

新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系

张 辉¹, 彭宇琼¹, 邹贤妮¹, 张婷婷¹, 巫 楚¹, 林小平¹, 乔永民^{2*}, 杨洪允² (1. 广东省河源生态环境监测站, 广东 河源 517000; 2. 暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632)

摘要: 为了了解新丰江水库的浮游植物功能群(Functional Group)特征及生态现状, 2020~2021 年逐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调查分析。结果表明, 水库主要水质指标达到国家《地表水环境质量标准》I 类标准。水库浮游植物可分为 25 个功能群, 以 A、D、E、F、J、K、L₀、M、MP、NA、P、S1、SN、TB、X1、X2、X3 和 Y 功能群出现频率较高, 其中 A、E、F、J、L₀、MP、NA、X3 和 Y 为优势功能群, 其时间变化特征为 L₀/A/E/Y(春季)→L₀/A/F/J/X3/NA(夏季)→L₀/NA/F/A(秋季)→L₀/E/MP/F/A(冬季)。与水库低营养盐状态相适应, A、E、L₀、NA 和 X3 等在浮游植物群落中呈主体优势。由浮游植物功能群与环境因子间的相关分析和冗余分析(RDA)结果表明, pH 值、透明度和水温是影响新丰江水库浮游植物群落结构的关键环境因子。基于浮游植物功能群计算的生态指数(Q), 时间上月度生态指数值介于 3.63~4.87 之间, 均值为 4.31, 表明新丰江水库生态状态总体为极好水平。

关键词: 新丰江水库; 浮游植物; 功能群; 时空变化; 环境因子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)01-0380-13

Characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir. ZHANG Hui¹, PENG Yu-qiong¹, ZOU Xian-ni¹, ZHANG Ting-ting¹, WU Chu¹, LIN Xiao-ping¹, QIAO Yong-min^{2*}, YANG Hong-yun² (Heyuan Sub-branch of Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Heyuan 517000, China; Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China). *China Environmental Science*, 2022,42(1): 380~392

Abstract: To understand the structural characteristics of the phytoplankton functional groups (FGs) and the ecological status of Xinfengjiang reservoir, the structure of phytoplankton and physicochemical indexes of water were investigated and analyzed monthly from 2020 to 2021. The results showed that the major water quality indexes of Xinfengjiang reservoir met I class standard of "Surface Water Environmental Quality Standard" (GB3838-2002). There were 25 identified phytoplankton functional groups. Among them, FGs A, D, E, F, J, K, L₀, M, MP, NA, P, S1, SN, TB, X1, X2, X3 and Y occurred frequently, and the dominant functional groups were A, E, F, J, L₀, MP, NA, X3 and Y. The main temporal changes characteristics of phytoplankton FGs occurred for L₀/A/E/Y in spring, for L₀/A/F/J/X3/NA in summer, for L₀/NA/F/A in autumn, and for L₀/E/MP/F/A in winter. The main dominant FGs were A, E, L₀, NA and X3, resulting from the oligotrophic factors of the reservoir. Correlation and Multivariate analysis (RDA) between phytoplankton abundance and environmental factors showed that pH, transparency and water temperature were the key factors affecting phytoplankton functional groups in Xinfengjiang Reservoir. The ecological state of Xinfengjiang reservoir is considered as in excellent level, as shown by its Q value with a range of 3.63~4.87.

Key words: Xinfengjiang reservoir; phytoplankton; functional groups; temporal and spatio-temporal variation; environmental factor

在水生态系统研究中浮游植物常被用作评估水域健康状况的指示性生物类群^[1-2]。基于传统形态分类的水体浮游植物特征研究方法^[3], 难以体现水体浮游植物群落的生态功能特征, 在反映水体环境状态方面存在较大的局限性^[4-5]。Reynolds 等^[6-7]提出了将具有相似适应性特征且易在类似生境下共存的藻类归类分组成藻类功能群的理论, 并提出浮游植物功能群概念和划分依据。后经 Padisák 等^[8]不断补充和完善, 至今共描述了 39 种藻类功能群及其识别特征和代表种^[4]。各功能群可以反映特定的生境类型, 具有形态、生理、生态特征相似、有相同或相近

的生长策略或生态位^[4,7-8]。因此, 基于浮游植物功能群概念, Padisák 等^[9]提出了生态指数(Q)以评估水体生态状态, 并得到了广泛应用^[9-16]。目前, 浮游植物功能群理论已被广泛应用于生态学研究和水体的环境质量评价^[17-21]。国内相关报道主要见于对长湖水库^[15]、乌江河^[16]、洱海^[21]、淀山湖^[22]、三板溪水库^[23]、南湖^[24]、洞庭湖^[25]、阿哈水库^[26]、紫坪

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家重大科技专项(2013ZX07105-005-02); 河源市社会发展科技计划(201103101472576)

* 责任作者, 副教授, qym77@163.com

铺水库^[27]、穆棱河^[28]、阳澄西湖^[29]、周村水库^[30]等不同类型水体的浮游植物功能群和水质评价的研究。

新丰江水库始建于 1958 年,是华南地区第一大水库^[31]。作为东江水资源和珠江三角洲饮用水源的核心调节枢纽,对大湾区的社会经济发展起着至关重要的基础支撑作用^[32]。进入 21 世纪后,受气候变暖和人为作用等因素影响,水库出现了偶发营养盐含量超标和藻类异常增殖等现象,对水库的科学管理和正常运营带来了困扰。因此,深入研究新丰江水库浮游植物结构特征,从功能群角度认识其变化规律以及与环境因子的关系,对水库的水质保护和保障粤港澳大湾区供水安全具有重要意义。到目前为止,新丰江水库浮游植物功能群结构和演替不明,与环境因子之间关系尚不清楚,相关报道仅见于王雅文等^[33]对水库生态分区的初步探讨,不足以支撑水库科学管理的基本需要。本研究基于 2020 年 3 月~2021 年 2 月间新丰江水库每月的浮游植物和水质监测数据,结合浮游植物功能群(FG)归类方法,划分新丰江水库浮游植物功能群,探究浮游植物功能群组成和时间演替特征;采用生态指数(Q)评估其水质状况,通过典型关联分析方法对浮游植物功能群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,以期水库生态学研究提供理论依据,为水库的科学管理和可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

新丰江水库位于广东省河源市东源县,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,库区属南亚热带季风气候,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℃^[31]。

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》^[34]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 2020 年 3 月~2021 年 2 月,以 1 次/月的频次进行样品采集,同步采集藻类和水质混合样。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 值,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 a(Chl-a)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)》^[35]。

浮游植物定性和定量样品采集方法、定量样品计数和生物量计算方法参照《淡水浮游生物研究方法》等^[36-37],浮游植物鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[38]。利用光学显微镜进行物种鉴定与计数。

表 1 采样点位

Table 1 Latitude-longitude and depth of sampling sites

点位	经度	纬度	平均水深(m)
Z01	114°38'10.21"	23°43'59.04"	47.9
Z02	114°37'10.47"	23°44'34.11"	69.9
Z03	114°33'55.33"	23°46'22.01"	26.4
Z04	114°34'23.98"	23°47'22.06"	54.9
Z05	114°28'35.08"	23°45'36.50"	44.5
Z06	114°31'44.24"	23°52'12.50"	43.7

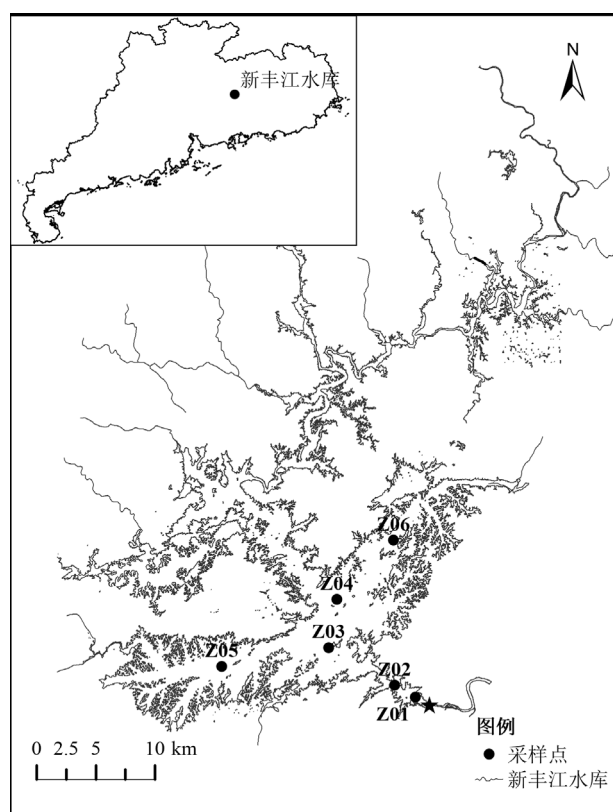


图 1 采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

1.3 优势功能群及生态指数

以相对生物量大于 5%的功能群为优势功能

群^[39],相对生物量大于 50%的功能群为绝对优势功能群.生态指数(Q)计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \cdot F_i \right) \tag{1}$$

式中: n 为浮游植物功能群的数量; N 为浮游植物的总生物量; n_i 为第 i 个功能群的生物量; F_i 为第 i 个功能群的赋值. Q 指数 0~5 分别表示:0~1 差,1~2 耐受,2~3 中等,3~4 好,4~5 极好^[4,8].

1.4 综合营养状态指数

以 SD、TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl-a 为参数,采用综合营养状态指数法 TLI(Σ) 对新丰江水库水体营养状态进行评价^[11].公式为

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \tag{2}$$

式中:TLI(Σ) 为综合营养状态指数;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(Σ) <30 时为贫营养;30≤ TLI(Σ) ≤50 时为中营养;TLI(Σ) >50 时为富营养.

1.5 数据处理

以 Excel2019、SPSS22.0、Canoco5.0 软件进行数据处理和统计学分析;以 Origin pro8.0、ArcGIS10.6 软件绘制统计图.

2 结果与分析

2.1 水环境因子

表 2 新丰江水库水环境因子

Table 2 Environmental factors of water in Xinfengjiang reservoir

指标	范围	均值
WT(℃)	17.9~32.8	25.4
DO(mg/L)	7.0~9.0	8.0
SD(m)	3.0~6.8	4.2
EC(μS/cm)	62.9~90.0	77.1
pH 值	6.8~8.5	7.6
TN(mg/L)	0.40~0.62	0.49
TP(mg/L)	0.001~0.009	0.003
NH ₃ -N(mg/L)	0.005~0.068	0.025
COD _{Mn} (mg/L)	0.6~2.5	1.5
Chl-a(mg/L)	0.0004~0.0033	0.0014

如表 2 所示,研究期间水库水温范围为 17.9~32.8℃,平均值为 25.4℃,其中以 2020 年 7 月和 8 月水温最高,为 32℃,12 月最低,为 18.8℃.水体中溶解氧浓度范围为 7.0~9.0mg/L,均值 8.0mg/L;透明度值

范围为 3.0~ 6.8m,均值 4.2m;电导率值范围为 62.9~90.0μS/cm,均值 77.1μS/cm; pH 值范围为 6.8~8.5,均值 7.6,水体总体呈弱碱性;总氮浓度范围为 0.40~0.62mg/L,均值 0.49mg/L;总磷浓度范围为 0.001~0.009mg/L,均值 0.003mg/L;氨氮浓度为 0.005~0.068mg/L,均值 0.025mg/L;高锰酸盐指数浓度为 0.6~2.5mg/L,均值 1.5mg/L;叶绿率 a 浓度范围为 0.0004~ 0.0033mg/L,均值 0.0014mg/L.研究期间除总氮外,新丰江水库水体总磷、氨氮、高锰酸盐指数和溶解氧等指标浓度均值均满足国家《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[40]I 类水质要求.

2.2 浮游植物群落结构特征

本次调查共鉴定出浮游植物 8 门 10 纲 22 目 40 科 91 属 201 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 103, 36, 32, 13, 9 种,分别占总种数的 51.2%、17.9%、15.9%、6.5%和 4.5%;隐藻门和金藻门各有 3 种和 4 种,分别占总种类数的 1.5%和 2%;黄藻门则仅有 1 种,仅占总种类数的 0.5%.

表 3 浮游植物组成

Table 3 Phytoplankton Composition

门	纲	目	科	属	种
蓝藻门	1	3	8	21	36
绿藻门	2	6	14	41	103
硅藻门	2	7	9	14	32
裸藻门	1	1	1	4	13
隐藻门	1	1	1	2	3
甲藻门	1	1	3	5	9
金藻门	1	2	3	3	4
黄藻门	1	1	1	1	1
合计	10	22	40	91	201

水库浮游植物月丰度介于 0.12×10⁶~2.24×10⁶cells/L,平均丰度 1.01×10⁶cells/L.丰度组成以蓝藻、绿藻和硅藻为主(图 2),其中冬季和春季硅藻在丰度贡献中优势明显占比最高达 52.3%(2021 年 1 月),夏季和秋季绿藻对丰度的贡献最大,占比达 65.3%(2020 年 11 月).从空间上看(图 3),水库各调查点位浮游植物丰度范围为 0.79×10⁶~1.12×10⁶cells/L,丰度在整体上呈现为库中心区域高,库湾区低的特点.其中最高值出现在水库中心敞水区 Z03 点位,最低值则出现在库湾 Z05 点位.从丰

度组成类群来看,蓝藻、绿藻和硅藻在各点位对丰度的贡献率基本一致。

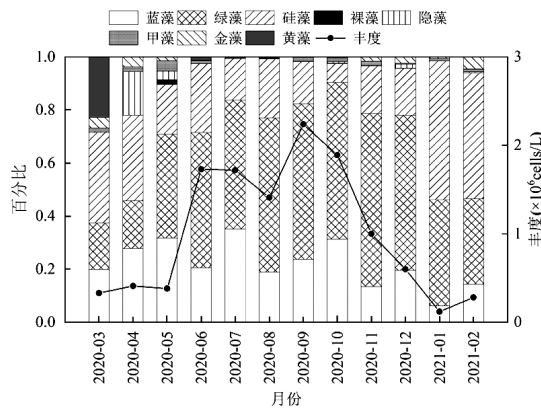


图2 浮游植物丰度和各门相对丰度时间分布

Fig.2 The temporal distribution of phytoplankton abundance and the percentage of different phylum

春季(3月、4月、5月);夏季(6月、7月、8月);秋季(9月、10月、11月);
冬季(12月、1月、2月), 下同

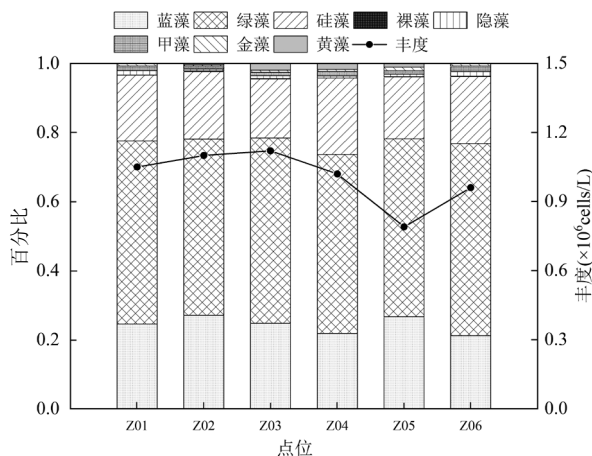


图3 浮游植物各门相对丰度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of phytoplankton abundance and the percentage of different phylum

水库浮游植物月生物量介于 0.08~1.15mg/L,平均值为 0.71mg/L.其中以秋季 2020 年 9 月份生物量最高,最低值则出现在 2021 年冬季 1 月份,季节变化明显.生物量贡献以甲藻和绿藻为主(图 4),其次为金藻和硅藻.其中冬季和春季以甲藻和硅藻为主,对生物量贡献率最高分别达 76%(2020 年 3 月)和 34.2%(2020 年 4 月);夏季和秋季以绿藻为主,对生物量的贡献率可达 60.6%(2020 年 10 月).从空间上来看(图 5),水库浮游植物在各点位的生物量范围为 0.49~1.03mg/L,其空间分布与丰度一致.从整体来看,

生物量以甲藻和绿藻贡献为主,其次为硅藻和金藻.其中,Z03 点位甲藻贡献率可达 53.8%,Z02 点位绿藻的贡献率最高为 39.3%.

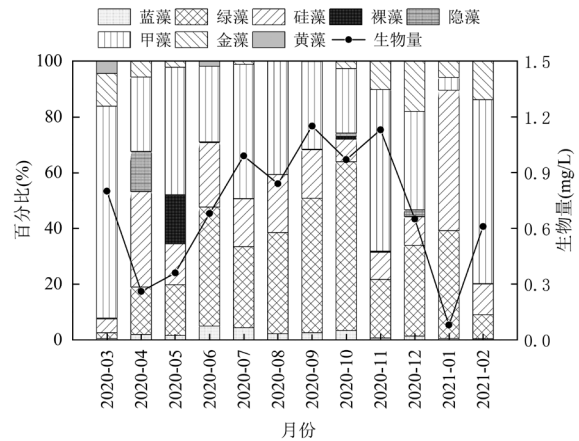


图4 浮游植物各门相对生物量时间分布

Fig.4 The temporal distribution of phytoplankton biomass and the percentage of different phylum

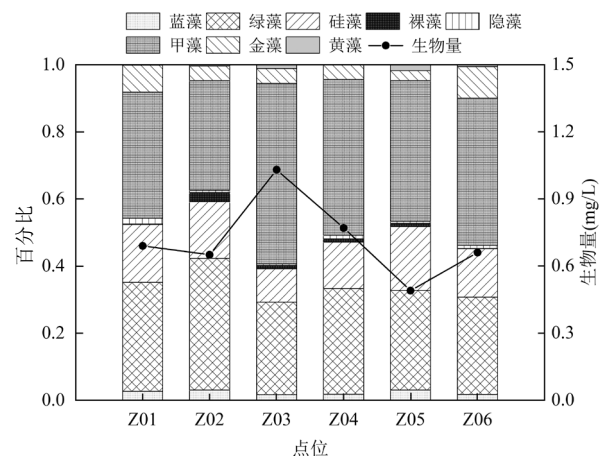


图5 浮游植物各门相对生物量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of phytoplankton biomass and the percentage of different phylum

2.3 浮游植物功能群划分

根据 FG 功能群分类方法可将新丰江水库浮游植物分为 25 个功能群,分别为 A、D、E、F、G、H1、J、K、L₀、M、MP、N、NA、P、S1、S2、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y.其中功能群 A、D、E、F、J、K、L₀、M、MP、NA、P、S1、SN、TB、X1、X2、X3、Y 的出现频率均大于 50%,为常见功能群;功能群 N、W1、W2 的出现频率在 20%~50%之间,仅在适宜的生态环境中出现;功能群 G、H1、S2 和 T 的出现频率较低,为新丰江水

库的偶见或罕见功能群.新丰江水库各浮游植物功能群的代表性藻属见表 4.

表 4 新丰江水库浮游植物功能群分组
Table 4 Phytoplankton functional groups in Xinfengjiang reservior

功能群 代码	代表属	耐受性	敏感性	生境(环境描述)	出现频 率(%)	F 值
A	小环藻属(<i>Cyclotella</i> Kützing ex Brébisson)	低营养	pH 值升高	贫营养、洁净、深水	100	5
D	针杆藻属(<i>Synedra</i> Ehrenberg)	冲刷	营养缺乏	含有营养盐、浑浊	92	2
E	锥囊藻属(<i>Dinobryon</i> Ehrenberg)	低营养	二氧化碳缺乏	贫营养或异营养、小型水体、浅水	75	5
F	并联藻属(<i>Quadrigula</i> Printz)、卵囊藻属(<i>Oocystis</i> Nägeli)、肾形藻属(<i>Nephrocytium</i> Nägeli)、浮球藻属(<i>Planktosphaeria</i> G. M. Smith)、葡萄藻属(<i>B. braunii</i> Kütz)、胶球藻(<i>Coccomyxa</i> Schmidle)、四孢藻(<i>Tetraspora</i> Link)、球囊藻属(<i>Sphaerocystis</i> Chodat)、月牙藻属(<i>Selenastrum</i> Reinsch)、蹄形藻属(<i>Kirchneriella</i> Schmidle)	低营养、高浑浊	二氧化碳缺乏	中到富营养、洁净、混合强	67	3
G	实球藻属(<i>Pandorina</i> Bory)	高光照	营养盐缺乏	富营养、停滞水体	17	0
H1	鱼腥藻属(<i>Anabaena</i> Bory)、束丝藻属(<i>Aphanizomenon</i> Morr.)	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照、低含磷量	富营养、分层、含氮低、浅水	8	0
J	多芒藻属(<i>Golenkinia</i> Chodat)、顶棘藻属(<i>Chodatella</i> Lemmermann)、四角藻属(<i>Tetraedron</i> Kützing)、栅藻属(<i>Scenedesmus</i> Meyen)、十字藻属(<i>Crucigenia</i> Morren)、空星藻属(<i>Coelastrum</i> Nägeli)		高光照	高营养、混合、浅水	100	1
K	棒胶藻属(<i>Rhabdogloea</i> Schröder)、隐球藻属(<i>Aphanocapsa</i> Næg)		水体高度混合	富营养的浅水	100	2
L _o	集胞藻属(<i>Synechocystis</i> Sauvageau)、色球藻属(<i>Chroococcus</i> Næg.)、多甲藻属(<i>Peridinium</i> Ehr.)、拟多甲藻属(<i>Peridiniopsis</i> Lemmermann)、角甲藻属(<i>Ceratium</i> Schrank)、腔球藻属(<i>Coelosphaerium</i> Næg)、Coelomonon 属(<i>Coelomonon</i> microcystoides)	营养分层	长时间或深层的混合	贫到富营养、中到到大型水体、可深可浅	100	5
M	微囊藻属(<i>Microcystis</i> Kütz.)	暴晒	冲刷作用、低光照	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高	58	0
MP	绿球藻属(<i>Chlorococcum</i> Meneghini)、克里藻属(<i>Klebsormidium</i> Silva)	混合搅动		经常性搅动、浑浊、浅水	92	3
N	辐射鼓藻属(<i>Actinotaenium</i> (Nägeli) Teiling)	低营养	水体分层、pH 值升高	持续或半持续的的混合水层	42	2
NA	鼓藻属(<i>Cosmarium</i> Corda ex Ralfs)、角星鼓藻属(<i>Staurostrum</i> Meyen)、顶接鼓藻属(<i>Spondylosium</i> Brébisson ex Kützing)		水体混合	贫到中营养、静水、低纬度地区	100	5
P	脆杆藻属(<i>Fragilaria</i> Lyngbye)、直链藻属(<i>Melosira</i> Agardh)	中程度的低光照和低碳含量	水体分层分层、硅元素缺乏	持续或半持续的混合水层	100	5
S1	浮鞘丝藻属(<i>Planktolingbya</i> Anagn. Et Kom.)、柯孟藻属(<i>Komvophoron</i> K. Anagnostidis et J. Komarek)、贾丝藻属(<i>Jaaginema</i> Anag. et Kom.)	极低的光照	冲刷作用	混合浑浊、透明度低	83	0
S2	螺旋藻属(<i>Spirulina</i> Turp.)	低光照	冲刷作用	温暖、高碱性、浅水	8	2
SN	尖头藻属(<i>Raphidiopsis</i> Fritsch et Rich.)、拟柱孢藻属(<i>Cylindrospermopsis</i> Komarek)	低光照、低营养	冲刷作用	温暖、混合	83	0
T	转板藻属(<i>Mougeotia</i>)	低光照	营养缺乏	持续混合水层	8	4
TB	曲壳藻属(<i>Achnanthes</i> Bory)、舟形藻属(<i>Navicula</i> Bory)、桥弯藻属(<i>Cymbella</i> Agardh)	冲刷		强急流	100	2
W1	裸藻属(<i>Euglena</i> Ehrenberg)	高生化需氧量	牧食作用	有机污染、浅水	42	2
W2	囊裸藻属(<i>Trachelomonas</i> Ehrenberg)			中营养、浅水	25	1
X1	单针藻属(<i>Monoraphidium</i> Komarkova-Legnerova)、纤维藻属(<i>Ankistrodesmus</i> Corda)	分层	营养缺乏、滤食作用	超富营养、浅水	100	3
X2	蓝隐藻属(<i>Chroomonas</i> Hangsg.)	分层	水体混合、滤食作用	中到富营养、浅水	75	3
X3	小球藻属(<i>Chlorella</i> Beijerinck)	恶劣环境条件	水体混合、牧食作用	贫营养、混合、浅水	100	5
Y	隐藻属(<i>Cryptomonas</i> Ehrenberg)、薄甲藻属(<i>Glenodinium</i> (Ehr.) Stein)、裸甲藻(<i>Gymnodinium</i> Stein)	低光照	吞噬作用	静水环境	75	3

2.4 浮游植物功能群演替与时空分布特征

将相对生物量大于 5%的浮游植物功能群定义

为该时期的优势功能群,大于 50%为绝对优势功能群.根据调查期间的浮游植物功能群相对生物量可知(图 6),浮游植物优势功能群随时间变化表现为 L_0+E (3 月) $\rightarrow A+Y+L_0+G+E$ (4 月) $\rightarrow L_0+W1+A+Y+J+T$ (5 月) $\rightarrow L_0+J+A+F+X3$ (6 月) $\rightarrow L_0+A+F+J+X3$ (7 月) $\rightarrow L_0+A+F+NA+X3+J$ (8 月) $\rightarrow L_0+NA+F+A+Y+X3$ (9 月) $\rightarrow NA+L_0+F+A+J$ (10 月) $\rightarrow L_0+F+E+A$ (11 月) $\rightarrow L_0+E+MP+F+A$ (12 月) $\rightarrow A+MP+P+X3+E$ (1 月) $\rightarrow L_0+E+MP$ (2 月).2020 年 3 月功能群 L_0 和 E 为主要优势,且 L_0 是绝对优势功能群,相对生物量贡献达 75.9%.4 月功能群 A 和 Y 快速上升,成为主要优势,

贡献比分别为 30.5%和 21.2%.5~9 月功能群 L_0 重新成为主要优势,贡献最高达 49.6%(7 月),功能群 $W1$ 和 A 在 5 月为亚优势,而 6 月亚优势功能群演替为 J 和 A ,7 月和 8 月亚优势功能群演替为 A 和 F ,9 月亚优势功能群演替为 NA 和 F .10 月功能群 NA 成为主要优势,贡献达 32.3%,亚优势功能群为 L_0 和 F .11~12 月功能群 L_0 快速上升,成为主要优势,贡献最高达 57.3%(11 月).2021 年 1 月功能群 A 、 MP 和 P 快速上升,功能群 A 成为主要优势,贡献达 32.0%.2021 年 2 月功能群 L_0 再次快速上升为绝对优势功能群,贡献达 72.5%.

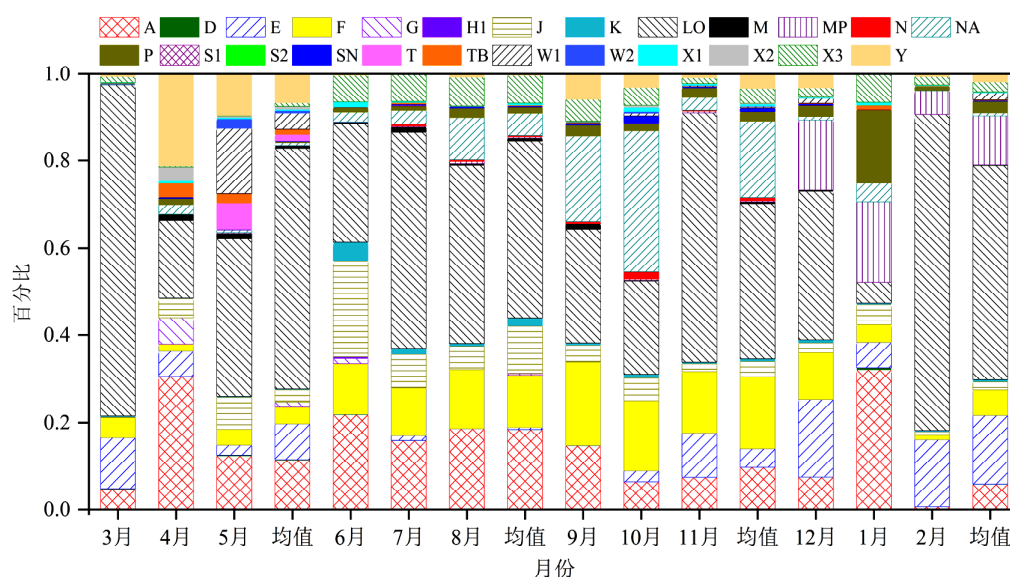


图 6 浮游植物功能群相对生物量时间分布

Fig.6 The temporal distribution of relative biomass for phytoplankton functional groups

均值为季节均值

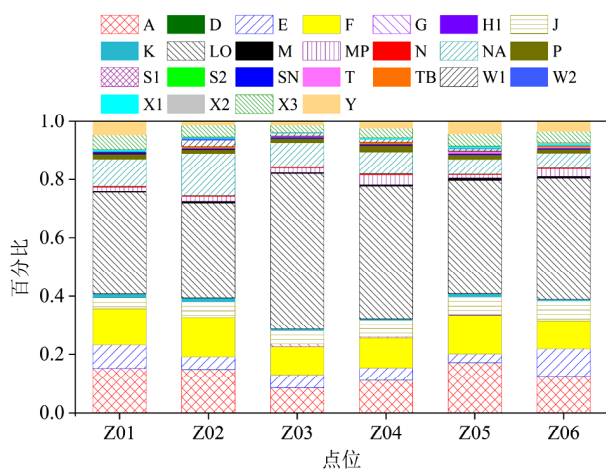


图 7 浮游植物功能群相对生物量空间分布

Fig.7 The spatial distribution of relative biomass for phytoplankton functional groups

浮游植物功能群季节变化表现为 $L_0+A+E+Y$ (春季) $\rightarrow L_0+A+F+J+X3+NA$ (夏季) $\rightarrow L_0+NA+F+A$ (秋季) $\rightarrow L_0+E+MP+F+A$ (冬季),功能群 L_0 和 A 是各季度常见优势功能群,其中功能群 A 主要代表性藻属为硅藻中小环藻,功能群 L_0 主要代表性藻属为甲藻中多甲藻和角甲藻.功能群 Y 是春季特有功能群,主要代表藻属为甲藻中薄甲藻.功能群 E 是春季和冬季特有功能群,主要代表藻属为金藻中锥囊藻.功能群 J 和 $X3$ 是夏季特有功能群,功能群 J 主要代表藻属为绿藻中栅藻和空星藻,功能群 $X3$ 主要代表藻属为绿藻中小球藻.功能群 NA 是夏季和秋季特有功能群,主要代表性藻属为绿藻中角星鼓藻.功能群 MP 是冬季特有功能群,主要代表性藻属为绿藻

中克里藻。

根据调查期间各点位的浮游植物功能群相对生物量可知(图 7),空间上,功能群 L₀、A、F、NA、E 和 J 成为优势功能群.功能群 L₀是各点位的主要优势类群,且在库区中心(Z03)成为绝对优势,贡献介于 32.6%~53.1%,主要代表性藻属为甲藻中角甲藻.功能群 A、F 和 NA 是各点位的亚优势类群,各点位贡献差别较小,贡献最高分别为 17.2%(Z05)、13.6%(Z02)和 14.4%(Z02),主要代表性藻属分别为硅藻中小环藻、绿藻中并联藻和角星鼓藻.功能群 E 在 Z01 和 Z06 形成微弱优势,贡献最高为 9.4%(Z06),主要代

表性藻属为金藻中锥囊藻.功能群 J 在 Z02、Z04、Z05 和 Z06 形成微弱优势,贡献最高为 6.8%,主要代表藻属为绿藻中栅藻和空星藻。

2.5 基于浮游植物功能群的水质评价

基于浮游植物功能群的生态指数(Q)值对新丰江水库的水质进行评价.时间上月度 Q 值介于 3.63~4.87 之间(表 5),均值为 4.31,说明时间上新丰江水库整体处于极好状态,仅在雨季初期的 4、5、6 月份,Q 值相对偏低,水库处于好的级别.从各点位来看,Q 值介于 4.22~4.41 之间(表 6),表明新丰江水库处于极好状态,各调查点位生态环境无显著性差异。

表 5 生态指数(Q)月度值及生态状态
Table 5 The ecological state with monthly index value (Q)

项目	2020										2021		均值
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	
Q 值	4.87	3.80	3.68	3.63	4.32	4.42	4.22	4.17	4.57	4.21	4.3	4.81	4.31
生态状态	极好	好	好	好	极好	极好	极好	极好	极好	极好	极好	极好	极好

表 6 生态指数(Q)点位值及生态状态
Table 6 The ecological state and index value (Q)

项目	Z01	Z02	Z03	Z04	Z05	Z06
Q 值	4.36	4.23	4.41	4.29	4.22	4.31
生态状态	极好	极好	极好	极好	极好	极好

采用综合营养状态指数法(TLI(Σ))评价新丰江水库水体营养状况的结果表明(图 8 和图 9).调查期间月度的 TLI(Σ)均小于 30,介于 18~25 之间,根据 TLI(Σ)<30 为贫营养的评价标准,水质为贫营养状态.时间上,总体表现为秋、冬季高于春、夏季.空间上,各点位 TLI(Σ)介于 21~24,各点位之间差别不显著,总体表现为水库中心相对较低(Z02 和 Z03)。

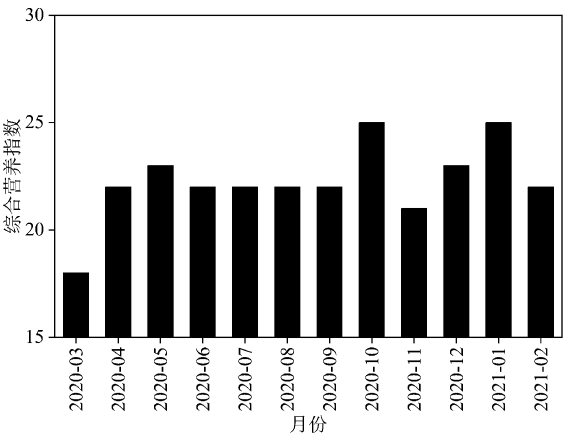


图 8 综合营养状态指数时间变化
Fig.8 The temporal variation of TLI

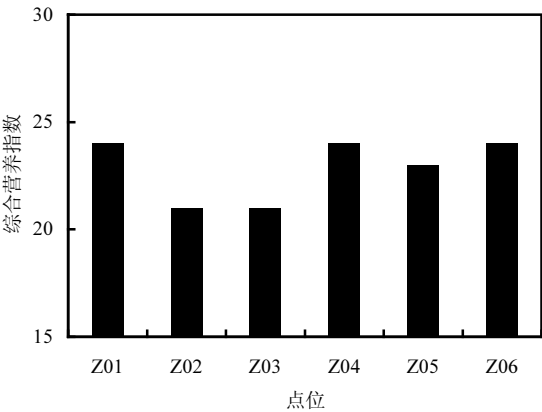


图 9 综合营养状态指数空间变化
Fig.9 The spatial variation of TLI

2.6 浮游植物功能群与环境因子的关系

优势功能群生物量数据的去趋势分析(DCA)表明功能群分布可使用线性模型(排序轴长度为 2.9),采用浮游植物优势功能群(相对生物量大于 5%,共 13 个)和影响浮游植物的环境因子(9 项)进行冗余分析(RDA).结果表明 2 个环境排序轴的相关系数为 0, Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平($P<0.05$),排序结果可靠^[41](表 7).第一排序轴和第二排序轴累计解释了 92.42%的物种信息量。

由表 8 和图 10 可知,pH 值、水温和透明度对浮游植物群落结构影响最为显著.其中 pH 值和透明度与第一排序轴正相关,相关系数分别为 0.3908 和

0.3410,水温与第二排序轴正相关,相关系数为0.7099.功能群 A、F、J、NA、P、X3 与水温、电导率正相关.功能群 L₀ 与透明度、pH 值,功能群 E 与总磷、溶解氧,功能群 MP 与总磷,功能群群 T、W1、Y 与总氮、高锰酸盐指数均呈正相关.功能群 G 接近中心,受多种环境因子共同影响.

表 7 浮游植物优势功能群 RDA 分析统计信息
Table 7 Summary statistics of the axes of RDA performed on phytoplankton dominant functional groups

统计信息	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.1744	0.0766	0.0111	0.0048
物种与环境因子相关系数	0.5129	0.7526	0.4078	0.4309
物种累积百分数(%)	17.44	25.10	26.20	26.68
物种与环境因子相关性的累积百分数(%)	64.21	92.42	96.49	98.25

表 8 RDA 分析中环境因子的显著性及重要性检验
Table 8 Statistics of RDA for dominant functional groups of phytoplankton

环境因子	F 值	P 值
pH 值	8.2	0.002
WT	6.1	0.012
SD	3.5	0.028
DO	1.2	0.312
TP	0.8	0.414
TN	0.7	0.522
NH ₃ -N	1.0	0.34
EC	0.6	0.596
COD _{Mn}	0.4	0.714

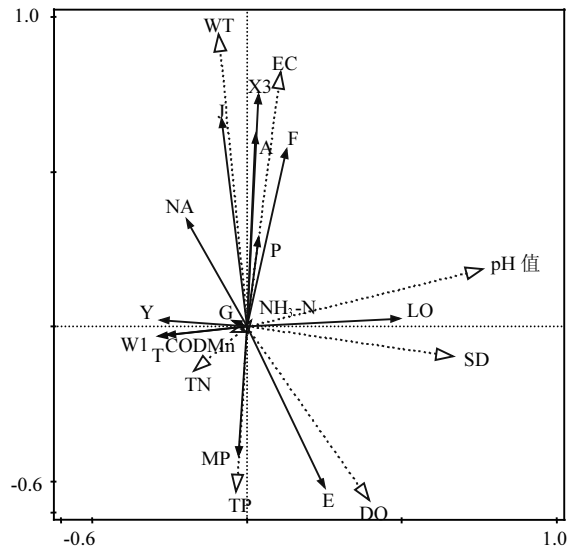


图 10 浮游植物功能群与环境因子 RDA 排序
Fig.10 The sequence plots of RDA for phytoplankton functional groups and environmental factors

3 讨论

3.1 浮游植物功能群演替特征

浮游植物功能群的演替受气候、水文、营养盐等因子的影响,环境因子变化会打破原有水体的生态平衡,通过群落演替来达到新的生态平衡^[42-43].研究期间新丰江水库检出浮游植物 201 种,分属 A、D、E、F、G、H1、J、K、L₀、M、MP、N、NA、P、S1、S2、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y 等 25 个功能群;略低于 Xiao 等^[44]对广东流溪河水库的调查结果(28 个),略高于黄亨辉等^[45]对广东 4 座中小型水库的调查结果(20 个)和张红等^[15]对广东长湖水库的调查结果(18 个),与淀山湖^[22]、巴松措湖^[46]和四明湖^[47]等研究结果相似.因水体中浮游植物种类、数量与水体环境关系密切^[48].新丰江水库作为特大河道型水库,库湾多,深水区 and 浅水区并存,水文形态复杂,形态与一般天然大型湖泊或小型水库存在一定差异,适宜浮游植物生殖的水体环境较广,因此功能群差异原因可能与水库特殊的水文特征有关^[16].

特定的功能类群与相应的生境状态及其耐受性特点相对应^[49].稳定的水环境体系中,浮游植物群落在光热传递时间变化与营养物外源输入的交叠影响下,沿着一定的群落演替途径产生结构变化^[49].新丰江水库浮游植物功能群的组成上,功能群 A 和 L₀ 在各季节均为优势功能群,且 L₀ 是主要优势功能群,并在 2020 年 3 月和 11 月成为绝对优势的功能群,功能群 A 为亚优势功能群,A 和 L₀ 所指示的生境特征均表明水库为贫营养型水体,与王雅文等^[33]研究前期结果相似.功能群 A 代表性藻属为硅藻中的小环藻属,适应生境为贫营养、洁净、深水水体,耐受低营养,对 pH 值升高敏感^[8];功能群 L₀ 具有广适性,其代表种类是具有鞭毛的运动型藻类甲藻中的多甲藻和角甲藻,能在营养物质隔离的水层中生长^[7],且适应低磷的水体环境^[50],也适应于雨季外源输入时水体环境;新丰江水库长期处于低磷、深水、贫营养^[31,33],有利于功能群 A 和 L₀ 的代表性藻类增殖,从而在竞争中取得优势.

不同季节由于生境差异,也出现不同优势类群.春季水库处于枯水期,水位低、流动性差,适应生境为静水环境^[8]的功能群 Y 能在资源竞争中占据有

利地位,进而形成优势,成为是春季特有功能群,代表性藻属为隐藻及甲藻中的薄甲藻属等,与石鼓水库^[45]研究成果相似.夏季水库处于丰水期,水位上升快,水体混合作用加强,适应于贫营养混合的浅水水域、耐受恶劣条件环境和营养盐的需求较低的功能群 X3 能在资源竞争中占据有利地位,进而形成优势,成为是夏季特有功能群,代表性藻属为绿藻中的小球藻,与南海湖^[51]研究成果相似.秋季水库水体混合作用减弱,水体静稳,适应于贫营养、静水生境的功能群 NA 在秋季形成优势,代表性类群为绿藻中的角星鼓藻,与普定水库^[52]研究成果类似.冬季水库水体相对稳定,搅动性差,但适应经常性搅动、浑浊、浅水等生境的功能群 MP 在冬季形成优势,与现有研究成果存在差异,形成机理有待深入研究.

3.2 影响浮游植物功能群的主要环境因子

环境因子是影响浮游植物群落分布的主要因素,水体中溶解氧、水温、电导率、pH 值、总氮、总磷、氨氮、高锰酸盐指数和叶绿率 *a* 等环境因子都会对浮游植物群落结构产生影响,并且不同功能群对水体生境的选择与适应性也不同^[53].由 RDA 分析结果可知,水温、pH 值和透明度的 *P* 值均小于 0.05,是新丰江水库浮游植物功能群群落结构的主要影响因子;功能群 A、F、J、NA、P 和 X3 与水温 and 电导率具有较大正相关,与百花水库^[54]、阿哈水库^[26]和程海湖^[55]等水体类似.功能群 L₀ 与透明度和 pH 值具有较大正相关,与官厅水库^[56]、三板溪水库^[23]等水体类似.功能群 E 与总磷和溶解氧具有较大正相关,与广东 4 座中小型水库^[45]等水体类似.功能群 MP 与总磷具有较大正相关,与紫坪铺水库^[27]等水体类似.功能群 T、W1 和 Y 与总氮和高锰酸盐指数具有较大正相关,与红枫湖^[39]等水体类似.功能群 G 接近中心,受多种环境因子共同影响,与呼兰河口湿地^[57]等水体类似.

温度是控制浮游植物生长繁殖的重要因子^[25-58].温度影响水体分层结构和营养盐扩散,同时调控藻类的同化过程、细胞内酶的活性和代谢速率,进而直接或间接影响浮游植物的群落结构^[59-60].新丰江水库地处亚热带地区,夏秋季节具有良好的光照和水温条件,而春冬季温度相对较低.水温条件的季节差异为不同功能群的出现创造了良好条件.由

相关分析结果可知(表 9).功能群 A、F、J、NA 和 X3 与水温间呈极显著的正相关关系($r>0.568$),功能群 E 和 MP 与水温间呈极显著的负相关关系($r<-0.369$),功能群 G、L₀、P、T、W1 和 Y 与水温间相关关系不显著.功能群 A 和 F 的代表藻属硅藻(小环藻属)和黄藻(葡萄藻属)适宜生境为较低温度的水体^[61],而本次调查期间却与水温呈极显著正相关,水温较高夏季也存在较大优势,某种程度上说明相应功能群的喜温习性特征^[62].功能群 G、L₀、P、T、W1 和 Y 与水温间关系不显著可能因为类群所代表藻属如蓝藻对温度的适应范围比较广,使两者之间的线性关系不够明显.

透明度是一个能较为直观反映水质的常用物理特性指标,一般浮游植物越多,水体透明度越低^[63].该研究中,不同时节透明度差异较大,夏季和秋季低于冬季和春季.透明度的差异在于对影响藻类生长的光照因子的影响,间接影响到藻类对营养盐的利用效率和光合速率,对藻类群体起到一定的调节作用.根据相关分析结果(表 9),功能群 E 与透明度间呈极显著的正相关关系($r=0.306$),功能群 J 和 P 与透明度间呈显著的负相关关系($r<-0.278$).功能群 E 代表藻属为金藻(锥囊藻属),反映水体为清洁、透明^[61],而功能群 J 代表藻属为绿藻(克里藻属等)和 P 代表藻属为硅藻(直链藻属等),反映水体为混合^[54].

相关分析表明功能群 F、L₀ 和 P 与 pH 值间呈显著或极显著的正相关关系($r>0.243$),相应代表的藻属为黄藻(葡萄藻属)、甲藻(角甲藻属等)和硅藻(直链藻属等),对水体 pH 值具有较广的耐受性^[62-65],同时水体 pH 值的升高不利于对 pH 值变化敏感的藻类生长,耐受 pH 值的藻类将发挥其竞争优势^[52],新丰江水库 pH 值均值 7.6,水体呈弱碱性,功能群 F 和 L₀ 易成为优势,与三板溪水库^[23]、呼兰河口湿地^[57]和普定水库^[52]的研究成果类似.功能群 Y 与 pH 值间呈显著的负相关关系,相关系数分别为 $r=-0.29$ ($P<0.05$),相应代表的藻属为隐藻(隐藻属),某种程度说明其功能群 Y 更适应于偏低 pH 值水体.本次调查中功能群 A、E、G、J、MP、NA、T、W1 和 X3 与 pH 值间相关关系不显著,可能因为功能群所代表藻属如绿藻对 pH 值的适应范围比较广有关.

营养盐浓度作为影响浮游藻类季节变化的关

键因子.研究^[49,66]认为,浮游藻类生长的最佳 N/P 比为 16:1,当超过此比值时,藻类生长主要受水体中磷限制,当低于此比值时,藻类生长主要受水体中氮限制.研究期间新丰江水库 N/P 约为 163:1,远大于 16:1,说明新丰江水库浮游植物增殖主要受磷含量制约.水质监测结果表明,新丰江水库磷浓度均值为 0.003mg/L,低于绝对限值($\rho(\text{SRP}) < 0.004\text{mg/L}$)^[67],有利于 A、E、F、NA、X3 和 L₀ 等耐受低营养水体的浮游植物类群的生长,从而在大部分时间都能形成优势.但 J、P、MP、T、G 和 W1 等对营养盐敏感

的功能群也出现短时期增殖,可能原因是受流域降水、风力搅动等影响,外源营养盐短时快速输入,磷含量短时期上升,超过绝对限制阈值,从而引起相关功能群生长,并形成优势.同时,在贫营养水体中磷的再生效率远大于富营养化水体,夏秋季节藻类增殖会使磷出现一定的累积,也会导致部分磷敏感功能群的出现.类似结果也出现在巴松措湖^[46]、三板溪水库^[23]、官厅水库^[56]等水体.因此控制水体雨季外源输入,对预防新丰江水库夏秋季藻类增殖有重要的作用.

表 9 浮游植物优势功能群与环境因子相关性分析

Table 9 The correlation analysis between the dominant functional groups of phytoplankton and environmental factors

功能群	TN	DO	SD	WT	COD _{Mn}	TP	NH ₃ -N	EC	pH 值
A	-0.061	-0.245*	-0.041	0.631**	0.007	-0.243*	0.061	0.634**	0.141
E	0.0002	0.471**	0.306**	-0.689**	0.040	0.269*	0.009	-0.506**	0.117
F	-0.021	-0.390**	0.053	0.568**	0.006	-0.521**	0.101	0.561**	0.243*
G	-0.058	-0.090	0.016	0.105	0.011	-0.074	0.092	0.100	-0.201
J	-0.004	-0.567**	-0.297*	0.764**	0.109	-0.306**	0.276*	0.683**	0.132
L ₀	-0.078	0.057	0.083	0.141	-0.035	-0.181	0.060	0.183	0.342**
MP	-0.079	0.080	-0.079	-0.369**	0.195	0.140	0.238*	-0.227	0.182
NA	0.097	-0.447**	-0.132	0.583**	0.044	-0.505**	0.147	0.565**	0.179
P	-0.102	-0.313**	-0.278*	0.192	0.096	-0.233*	0.268*	0.227	0.264*
T	0.147	-0.273*	-0.024	0.089	-0.051	0.195	-0.183	0.062	-0.202
W1	0.024	-0.320**	0.097	0.036	-0.120	-0.012	-0.124	0.139	0.107
X3	-0.107	-0.221	-0.078	0.620**	0.148	-0.400**	0.286*	0.519**	0.214
Y	-0.075	-0.249*	-0.082	-0.080	0.004	-0.200	-0.225	-0.095	-0.290*

注: * $P < 0.5$, ** $P < 0.01$.

3.3 水质评价

生态指数(Q)能更加精确地反映水体不同时期的环境状况,从而利用浮游植物数据可以较为准确的评价水质状况^[9].基于浮游植物功能群计算生态指数(Q),月度生态指数值表明水库生态状态介于好~极好的水平,点位生态指数值表明各点位生态状态均处于极好的水平.生态指数在时间变化和空间分布的差异均不大,说明新丰江水库的生态状态相对较为稳定,总体为极好水平^[9],与王雅文等^[33]在广东省大型水库生态分区中认为新丰江水库处于第 1 生态类型区的结果一致.基于传统的综合营养状态指数法(TLI(Σ)),新丰江水库在时间变化和空间分布上也均处于贫营养状态.说明两种方法评价结果较为一致,都具有很好的指示作用.因此生态指数(Q)可以反映浮游植物功能群对应的生境状况,进而指示水质状况.

4 结论

4.1 新丰江水库浮游植物共划分为 25 个功能群类别:A、D、E、F、G、H1、J、K、L₀、M、MP、N、NA、P、S1、S2、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y.其中 A、D、E、F、J、K、L₀、M、MP、NA、P、S1、SN、TB、X1、X2、X3、Y 为常见功能群,G、H1、S2 和 T 为偶见或罕见功能群,功能群 A 和 L₀ 的生物量比重占绝对优势.

4.2 浮游植物功能群结构受环境变化影响,RDA 分析表明,pH 值、水温 and 透明度是影响新丰江水库浮游植物功能群结构动态变化的主要环境因素.

4.3 基于浮游植物功能群计算的生态指数(Q),新丰江水库生态状态介于好~极好的水平,总体为极好水平.

4.4 适应中到富营养水体的功能群 F、J、G 和 W1

在部分时期会形成优势,应引起高度重视.

参考文献:

- [1] 汪 星,刘录三,李 黎,等.镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(11):3403-3413.
Wang X, Liu L S, Li L, et al. Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake [J]. China Environmental Science, 2015,35(11):3403-3413.
- [2] 沈毓芬,章宗涉,龚循矩.微型生物监测新技术 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990:119.
Zhang Z S, Huang X F, Gong X J. Freshwater plankton research method [J]. Beijing: Science Press, 1991:119.
- [3] Bonilla S, conde D, Aubriot L, et al. Influence of hydrology on phytoplankton species composition and life strategies in a subtropical coastal lagoon periodically connected with the Atlantic Ocean [J]. Estuaries, 2005,28(6):884-895.
- [4] 胡 韧,蓝于倩,肖利娟,等.淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用 [J]. 湖泊科学, 2015,27(1):11-23.
Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(1):11-23.
- [5] 陈 倩,李秋华,马欣洋,等.FG, MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 [J]. 环境科学, 2019,40(9):4061-4071.
Chen Q, Li Q H, Ma X Y, et al. Comparison of functional groups of phytoplankton in FG, MFG, and MBFG: Taking Three Reservoirs as an example in Guizhou Plateau [J]. Environmental Science, 2019, 40(9):4061-4071.
- [6] Reynolds C S. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems [J]. Holarctic Ecology, 1980,3:141-159.
- [7] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. Journal of Plankton Research, 2002,24(5):417-428.
- [8] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009,621(1):1-19.
- [9] Padisák J, Borics G, Grigorczyk I, et al. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: The assemblage index [J]. Hydrobiologia, 2006,553(1):1-14.
- [10] Crossetti L O, Bicudo C E M. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): The assemblage index application [J]. Hydrobiologia, 2008,610(1):161-173.
- [11] 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.
Xia Y F, Hu X D, Xu J X, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(1):134-146.
- [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.
Gao G J, Xiao L J, Lin Q Q, et al. Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province [J]. Ecological Science, 2013,32(2):144-150.
- [13] Shen H, Li B, Cai Q, 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.
- [14] Dembowska E A, Napiórkowski P, Mieszcankin T, et al. Planktonic indices in the evaluation of the ecological status and the trophic state of the longest lake in Poland [J]. Ecological Indicators, 2015,56:15-22.
- [15] 张 红,漆国佳,潘 鸿.广东长湖水库浮游植物功能群特征及其生态状态评价 [J]. 安徽农学通报, 2020,26(5):131-135.
Zhan H, Qi G J, Pan H. Characteristics of phytoplankton functional groups and evaluation of ecological status in Chang hu Reservoir, Guangdong Province [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(5):131-135.
- [16] Cui G Y, Wang B L, Xiao J, et al. Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in karst hydroelectric reservoirs [J]. Journal of Hydrology, 2021,592:125607.
- [17] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, et al. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. Water Research, 2010,44(11):3345-3354.
- [18] Sarmiento H, Isumbisho M, Descy J P. Phytoplankton ecology of Lake Kivu (eastern Africa) [J]. Journal of Plankton Research, 2006,28(9): 815-829.
- [19] Costa L S, Huszar V L M, Ovalle A R. Phytoplankton functional groups in a tropical estuary: hydrological control and nutrient limitation [J]. Estuaries and Coasts, 2009,32(3):508-521.
- [20] Stanković I, Vlahović T, Udovič D, M G, et al. Phytoplankton functional and morpho-functional approach in large floodplain rivers [J]. Hydrobiologia, 2012,698(1):217-231.
- [21] Cao J, Hou Z Y, Li Z K, et al. Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake [J]. Science of the Total Environment, 2018,631-632:1127-1137.
- [22] 杨 丽,张 玮,尚光霞,等.淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学, 2018,39(7):3158-3167.
Yang L, Zhang W, Shang G X, et al. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. Environmental Science, 2018,39(7):3158-3167.
- [23] 黄国佳,李秋华,陈 稼,等.贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 2015,35(2):418-428.
Huang G J, Li Q Q, Chen C, et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(2):418-428.
- [24] 杨 威,张菲云,孙雨琛,等.淮南北湖浮游植物功能群的季节演替及影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):3079-3086.
Yang W, Zhang F Y, Sun Y S, et al. Seasonal succession and influencing factors of phytoplankton functional groups in Lake Nanhu, Huaibei City [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):3079-3086.
- [25] 汪 星,李利强,郑丙辉,等.洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(12):3766-3776.
Wang X, Li L Q, Zheng B H, et al. Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake [J]. China Environmental

- Science, 2016,36(12):3766-3776.
- [26] 李 磊,李秋华,焦树林,等.阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析 [J]. 环境科学学报, 2015,35(11):3604-3611.
- Li L, Li Q H, Jiao S L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in aha reservoir and their influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,29(7): 985-994.
- [27] Liao N, Li H, You L H, et al. Succession of phytoplankton functional groups and driving variables in a young canyon reservoir [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020,18(7):1911-1924.
- [28] Sun X, Wang W. The impact of environmental parameters on phytoplankton functional groups in northeastern China [J]. Ecological Engineering, 2021,164,106209.
- [29] 葛 优,周彦锋,王晨赫,等.阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):3027-3039.
- Ge Y, Zhou Y F, Wang C H, et al. Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):3027-3039.
- [30] 黄廷林,曾明正,邱晓鹏,等.温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替 [J]. 中国环境科学, 2016,36(4):1157-1166.
- Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P, et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir [J]. China Environmental Science, 2016,36(4):1157-1166.
- [31] 胡 韧,雷腊梅,韩博平.南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 [J]. 生态学报, 2008,28(10): 4652-4664.
- Hu R, Lei L M, Han B P. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang Reservoir in Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(10):4652-4664.
- [32] 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 [J]. 广西师范学院学报:自然科学报, 2016,33(2):94-100.
- Li R M, Gan Y P. Environmental problems and countermeasures of the green lake scenic spot in Heyuan [J]. Journal of Guangxi Teachers Education University: Natural Science Edition, 2016,33(2):94-100.
- [33] 王雅文,杨 扬,潘 鸿,等.基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探 [J]. 湖泊科学, 2014,26(1):147-153.
- Wang Y W, Yang Y, Pan H, et al. Ecological region classification of 10 key reservoirs in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups [J]. Journal of Lake Sciences, 2014,26(1):147-153.
- [34] 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) [Z]. 北京:环境保护部, 2010:167-176.
- Department of Ecology in Ministry of Environmental Protection. China technical regulations for aquatic species resources survey (Trial) [Z]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of PRC, 2010: 167-176.
- [35] 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) [M]. 北京:中国环境出版社, 2017:3-188.
- Department of Environmental Monitoring in Ministry of Environmental Protection. Operation Instruction of monitoring task for national surface water environmental quality monitoring network (Trial) [M]. Beijing: China Environment Press, 2017:3-188.
- [36] 章宗泽,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京:科学出版社, 1995:333-344.
- Zhang Z S, Huang X F. Freshwater plankton research method. Beijing: Science Press [M]. 1995:333-344.
- [37] Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. Journal of Phycology, 1999, 35(2):403-424.
- [38] 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.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [39] 黄国佳,李秋华,陈稼,等.贵州高原红枫湖水浮游植物功能分组及其时空分布特征 [J]. 生态学报, 2015,35(17):5573-5584.
- Huang G J, Li Q H, Chen C, et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(17): 5573-5584.
- [40] GB3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
- GB3838-2002 Surface water environmental quality standard [S].
- [41] Ter Braak C J F, Prentice I C. A theory of gradient analysis [J]. Advances in Ecological Research, 2004,34:235-282.
- [42] Devercelli M, Farrell I O'. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river [J]. Limnologia, 2013,43(2):67-78.
- [43] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. Hydrobiologia, 1998,369(1):11-26.
- [44] Xiao L J, Wang T, Hu R, et al. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir [J]. Water Research, 2011,45(16):5099-5109.
- [45] 黄享辉,胡 韧,雷腊梅,等.南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征 [J]. 生态环境学报, 2013,22(2):311-318.
- Huang X H, Hu R, Lei L M, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013,22(2):311-318.
- [46] 安瑞志,潘成梅,塔巴拉珍,等.西藏巴松错浮游植物功能群垂直分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2021,33(1):86-101.
- An R Z, Pan C M, Taba L Z, et al. Vertical distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Lake Basomtso, Tibet, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(1):86-101.
- [47] 郑 诚,陆开宏,徐 镇,等.四明湖水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.
- Zheng C, Lu K H, Xu Z, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu Reservoir [J]. Environmental Science, 2018,39(6):2688-2697.
- [48] Götzenberger L, Bello F D, Bräthen K A, et al. Ecological assembly rules in plant communities—approaches, patterns and prospects [J]. Biological Reviews, 2012,87(1):111-127.
- [49] Reynolds. The ecology of fresh water phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:24-28.

- [50] 曾 娟,刘德富.磷营养盐对库湾暴发蓝藻水华的实验研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008,30(5):22-24.
- Zeng J, Liu D F. Experimental study of reservoir bay happening blue-green algal bloom due to phosphorus nutrient salt [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2008,30(5):22- 24.
- [51] 潘 彤.南海湖浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子分析 [D]. 包头:内蒙古科技大学, 2019.
- Pan T. Seasonal Succession characteristics of phytoplankton functional groups and analysis of its influencing factors of the Nanhai Lake [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.
- [52] 胡月敏,李秋华,朱冲冲,等.基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征 [J]. 湖泊科学, 2018,30(2):403-416.
- Hu Y M, Li Q H, Zhu C C, et al. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(2):403-416.
- [53] 赵秀侠,方 婷,杨 坤,等.安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系 [J]. 植物科学学报, 2018,36(5):687-695.
- Zhao X X, Fang T, Yang K, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and related environmental factors in summer in Tuohu Lake, Anhui, China [J]. Plant Science Journal, 2018,36(5):687-695.
- [54] 陈 倩,李秋华,胡月敏,等.贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析 [J]. 环境科学研究, 2018,31(7):1266-1274.
- Chen Q, Li Q H, Hu Y M, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Baihua Reservoir, Guizhou Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2018,31(7):1266-1274.
- [55] 邓 乐,戚 菁,宋勇军,等.程海湖夏季浮游植物功能群特征及其影响因子研究 [J]. 生态环境学报, 2019,28(11):2281-2288.
- Deng L, Qi Q, Song Y J, et al. Characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Chenghai Lake in Summer [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019,28(11):2281-2288.
- [56] 陈晓江,杨 劼,杜桂森,等.官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子 [J]. 中国环境监测, 2016,32(3):74-81.
- Chen X J, Yang J, Du G S, et al. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Guanting Reservoir [J]. Environmental Monitoring in China, 2016,32(3):74-81.
- [57] 贾 鹏,范亚文,陆欣鑫.基于功能类群分析呼兰河口湿地浮游植物群落结构特征 [J]. 生态学报, 2021,41(3):1042-1054.
- Jia P, Fan Y W, Lu X X. Analysis of phytoplankton structure based on different functional groups in Hulanhe Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):1042-1054.
- [58] 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 [J]. 湖泊科学, 2018,30(2):385-393.
- Zhao Q H, Sun G D, Wang J J, et al. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(2):385-393.
- [59] 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 [J]. 湖泊科学, 2010,22(2):227-234.
- Li Y, Xiao L J, Lin Q Q, et al. Phytoplankton community in a newly constructed reservoir: Jiantan Reservoir, south China [J]. Journal of Lake sciences, 2010,22(2):227-234.
- [60] 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 [J]. 环境科学与技术, 2014,37(S2):45-50.
- Fang L J, Liu D F, Yang Z J, et al. Effects of water temperature on the phytoplankton community structure [J]. Environmental science & Technology, 2014,37(S2):45-50.
- [61] 桂和荣,王和平,方文慧,等.金藻及黄藻类在煤矿塌陷区水域难生长的原因探讨 [J]. 煤田地质与勘探, 2007,35(4):50-54.
- Gui H R, Wang H P, Fang W H, et al. Discussion on the reasons for Chrysophyta and Xanthophyta seldom growing in the water of mining subsidence area [J]. Coal Geology & Exploration, 2007,35(4):50-54.
- [62] 殷大聪,耿亚红,梅 洪,等.几种主要环境因子对布朗葡萄藻 (*Botryococcus braunii*) 光合作用的影响 [J]. 武汉植物学研究, 2008,26(1):64-69.
- Yin D C, Geng Y H, Mei H, et al. The effects of several environmental factors on the photosynthesis of botryococcus braunii [J]. Plant Science Journal, 2008,26(1):64-69.
- [63] 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 [J]. 环境污染与防治, 2011,33(5):64-68.
- Tian Z Q, Tian B H, Xin L H, et al. Relationship between structure of phytoplankton community and water quality factors in Yuqiao Reservoir in autumn [J]. Environmental Pollution and Control, 2011, 33(5):64-68.
- [64] 王 珺,邢诒炫,陈国华,等.不同生态因子对直链藻生长的影响 [J]. 热带生物学报, 2010,1(3):220-223,227.
- Wang J, Xing Y X, Chen G H, et al. Effects of different ecological factors on the growth of *Melosira* sp. [J]. Journal of Tropical Biology, 2010,1(3):220-223,227.
- [65] 周 川,蔚建军,付 莉,等.三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 [J]. 环境科学, 2016,37(3):873-883.
- Zhou C, Wei J J, Fu L, et al. Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2016,37(3):873-883.
- [66] 葛 蔚,汪 芳,柴 超.氮和磷浓度对中肋骨条藻和锥状斯氏藻种间竞争的影响 [J]. 植物生态学报, 2012,36(7):697-704.
- Ge W, Wang F, Chai C. Effect of nitrogen and phosphorus concentration on interspecific competition between *Skeletonema costatum* and *Scrippsiella trochoidea* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012,36(7):697-704.
- [67] Ludwig J A., and Reynolds J F. Statistical ecology: A primer on methods and computing [M]. New York: John Wiley and Sons, 1988:345-427.

作者简介: 张 辉(1983-),男,江苏宿迁人,高级工程师,硕士,主要从事主要环境监测与评价研究.发表论文 10 余篇。