

广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应

林秋奇, 胡 韧, 段舜山, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要:于 2000 年调查了广东省 18 座大中型供水水库的水质现状并探讨了浮游生物对营养水平的响应。总氮、总磷、透明度和叶绿素 a 分别为 0.15~7.15mg/L、0.003~0.387mg/L、0.4~6.3m 和 0.6~32.3 μ g/L。总氮、总磷、透明度均与叶绿素 a 呈较高的相关性。根据这 4 个因子的综合加权营养状态指数为 23.7~55.1, 季节差异不大, 大多数水库处于中营养状态。

金藻在中-富及富营养型水库中没有分布, 而蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻在调查水库中均有比较广的营养生态位, 但它们的密度及相对优势度在各营养型水库中有一定的差异。高营养水平水库有较高的细胞密度和叶绿素 a 含量。营养水平较低的水库浮游植物以硅藻-甲藻、硅藻-绿藻或金藻-硅藻为主; 营养水平较高的水库以蓝藻-硅藻或蓝藻-绿藻为主, 并有较高的裸藻密度。浮游动物基本上以桡足类为优势种群, 但在中-富营养和富营养型水库中, 哲水蚤种类比低营养型水库中少。枝角类优势种类在各营养型水库差别不大。轮虫对水体营养水平的响应相对比较显著。低营养水平水库的轮虫以广营养型、中营养型或寡中营养型种类为主, 种类数目比较少; 富营养和中-富营养型水库的轮虫以喜在中营养到富营养条件下生长的种类为主, 且轮虫种类数目比较多。

关键词:营养状态, 浮游生物, 水库

Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province

LIN Qiu-Qi, HU Ren, DUAN Shun-Shan, HAN Bo-Ping (*Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1101~1108.

Abstract: The trophic states of 18 drinking water supply reservoirs and the response of plankton were surveyed in Guangdong Province in 2000. Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Secchi disk depth (SD) varied from 0.15 to 7.15mg/L, 0.003 to 0.387mg/L and 0.4 to 6.3m, respectively. They all showed high correlation with chlorophyll-a that varied between 0.6 and 32.3 μ g/m³. Trophic state indexes (TSI) based on TN, TP, SD and chlorophyll-a were between 23.7 and 55.1, without apparent seasonal variation. Among the investigated reservoirs, two were oligotrophic, four oligo-mesotrophic, three meso-

基金项目: 教育部优秀青年教师基金、国家自然科学基金(39900022)和广东省科技攻关(2KM06103S)等资助

收稿日期: 2002-07-28; 修订日期: 2003-01-20

作者简介: 林秋奇(1973~), 男, 讲师。主要从事水域生态学研究。E-mail: linqiuqi@21cn.com

本研究得到了广东省水利厅和广东省水文局属下各分局的大力支持; 同时本单位的王朝晖老师也参与了部分工作, 在此表示感谢。

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: The Chinese Education Ministry Grant, Natural Science Foundation of China (No. 39900022) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2KM06103S)

Received date: 2002-07-28 Accepted date: 2003-01-20

Biography: LIN Qiu-Qi, Majoring in aquatic ecology. E-mail: linqiuqi@21cn.com

eutrophic, two eutrophic and the others mesotrophic. Reservoirs in the coastal area had higher trophic level, especially in Pearl delta area that is quite developed in Guangdong Province.

In the oligotrophic and oligo-mesotrophic reservoirs, Chlorophyta and Bacillariophyta were the most important taxa and the proportion of Chrysophyta was distinctly higher than that in the other trophic level reservoirs, while that of Cyanobacteria was low. In the mesotrophic reservoirs, Chlorophyta and Bacillariophyta were also the important taxa, but the proportion of Cyanobacteria increased greatly with the increasing of trophic level. In the meso-eutrophic and eutrophic reservoirs, Cyanobacteria was the dominant group, but other groups such as Chlorophyta, Bacillariophyta and Euglenophyta were also well represented. The response of crustacean zooplankton to trophic status was not distinct, for fish played a key role in structuring zooplankton community. Heavy predation from the juvenile and adult of filter-feeding fish might result in the relative scarcity of Cladocera and Calanoida, notably the efficient filter-feeder *Daphnia* in most reservoirs. Cladocera were primarily dominated either by *Bosmina longirostris*, *Bosminopsis deitersi*, *Ceriodaphnia* spp. or *Diaphanosoma brachyurum*, and Copepoda by Cyclopoida. Compared with crustacean zooplankton, rotifer responded to trophic status more distinctly. In the meso-eutrophic and eutrophic reservoirs, more rotifer species was found and eutrophic indicators, *Brachionus* spp., *Trichocerca* spp., *Diurella stylata* or *Asplanchna priodonta* were the dominant groups. In the other trophic level reservoirs, the dominant groups were species with a wide ecological spectrum and oligotrophic indicators.

Key words: trophic status; plankton; reservoir

文章编号:1000-0933(2003)06-1101-08 中图分类号:Q14,Q938.8,TV697 文献标识码:A

广东省地处我国南部,年均降水量 1777mm。由于自然湖泊面积仅 13km²,兴建水库成为对水资源时空分布调节的有效手段之一。目前全省总库容 398 亿 m³。1998 年全省需水量 447 亿 m³,近三分之一为水库供水。同时,5 座水库每年分别向香港和澳门供水 11 亿 m³ 和 8.31×10⁶m³。水库供水在粤港澳三地起着十分重要的作用。

为了保证水库供水的可持续性,对水库水质的保护异常重要。在 1983~1985 年,中科院水库渔业所曾调查了广东省 74 座水库水质和渔业资源,大多数水库属贫营养型,极少数水库为富营养型*。广东省是我国经济最发达的省份之一,近 20a 来污废水排放量大幅度增长,1998 年全省污废水排放量达 99 亿 m³,水库水质日趋下降,并有明显的富营养化倾向。随着水库的富营养化,水库生产力提高,浮游生物群落结构发生了变化^[1]。对浮游植物言,水体的富营养化有利于光合作用效率高、光适应能力强种类生长^[2],如:鼓藻、金藻和硅藻中的平板藻(*Tabellaria*)和小环藻(*Cyclotella*)等逐渐为蓝藻和硅藻中的星杆藻(*Asterionella*)、脆杆藻(*Fragilaria*)和冠盘藻(*Stephanodiscus*)代替^[3]。对浮游动物言,捕食格局和浮游植物群落结构的改变使浮游动物个体小型化,剑水蚤取代哲水蚤,轮虫的种类和数量增加^[4]。水库的富营养化改变了水库生态系统的结构,影响了水库功能。针对水库水质下降及供需矛盾越来越突出,于 2000 年开展了广东省大中型供水水库富营养化现状调查,为全省水库富营养化防治提供科学依据。本文介绍了该调查的结果,分析了水库水质的区域分布特征和水库富营养化的成因;探讨了浮游生物对水质变化的响应。

1 材料与方法

根据广东省水资源开发利用的流域分区及该流域的社会经济、工农业布局和城市发展状况,水库供水在该地区的重要性,在 6 个亚流域选取了 18 座有代表性的供水水库:珠江三角洲地区的流溪河水库(C)、大沙河水库(K)、大镜山水库(O)、契爷石水库(Q)和石岩水库(R);东江流域的新丰江水库(A)、白盆珠水库(B)和沙田水库(E);北江流域的飞来峡水库(G)和赤石迳水库(H);韩江流域的合水水库(J);粤西沿海地区的高州水库(F)、大水桥水库(N)和鹤地水库(P)和粤东沿海地区的公平水库(D)、赤沙水库(I)、汤溪水库(L)和河溪水库(M)(图 1)。

万方数据

* 参见《广东省水库渔业生产性能的评价及提高水库鱼生产力技术措施的研究》

于 2000 年 6~7 月份(丰水期)和 11~12 月份(枯水期)对选取水库的河流区和湖泊区进行采样,每个区的采样点依水流方向设在原河道上(3~4 个),样品为混合样品。溶解氧、温度和电导率的垂直分布用 YSI~85 型水质分析仪现场测定;用萨氏盘测定透明度(SD)。采取表层 0.5m 的水样,按标准方法测定 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 TN 、 TP 和 COD_{Mn} 等化学指标^[5]。浮游植物定量和叶绿素 a (Chl. a) 在表层 0.5m 处各采取 1L 水,其中 Chl. a 用饱和碳酸镁固定并置冰箱 4℃ 保存,按 Lorenzen 的方法测定^[6];浮游植物用福尔马林固定,浓度为 5%,于实验室沉淀浓缩计数。浮游动物定量样品在湖泊区于表层 0.5m 往下每 2m 采取 5L 水到 10m 处,河流区则从表层采至底层,共 25L,用 64 μm 浮游生物网当场过滤,用福尔马林固定,浓度 5%。浮游植物和轮虫定性样品用 25 号浮游生物网(64 μm)而甲壳类定性样品用 13 号浮游生物网(113 μm)于水平及垂直方向拖网,用福尔马林固定(5%)。

2 结果与讨论

2.1 水库营养分布特征

2.1.1 理化特征 水库表层 0.5m 夏季温度为 27~33.6℃,冬季为 16.4~24℃。飞来峡水库水力滞留时间短,属直流型水库,全年无垂直分层现象;而新丰江水库属大型山谷型水库,平均水深达 30.5m,滞留时间长达 2a,水库全年垂直分层;其余水库属单混合型或多混合型,视水库的平均深度和水面面积而定。

水库电导率与溶解盐的含量具有直接的关系,并取决于流域地质及土壤特征^[7,8]。广东省地处亚热带,有多种成土母岩和母质,形成地带性土壤,由南向北依次为砖红壤、赤红壤和红壤,土壤盐分含量少,水库电导率为 27~420 $\mu\text{s}/\text{cm}$,一般低于 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。在珠江三角洲,由于生活污水和工业废物的排放量占全省 70%,水库(流溪河水库外)的电导率远高于其它地区水库,如大镜山水库丰水期电导率高达 420 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

水库 Chl. a 含量为 0.6~32.4 mg/m^3 ,其中最小值出现于公平水库丰水期(酸污染),最大值为契斧石水库枯水期。东江流域水库及珠江三角洲海拔较高的流溪河水库(235m)的 Chl. a 含量比较低,而沿海的粤东(公平水库外)、粤西和珠江三角洲地区(流溪河水库外)水库 Chl. a 含量比较高。当水体中的悬浮物质主要是浮游植物时,水体 SD 与 Chl. a 负相关。水库 SD 为 0.4~6.3m,合水水库由于上游流域水土流失严重,丰水期 SD 只有 0.6m,其余水库 SD 与 Chl. a 呈现出高的相关性($R^2=0.7$, 图 2)。

在水体中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 3 种主要的无机氮,我国湖泊一般以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主, $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量很低^[7]。从本调查结果看, $\text{NO}_2\text{-N}$ 为 0.002~0.219 mg/L ,大多数水库很低,但石岩水库枯水期表层溶解氧只有 2.63 mg/L ,相对处于还原状态, $\text{NO}_2\text{-N}$ 高达 0.219 mg/L 。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别为 0.08~4.89 mg/L 和 0.001~1.542 mg/L 。大多数水库以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主,但珠江三角洲(流溪河水库外)和粤西沿海水库 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量比较高,尤其是石岩水库枯水期高达 1.542 mg/L 。水库 TN 和 TP 分别为 0.15~7.15 mg/L 和 0.003~0.03 mg/L ,东江流域水库含量最低;而珠江三角洲水库(流溪河水库外)含量最高,如石岩水库

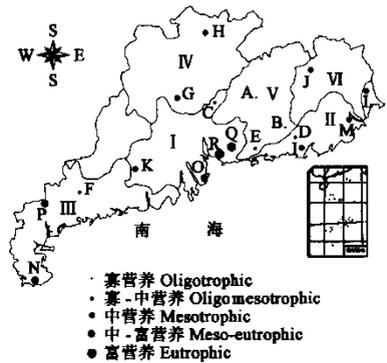


图 1 调查水库地理位置及营养状态

Fig. 1 The location and trophic states of the investigated reservoirs

* I 珠江三角洲 Pearl delta area, II 粤东沿海地区 the east coastal area, III 粤西沿海地区 the west coastal area, IV 北江流域 Beijiang river watershed, V 东江流域 Dongjiang river watershed, VI 韩江流域 Hanjiang river watershed

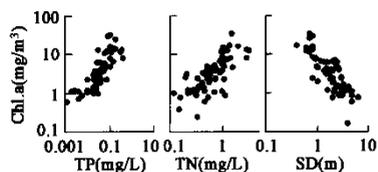


图 2 调查水库 TP、TN 和 SD 与 Chl. a 的关系

Fig. 2 The relationships of Chl. a with TP, TN and SD respectively

枯水期 TN 和 TP 分别高达 7.15 mg/L 和 0.098 mg/L。由图 2 可见, TN($R^2=0.60$) 和 TP($R^2=0.66$) 均与 Chl. a 呈比较高的相关性。

COD_{Mn} 作为有机污染的指标, 当其超过 4 mg/L 时, 表示水体已受到有机污染^[7]。水库 COD_{Mn} 为 1.2~7.1 mg/L, 大多数低于 4 mg/L。珠江三角洲的石岩水库、契爷石水库和粤西沿海的鹤地水库和大水桥水库两个季节的 COD_{Mn} 均超过 4 mg/L, 而珠江三角洲其它两座水库, 大沙河水库和大镜山水库 COD_{Mn} 也在 3 mg/L 以上, 表明这两个地区的有机污染已相当严重。

2.1.2 水库营养状态评价 水体的营养状态主要取决于一系列相关因子的综合作用, 如: N、P 等营养盐和 SD 等^[2]。本文采用了包括 Chl. a、TN、TP 和 SD 在内的相关加权综合营养状态指数^[1]来评价各水库的营养状态。由于地区差异, Chl. a 和 TN、TP 及 SD 之间关系的数学表达式有所不同, 它们之间的关系表达式采用本调查结果。水库营养状态指数计算值为 23.7~55.1, 季节差异不大。调查水库中, 寡营养两座: 新丰江水库和白盆珠水库; 寡-中营养四座: 沙田水库、流溪河水库、公平水库和高州水库; 富营养两座: 石岩水库和契爷石水库; 中-富营养三座: 大镜山水库, 鹤地水库和大水桥水库; 其余水库为中营养型。1983~1985 年所调查水库中有五座(高州、大沙河、赤石迳、合水和汤溪)也是本次调查对象之一, 从结果看, 这五座水库营养水平明显有所上升, 并由寡营养向中营养过渡*。两次调查结果比较可见, 广东省水库由以寡营养型为主过渡为以中营养型为主。

珠江三角洲地区水库营养态最高, 两座富营养型水库均分布于该地区, 另外三座分别为寡-中营养、中营养和中-富营养; 粤西沿海水库营养状态次之, 一座为寡-中营养, 两座为中-富营养; 粤东沿海水库为寡-中营养和中营养; 韩江流域和北江流域水库均为中营养; 东江流域水库营养状态最低, 两座寡营养水库均分布于该地区, 而另一座为寡-中营养(图 1)。珠江三角洲是广东省经济最发达的地区, 需水量 148 亿 m³, 其中 48% 为工业用水, 11% 为城镇生活用水, 工业废水和生活污水占全省排放量的 70%, 低海拔水库普遍受到污染, 水库氮、磷和有机物含量均比其它地区水库高。粤西沿海是广东省农业最集中的地区, 需水量 89 亿 m³, 其中农业用水占 75%, 水库主要受农业污染, 氮磷含量比较高。东江流域是广东省经济比较落后的地区之一, 水库蓄水量占全省一半以上, 但流域需水量仅占全省的 7%, 流域中上游受工农业和生活污水的污染程度比其它流域低得多, 水库仍处于低的营养状态。在同一流域内, 高海拔山谷型水库营养状态低于低海拔水库。

2.2 浮游生物对营养水平的响应

2.2.1 浮游植物 浮游植物作为初级生产者, 能对水体营养状态的变化迅速反应, 被广泛用作水体营养状态的指示种^[9]。一般藻类的营养生态位比较广, 在各养条件下均能生长, 应根据藻类群落组成特征, 而不是具体某一种来评定水体营养状态^[2]。

一般来说, 大多数蓝藻种类喜在营养水平比较高, 环境比较稳定的水体中生长。蓝藻在各营养水平水库中均有分布, 并以微囊藻(*Microcystis* sp.)、粘球藻(*Gloeocapsa* sp.)、席藻(*Phormidium* sp.)、色球藻(*Chroococcus* sp.) 和平裂藻(*Merismopedia* sp.) 为主。由图 3 可见, 对于大多数水库来说, 丰水期蓝藻密度高于枯水期, 且不管在哪一季节, 蓝藻在寡营养及寡-中营养型水库中的密度比较低, 如新丰江水库丰枯两期分别为 141 和 87 cells/ml, 流溪河水库则分别为 176 和 60 cells/ml; 在中-富及富营养型水库中的密度比较高, 如契爷石水库丰枯两期分别为 58.8×10^3 和 6.5×10^3 cells/ml, 高营养水平水库蓝藻密度远高于低营养水平水库。对于高州、大沙河、赤石迳、合水和汤溪这五座水库来说, 由于营养水平上升, 蓝藻的密度及相对优势度比 1983~1985 年的调查结果高得多*。

由图 4 月序数据可知, 水库丰水期绿藻密度远高于枯水期, 尤其是河溪水库和石岩水库。对于高州、汤溪、

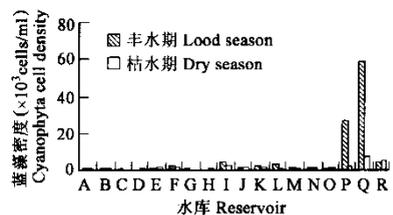


图 3 蓝藻在各营养型水库中的密度

Fig. 3 Cyanophyta cell density in the reservoirs
水库按营养水平由低到高排列 the reservoirs arranged from low trophic level to high trophic level

大沙河、赤石迳和合水这五座水库来说,绿藻的相对优势度比 20a 前大为降低。鼓藻科中的角星鼓藻属 (*Staurastrum*) 喜在寡营养条件下生长,而鼓藻属 (*Cosmarium*) 则多为中营养的指示种。从本调查结果看,角星鼓藻在低营养水平的水库中相对有比较高的密度,如在寡营养型的新丰江水库中,角星鼓藻占绿藻密度的 84%,而在中富及富营养型水库中分布甚少,不到绿藻密度的 1%。鼓藻只是在中营养型的河溪水库中有高的密度分布,不仅占总绿藻密度的 84%,而且是水库浮游植物的主要优势种。总体来说,鼓藻科种类是寡营养、寡-中营养及部分中营养型水库中主要的优势绿藻种类。富营养指示种的衣藻 (*Chlamydomonas* sp.) 和栅藻 (*Scenedesmus* spp.) 在营养水平比较高的水库中密度相对比较高,尤其是中-富及富营养型水库主要的优势绿藻种类,如在石岩水库,衣藻和栅藻密度分别为 760 和 840 cells/ml。

在调查水库中,直链藻 (*Melosira*) 和小环藻 (*Cyclotella*) 是主要的优势硅藻。直链藻和小环藻作为富营养指示种,由图 5 可见,在各营养类型水库中均有分布,营养生态位比较广。丰水期,在中营养的大沙河水库、汤溪水库,中-富营养的大水桥水库和富营养型的石岩水库中细胞密度比较高,尤其是在石岩水库中,密度高达 2.33×10^3 cells/ml。总的来说,低营养水平水库硅藻密度相对较低。对于高州、汤溪、大沙河、赤石迳和合水五座水库来说,硅藻的相对优势度比 20a 前降低,但密度却有所上升。作为中营养指示种的甲藻,本调查只观察到角甲藻 (*Ceratium*) 和多甲藻 (*Peridinium*) 两个属。由图 6 可见,甲藻的密度在各水库中均比较低(飞燕角甲藻为主),且除契爷石水库外(二角多甲藻为主),绝大多数水库丰水期高于枯水期。中-富及富营养型水库(契爷石水库外)甲藻密度低于其它营养型水库。在新丰江水库,虽然丰枯两期甲藻的密度分别只有 53 cells/ml 和 31 cells/ml,但由于水库浮游植物密度不高,甲藻仍为水库主要的优势种群。

金藻和裸藻是在完全不同的环境条件下生长的两类藻类。金藻多长在透明度较大,有机质含量低的水体中;裸藻则多生长于含有机质丰富的水体中。金藻只观察到一种,分歧锥囊藻 (*Dinobryon diverens*);裸藻主要为裸藻属 (*Euglena*) 和扁裸藻属 (*Phacus*)。分歧锥囊藻只在寡-中营养型的公平水库密度相对比较高,丰枯两期分别为 97 cells/ml 和 161 cells/ml,并为该水库主要的优势种,而在其它水库密度均比较低。相对而言,低营养水平的水库分歧锥囊藻的密度高于高营养水平的水库。在中-富和富营养型水库,COD 含量超过 4 mg/L,已有一定的有机污染,造成分歧锥囊藻在这些水库中均没有分布;但喜在有机质含量高的水体中生长的裸藻在这些水库有相对比较高的密度,尤其是在契爷石水库和石岩水库,丰水期裸藻密度分别高达 205 cells/ml 和 618 cells/ml;枯水期则分别为 245 cells/ml 和 497 cells/ml。在低营养水平的水库中,裸藻的密度很低,如白盆珠水库没观察到裸藻。

虽然浮游植物密度及种类组成有一定的季节波动,但总的来说,寡营养型的新丰江水库和白盆珠水库浮游植物分别为蓝藻-甲藻和硅藻-绿藻为主;寡-中营养型水库以金藻-硅藻(公平水库)或硅藻-绿藻为主;中营养型水库中,营养水平相对较低的水库以绿藻-硅藻为主,而营养水平较高的以蓝藻-硅藻或蓝藻-绿藻

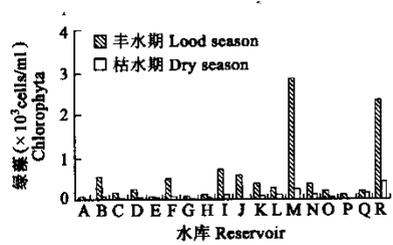


图 4 在各营养型水库绿藻密度

Fig. 4 Chlorophyta cell density in the reservoirs



图 5 硅藻在各营养型水库中密度

Fig. 5 Diatom cell density in the reservoirs



图 6 甲藻在各营养型水库中密度

Fig. 6 Pyrrophyta cell density in the reservoirs

为主;中-富营养型水库以蓝藻-绿藻-硅藻为主;富营养型的石岩水库则以蓝藻-绿藻-硅藻-裸藻为主,而契爷石以蓝藻-硅藻-甲藻-裸藻为主。我国武汉的东湖,随着营养水平的上升,浮游植物由硅、甲藻型演替为蓝、绿藻型^[7],广东省水库浮游植物也基本上呈类似的趋势。如:高州、大沙河、赤石迳、合水和汤溪五座水库,在 20a 前,浮游植物为硅、绿藻型,但从本次调查结果看,水库营养水平有所上升,浮游植物密度相应上升,硅藻和绿藻相对优势度比以前降低,而蓝藻的密度和相对优势度大为上升*。Naselli-Flores 认为在不同的营养条件下,浮游植物可以有类似的组成,或相同营养条件下,呈现不同的藻类组成,但藻类的生物量必定随着水体营养状态的上升而增加^[10]。因此,虽然在不同营养水平间,存在一些水库的优势种类组成比较相似,但在浮游植物的密度和生物量上均存在比较大的差异,而且在低营养型水库中金藻的生物量相对高于其它营养类型的水库,裸藻和蓝藻的生物量远低于高营养型水库^[11]。

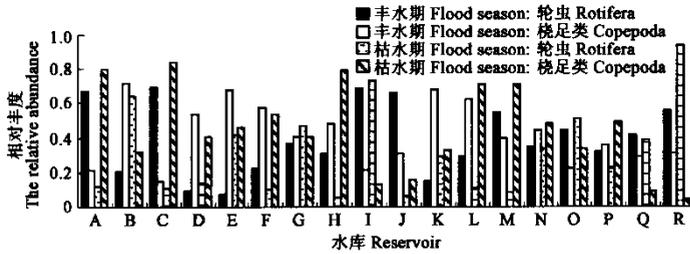


图 7 各营养型水库轮虫和桡足类相对丰度

Fig. 7 The relative abundance of Rotifer and Copepoda in the reservoirs

2.2.2 浮游动物 一般而言,随着水体营养水平和初级生产力的上升,浮游动物的生物量及丰度相应增加。调查水库浮游动物丰度为 7.9~812.2 ind./L。由于水库浮游动物丰度不仅取决于食物,还受鱼类的捕食作用和水库的滞留时间等的控制^[12],相对于浮游植物言,浮游动物丰度对水库营养水平的指示作用不是那么明显。但总的来说,低营养水平水库浮游动物丰度比较低,如:寡营养的新丰江水库和白盆珠水库浮游动物丰度分别只有 7.9 和 11.6 ind./L;营养水平比较高的水库浮游动物丰度相应比较高,如:中营养型的河溪水库和汤溪水库分别为 415.5 和 812.2 ind./L。

从生物量角度来说,浮游动物两个季节基本上都以桡足类为优势种群。从丰度而言,由图 7 可见,营养水平比较高的石岩水库、契爷石水库、大镜山水库和赤沙水库两个季节均以轮虫为优势种群;新丰江水库、流溪河水库、合水水库和河溪水库丰水期以轮虫为优势种群,枯水期仍以桡足类为优势种群;白盆珠水库枯水期以轮虫为优势种群,丰水期为桡足类;其它水库两期均以桡足类为优势种群。在温带地区,随着水体的富营养化,滤食效率比较高的大型枝角类,属成为枝角类的优势种,且是水体中主要的草食性浮游动物;而喜在寡营养型水体中生长的哲水蚤也逐渐为剑水蚤所代替^[2,4]。从本调查结果看,枝角类在各营养类型水库中丰度均低于桡足类,大多数水库相对丰度低于 20%,(最大相对丰度在高州水库枯水期,也只有 39%),且 属种类分布甚少,枝角类优势种基本上为滤食效率相对比较低的长额象鼻 (*Bosmina longirostris*)、颈沟基合 (*Bosminopsis deitersi*)、短尾秀体 (*Diaphanosoma brachyurum*) 和网纹 (*Ceriodaphnia* spp.), 优势种类在各营养类型水库差别不大。对于桡足类而言,在各营养类型水库中均以桡足幼体和无节幼体为主,成体丰度比较低(占桡足类丰度的 0~47%),且成体基本上以剑水蚤为优势。剑水蚤基本上以广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、台湾温剑水蚤 (*Thermocyclops taihokuensis*) 为主;哲水蚤以舌状叶镖水蚤 (*Phyllodiaptomus tunguidus*)、锯齿明镖水蚤 (*Heliodiaptomus serratus*) 和钩指复镖水蚤 (*Allodiaptomus specillodactylus*) 为主。从桡足类的种类组成看,在富营养型的石岩水库、契爷石水库和中-富营养型的鹤地水库和大水桥水库,没有或只有舌状叶镖水蚤一种哲水蚤分布;在营养程度比较低的水库,哲水蚤的种类数较多,如在新丰江水库和飞来峡水库,分别有 3 和 4 种哲水蚤。

由于在热带亚热带地区,水库水产养殖非常普及,大多数养殖鱼类主要以浮游生物为食,鱼类一方面

是浮游动物的捕食者,另一方面是浮游动物食物的竞争者。鱼类和藻类的协同进化,造成热带亚热带地区甲壳浮游动物群落结构有别于温带地区,并简单化^[4]。在所调查的水库中,水产养殖基本上都比较普及,养殖种类主要为鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)、鳊鱼(*Parabramis sp.*)等。在浮游动物个体同等大小的条件下,鱼类首先摄食枝角类,其次是哲水蚤最后才食剑水蚤^[13~15]。鱼类对甲壳浮游动物的选择性捕食,甲壳类浮游动物种类比较少,剑水蚤为主要的桡足类,而枝角类中滤食效率高的属分布甚少。由于甲壳浮游动物受鱼类捕食作用的控制,甲壳浮游动物对水体营养水平的响应不是那么明显。

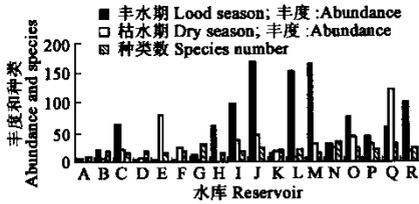


图8 在各营养型水库轮虫丰度(ind./L)及种类数

Fig. 8 The abundance of Rotifer and species number

轮虫由于个体小,受鱼类直接影响不大,且发育时间快,生命周期短,能较为迅速地反映环境的变化,被认为是很好的指示生物^[17]。在湖泊中,随着营养水平的上升,轮虫的种类和数量有逐渐增加的趋势^[4]。调查水库轮虫丰度为1~167 ind./L。由于水库的滞留时间相对于湖泊短得多,水位波动大,轮虫的丰度比同营养水平的湖泊要低得多。由图8可见,相对而言,在低营养水平的水库,轮虫丰度及种类均比较低,在新丰江水库轮虫种类数只有9种,而丰枯两期丰度也分别只有7 ind./L和1 ind./L;高营养水平的水库轮虫丰度及种类相对比较高,其中富营养型的石岩水库(丰水期)和契爷石水库(枯水期),轮虫丰度分别为100 ind./L和121 ind./L,种类数分别为24和31种。

有关轮虫的指示种,被认为是寡营养指示种中的郝氏皱甲轮虫(*Ploesoma hudsoni*)、卵形无柄轮虫(*Chromogaster ovalis*)、独角聚花轮虫(*Conochilus unicornis*);富营养指示种中的臂尾轮虫(*Brachionus spp.*)、沟痕泡轮虫(*Pompholyx sulcata*)、异尾轮虫(*Trichocerca spp.*)、长三支轮虫(*Filimia longiseta*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*)、对棘同尾轮虫(*Diurella stylata*)、前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*)和多肢轮虫(*Polyarthra spp.*)^[17-18]在水库中均有分布。其中,郝氏皱甲轮虫分布于寡营养和中营养型水库;独角聚花轮虫、多肢轮虫和螺形龟甲轮虫在各营养类型水库中均有分布;卵形无柄轮虫、曲腿龟甲轮虫、对棘同尾轮虫和沟痕泡轮虫主要分布于中营养型水库;其余种类主要分布于中营养和富营养型水库中。几乎所有被认为寡营养型的种类均可分布于中营养型和富营养型湖泊中,即不管哪一种轮虫都由于适应性而有一定的栖息范围,并相对有一个幅度^[18]。在寡营养型的新丰江水库和白盆珠水库中,轮虫主要为广营养型和寡营养到中营养型种类,且以螺形龟甲轮虫为优势种;寡-中营养型水库以针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫和郝氏皱甲轮虫为优势种;中营养型水库各营养类型轮虫均有分布,但主要以螺形龟甲轮虫、异尾轮虫、前节晶囊轮虫或臂尾轮虫为优势种;富营养型和中-富营养型水库轮虫主要为喜在中营养到富营养条件下生长的种类,且以臂尾轮虫、异尾轮虫、对棘同尾轮虫或前节晶囊轮虫为优势种(图9)。

3 结论

目前广东省水库水质尚好,但水库营养水平比20a前有所上升,大多数调查水库处于中营养状态,富营养型水库万有数据由于地区经济发展的差异,水库受污染程度及污染源性质存在地区差异。珠江三角洲是全省最发达的地区,工业废水和城市生活污水的污染相当严重,水库水质最差,营养程度最高(流溪河

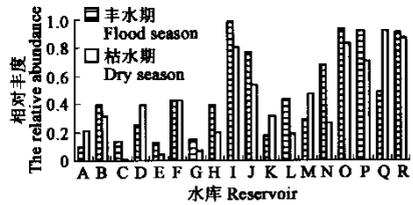


图9 各营养型水库轮虫富营养指示种(臂尾轮虫和异尾轮虫等)的相对丰度

Fig. 9 The relative abundance of eutrophic indicators of Rotifer (*Brachionus*, *Trichocerca et al.*)

水库除外);粤西沿海经济不甚发达,主要以农业为主,是广东省农业比较集中的地区,农业污染相当严重,水库水质也比较差,仅次于珠江三角洲地区;东江流域是最广东省经济比较落后的地区之一,工农业污染不算太严重,水库水质是全省最好的。

除金藻在中-富及富营养水库中没有分布外,蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻在水库中均有比较广的营养生态位,但它们的密度及相对优势度在各营养型水库中有一定的差异,浮游植物的细胞密度及叶绿素 a 含量随着营养水平的上升而上升。寡营养水库浮游植物以硅藻-甲藻或硅藻-绿藻为主;寡-中营养型水库以金藻-硅藻或硅藻-绿藻为主;中营养水库中,营养水平相对较低的水库以绿藻-硅藻为主,而营养水平较高的以蓝藻-硅藻或蓝藻-绿藻为主;中-富营养水库以蓝藻-绿藻-硅藻为主;富营养水库则以蓝藻-绿藻-硅藻-裸藻为主。浮游动物基本上都以桡足类为优势种群,但在中-富营养和富营养水库中,寡营养型的哲水蚤种类比其它营养型水库少。枝角类优势种在各营养型水库差别不大。相对于甲壳浮游动物,轮虫个体小,受鱼类直接影响不大,且发育时间快,生命周期短,对水体营养水平的响应比较显著。富营养和中-富营养水库轮虫以喜在中营养到富营养条件下生长的种类为主;低营养型水库以广营养型、中营养型或寡营养到中营养型种类为主,中营养到富营养型种类比较少,丰度也比较低。

References:

- [1] Jin X C, Tu Q Y, eds. *The standard methods in lake eutrophication investigation*. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 286~302.
- [2] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 11~26.
- [3] Rawson D S. Algal indicators of trophic lake types. *Limnol. Oceanogr.*, 1956, **1**: 18~25.
- [4] Nilssen J P. Tropical lakes- functional ecology and future development; The need for a process-orientated approach. *Hydrobiologia*, 1984, **113**: 231~242.
- [5] National Environmental Protection Agency. *The standard analytical methods in environmental monitoring*. Beijing: China Environmental Science Press, 1986.
- [6] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 1967, **12**: 343~346.
- [7] Liu J K eds. *Study on the Donghu Lake ecology (II)*. Beijing: Science Press, 1995. 63~226.
- [8] Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: an overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 1034~1040.
- [9] Shen Y F, Zhang Z S, Gong X J, et al. *Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota*. Beijing: China Agriculture & Building Press, 1990. 120~125.
- [10] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors. *Hydrobiologia*, 2000, **424**: 1~11.
- [11] Dasi M J, Miracle M R, Camacho A et al. Summer phytoplankton assemblages across trophic gradients in hard-water reservoirs. *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 27~43.
- [12] Duncan A. Assessment of factors influencing the composition, body size and turnover rate of zooplankton in Parakrama Samudra, an irrigation reservoir in Sri Lanka. *Hydrobiologia*, 1984, **113**: 201~215.
- [13] Brooks J L. Eutrophication and changes in the composition of the zooplankton. In: *Eutrophication*. National Academy of Science, Washington, 1969, 236~255.
- [14] Hall J G, Threlkeld S T and Burns C W. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1976, **7**: 177~208.
- [15] Smyly W j P. Some effects of enclosure on the zooplankton in a small lake. *Freshwater Biology*, 1976, **6**: 241~251.
- [16] Sladeczek V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, **100**: 169~202.
- [17] Stenson J A E. Fish impact on rotifer community structure. *Hydrobiologia*, 1982, **87**: 57~64.
- [18] Maemets A. Rotifers as indicators of lake types in Estonia. *Hydrobiologia*, 1983, **104**: 357~361.

参考文献:

- [1] 金相灿,屠清英编. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社,1990. 286~302.
- [5] 国家环境保护局. 环境监测标准分析方法. 北京:中国环境科学出版社,1986.
- [7] 刘建康编. 东湖生态学研究(二). 北京:科学出版社,1995. 63~226.
- [8] 林秋奇,韩博莱. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用. 生态学报,2001, **21**(6): 1034~1040.
- [9] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术. 北京:中国建筑工业出版社,1990. 120~125.