环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.11
第41卷 第11期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第11期
2020年11月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期 2020年11月
Vol.41, No.11 Nov., 2020

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响

郭芳[1], 顾继光[1], 赵剑[2], 余华章[2], 肖利娟[1,3*]

(1. 暨南大学水生生物研究中心, 广州 510632; 2. 广东省水文局汕头水文分局, 汕头 515041; 3. 广东省水库蓝藻水华防治中心, 广州 510632)

摘要: 浮游植物群落对环境变化敏感,常用于评价水质和生态系统健康状态,但其对环境响应受类群单元的影响. 为了解不同类群划分方法对浮游植物群落与环境响应关系的影响,以南亚热带地区 8 座水库的夏季浮游植物群落为研究对象,比较了分别以种(species)、属(genus)和门类(phyla)、形态功能群(morphology-based functional groups, MBFG)和生境模板功能群(functional groups, FG)为类群单元下浮游植物群落与环境因子的响应关系的差异. 结果表明, 8 座水库均为中营养水体,以水温高(32.6 ± 1.1)℃和有效光场弱(Z_{eu}/Z_m 为 0.48 ± 0.28)为特征,水库间环境差异主要体现在溶解性营养盐的梯度上,溶解性营养盐的梯度显著高于总营养状态、温度和有效光照强度的环境梯度($P < 0.05$). 群落中种和属水平的类群单元多但生物量低,MBFG 功能群和门类类群单元少但生物量高,导致虽然种属归类法的群落距离大于其他归类法,但种和属类群划分法的物种梯度(SCBD)和样点梯度(LCBD)均小于 MBFG 功能群和门类归类法. 统计分析表明, 5 种类群划分法中只有 MBFG 和门类归类法的群落梯度对溶解性营养盐梯度有显著的响应关系,尤其是对 pH 值和PO_4^{3-}-P浓度变化的响应; 只有 MBFG 和门类归类法的群落梯度与营养状态指数(TSI)变化有显著回归关系. 以上结果表明,当环境变化主要体现在营养盐的供应差异时, MBFG 和门类类群划分法对环境识别的灵敏度高于其他方法.

关键词: 分类方法; 浮游植物群落; 功能群; 水库; 环境响应

中图分类号: X171.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)11-5050-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202005106

Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China

GUO Fang[1], GU Ji-Guang[1], ZHAO Jian[2], YU Hua-zhang[2], XIAO Li-juan[1,3*]

(1. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Shantou Suboffice, Hydrological Bureau of Guangdong Province, Shantou 515041, China; 3. Guangdong Center for Control and Prevention of Reservoir Cyanobacterial Blooms, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Phytoplankton communities are sensitive to environmental changes and are used to assess water quality and ecosystem states. However, their responses to environment are affected by the classifications. To understand the impact of different classifications, the response relationship between phytoplankton communities and environment were compared with five phytoplankton classifications (species, genus, phyla, morphology-based functional groups, and functional groups) by investigating eight reservoirs in summer in the southern subtropical region. The eight reservoirs were mesotrophic and their environment was characterized by a high temperature (32.6 ± 1.1)℃ and low light bioavailability (Z_{eu}/Z_m was 0.48 ± 0.28). The variance of dissolved nutrients contributed to the main environmental differences between the eight reservoirs. The environmental gradient, in terms of dissolved nutrients concentration, was significantly higher than in terms of total nutritional status, temperature, and light bioavailability ($P < 0.05$). The number of species and genus was higher but their biomass was lower than those of other classifications. This contributed to the higher Bray-Curtis distance and lower species gradient (SCBD) and location gradient (LCBD) of phytoplankton communities with species and genus classifications than other classifications. A statistical analysis showed that only the phytoplankton community gradient with MBFG and phylum classifications was significantly correlated with environmental gradient, in particular the gradient of pH value and PO_4^{3-}-P concentration. A significant regress was detected between the TSI gradient and the phytoplankton community gradient with MBFG and phylum classifications. In conclusion, as the variance of environment stemmed from the supply of nutrients, the response of the phytoplankton community classified with MBFG and phylum was more sensitive than other classifications.

Key words: classification; phytoplankton community; functional group; reservoir; environmental response

浮游植物是水库生态系统最重要的初级生产者,在水体元素生物地化循环和营养传递过程中承担重要的功能. 由于浮游植物细胞粒径小、世代时间短,对环境变化敏感,浮游植物群落对水质和生态系统健康有很好的指示作用,在水环境质量和生态系

收稿日期: 2020-05-11; **修订日期**: 2020-05-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(31901144); 广州市科技计划项(201704020159); 中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)
作者简介: 郭芳(1995 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为浮游植物群落生态学,E-mail: gfyeah@163.com
* 通信作者,E-mail: tljxiao@jnu.edu.cn

统健康评价中有重要的应用[1,2]. 自 20 世纪 50 年代,浮游植物被应用到水环境质量评价中,但早期主要集中在少数对环境变化敏感的指示生物上,例如利用鼓藻指示水体清洁程度,利用裸藻指示水体有机污染状况等[3,4]. 随着研究的积累,全球湖泊富营养化日趋严重,人们发现营养状态相近的水体浮游植物群落相似性也高,Reynolds 等[5]根据温带湖泊的调查数据提出了生境功能类群,利用功能类群指示水环境状态,随后,多种功能群分类方法逐渐被提出[6,7]. 近年来,随着浮游植物生理生态研究的积累,Litchman 等[8,9]提出了基于群落功能形态性状指示水环境变化的方法,但目前该方法尚未得到广泛地应用.

目前常用的浮游植物群落描述方法可分为两种类型:反映亲缘关系的系统分类法和基于功能特征的功能群分类法[6,10]. 其中浮游植物指示种、属和门类是基于系统分类法,生境模板功能群(FG)和形态功能群(MBFG)为基于功能特征的功能群分类法[11,12]. FG 功能群分类法将水深、水体冲刷、混合状态、透明度、酸碱性、营养程度和牧食作用作为描述生境的变量,将适应相似生境类型的物种归为同一功能群,在实际应用中,通过优势功能群所适应的生境类型快速判断水体物理、化学和生物环境特征,实现利用浮游植物群落评价水生态系统健康的作用[5,13]. MBFG 功能群归类法以反映浮游植物资源获取能力、反牧食能力和抵御沉降的能力的形态参数,如体积、粒径、比表面面积和附属结构(鞭毛、硅质壳、胶被和伪空泡的有无)为分类依据,将浮游植物划分为 7 个功能群,在实际应用中根据优势功能群的形态特征判断水环境中的资源供应、牧食强度和水体稳定性的特征[14~16]. 这些方法在水环境质量评价中都有广泛地应用,但群落与环境响应关系的识别明显受类群划分方法的影响,即不同方法下描述的群落变化的关键驱动因子有明显差异[17~19]. Hu 等[18]对广东珠海 3 座调水型水库中浮游植物群落的研究表明,功能群的方法比基于系统分类法更有利于识别群落与环境因子的关系,但 Cupertino 等[19]对巴西东南部 6 座小水库浮游植物的研究结果表明,系统分类法比功能群分类法更有利于识别群落与环境因子之间的关系. 这些研究证明了归类方法在识别群落与环境响应关系中的重要性,但相反的结论表明需要更多的研究去分析和理解归类方法的作用.

样点之间浮游植物群落的差异可分解为时间变化(例如相同位点浮游植物的季节演替)和空间变化(例如相同季节不同采样点的群落差异). 前期对多座热带和亚热带水库浮游植物群落季节演替的研究结果显示,FG 功能群比 MBFG 功能群对水环境的季节性变化更敏感[18,20]. 在热带和亚热带水库中,水体混合过程对浮游植物的群落演替有重要作用,而水体混合是 FG 功能群的重要分类依据,这是 FG 功能群在识别水体环境季节变化更有优势的重要原因[18,20,21]. 但在相同季节里,同一区域内水体温度、受昼夜温差与风驱动的混合深度和表面光强均比较接近,水环境的差异主要体现在营养盐(氮、磷和碳等)的变化上,推测在指示相同采样时间的水库之间水环境差异上 FG 功能群的优势可能降低,系统分类法和 MBFG 功能群分类法更有利于识别浮游植物群落与环境之间的关系. 为验证该推测,本研究选择粤东地区 8 座供水水库,于 2016 年 7 月 25 日至 29 日完成调查,比较种、属、门类、生境模板功能群(FG)和形态功能群(MBFG)这 5 种归类方法下浮游植物群落与环境因子的响应关系的差异,以期为更好地应用浮游植物评价水环境和生态系统健康提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　采样点设置和时间

本次调查为粤东地区的 8 座水库,分别为赤沙水库(CS)、公平水库(GP)、河溪水库(HX)、秋风岭水库(QFL)、汤溪水库(TX)、凤凰水库(FH)、龙颈上水库(LJS)和新西河水库(XXH). 于 2016 年 7 月 25 ~ 29 日采样,分别在各水库敞水区(坝前约 150 m 中心位置)设置采样点(图 1).

1.2　样品采集与分析鉴定

采用 YSI 6600 多参数水质分析仪现场测定水温(water temperature, WT)、pH 值和电导率(electrical conductivity, EC),以 1 m 间隔测定水柱水温梯度,以 1 m 间隔水温差大于 1℃ 定义为温跃层[22],温跃层深度即湖上层混合层厚度(Z_m)[23];用测深仪测定水深;萨式盘测定水体透明度(SD),在已有研究基础上,采用 2.7 倍 SD 为近似真光层深度(Z_{eu})[24],以 Z_{eu}/Z_m 表示水下有效光场强度[25];使用有机玻璃采水器采集 1 L 表层(0.5 m 处)水样并按照国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)测定总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO_3^--N)和铵态氮(NH_4^+-N)、磷酸根磷(PO_4^{3-}-P)和溶解性硅(DSi)浓度,叶绿素 a(Chla)用反复冻融丙酮浸提法测定[26]. 同时采集 1 L 浮游植物样品,加入 1% 鲁哥试剂固定,用沉淀杯沉淀 24 h 后,在倒置显微镜(ZEISS Axio Vert A1)下用 400 × 放大倍数进行鉴定和计数,浮游植物生物量的计算方法参照

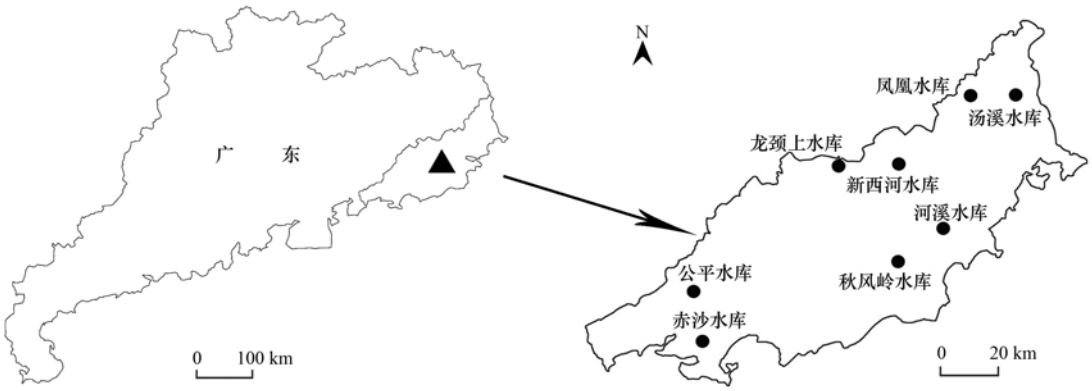

图1 采样点示意

Fig. 1 Map of sampling points

文献[27]. 浮游植物分别按种(species)、属(genus)和门类(phyla)、MBFG 功能群(MBFG)[14]和 FG 功能群(FG)[5,13]归类法归类.

1.3 数据处理

以叶绿素 a 的 TSI 指数为基准,从其余的状态参数中,再选择总氮、总磷和透明度的 TSI 参数(参照广东省水库的经验公式[28])与其进行相关加权综合. 计算公式见式(1):

$$\mathrm{TSI(Chla)} = 10[2.46 + \ln(\mathrm{Chla})/\ln 2.5] \quad (1)$$

透明度、总磷和总氮的 TSI 指数的计算公式分别见式(2)~(4):

$$\mathrm{TSI(SD)} = 10\left[2.46 + \frac{1.912 - 1.349\ln(\mathrm{SD})}{\ln 2.5}\right] \quad (2)$$

$$\mathrm{TSI(TP)} = 10\left[2.46 + \frac{3.497 + 0.654\ln(\mathrm{TP})}{\ln 2.5}\right] \quad (3)$$

$$\mathrm{TSI(TN)} = 10\left[2.46 + \frac{1.597 + 0.972\ln(\mathrm{TN})}{\ln 2.5}\right] \quad (4)$$

相关加权综合营养状态指数计算公式见式(5):

$$\mathrm{TSI}\left(\sum\right) = \sum_{j=1}^{m} W_j \cdot \mathrm{TSI}(j) \quad (5)$$

式中, $\mathrm{TSI}\left(\sum\right)$ 表示综合营养状态指数; $\mathrm{TSI}(j)$ 表示第 j 种参数的营养状态指数. W_j 表示第 j 种参数的营养状态指数的相关权重,其计算公式见式(6):

$$W_j = \frac{r_{1j}^2}{\sum_{j=1}^{m} r_{1j}^2} \quad (6)$$

式中, r_{1j} 为第 j 个参数与叶绿素 a 的相关系数; m 为选出的主要参数数目,此处取叶绿素 a、透明度、总磷和总氮. TSI 水库营养状态划分标准: TSI < 30 为贫营养; TSI 在 30 ~ 50 之间为中营养; TSI > 50 为富营养.

采用欧氏距离[29]计算水库之间的总环境梯度(ED)和营养状态梯度(TSID),同时将环境梯度分解为 TN 和 TP 浓度梯度(TD)、T 和 Z_{eu}/Z_m 梯度(LD)和溶解性营养盐(pH、NO_3^--N、NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P)的梯度(ND),所有环境数据都经标准化后计算距离. 采用 Bray-Curtis 距离计算水库之间的群落距离,分别计算 5 种归类方法下的距离矩阵: spe-D,基于优势种的距离矩阵; gen-D,基于优势属的距离矩阵; phyl-D,基于门类的距离矩阵; MBFG-D,基于 MBFG 功能群的距离矩阵; FG-D,基于 FG 功能群的距离矩阵. 所有浮游植物数据均采用 Hellinger 转换后计算距离,其中优势种为在群落中的相对生物量大于 10% 的种; 优势属为在群落中的相对生物量大于 10% 的属. 进一步将群落距离分解为样点内物种梯度(SCBD)和样点间梯度(LCBD)[30]. 用一般线性回归模型分析群落距离与环境距离的回归关系,对显著的回归关系用局部加权回归分析进行线性拟合.

欧氏距离和 Bray-Curtis 距离计算使用 R 语言中的程序包 vegan 完成,回归和拟合分析使用程序包 vcd 完成,群落结构图用 Microsoft Excel 2013 绘制.

2 结果与分析

2.1 水库之间的环境梯度

调查期间气温较高, 8 座水库平均水温为 (32.6 ± 1.1)℃, pH 值为 7.1 ~ 8.9, Z_{eu}/Z_m 值与藻类初级生产力密切相关,调查的 8 座水库 Z_{eu}/Z_m 均值为 0.48 ± 0.28,均小于 1. 8 座水库的综合营养状态相近, TSI 为 39 ~ 48,均为中营养水平,但各水库间溶解性营养盐浓度(NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P 和 DSi)差异显著(表 1).

表 1　水库的环境特征

Table 1　Environmental characteristics of the reservoirs

项目	CS	GP	HX	QFL	TX	FH	LJS	XXH
WT/℃	33	34	33	33	33	30	32	33
Z_{eu}/Z_m	0.6	0.33	0.32	0.47	0.15	0.27	0.91	0.88
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	0.019	0.019	0.047	0.041	0.007	0.003	0.022	0.035
NO_3^--N/mg·L^{-1}	0.27	0.18	0.46	0.32	0.45	0.75	0.13	0.63
PO_4^{3-}-P/mg·L^{-1}	0.019	0.023	0.004	0.010	0.004	0.009	0.001	0.009
DSi/mg·L^{-1}	6	6	14	15	10	12	11	14
TP/mg·L^{-1}	0.027	0.025	0.019	0.010	0.034	0.017	0.021	0.020
TN/mg·L^{-1}	0.54	0.40	1.00	0.41	0.78	0.98	0.24	0.73
EC/μS·cm^{-1}	58	47	92	69	80	43	33	39
pH	7.1	7.3	8.6	8.0	9.2	8.4	8.8	7.1
TSI	42	42	41	39	48	40	45	39

采用欧氏距离计算各水库间的环境距离中，总的环境梯度（ED）为 4.16 ± 0.83，其中营养状态梯度（TSID）为 1.17 ± 0.81，TN 和 TP 浓度梯度（TD）为 1.86 ± 0.75，温度梯度和 Z_{eu}/Z_m 梯度（LD）为 1.85 ± 0.78，溶解性营养盐（pH、NO_3^--N、NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P）的梯度（ND）为 3.08 ± 0.74. 溶解性营养盐（ND）显著高于 TD、LD 和 TSID 的梯度，在总环境梯度（ED）中占主要作用，对环境梯度的贡献最大（图 2）.

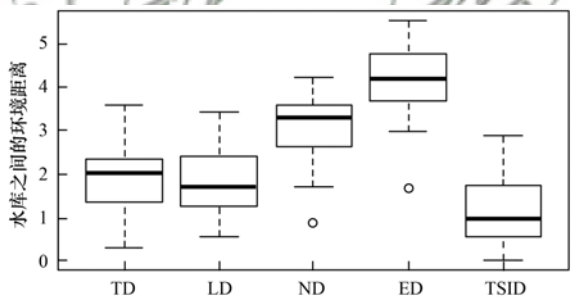

图 2　水库之间的环境梯度

Fig. 2　Environmental gradient between reservoirs

2.2　浮游植物结构特征

本次调查共检出浮游植物 129 种（包括变种在内），蓝藻 22 种、绿藻 71 种、硅藻 18 种、甲藻 9 种、隐藻 4 种、裸藻 4 种和金藻 1 种，每个水库平均物种数量为 36 种. 浮游植物总丰度在 $1.18 \times 10^6 \sim 10.50 \times 10^6$ cells·L^{-1}，总生物量在 0.47 ~ 20 mg·L^{-1}. 分别按种、属和门类、MBFG 和 FG 归类法对浮游植物进行归类，优势种主要来自蓝藻（3 种）、绿藻（3 种）、硅藻（5 种）和甲藻（3 种），有较明显优势的如：脆杆藻（*Fragilaria* sp.）和针杆藻（*Synedra* sp.）在汤溪水库的相对生物量分别约为 60%、30%；梅尼鼓藻（*Comarium meneghinii*）在新西河水库约占 37%，占鼓藻属的 97%，绿藻的 52%；飞燕角甲藻（*Ceratium hirundinella*）在公平水库约占 33%；棒条藻（*Rhabdogloea* sp.）在凤凰水库的相对生物量约为 38%，是该水库蓝藻的主要组成（约占蓝藻生物量 99%）. 8 座水库主要优势属包括棒条藻属（*Rhabdogloe*）、鼓藻属（*Cosmarium*）、角甲藻属（*Ceratium*）、脆杆藻属（*Fragilaria*）、针杆藻属（*Synedra*）以及直链藻属（*Melosira*）和小环藻属（*Cyclotella*）. 浮游植物按 MBFG 归类法，8 座水库的浮游植物以 GroupⅣ、GroupⅤ、GroupⅥ和 GroupⅦ功能组为主，GroupⅥ为体积相对较大的硅藻，相对生物量高达 90%，出现在汤溪水库. 根据 FG 归类法 8 座水库浮游植物划分为 26 个功能群，其中 C、D、F、J、K、Lo、N 和 Z 为优势功能类群（图 3）.

2.3　水库之间浮游植物群落距离

不同归类方法下 8 座水库的浮游植物群落距离差异很大，5 种归类方法下群落距离分别为：优势种的距离（spe-D）为 0.72 ± 0.15，优势属距离（gen-D）为 0.70 ± 0.14，生境模板功能群距离（FG-D）为 0.53 ± 0.12，门类距离（phyl-D）为 0.27 ± 0.11，形态功能群距离（MBFG-D）为 0.29 ± 0.11. 5 种归类法中，在 MBFG 和门类法下计算的群落距离要显著低于其他 3 种归类法（图 4）.

进一步地将群落的距离分解为 SCBD 和 LCBD. 5 种归类方法下计算的水库间的 LCBD 均值为 0.12，MBFG 和门类法略小于其他 3 种归类法，但差异不显著，所有方法下的 LCBD 平均值均在 0.1 左右. 但是方差有明显的差异，MBFG 和门类法的 LCBD 方差明显大于其他 3 种方法. 5 种归类方法的 SCBD 差异更显著，MBFG 和门类法的 SCBD 均值和方差均显著高于其他 3 种方法（图 5）.

2.4　统计分析

对群落距离与环境梯度作回归分析，5 种归类方法下的群落结构只有 MBFG 和门类法对溶解性营养盐梯度有显著的响应关系（$P < 0.05$），pH 值和 PO_4^{3-}-P 浓度梯度是 MBFG 和门类法下浮游植物群落的重要解释变量，且 MBFG 与 PO_4^{3-}-P 有极

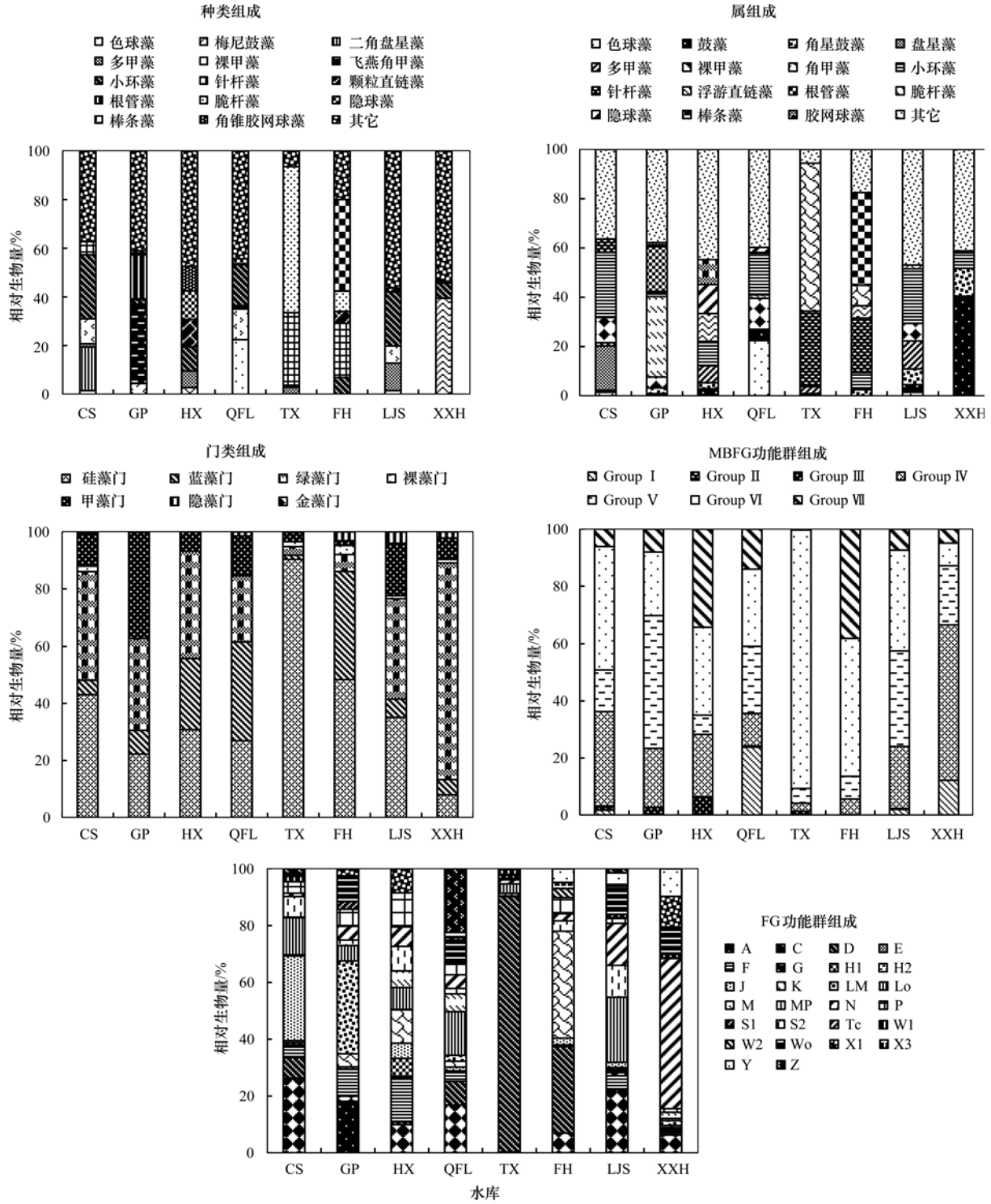

图 3 不同归类方法下群落结构特征

Fig. 3 Community structure characteristics with different classifications

显著($P<0.01$)的响应关系,在其他 3 种归类方法下的浮游植物群落与环境梯度的响应关系不显著(表 2).

在群落距离与 TSI 梯度响应关系的回归分析中,MBFG 与 TSI 的拟合方程为:MBFG-D = 0.22TIS + 0.061,($P = 0.016$);门类法与 TIS 的拟合方程为:phyl-D = 0.21 TSI + 0.056,($P = 0.023$),两种归类法下的浮游植物群落与 TSI 具有显著的响应关系($P<0.05$),其它归类法不显著(图 6).

表 2 群落距离与环境梯度的回归分析[1)]

Table 2 Regression analysis of community distance and environmental gradient

群落距离	解释变量	R_{adj}	P 值
MBFG-D	pH**, PO_4^{3-}-P**	0.38	0.000 9
phyl-D	pH*, PO_4^{3-}-P*	0.21	0.01

1) * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

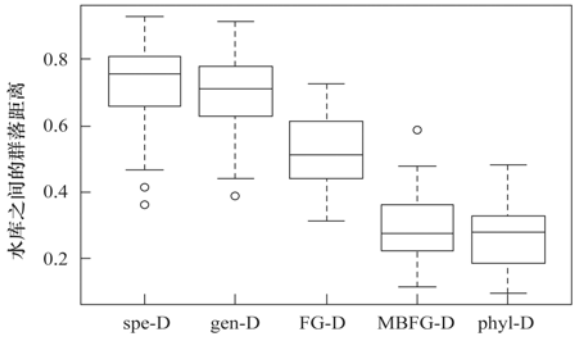

图 4　基于 5 种归类方法的水库之间的浮游植物群落距离

Fig. 4　Phytoplankton community distance between reservoirs based on five classification methods

3　讨论

3.1　水库环境和浮游植物群落特征

本次调查时间处于夏季，8 座水库表层平均水温为 32.6℃，高温是 8 座水库共同的环境特征. 光照是浮游植物进行光合作用的必备条件，浮游植物在水层中接收的有效光照强度将直接影响其生长[31]. 水体中的浮游植物光可获得性不仅受太阳辐射强度的影响，还受水体混合状态的影响. 水体混合通过影响浮游植物的光可获得性进而影响其生产力，因为混合使浮游植物分布在更深的水层，同时太阳辐照强度随深度而降低[32,33]，混合层深度越深，浮游植物接收的有效光强的几率越小[24]. Z_{eu}/Z_m 是描述有效光场的主要参数，陈洋等[24]研究了临界层对水华暴发的影响，结果显示 Z_{eu}/Z_m 大于 1 能引起水华暴发，Z_{eu}/Z_m 小于 1 时则生长缓慢. 本次调查 8 座水库 Z_{eu}/Z_m 均小于 1，浮游植物的光可获得性较差. 营养盐的供应也是浮游植物生长的必要条件，8 座水库均为中营养水体，其中 6 座水库溶解性磷浓度低于 0.01 mg·L^{-1} 同时溶解性氮高于 0.3 mg·L^{-1}，另外 2 座溶解性磷浓度大于 0.01 mg·L^{-1}

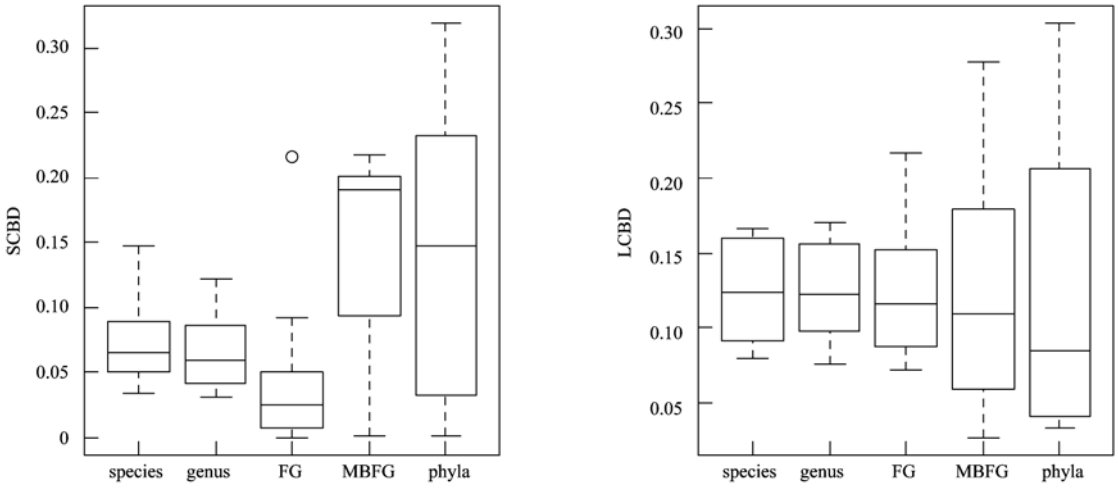

图 5　5 种归类方法下浮游植物群落的 SCBD 和 LCBD 的差异

Fig. 5　Difference of SCBD and LCBD of phytoplankton community between five classifications

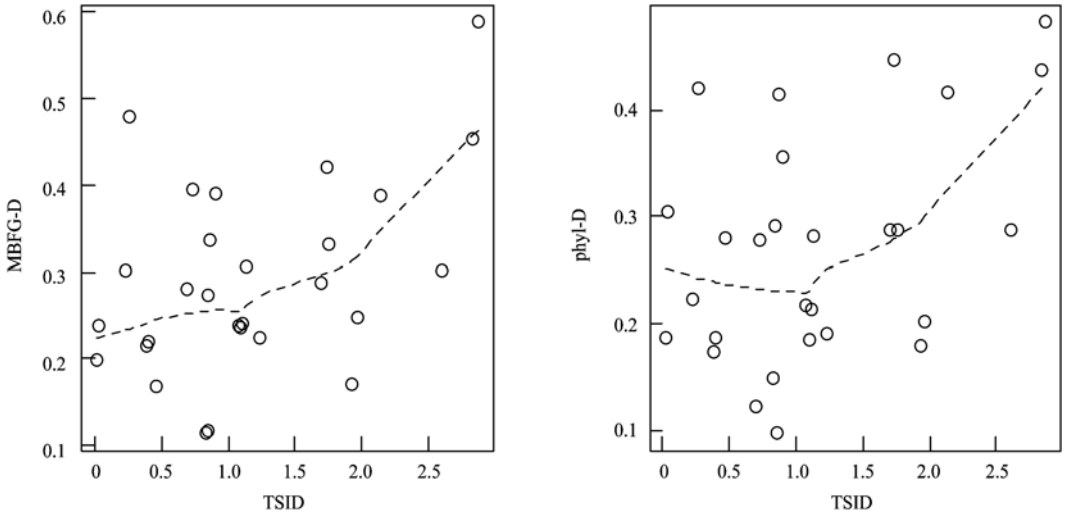

图 6　形态功能群(MBFG-D)和门类类群距离(phyl-D)与 TSI 梯度响应关系的局部拟合回归

Fig. 6　Local fitting regression of the relationship between morphological functional group (MBFG-D) and genre group distance (phyl-D) and TSI gradient response

的水库溶解性氮低于 0.3 mg·L^{-1}，8 座水库的溶解性硅酸盐浓度均大于 6 mg·L^{-1}，表明硅元素不是限制因子，磷或氮资源供应不足是浮游植物生长的主要限制因子[34]. 以上分析表明 8 座水库共同的环境特征是高温条件下的强烈资源限制，光照和营养盐供应均不充足. 进一步地统计分析表明，8 座水库的营养状态以及以光照和温度代表的物理环境梯度较小，水库之间的环境梯度主要体现在溶解性营养盐的浓度差异上. 调查期间水库间的 NH_4^+-N、NO_3^--N 和 PO_4^{3-}-P等波动幅度较大，溶解性营养盐梯度显著高于 TN 和 TP 浓度梯度、T 和 Z_{eu}/Z_m 梯度以及 TSI 梯度. 水库的溶解性营养盐受地表径流和内源释放的影响，在水库之间有较大的差异[21,35].

本次调查的 8 座水库浮游植物群落结构以蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻为主，浮游植物的优势种为：脆杆藻（*Fragilaria* sp.）、针杆藻（*Synedra* sp.）、梅尼鼓藻（*Comarium meneghinii*）、飞燕角甲藻（*Ceratium hirundinella*）和棒条藻（*Rhabdogloea* sp.）. 这些种类在形态上的共同特征是细胞体积大和/或形态拉长成长条状，在生理上这些种类均具有耐低营养盐的特性[13,36]. 形态功能群的分析结果也表明，8 座水库的优势功能群均具有体积大的特征[14,34]. 生境功能群分析结果表明，群落以耐受低光或低营养或稳定环境的功能群为优势类群，其中代码为 C、D、F 和 J 的功能群均能耐受低光条件，代码为 N 和 Z 的功能群耐受低营养环境，代码为 K 和 Lo 的功能群喜好稳定环境[5,13].

3.2 浮游植物归类方法对群落与环境响应关系的影响

自然水体中影响浮游植物群落的因素归结为两个方面：迁移扩散和环境选择[37~39]. 在长水力滞留时间（大于 40 d）的湖泊水库，浮游植物群落主要受环境选择的作用[37,40]，浮游植物群落结构特征是水体物理、化学和生物环境因素的综合反映[35,38,40]. 基于浮游植物群落与水环境条件之间的关系，浮游植物常作为水环境质量或水生态系统健康的主要指示生物[12,41]. 利用浮游植物群落反映水环境变化时，来自于不同样点或生境的群落之间的差异越大越有利于识别环境之间的差异，即群落之间的距离越大越有利于识别环境变化. 本研究的分析结果表明，群落的距离受归类方法的影响显著，分类单元越小、群落距离越大，以种类为归类单元的群落距离显著高于其他归类方法，归类单元较少的 MBFG 和门类归类法表示的群落距离最小. 理论上以种类为归类单元的群落更能反映环境的变化，但本研究的统计分析却表明，以种类为归类单元的群落距离与环境梯度没有显著相关关系，即群落的变异不能被环境变异所解释. 相反 MBFG 和门类归类法表示的群落距离与环境梯度有显著的相关性，即群落的变异能被环境变异所解释，基于 MBFG 和门类归类法描述的群落变异能更好的反映环境变化.

进一步将群落梯度（或 β 多样性）分解为样点内部归类单元间的变异（SCBD）和归类单元在样点间的变异（LCBD）[30]. 结果表明，MBFG 和门类归类法的 SCBD 显著高于其他归类法，即在样点内部这两种归类法的归类单元之间差异更大、优势种和非优势种之间的生物量差异更明显，而以物种为归类单元的方法虽然物种多但是优势种和非优势种之间的差异是最小的. 此外在反映样点间变化的时候，MBFG 和门类归类法有更大的方差，即水库间的梯度更明显. 相比于 MBFG 和门类归类法，以物种为归类单元描述群落，种类之间的差异（SCBD）较小、种类生物量在水库之间的变化（LCBD）也较小，归类单元多（即种类多）是导致群落距离更大的主要原因.

种和属归类法的分类依据包括形态、光合色素和繁殖方式[11,42]，反映归类单元之间的进化关系，不同的种或属可能有相似的生态位. 湖沼学家们很早就注意到自然水体中生态位相似的多种共存的现象，Hutchinson[43]提出浮游生物悖论，指出自然水体很难维持稳定状态实现浮游植物种类之间的竞争排斥. 优势种常被用于指示水环境状态，比如鼓藻属和甲藻可用于指示中营养状态水体，直链藻和小环藻用于指示富营养水体等等[36]，而忽视了具有相似生态位的非优势种的存在. 同时在生境相似的水体之间，经常出现生态位近似但物种不同的现象[5]. 本次调查中的 8 座水库环境梯度并不大，主要体现在营养盐的供应上，在这种生境相似度较高的条件下，种、属的变化不能很好地反映水环境的变化，群落梯度与环境梯度没有显著相关性.

相比于种、属归类单元，门类鉴定更简单，以细胞核和叶绿体形态为分类依据. 一般而言，门类之间的生态位有明显的区别，例如蓝藻具有藻胆蛋白，有些种类具有伪空泡，光竞争能力较强；硅藻能够适应低光，在低光环境能够很好地生长，硅质壳还能抵抗机械损伤，适应高冲刷率的环境[35]；甲藻、裸藻和隐藻能够适应无机碳不足、有机质较高的环境[36,44]. 门类之间获取营养盐的能力也有明显的区别，例如甲藻依靠鞭毛在水体中活动并获取营养盐；硅藻因坚硬的硅质壳而获得较大的沉降率[14]，可沉降至具有较高营养盐浓度的深水层；体型相对较小的蓝藻是生长速率较快的种类，胶被和伪空泡等结

构可产生浮力,调节在水层中的位置以获取资源,防止被牧食等[14]. 门类之间存在的这些差异为利用门类来评估水环境质量提供了便利. 本研究的结果也表明,门类变化能很好地反映水环境的变化.

FG 是将某一特定生境且具有相似敏感性的浮游植物归为一个功能群,通过优势功能群对应的生境类型来说明水体情况,应用时需将浮游植物与环境数据相结合,该分类法对环境变化敏感[5,11]. 已有较多研究表明 FG 可以更敏感地反映水环境的变化[20,39],Reynolds 等[5]的研究表明与系统分类法中的物种相比,FG 能更好地捕获环境梯度的群落变化,但在本次调查中,浮游植物的优势功能群为 C、D、F、J、K、Lo、N 和 Z. C 主要在富营养的中小型湖泊,D 的生境为含营养盐的浑浊浅水或河流,N 的生境为 2 ~3m 连续或半连续混合水层,F 的生境为清澈、深层混合的中富营养湖泊,J 的生境为高富营养混合浅水湖泊(包括许多低坡度河流),Z 的生境为贫营养湖泊的表层或湖下层的上部,K 的生境为富营养的浅水湖泊,Lo 的生境为可深可浅、贫营养到富营养、中型到大型的湖泊[13],所有类群均对低光或低营养环境有较好的适应能力,这与 8 座水库的整体特征是相对应的. 但统计分析表明,FG 在 5 类归类法中对 8 座水库的环境梯度的识别是最差的. FG 的分类依据是生境特征,描述生境特征的指标主要包括混合深度、营养状态和光照条件,功能群对环境的响应主要体现在这 3 个方面. 例如,朱忆秋等[20]和 Xiao 等[39]在研究浮游植物群落季节动态时,水体混合深度、营养状态和光照条件有明显的季节性特征,FG 归类法能敏感地反映环境变化,对环境变化的识别比其他归类法更具有优势. 本次调查的 8 座水库的营养状态、光照条件和水温均接近,环境差异主要体现在溶解性营养盐的变化,FG 归类法在识别浮游植物群落与环境的响应关系上敏感性降低.

MBFG 是根据浮游植物的大小、比表面积以及黏质胶被、鞭毛、伪空胞和硅质甲壳的有无等形态特征进行分类[14],是一种简单有效且客观的分类方式,可用于反映功能群资源获取能力、反牧食能力以及抵御沉降的能力,并进一步反映水环境状况[15,16]. MBFG 和系统分类法的门类归类与溶解性营养盐有显著相关性,回归分析表明PO_4^{3-}-P浓度和 pH 值梯度变化是 MBFG 群落梯度变化的显著解释变量($P<0.01$). 另外,在与 TSI 梯度响应关系的局部拟合回归中,也只有 MBFG 和门类法能较好地同 TSI 拟合. 该结果再次表明在本次调查背景下,MBFG 归类法识别浮游植物群落与环境状态上优于其他归类法.

综上所述, 5 种归类法中 MBFG 和门类法能更好地捕捉到浮游植物群落沿环境梯度的变化. 该调查结果与推测一致,在同一季节内对同一区域的水库调查中,选择 MBFG 或门类归类法来描述浮游植物群落与环境因子的响应关系更为恰当.

4　结论

(1)8 座水库的环境差异主要体现在溶解性营养盐的差异上,总营养状态、温度和有效光场的环境梯度显著小于溶解性营养盐的梯度.

(2)5 种归类方法下计算的群落距离有显著差异,以种和属归类单元计算的群落距离较大,但样点内归类单元间的差异和样点间分类单元的变化均小于其他归类方法.

(3)MBFG 和门类归类法下的群落距离与环境梯度有显著相关性,pH 值和PO_4^{3-}-P浓度梯度是群落梯度的显著解释变量.

(4)MBFG 归类法能更好识别水库之间溶解性营养盐梯度和营养状态变化.

参考文献:

[1] 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.

[2] Padisák J, Borics G, Grigorszky 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.

[3] Coesel P F M. The relevance of desmids in the biological typology and evaluation of fresh waters[J]. Hydrobiological Bulletin, 1975, **9**(3): 93-101.

[4] Wolowski K, Poniewozik M, Walne P L. Pigmented euglenophytes of the genera Euglena, Euglenaria, Lepocinclis, Phacus and Monomorphina from the Southeastern United States [J]. Polish Botanical Journal, 2013, **58**(2): 659-685.

[5] 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.

[6] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisák J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology[J]. Freshwater Biology, 2015, **60**(4): 603-619.

[7] Salmaso N, Padisák J. Morpho-functional groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany)[J]. Hydrobiologia, 2007, **578**(1): 97-112.

[8] Litchman E, de Tezanos Pinto P, Klausmeier C A, *et al*. Linking traits to species diversity and community structure in phytoplankton[J]. Hydrobiologia, 2010, **653**(1): 15-28.

[9] Litchman E, Klausmeier C A, Schofield O M, *et al*. The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: scaling from cellular to ecosystem level [J].

Ecology Letters, 2007, **10**(12): 1170-1181.

[10] Komárek J. Review of the cyanobacterial genera implying planktic species after recent taxonomic revisions according to polyphasic methods: state as of 2014[J]. Hydrobiologia, 2016, **764**(1): 259-270.

[11] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(6): 1833-1840.
Yang W, Zhu J Y, Lu K H, *et al*. The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(6): 1833-1840.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, *et al*. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton[J]. Freshwater Biology, 2010, **55**(3): 614-627.

[15] Kruk C, Segura A M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups[J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 191-202.

[16] Huszar V L M, Nabout J C, Appel M O, *et al*. Environmental and not spatial processes (directional and non-directional) shape the phytoplankton composition and functional groups in a large subtropical river basin[J]. Journal of Plankton Research, 2015, **37**(6): 1190-1200.

[17] Sarmento H, Descy J P. Use of marker pigments and functional groups for assessing the status of phytoplankton assemblages in lakes[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, **20**(6): 1001-1011.

[18] Hu R, Han B P, Naselli-Flores L. Comparing biological classifications of freshwater phytoplankton: a case study from South China[J]. Hydrobiologia, 2013, **701**(1): 219-233.

[19] Cupertino A, Gücker B, Von Rückert G, *et al*. Phytoplankton assemblage composition as an environmental indicator in routine lentic monitoring: taxonomic versus functional groups [J]. Ecological Indicators, 2019, **101**: 522-532.

[20] 朱忆秋, 吕俊, 李乔臻, 等. 亚热带水库浮游植物群落的季节变化及其与环境的关系: 两种功能群分类法的比较[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(6): 2079-2086.
Zhu Y Q, Lyu J, Li Q Z, *et al*. Seasonal variation of phytoplankton community and its relationship with environment in subtropical reservoirs: a comparison between two methods of functional groups classification[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(6): 2079-2086.

[21] 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.

[22] Kunz T J, Diehl S. Phytoplankton, light and nutrients along a gradient of mixing depth: a field test of producer-resource theory [J]. Freshwater Biology, 2003, **48**(6): 1050-1063.

[23] Chen X C, Wang X D, Wu D Y, *et al*. Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya reservoir, China[J]. Limnology, 2009, **10**(3): 159-165.

[24] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3049-3056.
Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al*. Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3049-3056.

[25] Fee E J, Hecky R E, Kasian S E M, *et al*. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1996, **41**(5): 912-920.

[26] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.
Lin S J, He L J, Huang P S, *et al*. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. Ecologic Science, 2005, **24**(1): 9-11.

[27] 陈纯, 李思嘉, 胡韧, 等. 四种浮游植物生物量计算方法的比较分析[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 927-935.
Chen C, Li S J, Hu R, *et al*. Comparative analysis of four methods for calculating biomass of phytoplankton community[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 927-935.

[28] Lin Q Q, Han B P, Lin J X, *et al*, Reservoir water supply and reservoir eutrophication in Guangdong Province (South China) [A]. In: International Lake Environment Committee (Ed.). Proceedings of 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes[C]. Shiga, Japan: Shiga Prefectural Government, 2001. 269-272.

[29] Legendre P, Gallagher E D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data[J]. Oecologia, 2001, **129**(2): 271-280.

[30] Legendre P, De Cáceres M. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning[J]. Ecology Letters, 2013, **16**(8): 951-963.

[31] 刘金福, 胡韧, 段雪珂, 等. 长孢藻(*Dolichospermum*)丝体长度与丰度的变化关系及其水华指示作用[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(3): 496-502.
Liu J F, Hu R, Duan X K, *et al*. The relationship between abundance and filament length of *Dolichospermum* and its indicativefunction of bloom [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(3): 496-502.

[32] Grobbelaar J U. Do light/dark cycles of medium frequency enhance phytoplankton productivity? [J]. Journal of Applied Phycology, 1989, **1**(4): 333-340.

[33] Jackson G A. Effect of mixed layer depth on phytoplankton removal by coagulation and on the critical depth concept[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2008, **55**(6): 766-776.

[34] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.

[35] 林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J]. 生态学报, 2003, **23**(11): 2278-2284.
Lin Q Q, Hu R, Han B P. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, **23**(11): 2278-2284.

[36] 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的响应[J]. 生态学报, 2003, **23**(6): 1101-1108.
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.

[37] Xiao L J, Hu R, Peng L, *et al*. Dissimilarity of phytoplankton assemblages in two connected tropical reservoirs: effects of water transportation and environmental filtering [J]. Hydrobiologia, 2016, **764**(1): 127-138.

[38] Padisák J, Vasas, G, Borics G. Phycogeography of freshwater phytoplankton: traditional knowledge and new molecular tools [J]. Hydrobiologia, 2016, **764**(1): 3-27.

[39] Xiao L J, Zhu Y Q, Yang Y, *et al*. Species-based classification reveals spatial processes of phytoplankton meta-communities better than functional group approaches: a case study from three freshwater lake regions in China[J]. Hydrobiologia, 2018, **811**(1): 313-324.

[40] Naselli-Flores L, Padisák J. Blowing in the wind: how many roads can a phytoplanktont walk down? A synthesis on phytoplankton biogeography and spatial processes [J]. Hydrobiologia, 2016, **764**(1): 303-313.

[41] Litchman E, Edwards K F, Klausmeier C A, *et al*. Phytoplankton niches, traits and eco-evolutionary responses to global environmental change [J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, **470**: 235-248.

[42] Hoek C, Mann D G, Jahns H M. Algae: an introduction to phycology[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

[43] Hutchinson G E. The paradox of the plankton[J]. The American Naturalist, 1961, **95**(882): 137-145.

[44] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖北部隐藻生物量时空动态[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 142-148.
Liu X, Lu X H, Chen Y W. Temporal and spatial dynamics of Cryptophytes biomass in the north of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(1): 142-148.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2020

CONTENTS