

基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探*

王雅文¹, 杨扬^{1,2**}, 潘鸿¹, 何文祥^{1,2}, 乔永民^{1,2}, 陶然^{1,2}

(1: 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

(2: 热带亚热带水生生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632)

摘要: 2012年1月和7月通过对广东省境内10座供水水库进行水生态调查, 采集48个站点的浮游植物样品, 对其进行浮游植物功能类群的划分及聚类分析. 调查区共鉴定出8门104属207种浮游植物, 主要分属于30个功能类群. 聚类分析将这10座水库聚合为4个类型区, 第一生态类型区包括南水和新丰江水库, 以适应低营养环境的功能类群为主; 第二生态类型区包括飞来峡、白盆珠和新丰江水库, 主要以中营养型和广谱型为优势功能类群; 第三生态类型区和第四生态类型区包括高州、公平、大水桥、鹤地和汤溪水库, 其中高州和公平水库主要以富营养型和广谱型为优势功能类群, 其它水库则以适应富营养环境的功能类群为绝对优势类群. 上述4个类型区浮游植物优势功能类群差异较大, 且与水质营养状态有良好的响应关系.

关键词: 浮游植物; 功能类群; 生态分区; 大型水库

Ecological region classification of 10 key reservoirs in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups

WANG Yawen¹, YANG Yang^{1,2}, PAN Hong¹, HE Wenxiang^{1,2}, QIAO Yongmin^{1,2} & TAO Ran^{1,2}

(1: *Research Center of Hydrobiology, College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China*)

(2: *Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Ministry of Education, Guangzhou 510632, P. R. China*)

Abstract: Ecological investigations on the community structure of phytoplankton in 10 large reservoirs of Guangdong Province, which played a great role in water supply, were conducted in January and July, 2012. A total of 207 species of phytoplankton were identified, belonging to 104 genera of 8 phyla, which were classified into 30 phytoplankton functional groups. According to the cluster analysis, the ten reservoirs were separated into four ecological regions. Ecological Region One included Nanshui and Xinfengjiang reservoirs, where dominant groups were Oligotropher-adaptive groups. Ecological Region Two included Feilaixia, Baipenzhu and Fengshuba reservoirs, where dominant groups were Mesotropher-adaptive groups and broad-spectrum groups. Additionally, Ecological Region Three and Four contained Gaozhou, Gongping, Dashuiqiao, Hedi and Tangxi reservoirs, where Gaozhou and Gongping reservoirs were characterized by Eutropher-adaptive groups and broad-spectrum groups, while other reservoirs were dominated by Eutropher-adaptive groups. The representative phytoplankton functional groups were significantly different among four regions, and corresponded well with water nutrient conditions.

Keywords: Phytoplankton; functional group; ecological region; large reservoirs

水生态区概念起源于美国, 被认为是具有相对同质的淡水生态系统或生物体及其与环境相互关系的土地单元^[1], 目的是为水生态系统的研究、评价、修复和管理提供一个合适的空间单元^[2]. 该概念自提出后很快被应用到水生态系统的管理中, 如河流生物监测与评价、湖泊水库管理、水生生物区系管理等^[3-5], 并且被

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07206-004). 2013-04-28 收稿; 2013-05-27 收修改稿. 王雅文(1987~), 女, 硕士研究生; E-mail: mingwu050793@yeah.net.

** 通信作者; E-mail: yangyang@scies.org.

认为可表征水生生态系统空间分异的特点,在指导水质管理和制定水质标准中具有显著效果。

生物体能够整合环境在时间尺度上的压力效应信息,可能比简单的化学物质浓度更能够反映生态系统的时间变化特征,能够从生物学角度对环境状况进行监测和评价^[6]。因此,国际上将生物指标选作水体管理的重要分区指标之一,认为通过发展水质生物基准可以达到水质评价及生物多样性保护的目标^[7-8]。浮游植物作为水生生态系统中重要的初级生产者,其群落结构特征能够敏感地反映水生态系统对水环境污染和生态破坏的响应,从生物学的角度评价水环境状况。近年,Reynolds 等和 Padisák 等依据浮游植物对特定环境因子的敏感性和耐受性,将在某一已知环境中共同占优势的不同种群的浮游植物归纳为同一功能类群^[9-10],很大程度上弥补了浮游植物个体组成随机性大、种类适应生境相互重叠等不足^[11]。目前,有关浮游植物功能类群在热带、亚热带地区湖泊、水库及河流等水体中的空间异质性、季节演替规律及其与环境相互关系等已成为研究热点^[12-14],已有成果表明功能类群分类方法包含着完整的浮游植物生存策略信息,能够简单而有效地描述热带、亚热带地区不同类型水体的生物和生境特征,具有作为水体管理分区指标的潜力。

广东省虽是水资源大省,但时空分布不均匀,水库作为调控水资源的重要手段,其水资源质量及供水安全显得尤为重要。为促进水库资源的有效管理与保护,建立科学的水库生态分区具有良好的现实意义。为此,本文以广东省境内大型供水水库为研究对象,试图分析浮游植物功能类群与水质之间的响应关系,进而探讨以浮游植物功能类群为分区指标对水库进行生态区划分的有效性和可行性,可为水库水功能保护与水质管理目标的实现以及流域水资源开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 水库基本概况

选择广东省 10 座大型水库为研究对象,包括粤西沿海的大水桥、鹤地和高州水库,北江的南水和飞来峡水库,西江的飞来峡水库,珠江三角洲的飞来峡水库,东江的飞来峡水库,粤东沿海的公平和汤溪水库(图 1 和表 1)。

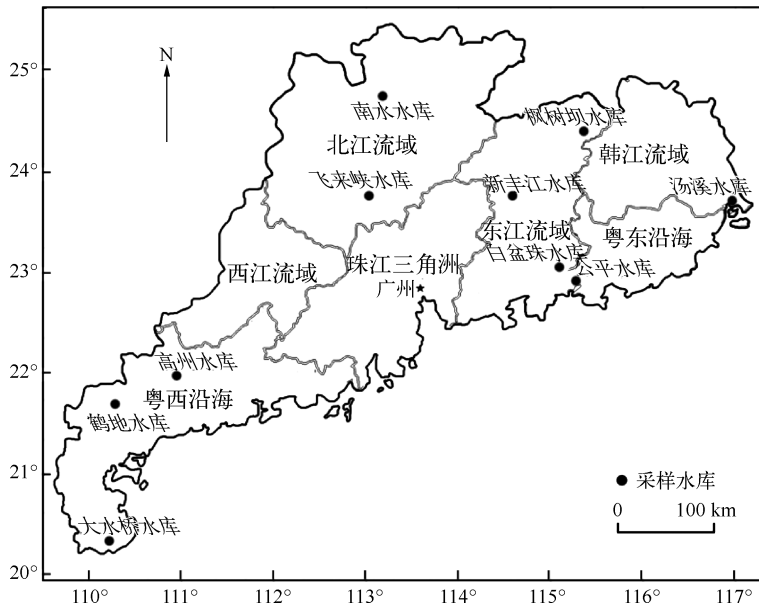


图 1 广东省 10 座调查水库分布

Fig. 1 Location of the ten investigated reservoirs in Guangdong Province

1.2 采样点设置

在各水库的入库口、大坝、取水口和库中心等处设置代表性采样点共 48 个。其中,大水桥水库 5 个、鹤地水库 3 个、高州水库 7 个、南水水库 7 个、飞来峡水库 3 个、白盆珠水库 4 个、新丰江水库 4 个、枫树坝水库 3 个、公平水库 8 个、汤溪水库 4 个。

表 1 10 座调查水库的基本情况^[15]

Tab. 1 Basic parameters of ten investigated reservoirs

水系	水库	所在行政区	集雨面积/ (km ²)	总库容/ (×10 ⁴ m ³)	兴利库容/ (×10 ⁴ m ³)	功能	2020 年水质 管理目标
粤西沿海	大水桥	湛江徐闻县	196	14297	9988	供水、灌溉	II
粤西沿海	鹤地	湛江廉江市	1495	114400	49900	供水、发电、防洪、灌溉、发电	II
粤西沿海	高州	茂名高州市	1022	115106	75980	供水、发电、灌溉、航运、养殖	II
北江流域	南水	韶关乳源县	608	124300	71000	供水、发电、防洪、养殖	II
北江流域	飞来峡	清远市	34097	190400	42250	航运、发电、供水	II
东江流域	白盆珠	惠州惠东县	856	122000	38500	灌溉、发电、航运、防洪	II
东江流域	新丰江	河源市	5730	1389600	649100	供水、旅游	II
东江流域	枫树坝	河源龙川县	5150	193200	125000	供水、发电	II
粤东沿海	公平	汕尾海丰县	317	33070	14610	供水、发电、灌溉	II
粤东沿海	汤溪	潮州饶平县	667	38100	27470	供水、发电	II

1.3 样品采集与分析鉴定

采样时间为 2012 年 1 月(枯水期)和 7 月(丰水期). 于表层 0.5 m 处采集水样 1 L, 用 5% 的鲁哥试剂固定, 在实验室内沉淀浓缩至 20 ml, 在显微镜(Olympus)下对浮游植物进行分类和计数. 浮游植物的分类鉴定参照文献[16-17], 并依据 Padisák 等的浮游植物功能类群分类方法对浮游植物进行功能类群划分^[10]. 水温和溶解氧(DO)在采样现场用多参数水质监测仪(YSI-85)进行测定, 采用塞氏盘测定透明度(SD). 同时采集表层水样 2.5 L, 在 8 h 内运回实验室, 并依据《水和废水监测分析方法》中的标准方法对总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl. a)进行测定^[18].

1.4 数据统计

采用包括 Chl. a、TP、COD_{Mn}、SD 在内的综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 来评价水库营养状态^[19], 公式为 $TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^i W_j \cdot TLI(j)$. 其中, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数. 当 $TLI(\Sigma) < 20$ 时, 为贫营养化状态; $20 \leq TLI(\Sigma) < 30$ 时, 为贫中营养状态; $30 \leq TLI(\Sigma) < 40$ 时, 为中营养状态; $40 \leq TLI(\Sigma) < 50$ 时, 为中富营养状态; $TLI(\Sigma) \geq 50$ 时, 为富营养状态. 采用系统聚类法对 10 座水库进行聚类分析, 由于最近邻体法和最远邻体法具有空间压缩性和扩张性, 因此选择系统默认的组间连接法, 即类平均法. 以下数据为各水库样点的两次采样数据的算术平均值. 用 Excel 软件作图; 采用统计软件 SPSS 18.0 对数据进行分析.

2 结果

2.1 水质及营养状态指数

水质监测结果见表 2, 南水、新丰江、飞来峡、白盆珠和枫树坝水库除 TN 外其它指标均达到《国家地表水环境质量标准》(GB/T 3838-2002) II 类标准要求, 而大水桥、鹤地、高州、公平和汤溪水库基本满足 GB/T 3838-2002 III 类标准要求.

利用综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 评价 10 座水库营养状态(表 2), 其中南水和新丰江水库为贫中营养型水库, 飞来峡、白盆珠和枫树坝水库为中营养型水库, 高州和公平水库为中富营养型水库, 大水桥、鹤地和汤溪水库为富营养型水库.

2.2 浮游植物功能类群结构特征

2.2.1 浮游植物群落结构组成及优势功能类群分类 此次调查的 10 座水库共鉴定出浮游植物 8 门 104 属 207 种(含变种). 其中, 绿藻门种类数最多, 为 45 属 101 种, 占全部种类数的 46%; 其次为蓝藻门 28 属 46 种, 占 22%; 硅藻门 17 属 35 种, 占 16%; 甲藻门 5 属 11 种, 占 5%; 裸藻门 4 属 9 种, 占 4%; 隐藻门 2 属 2 种; 金藻门 2 属 2 种; 黄藻门 1 属 1 种.

表 2 10 座调查水库的水质参数及营养状态指数

Tab. 2 Parameters of water quality and TSI index in the ten investigated reservoirs

水库	水温/°C	SD/ m	DO/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	Chl. a/ (μg/L)	TLI(Σ)
大水桥	24.69 ± 0.64	1.20 ± 0.18	8.25 ± 1.00	1.26 ± 0.08	0.06 ± 0.03	2.81 ± 0.31	20.07 ± 0.68	51.7
鹤地	23.41 ± 1.12	1.41 ± 0.23	7.42 ± 0.57	1.56 ± 0.04	0.11 ± 0.02	4.09 ± 0.36	22.11 ± 2.57	53.8
高州	25.05 ± 1.00	1.61 ± 0.14	7.06 ± 1.76	0.76 ± 0.08	0.08 ± 0.02	2.12 ± 0.08	8.64 ± 2.07	47.5
南水	20.81 ± 2.12	4.66 ± 0.14	8.32 ± 0.94	0.34 ± 0.05	0.01 ± 0.01	0.96 ± 0.12	1.52 ± 0.38	21.6
飞来峡	22.23 ± 0.19	3.10 ± 0.20	9.27 ± 0.15	0.89 ± 0.07	0.02 ± 0.01	3.47 ± 0.11	4.49 ± 1.76	39.0
白盆珠	24.92 ± 0.57	2.73 ± 0.10	8.13 ± 0.56	0.79 ± 0.07	0.02 ± 0.01	1.85 ± 0.38	3.06 ± 0.91	31.1
新丰江	22.43 ± 1.43	4.65 ± 0.27	6.11 ± 1.02	0.38 ± 0.08	0.02 ± 0.01	1.16 ± 0.30	1.23 ± 0.08	27.3
枫树坝	25.15 ± 0.36	3.27 ± 0.53	6.71 ± 0.67	0.63 ± 0.03	0.03 ± 0.01	2.48 ± 0.56	3.09 ± 0.80	34.7
公平	24.74 ± 0.67	1.87 ± 0.26	6.84 ± 1.54	0.79 ± 0.12	0.06 ± 0.01	2.62 ± 0.55	11.32 ± 4.07	48.7
汤溪	25.31 ± 0.67	1.30 ± 0.30	8.34 ± 1.02	1.27 ± 0.15	0.08 ± 0.01	4.37 ± 0.63	26.20 ± 2.43	51.2
Ⅱ类水	—	—	≥6	≤0.5	≤0.025	≤4	—	—
Ⅲ类水	—	—	≥5	≤1.0	≤0.05	≤6	—	—

依据浮游植物的生境、耐受性和敏感性可将其划分成 30 个功能类群^[10](表 3)。从浮游植物功能类群在 10 座水库中的空间分布来看,南水和新丰江水库以 A、E、L₀ 和 Y 等适应贫营养水体及营养广谱型功能类群为主,飞来峡、白盆珠和枫树坝水库以 B、N_A、L₀ 和 Y 等适应中营养、贫-中营养水体和营养广谱型功能类群为主,高州和公平水库基本以适应中营养、富营养水体和营养广谱型的 B、C、P、L₀ 和 Y 等功能类群为主,而大水桥、鹤地和汤溪水库则以 C、P、S1 和 W2 等适应富营养水体的功能类群为主。

表 3 10 座调查水库浮游植物功能类群名录

Tab. 3 The functional group of phytoplankton in the ten investigated reservoirs

序号	功能类群代码	代表物种	序号	功能类群代码	代表物种
1	A	根管藻属、小环藻属等	16	X3	小球藻属等
2	B	冠盘藻属、小环藻属等	17	X2	衣藻属、翼膜藻属等
3	C	星杆藻属、小环藻属等	18	X1	纤维藻属、小球藻属等
4	D	针杆藻属、菱形藻属等	19	E	锥囊藻属、鱼鳞藻属
5	N	鼓藻属、角星鼓藻属等	20	Y	隐藻属、薄甲藻属等
6	N _A	顶接鼓藻属、凹顶鼓藻属等	21	F	蹄形藻属、肾形藻属等
7	P	直链藻属、新月藻属等	22	G	空球藻属、实球藻属等
8	M	微囊藻属	23	J	栅藻属、十字藻属等
9	MP	脆杆藻属、舟形藻属等	24	K	隐球藻属、聚球藻属等
10	T	双胞藻属	25	H1	水华鱼腥藻
11	T _C	贾丝藻属、颤藻属等	26	L ₀	多甲藻属、隐藻属等
12	T _B	异极藻属、曲壳藻属等	27	L _M	微囊藻属、角甲藻属等
13	S1	贾丝藻属、席藻属等	28	W1	裸藻属
14	S2	螺旋藻属、节旋藻属等	29	W2	囊裸藻属、陀螺藻属等
15	S _N	尖头藻属、鱼腥藻属等	30	W ₀	衣藻属、颤藻属等

2.2.2 浮游植物功能类群的生物量动态 浮游植物总生物量均值为 3.31 mg/L,变动范围为 0.82 ~ 7.22 mg/L(图 2)。其中以南水和新丰江水库生物量最低,分别为 0.28 ~ 1.11 和 0.59 ~ 1.44 mg/L,其中 A、F、L₀ 和 N 功能类群生物量最多,生物量百分比在 8% ~ 21% 之间,4 个类群共占 55% ~ 65%。飞来峡、白盆珠和枫树坝水库总生物量分别为 1.24 ~ 1.89、0.92 ~ 1.67 和 0.94 ~ 1.58 mg/L,略高于南水和新丰江水库。以 L₀ 为优势功能类群,生物量占总生物量的 33%、28% 和 28%,其余如 B、N、F 和 N_A 4 个功能类群生物量百分比在 4% ~ 33% 之间,5 个类群共占 73% ~ 80%。高州和公平水库总生物量分别为 0.90 ~ 3.67 和 2.65 ~ 3.88 mg/L,明显高于飞来峡、白盆珠和枫树坝水库。主要优势功能类群为 P 和 Y,生物量占总生物量的 48% 和

46%,其余如C、F、J、B和N类群,生物量百分比在2%~9%之间,7个类群共占78%~81%。大水桥、鹤地和汤溪水库总生物量最高,分别为5.67~7.02、5.87~8.27和6.09~7.20 mg/L,主要优势类群为S1和P,生物量占总生物量的44%~51%,其次是Y、D、J和W2类群,生物量百分比在3%~16%之间,7个类群共占72%~83%。

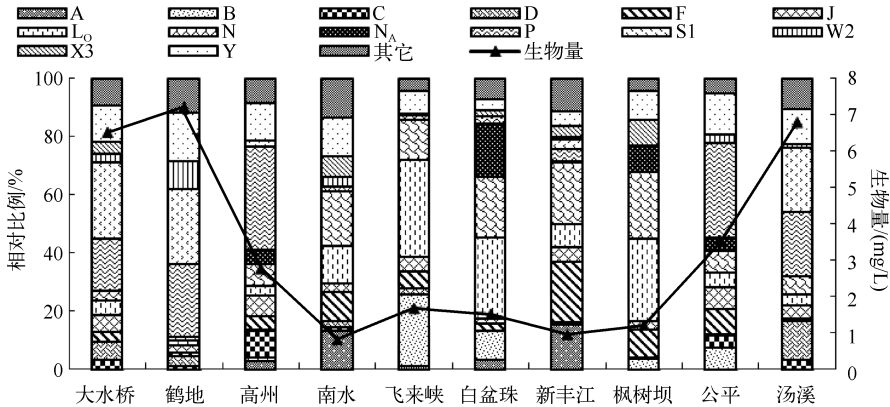


图2 10座调查水库中浮游植物功能类群的相对生物量及总生物量

Fig. 2 The relative proportions of biomass and total biomass of each phytoplankton functional group in the ten investigated reservoirs

2.3 聚类分析

以浮游植物功能类群组成和生物量为指标对目标水库进行聚类分析,并分别以水质参数和综合营养状态指数为指标对目标水库进行聚类。结果表明,基于浮游植物功能类群结构特征的聚类结果与基于综合营养状态指数的聚类分析结果一致,均将10座水库划分为4类水体(图3a和图3b),飞来峡、枫树坝和白盆珠水库聚为一类,南水和新丰江水库聚为一类,高州和公平水库聚为一类,大水桥、汤溪和鹤地水库聚为一类。而基于水质参数的聚类分析结果与前两者相比,除将贫、中营养状态的南水、新丰江、白盆珠、枫树坝和飞来峡水库聚为一类外,结果也基本一致(图3c)。

3 讨论

3.1 水库优势浮游植物功能类群

根据水体特征,本研究所调查的10座水库水体可分为4种营养类型:贫-中营养型水库(南水、新丰江水库)、中营养型水库(飞来峡、白盆珠和枫树坝水库)、中-富营养型水库(高州和公平水库)以及富营养型水库(大水桥、鹤地和汤溪水库),研究表明其浮游植物优势功能类群存在显著差异。

南水和新丰江水库浮游植物优势功能类群以A、F和L₀为主,A和F功能类群多出现在营养贫瘠和中营养水体,而L₀功能类群的适应生境较广,在贫营养到富营养水体中均有出现^[9-10]。三者的典型生境虽不相同,但有研究表明它们均能适应低营养环境^[20]。飞来峡、白盆珠和枫树坝水库的浮游植物优势功能类群除了广谱型的L₀类群外,还包括了典型生境为中营养水体的N和B功能类群^[12-13]。高州和公平水库的浮游植物优势功能类群为Y和P功能类群。研究认为Y和L₀功能类群虽都属于广谱型类群,但Y功能类群更喜好有机含量丰富的水体^[10,13],而P功能类群也喜好富营养化水体^[9-10]。大水桥、鹤地和汤溪水库以富营养的P、S1、J、W2和X1功能类群以及喜好有机质丰富水体的Y功能类群为绝对优势类群,罕见适应其它营养环境尤其是低营养环境的类群^[9-10]。

浮游植物是水生生态系统的主要组成部分,是水生食物链的基础,它与水体的无机环境直接相连,能够迅速对外界环境变化做出反应。浮游植物优势功能类群类型反映了水体的水质状况,与营养状态评价趋势一致,表明二者具有良好的响应关系。

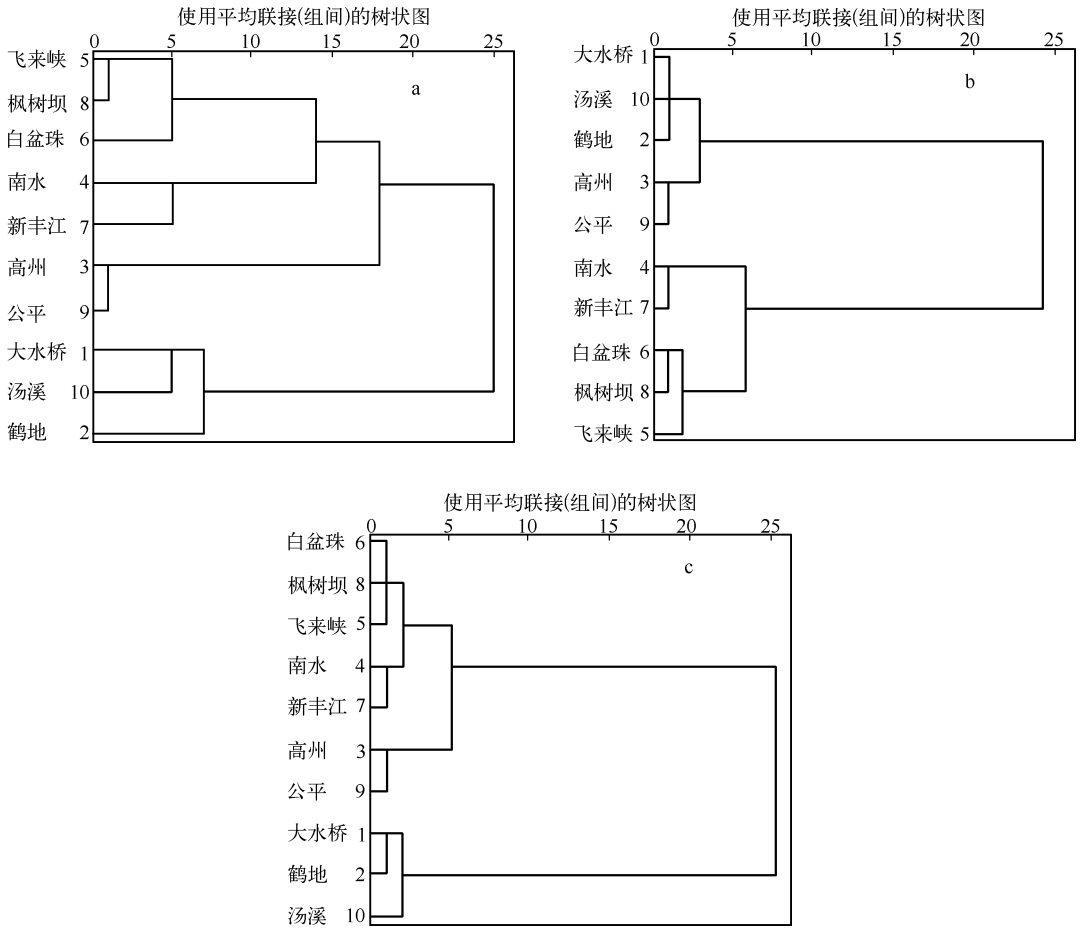


图3 基于不同特征参数的广东省10座供水水库聚类分析图 (a为功能类群;b为TLI指数;c为水质参数)

Fig. 3 The cluster analyse of different characteristic parameters in the ten investigated reservoirs (a :phytoplankton functional groups; b: TLI index; c: parameters of water quality)

3.2 基于浮游植物功能类群的生态分区特征

通过对10座水库的浮游植物功能类群组成特征进行聚类统计分析,结合环境指标差异性分析结果可知:10座水库可以分为4个生态类型区,各生态类型区优势功能类群差异较大,营养盐是导致这种差异的主要原因。

第一生态类型区(南水和新丰江水库)位于北江和东江的上游地区,该水域以适应低营养环境的类群为主要优势功能类群,辅以广谱型功能类群.生物量在4个生态区中相对最低.该水域营养盐浓度相对较低,为贫-中营养水域,不适宜藻类的大量繁殖,同时也限制了大多数浮游植物种类的生长。

第二生态类型区(飞来峡、白盆珠和枫树坝水库)位于北江中游地区和东江中游地区,以适应中营养环境和广谱型功能类群为优势,生物量略高于第一生态类型区.该区域营养盐浓度相较于第一生态类型区有所增加,为中营养水域,区域内浮游植物个体生物量增加,一些适应中营养环境的功能类群迅速生长并形成优势。

位于粤东沿海和粤西沿海的第三生态类型区和第四生态类型区的营养水平较前两区高,比较适合广谱型、中营养甚至高营养型功能类群的生长繁殖.其中,第三生态类型区(高州和公平水库)表现出中富营养水体特征,浮游植物种类较多,个体生物量大幅增加,以适应富营养环境的功能类群为主,以营养广谱型类群

为辅;第四生态类型区(大水桥、鹤地和汤溪水库)营养盐浓度与生物量明显高于第三生态类型区,表现出富营养水体特征,适应富营养环境的功能类群占绝对优势,而浮游植物种类则较第三生态类型区有所减少。

结果表明 10 座水库所属的 4 个生态类型区的水质、浮游植物功能类群结构存在差异,从多元统计分析的角度验证了调查水库按照 4 个生态类型区进行分析的可行性。

3.3 基于浮游植物功能类群的生态分区优势

浮游植物功能类群是具有相似适应特征的浮游植物的集合,由于强调的是集群的概念,避免了由于某个或者少数几个偶见种在分析群落特征时造成的干扰^[11]。本文基于功能类群对广东省 10 座供水水库进行生态类型区分研究,分区结果能够将位于不同流域、具有相同或相似营养类型的优势功能类群的水库聚集起来,说明该分区方法能够突破传统意义上的行政区划和地理区划,从生态学的角度有效描述水生生态系统的生态特征差异;同时,该方法的分区结果与水库的营养状态及水质有显著的响应关系。

综合分析各生态区所表现出来的生态特征,第四生态类型区水库水生态系统已经受损,富营养生物大量繁殖,生物多样性向单一化发展。因此,此区需要切断外源营养物质来源,减少内源性营养物质负荷,同时实施一定的生态修复技术以保障与促进区域生态环境改善和生态系统恢复;第三生态类型区水库水生态系统已受到一定程度氮、磷污染,应通过加强监管、严控污染物排放等措施对该生态区进行密切关注,预防与修复相结合。对于第一生态类型区和第二生态类型区则应坚持预防为主的管理原则。

致谢:本研究在文章修改过程中得到戴玉女、唐小燕、王铭、李丽、麦晓蓓、姚达章等的协作与帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

4 参考文献

- [1] Omernik JM. Ecoregions of the Conterminous United States (Map Supplement). *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, **77**(1): 118-251.
- [2] Kart JR, Dudley DR. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 1981, **5**: 55-68.
- [3] Hughes RM, Larsen DP, Omernik JM. Regional reference sites: A method for assessing stream potentials. *Environmental Management*, 1986, **10**: 629-635.
- [4] USEPA. Nutrient criteria technical guidance manual lake and reservoirs (First Edition). EPA-822-B00-001, 2000.
- [5] Whittier T, Hughes R, Larsen D. Correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1988, **45**: 1264-1278.
- [6] 沈惠麟. 生物监测和生物标志物——理论基础及应用. 北京:北京大学医学出版社,2006:45-47.
- [7] Thieme M, Abell R, Stiassny MLJ *et al.* Freshwater ecoregions of Africa and Madagascar: A conservation assessment. Washington DC: Island Press, 2005.
- [8] Omernik JM, Bailey RG. Distinguishing between watershed and ecoregion. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, **33**: 935-949.
- [9] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [10] Padišák J, Luciane O, Luigi N. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**: 1-19.
- [11] Padišák 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. *Hydrobiologia*, 2006, **553**: 1-14.
- [12] Vanessa B, Vera LM, Luciane O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, **628**: 137-151.
- [13] Luigi N, Rossella B. Phytoplankton dynamics in permanent and temporary Mediterranean waters: is the game hard to play because of hydrological disturbance? *Hydrobiologia*, 2012, **698**: 147-159.
- [14] 刘足根,张柱,张萌. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 375-384.
- [15] 广东省水利厅. 广东省水功能区划, 2007.
- [16] 胡鸿钧. 中国淡水藻类. 北京:科学出版社, 2006.
- [17] Wehr JD, Robert G. Freshwater algae of North America: Ecology and classification. California: Academic Press, 2002.
- [18] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法:第4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [20] Xiao LJ, Wang T, Hu R *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. *Water Research*, 2011, **45**: 5099-5109.