

团结水库浮游植物功能群及营养水平研究

景德清¹, 柴一涵², 鞠永富³, 柴青宇⁴, 于洪贤^{5*}, 柴方营^{4*}, 孙旭⁶

¹北京师范大学天津附属中学, 天津

²东北林业大学奥林学院, 黑龙江 哈尔滨

³哈尔滨学院地理与旅游学院, 黑龙江 哈尔滨

⁴黑龙江科技大学管理学院, 黑龙江 哈尔滨

⁵东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

⁶大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连

Email: *china.yhx@163.com, *chaifangying@126.com

收稿日期: 2021年7月29日; 录用日期: 2021年9月1日; 发布日期: 2021年9月8日

摘要

为了研究团结水库浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子, 分别于2020年9月(秋季)、2021年5月(春季)、7月(夏季)对团结水库设置的5个采样点进行浮游植物采样分析, 共鉴定出浮游植物6门, 划分为16个功能群, 分别为C、D、F、H1、J、L0、M、MP、N、P、S1、W1、W2、X1、X2、Y。团结水库浮游植物功能群季节变化呈现为M + P → M + Y → D + F + P + W1 + Y的变化特征。运用冗余分析(RDA)探究浮游植物功能群与环境因子间的关系, 结果表明, 团结水库浮游植物功能群受水环境因子影响较为显著, 其中, 水深(Depth)、透明度(SD)、pH值、总磷(TP)、氯离子(Cl⁻)、化学需氧量(COD_{Mn})是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。团结水库水体中透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素(Chla)等指标均远超水体富营养化最低标准, 表明该水库呈富营养化状态。

关键词

浮游植物, 功能群, 季节演替, 环境因子

Study on Phytoplankton Functional Groups and Nutrient Levels in Tuanjie Reservoir

Deqing Jing¹, Yihan Chai², Yongfu Ju³, Qingyu Chai⁴, Hongxian Yu^{5*}, Fangying Chai^{4*}, Xu Sun⁶

¹Tianjin High School Affiliated with Beijing Normal University, Tianjin

*通讯作者。

文章引用: 景德清, 柴一涵, 鞠永富, 柴青宇, 于洪贤, 柴方营, 孙旭. 团结水库浮游植物功能群及营养水平研究[J]. 自然科学, 2021, 9(5): 672-683. DOI: 10.12677/ojns.2021.95073

²Aulin College, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

³School of Geography and Tourism, Harbin University, Harbin Heilongjiang

⁴School of Management, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

⁵College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

⁶College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Email: *china.yhx@163.com, *chaifangying@126.com

Received: Jul. 29th, 2021; accepted: Sep. 1st, 2021; published: Sep. 8th, 2021

Abstract

In order to study the seasonal succession characteristics and influencing factors of phytoplankton functional groups in Tuanjie Reservoir, phytoplankton samples were analyzed in 5 sampling sites in September 2020 (autumn), May 2021 (spring) and July 2021 (summer), respectively. Six phyla of phytoplankton were identified, and they were divided into 16 functional groups: C, D, F, H1, J, L0, M, MP, N, P, S1, W1, W2, X1, X2, and Y. The seasonal variation of the Phytoplankton functional group in Tuanjie Reservoir is characterized by $M + P \rightarrow M + Y \rightarrow D + F + P + W1 + Y$. Redundancy analysis (RDA) was used to explore the relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors, and the results showed that the phytoplankton functional groups were significantly affected by water environmental factors, and the water depth (Depth), transparency (SD), pH, total phosphorus (TP), chloride ion (Cl⁻) and chemical oxygen demand (COD_{Mn}) were the main environmental factors that affected the distribution of phytoplankton functional groups. The values of transparency (SD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chlorophyll (Chla) in Tuanjie Reservoir were all higher than the minimum standards of eutrophication. These indicate that the reservoir is in an eutrophication state.

Keywords

Phytoplankton, Functional Group, Seasonal Succession, Environmental Factors

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

浮游植物作为淡水水体的初级生产者，能够迅速对水环境的变化做出响应，因此通常将其作为指示性生物来评估水生态系统的健康状况[1]。浮游植物群落与水环境因子之间有着十分密切的关系，其种类、生物量和各种指数等群落特征常常被作为评价和监测水生态系统的重要指标[2] [3]。早期的浮游植物生态学研究中，主要是依据林奈物种同源性特点，通过对浮游植物进行物种分类鉴定与计数，分析其群落组成、密度动态、优势物种、多样性指数等表征其种群结构的重要指标，借以直接或间接评价水环境质量状况[4]。这种经典的分类方法可以在一定程度上反映淡水水体的健康状况，却不能精确体现浮游植物集群机理和所在淡水水体的生态功能。Reynolds [5]和 Padisak 等人[2]提出了浮游植物功能群的概念，将具有专门的适应特征或需求(如对营养水平、光照强度、水体交换速度等因子的需求、耐受性和敏感性)的浮游植物集群归为相同功能群，目前共总结出 39 个群组，分别命名为 A、B、C、D、N、NA、P、MP、T、TC、TD、

TB、S1、S2、SN、Z、X3、X2、X1、XPh、E、Y、F、G、J、K、H1、H2、U、Lo、LM、M、R、V、W1、W2、Ws、Wo 和 Q 功能群[2] [5]。该理论以浮游植物群落为单位，能更准确地反应其结构与水体间的动态关系，目前已经成为国内外学者[6] [7] [8] [9]的研究热点并被广泛应用于水库[9] [10] [11] [12] [13]和湖泊[14] [15] [16]等水体的生态状态[14] [15] [16] [17]或富营养水平[15] [18]评价中。张新月等人通过研究尔王庄水库浮游植物功能群时空分布特征，共鉴定出该水库 20 组功能群[9]。陈倩等人通过研究太湖水库蓄水前后浮游植物群落结构特征，将太湖水库蓄水前、后分别归类出 5 和 8 个功能类群，并判定该水库水体处于中营养水平[10]。以上研究均表明了浮游植物功能群的理论在鉴定水质方面具有重要价值。

随着社会经济的发展，越来越多的水库被作为城市饮用水水源地，其不仅具有防洪、灌溉、发电功能，还承担了保障城市供水的职能，具备较高生态系统服务价值[18]。水库水源地因其独有的生态脆弱性，其生态保护要比其他地区承担更多的生态建设任务，遵守更严格的法规要求和水质标准[19]。目前我国已建成水库 8.5 万余座，其中黑龙江省共计 497 座。位于穆稜县最南部共和乡境内的团结水库作为黑龙江省十大水库之一，为共和乡周边地区提供大量电能和供水，是当地的水源储备和供水调节水库，具有防洪、灌溉、养鱼、发电和美学价值。但该水库浮游植物功能群的研究未见报道，本研究首次对团结水库浮游植物功能群进行划分及演替分析，揭示了该水库浮游植物功能群随环境因素的季节性变化，为保护该水库的水资源提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究地概况

团结水库(130°8'~130°11'E, 44°01'~44°04'N)位于黑龙江省穆稜市穆稜河干流上游，建于 1981 年，用于为当地居民提供饮用水。团结水库表面积 445 km²，库容 8.63×10^7 m³，形如“Y”形[20]，年均蒸发量 950 mm，年均降水量 534 mm，主要集中在 6~9 月。水库因受温带大陆性季风气候影响，气温为 -44.1℃~37.6℃。夏季湿热较短，冬季寒冷且水体结冰有冰雪覆盖。

2.2. 采样点设定

本调查于 2020 年 9 月(秋季)、2021 年 5 月(春季)、7 月(夏季)进行，结合水库的周边环境和浮游动物分布特点共设置 5 个采样点(S1、S2、S3、S4、S5)，其中 S1 为水库上游，S2 为十号坝，S3 为馒头山，S4 为库心，S5 为大坝上游(图 1，表 1)。



Figure 1. Location of sampling sites in Tuanjie Reservoir
图 1. 团结水库采样点分布

Table 1. Five sampling sites coordinate in Tuanjie Reservoir
表 1. 团结水库五个采样点名称及坐标

采样点	纬度(N)	经度(E)
S1 水库上游	44°01'48"	130°11'24"
S2 十号坝	44°03'36"	130°10'48"
S3 馒头山	44°03'00"	130°09'36"
S4 库心	44°04'12"	130°10'36"
S5 大坝上游	44°04'48"	130°10'48"

2.3. 样品采集

2.3.1. 浮游植物样品的采集、处理和鉴定

每个采样点分别于春季(5月)、夏季(7月)、秋季(9月)进行了三次水样及浮游植物样品的采集。分别用采水器从水体顶部(距地表水 0.5 m)、中部和底部(距水床 0.5 m)采集 1 L 混合水样,现场滴加 10 ml Lugol 试剂进行固定,静置 48 h 并虹吸至 30 ml。用快速混匀器充分摇匀,吸取 0.1 ml 待测样品置于浮游植物计数框内进行全片计数。每升水中浮游植物的数量应按下列公式计算[21]:

$$N = \frac{C_s}{F_s \cdot F_n} \cdot \frac{V}{v} \cdot P_n \quad (1)$$

式中: C_s 为计数框面积, mm^2 ; F_s 为视野面积, mm^2 ; F_n 为计数视野数; V 为浓缩体积, mL; v 为计数框容积, mL; P_n 为计数个数。

浮游植物分类依据《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》[22]进行鉴定。浮游植物功能群按照 Reynolds 和 Padiak 等人[2][5]的标准进行划分。

2.3.2. 水体理化指标的测定

每个采样点的水温(WT)、电导率(Cond)、pH 值、溶解氧(DO)、氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、氯离子(Cl^-)和浊度(NTU)使用 YSI-6600 便携式多功能水质分析仪进行现场测定。水透明度(SD)和深度(Depth)用塞奇氏盘测得。在每个采样点采集上、中、下层三份共 1 L 混合水样,用样品瓶储存并置于冰盒中带回实验室进行分析,按地表水环境质量标准(GB3838-2002)对总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、化学需氧量(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、叶绿素 a(Chla) 含量、溶解氧(DO)、和浊度(NTU)等指标进行测定。

2.3.3. 水体富营养化评价指标和评价标准

目前国内尚无统一的水体富营养化评价标准,参考国内部分水库、湖泊的评价标准和以往学者的研究[23][24][25][26],确定水体富营养化评价标准(表 2)。

2.4. 数据处理和分析

利用 CANOCO for Windows 4.5 软件分析浮游植物功能群与环境理化因子间的关系,将除 pH 值外的所有数据进行 $\lg(x+1)$ 的处理,使之趋于正态分布。首先进行去趋势对应分析(DCA),DCA 分析结果显示梯度长度最大值为 2.255 (< 3),因此本次选用冗余分析(RDA)揭示浮游植物功能群特征与环境因子间的关系。

Table 2. Assessment system and assessment standard of water eutrophication**表 2.** 水体富营养化评价指标和评价标准

评价因子	贫营养	中营养	富营养化		
			轻度富营养化	中度富营养化	重度富营养化
透明度 SD (m)	37.000	12.000	2.400	0.550	0.170
总氮 TN (mg/L)	0.020	0.060	0.310	1.200	4.600
总磷 TP (mg/L)	0.001	0.004	0.023	0.110	0.660
叶绿素 Chla	1.000	2.000	4.000	10.000	65.000

3. 结果

3.1. 团结水库水环境特征

如表 3 所示, 团结水库水体各季节理化因子的平均值呈现出季节性差异, 其中 Depth、WT、COND、pH 值、NTU、Chla、TN、COD_{Mn} 均在夏季出现最大值, 随季节变化呈现出先增大后减小的趋势; DO、SD、BOD₅、Cl⁻、NH₄⁺ 随季节变化先减小后增大, 最小值均出现在夏季; TP 和 DO 春季出现最大值且 TP 随季节更替持续减小。

Table 3. Seasonal physicochemical factors of Tuanjie Reservoir**表 3.** 团结水库各季节理化因子

	春季	夏季	秋季
水深 Depth (m)	11.56 ± 3.95	16.36 ± 4.79	13.19 ± 4.31
透明度 SD (m)	0.79 ± 0.11	0.72 ± 0.06	0.89 ± 0.18
水温 WT (°C)	11.67 ± 0.74	25.62 ± 0.67	13.70 ± 1.82
电导率 COND (μs/cm)	0.06 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01
溶解氧 DO (mg/L)	7.92 ± 0.38	2.44 ± 0.2	7.18 ± 0.34
五日生物耗氧量 BOD ₅ (mg/L)	1.97 ± 0.50	1.26 ± 0.10	2.32 ± 0.37
pH 值	7.28 ± 0.18	8.19 ± 0.09	7.94 ± 0.07
氯离子 Cl ⁻ (mg/L)	1.28 ± 0.13	1.04 ± 0.21	1.19 ± 0.09
铵根 NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.22 ± 0.04	0.14 ± 0.01	0.28 ± 0.03
硝酸根 NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.76 ± 0.11	2.26 ± 0.17	2.25 ± 0.23
浊度 NTU	5.54 ± 0.48	12.18 ± 0.64	7.10 ± 0.59
叶绿素 Chla	6.84 ± 0.96	8.96 ± 0.80	7.68 ± 0.47
总氮 TN (mg/L)	1.40 ± 0.09	5.20 ± 0.18	3.45 ± 0.31
总磷 TP (mg/L)	0.69 ± 0.16	0.50 ± 0.06	0.18 ± 0.02
化学需氧量 COD _{Mn} (mg/L)	4.73 ± 0.32	5.15 ± 0.05	4.76 ± 0.32

3.2. 浮游植物功能群组成

通过对团结水库进行样品采集和数据分析,共鉴定出浮游植物 6 门(图 2),其中硅藻门占 58.62%,隐藻门占 3.45%,绿藻门占 17.24%,蓝藻门占 10.34%,裸藻门占 8.26%,甲藻门占 1.72%,共划分为 16 个功能群,分别为 C、D、F、H1、J、L0、M、MP、N、P、S1、W1、W2、X1、X2、Y(表 4)。

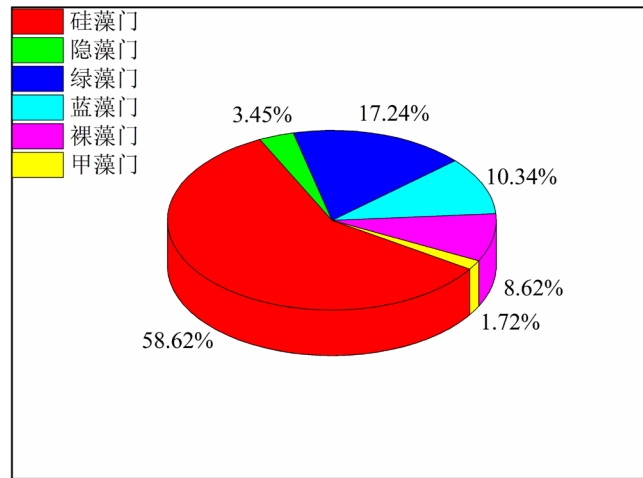


Figure 2. Species and composition of phytoplankton in Tuanjie Reservoir
图 2. 团结水库浮游植物种类及组成

Table 4. Composition of function groups in Tuanjie Reservoir
表 4. 团结水库浮游植物功能群组成

功能群	浮游植物	生境特征	耐受性	敏感性
C	华丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i> 、 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	富营养中 小型水体	光照、C 缺乏	Si 的大量消耗,分层
D	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> 、 双头针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i> 、 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> 、 肘状针杆藻极狭变种 <i>Synedra ulna var. danica</i> 、 平片针杆藻 <i>Synedra tabulata</i>	浅水、浊度较大 的水体	冲刷	营养物匮乏
F	丛球韦斯藻 <i>Westella botryoides</i>	中 - 富营养型湖泊, 洁净、混合水体	低营养高浊度	CO ₂ 缺乏
H1	固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	富营养型分层水体, 浅水、含氮低	低 N、低 C 条件	混合、低光照、 低 P
J	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 、 四角盘星藻 <i>Pesistrium tetras</i> 、 三角四角藻 <i>Tetraedron trigonum</i>	高营养混合 浅水水体		光照下降
L0	尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i> 、 尖辐节藻 <i>Stauroneis acuta</i> 、 小形色球藻 <i>Chroococcus minor</i>	深水或浅水, 贫 - 富营养, 中 - 大型水体	营养物利用 性可分离	持续时间很长或 深层混合
M	粗大微囊藻 <i>Microcystis robusta</i> 、 不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>	小型富营养湖泊的 昼夜混合层	强光照	冲刷、总光照较低

Continued

MP	偏肿桥弯藻 <i>Cymbella ventricosa</i> 、 膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i> 、 极小桥弯藻 <i>Cymbella perpusilla</i> 、 缢缩异极藻 <i>Gomphonema constrictum</i> 、 缢缩异极藻头状变种 <i>Gomphonema constrictum</i> var. <i>capitata</i> 、 英吉利舟形藻 <i>Navicula anglica</i> 、 放射舟形藻 <i>Navicula radiosa</i> 、 扁圆舟形藻 <i>Navicula placentula</i> 、 椭圆舟形藻 <i>Navicula schofeldii</i> 、 长圆舟形藻 <i>Navicula oblonga</i> 、 短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i> 、 双头舟形藻 <i>Navicula dicephala</i> 、 凸出舟形藻 <i>Navicula protracta</i> 、 长等片藻 <i>Diatoma elongatum</i> 、 普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i> 、 环状扇形藻 <i>Meridion circulare</i> 、 扁圆卵形藻 <i>Cocconeis piacentula</i> 、 多形丝藻 <i>Ulothrix variabilis</i>	受扰动浑浊型 浅水水体		
N	钝鼓藻 <i>Cosmarium obtusatum</i>	持续或半持续的 中营养型混合水体	营养物缺乏	分层, pH 值升高
P	短线脆杆藻 <i>Fragilaria brevisriata</i> 、 变异脆杆藻 <i>Fragilaria virescen</i> 、 钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i> 、 钝脆杆藻中狭变种 <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i> 、 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、 颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> 、 窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i> 、 扎卡四棘藻 <i>Attheya zachariasi</i>	持续或半持续的 中 - 富营养型 混合水体	温和光照和 C 缺乏	分层, Si 缺乏
S1	阿氏席藻 <i>Phormidium allorgei</i> 、 奥克席藻 <i>Phormidium orenii</i> 、 尖尾裸藻 <i>Euglena axyris</i>	透明度低的混浊 混合水体	高度光照匮乏条件	冲刷
W1	双鞭藻 <i>Eutreptia viridis</i> 、 梭形裸藻 <i>Euglena clavata</i> 、 棒形裸藻 <i>Euglena acus</i>	受到有机污染的 浅水水体	高 BOD	摄食
W2	颗粒囊裸藻 <i>Trachelomonas granulata</i>	中营养型浅水水体		
X1	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i> 、 镰形纤维藻奇异变种 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>	混合程度较高的超 富营养浅水水体	分层	营养不足, 滤食性摄食
X2	卵形衣藻 <i>Chamydomonas ovalis</i> 、 球衣藻 <i>Chamydomonas globosa</i>	混合程度较高的 中 - 富营养浅水 水体	分层	混合, 滤食性摄食
Y	蛋白核隐藻 <i>Cryptomonas pyrenoidifera</i> 、 卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> 、 薄甲藻 <i>Glenodinium pulvisculus</i>	静水水体(广适性)	低光照	噬菌生长

由表 5 可知, 浮游植物丰度最大值出现在秋季 S4 采样点, 最小值出现在春季 S1 采样点。春、夏、秋季浮游植物的总丰度分别为 3.13×10^7 ind/L、 2.05×10^7 ind/L 和 2.49×10^7 ind/L。总生物量分别为 44.06 mg/L、29.71 mg/L 和 22.59 mg/L, 二者均为春季最高。从季节上看, S2、S3、S5 采样点的浮游植物丰度春季最大; S1 采样点的浮游植物丰度夏季最大。从季节上看, S2、S3 采样点的浮游植物生物量春季最大; S4、S5 采样点的生物量秋季最大; S1 采样点的生物量夏季最大。

Table 5. Phytoplankton abundance ($\times 10^4$ ind/L) and biomass (mg/L) in different seasons
表 5. 不同季节浮游植物丰度值($\times 10^4$ ind/L)和生物量(mg/L)

采样点	丰度			生物量		
	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
S1	31.2	484.8	82.8	0.1	9.69	0.58
S2	592.8	367.2	424.8	21.61	2.49	3.89
S3	908.4	447.6	559.2	17.62	12.42	6.34
S4	775.2	405.6	938.4	2.29	2.64	7.16
S5	825.6	348	484.8	2.44	2.47	4.62

3.3. 浮游植物功能群时空分布

通过对表 6 中浮游植物功能群的丰度和生物量进行分析可知, 功能群 M、P、Y 是春、夏、秋三个季节最常见的类群。春季团结水库浮游植物功能群以 M、P 为主, 相对生物量分别为 79.68% 和 10.48%; 夏季以功能群 M、Y 为主, 相对生物量分别为 55.15% 和 22.16%; 功能群 D、F、P、W1、Y 为秋季的主要类群。

浮游植物功能群丰度(图 3), 春季最大值出现在 S3, 最小值出现在 S1; 夏季最大值出现在 S1, 最小值出现在 S5; 秋季最大值出现在 S4, 最小值出现在 S1。浮游植物功能群生物量(图 4), 春季最大值出现在 S2, 最小值出现在 S1; 夏季最大值出现在 S3, 最小值出现在 S5; 秋季最大值出现在 S4, 最小值出现在 S1。

Table 6. Composition of function groups in Tuanjie Reservoir
表 6. 团结水库浮游植物功能群组成

功能群	相对丰度			相对生物量		
	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
C	10.11%	16.72%	11.36%	3.41%	5.03%	5.68%
D	2.26%	8.01%	8.90%	1.50%	5.51%	13.32%
F	0.54%	2.22%	7.03%	0.58%	2.34%	11.76%
H1	0.65%	1.23%	14.05%	0.07%	0.13%	1.25%
J	0.00%	0.64%	0.53%	0.00%	0.48%	0.33%
L0	0.31%	0.00%	0.29%	0.33%	0.00%	0.54%
M	1.72%	1.23%	0.05%	79.68%	55.15%	3.44%
MP	26.81%	12.22%	10.54%	2.92%	1.31%	2.87%
N	0.00%	0.18%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
P	53.35%	25.72%	35.51%	10.48%	5.42%	35.48%
S1	0.46%	0.00%	0.29%	0.03%	0.00%	0.40%
W1	0.00%	0.00%	1.11%	0.00%	0.00%	12.16%
W2	0.04%	1.75%	1.92%	0.01%	0.48%	0.85%
X1	0.11%	0.35%	0.34%	0.02%	0.05%	0.07%
X2	3.33%	14.03%	3.08%	0.47%	1.94%	0.68%
Y	0.31%	15.72%	5.00%	0.50%	22.16%	11.18%

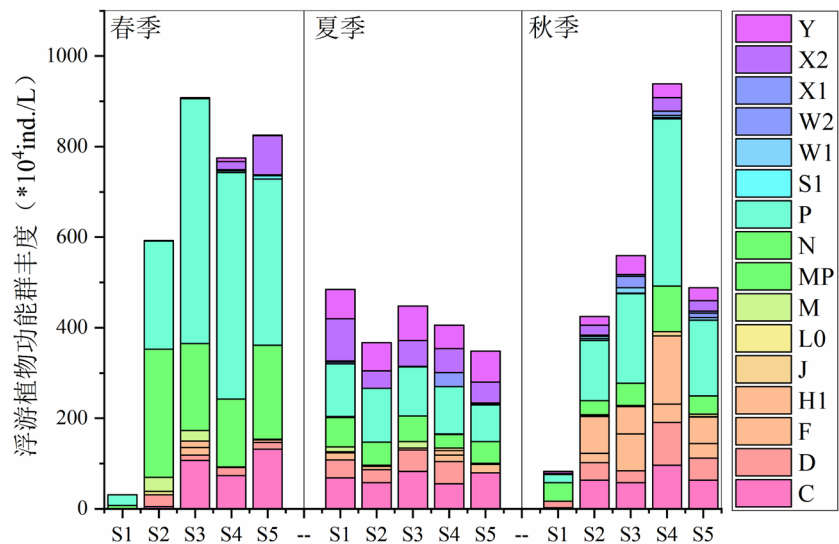


Figure 3. Temporal and spatial distribution of phytoplankton functional group abundance
图 3. 浮游植物功能群丰度的时空分布

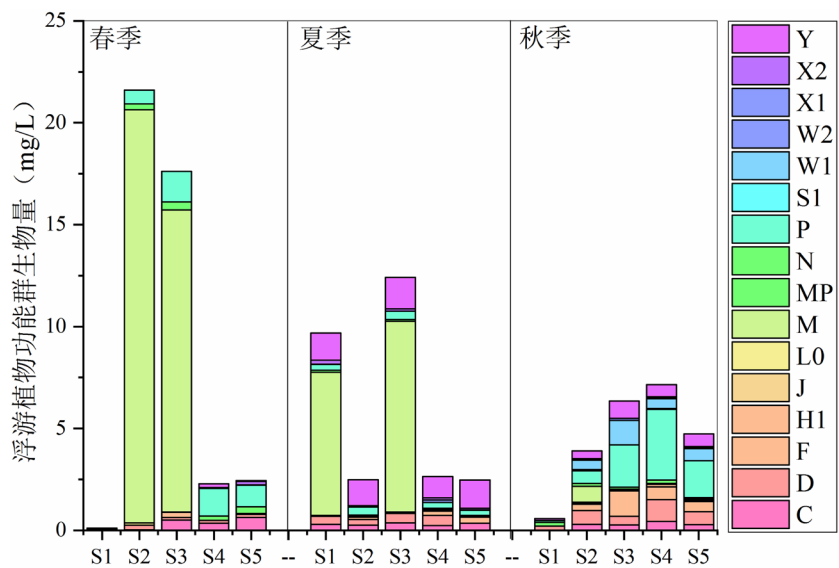


Figure 4. Temporal and spatial distribution of phytoplankton functional group biomass
图 4. 浮游植物功能群生物量的时空分布

3.4. 影响浮游植物功能群分布的环境因子

浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析结果表明,四个轴的特征值分别为 0.740、0.139、0.078、0.022 (表 7)。4 个轴对功能群数据的累积百分比方差为 98%, 功能群-环境关系的累积百分比方差为 98%, 各轴功能群 - 环境的相关性均为 1, 表明浮游植物功能群与环境因子之间有明显的相关性。由图 5 可知, 与轴 1 最主要的正相关因子是 Cl^- , 其次为 COND, 最主要的负相关因子为 pH 值, 其次为 NO_3^- ; 与轴 2 最主要的正相关因子为 SD, 其次为 COD_{Mn} , 最主要的负相关因子为 TP, 其次为 NTU。通过分析大部分功能群位于第二象限, 少部分位于其它象限, 如: 功能群 S1、W1、F、W2、X1 均与 Depth、DO 呈正相关; P、D、C 等均与 SD、 BOD_5 呈正相关; X2、N 与 NTU、TP、COND 呈正相关, 与 SD、Depth 呈负相关;

功能群 L0 与 COD_{Mn} 、 NH_4^+ 和 Cl^- 呈正相关；功能群 MP 与 Cl^- 呈正相关；功能群 M 与 Cl^- 呈正相关，与 pH 呈负相关等。整体来看，Depth、SD、pH 值、TP、 Cl^- 、 COD_{Mn} 是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。

Table 7. RDA results for phytoplankton functional groups
表 7. 浮游植物功能群的 RDA 分析结果

轴	1	2	3	4
特征值	0.740	0.139	0.078	0.022
功能群 - 环境相关性	1.000	1.000	1.000	1.000
功能群数据的累积百分比方差	74.0	88.0	95.8	98.0
功能群 - 环境关系的累积百分比方差	74.0	88.0	95.8	98.0

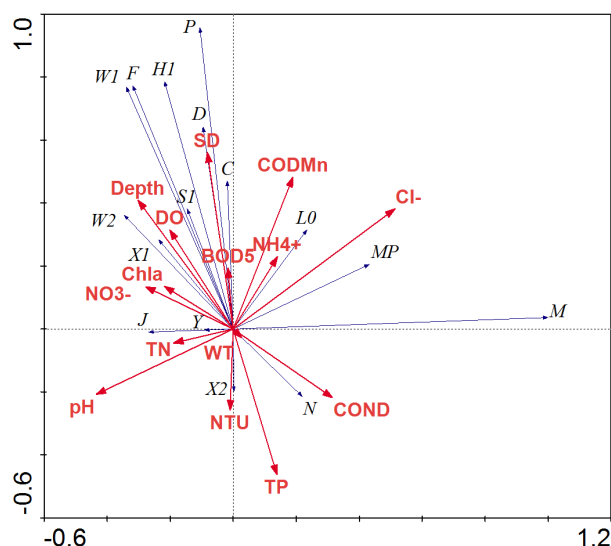


Figure 5. RDA analysis of functional groups and environment factors
图 5. 功能群与环境因子的 RDA 分析

4. 讨论

通过对团结水库的样品进行分析，共鉴定出 6 门浮游植物。其中硅藻门占 58.62%，为该水库优势类群，绿藻门为次优势类群。该结论与天然河流浮游植物种类组成以硅藻门的种类为主的结论一致[27] [28]。浮游植物功能群可通过自身演替来应对季节更替引起的水环境因子变化，从而维持生态平衡，这种伴随季节更替发生的演替往往具有一定的规律性[2] [5]。经研究显示，团结水库浮游植物功能群具有季节差异。随春、夏、秋季季节更替呈现出： $M + P \rightarrow M + Y \rightarrow D + F + P + W1 + Y$ 的季节演替。

通过将表 2 与表 3 进行对比分析可知，团结水库水体中透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素(Chla)等指标均远超水体富营养化最低标准，该水库水体呈富营养化状态。且该水库春、秋季溶解氧含量均在 7 mg/L 以上，远超过我国地面水质标准中规定的三级标准(溶解氧不低于 4 mg/L)，但夏季却不足 2.5 mg/L，易因缺氧影响浮游植物生长。有许多研究认为，总氮和总磷是衡量河流生态环境受到营养物质污染程度的重要指标之一[3] [29] [30]，并对浮游植物群落的生长繁殖起着重要作用。水中溶解氧含量的高低直接

影响到浮游植物的生存,溶解氧含量低甚至可能导致浮游植物群落的死亡[31],这些研究结果与本研究结论一致。

功能群 M 的代表种类为粗大微囊藻、不定微囊藻,适宜生长在小型富营养湖泊的昼夜混合层,对强光照有耐受能力,其生物量与 Cl^- 呈正相关,与 pH 值呈负相关。因为该水库水体呈富营养化状态,且水体中 Cl^- 于春季出现最大值,pH 值出现最小值,因此能够在光照较强的春、夏季的水体中获得竞争优势。同时因功能群 M 在春季的相对生物量为 79.68%,占比极大,在 Cl^- 与 pH 值的影响下,也使浮游植物总生物量在春季出现最大值。功能群 P 的代表种类为短线脆杆藻、变异脆杆藻、钝脆杆藻、钝脆杆藻中狭变种、颗粒直链藻等,其在春、夏、秋季的相对生物量分别为 10.48%、5.42%、35.48%,适宜生长在持续或半持续的中-富营养型混合水体,与 SD 呈现极强的正相关性,与 TP 呈极强的负相关性。该功能群在秋季成为优势种类,在夏季占比却比较低,可能是受该水体秋季 SD 出现最大值,夏季 SD 和 DO 均出现最小值,TP 在秋季出现最小值的影响。功能群 Y 的代表种类为蛋白核隐藻、卵形隐藻、薄甲藻,适宜在静水水体和低光照条件下生长,其生物量与 pH 值、 NO_3^- 呈正相关。这也更好的解释了该水体 pH 值、 NO_3^- 在夏季出现最大值,同时功能群 Y 在夏季也出现相对生物量的最大值的现象。

5. 结论

1) 团结水库共鉴定出浮游植物 6 门,划分为 16 个功能群,分别为 C、D、F、H1、J、L0、M、MP、N、P、S1、W1、W2、X1、X2、Y。

2) 团结水库浮游植物功能群季节变化呈现为 $M + P \rightarrow M + Y \rightarrow D + F + P + W1 + Y$ 的变化特征,该水库水体中透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素(Chla)等指标均远超水体富营养化最低标准,表明该水库呈富营养化状态。

3) RDA 分析结果表明,团结水库功能群受水环境因子影响较为显著,其中,水深、透明度、pH 值、总磷、氯离子、化学需氧量是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0500406),中央财政支持地方高校改革发展基金项目“冷水鱼类资源产业化可持续利用集成技术创新研究”(2020GSP14),黑龙江省经济社会发展重点研究课题(20309)。

参考文献

- [1] 王帅帅,王博涵,韩洁,等. 济南南部山区夏季水域浮游植物功能群分析[J]. 河北渔业,2017(5): 24-25, 30.
- [2] Padisak, J., Crossetti, L.O. and Naselli-Flores, L. (2009) Use and Misuse in the Application of the Phytoplankton Functional Classification: A Critical Review with Updates. *Hydrobiologia*, **621**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9645-0>
- [3] 陆欣鑫,刘妍,范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. 生态学报,2014, 34(5): 1264-1273.
- [4] 唐毅,郑永华,刘建虎,等. 横江中下游春季浮游植物群落结构及多样性分析[J]. 淡水渔业,2016, 46(1): 51-58.
- [5] Reynolds, C.S., Huszar, V., Kruk, C., et al. (2002) Towards a Functional Classification of the Freshwater Phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, **24**, 417-428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>
- [6] 郑诚,陆开宏,徐镇,等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J]. 环境科学,2018, 39(6): 2688-2697.
- [7] Mac, X., Chula Mwagona, P., Yu, H.X., et al. (2019) Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Functional Groups in Extremely Alkaline Dali Nur Lake, North China. *Journal of Freshwater Ecology*, **34**, 91-105. <https://doi.org/10.1080/02705060.2018.1554545>
- [8] 钱奎梅,刘宝贵,陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009~2016 年) [J]. 湖泊科学,2019, 31(4):

1035-1044.

- [9] 张新月, 郑涛, 龙剑锋, 等. 尔王庄水库浮游植物功能群初步研究[J]. 江西水产科技, 2020(1): 15-16.
- [10] 陈倩, 吴琼, 罗欢. 太湖水库蓄水前后浮游植物群落结构特征[J]. 生态科学, 2020, 39(6): 75-82.
- [11] 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]. 2021, 42(3): 55-61.
- [12] 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.
- [13] Shen, H., Li, B., Cai, Q., *et al.* (2014) Phytoplankton Functional Groups in a High Spatial Heterogeneity Subtropical Reservoir in China. *Journal of Great Lakes Research*, **40**, 859-869. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.09.007>
- [14] Padiasak, J., Borics, G., Grigorszky, I., *et al.* (2006) Use of Phytoplankton Assemblages for Monitoring Ecological Status of Lakes within the Water Framework Directive: The Assemblage Index. *Hydrobiologia*, **553**, 1-14.
- [15] 夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄, 等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 134-146.
- [16] Dembowska, E.A., Napiórkowski, P., Mieszczankin, T., *et al.* (2015) Planktonic Indices in the Evaluation of the Ecological Status and the Trophic State of the Longest Lake in Poland. *Ecological Indicators*, **56**, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.019>
- [17] Crossetti, L.O. and de Bicudo, M.C.E. (2008) Phytoplankton as a Monitoring Tool in a Tropical Urban Shallow Reservoir (Garças Pond): The Assemblage Index Application. *Hydrobiologia*, **610**, 161-173. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9431-z>
- [18] 孙作雷, 李亚男, 俞洁, 等. 浙江省 6 大重点水库生态服务功能价值评估[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(3): 353-358, 364.
- [19] 彭秀莲, 黄鸿君, 李冬林, 等. 重要水库水源地生态服务价值评估——以株树桥水库为例[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 111-116.
- [20] Sun, X., Chai, H.X., *et al.* (2019) Seasonal Variations of Zooplankton Functional Groups and Relationship with Environmental Factors in a Eutrophic Reservoir from Cold Region. *Applied Ecology and Environmental Research*, **17**, 7727-7740. https://doi.org/10.15666/aeer/1704_77277740
- [21] 汪梦琪, 汪金成, 王琪, 等. 洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状[J]. 生态学杂志, 2018, 30(8): 193-204.
- [22] 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.
- [23] 韩曦, 王丽, 周平, 等. 淮河(安徽段)南岸诸河流水质标识指数评价[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 46-57.
- [24] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 291-303.
- [25] 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J]. 环境污染与治理, 1990(5): 2-7.
- [26] 孙清展, 臧淑英, 张囡囡, 等. 基于蒙特卡罗方法的扎龙湿地水环境质量评价[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 75-81.
- [27] 况琪军, 胡征宇, 周广杰, 等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(6): 507-513.
- [28] 王岳, 夏爽, 裴国凤. 长江干流湖北段浮游藻类群落结构特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6): 916-922.
- [29] 李庆南, 赵文, 殷旭旺, 等. 辽河太子河水系的浮游植物种类多样性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(4): 322-327.
- [30] 王博涵, 李文香, 项珍龙, 等. 济南地区河流浮游植物功能群与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(5): 524-530.
- [31] 李俊龙, 郑丙辉, 刘录三, 等. 长江口浮游植物群落结构特征及其与环境的响应关系[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 403-409.