

广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价

王朝晖 林秋奇 胡 韧 范春雷 韩博平

(暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632)

摘要: 于 2000 年的丰水期和枯水期对广东省 19 个大中型水库的浮游植物状况进行了调查, 并根据浮游植物群落结构、多样性指数、蓝藻污染状况和营养状态指数对水库的水质进行了分析。结果表明, 大部分水库为蓝藻型水体, 优势种类主要是能产生毒素的微囊藻类, 而且蓝藻种类数和细胞密度与水库水质密切相关。蓝藻细胞密度和百分比分别为 0.1×10^4 – $6\ 728.4 \times 10^4$ cells L⁻¹ 和 0.53%–99.2%。大部分水库受到了一定程度的污染, 属于中营养型; 东江流域的新丰江水库和白盘珠水库水质优良, 为贫营养型; 而位于经济较发达的沿海地区的鹤地水库、石岩水库和契斧石水库已受到严重污染。东江流域和北江流域水库水质普遍较好, 而粤西沿海地区和珠江三角洲地区水库则污染较为严重。

关键词: 蓝藻; 水库; 富营养化

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2004)02-0117-07

Pollution by Blue-green Algae (Cyanophyta) in Reservoirs of Guangdong Province and Water Quality Evaluation

WANG Zhao-hui LIN Qiu-qi HU Ren FAN Chun-lei HAN Bo-ping

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: A phytoplankton and water quality survey was conducted in flood and dry seasons in 2000 in 19 typical reservoirs in Guangdong Province, China, in order to evaluate the trophic state and blue-green algae (cyanophyta) pollution. Results showed that many reservoirs were polluted by blue-green algae, of which the potentially toxic *Microcystis* was the dominant species and often took up over 50% of the total phytoplankton cell concentration. Cell density and percentage proportion of blue-green algae were 0.1×10^4 – $6\ 728.4 \times 10^4$ cells L⁻¹ and 0.53%–99.2%, respectively. Furthermore, species richness and density of blue-green algae were closely related to the water quality. Results based on phytoplankton community structure and trophic state index (TSI) revealed that the trophic level was lower in reservoirs located at upper reaches of rivers and mountainous districts than at lower reaches and coastal regions. Moreover, the water quality of reservoirs in Dongjiang and Beijiang drainage areas were better than those in other water areas especially the west coastal area and the delta area of the Pearl River. Most reservoirs have been polluted to some extent and belonged to mesotrophic state, two in Dongjiang drainage area are oligotrophic, while other three which located in highly economic developing coastal areas are heavily polluted and enriched.

Key words: Cyanophyta; Reservoir; Eutrophication

我国是水资源较为短缺的国家之一, 城市供水越来越依赖于水库供水。目前水体富营养化已成为全球水体的通病, 富营养化过程中有毒蓝藻水华的持续和大规模爆发, 对人类饮用水安全构成了严重

威胁。目前, 我国许多大型湖泊如太湖、巢湖、滇池等已经严重遭受蓝藻污染, 蓝藻水华时常发生, 而一些供水湖泊和水库也相继暴发了蓝藻水华^[1,2]。许多蓝藻能产生以微囊藻毒素为主的毒素, 我国已有

收稿日期: 2003-03-03 修订日期: 2003-07-22

基金项目: 广东省科技计划项目 (2003C32902); 广东省水利厅重点项目

不少地区的饮用水源中检测出了相当水平的微囊藻毒素,一些自来水厂甚至因此而关闭^[3,4],而由微囊藻毒素造成的野生动物、家畜等中毒、死亡事件已有许多报道^[5,6],同时流行病学调查显示,饮用水源中微囊藻毒素是导致我国南方一些地区原发性肝癌发病率高的主要原因^[6]。

广东省是水库水资源大省,总库容量在全国列第四位。水库水质在广东省及港澳地区的工农业生产和人民生活中起着十分重要的作用。但随着经济的发展,水库富营养化程度日益上升,水质下降十分明显,水库富营养化直接影响到水库的正常功能。而且广东省地处热带、亚热带地区,温度、气象条件很适合微囊藻等蓝藻生长。本文研究了广东省典型供水水库浮游植物群落及蓝藻的季节性变化与富营养化的关系,为广东省水库富营养化和蓝藻污染的防治及水资源的保护和可持续发展提供理论依据和背景资料。

1 材料和方法

1.1 样品的采集及分析鉴定

于 2000 年 6 月至 7 月的丰水季节和 11 月至 12 月的枯水季节在北江流域、东江流域、韩江流域、粤东沿海地区、粤西沿海地区及珠江三角洲地区 6 个水域区的 19 座水库共设置了 45 个采样点,在大部分水库河流入口处和库中心区或大坝处设置了 2-3 个采样点(表 1)。样品采集和分析鉴定根据《湖泊富营养化调查规范》^[7]进行,对浮游植物进行定性定量分析,并测定叶绿素 a (Chl a) 含量及总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)等水质参数。

1.2 营养状态指数及多样性指数的计算

Shannon-Weaver 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (e) 和 McNaughton 优势度指数 (I) 分别根据 Shannon 和 Weaver^[8]、Pielou^[9] 和 McNaughton^[10] 方法计算。一般来说, H' 和 e 值越大、 I 值越小表示水质越好。 $H' = 0-1$, $e = 0-0.3$: 表示重度污染; $H' = 1-3$, $e = 0.3-0.5$: 表示中度污染; $H' > 3$, $e = 0.5-0.8$ 表示轻度污染或无污染。

根据金相灿和屠清瑛^[7]的方法计算营养状态指数(Trophic state index, TSI), 其中 TSI(Chl a)、TSI(TN)、TSI(TP)、TSI(SD) 分别表示以叶绿素 a、总氮、总磷、透明度为基准的营养状态指数, TSI(Σ) 表示综合营养状态指数。TSI < 30 为贫营养化, TSI = 30-50 表示中营养化, TSI = 50-100 表示富营养化。

表 1 各水域区的调查水库及采样时间
Table 1 Reservoirs surved and sampling date

| 水域区 Drainage areas | 水库名称 Reservoirs | 采样时间 Date | 采样点数量 Number of sites |
|----------------------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| 北江流域 Beijiang | 赤石径 Chishijing | 2000.06.20 | 2 |
| | 小坑 Xiaokeng | 2000.11.20 | 1 |
| 东江流域 Dongjiang | 飞来峡 Feilaixia | 2000.06.20 | 3 |
| | 新丰江 Xinfengjiang | 2000.11.20 | 3 |
| | 白盘珠 Baipanzhu | 2000.07.18 | 3 |
| | 沙田 Shatian | 2000.12.22 | 2 |
| | 公平 Gongping | 2000.07.03 | 3 |
| 粤东沿海 East coastal area | 赤沙 Chisha | 2000.12.18 | 2 |
| | 汤溪 Tangxi | 2000.07.25 | 3 |
| | 河溪 Hexi | 2000.12.18 | 2 |
| | 合水 Heshui | 2000.07.27 | 2 |
| | 高州 Gaozhou | 2000.12.20 | 2 |
| 粤西沿海 West coastal area | 大水桥 Dashuiqiao | 2000.06.27 | 2 |
| | 鹤地 Hedi | 2000.11.13 | 2 |
| | 流溪河 Liuxihe | 2000.07.13 | 3 |
| | 契谷石 Qiyeshi | 2000.11.15 | 3 |
| | 大境山 Dajingshan | 2000.07.12 | 2 |
| 珠江三角洲 Pearl River Delta | 石岩 Shiyan | 2000.11.14 | 3 |
| | 大沙河 Dashaha | 2000.07.11 | 2 |
| | | 2000.11.15 | 3 |
| | | 2000.07.06 | 3 |
| | | 2000.11.23 | 2 |
| | | 2000.07.20 | 3 |
| | | 2000.12.01 | 2 |

2 结果和分析

2.1 浮游植物种类组成

本调查共分析鉴定出 142 种浮游植物, 其中绿藻类(Chlorophyta) 84 种、硅藻类(Bacillariophyta) 25 种、蓝藻类(Cyanophyta) 19 种、裸藻类(Euglenophyta) 9 种、甲藻类(Pyrrophyta) 和金藻类(Chrysophyta) 各 2 种、隐藻类(Cryptophyta) 1 种。总体来说, 广东省水库为蓝、绿藻型水库, 大部分水库的优势种类为蓝藻类, 绿藻和硅藻类也常出现, 而贫营养型指示种类如金藻类和甲藻类仅在少数水库出现。

大部分浮游植物属于清洁水体指示种类, 即寡污至 α 中污型指示种类, 其次是 α 中污型至 β 中

污型水体指示种类,仅观察到了 2 种多污型指示种类,它们是小席藻 (*Phormidium tenus*)、绿色裸藻 (*Euglena viridis*)。丰水期耐污性种类(α 中污型至多污型指示种类)有 4-18 种,占浮游植物总种数的

20.0%-72.2%,枯水期有 4-23 种,占 23.1%-62.2%。耐污种数在石岩水库出现最多(23 种),而相对百分率则以鹤地水库最高(62.2%)(表 2)。不论是丰水期还是枯水期,位于山区的上游水库耐污种类较

表 2 广东省典型水库浮游植物耐污种类数及浮游植物、蓝藻细胞密度和叶绿素 a、营养状态指数的变化
Table 2 Number of β-mesosaprobic to polysaprobic phytoplankton species, cell densities of blue-green algae and phytoplanktons, Chl a contents and TSI values in reservoirs of Guangdong Province

| 流域 Drainage areas | 水库名称 Reservoirs | 耐污染种类数 No. of β-mesosaprobic and polysaprobic species* | | 蓝藻细胞密度 Cell density of blue-green algae** (10 ⁴ L ⁻¹) | | 浮游植物 细胞密度 Cell density of phytoplankton (10 ⁴ L ⁻¹) | | 叶绿素 a Chloropyll a (mg m ⁻³) | | 营养状态指数 Trophic state index (Σ) | |
|----------------------------|--------------------|---|---------|--|---------|---|-------|--|------|-----------------------------------|-------|
| | | F | D | F | D | F | D | F | D | F | D |
| 北江流域 Beijiang | 赤石径 | 7 | 12 | 23.8 | 48.9 | 125.1 | 68.3 | 1.27 | 2.56 | 33.83 | 35.86 |
| | Chishijing | (33.3%) | (30.8%) | (16.6%) | (70.5%) | | | | | | |
| | 小坑 | 8 | 6 | 8.4 | 0.1 | 50 | 18.9 | 2.87 | 1.0 | 36.00 | 32.2 |
| 东江流域 Dongjiang | Xiaokeng | (32.0%) | (23.1%) | (16.8%) | (0.53%) | | | | | | |
| | 飞来峡 | 7 | 11 | 23.4 | 5.8 | 41.6 | 31.3 | 1.18 | 3.28 | 36.05 | 36.86 |
| | Feilaixia | (41.2%) | (50.0%) | (57.8%) | (17.7%) | | | | | | |
| | 新丰江 | 4 | 7 | 14.1 | 0.87 | 31.5 | 19.6 | 0.26 | 0.8 | 26.64 | 23.71 |
| | Xinfengjing | (20.0%) | (26.9%) | (43.1%) | (4.52%) | | | | | | |
| 粤东沿海 East coastal area | 白盘珠 | 11 | 8 | 102.4 | 34.7 | 90.4 | 42.8 | 0.45 | 0.6 | 28.56 | 30.7 |
| | Baipanzhu | (22.4%) | (24.2%) | (41.8%) | (30.0%) | | | | | | |
| | 沙田 | 11 | 9 | 44.2 | 87.5 | 78.4 | 131.3 | 0.37 | 1.84 | 32.07 | 33.08 |
| | Shatian | (27.5%) | (30.0%) | (45.0%) | (67.5%) | | | | | | |
| | 公平 | 8 | 11 | 13.5 | 6.4 | 60.7 | 30.7 | 0.92 | 1.45 | 30.46 | 31.90 |
| | Gongping | (24.2%) | (32.5%) | (21.0%) | (21.8%) | | | | | | |
| | 赤沙 | 14 | 11 | 326.5 | 179.9 | 437.9 | 222.3 | 2.75 | 2.01 | 35.37 | 33.01 |
| 韩江流域 Hanjiang | Chisha | (43.8%) | (35.5%) | (71.2%) | (80.8%) | | | | | | |
| | 汤溪 | 16 | 11 | 327.4 | 59.2 | 502.2 | 133.9 | 4.92 | 3.64 | 41.12 | 38.15 |
| | Tangxi | (43.2%) | (33.3%) | (63.8%) | (43.8%) | | | | | | |
| | 河溪 | 13 | 4 | 173.9 | 10.4 | 454.4 | 42.35 | 5.5 | 4.35 | 41.81 | 38.5 |
| 粤西沿海 West coastal area | Hexi | (39.4%) | (25.0%) | (38.3%) | (26.0%) | | | | | | |
| | 合水 | 15 | 16 | 70.7 | 204.5 | 154.9 | 229 | 3.85 | 2.11 | 39.93 | 38.12 |
| | Heshui | (40.5%) | (44.4%) | (43.5%) | (85.9%) | | | | | | |
| 珠江三角洲 Pearl River Delta | 高州 | 10 | 7 | 166.3 | 48.9 | 271.5 | 60.8 | 1.64 | 0.98 | 32.31 | 28.78 |
| | Gaozhou | (34.5%) | (33.3%) | (61.7%) | (77.3%) | | | | | | |
| | 大水桥 | 14 | 16 | 887.5 | 36.5 | 1059.9 | 122.8 | 12 | 4.84 | 46.25 | 40.47 |
| | Dashuiqiao | (38.9%) | (42.1%) | (83.3%) | (27.3%) | | | | | | |
| 珠江三角洲 Pearl River Delta | 鹤地 | 13 | 14 | 2677.1 | 132.2 | 2699.8 | 138.1 | 12.4 | 6.43 | 48.58 | 42.07 |
| | Hedi | (72.2%) | (58.3%) | (99.2%) | (88.7%) | | | | | | |
| | 流溪河 | 11 | 10 | 11.8 | 3.2 | 39.1 | 19.2 | 0.37 | 1.04 | 33.39 | 26.04 |
| | Liuxihe | (42.3%) | (30.3%) | (26.7%) | (16.7%) | | | | | | |
| | 大境山 | 13 | 14 | 23.4 | 150.1 | 57.3 | 191.3 | 0.44 | 6.1 | 47.6 | 39.4 |
| | Dajingshan | (41.9%) | (38.9%) | (39.3%) | (80.2%) | | | | | | |
| | 大沙河 | 13 | 14 | 202.3 | 154.4 | 311.9 | 212.3 | 0.81 | 3.72 | 40.78 | 40.3 |
| 珠江三角洲 Pearl River Delta | Dashahe | (41.9%) | (38.9%) | (54.8%) | (68.7%) | | | | | | |
| | 契爷石 | 17 | 27 | 621.3 | 327.4 | 6830.5 | 707.6 | 11.1 | 21.2 | 48.39 | 51.91 |
| | Qiyeshi | (93.0%) | (60.0%) | (50.1%) | (87.2%) | | | | | | |
| | 石岩 | 18 | 23 | 6728.4 | 621.4 | 1305 | 393.3 | 10.8 | 24.5 | 52.22 | 55.64 |
| Shiyan | (62.1%) | (62.2%) | (98.5%) | (88.1%) | | | | | | | |

F:丰水期 Flood season; D:枯水期 Dry season; * 括号中的数字为耐污染种数占浮游植物总种数的百分率 Numbers in parentheses indicate percentages of the species number of saprobic phytoplanktons in total phytoplankton taxa; ** 括号中的数据为蓝藻细胞的百分比 Numbers in parentheses indicate percentage proportions of blue-green algae.

少,而下游水库及沿海经济较发达地区的水库则耐污性种类较为丰富。在流域之间,以东江流域水质最佳,耐污种类所占百分比在 35%以下,没有多污水体标志种类出现;北江流域和粤东沿海次之,耐污种类所占百分比在 50%以下,多污水体标志种类偶尔出现;而位于粤西沿海的鹤地水库及位于珠江三角洲地区的契爷石水库、石岩水库水质较差,耐污种类超过了清洁水体种类,多污型水体指示种类常常出现,有时还占据优势。

出现频率较高的耐污性种类主要是一些 β 中污型至多污型水体指示种类,如微囊藻(*Microcystis* spp.)、平裂藻(*Merismopedia* spp.)、鞘丝藻(*Lyngbya* spp.)和鱼腥藻(*Anabaena* spp.)等蓝藻,衣藻(*Chlamydomonas* spp.)、纤维藻(*Ankistrodesmus*)、栅藻(*Scenedesmus* spp.)等绿藻,颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)等硅藻,它们常成为某些水库的第一或第二优势种类。在采集的 90 个样品中,以微囊藻作为第一优势种的就有 26 个,以席藻作为第一优势种有 11 个;此外还有一些水库以鞘丝藻和鱼腥藻为优势种类。这些耐污型种类的出现说明广东省许多大中型水库都不同程度遭受了有机物的污染。

2.2 蓝藻细胞密度及其与水质指标的关系

丰水期、枯水期蓝藻细胞密度的变化见表 2。大部分水库属于蓝藻型水体,蓝藻百分比在大部分水库都超过了 50%,而且第一优势种常为能产生毒素的微囊藻,说明广东省水库的有毒蓝藻污染已达到相当严重的程度。丰水期蓝藻细胞密度明显高于枯水期,但百分比相近,丰水期和枯水期平均值分别为 6.65×10^6 (51.2%)、 1.11×10^6 cells L^{-1} (51.8%)。除个别水库外,从上游至下游大部分水库蓝藻细胞密度逐渐上升,一般在下游的沿海地区出现最高值,此变化趋势在丰水期更加明显。位于粤西沿海的鹤地水库及珠江三角洲地区的契爷石水库、石岩水库蓝藻污染较严重,丰水期调查期间,鹤地水库和契爷石水库分别发生了微囊藻和小席藻水华,细胞密度分别为 2.68×10^7 和 6.21×10^7 cells L^{-1} ,百分比也都超过了 99%,石岩水库以平裂藻为优势种类,百分比也接近 70%。

蓝藻细胞密度与水质优劣程度明显相关,而且蓝藻百分比与水质参数相关性更高(表 3)。其中与透明度(SD)、叶绿素 a(Chl a)及 TSI(Chl a)、TSI(SD)和总 TSI 相关性较好,而与 TN、TP 及 TSI

(TN)、TSI(TP)的相关性较小,表明水库的营养盐含量对蓝藻细胞密度影响不大,但蓝藻细胞密度和百分比却影响着水库的水质,蓝藻细胞密度越高,水体富营养化程度也越高。此外,蓝藻细胞密度和百分比与 H' 和 e 值明显负相关,而与 I 值正相关,说明蓝藻数量和百分比的增加使浮游植物多样性和均匀性降低,优势度增加,导致浮游植物群落种类向单一化发展。

表 3 蓝藻细胞密度、百分比与一些水质指标的相关关系(r)
Table 3 Correlation between cell density, percentage proportion of blue-green algae and factors of water quality

| 相关系数 (r) | 蓝藻细胞密度 Cell density of blue-green algae | 蓝藻百分比 Percentage proportion of blue-green algae |
|-----------------|---|---|
| Chl a | 0.36** | 0.50** |
| TN | 0.07 | 0.25* |
| TP | 0.19* | 0.16 |
| SD | -0.36* | -0.61** |
| H' | -0.56** | -0.68** |
| e | -0.55** | -0.74** |
| I | 0.47** | 0.69** |
| TSI(Chl a) | 0.41** | 0.54** |
| TSI(TN) | 0.19* | 0.33* |
| TSI(TP) | 0.27* | 0.30* |
| TSI(SD) | 0.47** | 0.67** |
| TSI(Σ) | 0.41** | 0.56** |

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. Chl a: Chlorophyll a; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; SD: Transparency; H': Shannon-Weaver species diversity index; e: Pielou evenness index; I: McNaughton dominance index; TSI: Trophic state index, TSI(Chl a), TSI(TN), TSI(TP), TSI(SD) indicate TSI based on Chl a, TN, TP and SD; TSI(Σ) indicate general TSI.

虽然水库营养盐含量对蓝藻细胞密度影响较小,但营养盐之间的比例与蓝藻细胞密度密切相关,高密度蓝藻出现在 N:P(原子比)为 10-30 的水平,在 20 左右细胞密度达到高峰(图 1)。蓝藻污染较严重的鹤地、契爷石和石岩水库 N:P 为 15-30 左右,而水质优良的新丰江水库 N:P 高于 200。大部分淡水水体属于磷限制性水体^[1],过量磷的输入使水体中磷含量不再受到限制,从而大大刺激了浮游微藻类的生长,特别是蓝藻类的生长。微囊藻是一种较适合于富磷条件下生长的藻类,其最适 N:P 为 10-15^[2],并且细胞能富集磷,这样可使其即使在短时间的缺磷环境中也能保持较大的生长率,因而在竞争中占据优势^[13]。因此,控制磷的输入是控制蓝藻特别是有毒微囊藻水华的关键。随着含磷洗涤剂的

广泛使用,越来越多的含磷化合物随生活污水排入水体,而这些含磷物质一般很难通过常规污水处理方法去除,这样就造成了水体磷的富集,有利于微囊藻等蓝藻的生长。

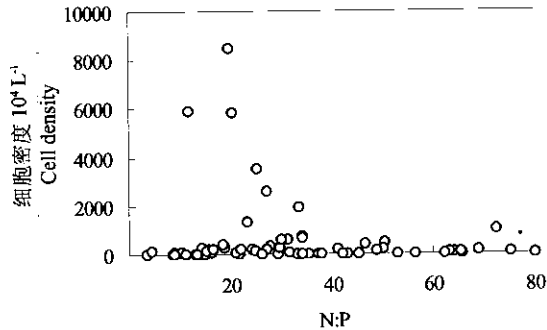


图1 广东省水库蓝藻密度与N:P原子比的关系
Fig.1 Relationship between cell density of blue-green algae and N:P atom ratio in reservoirs of Guangdong Province

2.3 各水域区水库污染状况

蓝藻是耐污性比较强的种类,一般在营养化程度比较高的水体出现,而不少文献中都把蓝藻作为淡水水体重富营养化的标志^[7,14-16]。从广东省水库的耐污性种类的分布状况和蓝藻数量及百分比来看,广东省大部分水库受到一定程度的污染,而且水质从上游至下游、从山区到沿海、从经济不发达地区到发达地区逐步恶化。

各流域水库中,以东江流域水库水质较好,生物学和水质指标在 6 个水域区中为最优 (表 4),耐污染浮游植物种类少,蓝藻细胞密度较低,但由于

总浮游植物密度较低,一些水库蓝藻百分比仍超过 40% (表 2,4)。北江流域水库蓝藻细胞密度最低,但其他指标值稍劣于东江流域。粤东沿海和韩江流域水库污染程度相近,平均蓝藻细胞密度超过了 $100 \times 10^4 L^{-1}$, Chl a 含量为 $3 mg m^{-3}$ 左右。粤西沿海水库已受到明显污染,蓝藻细胞密度超过 $500 \times 10^4 L^{-1}$, 百分比为 6 个水域区较高,超过了 60%。珠江三角洲地区大部分水库已受到严重污染,蓝藻细胞密度超过 $800 \times 10^4 L^{-1}$ 。平均营养状态指数东江流域小于贫营养水平 30,其他水域区水库未超过富营养化水平域值 50。总体来说,除东江流域水库外,其余 5 个水域区都已受到一定程度的污染,但流域污染水平尚在中营养型范围之内。

北江流域水质的变化趋势不明显,整体水质较好,3 座水库均处于粤北山区,工业污染较少,人口相对也较少,主要污染源为农业污染,它们的污染程度相近。下游的飞来峡水库是一座蓄水初期的直流型水库,1998 年才开始蓄水,底部沉积物较少,底质所带来的营养盐也较少,加之直流型水库水流较急,不利于藻类聚集,因此浮游植物数量较低,营养状况与上游 2 座水库相近。

东江流域水质较好,耐污性种类仅偶尔出现,蓝藻细胞密度和百分比都较低。东江流域是广东省重要的水资源蓄水区,全省蓄水的一半以上来自东江流域,因此,该流域水资源的保护对广东省人民生活 and 经济发展具有极其重要的作用。东江上游的新丰江水库是广东省库容量最大的水库,也是全国

表 4 各流域浮游植物细胞密度、蓝藻细胞密度和百分比及叶绿素含量和营养状态指数的平均值
Table 4 Averages of water quality factors in reservoirs of six drainage areas

| | 流域 Drainage areas | | | | | |
|--|-------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|
| | 北江 Beijiang | 东江 Dongjiang | 粤东沿海 East coastal area | 韩江 Hangjiang | 粤西沿海 West coastal area | 珠江三角洲 Pearl River Delta |
| 耐污染种类数百分比(%) Percentage proportion of species number of saprobic taxa | 30.01 | 21.57 | 34.61 | 42.45 | 39.90 | 51.15 |
| 蓝藻细胞密度($10^4 L^{-1}$) Cell density of blue-green algae | 15.77 | 40.54 | 137.15 | 137.60 | 564.07 | 884.37 |
| 蓝藻百分比(%) Percentage proportion of blue-green algae | 25.70 | 33.13 | 45.84 | 64.70 | 62.50 | 61.03 |
| 浮游植物细胞密度($10^4 L^{-1}$) Cell density of phytoplankton | 55.87 | 65.67 | 235.56 | 191.95 | 725.48 | 1006.75 |
| 叶绿素 a Chl a ($mg m^{-3}$) | 2.03 | 0.72 | 3.19 | 2.98 | 6.38 | 8.01 |
| 综合营养状态指数 Trophic state index (Σ) | 35.13 | 29.13 | 36.29 | 39.02 | 39.74 | 43.57 |

第 4 大水库,水质优良,但本研究发现该水库也出现了一定数量的耐污性蓝藻,特别是在旅游旺季的夏季(丰水期),旅游污染是该水库的主要污染源,若不及时控制旅游业的发展速度,势必影响到该水库的水质,也将影响广州市引入该水库水作为饮用水源的城市规划项目。

单从浮游植物和蓝藻污染状况来说(表 2),粤东沿海的 4 座水库以公平水库水质最好,其他 3 座水库水质相近。公平水库上游集水区部分地区有硫铁矿分布,丰水期大量降雨也带来了大量酸性水流入水库,使入库水呈明显的酸性,酸污染区附近河流入口处极端 pH 值可降至 4.73,这种酸性条件下,藻类生长受到一定的抑制。因此,公平水库是一座酸污染型水库,其所显示的良好生物学指标并不能代表水质状况。

粤西沿海地区是广东省的高科技农业区,而且也是水资源较为缺乏地区,水库在农业生产及人民生活中的地位极其重要,但遗憾的是该地区也是水污染较为严重的地区之一。特别是鹤地水库,丰水期微囊藻平均细胞密度高达 $2.68 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,百分比超过了 99%。该水域水库主要受到农业污染,营养盐含量较高^[17],适合于小型耐污性蓝藻如微囊藻的生长,该区域水库蓝藻的百分比为 6 个水域区最高(表 4)。

珠江三角洲地区 5 座水库以流溪河水库水质较好,大镜山和大沙河水库次之,而石岩和契斧石水库则是本次调查中水质较差的 2 座水库(表 2)。流溪河水库位于流溪河源头区,周边人口较少,广州市 70% 的供水来源于该水库,水质受到良好保护,污染程度较低。而石岩和契斧石水库则位于经济发达的深圳市和东莞市,工、农业污染和生活污染都比较严重,蓝藻细胞密度均高于 $10^7 \text{ cells L}^{-1}$ (表 4)。从本调查结果来看,这两座水库如不进行及时治理,再继续作为饮用水源较为困难。

2.4 水质的综合评价

结合文献报道及我国地面水水质标准^[7,18],根据本调查结果对水库水质进行评价,将水库水质分为 4 类(表 5),并对 19 个水库进行归类,评价结果显示新丰江和白盘珠两座水库尚未受到污染,属于贫营养型水体;赤石径、小坑、飞来峡、沙田、合水、公平、河溪、高州、流溪河和大镜山 10 座水库受到一定程度的污染,属于中营养型水体;赤沙、汤溪、大水桥和大沙河 4 座水库受到较为严重污染,属于中

至富营养型水体;而鹤地、契斧石和石岩这 3 座水库已遭受严重污染,属于富营养型水体。此评价结果与根据水化、叶绿素等营养状态指数法^[17]进行评价所得结果基本上一致,只是个别水库略有差异。

表 5 营养状态分级标准

Table 5 Criteria of trophic state used in this study

| | I | II | III | IV |
|--|-----|--------|---------|------|
| 蓝藻细胞密度 Cell density of blue-green algae ($\times 10^4 \text{ L}^{-1}$) | <50 | 50-200 | 200-500 | >500 |
| 蓝藻百分比 (%) Percentage proportion of blue-green algae | <50 | 50-70 | 70-80 | >80 |
| 耐污种类数百分比 (%) Percentage proportion of saprobic taxa | <30 | 30-40 | 40-50 | >50 |
| 叶绿素 a Chl a (mg m^{-3}) | <1 | 1-5 | 5-10 | >10 |
| 综合营养状态指数 Trophic state index (Σ) | <30 | 30-40 | 40-50 | >50 |

I: 贫营养化即寡污型 Oligotrophic or oligosaprobic; II: 中营养化即 α -中污型 Meso-trophic or α -mesosaprobic; III: 中至富营养化即 β -中污型 Meso- to eutrophic or β -mesosaprobic; IV: 富营养化即重污型 Eutrophic or polysaprobic.

3 结论

广东省大部分水库为中营养型水体,2 座水库尚未受到明显污染,4 座水库已受到明显污染,而 3 个位于沿海经济发达地区的水库则受到严重污染。东江流域水库水质普遍较好,北江流域次之,粤西沿海和珠江三角洲地区各水库均受到不同程度的污染。值得注意的是许多水库已明显遭受蓝藻污染,优势种类为能产生微囊藻毒素的微囊藻、鱼腥藻等蓝藻,有的甚至发生了较为严重的蓝藻水华,如不及时采取措施进行治理,作为饮用水源势必危及人民身体健康,同时也阻碍广东省经济的可持续发展。

参考文献

- [1] Yao W Z (姚维志). Evaluation of eutrophication of the Jintan reservoir by means of phytoplankton [J]. Chongqing Envir Sci (重庆环境科学), 1996, 18(1):55-57. (in Chinese)
- [2] Li J(李瑾), Wu J(吴洁), Gong P(巩兵), et al. Primary study of phytoplankton community in Qingshan reservoir of Zhejiang province [J]. Acta Agri Zhejiang (浙江农业大学学报), 1998, 10 (3):122-127. (in Chinese)
- [3] Min Y Z(孟玉珍), Zhang D(张丁), Wang X G(王兴国), et al.

- Study on the contamination of algae and microcystins in water sources of Zhengzhou City [J]. *J Hygiene Res (卫生研究)*, 1999, 28(2):100-101. (in Chinese)
- [4] Dong C H(董传辉), Yu S Z(俞顺章), Chen G(陈刚), et al. Detection of microcystins in source and tap water from a lake [J]. *J Hygiene Res (卫生研究)*, 1998, 27(2):100-102. (in Chinese)
- [5] Qiao M Y(乔明彦), He Z R(何振荣), Shen Z(沈智), et al. Damage of *Anabaena* bloom on sheep in Dalai Lake and the separation of the toxins [J]. *Inner Mongolia Envir Prot (内蒙古环境保护)*, 1996, 8(1):19-20. (in Chinese)
- [6] Yu S Z(俞顺章), Zhao N(赵宁), Zi X L(资小林), et al. The relationship between cyanotoxin (Microcystin, MC) in pond-ditch water and primary liver cancer in China [J]. *Chin J Oncol(中华肿瘤杂志)*, 2001, 23(2):96-99. (in Chinese)
- [7] Jin X C(金相灿), Tu Q Y(屠清瑛). *Manual of Eutrophication Survey on Lakes* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 286-302. (in Chinese)
- [8] Shannon C E, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication* [M]. Urbana, Chicago, Ill. London: Univ Illinois Press, 1949. 296.
- [9] Pielou E. C. *An Introduction to Mathematical Ecology* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1969. 1-286.
- [10] McNaughton S J. Relationship among functional prosperities of California grassland [J]. *Nature*, 1967, 216:168-169.
- [11] Heckey R G, Killham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on effects of enrichment [J]. *Limnol Oceanogr*, 1988, 33:796-822.
- [12] Liu Y S(刘玉生), Han M(韩梅), Liang Z B(梁占彬), et al. Influence of light intensity, temperature and nutrients on the growth of *Microcystis* in water of Dianchi Lake [J]. *Res Envir Sci(环境科学研究)*, 1995, 8(6):7-11. (in Chinese)
- [13] Gao X Q(高学庆), Ren C J(任久长), Zong Z X(宗志祥), et al. Study on nutrient energetics of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Acta Sci Natl Univ Pekinensis(北京大学学报自然科学版)*, 1994, 30(4):461-469. (in Chinese)
- [14] Wu J(吴洁), Yu Z M(虞左明). The succession of phytoplankton and the ecological effects of eutrophication control measures in Hongzhou West Lake [J]. *Chin Envir Sci(中国环境科学)*, 2001, 21(6):540-544. (in Chinese)
- [15] Zhang Y K(张义科), Zhang X S(张雪松), Tie Y M(田玉梅). Study on assessment of water quality of the Lake Beiyangdian using phytoplankton on community structure [J]. *J Hebei Univ(河北大学学报)*, 1997, 4:39-46. (in Chinese)
- [16] Lin Q Q(林秋奇), Hu R(胡韧), Duan S S(段舜山), et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2003, 23(6):1101-1108. (in Chinese)
- [17] Shen Y F(沈韞芬), Zhang Z S(章宗涉), Gong X J(龚循矩), et al. *Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990. 119-169. (in Chinese)