

南亚热带特大型水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系:以新丰江水库为例*

张 辉¹, 彭宇琼¹, 邹贤妮¹, 张婷婷¹, 巫 楚¹, 乔永民^{2**}, 杨洪允²

(1: 广东省河源生态环境监测站, 河源 517000)

(2: 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘 要: 为了解亚热带大型深水贫营养水库的浮游植物群落特征及生态现状, 2019年9月至2020年8月对新丰江水库的浮游植物群落结构和水体理化指标进行了周年调查. 结果表明, 新丰江水库水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) I类标准, 综合营养状态指数(TLI(Σ))在15~28之间, 整体上处于贫营养状态. 共检出浮游植物8门89属189种, 其中绿藻门94种、蓝藻门36种、硅藻门33种、裸藻门10种和甲藻门9种, 分别占总种数的49.74%、19.05%、17.46%、5.29%和4.76%. 浮游植物群落结构冬季和春季为绿藻—硅藻型、夏秋季为绿藻—蓝藻型; 浮游植物丰度范围为 $0.33 \times 10^6 \sim 11.78 \times 10^6$ cells/L, 均值为 3.75×10^6 cells/L. 其时间变化特征为2019年9月至2020年3月呈下降趋势, 此后至2020年7月又呈缓慢上升. 浮游植物生物量变化范围为0.26~2.49 mg/L, 均值为1.19 mg/L, 其时间分布与丰度基本一致, 其中绿藻门和硅藻门为生物量主要贡献类群; 相关分析和典型对应分析(CCA)结果表明, 水温是影响新丰江水库浮游植物群落结构的关键因素, 其次为透明度和电导率. 该研究对于深入认识贫营养水体藻类生态学特征, 拓展湖沼学研究范围与思路具有重要意义.

关键词: 南亚热带; 新丰江水库; 浮游植物; 群落特征; 时空变化; 环境因子

The characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors of a large reservoir in subtropic of Southern China: A case study of Xinfengjiang Reservoir*

Zhang Hui¹, Peng Yuqiong¹, Zou Xianni¹, Zhang Tingting¹, Wu Chu¹, Qiao Yongmin^{2**} & Yang Hongyun²

(1: Heyuan Ecology Environment Monitoring Station of Guangdong, Heyuan 517000, P.R.China)

(2: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China)

Abstract: To understand the characteristics of the phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors, an investigation was carried out monthly from September 2019 to August 2020 in Xinfengjiang Reservoir, a large oligotrophic reservoir in Southern China. The results showed that the water quality indexes of Xinfengjiang Reservoir met the Criterion I according to the "Surface Water Environmental Quality Standard" (GB 3838—2002). A total of 189 phytoplankton species were identified, belonging to 8 phyla and 89 genera. Among these species, 94 were members of Chlorophyta, 36 Cyanophyta, 33 Bacillariophyta, 10 Euglenophyta and 9 Pyrrophyta, accounting for 49.74%, 19.05%, 17.46%, 5.29% and 4.76% of the total phytoplankton species, respectively. The phytoplankton community structure was Chlorella-Diatom form in winter and spring 2020, and Chlorella-Cyanophyta form in summer and autumn 2019. The abundance of phytoplankton ranged from 0.33×10^6 to 11.78×10^6 cells/L with an average range of 3.75×10^6 cells/L. It was higher in autumn and winter in 2019 than that of spring and summer in 2020. The phytoplankton biomass has a range of 0.26–2.49 mg/L with an average of 1.19 mg/L. The temporal trend of biomass was as similar as that of abundance with dominated groups of Cyanophyta and Chlorophyta as well as Chlorophyta and Diatoms Correlation

* 2021-04-16 收稿; 2021-07-19 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07105-005-02)和河源市社会发展科技计划项目(201103101472576)联合资助.

** 通信作者; E-mail: qym77@163.com.

and canonical correspondence analysis showed that water temperature was the key factor affecting phytoplankton community structure in Xinfengjiang Reservoir, followed by water transparency and electrical conductivity. The present study had great significance for further understanding the ecological characteristics of phytoplankton in the oligotrophic reservoir, as well as expanding the study scope of limnology.

Keywords: Subtropic of Southern China; Xinfengjiang Reservoir; phytoplankton; community structure; spatio-temporal variation; environmental factors

浮游植物是水生生态系统中重要的初级生产者,在维持水生生态系统稳定性和完整性方面均起着重要作用^[1-3]. 浮游植物群落特征及其动态变化与水环境理化因子存在着密切关系^[3-6],其物种组成、演替规律和生物多样性特点对环境变化具有重要的指示作用,被广泛用于河流、水库等水环境特征分析与评价,已成为水域生态研究的热点内容之一^[6-10]. 贫营养水体中分布的浮游植物个体相对较小,具有更大比表面积,对水环境变化也更为敏感,其生理生态特点有别于富营养化水体的藻类^[11-12]. 因此,研究贫营养水库藻类群落特征及其与环境因子的关系,对于深入探究贫营养水体生态系统特点,制定科学的管理与保护措施具有重要的意义.

新丰江水库是全国第一个“中国优质饮用水资源开发基地”和东江水资源核心调节枢纽,也是东江饮用水源的“枢纽”,对大湾区的社会经济发展起着至关重要的基础支撑作用^[13]. 根据历年河源市环境质量公报,新丰江水库水质常年保持在国家地表水Ⅰ类标准,其综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)评价处于贫营养状态($TLI(\Sigma) \leq 26$)^[14]. 作为一座典型的亚热带大型贫营养水体,陈丽芬等研究认为新丰江水库浮游植物密度和生物量均比较低,丰水期以蓝、绿藻为主,枯水期以硅藻为主^[15],胡韧等的调查也得出类似结果,水库浮游植物主要以小环藻、蓝纤维藻、小球藻和纤维藻等为主,生物量低且以微小多甲藻为优势^[12]. 进入 21 世纪后,受气候变暖等因素影响,水库出现了偶发营养盐浓度超标和藻类异常增殖等现象,如 2019 年总氮浓度达到 0.58 mg/L. 但有关该水库浮游植物及营养状态的研究则鲜有报道,对水库的科学管理和正常运营带来了困扰. 因此,本文在优化与完善采样点位的基础上,对新丰江水库浮游植物进行了周年调查,同时进行相关水质监测分析,从浮游植物种类组成、丰度、多样性指数探讨浮游植物的群落结构及其演替特征;通过典型关联分析方法对浮游植物与环境因子之间的关系进行分析,探讨其间的响应规律和存在的关联机制. 本研究对于科学认识贫营养状态下浮游植物生理生态适应机制,丰富湖沼学研究内容,深化对人工水体生态学效应的认识具有重要意义. 同时也可水库的科学管理与保护提供数据支撑,切实保障供水安全,为粤港澳大湾区建设和可持续发展提供有力支持.

1 材料与方法

1.1 区域概况

新丰江水库(23°41'15"~24°7'45"N, 114°19'30"~114°45'40"E)位于广东省河源市东源县,始建于 1958 年,是全国第七大水库和华南第一大水库,流域面积 5813 km²,以丘陵和山地为主;水域面积 370 km²,库容 1.39×10¹⁰ m³,平均年入库水量 0.6×10¹⁰ m³,多年平均水深 28.7 m,最大水深 93 m,水力滞留时间 2 a,库区属亚热带季风气候,降雨期主要集中在 4—9 月份,年均降雨量 1974.7 mm,年平均气温 20.8℃^[12].

1.2 样品采集及处理

参照《全国淡水生物物种资源调查技术规定》^[16]要求,在新丰江水库库区中心、左右两翼和库区出入口共设置 6 个采样点位(表 1 和图 1). 于 2019 年 9 月至 2020 年 8 月,以 1 次/月的频次进行样品采集,采用卡盖式深水采样器分别在 0.5、5、10、15 m 处取水样,同步采集藻类和水质混合样.

浮游植物定性和定量样品采集方法、定量样品计数

表 1 新丰江水库采样点位信息

Tab.1 Latitude-longitude and depth information of sampling sites in Xinfengjiang Reservoir

点位	经度	纬度	平均水深/m
Z1	114°38'10.21"E	23°43'59.04"N	47.9
Z2	114°37'10.47"E	23°44'34.11"N	69.9
Z3	114°33'55.33"E	23°46'22.01"N	26.4
Z4	114°34'23.98"E	23°47'22.06"N	54.9
Z5	114°28'35.08"E	23°45'36.50"N	44.5
Z6	114°31'44.24"E	23°52'12.50"N	43.7

和生物量计算方法参照《淡水浮游生物研究方法》等^[17-18],浮游植物鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[19]. 利用光学显微镜进行物种鉴定与计数.

用塞氏盘现场测定透明度(SD);以 YSI 多参数水质分析仪现场测定混合水样的溶解氧(DO)、水温(WT)、电导率(EC)和 pH,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 *a* (Chl.*a*) 浓度分析方法参照《国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书(试行)》^[20].

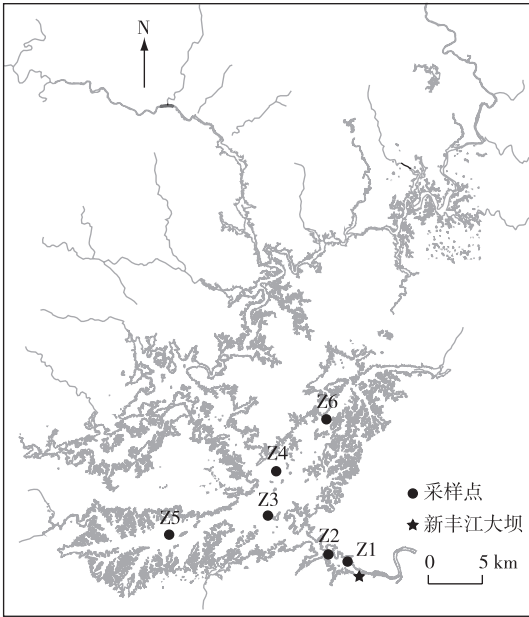


图 1 新丰江水库采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Xinfengjiang Reservoir

1.3 生物多样性指数

优势属的确定采用 Mcnaughton 优势度(Y),其计算公式为:

$$Y = \frac{N_i}{N} \cdot f_i \tag{1}$$

式中, Y 为优势度, $Y \geq 0.02$ 的属即为优势属, N_i/N 为第 i 个属的细胞密度(N_i)与总浮游植物细胞密度(N)的比值, f_i 为各采样点第 i 个属的出现频率.

浮游植物多样性指数计算公式如下^[21-22]:

Margalef 丰富度指数(D)计算公式:

$$D = (S - 1) / \ln N \tag{2}$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式:

$$H' = - \sum (N_i/N) \cdot \ln(N_i/N) \tag{3}$$

Pielous 均匀度指数(e)计算公式:

$$e = H' / \ln (S) \tag{4}$$

式中, S 为浮游植物总属数, H' 为浮游植物多样性指数.

1.4 营养状态评价

1.4.1 生物学指标 生物学指标采用浮游植物丰度、生物量、 D 、 H' 和 e 多样性指数评价水库营养状态(表 2).

1.4.2 综合营养状态指数 以 SD、TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 为参数,采用地表水环境质量评价办法(试行)^[25] 中的综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)法对新丰江水库水体营养状态进行评价. 公式为:

表 2 水体营养状态评价的藻类生物学指标及标准^[23-24]

Tab.2 Algal biological indices and standards for evaluation of water trophic state^[23-24]

评价指标	极贫营养	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	超/重富营养
丰度/($\times 10^6$ cells/L)	≤ 0.5	0.5~1	1~9	9~40	40~80	80~100	≥ 100
生物量/(mg/L)		≤ 3		3~5	5~10	≥ 10	
<i>D</i>		≥ 6	4~6	2~4	1~2	≤ 1	
<i>H'</i>		≥ 3		2~3	1~2	0~1	
<i>e</i>		≥ 0.5		0.3~0.5	0.2~0.3	≤ 0.2	

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \tag{5}$$

式中, $TLI(j)$ 表示第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重. 当 $TLI(\sum) < 30$ 时为贫营养; $30 \leq TLI(\sum) \leq 50$ 时为中营养; $TLI(\sum) > 50$ 时为富营养.

1.5 数据处理

以 Excel 2019、SPSS 22.0、Canoco 5.0 软件进行数据处理和统计学分析; 以 Origin pro 8.0、ArcGIS 10.6 软件绘制统计图.

2 结果与讨论

2.1 水质理化指标

新丰江水库全年 WT 为 17.9~32.8℃, 均值为 25.6℃. DO 浓度介于 6.8~9.3 mg/L 之间, 均值 8.0 mg/L, 其最高值出现在 2020 年 3 月, 最低值则出现在 2019 年的 10 月. SD 值介于 1.9~6.8 m 之间, 均值 3.8 m. EC 值介于 56.1~90 μ S/cm, 均值 74.6 μ S/cm. pH 值介于 6.8~8.5, 均值 7.5, 水体总体呈弱碱性. TN 浓度介于 0.41~0.68 mg/L, 均值 0.49 mg/L. TP 浓度为 0.001~0.009 mg/L, 均值 0.004 mg/L. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度介于 0.005~0.134 mg/L 之间, 均值 0.023 mg/L. COD_{Mn} 介于 0.8~2.8 mg/L 之间, 均值 1.5 mg/L. Chl.*a* 浓度介于 0.0004~0.005 mg/L 之间, 均值 0.0019 mg/L. 调查期间除 TN 外, 新丰江水库 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 和 DO 等指标浓度均值均满足国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) I 类水质标准.

采用综合营养状态指数法($TLI(\sum)$)对新丰江水库进行评价(图 2), 结果显示 $TLI(\sum)$ 范围介于 15~28 之间, 水库整体上处于贫营养状态($TLI(\sum) < 30$).

2.2 藻类组成

调查期间共鉴定出浮游植物 8 门 10 纲 21 目 41 科 89 属 189 种(表 3), 其中绿藻门(Chlorophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、裸藻门(Euglenophyta)和甲藻门(Dinophyta)分别为 94、36、33、10、9 种, 分别占总种数的 49.74%、19.05%、17.46%、5.29% 和 4.76%, 隐藻门和金藻门各有 3 种, 分别占总种类数的 1.59%; 黄藻门则仅有 1 种, 仅占总种类数的 0.5%.

从时间变化上来看(图 3), 夏季出现种类最多, 2020 年 6 月共鉴定出 123 种; 此后随着气温的下降种类数快速减少, 于冬季出现最低值, 2020 年 2 月仅鉴定出 68 种, 此后种类数开始缓慢回升, 呈明显的季节变化特征. 从空间来看, 水库中心位置(Z4)的种类最多, 两侧库湾则相对较少(Z5 和 Z6), 整体上空间差异不大.

2.3 优势属

以优势度 $Y \geq 0.02$ 确定浮游植物优势属. 调查期间新丰江水库的浮游植物优势属共有 6 门 19 属, 优势度 Y 介于 0.020~0.816 之间(表 4). 2019 年秋季和冬季, 优势属以蓝藻门类群为主, 其中绝对优势属为尖头藻属

表 3 新丰江水库浮游植物组成

Tab.3 Composition of phytoplankton in Xinfengjiang Reservoir

门	纲	目	科	属	种
蓝藻门	1	3	8	21	36
绿藻门	2	6	15	41	94
硅藻门	2	7	10	14	33
裸藻门	1	1	1	3	10
隐藻门	1	1	1	2	3
甲藻门	1	1	3	5	9
金藻门	1	1	2	2	3
黄藻门	1	1	1	1	1
合计	10	21	41	89	189

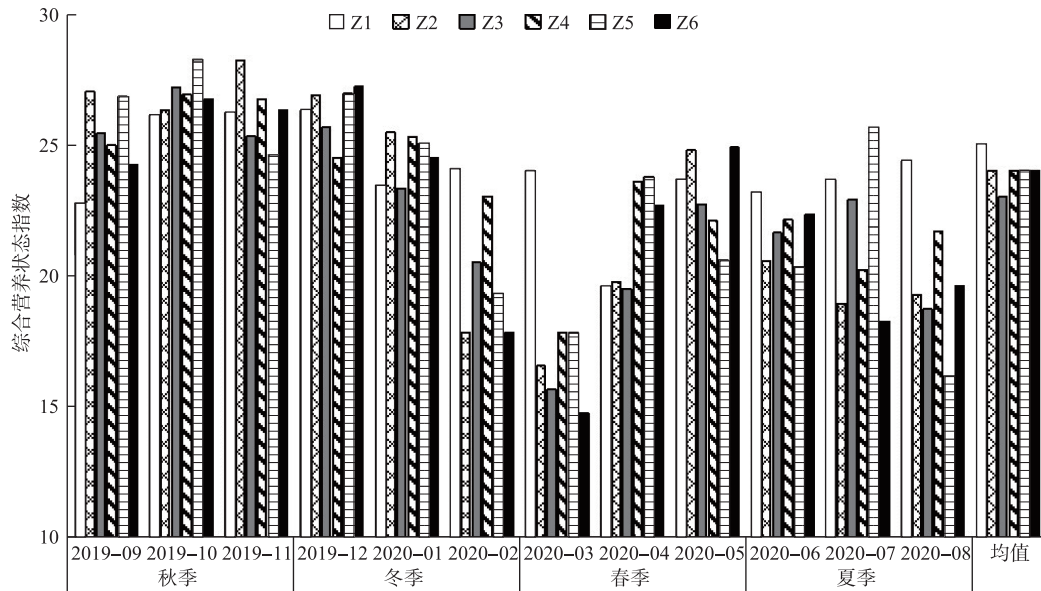


图2 新丰江水库不同采样点不同季节综合营养状态指数

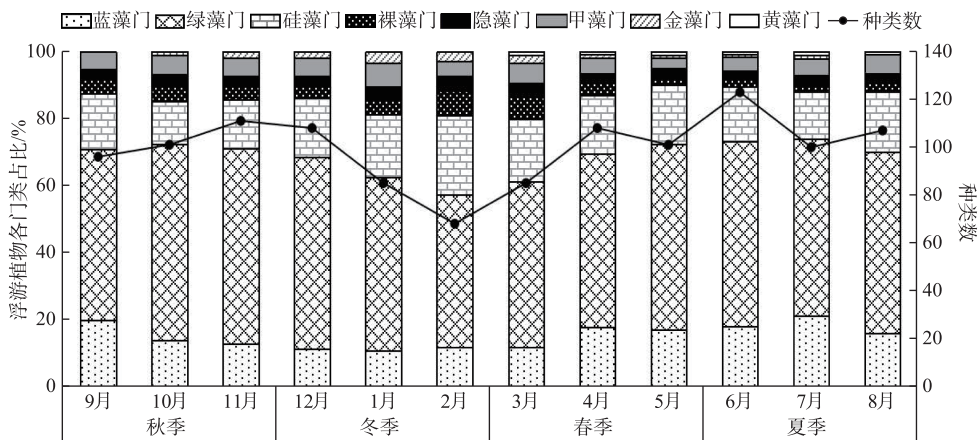
Fig.2 TLI(Σ) of water in Xinfengjiang Reservoir in different seasons and different sites

图3 新丰江水库浮游植物各门种类时间分布

Fig.3 The percentage of different phyla at each month in Xinfengjiang Reservoir

(*Raphidiopsis*) ($Y=0.625 \sim 0.816$), 亚优势属为浮鞘丝藻属 (*Planktolyngbya*) ($Y=0.069 \sim 0.244$), 隐球藻属 (*Aphanocapsa*) 和棒胶藻属 (*Rhabdogloea*) 仅在个别月份形成优势. 进入2020年冬春季之交, 绿藻门的小球藻属 (*Chlorella*) ($Y=0.021 \sim 0.172$) 和硅藻门的小环藻属 ($Y=0.024 \sim 0.332$) 的丰度快速上升, 成为优势属. 与此同时, 蓝藻门优类群逐步减少. 随着气温的升高, 优势类群的数量和类别出现显著的演替特征. 优势属由冬季的7个增加至夏季17个, 其中以小环藻属占绝对优势, 隐球藻属 (*Aphanocapsa*)、微囊藻属 (*Microcystis*) 等为春季和夏季的亚优势属. 隐藻的蓝隐藻属 (*Chroomonas*)、金藻的锥囊藻属 (*Dinobryon*)、黄藻的葡萄藻属 (*Botryococcus*) 仅在春季形成优势; 蓝藻的色球藻属 (*Chroococcus*), 绿藻的浮球藻属 (*Planktosphaeria*)、并联藻属 (*Quadrigula*) 和栅藻属 (*Scenedesmus*), 仅在夏季形成优势.

表 4 新丰江水库浮游植物不同季节的优势属及 Y 值*
Tab.4 Dominant genera and dominance of phytoplankton in different seasons in Xinfengjiang Reservoir

编号	优势属		秋季			冬季			春季			夏季		
			9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月
S1	尖头藻属	<i>Raphidiopsis</i>	0.625	0.816	0.659	0.776	0.808	0.619	—	0.044	—	—	—	—
S2	浮鞘丝藻属	<i>Planktolyngbya</i>	0.244	0.071	0.174	0.117	0.069	0.074	—	—	—	—	—	—
S3	隐球藻属	<i>Aphanocapsa</i>	—	—	0.037	—	—	—	0.029	—	—	0.159	0.071	—
S4	微囊藻属	<i>Microcystis</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.122	0.239	—	0.094	0.024
S5	色球藻属	<i>Chroococcus</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.068	0.044
S6	棒胶藻属	<i>Rhabdogloea</i>	—	—	—	—	—	0.042	—	—	—	—	0.021	0.055
S7	空星藻属	<i>Coelastrum</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	0.134	0.237	0.082	—
S8	小球藻属	<i>Chlorella</i>	—	—	—	—	0.021	0.066	0.139	—	—	0.104	0.139	0.172
S9	卵囊藻属	<i>Oocystis</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	0.027	—	0.040	0.044
S10	四角藻属	<i>Tetradron</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	0.021	—	—	—
S11	浮球藻属	<i>Planktosphaeria</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.023	—	—
S12	纤维藻属	<i>Ankistrodesmus</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.025	—	—	—	—
S13	栅藻属	<i>Scenedesmus</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.024	0.052	0.132
S14	并联藻属	<i>Quadrigula</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.032	0.086	0.156
S15	小环藻属	<i>Cyclotella</i>	—	—	—	—	0.024	0.104	0.332	0.283	0.166	0.251	0.150	0.205
S16	脆杆藻属	<i>Fragilaria</i>	0.023	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S17	蓝隐藻属	<i>Chroomonas</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.145	0.021	—	—	—
S18	锥囊藻属	<i>Dinobryon</i>	—	—	—	—	—	—	0.040	0.020	—	—	—	—
S19	葡萄藻属	<i>Botryococcus</i>	—	—	—	—	—	—	0.114	—	—	—	—	—

* “—”表示未出现优势属.

2.4 浮游植物群落的时间变化

调查期间,新丰江水库藻类丰度介于 $0.33\times10^6\sim11.78\times10^6$ cells/L 之间,均值为 3.75×10^6 cells/L. 浮游植物丰度季节变化明显,且表现出与一般湖库不同的特征. 新丰江水库在 2019 年秋季和冬季浮游植物的丰度明显高于 2020 年的春季和夏季,其高值和次高值分别出现在 2019 年 10 月和 9 月. 此后呈快速下降趋势,并在 2020 年 3 月达到最低值 (0.33×10^6 cells/L),仅为最高值的 1/36. 此后,藻类丰度缓慢回升,至 2020 年 6 月达到 1.73×10^6 cells/L,不及 2020 年入冬时的 1/3. 从浮游植物组成上来看,2020 年秋季和冬季均以蓝藻占绝对优势,最高贡献率达 92.48%. 随着 2020 年春季的到来,绿藻、硅藻和黄藻丰度迅速增加,与蓝藻共同成为优势类群,至夏季绿藻取代蓝藻和硅藻成为主要优势类群,并呈逐步增加趋势,贡献率最高可达 58.16%,成为绝对优势类群.

调查期间,新丰江水库浮游植物生物量介于 0.26~2.49 mg/L,均值为 1.19 mg/L. 其时间变化特征与丰度相似,由 2019 年秋季经冬季至 2020 年春季浮游植物生物量呈下降趋势. 其最高值出现在 2019 年 10 月,最低值出现在 2020 年 4 月,约为最高值的 1/10. 此后生物量迅速回升,至 6 月出现此次调查的次高值. 从浮游植物对生物量的贡献组成上来看,2019 年秋季蓝藻、绿藻和甲藻是生物量的主要贡献者,贡献率为 85.3%~95%. 进入冬季后,生物量主要贡献类群演替变化明显,2019 年 12 月以蓝藻、绿藻和硅藻为主,总贡献率达 78%,2020 年 1 月适应低温的金藻快速增加,贡献率上升至 45%,2020 年 2 月则演替为以绿藻和硅藻为主,两者贡献率达 99%. 至 2020 年 4 月绿藻贡献率大幅下降,隐藻和甲藻贡献率开始上升,2020 年 5 月甲藻的贡献率达至 46%.

2.5 浮游植物的空间分布特征

新丰江水库浮游植物丰度变化较大(图 6a),由大坝附近的 Z2 (6.99×10^6 cells/L) 至水库中心 Z4 (2.91×10^6 cells/L) 丰度呈明显下降趋势,从库心向两侧库湾延伸,丰度则略有回升. 从生物量来看(图 6b),其分布有别于丰度,各点位差别不显著,生物量介于 1.03~1.31 mg/L 之间. 其中 Z3 点位出现最高值,于库湾处的

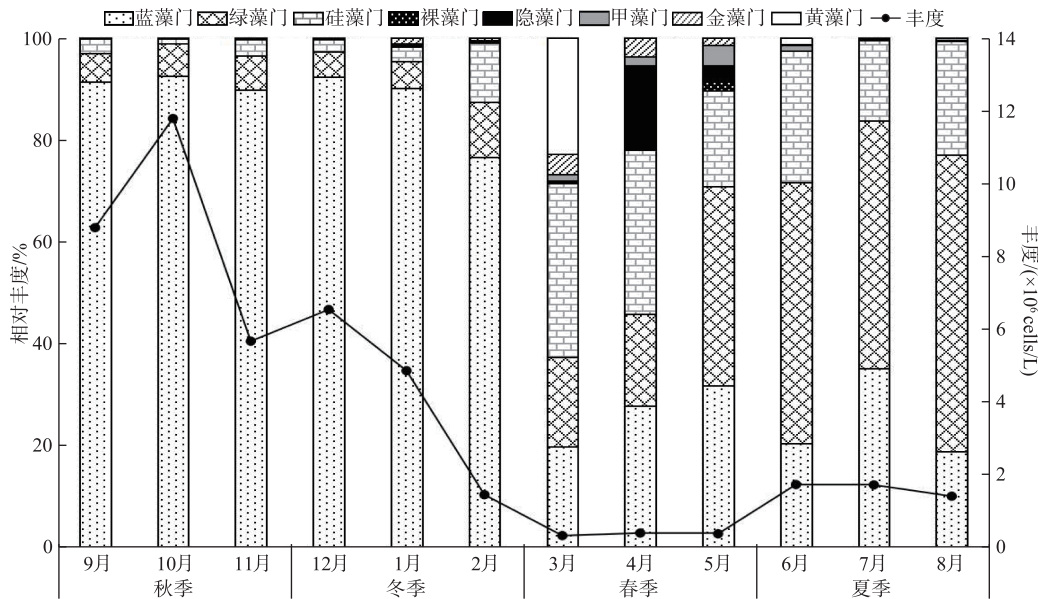


图 4 新丰江水库不同季节浮游植物丰度和各门相对丰度

Fig.4 Abundance of phytoplankton and the percentage of different genus in different seasons in Xinfengjiang Reservoir

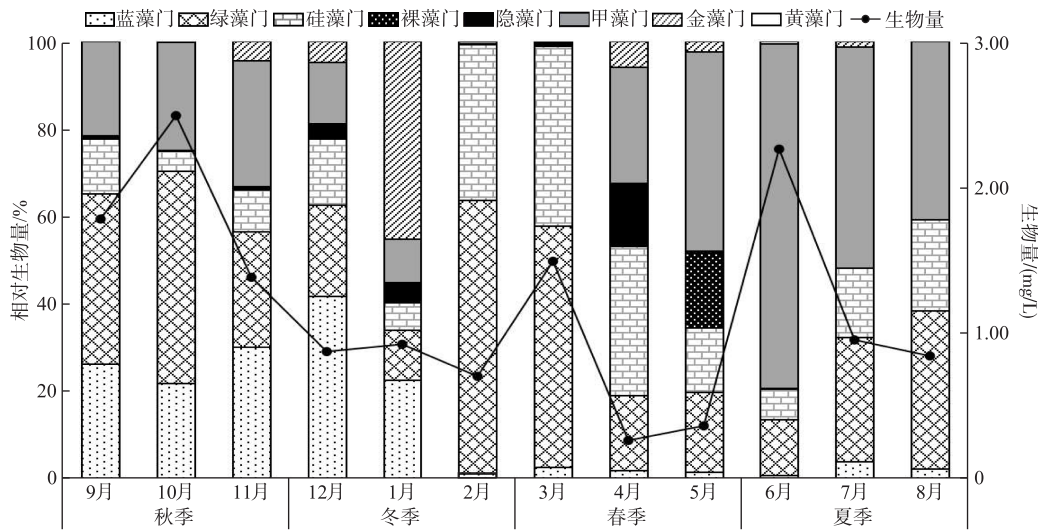


图 5 新丰江水库不同季节浮游植物生物量和各门相对生物量

Fig.5 Biomass of phytoplankton and the percentage of different genus in different seasons in Xinfengjiang Reservoir

Z6 点位出现最低值. 藻类总生物量的空间变化趋势与甲藻和绿藻相对生物量基本一致, 主要在于其在生物量贡献上占主导地位, 其中甲藻和绿藻在 Z3 和 Z4 点贡献率超过 70%.

2.6 浮游植物多样性及营养状态

调查期间, 新丰江水库浮游植物的 D 、 H' 和 e 指数范围分别为 2.07~3.22、0.91~2.62 和 0.24~0.75, 年度

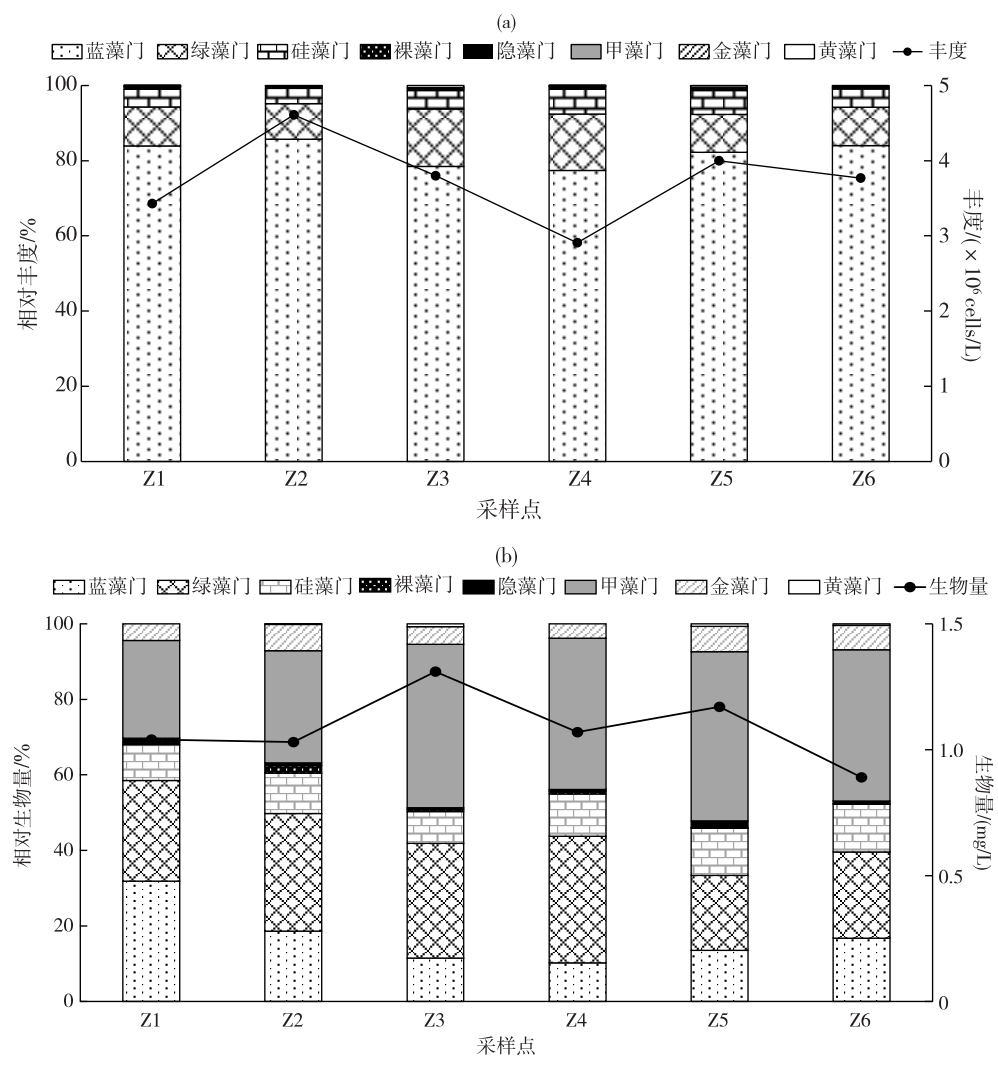


图 6 新丰江水库不同采样点浮游植物丰度和各门相对丰度(a)以及生物量和各门相对生物量(b)

Fig.6 Abundance, relative abundance(a) and biomass, relative biomass(b) of phytoplankton and the percentage of different genus in different sites in Xinfengjiang Reservoir

均值分别为 4.12、1.63 和 0.37. H' 和 e 指数在 2019 年的秋季和冬季低于 2020 年春季和夏季, 最低值和最高值分别出现在 2019 年 10 月和 2020 年 5 月(表 5). D 指数变化不明显, 2019 年秋季和冬季略高于 2020 年的春季和夏季, 最高值和最低值分别出现在 2019 年 11 月和 2020 年 3 月; 从空间分布来看, 各点位之间 D 、 H' 和 e 指数范围分别为 3.70~4.43、1.42~1.81 和 0.35~0.44(表 6). 分别以 D 、 H' 和 e 指数对水库营养状态进行评价, D 指数表明新丰江水库各季节水质均为中营养; H' 指数表明新丰江水库在 2019 年秋、冬季为中富营养—富营养, 在 2020 年春季和夏季为中营养; e 指数表明新丰江水库在 2019 年秋季和冬季为中营养—中富营养, 在 2020 年春季和夏季为贫营养. 由于调查期间浮游植物鉴定仅到属的水平, 因此 D 、 H' 和 e 指数值可能会相对偏低. 综合各指数评价结果, 新丰江水库整体为中营养水平.

2.7 浮游植物与环境因子的关系

选择浮游植物优势属 ($Y \geq 0.02$, 共 19 种) 和环境因子(9 项) 进行典范对应分析(CCA, 梯度长度 3.2) [5-7]. 结果表明, 两个环境排序轴的相关系数均为 0, Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平

表 5 新丰江水库不同季节浮游植物
生物多样性指数变化

Tab.5 Changes of phytoplankton diversity indexes
in different seasons in Xinfengjiang Reservoir

季节	月份	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>e</i>
秋季	9 月	2.44	1.25	0.34
	10 月	2.58	0.91	0.24
	11 月	3.22	1.34	0.34
冬季	12 月	3.19	1.00	0.25
	1 月	2.50	0.94	0.41
	2 月	2.44	1.52	0.41
春季	3 月	2.07	2.01	0.59
	4 月	2.38	2.52	0.70
	5 月	2.19	2.62	0.75
夏季	6 月	2.54	2.30	0.62
	7 月	2.60	2.60	0.69
	8 月	2.63	2.45	0.65
年度均值		4.12	1.63	0.37

表 6 新丰江水库不同采样点浮游
植物生物多样性指数变化

Tab.6 Changes of phytoplankton diversity indexes
in different sites in Xinfengjiang Reservoir

指数	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
<i>D</i>	3.99	3.85	4.09	4.43	4.01	3.70
<i>H'</i>	1.57	1.42	1.81	1.71	1.64	1.50
<i>e</i>	0.38	0.35	0.44	0.41	0.40	0.37

藻、硅藻与绿藻因种类繁多、分布广泛,能更好地反映水环境特征,被认为是水体营养状态的指标生物类群^[27]. 新丰江水库藻类群落组成中,甲藻、硅藻和绿藻无论是在种类数量还是生物量贡献率方面均占主导地位,而蓝藻门仅在丰度组成方面占优势. 这与抚仙湖^[5]、九寨沟^[28]、丹江口水库^[29]和鹤地水库^[30]等湖泊水库调查结果相似,表明新丰江水库浮游植物种群组成具有一般湖泊的普遍性特征.

水体浮游植物存在明显的季节变化现象已成为基本的共识,但在不同的水体其变化规律则存在显著的差异^[31-33]. 本研究新丰江水库浮游植物丰度 2019 年秋季和冬季以蓝藻贡献占优势,2020 年春季和夏季则以绿藻和硅藻占优势,与陈丽芬、胡韧等^[12,15]对该水库生物群落的研究结果有所不同. 其原因在于 2019 年 6 月新丰江流域出现百年一遇的极端强降雨天气,洪水在几天内大量涌入水库,水位上升近 10 m,库存水量增加近 50%. 洪水不仅为水库带来了大量的营养盐,同时洪水扰动也破坏了水体的稳定分层结构,水库整体水温升高. 在此条件下,对营养盐吸收效率高,光照和温度适应范围广的蓝藻在短时间内快速增殖,在丰度贡献上成为绝对优势,使浮游植物群落结构表现出明显的演替特征,类似现象也出现在受洪水影响的高州水库^[34]. 另外,强降雨过程也会使入库河流的藻类大量涌入主库区,在群落演替过程中会出现类似小球藻、色球藻、蓝隐藻等适宜于富营养化水体的种类短时成为优势类群的现象. 进入 2020 年春季以后,暴雨的影响已大为减弱. 随着营养盐水平和气温下降,绿藻、硅藻逐步取代蓝藻而成为优势类群,同时代表洁净水质的金藻和黄藻也开始出现,水库浮游植物季节演替基本恢复常态. 此后,夏季随着气温升高,蓝藻丰度虽然有所增加,但优势地位仍被绿藻和硅藻占据. 水库藻类群体结构由此转为绿藻-硅藻型,之前的调查结果趋于一致.

($P<0.05$),排序结果可靠^[26]. 第一排序轴和第二排序轴累计解释了75.57%的物种信息量.

由图 7 可知,WT 和 SD 对浮游植物群落结构影响最为显著,其次是 DO 和 EC. 其中,WT 和 EC 与第一排序轴呈正相关,相关系数分别为 0.800 和 0.703;SD 和 DO 与第二排序轴呈正相关,相关系数分别为 0.580 和 0.428. 蓝藻门中尖头藻属、浮鞘丝藻属和硅藻中脆杆藻属与 TP 呈正相关;蓝藻门中色球藻属和绿藻中浮球藻属与 WT 呈正相关;绿藻门中纤维藻属、隐藻中蓝隐藻属和金藻中锥囊藻属与 DO 和 TN 呈正相关;硅藻门中小环藻属和黄藻中葡萄藻属与 SD 具有较大正相关;蓝藻门中微囊藻属和绿藻门中空星藻属与 EC 和 pH 具有较大正相关;其他藻属多数集中在两排序轴中心位置,表明其增殖受多个环境因子的综合影响.

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

调查期间新丰江水库共鉴定出浮游植物 8 门 10 纲 21 目 41 科 89 属 189 种,略高于胡韧等^[12]的调查结果(7 门 99 属 158 种). 其原因一方面在于 2 次调查在范围和周期存在明显差异,另一方面也反映了新丰江水库藻类群落在年际间的动态变化,如此前调查中的粘球藻(*Gloeocapsa* spp.)和蓝纤维藻(*Dactylococcopsis* sp.)等优势种在本次调查中均未检出. 但从丰度和生物量组成的主要贡献类群来看群落结构又存在明显相似性,如主要贡献者为甲藻,其次为绿藻和硅藻,说明新丰江水库藻类群落结构及水体环境处于相对稳定状态. 一般来说甲

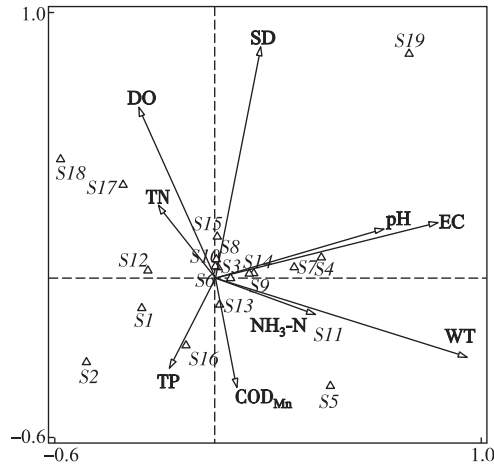


图7 浮游植物与环境因子的 CCA 排序图(蓝藻门:尖头藻属(S1)、浮鞘丝藻属(S2)、隐球藻属(S3)、微囊藻属(S4)、色球藻属(S5)、棒胶藻属(S6);绿藻门:空星藻属(S7)、小球藻属(S8)、卵囊藻属(S9)、四角藻属(S10)、浮球藻属(S11)、纤维藻属(S12)、栅藻属(S13)、并联藻属(S14);硅藻门:小环藻属(S15)、脆杆藻属(S16);隐藻门:蓝隐藻属(S17);金藻门:锥囊藻属(S18);黄藻门:葡萄藻属(S19))

Fig.7 Correlation plots of CCA on the relationship between phytoplankton and environmental factors

3.2 浮游植物群落结构与环境因子的关系

浮游植物群落结构的形成及其变化是环境因子共同作用的结果^[5-7]. 由 CCA 分析结果可知,WT 和 SD 是新丰江水库浮游植物群落结构的主要影响因子,其中 WT 和 SD 的 P 值均为 0.002 ($P < 0.05$).

WT 是控制浮游植物生长繁殖的重要因素,通过调控藻类的同化过程、细胞内酶的活性和代谢速率直接或间接影响浮游植物的群落结构^[35-36]. WT 也是引起水体浮游植物随时间变化的主要因素之一^[37-38]. 一方面通过改变水体分层结构和营养盐扩散影响藻类增殖;另一方面通过直接影响藻细胞酶活性,调控光合作用和呼吸代谢过程来影响藻类的生理作用^[39]. WT 的变化不仅会影响藻类的生长,还会导致藻类的演替^[40]. 因此,新丰江水库浮游植物丰度的变化主要取决于 WT,在温度梯度的驱动作用下,浮游植物丰度结构随 WT 而变化^[41]. 由 CCA 分析可知,蓝藻种类主要集中在第 1、第 2 和第 3 象限,与 WT 呈正相关,表明大部分蓝藻适宜在较高的 WT 条件下生长. 其中,微囊藻属及色球藻属在夏季成为优势种正是这一关联机制的反映. 与此相反,CCA 分析显示蓝隐藻属和锥囊藻属与 WT 呈负相关,表明其更易在相对低温的状态下生长. 二者在春季易成为优势类群,这种现象见于千岛湖^[42]. 绿藻和硅藻种类多数集中在两排序轴中心位置,表明其增殖受多个环境因子的综合影响,同时也表明绿藻和硅藻对新丰江水库水环境具有较强的适应性. 但温度仍然是调控其增殖的重要因素,相关分析(表 7)表明黄藻、硅藻和绿藻与 WT 间呈极显著的正相关关系,相关系数分别为 $r = 0.304$ ($P < 0.01$)、 $r = 0.570$ ($P < 0.01$) 和 $r = 0.642$ ($P < 0.01$),硅藻和绿藻由春季到夏季过程中随着 WT 的上升而迅速增殖成为优势类群. 本次调查中蓝藻丰度与 WT 间的相关关系并不显著($r = -0.109$, $P < 0.5$),其原因在于蓝藻对 WT 的适应范围比较广,其中的不同类群对温度的响应存在差异,使其与 WT 之间的线型关系不够明显. CCA 分析表明,蓝藻的微囊藻属(S4)和色球藻属(S5)与 WT 存在显著的正相关正是这一关系的反映. 与此相似,绿藻的空星藻属(S7)、小球藻属(S8)、卵囊藻属(S9)、浮球藻属(S11)、栅藻属(S13)、并联藻属(S14)、硅藻的小环藻属(S15)和黄藻的葡萄藻属(S19),均与 WT 呈较大的正相关,反映了上述藻属的喜温习性特征,也表明 WT 是调控其增殖的主要因素.

SD 与浮游植物及其分泌物关系密切,是水体中无机或有机悬浮物综合影响的反映,通过 SD 也能够粗略预估水体中浮游植物的量^[43]. 一般地,浮游植物越多,水体 SD 越低^[44]. 该研究中,不同季节 SD 差异并不大,秋季和冬季略低于春季和夏季. 相关分析(表 7)表明绿藻和蓝藻分别与 SD 间呈显著和极显著的负相关关系,相关系数分别为 $r = -0.28$ ($P < 0.05$) 和 $r = -0.613$ ($P < 0.01$);黄藻与 SD 间呈极显著的正相关关系,相

关系数为 $r=0.303(P<0.01)$; 本次调查中硅藻、隐藻和金藻丰度与 SD 间相关关系均不显著, 相关系数分别为 $r=-0.22(P<0.1)$ 、 $r=-0.026(P<1.0)$ 和 $r=-0.086(P<0.5)$. 各藻属中, 蓝藻中尖头藻属(S1)、浮鞘丝藻属(S2)、色球藻属(S5)、绿藻中小球藻属(S8)、卵囊藻属(S9)、四角藻属(S10)、栅藻属(S13)和硅藻中脆杆藻属(S16)与 SD 均呈显著或极显著负相关, 并且二者在季节变化上拟合较好, 表明上述藻属增殖过程会降低水体的 SD.

表 7 新丰江水库浮游植物丰度与环境因子相关性分析

Tab.7 The correlation of phytoplankton abundance with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir

浮游植物	TP	NH ₃ -N	TN	COD _{Mn}	DO	SD	EC	pH	WT
蓝藻门	0.360 **	-0.250 *	-0.168	0.323 **	-0.269 *	-0.613 **	-0.389 **	-0.380 **	-0.109
绿藻门	-0.057	0.409 **	-0.22	0.273 *	-0.341 **	-0.280 *	0.425 **	0.232 *	0.642 **
硅藻门	-0.128	0.307 **	-0.129	0.067	-0.268 *	-0.22	0.450 **	0.318 **	0.570 **
隐藻门	0.086	-0.026	0.257 *	-0.131	0.205	0.026	-0.14	-0.172	-0.271 *
金藻门	-0.123	-0.391 **	0.251 *	-0.089	0.365 **	0.082	-0.465 **	-0.282 *	-0.611 **
黄藻门	-0.264 *	0.306 **	-0.036	-0.011	0.066	0.303 **	0.360 **	0.315 **	0.304 **

3.3 营养状态评价

水体营养状态评价方法一般分为两种: 一是以理化指标为依据的评价, 另一类是以水生生物群落特征为依据的生物学评价^[45-48]. 基于理化指标的综合营养状态指数评价, 新丰江水库为贫营养状态; 基于浮游植物丰度评价, 新丰江水库秋季、冬季和夏季浮游植物的丰度处于贫中营养状态, 春季丰度处于极贫营养状态. 基于浮游植物生物量评价, 新丰江水库各季均处于贫营养状态. 基于生物多样性的 D 、 H' 和 e 指数评价, 新丰江水库为中营养状态. 由此可见, 依据不同的标准, 评价结果存在不一致的现象^[48]. 类似情况也在其他水体出现, 如抚仙湖^[5]、九寨沟长海^[28] 和大溪水库^[47]. 评价结果的差异说明生物学指标受多种因素的影响, 特别是在河流型水库, 其中藻类群落特征的变化不仅取决于库区的环境因素, 还受入库河流输入的影响. 因此, 藻类特征并不仅是库区环境因子的反映, 而应考虑到库区的流域因素. 所以在判断水体营养状况时, 应综合了解水体生物学指标及相应影响因素, 再结合环境因子进行综合分析和比较^[28,49]. 单独采用多样性等生物学评价并不完全适合新丰江水库, 而应该参考水体理化因子与生物评价相结合的评价结果.

4 结论

新丰江水库共鉴定出浮游植物 8 门 10 纲 21 目 41 科 89 属 189 种, 其中绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门和甲藻门为主, 分别为 94、36、33、10 和 9 种; 以优势度 $Y \geq 0.02$ 为标准, 调查期间新丰江水库的浮游植物优势属共有 6 门 19 属, 2019 年秋季和冬季, 优势属以蓝藻门类群为主, 2020 年春季和夏季则以绿藻门和硅藻门类群为主; 浮游植物丰度范围为 $0.33 \times 10^6 \sim 11.78 \times 10^6$ cells/L, 均值为 3.75×10^6 cells/L. 2019 年秋季和冬季浮游植物丰度显著高于 2020 年的春季和夏季. 其中 2019 年夏季出现强降雨天气是造成这一结果的主要原因之一; 新丰江水库浮游植物 D 、 H' 和 e 分别介于 3.7~4.43、1.42~1.81 和 0.35~0.44 之间, 空间差异较小; 相关性分析与 CCA 分析表明, WT 和 SD 是调控新丰江水库浮游植物群落结构的主要环境因子; 以水质和藻类群落特征综合评价, 新丰江水库水质处于贫营养状态.

5 参考文献

[1] Wang YB, Hou ZY, Ye BB *et al.* The characteristics of spatial and temporal variations of phytoplankton in Poyang Lake and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1310-1317. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1052.[王艺兵, 侯泽英, 叶碧碧等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1310-1317.]

[2] Pan H, Yang Y, Tao R *et al.* Simulation of phytoplankton community succession mechanism of water improvement. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(12): 3309-3316. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.12.001.[潘鸿, 杨扬, 陶然等. 水质改善的浮游植物群落演替机制模拟研究. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3309-3316.]

- [3] Gogoi P, Das SK, Das Sarkar S *et al.* Environmental factors driving phytoplankton assemblage pattern and diversity: Insights from Sundarban eco-region, India. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2021, **21**(2): 354-367. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2020.09.005.
- [4] Chai Y, Peng T, Guo K *et al.* Community characteristics of phytoplankton in Lake Changhu and relationships with environmental factors in the summer of 2012. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(8): 857-867. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2014.00080. [柴毅, 彭婷, 郭坤等. 2012 年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 植物生态学报, 2014, **38**(8): 857-867.]
- [5] Ji ZY, Liu SJ. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in the Fuxian lake. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 67-77. [吉正元, 刘绍俊. 抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价. 中国环境监测, 2019, **35**(4): 67-77.]
- [6] Yang MZ, Xia JH, Cai WW *et al.* Seasonal and spatial distributions of Morpho-functional phytoplankton groups and the role of environmental factors in a subtropical river-type reservoir. *Water Science and Technology*, 2020, **82**(11): 2316-2330. DOI: 10.2166/wst.2020.489.
- [7] Chen XJ, Li X, Yang J. The spatial and temporal dynamics of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in Wuliangsu Lake, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, **14**(8): 1-8. DOI: 10.1007/s12517-021-07071-w.
- [8] Liu XM, Chen LW, Zhang GX *et al.* Spatiotemporal dynamics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake. *Water Research*, 2021, **194**: 116910. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116910.
- [9] Jia JJ, Gao Y, Zhou F *et al.* Identifying the main drivers of change of phytoplankton community structure and gross primary productivity in a river-lake system. *Journal of Hydrology*, 2020, **583**: 124633. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124633.
- [10] Sabater-Liesla L, Ginebreda A, Barceló D. Shifts of environmental and phytoplankton variables in a regulated river: A spatial-driven analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 968-978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.096.
- [11] Reeder BC. Primary productivity limitations in relatively low alkalinity, high phosphorus, oligotrophic Kentucky reservoirs. *Ecological Engineering*, 2017, **108**: 477-481. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.009.
- [12] Hu R, Lei LM, Han BP. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang Reservoir in Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(10): 4652-4664. [胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例. 生态学报, 2008, **28**(10): 4652-4664.]
- [13] Li RM, Gan YP. Environmental problems and countermeasures of the green lake scenic spot in Heyuan. *Journal of Guangxi Teachers Education University: Natural Science Edition*, 2016, **33**(2): 94-100. [李日曼, 甘永萍. 河源市万绿湖旅游景区开发中的环境问题及对策分析. 广西师范学院学报: 自然科学版, 2016, **33**(2): 94-100.]
- [14] Wang ZH, Lin QQ, Hu R *et al.* Pollution by blue-green algae (Cyanophyta) in reservoirs of Guangdong Province and water quality evaluation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, **12**(2): 117-123. [王朝晖, 林秋奇, 胡韧等. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. 热带亚热带植物学报, 2004, **12**(2): 117-123.]
- [15] Chen LF, Lin QQ, Hu R *et al.* Plankton community in a subtropical large reservoir (Xinfengjiang Reservoir). *Ecologic Science*, 2002, **21**(2): 104-107. [陈丽芬, 林秋奇, 胡韧等. 亚热带大型水库——新丰江水库的浮游生物群落特征. 生态科学, 2002, **21**(2): 104-107.]
- [16] Department of Ecology in Ministry of Environmental Protection ed. China technical regulations for aquatic species resources survey (Trial). Beijing: Ministry of Environmental Protection of PRC, 2010. [环境保护部生态司. 全国淡水生物物种资源调查技术规定(试行). 北京: 环境保护部, 2010.]
- [17] Zhang ZS, Huang XF eds. Freshwater plankton research method. Beijing: Science Press, 1991. [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [18] Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschtel D *et al.* Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(2): 403-424. DOI: 10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
- [19] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [20] Department of Environmental Monitoring in Ministry of Environmental Protection ed. Operation instruction of monitoring task for national surface water environmental quality monitoring network (Trial). Beijing: China Environment Press, 2017. [环境保护部环境监测司. 国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书(试行). 北京: 中国环境出版

- 社, 2017.]
- [21] Pan H, Tang YH. Comparison of eutrophication evaluation by phytoplankton indexes in a shallow aquatic vegetation lake. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, **22**(Z1): 67-69, 110. [潘鸿, 唐宇宏. 草型浅水湖泊富营养化评价的浮游植物指标比较. 安徽农学通报, 2016, **22**(Z1): 67-69, 110.]
- [22] Guo K, Yang DG, Peng T *et al.* Ecological niche analysis of dominant species of phytoplankton in Lake Changhu, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 825-834. DOI: 10.18307/2016.0416. [郭坤, 杨德国, 彭婷婷等. 湖北省长湖浮游植物优势种生态位分析. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 825-834.]
- [23] Kuang QJ, Ma PM, Hu ZY *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *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. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.]
- [24] Wang ZH, Han BP, Hu R *et al.* Phytoplankton community structure and eutrophication of reservoirs in Guangdong Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(4): 402-405, 409. [王朝晖, 韩博平, 胡韧等. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究. 生态学杂志, 2005, **24**(4): 402-405, 409.]
- [25] General Office of the Ministry of Environmental Protection ed. Evaluation measures for environmental quality of surface water (Trial). Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2011. [环境保护部办公厅. 地表水环境质量评价办法(试行). 北京: 环境保护部, 2011.]
- [26] Ter Braak, Prentice IC. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 2004, **34**: 235-282. DOI: 10.1016/S0065-2504(03)34003-6.
- [27] Pan H, Tang YH. Pollution indicator species and evaluation of water quality in Caohai Lake, Weining. *Wetland Science*, 2016, **14**(2): 230-234. [潘鸿, 唐宇宏. 威宁草海浮游植物污染指示种及水质评价. 湿地科学, 2016, **14**(2): 230-234.]
- [28] Xing BW, Xu JX, Cao Y *et al.* Phytoplankton community structure and ecological evaluation in summer, Lake Changhai of Jiuzhaigou National Nature Reserve. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 1088-1099. DOI: 10.18307/2020.0417. [邢冰伟, 徐季雄, 曹玥等. 九寨沟国家级自然保护区长海夏季浮游植物群落结构及生态评价. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1088-1099.]
- [29] 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.]
- [30] Zou HJ, Hu R, Han BP. Structure and dynamics of phytoplankton community in Hedi reservoir, South China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, **18**(2): 196-202. [邹红菊, 胡韧, 韩博平. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态. 热带亚热带植物学报, 2010, **18**(2): 196-202.]
- [31] Kalf J ed. Translated by Gu BH, Liu ZW, Li KY *et al.* Limnology: Inland water ecosystems. Beijing: Higher Education Press, 2011: 367-418. [Kalf J 编. 古滨河, 刘正文, 李宽意等译. 湖沼学: 内陆水生态系统. 北京: 高等教育出版社, 2011: 367-418.]
- [32] Jiang YJ, He W, Liu WX *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.01.006.
- [33] Muñiz O, Rodríguez JG, Revilla M *et al.* Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotrophic area of the European Atlantic Coast (southeastern Bay of Biscay). *Regional Studies in Marine Science*, 2018, **17**: 59-72. DOI: 10.1016/j.rsma.2017.11.011.
- [34] Chen XK, Guo YH, Feng Y *et al.* Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: A case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 137-146. DOI: 10.18307/2014.0117. [陈修康, 郭跃华, 冯喻等. 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 137-146.]
- [35] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ *et al.* Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 385-393. DOI: 10.18307/2018.0210. [赵巧华, 孙国栋, 王健健等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 385-393.]
- [36] Su XM, Steinman AD, Xue QJ *et al.* Temporal patterns of Phyto- and bacterioplankton and their relationships with environ-

- mental factors in Lake Taihu, China. *Chemosphere*, 2017, **184**: 299-308. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.003.
- [37] Li Y, Xiao LJ, Lin QQ *et al.* Phytoplankton community in a newly constructed reservoir—Jiantan Reservoir, South China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 227-234. DOI: 10.18307/2010.0212.[李莹, 肖利娟, 林秋奇等. 一座新建水库——广东剑潭水库浮游植物动态特征. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 227-234.]
- [38] Li CC, Feng WY, Chen HY *et al.* Temporal variation in zooplankton and phytoplankton community species composition and the affecting factors in Lake Taihu—a large freshwater lake in China. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 1050-1057. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.11.007.
- [39] Zhou YF, Song JT, Liu K *et al.* Study on the relation between phytoplankton community structure and aquatic environment factors in Huaihong River. *Ecological Science*, 2017, **36**(1): 35-42.[周彦锋, 宋江腾, 刘凯等. 怀洪新河浮游植物群落结构与水环境因子的关系研究. 生态科学, 2017, **36**(1): 35-42.]
- [40] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 45-50.[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.]
- [41] Kosten S, Huszar VLM, Bécares E *et al.* Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Global Change Biology*, 2012, **18**(1): 118-126. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02488.x.
- [42] 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.[宣文怡, 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.]
- [43] Xu XH, Chen C, Ning AL *et al.* Relations between the phytoplankton quantity and environment factors in Aha Reservoir. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(10): 6106-6109.[徐兴华, 陈椽, 宁爱丽等. 阿哈水库浮游植物数量与环境因子的关系. 安徽农业科学, 2012, **40**(10): 6106-6109.]
- [44] Tian ZQ, Tian BH, Xin LH *et al.* Relationship between structure of phytoplankton community and water quality factors in Yuqiao Reservoir in autumn. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(5): 64-68.[田志强, 田秉晖, 辛丽花等. 于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系. 环境污染与防治, 2011, **33**(5): 64-68.]
- [45] Wang Q, Huang W, Chen KN *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Reservoir Daxi. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1286-1297. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0497.[汪琪, 黄蔚, 陈开宁等. 大溪水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1286-1297.]
- [46] Zhang JF, Feng J, Xie SL *et al.* Characteristics of phytoplankton community structures in Ningwu subalpine lakes, Shanxi Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 117-122. DOI: 10.18307/2012.0116.[张俊芳, 冯佳, 谢树莲等. 山西北部亚高山湖群浮游植物群落结构特征. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 117-122.]
- [47] Chen LL, Zou H, Zhuang Y *et al.* Phytoplankton community characteristics and ecological assessment of water quality in Xiaoxi port. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 1016-1023.[陈琳荔, 邹华, 庄严等. 小溪港浮游植物群落特征及水质评价. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 1016-1023.]
- [48] Qin JJ, Wang Y. Application and evaluation of phytoplankton diversity indexes. *Journal of Shenyang Normal University: Natural Science Edition*, 2014, **32**(4): 502-505.[秦娇娇, 王艳. 浮游植物多样性指数的应用及评价. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2014, **32**(4): 502-505.]
- [49] Sun JL, Dong ZQ, Qu LY *et al.* Preliminary investigation and index evaluation of phytoplankton in Wanfeng Lake in Guizhou Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(23): 10096-10097.[孙嘉龙, 董泽琴, 瞿丽雅等. 贵州万峰湖浮游植物的调查及其指数评价. 安徽农业科学, 2008, **36**(23): 10096-10097.]