回实验室后, 将定量样品静置 24 h, 再浓缩至 30 mL, 放入 50 mL 样品瓶中。在实验室内, 借助 Olympus BX51 (BX51, Olympus Corporation, Tokyo, Japan)光学显微镜, 依据《中国淡水藻类——系统、分类及生态》<sup>[24]</sup>对浮游植物定性定量样品进行鉴定、计数, 生物量(湿重)的计算依据形态相似的几何体积直接换算而得(密度近似为 1 g/cm<sup>3</sup>), 单位为 mg/L。

## 1.3 数据分析方法

**1.3.1 浮游植物群落结构特征分析** 通过优势度( $Y$ )、Margalef 丰富度指数( $D_m$ )<sup>[25]</sup>、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )<sup>[26]</sup>、Pielou 均匀度指数( $J'$ )<sup>[27]</sup>对库区浮游植物的优势度及生物多样性特征进行描述, 相关计算公式如下:

$$Y = N_i/N \times F_i \quad (1)$$

$$D_m = (S - 1)/\ln N \quad (2)$$

$$H' = -\sum (P_i \times \ln P_i) \quad (3)$$

$$J' = H'/\ln S \quad (4)$$

式中,  $N_i$  为物种  $i$  的数量;  $N$  为所有物种的总数量;

$F_i$  为物种  $i$  出现的频率;  $S$  为种类数;  $P_i$  为物种  $i$  的数量(对应  $H_N$  和  $J_N$ )或生物量(对应  $H_W$  和  $J_W$ )所占比例。当  $Y \geq 0.02$  时, 定义该物种为优势种。

采用方差分析(方差齐性时)或 Scheirer-Ray-Hare 检验(方差不齐时)分析不同库区及不同水位时期浮游植物的密度、生物量及多样性指数是否存在显著差异。运用层次聚类(hierarchical clustering)和非度量多维尺度(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)分析对浮游植物群落数据(物种丰度)进行聚类及排序, 分析其在不同库区及水位时期是否存在差异。本研究仅考虑至少在任意一次采样的一个样点中相对丰度大于 0.1%的物种, 且事先对浮游植物群落数据进行  $\ln(x+1)$ 转化, 同时选用 Bray-Curtis 相异系数。并通过相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM; 置换次数  $n=999$ )和多元置换方差分析(permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA; 置换次数  $n=999$ )检验其差异是否显著, 最后采用相似性百分比分析(similarity percentage analysis, SIMPER)确定引起差异的物种。

**1.3.2 鱼产力估算** 根据《水库鱼产力评价标准》(SL563-2011)<sup>[28]</sup>中所给出的方法推算库区浮游植物提供的鱼产力, 其计算公式为:

$$F_{\text{浮游植物}} = B_G(P/B)aV \times 100/k \quad (5)$$

式中,  $F_{\text{浮游植物}}$  为浮游植物所提供鱼产力, 单位 t;  $B_G$  为浮游植物的年平均生物量, 单位 mg/L;  $P/B$  为该类饵料生物年生产量与年平均生物量之比;  $a$  为鱼类对该类饵料生物最大利用率;  $V$  为表层 10 m 以内的库容, 单位 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $k$  为鱼类对该类饵料生物的饵料系数。

所有数据分析及作图均在 Excel 2019、R 3.6.1、ArcGIS 10.3 等软件中完成。结果以平均值±标准误( $\bar{x} \pm SE$ )表示, 显著性水平设为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成及优势种

2017 年 3 次调查共检出浮游植物 7 门 114 种(包含变种), 其中绿藻门种类最多, 为 65 种(57.02%); 其次为蓝藻门 23 种(20.18%), 硅藻门 15 种(13.16%), 隐藻门 5 种(4.39%), 甲藻门 3 种

(2.63%), 裸藻门 2 种(1.75%), 金藻门 1 种(0.88%)。在不同水位时期(季节)以及库区调查到的浮游植物种类数都是以绿藻门种类居多, 蓝藻门种类次之, 然后是硅藻门和隐藻门。其具体的种类数量有一定差异, 3 次调查中以 8 月种类最多(63 种); 空间上以汉库最多(93 种), 坝前最少(44 种) (图 3)。3 次调查均采集到的浮游植物有 15 种, 分别为颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*)、针

杆藻(*Synedra* sp.)、角甲藻(*Ceratium hirundinella*)、鱼鳞藻(*Mallomonas* sp.)、细鞘丝藻(*Leptolyngbya* sp.)、泽丝藻(*Limnothrix* sp.)、长孢藻(*Dolichospermum* sp.)、假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、空球藻(*Eudorina elegans*)、衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、四星藻(*Tetrastrum* sp.)、微小四角藻(*Tetraëdron minimum*)、隐藻(*Cryptomonas* sp.)。

根据优势度( $Y \geq 0.02$ )筛选出丹江口水库浮游植物的优势种见表 1, 归属于蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门藻类。其中绿藻门的双对栅藻和栅藻(*Scenedesmus* sp.)在 3 个库区均为优势种, 全年优势度大于 0.02 的浮游植物有 6 种, 但在不同季节及库区所表现出的优势度不同。春季优势种种类最多, 以隐藻门尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)的优势度最高(0.178); 夏季优势种分属于蓝藻门和绿藻门藻类, 其中以双对栅藻优势度最高, 为 0.301; 而秋季的优势种种类最少(3 种), 分别是硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.)和隐藻门的隐藻、蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)。空间上, 汉库优势度最高的为一种隐藻, 丹库和坝前均以双对栅藻优势度最高。

2.2 浮游植物密度及生物量

丹江口水库 3 次调查中浮游植物的平均密度为

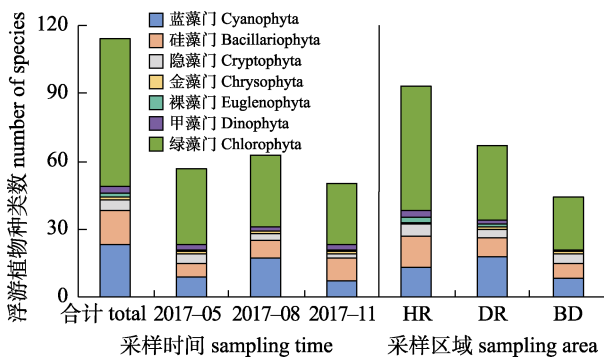


图 3 不同采样时间及区域丹江口水库浮游植物的物种组成

HR: 汉江库区; DR: 丹江库区; BD: 坝前.

Fig. 3 Composition of phytoplankton species in different sampling time and areas in the Danjiangkou Reservoir  
HR: Hanjiang Reservoir zone; DR: Danjiang Reservoir zone; BD: reservoir zone before dam.

表 1 丹江口水库浮游植物优势种及其优势度

Tab. 1 Dominant species of phytoplankton and its dominance in the Danjiangkou Reservoir

物种 species	采样时间 sampling time			采样区域 sampling area			全年 year round
	2017-05	2017-08	2017-11	BD	HR	DR	
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.022	-	-	-	-	-	-
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	-	-	0.236	0.059	0.081	-	0.064
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	0.054	0.125	-	-	0.057	-	0.050
拉氏拟柱孢藻 <i>Cylinderspermopsis raciborskii</i>	-	0.029	-	-	-	0.092	-
细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya</i> sp.	0.049	-	-	-	-	0.051	-
长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	0.084	0.030	-	-	0.021	-	-
隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	0.096	-	-	-	-	-	-
双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	-	0.301	-	0.266	0.121	0.102	0.124
栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	-	0.126	-	0.064	0.028	0.048	0.035
长绿梭藻 <i>Chlorogonium elongatum</i>	0.037	-	-	-	-	-	-
隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	0.048	-	0.311	0.022	0.158	-	0.113
蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> sp.	-	-	0.198	-	0.073	-	0.050
尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	0.178	-	-	0.020	-	-	-

注: “-” 表示该物种优势度指数低于 0.02.

Note: “-” means the dominance of the species was less than 0.02.

7.71×10<sup>6</sup> ind/L, 其中绿藻门密度占比最高(34.66%), 蓝藻门次之(26.23%), 之后依次是隐藻门(25.42%)、硅藻门(13.50%)、甲藻门(0.08%)、金藻门(0.05%)、裸藻门(0.05%)。绿藻、蓝藻、隐藻和硅藻占浮游植物总密度的 99.82%。在这 3 次调查中, 浮游植物的密度随季节、空间变化表现出一定差异。5 月浮游植物密度(1.49×10<sup>6</sup> ind/L)明显低于 8 月(11.60×10<sup>6</sup> ind/L)和 11 月(10.04×10<sup>6</sup> ind/L); 空间上以汉库浮游植物密度最高(9.57×10<sup>6</sup> ind/L), 坝前最低(3.19×10<sup>6</sup> ind/L)。其中, 仅 5 月与 8 月的藻类密度之间具有显著差异( $P < 0.05$ )。从具体门类的密度占比变化来说, 5 月以蓝藻门浮游植物占比最高(52.26%), 隐藻门及绿藻门次之; 8 月以绿藻门浮游植物占比最高(52.99%), 蓝藻门次之; 11 月以隐藻门浮游植物占比最高(50.91%), 硅藻门和绿藻门次之。空间上, 坝前、丹库和汉库浮游植物密度占比最高的依次是绿藻门(69.90%)、蓝藻门(58.25%)、绿藻门(35.62%) (图 4)。

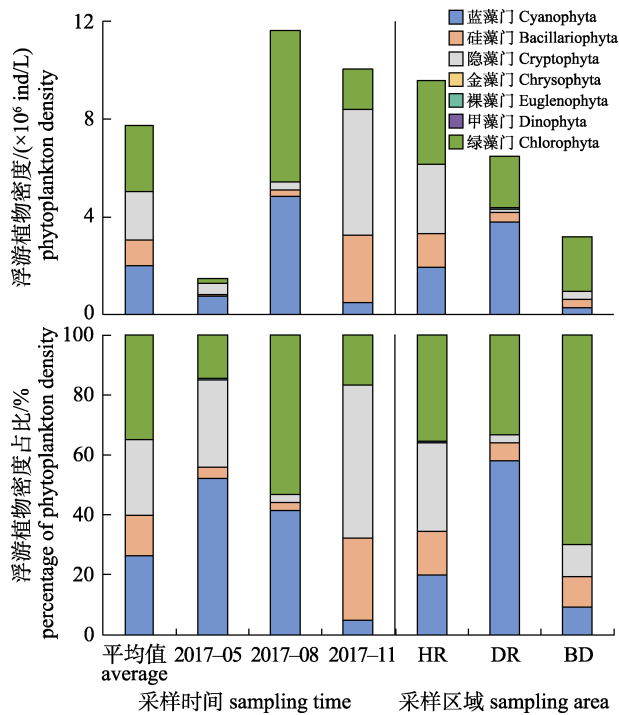


图 4 丹江口水库不同采样时间和区域浮游植物的密度及其占比

HR: 汉江库区; DR: 丹江库区; BD: 坝前。

Fig. 4 Density and its percentage of phytoplankton during different sampling time and area in the Danjiangkou Reservoir  
HR: Hanjiang Reservoir zone; DR: Danjiang Reservoir zone; BD: reservoir zone before dam.

浮游植物生物量的时空变化情况如图 5 所示, 3 次调查所得平均生物量为 3.37 mg/L, 其中隐藻门占比最高(49.45%), 绿藻门次之(28.67%), 之后依次是硅藻门(12.55%)、蓝藻门(5.81%)、裸藻门(2.03%)、甲藻门(1.45%)、金藻门(0.03%)。在这 3 次调查中, 浮游植物在 11 月生物量最高(7.02 mg/L), 5 月最低(0.40 mg/L); 空间上以汉库生物量最高(4.39 mg/L), 坝前最低(0.77 mg/L), 不同季节(空间)两两之间数值上的差异并不显著( $P > 0.05$ )。从具体门类的生物量占比来说, 5 月和 11 月均以隐藻门占比最高, 8 月以绿藻门占比最高。空间上, 坝前和丹库都是以绿藻门占比最高, 汉库以隐藻门占比最高。

### 2.3 浮游植物丰富度、多样性和均匀度

浮游植物的生物多样性指数见表 2, 在不同采样时间及区域虽表现出一定差异, 但经方差分析和多重比较(Tukey's HSD)发现, 仅 2017 年 11 月的 Margalef 丰富度指数( $D_m$ )显著低于 2017 年 8 月( $P < 0.05$ ), 其余差异并未达到显著性水平。

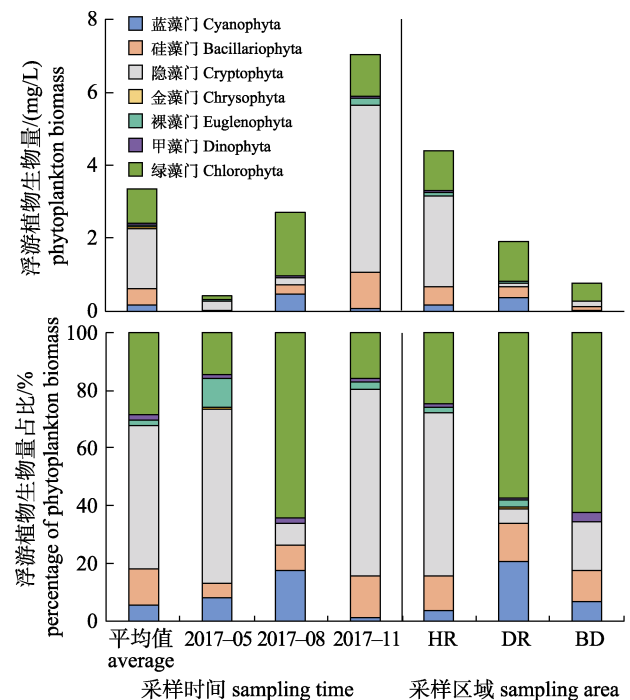


图 5 丹江口水库不同采样时间和区域浮游植物的生物量及其占比

HR: 汉江库区; DR: 丹江库区; BD: 坝前。

Fig. 5 Biomass and its percentage of phytoplankton during different sampling time and area in the Danjiangkou Reservoir  
HR: Hanjiang Reservoir zone; DR: Danjiang Reservoir zone; BD: reservoir zone before dam.

表 2 丹江口水库不同采样时间及区域浮游植物的生物多样性指数

Tab. 2 Diversity indices of phytoplankton in different sampling time and area of the Danjiangkou Reservoir

时间/区域 time/area	n	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index, $D_m$	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index, $H'$		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index, $J'$	
			$H_N$	$H_W$	$J_N$	$J_W$
			$\bar{x} \pm SE$			
时间 time						
2017-05	7	1.39±0.04	1.83±0.10	2.04±0.14	0.61±0.03	0.68±0.05
2017-08	8	1.58±0.06	1.85±0.10	2.09±0.16	0.57±0.03	0.64±0.04
2017-11	6	1.09±0.16	1.65±0.16	1.63±0.15	0.58±0.04	0.58±0.05
区域 area						
BD	3	1.24±0.27	1.54±0.04	1.95±0.18	0.54±0.04	0.67±0.02
HR	12	1.37±0.09	1.73±0.08	1.94±0.12	0.56±0.02	0.63±0.03
DR	6	1.46±0.10	2.02±0.13	1.93±0.23	0.65±0.05	0.62±0.07
全年 year round	21	1.38±0.07	1.79±0.07	1.94±0.09	0.58±0.02	0.63±0.03

## 2.4 浮游植物群落结构的时空动态

浮游植物的层次聚类和非度量多维尺度分析(stress=0.106<0.20)结果显示,可将浮游植物群落按采样时间分为3组(图6),即其存在一定的时间上的差异。ANOSIM分析和PERMANOVA分析也从统计学角度证实这一分组存在显著差异(Anosim:  $P=0.001$ ; Adonis:  $P=0.001$ ),而空间上差异不显著(Anosim:  $P>0.05$ ; Adonis:  $P>0.05$ )。经多重比较发现,不同采样时间两两间差异都达到显著性水平( $P<0.05$ )。通过SIMPER分析进一步显示,引起5月与8月之间群落结构差异的主要物种(贡献率大于5%且 $P<0.05$ ,下同)是双对栅藻(29.76%)、栅藻(15.90%)、拉氏拟柱孢藻(*Cylinderspermopsis raciborskii*, 10.20%)和微囊藻(*Microcystis* sp., 8.20%);引起5月与11月之间群落结构差异的主要物种是小环藻(26.31%)、隐藻(13.50%)、蓝隐藻(11.62%)、尖尾蓝隐藻(5.61%)、网状空星藻(*Coelastrum reticulatum*, 5.54%);而引起8月与11月之间差异的主要物种是双对栅藻(21.31%)、栅藻(11.40%)。

## 2.5 浮游植物的鱼产力评估

根据相关文献及标准<sup>[13-14,28]</sup>,在估计丹江口水库浮游植物的鱼产力时,水深取10 m、 $P/B$ 系数取100,饵料系数取100,利用率取30%,结合此次调查所得浮游植物年均生物量3.37 mg/L,丹江口水库2017年浮游植物的鱼产力为101.1 kg/hm<sup>2</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 丹江口水库浮游植物群落结构特征

本研究共计发现浮游植物114种,以绿藻门种类数最多(65种,占比57.02%),与近几年有关丹江口水库浮游植物的研究结果一致,总体上,丹江口水库从建坝至今,库区浮游植物的种类组成均以硅藻、绿藻和蓝藻门藻类为主,其余类别仅占据10%左右的比例(表3)。对比其上游及坝下水体中浮游植物的种类组成,也能发现类似特征<sup>[29-30]</sup>。其具体数值可能因物种本身丰度差异、种属划分争议、采样频次、采样点的位置和数量、采样水层等不同而产生较大差异,如凡盼盼<sup>[31]</sup>于2013—2015年在丹江口水库共记录到浮游植物690种,远高于同时期内其他研究人员所记录到的浮游植物的数量<sup>[20,32]</sup>。

本研究所得浮游植物年均密度为 $7.71 \times 10^6$  ind/L,介于 $0.40 \times 10^6 \sim 31.80 \times 10^6$  ind/L,其中绿藻门、蓝藻门藻类密度占比均超过硅藻门藻类,合计达60.89%,硅藻占比仅13.50%。对比前人的研究结果(表3)可知,正如建坝前相关专家的预报<sup>[12]</sup>,丹江口水库建成后,由于浮游植物是水体的初级生产者,对环境变化敏感;而大坝建立及水库蓄水所带来的水体滞留时间变长、流速显著减缓、水深和透明度增加、淹没区氮磷及有机质的释放、地表径流及上游来水带来的营养物质在

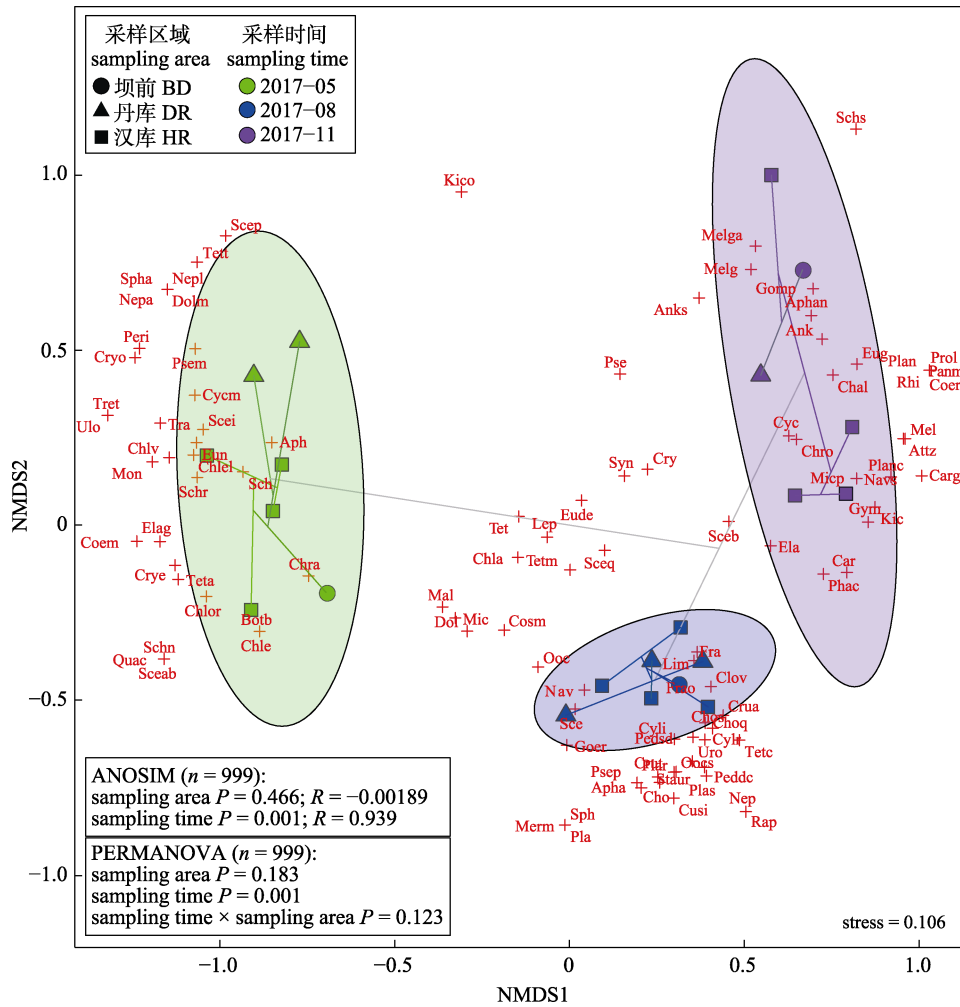


图 6 丹江口水库不同采样时间及区域浮游植物群落结构层次聚类、非度量多维尺度分析、相似性分析及多元置换方差分析结果

Fig. 6 Hierarchical clustering, NMDS, ANOSIM and PERMANOVA results of phytoplankton community during different sampling time and area in the Danjiangkou Reservoir

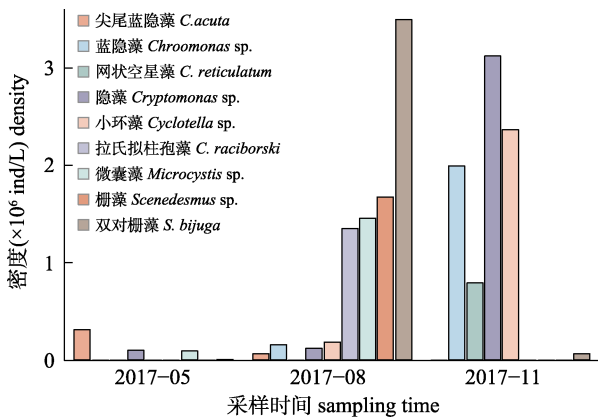


图 7 丹江口水库不同采样时间引起浮游植物群落结构差异的主要物种的密度

Fig. 7 The density of the leading species causing pronounced differences of phytoplankton community structure in different sampling times in the Danjiangkou Reservoir

库区富集等变化为藻类的生长提供了有利条件,尤其是适应该环境变化的蓝藻门、绿藻门藻类。随时间推移至今,浮游植物的密度和生物量分别高出建坝前约 30 倍和 10 倍,库区硅藻占比逐渐下降,绿藻和蓝藻大量出现,甚至成为库区的主要种类。类似现象在三峡水库也被观测到,高水位蓄水后,优势藻类由河道型藻类向湖泊型藻类转化<sup>[33]</sup>。

与既往研究<sup>[19-20]</sup>一样,本研究中浮游植物群落的密度、生物量随季节变化表现出一定差异,但仅 5 月与 8 月之间的藻类密度具有显著差异,这可能是由于 8 月水温提升后蓝藻、绿藻的大量繁殖导致的。各门类的密度与生物量随季节也有

表 3 丹江口水库浮游植物群落结构的年际变化

Tab. 3 Succession of phytoplankton community structure in the the Danjiangkou Reservoir

采样时间 sampling time	采样 次数 sampling times	样点 个数 number of sites	调查 库区 investi- gation area	密度/ ( $\times 10^4$ ind/L) density	生物量/ (mg/L) biomass	总氮/ (mg/L) TN	总磷/ (mg/L) TP	物种 丰富度 species richness	种类组成 species composition	密度占比/% percentage of density	数据来源 data source
1958.5	1	4	全库	26.47 (14.08–42.24)					硅藻		波鲁茨基 等 <sup>[12]</sup>
1958.9	1	3	汉库	23.70 (7.22–44.61)	0.30 (0.095–0.53)					硅藻(84.41)	
1986.10– 1987.7	4	7	全库	106.50 (10.22–426.39)	1.60 (0.050–8.42)		0.019	92(属)	硅藻: 绿藻: 蓝藻 19: 45: 16	硅藻(40.85) 绿藻(26.34) 蓝藻(19.88)	杨广等 <sup>[13]</sup> ; 尹魁浩等 <sup>[34]</sup>
1992.12– 1993.9	4	11	全库	42.18 (1.20–312.00)	0.71 (0.020–7.05)	0.84	0.042	60(属)		硅藻(79.8) 绿藻(6.10)	韩德举等 <sup>[14]</sup> ; 邬红娟等 <sup>[15]</sup>
2004.3– 2004.11	4	3	丹库	50.74 (34.16–80.64)		0.72	0.0025	71	硅藻: 绿藻: 蓝藻 35: 22: 8	硅藻(60.01) 绿藻(30.69) 蓝藻(5.52)	李运贤等 <sup>[16]</sup>
2003.3– 2005.8	12	3	丹库	109.33 (54.13–184.53)							张乃群等 <sup>[17]</sup> ; 张乃群等 <sup>[35]</sup>
2007.7– 2008.6	4	14	全库	417.49 (0.52–6100.00)		1.31	0.058	110	硅藻: 绿藻: 蓝藻 35: 46: 15	甲藻(40.92) 硅藻(22.46) 隐藻(16.73) 蓝藻(13.16)	申恒伦等 <sup>[8]</sup> ; 孔令惠等 <sup>[36]</sup>
2008.8– 2009.5	5	10	丹库	201.00 (19.93–1472.08)		1.27 <sup>a</sup>	0.036 <sup>a</sup>	117	硅藻 绿藻		Yin 等 <sup>[18]</sup>
2009.4– 2010.1	4	8	全库	111.03				74	硅藻: 绿藻: 蓝藻 20: 30: 7	硅藻(51.72) 隐藻(19.76) 蓝藻(17.37)	谭香等 <sup>[19]</sup>
2011.7– 2012.4	4	25	全库		0.030–43.10	1.65	0.024	106	硅藻: 绿藻: 蓝藻 34: 44: 14		Shen 等 <sup>[7]</sup>
2013.12– 2014.10	4	8	全库		0.16	1.27	0.024	101	硅藻: 绿藻: 蓝藻 20: 45: 26		王俊健 <sup>[32]</sup>
2014.5– 2015.4	4	24	全库	90.80	0.35	1.436	0.039	66	硅藻: 绿藻: 蓝藻 21: 26: 9	硅藻(38.60) 绿藻(35.39) 蓝藻(20.53)	王英华等 <sup>[20]</sup>
2014.1– 2016.10	12	10	全库		4.87 <sup>b</sup>	1.77 <sup>b</sup>	0.033 <sup>b</sup>				Pan 等 <sup>[10]</sup>
2017.4– 2018.1	4	11	库湾	489.00 (39.00–6110.00)		1.47	0.014	57(属)			贾海燕等 <sup>[22]</sup>
2017.5– 2017.11	3	10	全库	771.17 (39.56–3180.12)	3.37 (0.072–28.05)	1.58	0.032	114	硅藻: 绿藻: 蓝藻 15: 65: 23	绿藻(34.66) 蓝藻(26.23) 隐藻(25.42) 硅藻(13.50)	本研究 this study

注: 标注字母“a”的数值表示溶解性的营养盐, 标注字母“b”的数值为每年采样所得中位数的平均值。

Note: The soluble nutrients are annotated with the superscript character “a”, and the averages of median values of quarterly sampling are annotated with the superscript character “b”.

一定波动, 从具体种类丰度变化的多元统计分析可知, 3 次调查浮游植物群落结构的差异显著, 主

要是因为硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻在不同季节具有不同的竞争优势。对包含丹江口水库各季节藻



类组成信息的现有研究<sup>[8,13,19-20]</sup>进行分析发现, 春季藻类占比在 1986—1987 年以金藻为主, 绿藻、硅藻和蓝藻也占有较大比例, 而在 2007—2008 年、2009—2010 年、2014—2015 年均以硅藻占据较大优势。夏季藻类除 2007—2008 年以隐藻为主, 蓝藻和绿藻次之外, 其余几次调查均以硅藻、绿藻、蓝藻三门藻类为主, 且绿藻和蓝藻的优势在后两次调查中逐渐超过硅藻。秋季藻类除 2007—2008 年<sup>[8]</sup>以隐藻为主, 硅藻和绿藻次之外, 其余几次调查均以硅藻占比最多, 绿藻、蓝藻次之。冬季藻类在 1986—1987 年<sup>[13]</sup>以绿藻为主, 硅藻和蓝藻次之, 在 2007—2008 年<sup>[8]</sup>以甲藻占据绝对优势, 因为调查期间部分区域发生拟多甲藻水华影响了冬季的浮游植物种类组成; 后两次调查中<sup>[19-20]</sup>均以硅藻占比较多。本研究中各季节藻类组成与前人的研究有较大差异, 主要表现在夏季蓝藻和绿藻密度占比高达 94.38%, 生物量占比高达 82.19%, 其优势度进一步提升; 即使在温度较低的春季, 蓝藻密度占比也超过 50%, 而硅藻在春季密度占比仅 4%; 秋季以隐藻和硅藻为主。整体上, 近年来硅藻在丹江口水库一年四季均占据较大优势(表 3), 但在本研究中硅藻占比明显下降, 蓝藻和绿藻在夏季的相对丰度大幅度提升。此外, 隐藻占比的提升主要是由于秋季均县样点(尤其是 D13 样点)一种隐藻的密度及生物量异常高于其他样点, 同样的现象也曾在谭香等<sup>[19]</sup>对丹江口水库浮游植物的研究中出现。这可能与该区域在秋季由于水位的进一步提升、降雨增加及上游营养物质的输入而受到一定程度的有机物和氮的污染有关<sup>[1]</sup>。

空间上, 一直以来, 汉江库区的浮游植物种类、密度及生物量都要高于丹江库区<sup>[8,13-15,19-20]</sup>, 本研究所得结果与之一致, 这可能是因为汉江库区狭长、支流众多且库岸线长, 接受地表径流带来的外源性营养更丰<sup>[15]</sup>, 但在本研究中该差异并未达到显著性水平。从具体门类来看, 1992—1993 年<sup>[14-15]</sup>和 2007—2008 年<sup>[8]</sup>进行的两次调查显示, 库区从汉江库区到丹江库区总体上保持着硅藻种类数逐渐减少、蓝藻和绿藻种类数逐渐增加且硅

藻密度占比也相应下降的趋势, 汉江库区比丹江库区更接近河流状态且多样性更高。而近两次调查(2009—2010 年<sup>[19]</sup>、2014—2015 年<sup>[20]</sup>)显示丹江库区硅藻占比最高, 汉江库区则在 2009—2010 年以隐藻所占比例最大, 在 2014—2015 年绿藻门、蓝藻门、甲藻门和隐藻门生物量更高。本研究调查显示, 汉江库区绿藻、隐藻和硅藻种类数、密度均高于丹江库区, 而后者蓝藻的种类数及密度更高。由此可见, 两库区浮游植物可能存在不同的周期性演替模式, 因缺乏长期持续性的数据无法进行更深入的探讨。此外, 从具体种类的丰度进行比较发现, 库区之间的浮游植物群落结构差异并不显著。总体上, 两个库区的蓝藻和绿藻均占据较大比例, 虽有一定差异, 但都未达到显著性水平。相比于以往同水域的其他研究可知, 丹江口水库不同水域呈现一定的同质化趋势。

Margalef 丰富度指数<sup>[25]</sup>和 Shannon-Wiener 多样性指数<sup>[26]</sup>主要反映生物群落结构的复杂性, 数值越高, 表示群落结构越复杂, 稳定性越高。Pielou 均匀度指数<sup>[27]</sup>是生物群落实际多样性与理论最大多样性的比值, 同一群落中每个物种的丰度越接近, 分布越均匀, 均匀度就越高。本研究调查发现, 丹江口水库浮游植物的 Margalef 丰富度指数( $D_m$ )和 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'_N$ )都主要分布在 1~2 之间, 平均值分别为 1.35、1.78; Pielou 均匀度指数( $J_N$ )主要介于 0.4~0.7 之间, 平均值为 0.58。Yin 等<sup>[18]</sup>于 2008—2009 年、谭香等<sup>[19]</sup>于 2009—2010 年、王俊健<sup>[32]</sup>于 2013—2014 年及贾海燕等<sup>[22]</sup>于 2017—2018 年均对丹江口水库 3 种浮游植物生物多样性指数进行过研究, 分别得出库区的 Margalef 丰富度指数依次为 1.95、4.42、2.76、2.19; Shannon-Wiener 多样性指数依次为 1.34、1.54、2.11、1.34; Pielou 均匀度指数依次为 0.60、0.49、0.62、0.55。2017 年丹江口水库多样性指数与以往研究基本一致, 整体都处于较低水平, 其中, Margalef 丰富度指数有降低趋势。这说明丹江口水库浮游植物群落结构比较简单, 稳定性不高, 可能与水库环境受水位调节、渔业放养等人为干预较大有关。

### 3.2 丹江口水库水体营养状态评价

一般来说,蓝藻和绿藻占比较多、藻类密度和生物量大量增长是水体富营养化的特征<sup>[37-38]</sup>。按况琪军等<sup>[38]</sup>提出的依据藻类密度和生物量的划分标准,相对于王英华等<sup>[20]</sup>的调查结果(表 3),丹江口水库的营养状态又上升至一个新的水平,处于贫中营养型到中营养型之间,这也预示着丹江口水库有逐渐富营养化的趋势。而依据生物多样性指数及相关水质评价标准<sup>[39]</sup>,丹江口水库分别属于  $\alpha$ -中污染(基于  $D_m$ 、 $H_N$ )和轻污染状态(基于  $J_N$ )。综合来看,丹江口水库营养状态整体处于贫中营养型到中营养型之间,有一定的富营养化趋势。鉴于其生态系统服务功能的重要性,如何防止水体的进一步富营养化将是后续研究的重点。

### 3.3 丹江口水库鱼产力

丹江口水库作为国家一级水源保护区,其水质保护事关受水区域居民的用水安全,同时,作为重要的渔业生产基地,其渔业资源的合理可持续开发利用对当地经济也非常重要。滤食性鱼类的合理放养,在控制水质的同时又能为当地带来渔业产量,是目前保水渔业发展的重要措施之一,而对鱼产力的准确评估可为其提供基础理论依据。本研究采用饵料基础法所得丹江口水库 2017 年鱼产力为  $101.1 \text{ kg/hm}^2$ ,略高于 2012 年的捕捞产量  $75 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[40]</sup>。鉴于现阶段丹江口水库藻类生物量相对于 2012 年有所增加,有一定的富营养化趋势,滤食性鱼类放养量可较 2012 年适当提升。此外,搭配肉食性鱼类进行组合放养可能会取得更好的效果<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

本研究共计检出丹江口水库浮游植物 114 种属(包含变种),年均密度及生物量有所增加,分别为  $7.71 \times 10^6 \text{ ind/L}$ 、 $3.37 \text{ mg/L}$ ,主要由绿藻、蓝藻、隐藻和硅藻组成,硅藻占比相比于以往研究明显下降,蓝藻和绿藻优势度提升,具有一定的富营养化风险。库区浮游植物群落结构存在显著的季节差异,但在空间上呈现一定的同质化趋势,差异未达显著性水平;其多样性指数处于较低水平,群落结构较为简单。根据丹江口水库现阶段

浮游植物所能提供的鱼产力及浮游植物密度与生物量的变化情况,可适当增加滤食性鱼类的放养量。本研究可为丹江口水库水质保护、生态系统健康管理提供基础理论支撑。

### 参考文献:

- [1] Zhao W. Hydrobiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 1-528. [赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 1-528.]
- [2] Patil R R, Kambhar S V, Giriyanavar B S, et al. Algae as environmental biotechnological tool for monitoring health of aquatic ecosystem[M]//Maddala N R, Garcia Cruzatty L C, Chakraborty S. Advances in the Domain of Environmental Biotechnology. Singapore: Springer, 2021: 549-563.
- [3] Peng G G, Zhou X J, Xie B, et al. Ecosystem stability and water quality improvement in a eutrophic shallow lake via long-term integrated biomanipulation in Southeast China[J]. Ecological Engineering, 2021, 159: 106119.
- [4] Wang H. More than 39.4 billion cubic meters of water have been diverted through the middle and eastern routes of the South-to-North Water Diversion Project[N/OL]. People's Daily, 2020-12-13(01). [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-12/13/nw.D110000renmrb\\_20201213\\_4-01.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-12/13/nw.D110000renmrb_20201213_4-01.htm). [王浩. 南水北调东中线调水超三百九十四亿立方米[N/OL]. 人民日报, 2020-12-13(01). [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-12/13/nw.D110000renmrb\\_20201213\\_4-01.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-12/13/nw.D110000renmrb_20201213_4-01.htm).]
- [5] Li F P, Zhang H P, Zhu Y P, et al. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake[J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 64-71.
- [6] Rangel L M, Silva L H S, Rosa P, et al. Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs[J]. Hydrobiologia, 2012, 693(1): 13-28.
- [7] Shen H L, Li B, Cai Q H, et al. Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China[J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, 40(4): 859-869.
- [8] Shen H L, Xu Y Y, Wang L, et al. Spatial and temporal variations of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its affecting factors[J]. Plant Science Journal, 2011, 29(6): 683-690. [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[J]. 植物科学学报, 2011, 29(6): 683-690.]
- [9] Mac Donagh M E, Casco M A, Claps M C. Plankton relationships under small water level fluctuations in a subtropical reservoir[J]. Aquatic Ecology, 2009, 43(2): 371-381.
- [10] Pan Y D, Guo S J, Li Y Y, et al. Effects of water level in-

- crease on phytoplankton assemblages in a drinking water reservoir[J]. *Water*, 2018, 10(3): 256.
- [11] Zhang Z M, Gao J F, Cai Y J. The direct and indirect effects of land use and water quality on phytoplankton communities in an agriculture-dominated basin[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(12): 760.
- [12] Borutsky E B, Wu H W, Pai K T, et al. Hydrobiological survey of the region of the projected dam-reservoir of Tankiangkou, with propositions for fisheries management[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1959(1): 33-56. [E. B. 波鲁茨基, 伍献文, 白国栋, 等. 丹江口水库库区水生生物调查和渔业利用的意见[J]. *水生生物学集刊*, 1959(1): 33-56.]
- [13] Yang G, Yang G R, Liu J L. Plankton resource survey of Dan Jiangkou Reservoir[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 1996, 16(1): 38-42. [杨广, 杨干荣, 刘金兰. 丹江口水库浮游生物资源调查[J]. *湖北农学院学报*, 1996, 16(1): 38-42.]
- [14] Han D J, Peng J H, Jian D, et al. The assessment of food organism resources and trophic states of Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(1): 57-62. [韩德举, 彭建华, 简东, 等. 丹江口水库的饵料生物资源及水体营养状态评价[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(1): 57-62.]
- [15] Wu H J, Peng J H, Han D J, et al. Composition and ecological changes of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(1): 43-50. [邬红娟, 彭建华, 韩德举, 等. 丹江口水库浮游植物及其演变[J]. *湖泊科学*, 1996, 8(1): 43-50.]
- [16] Li Y X, Zhang N Q, Li Y Y, et al. Study on phytoplankton and evaluation of water quality in water source area of middle line project of transferring water from south to north[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(3): 219-225. [李运贤, 张乃群, 李玉英, 等. 南水北调中线水源区浮游植物[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(3): 219-225.]
- [17] Zhang N Q, Wang Z D, Du M H, et al. Phytoplankton and water quality of water source area of the middle line project of south to north water diversion[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, 12(4): 506-510. [张乃群, 王正德, 杜敏华, 等. 南水北调中线水源区浮游植物与水质研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(4): 506-510.]
- [18] Yin D C, Zheng L L, Song L R. Spatio-temporal distribution of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir, a water source area for the South-to-North Water Diversion Project (Middle Route), China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(3): 531-540.
- [19] Tan X, Xia X L, Cheng X L, et al. Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 2875-2882. [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[J]. *环境科学*, 2011, 32(10): 2875-2882.]
- [20] Wang Y H, Chen L, Niu Y, et al. Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 1057-1065. [王英华, 陈雷, 牛远, 等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(5): 1057-1065.]
- [21] Shi J W, Zhu J Y, Huang J, et al. Study on plankton community in the water source area of the mid-line project of south-to-north water diversion[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(6): 114-119. [施建伟, 朱静亚, 黄进, 等. 南水北调中线工程水源头区浮游生物群落研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6): 114-119.]
- [22] Jia H Y, Xu J F, Lei J S. Relationship of community structure of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir bay[J]. *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[J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 52-58.]
- [23] Wan Y S, Zhang L Q, 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[J]. *China Water Resources*, 2018(23): 27-30, 58. [万育生, 张乐群, 黄茁, 等. 南水北调中线水源区高水位蓄水水质变化及污染防治对策[J]. *中国水利*, 2018(23): 27-30, 58.]
- [24] Hu H J, Wei Y X. *The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology*[M]. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [25] Margalef R. *Information theory in ecology*[J]. *General Systems*, 1958, 3(1): 36-71.
- [26] Shannon C E, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communications*[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [27] Pielou E C. *An introduction to mathematical ecology*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [28] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *The evaluation standard of reservoir fish productivity (SL 563-2011)*[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 1-5. [中华人民共和国水利部. *SL 563-2011 水库鱼产力评价标准*[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 1-5.]
- [29] Liu Z F. Structure and annual variation of phytoplankton community at upstream of Hanjiang River[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014,

- 42(7): 176-182. [刘智峰. 汉江上游浮游植物的群落结构及周年变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 176-182.]
- [30] Mai Z, Li S Q, Guo C, et al. Phytoplankton community structure and water quality evaluation in the middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. *Biotic Resources*, 2020, 42(3): 271-278. [买占, 李诗琦, 郭超, 等. 汉江中下游浮游植物群落结构及水质评价[J]. 生物资源, 2020, 42(3): 271-278.]
- [31] Fan P P. Study on the change structure of phytoplankton community and water quality evaluation in Danjiangkou Reservoir[D]. Nanyang: Nanyang Normal University, 2015. [凡盼盼. 丹江口水库浮游生物群落结构与水质评价[D]. 南阳: 南阳师范学院, 2015.]
- [32] Wang J J. Research for community structure of crustacean zooplankton, phytoplankton, macrobenthos and the impact of environmental factors in Danjiangkou Reservoir[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [王俊健. 丹江口水库浮游甲壳动物、浮游植物、大型底栖动物生物群落结构及与环境因子的相关性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [33] Wang S T, Lei J S, Jia H Y, et al. Characteristics of phytoplankton community and eutrophication evaluation of the Three Gorges Reservoir[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, 5(1): 32-41. [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[J]. 三峡生态环境监测, 2020, 5(1): 32-41.]
- [34] Yin K H, Yuan H R, Xu B H, et al. Variation and correlation of environmental parameters in the water of Danjiangkou Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(1): 75-81. [尹魁浩, 袁弘任, 徐葆华, 等. 丹江口水库水质要素变化特征及其相互关系[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(1): 75-81.]
- [35] Zhang N Q, Du M H, Pang Z L, et al. Investigation of phytoplankton and evaluation of water quality in the water source area of the middle line project for transferring water from south to north[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 650-654. [张乃群, 杜敏华, 庞振凌, 等. 南水北调中线水源区浮游植物与水质评价[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 650-654.]
- [36] Kong L H, Cai Q H, Xu Y Y, et al. Seasonal change features of rotifer community and its correlation with environmental factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 941-949. [孔令惠, 蔡庆华, 徐耀阳, 等. 丹江口水库浮游轮虫群落季节变动特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 941-949.]
- [37] Lin Q Q, Hu R, Duan S S, et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1101-1108. [林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.]
- [38] Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91. [况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.]
- [39] Bai L J, Zhang Z Y, Wang L, et al. Analysis of plankton community and fishery resources in Xiangshui Reservoir[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(2): 280-287. [白禄军, 张子媛, 王利, 等. 响水水库浮游生物渔业资源分析[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 280-287.]
- [40] Yuan J, Xia Y, Li Z, et al. Changes in fisheries resources in the Hanjiang River and Danjiangkou Reservoir, China[C]// Chen Y, Chapman D C, Jackson J R, et al. *Fishery Resources, Environment, and Conservation in the Mississippi and Yangtze (Changjiang) River Basins*. Bethesda: American Fisheries Society, 2016, 84: 179-191.

## Spatio-temporal characteristics of the phytoplankton community and assessment of fish productivity in the Danjiangkou Reservoir, the water source for the South-to-North Water Diversion Project, China

XIONG Mantang<sup>1,3</sup>, WANG Puze<sup>1</sup>, YE Shaowen<sup>1</sup>, YU Gongliang<sup>2</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, LIU Jiashou<sup>1</sup>, ZHANG Tanglin<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
2. Key Laboratory of Algal Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In order to understand the dynamic spatio-temporal characteristics of the phytoplankton community in the Danjiangkou Reservoir during high-level water storage, the species composition, density, biomass, and biodiversity of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir were investigated and analyzed during May, August and November, 2017, and its fish productivity was evaluated. The results showed that 114 genera (including varieties) of phytoplankton from seven phyla were recorded in the Danjiangkou Reservoir, among which Chlorophyta had the most species with 65. The average density and biomass of phytoplankton were  $7.71 \times 10^6$  ind/L and 3.37 mg/L. The total algae density of Chlorophyta, Cyanophyta, and Cryptophyta accounted for 86.31%, and each of them exceeded the density of diatom algae (accounting for 13.50%). The Margalef richness index ( $D_m$ ) and the Shannon-Wiener diversity index ( $H'_N$ ) of phytoplankton ranged mainly from 1 to 2, and the Pielou evenness index ( $J'_N$ ) of phytoplankton mainly ranged from 0.4 to 0.7, with averages of 1.35, 1.78, and 0.58, respectively. The fish productivity of phytoplankton was 101.10 kg/hm<sup>2</sup>. Analysis of Similarities (ANOSIM), Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA), and Similarity Percentage Analysis (SIMPER) showed that there were significant seasonal differences in phytoplankton community structure in the reservoir area, which were caused by changes in the abundance of dominant species. There were no significant spatial differences in phytoplankton community composition, with a certain homogenization trend among the different reservoir areas. Compared with previous studies, our results showed that the density and biomass of algae in the reservoir had increased, the proportion of diatoms in the Danjiangkou Reservoir area had dropped obviously, and Cyanophyta and Chlorophyta algae had become the main species in the reservoir area. All phytoplankton biodiversity indexes were at a relatively lower level, which indicates that the phytoplankton community structure is simple and unstable. These results could serve as an essential scientific basis for optimizing the ecosystem structure and function of the Danjiangkou Reservoir, as well as its ecosystem health management.

**Key words:** Danjiangkou Reservoir; phytoplankton; community structure; fish production

**Corresponding author:** ZHANG Tanglin. E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn