

# 杭州地区 17 座水库浮游植物群落组成及其与环境因子的关系

盛海燕<sup>1,2</sup>, 姚佳玫<sup>2</sup>, 刘明亮<sup>2</sup>, 何剑波<sup>2</sup>, 韩轶才<sup>2</sup>, 虞左明<sup>2</sup>, 张银龙<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 2. 杭州市环境保护科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**于 2008 年和 2009 年的丰水期(8 月)和枯水期(12 月)分别对杭州地区 17 座大中型水库进行采样调查。结果表明,浮游植物有 85 种,其中绿藻最多,有 29 种,硅藻 26 种,蓝藻 15 种,裸藻 6 种,隐藻、甲藻和金藻各 3 种。各水库浮游植物年均密度为  $1.27 \times 10^6 \sim 6.55 \times 10^6$  个/L,最高密度为  $12.20 \times 10^6$  个/L,最低密度为  $0.168 \times 10^6$  个/L。叶绿素 a 浓度年均值为  $2.86 \sim 28.35 \mu\text{g/L}$ ,最高浓度为  $33.60 \mu\text{g/L}$ ,最低浓度为  $1.36 \mu\text{g/L}$ ;丰水期浮游植物密度和叶绿素 a 浓度高于枯水期。多数水库丰水期优势种为蓝藻,枯水期优势种为硅藻;各水库间浮游植物密度无显著差异,但叶绿素 a 浓度差异显著。从营养状态指数(TLI)、浮游植物密度及叶绿素 a 浓度等综合分析,杭州地区 17 座大中型水库基本处于中营养-轻度富营养状态。对浮游植物群落组成及动态与环境因子之间的关系进行典范对应分析(CCA),发现营养盐和透明度对浮游植物的增长起到关键作用。

**关键词:**浮游植物;群落组成;环境因子;水库;典范对应分析;营养状态指数

**中图分类号:**Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2015)01-0025-09

水库的基本功能是用来防洪、灌溉和发电(胡韧等,2002)。随着经济的高速发展以及人为活动的加剧,我国河流与湖泊污染日益严重,很多以此作为供水水源地的水质恶化明显,水库已逐步成为主要的供水水源。水库生态学及其水质管理已经成为湖沼学研究的热点(Straskraba et al, 1993; 韩博平, 2010)。浮游植物作为淡水生态系统中重要的初级生产者,在能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用(孙军和刘东艳,2004; 张婷和宋立荣,2006; 李敦海等,2007; 张婷等,2009)。由于浮游植物生活周期短,对环境变化非常敏感,其群落结构能较好地反映水生态系统的营养状况,因此已作为评价水体营养等级的重要环境指示生物(Mariaeristina & Antonio, 2006; 石晓丹等, 2008; 苏玉等, 2011)。

国内对单座水库浮游植物群落结构、季节动态及其与环境因子的研究较多,但对整个地区及流域多座水库的综合研究较少(林秋奇等,2003; 王朝晖等,2005)。杭州地区以钱塘江和苕溪作为主要饮用水源地,随着两大流域的污染不断增加,水体污染日益严重,导致其水质很难满足水功能区的要求,给

杭州地区饮用水源的水质带来很大风险(董民强等,2011; 聂泽宇等,2012)。基于此严峻的现状,决策部门考虑水库取水为杭州地区提供一条可行且安全的供水渠道。本文通过对杭州地区大中型水库浮游植物的调查,探究浮游植物群落与水体营养状态的关系,为该地区水资源保护与饮用水安全提供基础资料和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 地区概况

杭州地区属亚热带季风性气候,光温同步、雨热同季、四季分明、光照充足、雨量充沛,多年平均降雨量为 1 573 mm,降雨多集中于每年的 4-10 月,为丰水期,11 月至次年 3 月为枯水期。

### 1.2 样点设置

根据杭州市水资源的分布情况,选择了钱塘江和苕溪两大流域上的 17 座大中型水库,钱塘江流域的铜山水库(TS)、枫树岭水库(FSL)、霞源水库(XY)、严家水库(YJ)、新安江水库(XAJ)、罗村水库(LC)、分水江水库(FSJ)、富春江水库(FCJ)、肖岭水库(XL)、岩石岭水库(YSL)、华光潭水库(HGT)、英公水库(YG)、青山殿水库(QSD);苕溪流域的水涛庄水库(STZ)、里畈水库(LF)、青山水库(QS)和四岭水库(SL)(图 1)。于 2008 年 8 月(丰水期)和 12 月(枯水期)以及 2009 年 8 月(丰水期)和 12 月(枯水期)对选取水库的河流区和湖泊区进行采样。

收稿日期:2014-06-11

**基金项目:**杭州市环境保护科研计划重大项目(2010116);杭州市科技发展计划项目(20091133B11)。

**作者简介:**盛海燕,1978 年生,女,高级工程师,主要从事淡水生态学研究。E-mail:21708089@qq.com

1.3 样品采集与分析

浮游植物定性样品用 25 号网在不同方向和深度拖取;定量样品从表层 0.5 m 处采取 1 L 水,现场用鲁哥氏液固定,带回实验室静置沉淀后浓缩计数;种类鉴定和计数等参考胡鸿钧和魏印心(2006)。

测定项目包括水温(WT)、透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、氨

氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、可溶性磷(DP)、可溶性硅(DSi)。透明度采用塞氏圆盘法现场测定,水温和溶解氧采用美国银泉公司生产的 YSI-52 型溶氧仪现场测定,其余理化项目采集后 4 h 内在实验室测定。理化指标按照《水和废水监测分析方法》进行(金相灿和屠清瑛,1990);叶绿素 a 的测定采用分光光度法(林少君等,2005)。



图1 杭州地区 17 座大中型水库的位置分布

Fig. 1 Location of the 17 medium and large reservoirs in Hangzhou

1.4 营养状态评价

水库营养状态评价采用综合营养状态指数法。评价指标包括叶绿素 a (Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)(Habib & Tippet,1997;谭香等,2011)。

计算公式如下:

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

式中:TLI(Σ) - 综合营养状态指数;W<sub>j</sub> - 第 j 种参数营养状态指数的相关权重;TLI(j) - 第 j 种参数的营养状态指数。

采用数值 0 ~ 100 对营养状态进行分级:TLI(Σ) < 30 为贫营养,30 ≤ TLI(Σ) ≤ 50 为中营养,TLI(Σ) > 50 为富营养;其中,50 < TLI(Σ) ≤ 60 为

轻度富营养,60 < TLI(Σ) ≤ 70 为中度富营养,TLI(Σ) > 70 为重度富营养。在同一营养状态下,指数值越大表示其营养程度越高。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 对所有数据进行统计分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同数据组间的差异。聚类分析采用 SPSS 19.0 统计软件。选取水温、pH、DO、TN、TP、SD、COD、氨氮、可溶性磷、可溶性硅、水力滞留时间等理化因子和叶绿素 a、浮游植物密度等生物因子进行分析和聚类。采用 Canoco for Windows 4.5 软件进行典范对应分析(Abrantes et al, 2006)。筛选各季度出现频率在 50% 以上的浮游植物种类用于分析,细胞密度数据进行 log(x + 1)转换(李德亮等,2012)。

2 结果与分析

2.1 种类组成

在 4 次采样中共鉴定出浮游植物 85 种, 隶属 7 门; 其中, 绿藻门 (Chlorophyta) 最多, 有 29 种, 占总种数的 34.1%; 硅藻门 (Bacillariophyta) 其次, 26 种, 占 29.4%; 蓝藻门 (Cyanophyta) 15 种, 占 17.6%; 裸藻门 (Euglenophyta) 6 种, 占 7.1%; 隐藻门 (Cryptophyta)、甲藻门 (Pyrrophyta)、金藻门均为 3 种, 各占 4.0%。种类丰度最大的是新安江水库, 共有 76 种, 最低的是肖岭水库, 仅有 46 种 (表 1)。

杭州地区大中型水库浮游植物种类以绿藻和硅

藻为主。在所有水库样本中均有出现的浮游植物有微小色球藻 (*Chroococcus minutus*)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、单角盘星藻 (*Pediastrum simplex*)、梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、广缘小环藻 (*Cyclotella bodanica*)、颗粒直链藻 (*Melosira granulata*)、尖针杆藻 (*Synedra acus*)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、中型脆杆藻 (*Fragilaria intermedia*)、星杆藻 (*Asterionella formosa*)、细小舟形藻 (*Navicula gracilis*)、尖布纹藻 (*Gyrosigma acuminatum*)、双头菱形藻 (*Nitzschia frustulum*)、分歧锥囊藻 (*Dinobryon divergens*)、角甲藻 (*Ceratium hirundinella*)。

表 1 17 座水库的浮游植物种类

Tab.1 Distribution of phytoplankton taxa in sampled reservoirs

| 水 库  | 蓝藻门 | 绿藻门 | 硅藻门 | 裸藻门 | 金藻门 | 隐藻门 | 甲藻门 | 种数合计 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 铜山   | 2   | 20  | 20  | 0   | 3   | 2   | 1   | 48   |
| 枫树岭  | 5   | 23  | 23  | 1   | 2   | 3   | 2   | 59   |
| 霞源   | 2   | 20  | 18  | 1   | 3   | 2   | 1   | 47   |
| 严家   | 5   | 19  | 23  | 3   | 1   | 2   | 2   | 55   |
| 新安江  | 13  | 26  | 23  | 5   | 3   | 3   | 3   | 76   |
| 罗村   | 6   | 19  | 23  | 1   | 1   | 3   | 2   | 55   |
| 分水江  | 13  | 21  | 23  | 3   | 1   | 1   | 3   | 65   |
| 富春江  | 8   | 14  | 18  | 2   | 1   | 1   | 3   | 47   |
| 肖岭   | 1   | 22  | 20  | 0   | 2   | 1   | 0   | 46   |
| 岩石岭  | 5   | 21  | 20  | 3   | 1   | 2   | 3   | 55   |
| 华光潭  | 4   | 22  | 23  | 3   | 3   | 2   | 2   | 59   |
| 英公   | 9   | 22  | 21  | 2   | 2   | 2   | 1   | 59   |
| 青山殿  | 7   | 17  | 24  | 2   | 2   | 3   | 1   | 56   |
| 水涛庄  | 8   | 19  | 21  | 3   | 3   | 2   | 2   | 58   |
| 里畈   | 9   | 15  | 20  | 1   | 2   | 2   | 2   | 51   |
| 青山   | 13  | 16  | 21  | 3   | 1   | 2   | 3   | 59   |
| 四岭   | 12  | 19  | 24  | 5   | 3   | 1   | 3   | 67   |
| 种数合计 | 15  | 29  | 26  | 6   | 3   | 3   | 3   | 85   |

2.2 细胞密度

各水库浮游植物细胞密度、蓝藻数量及百分比、叶绿素 a 含量见表 2。细胞密度表现为丰水期高于枯水期, 丰水期为  $1.48 \times 10^6 \sim 12.20 \times 10^6$  个/L, 枯水期为  $0.168 \times 10^6 \sim 4.89 \times 10^6$  个/L, 平均细胞密度范围  $1.27 \times 10^6 \sim 6.55 \times 10^6$  个/L。丰水期所有水库浮游植物数量均大于富营养化标准  $10^6$  个/L (金相灿和屠清瑛, 1990; 刘健康, 1999); 说明从浮游植物细胞密度来看, 各水库丰水期水质均已经达到富营养化水平。枯水期, 霞源、严家、新安江、罗村、分水江、水涛庄、青山和四岭水库的浮游植物密度也超过了  $10^6$  个/L。蓝藻密度也是丰水期高于枯水期, 丰水期的藻类细胞密度除霞源和富春江水库外, 均在  $10^6$  个/L 以上, 枯水期的密度在  $1.8 \times 10^4 \sim 61.8 \times 10^4$  个/L。丰水期蓝藻密度比例较高, 17 座

水库中有 10 座水库的蓝藻比例大于 50%, 枯水期仅 2 座水库比例超过 50%。

各水库叶绿素 a 含量也基本表现为丰水期大于枯水期 (除了霞源、严家和四岭水库外)。丰水期叶绿素 a 含量为  $4.35 \sim 33.60 \mu\text{g/L}$ , 枫树岭、分水江、富春江、岩石岭、青山殿、水涛庄、青山和四岭水库含量大于  $10 \mu\text{g/L}$ , 已经达到和超过富营养湖泊水平 (刘健康, 1999); 枯水期仅青山和四岭水库叶绿素 a 含量大于  $10 \mu\text{g/L}$ 。

2.3 理化因子与营养状态评价

根据地表水环境质量标准 (GB3838-2002), 杭州地区 17 座大中型水库仅 5 座水库水质为 II ~ III 类, 占 29.4%, 分别是铜山、枫树岭、霞源、严家、新安江水库; 2 座水库水质为 IV 类, 占 11.8%, 分别是罗村和四岭水库; 其余 10 座水库水质为 V 类或劣 V

类,占 58.8%。从影响水库水质类别的污染物来看,主要是总氮浓度过高,个别水库总磷超标;17 座水库中有 12 座的总氮超过湖库Ⅲ类标准值,7 座超过Ⅴ类水质标准值,其中青山水库的 TN 最高,年均值达到 3.322 mg/L(表 3)。

根据综合营养状态指数(表 4),丰水期有 2 座水库处于贫营养状态,分别是铜山和霞源,13 座水库处于中营养状态,而富春江和青山 2 座水库则处于轻度富营养状态;枯水初期青山和富春江水库处于轻度富营养状态,铜山水库处于贫营养状态,其余

水库均处于中营养状态。各水库丰水期和枯水期的综合营养状态指数略有变化,但变化幅度不大。

2.4 聚类分析

选择理化因子和生物因子对 17 座水库进行聚类分析,结果见图 2。17 座水库分为 3 类。第 1 类水库包括新安江、严家、枫树岭、霞源和铜山 5 座水库,主要位于新安江水库上游地区,水质较好,富营养化程度较低;第 2 类水库仅包括青山和富春江水库,是富营养程度最高的 2 座水库;第 3 类水库包括分水江、里畈、肖岭、华光潭、英公、罗村、四岭、岩石

表 2 17 座水库的浮游植物总密度、叶绿素 a 浓度及蓝藻密度和百分比

Tab.2 Cyanophyta density, Cyanophyta density percentage, phytoplankton density and chlorophyll a content in sampled reservoirs

| 水库  | 蓝藻密度/ $\times 10^5$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$ |      |       | 蓝藻百分比/% |       |       | 浮游植物密度/ $\times 10^5$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$ |       |       | 叶绿素 a 含量/ $\mu$ g $\cdot$ L $^{-1}$ |       |       |
|-----|-----------------------------------------|------|-------|---------|-------|-------|-------------------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|
|     | 丰水期                                     | 枯水期  | 平均    | 丰水期     | 枯水期   | 平均    | 丰水期                                       | 枯水期   | 平均    | 丰水期                                 | 枯水期   | 平均    |
| 铜山  | 20.77                                   | 1.38 | 11.10 | 67.68   | 28.05 | 47.86 | 30.69                                     | 4.92  | 17.80 | 5.95                                | 1.49  | 3.72  |
| 枫树岭 | 26.52                                   | 6.02 | 16.30 | 21.78   | 64.87 | 43.32 | 121.78                                    | 9.28  | 65.50 | 10.68                               | 2.61  | 6.65  |
| 霞源  | 8.55                                    | 1.50 | 5.00  | 57.97   | 12.78 | 35.37 | 14.75                                     | 11.74 | 13.20 | 5.40                                | 5.59  | 5.49  |
| 严家  | 33.54                                   | 2.00 | 17.80 | 47.75   | 10.16 | 28.96 | 70.24                                     | 19.68 | 45.00 | 7.76                                | 7.91  | 7.83  |
| 新安江 | 35.20                                   | 2.23 | 18.71 | 56.22   | 10.40 | 33.35 | 62.61                                     | 21.28 | 41.95 | 8.30                                | 2.85  | 5.58  |
| 华光潭 | 11.30                                   | 0.53 | 5.90  | 48.21   | 6.75  | 27.48 | 23.44                                     | 7.85  | 15.60 | 6.39                                | 3.13  | 4.76  |
| 英公  | 24.30                                   | 2.20 | 13.30 | 71.34   | 60.45 | 65.89 | 34.06                                     | 3.64  | 37.70 | 6.53                                | 1.63  | 4.08  |
| 罗村  | 47.35                                   | 1.86 | 32.19 | 59.68   | 11.06 | 35.37 | 79.34                                     | 16.84 | 48.39 | 9.78                                | 7.93  | 8.86  |
| 肖岭  | 15.95                                   | 0.18 | 8.10  | 67.56   | 9.68  | 38.62 | 23.61                                     | 1.86  | 12.70 | 4.35                                | 1.36  | 2.86  |
| 青山殿 | 72.85                                   | 0.92 | 36.90 | 61.10   | 14.89 | 37.99 | 119.24                                    | 6.18  | 62.70 | 20.05                               | 3.99  | 12.02 |
| 岩石岭 | 29.28                                   | 0.65 | 15.00 | 26.53   | 8.66  | 17.60 | 110.36                                    | 7.51  | 58.90 | 19.85                               | 6.54  | 13.19 |
| 分水江 | 12.44                                   | 3.39 | 6.17  | 37.70   | 32.98 | 35.36 | 32.96                                     | 10.28 | 21.62 | 15.69                               | 3.76  | 9.72  |
| 富春江 | 2.99                                    | 0.38 | 1.07  | 12.20   | 22.59 | 17.40 | 24.47                                     | 1.68  | 13.08 | 15.26                               | 1.95  | 8.60  |
| 水涛庄 | 43.80                                   | 2.75 | 23.30 | 71.42   | 18.82 | 45.13 | 61.32                                     | 14.61 | 38.00 | 10.50                               | 4.12  | 7.31  |
| 里畈  | 24.50                                   | 2.13 | 13.30 | 64.05   | 48.96 | 56.51 | 38.25                                     | 4.35  | 37.97 | 4.70                                | 1.74  | 3.22  |
| 四岭  | 17.69                                   | 6.18 | 24.39 | 29.71   | 12.63 | 21.17 | 59.55                                     | 48.93 | 54.24 | 15.03                               | 15.29 | 15.16 |
| 青山  | 60.34                                   | 2.59 | 31.46 | 72.06   | 5.76  | 38.91 | 83.75                                     | 44.93 | 64.34 | 33.60                               | 23.10 | 28.35 |

表 3 17 座水库的主要理化因子

Tab.3 Main physical and chemical parameters of the water body in sampled reservoirs

| 水库  | pH              | WT/℃            | SD/m            | DO/mg $\cdot$ L $^{-1}$ | COD/mg $\cdot$ L $^{-1}$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| 铜山  | 7.89 $\pm$ 0.38 | 21.9 $\pm$ 8.5  | 2.31 $\pm$ 1.64 | 9.36 $\pm$ 1.77         | 1.14 $\pm$ 0.41          |
| 霞源  | 8.24 $\pm$ 0.82 | 22.2 $\pm$ 10.0 | 2.44 $\pm$ 1.38 | 8.65 $\pm$ 1.06         | 1.62 $\pm$ 0.51          |
| 枫树岭 | 8.35 $\pm$ 0.82 | 22.5 $\pm$ 8.1  | 1.42 $\pm$ 0.82 | 9.62 $\pm$ 2.94         | 1.41 $\pm$ 0.58          |
| 严家  | 8.30 $\pm$ 0.97 | 20.9 $\pm$ 8.5  | 1.56 $\pm$ 0.90 | 9.41 $\pm$ 1.17         | 1.39 $\pm$ 0.46          |
| 新安江 | 7.77 $\pm$ 0.27 | 22.9 $\pm$ 5.7  | 4.28 $\pm$ 1.69 | 8.02 $\pm$ 0.92         | 1.64 $\pm$ 0.26          |
| 华光潭 | 8.07 $\pm$ 0.32 | 18.7 $\pm$ 10.4 | 2.81 $\pm$ 0.85 | 10.01 $\pm$ 1.88        | 1.79 $\pm$ 0.59          |
| 英公  | 8.12 $\pm$ 0.91 | 20.9 $\pm$ 13.2 | 1.98 $\pm$ 0.98 | 10.96 $\pm$ 2.25        | 2.16 $\pm$ 0.87          |
| 罗村  | 8.84 $\pm$ 0.98 | 24.6 $\pm$ 10.9 | 1.72 $\pm$ 0.32 | 10.31 $\pm$ 0.59        | 1.91 $\pm$ 0.82          |
| 肖岭  | 7.68 $\pm$ 0.52 | 20.1 $\pm$ 9.8  | 5.00 $\pm$ 3.39 | 9.07 $\pm$ 1.65         | 0.99 $\pm$ 0.41          |
| 青山殿 | 8.23 $\pm$ 0.48 | 20.1 $\pm$ 10.2 | 2.20 $\pm$ 0.58 | 10.76 $\pm$ 2.58        | 1.78 $\pm$ 0.60          |
| 岩石岭 | 8.33 $\pm$ 0.34 | 20.6 $\pm$ 11.5 | 1.28 $\pm$ 0.53 | 11.98 $\pm$ 2.52        | 1.76 $\pm$ 0.75          |
| 分水江 | 8.34 $\pm$ 0.58 | 21.9 $\pm$ 7.5  | 1.30 $\pm$ 0.58 | 10.08 $\pm$ 1.91        | 1.74 $\pm$ 0.43          |
| 富春江 | 7.57 $\pm$ 0.22 | 19.1 $\pm$ 6.5  | 0.66 $\pm$ 0.19 | 7.48 $\pm$ 1.27         | 2.23 $\pm$ 0.19          |
| 里畈  | 7.89 $\pm$ 0.69 | 20.2 $\pm$ 10.1 | 1.22 $\pm$ 0.65 | 9.94 $\pm$ 0.44         | 1.95 $\pm$ 0.63          |
| 水涛庄 | 7.95 $\pm$ 0.60 | 21.4 $\pm$ 9.6  | 1.60 $\pm$ 0.58 | 9.69 $\pm$ 0.84         | 2.18 $\pm$ 0.79          |
| 四岭  | 8.11 $\pm$ 0.56 | 20.4 $\pm$ 7.9  | 1.68 $\pm$ 0.42 | 10.25 $\pm$ 1.97        | 2.01 $\pm$ 0.43          |
| 青山  | 8.13 $\pm$ 0.35 | 20.5 $\pm$ 9.8  | 0.55 $\pm$ 0.22 | 9.82 $\pm$ 3.28         | 3.87 $\pm$ 0.75          |

续表 3      Tab. 3    continued

| 水库  | TN/mg · L <sup>-1</sup> | NH <sub>3</sub> -N/mg · L <sup>-1</sup> | TP/mg · L <sup>-1</sup> | DP/mg · L <sup>-1</sup> | DSi/mg · L <sup>-1</sup> |
|-----|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 铜山  | 0.461 ± 0.353           | —                                       | 0.015 ± 0.008           | 0.010 ± 0.007           | 3.11 ± 2.13              |
| 霞源  | 0.162 ± 0.125           | —                                       | 0.017 ± 0.003           | 0.014 ± 0.001           | 3.04 ± 2.26              |
| 枫树岭 | 0.321 ± 0.291           | —                                       | 0.019 ± 0.010           | 0.018 ± 0.003           | 3.93 ± 2.53              |
| 严家  | 0.850 ± 0.438           | —                                       | 0.019 ± 0.005           | 0.017 ± 0.001           | 3.27 ± 2.23              |
| 新安江 | 0.958 ± 0.403           | 0.020 ± 0.017                           | 0.018 ± 0.012           | —                       | 4.86 ± 2.76              |
| 华光潭 | 2.218 ± 0.167           | 0.078 ± 0.021                           | 0.017 ± 0.006           | 0.009 ± 0.001           | 5.43 ± 2.88              |
| 英公  | 3.035 ± 0.332           | 0.135 ± 0.063                           | 0.022 ± 0.010           | —                       | 6.96 ± 3.49              |
| 罗村  | 1.290 ± 0.445           | 0.039 ± 0.005                           | 0.029 ± 0.005           | —                       | 5.17 ± 1.68              |
| 肖岭  | 2.473 ± 0.710           | 0.042 ± 0.014                           | 0.023 ± 0.010           | —                       | 9.43 ± 0.66              |
| 青山殿 | 1.720 ± 0.202           | 0.077 ± 0.025                           | 0.030 ± 0.008           | 0.023 ± 0.013           | 8.94 ± 2.88              |
| 岩石岭 | 1.810 ± 1.048           | 0.102 ± 0.015                           | 0.035 ± 0.015           | 0.015 ± 0.005           | 5.64 ± 2.19              |
| 分水江 | 2.083 ± 0.554           | 0.065 ± 0.025                           | 0.033 ± 0.013           | 0.014 ± 0.004           | 4.69 ± 2.08              |
| 富春江 | 2.193 ± 0.458           | 0.279 ± 0.172                           | 0.127 ± 0.026           | 0.071 ± 0.022           | 7.78 ± 1.33              |
| 里畈  | 2.063 ± 0.517           | 0.085 ± 0.021                           | 0.016 ± 0.005           | 0.011 ± 0.005           | 7.94 ± 2.11              |
| 水涛庄 | 1.577 ± 0.164           | 0.080 ± 0.041                           | 0.023 ± 0.001           | 0.012 ± 0.003           | 12.40 ± 4.32             |
| 四岭  | 1.489 ± 0.304           | 0.094 ± 0.039                           | 0.040 ± 0.012           | 0.019 ± 0.007           | 6.09 ± 3.49              |
| 青山  | 3.322 ± 1.351           | 0.418 ± 0.227                           | 0.087 ± 0.031           | 0.026 ± 0.013           | 8.63 ± 0.56              |

注：“—”表示低于检测线。  
Note: “—” means below the detection line.

表 4    17 座水库的水质营养状态评价

Tab. 4    Trophic states of the 17 medium and large reservoirs in Hangzhou

| 水库  | 丰水期    | 营养    | 枯水期    | 营养    |
|-----|--------|-------|--------|-------|
|     | TLI(Σ) | 状态    | TLI(Σ) | 状态    |
| 铜山  | 28.85  | 贫营养   | 26.65  | 贫营养   |
| 霞源  | 29.07  | 贫营养   | 32.85  | 中营养   |
| 枫树岭 | 35.77  | 中营养   | 31.36  | 中营养   |
| 严家  | 37.09  | 中营养   | 37.15  | 中营养   |
| 新安江 | 35.58  | 中营养   | 31.87  | 中营养   |
| 华光潭 | 39.37  | 中营养   | 36.78  | 中营养   |
| 英公  | 41.80  | 中营养   | 38.85  | 中营养   |
| 罗村  | 42.50  | 中营养   | 36.52  | 中营养   |
| 肖岭  | 32.17  | 中营养   | 32.45  | 中营养   |
| 青山殿 | 43.87  | 中营养   | 40.11  | 中营养   |
| 岩石岭 | 44.57  | 中营养   | 42.51  | 中营养   |
| 分水江 | 49.43  | 中营养   | 40.41  | 中营养   |
| 富春江 | 50.25  | 轻度富营养 | 50.39  | 轻度富营养 |
| 里畈  | 38.53  | 中营养   | 41.54  | 中营养   |
| 水涛庄 | 43.93  | 中营养   | 39.37  | 中营养   |
| 四岭  | 43.62  | 中营养   | 45.17  | 中营养   |
| 青山  | 55.21  | 轻度富营养 | 59.01  | 轻度富营养 |

岭、青山殿和水涛庄共 10 座水库,富营养化程度比第 2 类水库高,但比第 1 类水库低。本次调查结果表明,从上游至下游、从山区到平原地区,富营养化程度有加重的趋势,这与国内其他地区的研究结果类似(王朝晖等,2005)。

3 讨论

3.1 杭州地区 17 座水库的浮游植物群落特征

在亚热带地区内陆未受污染水体浮游植物的组

成和数量有明显的季节变化规律,春季以喜低温的硅藻和金藻为主,夏季以喜高温的蓝藻和绿藻为主,秋季和春季相似,冬季浮游植物种类和数量都很少(Grover & Chrzanowski,2006;陈立婧等,2011;Ênio et al,2012)。杭州地区大中型水库的浮游植物种类组成也基本符合这一普遍规律。夏季(丰水期)17 座水库中有 16 座的蓝藻占总密度 20% 以上,有 10 座的蓝藻比例大于 50%;冬季(枯水期)以硅藻和隐藻为主,且藻类密度明显低于夏季,这一结果与林秋奇等(2003)对广东省大中型供水水库的浮游植物研究类似。浮游植物总密度和蓝藻密度在 17 座水库中差异不显著( $P>0.05$ ),但叶绿素 a 浓度差异

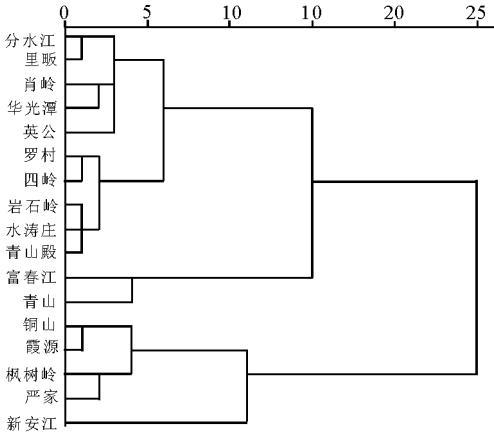


图 2    17 座水库的聚类分析

Fig.2    Dendrogram of the 17 reservoirs based on clustering analysis of physical and chemical factors

表5 典范对应分析中浮游植物种类代码

Tab.5 Codes of phytoplankton species for canonical correlation analysis (CCA)

| 编号  | 种类                                   | 编号   | 种类                                  |
|-----|--------------------------------------|------|-------------------------------------|
| Cy1 | 阿氏颤藻 <i>Oscillatoria agardhii</i>    | Ba5  | 尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>            |
| Cy2 | 微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i> | Ba6  | 星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>     |
| Cy3 | 水华束丝藻 <i>Aphanizomeno flos-aquae</i> | Ch1  | 四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> |
| Cy4 | 卷曲鱼腥藻 <i>Anabaena circinalis</i>     | Ch2  | 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>       |
| Cy5 | 铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>  | Ch3  | 单角盘星藻 <i>Pediastrum pimplex</i>     |
| Ba1 | 颗粒直链藻 <i>Melodira granulata</i>      | Cr1  | 尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>       |
| Ba2 | 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | Eu1  | 尖尾扁裸藻 <i>Phacus acuminatus</i>      |
| Ba3 | 细小舟形藻 <i>Navicula gracilis</i>       | Py1  | 角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>    |
| Ba4 | 中型脆杆藻 <i>Fragilaria intermedia</i>   | Chr1 | 分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>    |

表6 环境因子与前2个排序轴的相关系数

Tab.6 Correlation coefficients between environmental factors and the first two ordination axes

|                    | SP1      | SP2      | EN1      | EN2      | TP       | TN       | SD       | COD     | NH <sub>3</sub> -N | DP       | WT    | pH      | DSi      | DO       | HRT |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------------------|----------|-------|---------|----------|----------|-----|
| SP1                | 1        |          |          |          |          |          |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| SP2                | 0.064    | 1        |          |          |          |          |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| EN1                | 0.876 *  | 0.000    | 1        |          |          |          |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| EN2                | 0.000    | 0.959 *  | 0.000    | 1        |          |          |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| TP                 | -0.355   | 0.732 *  | -0.405   | 0.764 *  | 1        |          |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| TN                 | -0.618 * | 0.111    | -0.706 * | 0.115    | 0.609 *  | 1        |          |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| SD                 | 0.217    | -0.684 * | 0.248    | -0.713 * | -0.687 * | -0.332   | 1        |         |                    |          |       |         |          |          |     |
| COD                | -0.390   | 0.644 *  | -0.446 * | 0.671 *  | 0.839 *  | 0.674 *  | -0.711 * | 1       |                    |          |       |         |          |          |     |
| NH <sub>3</sub> -N | -0.336   | 0.690 *  | -0.383   | 0.719 *  | 0.905    | 0.696 *  | -0.628 * | 0.931 * | 1                  |          |       |         |          |          |     |
| DP                 | -0.055   | 0.560 *  | -0.063   | 0.584 *  | 0.746 *  | 0.248    | -0.554 * | 0.560 * | 0.654 *            | 1        |       |         |          |          |     |
| WT                 | -0.100   | 0.453 *  | -0.114   | 0.473 *  | 0.464 *  | 0.199    | -0.441 * | 0.564 * | 0.436 *            | 0.031    | 1     |         |          |          |     |
| pH                 | 0.113    | 0.117    | 0.129    | 0.122    | -0.025   | -0.180   | -0.260   | -0.032  | -0.208             | -0.177   | 0.400 | 1       |          |          |     |
| DSi                | -0.346   | 0.111    | -0.395   | 0.116    | 0.536 *  | 0.805 *  | -0.130   | 0.560 * | 0.588 *            | 0.282    | 0.178 | -0.275  | 1        |          |     |
| DO                 | -0.389   | -0.117   | -0.444 * | -0.122   | 0.074    | 0.405    | -0.246   | 0.134   | 0.018              | -0.193   | 0.302 | 0.526 * | 0.295    | 1        |     |
| HRT                | 0.300    | -0.153   | 0.342    | -0.159   | -0.470 * | -0.494 * | 0.379    | -0.242  | -0.320             | -0.527 * | 0.053 | -0.066  | -0.442 * | -0.438 * | 1   |

注：\*  $P < 0.05$ 。SP1:物种排序轴1;SP2:物种排序轴2;EN1:环境因子排序轴1;EN2:环境因子排序轴2;TP:总磷;TN:总氮;SD:透明度;COD<sub>Mn</sub>:化学需氧量;NH<sub>3</sub>-N:氨氮;DP:可溶性磷;WT:水温;DSi:可溶性硅;DO:溶解氧;HRT:水力滞留时间。

Note: \*  $P < 0.05$ . SP1: species ordination axis 1; SP2: species ordination axis 2; EN1: environmental variables ordination axis 1; EN2: environmental variables ordination axis 2; TP: total phosphorus; TN: total nitrogen; SD: water transparency; COD<sub>Mn</sub>: chemical oxygen demand based on Mn method; NH<sub>3</sub>-N: ammonia nitrogen; DP: soluble phosphorus; WT: water temperature; DSi: soluble silica; DO: dissolved oxygen; HRT: hydraulic retention time

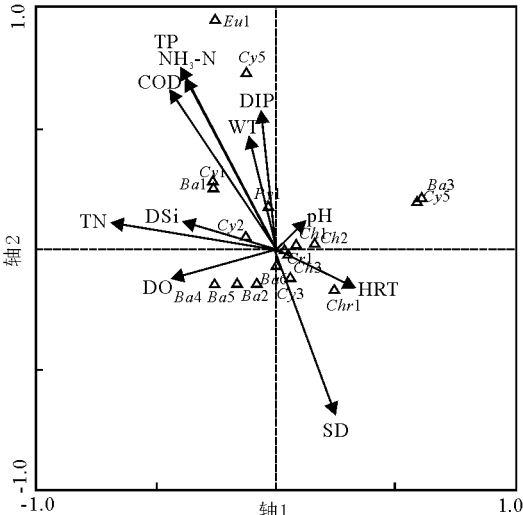


图3 主要浮游植物种类与环境因子关系的 CCA 分析  
Fig.3 CCA of phytoplankton species and environmental variables in biplot

显著( $P < 0.01$ );其中,青山水库平均叶绿素 a 浓度达到 28.35  $\mu\text{g/L}$ ,其次是四岭水库为 15.16  $\mu\text{g/L}$ ,青山殿和岩石岭水库也超过了 10  $\mu\text{g/L}$ 。

浮游植物密度和叶绿素 a 浓度基本呈现出上游地区小于下游地区、山区小于平原地区的规律,其群落结构出现这种规律与水库的营养状态及水文气象条件密不可分。相对而言,位于新安江水库上游地区的铜山、霞源、枫树岭和严家这 4 座水库由于处在山地丘陵地段,离城市较远,周围工厂企业很少,主要以农业生产活动为主,氮磷污染物主要来自农业面源污染,且氮磷含量较低,属于富营养化程度较低的水库类型,其浮游植物生物量小于青山水库和四岭水库;同样位于青山水库上游的水涛庄水库和里畈水库,其浮游植物生物量也明显低于下游的青山水库和四岭水库。

### 3.2 环境因子对浮游植物的影响

典范对应分析方法能把对应分析和多元回归结合起来(Ter Braak, 1986),能更好的解释环境与浮游植物之间的关系,在湖库和河流生态学研究中被广泛应用(Habib et al, 1997; 田永强等, 2012)。浮游植物种类代码见表5。从第一排序轴看,位于右下方的分歧锥囊藻与透明度存在较好的正相关,说明分歧锥囊藻分布在相对清洁的水体中,符合金藻的生态环境特征(图3)。水温对浮游植物的影响在本次研究中并没有表现出最大的关联性(表6),与有些学者认为温度是影响浮游植物现存量的主要因素这一结论不符(Habib et al, 1997),可能与仅监测分析了2个季度有关。

营养盐是影响浮游植物生物量的最基本因素,尤其是氮磷等营养盐。从第二排序轴可以看出(图3),左上方的尖尾扁裸藻、铜绿微囊藻、阿氏颤藻、颗粒直链藻与氨氮、总磷和总氮存在正相关,说明这些物种对营养盐的需求较高,属于能迅速吸收营养盐并快速繁殖的种类,在较高营养盐条件下可以形成较高的相对丰度。有研究表明,在淡水浮游植物中,当环境中的N/P大于20时,被认为是磷限制的,小于10时被认为是氮限制的(Schanz & Juon, 1983);17座水库中,霞源水库的N/P小于10,枫树岭和富春江水库的N/P在10~20,其余水库的N/P均高于20,说明杭州地区大中型水库主要是磷限制类型。总体来看,杭州地区大中型水库浮游植物总密度和叶绿素与总磷呈正相关( $r=0.527, P<0.05$ ;  $r=0.586, P<0.05$ ),但与总氮不相关,也同样说明了磷的限制特性。

### 3.3 水质综合评价

根据地表水环境质量标准(GB3838-2002),杭州地区17座大中型水库仅5座的水质为Ⅱ~Ⅲ类,占29.4%;2座为Ⅳ类,占11.8%;10座为Ⅴ类或劣Ⅴ类,占58.8%。从影响水库水质类别的污染物来看,主要是总氮浓度过高,个别水库总磷超标;17座水库中有12座的总氮超过湖库Ⅲ类标准值,7座超过Ⅴ类水质标准值,其中青山水库的TN最高,年均值达到3.322 mg/L。根据综合营养状态指数,杭州地区17座大中型水库中仅有2座为贫营养状态,13座为中营养状态,还有2座已在轻度富营养状态。

根据浮游植物密度在 $1 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6$  个/L之间时水库水质为寡污-β中污型水体(高远等, 2008),叶绿素a浓度大于10 μg/L时为富营养化水体(刘健康, 1999),蓝藻密度占优势时水体富营养

化程度较高。杭州地区大中型水库中有50%的水库在丰水期属于富营养化水体,特别是处于人口密集区域及流域下游区域的水库。

总体而言,杭州地区大中型水库营养状态基本处于中营养-轻度富营养之间。影响水库的主要因子为总氮、叶绿素a和浮游植物密度,在水库生态保护过程中注意这几个因子的变化,需特别注意产毒和产异味藻类异常增殖现象,以保障饮用水源的安全和水生态系统的健康。

### 参考文献

- 陈立婧,吴竹臣,胡忠军,等. 2011. 上海崇明岛明珠湖浮游植物群落结构[J]. 应用生态学报, (6): 1404-1413.
- 董民强,李小敏,张赞. 2011. 钱塘江饮用水源水质风险和控制[J]. 给水排水动态, (6): 20-21.
- 高远,苏宇祥,亓树财. 2008. 沂河流域浮游植物与水质评价[J]. 湖泊科学, 20(4): 54-548.
- 韩搏平. 2010. 中国水库生态研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 22(2): 151-160.
- 胡鸿钧,魏印心. 2006. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社.
- 胡韧,林秋奇,王朝晖,等. 2002. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征[J]. 生态学报, 22(11): 1939-1944.
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社: 286-302.
- 李德亮,张婷,肖调义,等. 2012. 大通湖浮游植物群落结构及其与环境因子关系[J]. 应用生态学报, 23(8): 2107-2113.
- 李敦海,李根宝,王高鸿,等. 2007. 水华蓝藻生物质对沉水植物五刺金鱼藻生长的影响[J]. 水生生物学报, 31(5): 689-692.
- 林秋奇,段舜山,胡韧,等. 2003. 广东省大中型水库水质现状及其浮游生物响应[J]. 生态学报, 23(6): 1101-1108.
- 林少君,贺立静,黄沛生,等. 2005. 浮游植物叶绿素a的提取方法比较与改进[J]. 生态科学, 24(1): 9-11.
- 刘健康. 1999. 高等水生生物学[M]. 北京: 科学出版社.
- 聂泽宇,梁新强,邢波,等. 2012. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J]. 生态学报, 32(1): 20-55.
- 石晓丹,阮晓红,邢雅因,等. 2008. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 29(11): 2999-3008.
- 苏玉,文航,王东伟,等. 2011. 太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因子分析[J]. 环境科学, 32(7): 1945-1951.
- 孙军,刘东艳. 2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的



- 应用[J]. 海洋学报, 26(1): 62 – 75.
- 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 等. 2011. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 32(10): 2875 – 2882.
- 田永强, 俞超超, 王磊, 等. 2012. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 23(9): 2559 – 2565.
- 王朝晖, 韩博平, 胡韧, 等. 2005. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究[J]. 生态学杂志, 24(4): 402 – 405.
- 张婷, 宋立荣. 2006. 铜绿微囊藻(*Microcystis aelltgittosu*)与三种丝状蓝藻间的相互作用[J]. 湖泊科学, 18(2): 150 – 156.
- 张婷, 李林, 宋立荣. 2009. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J]. 生态学报, 29(6): 2971 – 2979.
- Abrantes N, Antunes S C, Pereira M J, et al. 2006. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake (Lake Vela, Portugal) [J]. Acta Oecologica, 29: 54 – 64.
- Carolina F, Elisa R P, Eduardo J C. 2012. Phytoplankton structure and diversity in the eutrophic-hypereutrophic reservoir Paso de las Piedras, Argentina [J]. Limnology, (13): 13 – 25.
- Ênio W D, Maria C B O, Ariadne N M. 2012. Dynamics of phytoplankton associations in three reservoirs in northeastern Brazil assessed using Reynolds' theory [J]. Limnologica, 42: 72 – 80.
- Grover J P, Chrzanowski T H. 2006. Seasonal dynamics of phytoplankton in two warm temperate reservoir: association of taxonomic composition with temperature [J]. Journal of Plankton Research, 28: 1 – 17.
- Habib O A, Tippet T R. 1997. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physic-chemical factors in Loch Lomond [J]. Hydrobiologia, 350: 63 – 79.
- Habib O A, Tippet R, Murphy K J. 1997. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland [J]. Hydrobiologia, 350: 63 – 79.
- Hu R, Han B P, Naselli-Flores L. 2013. Comparing biological classifications of freshwater phytoplankton: a case study from South China [J]. Hydrobiologia, 701: 219 – 233.
- Mariaeristina T, Antonio D U. 2006. Biology monitoring of some Apennine Rivem using the Diatom-Based Eutrophication/Pollution index compare to other European Diatom indices [J]. Diatom Research, 21(1): 159 – 174.
- Schanz F, Juon H. 1983. Two different methods of evaluating nutrient limitation of periphyton bioassays using water from the River Rhine and eight of its tributaries [J]. Hydrobiologia, 102: 187 – 195.
- Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. 1993. State of the art of reservoir limnology and water quality management [M]. In: Comparative reservoir limnology and water quality management, Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A, eds. Kluwer Academic Publishers, Netherland: 213 – 288.
- Ter Braak C J F. 1986. Canonical co-espondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. Ecology, 67: 1167 – 1179.

(责任编辑 万月华)



## Phytoplankton Communities and Their Relationship with Environmental Factors in 17 Medium and Large Reservoirs in Hangzhou

SHENG Hai-yan<sup>1,2</sup>, YAO Jia-mei<sup>2</sup>, LIU Ming-liang<sup>2</sup>, HE Jian-bo<sup>2</sup>,  
HAN Yi-cai<sup>2</sup>, YU Zuo-ming<sup>2</sup>, ZHANG Yin-long<sup>1</sup>

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China;

2. Hangzhou Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014, P. R. China)

**Abstract:** The reservoir has gradually taken on the role of drinking water supply instead of flood control, irrigation and power generation for the serious water pollution of rivers and lakes. The deterioration of water quality in the Qiantang River and the Tiaoxi River in Hangzhou area threatens the drinking water supply in the region. Decision-making departments consider reservoir water as a feasible and safe water resource of water supply for this area. Seventeen reservoirs along the Qiantang River and the Tiaoxi River were selected according to the distribution of water resources in Hangzhou. Our study investigated the phytoplankton community of the 17 medium and large reservoirs, analyzed the relationship between phytoplankton and nutrient status of the water body and provided basic information and data for water resources protection and drinking water safety. The phytoplankton samples were selected during flood season (August) and dry season (December) in 2008 and 2009. Qualitative phytoplankton samples were taken with 25  $\mu\text{m}$  plankton nets from different directions and at different depth. 1L samples for quantitative analysis were collected 0.5 m below the surface, then concentrated and identified after settling. Physical and chemical factors were measured including the water temperature (WT), water transparency (SD), pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), total phosphorus (TP), soluble phosphorus (DP) and soluble silica (DSi). Chlorophyll a was determined by spectrophotometry. A total of 85 species of phytoplankton in 7 phyla were collected and the species were dominated by Chlorophyta (29), followed by Bacillariophyta (26), Cyanophyta (15), Euglenophyta (6), Cryptophyta (3), Pyrrophyta (3) and Chrysophyta (3). Phytoplankton density averaged  $1.27 \times 10^6 - 6.55 \times 10^6$  cells/L and was the highest in summer ( $12.2 \times 10^6$  cells/L) and the lowest in winter ( $0.168 \times 10^6$  cells/L). Annual average chlorophyll a concentration varied between 2.86  $\mu\text{g/L}$  and 28.35  $\mu\text{g/L}$ , with a maximum value of 33.60  $\mu\text{g/L}$  and minimum value of 1.36  $\mu\text{g/L}$ . Phytoplankton density and chlorophyll a concentration in the wet (flood) season were higher than in the dry season, higher in the lower reaches than the upper reaches, higher in the lowlands than the highlands and all were closely related to reservoir nutrient levels. In most of the reservoirs Cyanophyta species dominated during flood season and Bacillariophyta dominated during the dry season. Differences in chlorophyll a concentration among the 17 reservoirs were significant, but differences in phytoplankton density were not significant. Analysis of trophic state index (TLI) and phytoplankton density indicate that the 17 reservoirs in the Hangzhou area are mesotrophic to slightly eutrophic. Canonical correspondence analysis (CCA) shows that nutrients and transparency were the primary environmental factors affecting phytoplankton community structure. There was also a significant correlation of phytoplankton density and chlorophyll a concentration with total phosphorous concentration ( $r = 0.527, P < 0.05$ ;  $r = 0.586, P < 0.05$ ).

**Key words:** phytoplankton; community structure; environmental factors; reservoir; canonical correlation analysis (CCA); trophic state index (TLI)