

文章编号: 1674-5566(2017)01-0075-10

DOI:10.12024/jsou.20160501776

青草沙水库浮游藻类群落组成及其与环境因子的关系

严文逸¹, 王绍祥², 顾静², 陈立婧¹

(1. 上海海洋大学 农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 2. 上海城投原水有限公司青草沙水库管理分公司, 上海 201913)

摘要: 2014 年 1 月至 2015 年 12 月逐月对上海水源地——青草沙水库进行浮游藻类调查研究。2014 年发现优势种 25 种, 2015 年只有 12 种, 两年均出现的优势种为: 不定微囊藻(*Microcystis incerta*)、伪鱼腥藻属未定种(*Pseudoanabaena* sp.)、小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.)、镰形纤维藻奇异变种(*Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*)和平壁克里藻(*Klebsormidium scopulinum*)。2015 年较 2014 年种类数大幅减少, 其季节变化也不如 2014 年明显, 但总体上属夏秋季优势种种类多, 冬春季则相对较少。优势种类群呈现夏秋季蓝藻多, 春夏季绿藻多的特点, 黄藻门和硅藻门的种类一般为冬春季优势种。冗余分析(RDA)显示, 大多数优势种的密度主要与水温、溶解氧、总氮、总磷有关。重要优势种不定微囊藻密度与水温呈正相关关系, 黄丝藻属未定种(*Tribonema* sp.)和小环藻属未定种密度与水温呈负相关关系。

关键词: 青草沙水库; 浮游藻类; 优势种; 种类组成; 环境因子

中图分类号: S 932.7

文献标志码: A

青草沙饮用水源地位于长兴岛北侧、长江口南北港分流口下方, 属上海崇明县管辖, 而长江口属于海洋、淡水生物栖息地间的生态交错区域, 其水域具有特殊的生态环境。该水源地的开发项目于 2007 年 6 月正式开工, 2010 年 12 月开始试运行, 到了 2011 年 6 月项目即全面投入运行, 总面积约达 67.2 km², 相当于 10 个西湖的水域面积, 其拥有的 7.19 × 10⁶ m³/d 供水规模, 弥补了上海市原水供应缺口, 使得超过 1 100 万人口受益, 为上海市开创了原水水源供给的新格局。青草沙水库拥有丰富的水量以及优良的水质, 因此是上海市难得的优良水源地和城市供水的战略储备地^[1], 也是国内最大的蓄淡避咸的河口江心水库, 同时还是目前世界上最大的边滩水库^[2]。

浮游藻类的优势种能有效地适应水体环境变化, 并能抵制该变化造成的干扰, 从而维持不同

水域环境下浮游藻类群落的稳定和演替^[3]。某些特定浮游藻类的演替可体现水体的营养水平^[4], 而环境条件的改变也会影响到浮游藻类优势种的变化^[5]。为了控制污染、保护生物多样性及保持生态平衡, 浮游藻类优势种的研究等前期工作就显得尤为必要。国内外已有大量文献报道过不同水域中浮游藻类群落结构的特征及其与水环境的关系^[6-8], 也有学者在青草沙水库运行初期进行过相关的调查研究^[9-11], 但针对浮游藻类优势种的组成、变化及其与环境因子的关系鲜有报道。本文研究浮游藻类优势种的组成及其变化, 探讨优势种演替规律, 分析重要优势种的分布特征, 并将优势种种类与环境因子作 RDA 分析, 探讨诱发青草沙水库优势种演替的环境因子, 以为水生生物群落的后续演替研究提供理论依据和参考, 为青草沙水体营养状况的判定及富营养化防治提供重要依据。

收稿日期: 2016-05-13 修回日期: 2016-10-04

基金项目: 上海市教委水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(ZF1206); 上海城投原水有限公司项目(D-8006-14-0055, D-8006-16-0082)

作者简介: 严文逸(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游植物水域生态学。E-mail: yanwenyi0303@163.com

通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

1 材料与方

1.1 站点布设和采样频率

本调查组于 2014—2015 年每月下旬在青草沙水库进行浮游藻类调查。根据青草沙水库的自然形态、水文规划状况等特点^[12],在水库上、中、下游和 3 个闸门等处共布设 11 个采样站点(表 1、图 1)。生物学物候上一般以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月、1—2 月为冬季。

1.2 理化指标的测定

采用 YSI 6600EDS 现场测定水温(WT)、溶氧(DO)、酸碱度(pH),用塞氏盘测定透明度(SD),用日本 BPL8-PS7FL 回声测深仪测定水深(D),用 HANNA HI9811-5 便携式测定仪测定电导率(EC),对带回实验室的样品分析总氮(TN)、

总磷(TP),采用国标(GB/T 11892—1989)的方法测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

表 1 青草沙水库采样站点的经纬度

Tab.1 The latitude and longitude of sampling sites in Qingcaosha Reservoir

站点 Site	N	E
S1	31°29.208'	121°35.426'
S2	31°28.230'	121°36.854'
S3	31°27.779'	121°37.630'
S4	31°26.689'	121°38.022'
S5	31°26.681'	121°39.919'
S6	31°26.475'	121°40.929'
S7	31°25.403'	121°42.348'
S8	31°26.237'	121°39.248'
S9	31°26.822'	121°36.946'
S10	31°27.721'	121°34.807'
S11	31°28.380'	121°34.411'

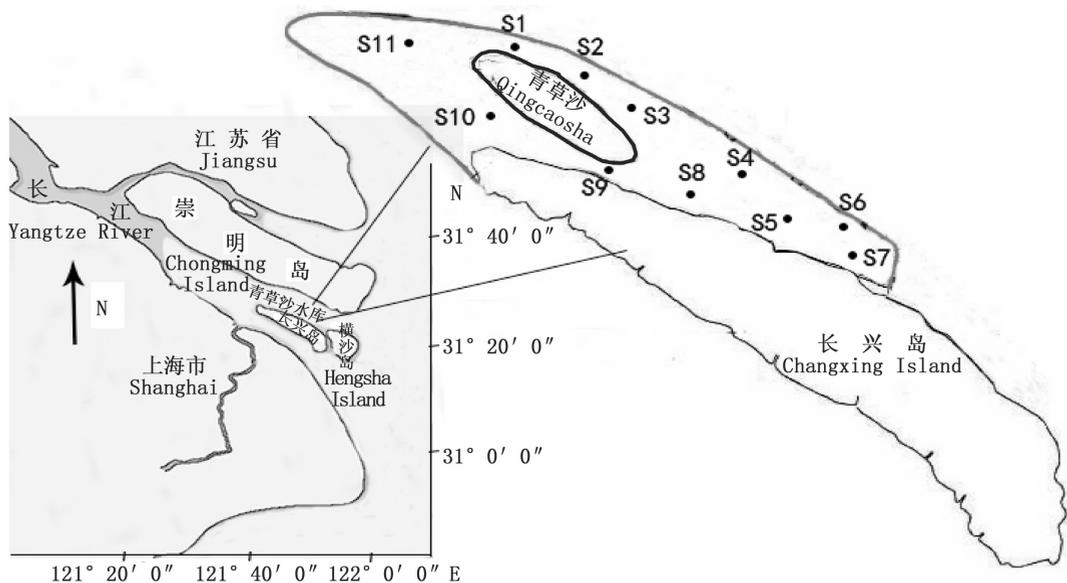


图 1 青草沙水库调查站点图

Fig.1 Map of sampling sites in Qingcaosha Reservoir

1.3 浮游藻类样品处理与实验方法

采用 2.5 L 柱状采水器于水面下 0.5 m 处的浅表水层采集 10 L 水样,经过充分混匀后取 1 L 体积的水,立即加入 10 mL 鲁哥氏碘液及 5 mL 左右的中性甲醛溶液固定,带回实验室后,置于分液漏斗中静置沉淀 48 h,将样品浓缩定容至 50 mL 血清瓶中,用光学显微镜 Olympus CX21 对藻类进行鉴别和细胞计数^[13],重复计数两次并取平均值后换算成 1 L 样品中浮游藻类的总细胞数。浮游藻类的鉴定主要参考齐雨藻、胡鸿钧和王全

喜等的文献^[14-16]。

1.4 数据处理和分析

种类优势度(Y)的计算公式为:

$$Y = (N_i / N) f_i \quad (1)$$

式中: N_i 为群落中第 i 个物种的个体数量, N 为群落中所有个体数量, f_i 为群落中第 i 种的出现频率。当 $Y > 0.02$ 时即为优势种^[17]。

种类更替率(R)的计算公式为^[18]: $R(\%) = [(a + b - 2c) / (a + b - c)] \times 100\%$ (2) 式中: a 为 2014 年的种类数, b 为 2015 年的种类

数, c 为两年共有的种类数。

制图采用 Origin 9 软件完成,利用 SPSS 19.0 软件和 CANOCO of Windows 4.5 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 青草沙水库的理化因子

2015 年青草沙水库的理化数据与 2014 年的相比,水深有所增加,水温、溶解氧年均值有所上升,pH 呈弱碱性,透明度、溶解氧范围变大,电导率明显下降,TN 浓度、TP 浓度、 COD_{Mn} 两年间差异不大(表 2)。

2.2 浮游藻类优势种的组成

2014 年共发现优势种 25 种,隶属于 4 门 17

属。优势种以蓝藻和绿藻居多,其中蓝藻门 7 种,占 28.00%;硅藻门 5 种,占 20.00%;绿藻门 13 种,占 52.00%。优势度排名前 4 位的优势种依次为不定微囊藻(*Microcystis incerta*)、细小平裂藻(*Merismopedia minima*)、丝藻属未定种(*Ulothrix* sp.)和辐球藻(*Radiococcus nimbatus*)。

2015 年共发现优势种 12 种,隶属于 4 门 10 属。优势种以蓝藻和绿藻居多,其中蓝藻门和绿藻门均为 5 种,各占 41.67%;硅藻门和黄藻门均为 1 种,各占 8.33%。优势度排名前 4 位的优势种依次为小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.)、静水隐杆藻(*Aphanothece stagnina*)、黄丝藻属未定种(*Tribonema* sp.)和不定微囊藻。

表 2 青草沙水库的主要理化因子的年均值及其范围

Tab.2 Annual average and the range of main physicochemical factors in Qingcaosha Reservoir

2014 年理化因子 Physicochemical index of 2014	均值与标准差 Average and standard deviation	范围 Range	2015 年理化因子 Physicochemical index of 2015	均值与标准差 Average and standard deviation	范围 Range
D/m	7.9 ± 0.8	1.7 ~ 13.5	D/m	8.4 ± 0.9	2.7 ~ 16.7
SD/cm	64 ± 12	26 ~ 115	SD/cm	65 ± 15	20 ~ 180
WT/°C	18.6 ± 7.8	7.3 ~ 30.5	WT/°C	19.1 ± 8.2	7.6 ~ 33.1
DO/(mg/L)	9.18 ± 1.53	5.50 ~ 13.06	DO/(mg/L)	9.62 ± 2.09	4.16 ~ 13.61
pH	8.4 ± 0.4	7.2 ~ 9.7	pH	8.5 ± 0.2	7.4 ~ 9.5
EC/(μS/cm)	302 ± 89	220 ~ 610	EC/(μS/cm)	227 ± 34	169 ~ 339
TN/(mg/L)	1.64 ± 0.31	1.01 ~ 2.19	TN/(mg/L)	1.82 ± 0.27	1.31 ~ 2.37
TP/(mg/L)	0.07 ± 0.03	0.03 ~ 0.14	TP/(mg/L)	0.08 ± 0.02	0.04 ~ 0.12
COD_{Mn} /(mg/L)	2.7 ± 1.4	1.5 ~ 3.9	COD_{Mn} /(mg/L)	2.6 ± 0.7	1.5 ~ 3.6

注:D. 水深; SD. 透明度; WT. 水温; DO. 溶解氧; pH. 酸碱度; EC. 电导率; TN. 总氮; TP. 总磷; COD_{Mn} . 高锰酸盐指数

Note: D. Water depth; SD. Transparency; WT. Water temperature; DO. Dissolved Oxygen; pH. Potential of hydrogen; EC. Conductivity; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; COD_{Mn} . Permanganate index

青草沙水库优势种在这两年间既有延续又有更替,两年皆出现的优势种为:不定微囊藻、伪鱼腥藻属未定种(*Pseudoanabaena* sp.)、小环藻属未定种、镰形纤维藻奇异变种(*Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*)和平壁克里藻(*Klebsormidium scopulinum*)。浮游藻类优势物种物种更替率为 84.38%,表明两年间青草沙水库浮游藻类优势物种的更替变化较为明显,2015 年较前一年优势物种种类数减少将近一半,并出现优势度较大的新的优势种:黄丝藻属未定种。

2.3 浮游藻类优势种的季节变化

2014—2015 年青草沙水库浮游藻类优势种存在较为明显的季节变化(表 3,4),并且两年的优势物种种类数季节变化趋势上并不一致。2014 年浮游藻类优势物种种类数的季节变化表现为:夏季(16 种) > 秋季(15 种) > 春季(11 种) > 冬季

(9 种),浮游藻类优势种在 4 个季度中多以蓝藻和绿藻为主,尤其以绿藻居多。2015 年出现的浮游藻类优势物种种类数 4 季相差不大,秋季(7 种) > 春季、夏季(均为 6 种) > 冬季(5 种),同样以蓝藻和绿藻为主。

2014—2015 各个季节共有的优势种均为 3 种,冬春季分别为不定微囊藻、小环藻属未定种和镰形纤维藻奇异变种;夏秋季分别为不定微囊藻、伪鱼腥藻属未定种和小环藻属未定种。2014 年小席藻(*Phorimidium tenuis*)、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、点状平裂藻(*Merismopedia punctata*)、细小平裂藻是夏秋季的蓝藻优势种,但 2015 年这些蓝藻优势种演替为湖泊鞘丝藻(*Lyngbya limnetica*)、静水隐杆藻和微囊藻属未定种(*Microcystis* sp.)占优势。总的来说,2014—2015 年间浮游藻类的优势种数量呈现夏

秋季多、冬春少的特点,所属门类主要为蓝藻门、硅藻门、绿藻和黄藻门,具有夏秋季蓝藻占优势,春夏季绿藻占优势,冬春季硅藻、黄藻占优势的特征(图2)。

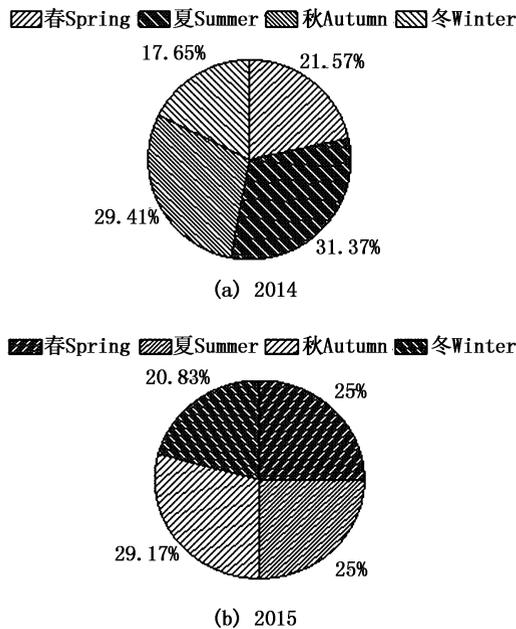


图2 青草沙水库优势种种类数的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation in the number of dominant species in Qingcaosha Reservoir

2.4 浮游藻类重要优势种生物密度的动态变化

因为2014年和2015年优势度最大的优势种分别为不定微囊藻和小环藻属未定种,且两种藻类又是两年的共同优势种,黄丝藻属未定种为2015年新出现的优势种,且优势度较大,所以将这3种藻类作为青草沙水库的重要优势种,对其进行生物密度周年变化的研究。

不定微囊藻2014年的生物密度年均值为 $(97.99 \pm 124.58) \times 10^4$ cells/L,占总藻类年平均生物密度的19.62%,单因素方差分析(one-way ANOVA)可得:各月间的生物密度有极显著变化($F = 24.083, P < 0.01$),各站点间无显著差异($F = 1.112, P > 0.05$,图5a);2015年的生物密度年均值为 $(130.25 \pm 156.10) \times 10^4$ cells/L,占总藻类各站点年平均生物密度的8.97%,各月间的生物密度有极显著变化($F = 13.911, P < 0.01$),各站点间有显著差异($F = 2.235, P < 0.05$,图5b)。不定微囊藻出现于两年的所有月份中且均有较大的优势度,两年间的生物密度变化趋势总体上一致,但2015年其对总生物密度的贡献率有所降低(图3a)。

表3 青草沙水库浮游藻类优势种及优势度(2014年)

Tab. 3 The dominance of dominant species of planktonic algae in Qingcaosha Reservoir (2014)

门 Phylum	优势种 Dominant species	优势度 Dominance			
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
蓝藻门	不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>	0.09	0.26	0.30	0.41
	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	-	-	0.22	*
	点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	-	0.08	0.06	-
	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	*	0.04	-	*
	小席藻 <i>Phorimidium tenuis</i>	-	0.02	0.05	*
	伪鱼腥藻属未定种 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	*	0.07	0.02	-
	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	-	*	*	0.02
硅藻门	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	*	0.10	0.03	*
	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	0.09	0.06	0.03	0.53
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	0.09	*	*	*
	颗粒直链藻极狭变种 <i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.22	0.02	*	0.10
	模糊直链藻 <i>M. ambigua</i>	*	*	0.02	*
	镰形纤维藻奇异变种 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>	0.03	-	-	0.02
	平壁克里藻 <i>Klebsormidium scopulinum</i>	0.07	*	*	0.18
绿藻门	辐球藻 <i>Radiococcus nimbatus</i>	0.41	0.07	0.08	*
	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	0.03	0.03	0.05	0.03
	小形月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i>	*	0.02	0.02	*
	扭曲蹄形藻 <i>Kirchneriella contorta</i>	*	*	0.03	*
	丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.	0.04	0.29	*	*
	四星藻属未定种 <i>Tetrastrum</i> sp.	0.03	*	0.03	*
	胶星藻 <i>Gloeoactinium limneticum</i>	*	0.02	*	*
	卵囊藻属未定种 <i>Oocystis</i> sp.	*	0.02	*	0.02
	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	0.03	0.06	0.08	0.02
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	*	0.02	*	*
	二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	*	*	0.02	*

注: - 表示未出现; * 表示该季节出现但未成为优势种

Note: - means it doesn't appear; * means it appears but doesn't grow into dominant species

表 4 青草沙水库浮游藻类优势种及优势度(2015 年)
Tab.4 The dominance of dominant species of planktonic algae in Qingcaosha Reservoir(2015)

Table with 5 columns: Phylum, Dominant species, Spring, Summer, Autumn, Winter. Lists species like Microcystis incerta, Pseudonabaena sp., Lyngbya limnetica, etc.

注: - 表示未出现; * 表示该季节出现但未成为优势种
Note: - means it doesn't appear; * means it appears but doesn't grow into dominant species

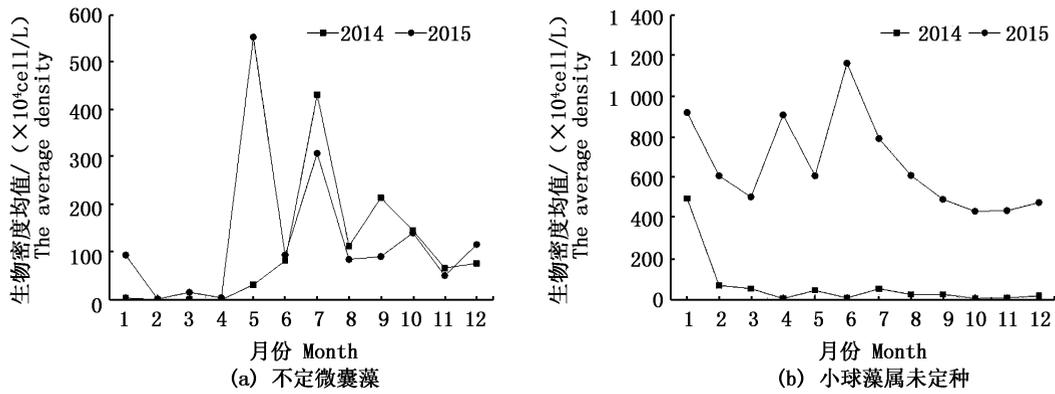


图 3 青草沙水库不定微囊藻和小环藻属未定种生物密度的周年变化(2014—2015)

Fig.3 Annual variation of density of Microcystis incerta and Cyclotella sp. in Qingcaosha Reservoir(2014—2015)

小环藻属未定种 2014 年的生物密度年均值为 70.73 x 10^4 cells/L, 占总藻类各站点年平均生物密度的 14.16%, 各月间的生物密度有极显著变化 (F = 26.001, P < 0.01), 各站点间无显著差异 (F = 0.833, P > 0.05, 图 5a); 2015 年的生物密度年均值为 664.50 x 10^4 cells/L, 占总藻类各站点年平均生物密度的 45.79%, 各月间的生物密度亦有极显著变化 (F = 1.997, P < 0.05), 各站点间亦无显著差异 (F = 1.158, P > 0.05, 图 5b)。

黄丝藻属未定种 2014 年未成为优势种; 2015 年生物密度年均值为 298.26 x 10^4 cells/L, 占总藻类年平均生物密度的 20.55%, 各月间的生物密度存在极显著的变化 (F = 34.084, P < 0.01),

但各站点间无显著差异 (F = 0.988, P > 0.05, 图 5b)。2015 年 3、4 月黄丝藻迅猛增长, 生物密度急剧升高, 均值分别达到 813.42 x 10^4 cells/L 和 1 685.65 x 10^4 cells/L, 占当月总生物密度的 49.46% 和 61.73%, 夏季之后黄丝藻数量呈现明显的下降趋势(图 4)。

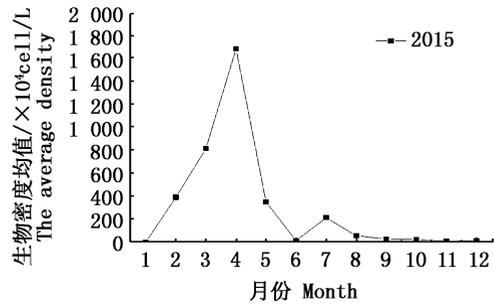


图 4 青草沙水库黄丝藻属未定种生物密度的周年变化
Fig.4 Annual variation of density of Tribonema sp. in Qingcaosha Reservoir

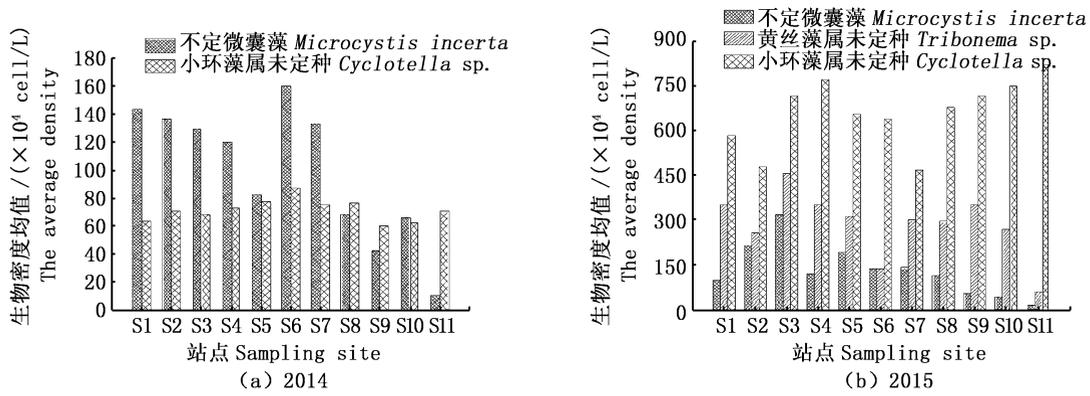


图5 青草沙水库重要优势种密度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the important dominant species density in Qingcaosha Reservoir

2.5 浮游藻类优势种与环境因子的关系

为了使藻类密度的数据呈现正态分布,首先对其进行 $\lg(x + 1)$ 转换处理^[19-21],之后对 2014 和 2015 年的优势种进行去趋势对应分析 (DCA)^[22-23],从所得的各特征值中看出,4 个排序轴中梯度最大的值分别是 2.384、1.688 (均小于 3),故选择线性模型 RDA 较合适。对 2014 年的浮游藻类优势种及环境因子数据的分析显示,前两个排序轴的特征值依次为 0.239 和 0.068,物种与环境相关性轴 1 特征值为 0.826,轴 2 为 0.732。对 2015 年的浮游藻类优势种及环境因子数据的分析显示,前两个排序轴的特征值依次为 0.160 和 0.138,物种与环境相关性轴 1 特征值为

0.796,轴 2 为 0.733,RDA 说明了两年度的两个排序轴均能较好地反映青草沙水库浮游藻类优势种与各环境因子之间的相互关系。环境因子缩写和优势种代码见表 2 和表 5。图 6a 显示:2014 年大多数优势种类与水温、电导率、TN、TP 呈正相关关系,与 pH、溶解氧呈负相关关系;图 6b 显示:2015 年各优势种与水温的关系不尽相同,大多数优势种类与 TN、TP 呈正相关关系,与溶解氧呈负相关关系。水温是两年间 3 种重要优势种的主要影响因子,不定微囊藻密度与水温呈正相关关系;黄丝藻属未定种和小环藻属未定种与水温呈负相关关系。

表 5 两年间青草沙水库 RDA 中的优势种代码

Tab.5 The dominant species during two years in Qingcaosha Reservoir and the codes of species in RDA

代码 Code	优势种 Dominant species	代码 Code	优势种 Dominant species
	蓝藻门 Cyanophyta	16	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.
1	伪鱼腥藻属未定种 <i>Pseudoanabaena</i> sp.		绿藻门 Chlorophyta
2	微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.	17	扭曲蹄形藻 <i>Kirchneriella contorta</i>
3	不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>	18	小形月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i>
4	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	19	纤细月牙藻 <i>Selenastrum gracile</i>
5	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	20	三叶四角藻 <i>Tetraedron trilobulatum</i>
6	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	21	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>
7	点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	22	镰形纤维藻奇异变种 <i>A. falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>
8	小席藻 <i>Phorimidium tenuis</i>	23	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>
9	静水隐杆藻 <i>Aphanothece stagnina</i>	24	辐球藻 <i>Radiococcus nimbus</i>
10	湖泊鞘丝藻 <i>Lyngbya limnetica</i>	25	胶星藻 <i>Gloeoactinium limneticum</i>
	黄藻门 Xanthophyta	26	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>
11	黄丝藻属未定种 <i>Tribonema</i> sp.	27	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>
	硅藻门 Bacillariophyta	28	二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>
12	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	29	四星藻属未定种 <i>Tetrastrum</i> sp.
13	颗粒直链藻极狭变种 <i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i>	30	卵囊藻属未定种 <i>Oocystis</i> sp.
14	模糊直链藻 <i>M. ambigua</i>	31	丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.
15	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	32	平壁克里藻 <i>Klebsormidium scopulinum</i>

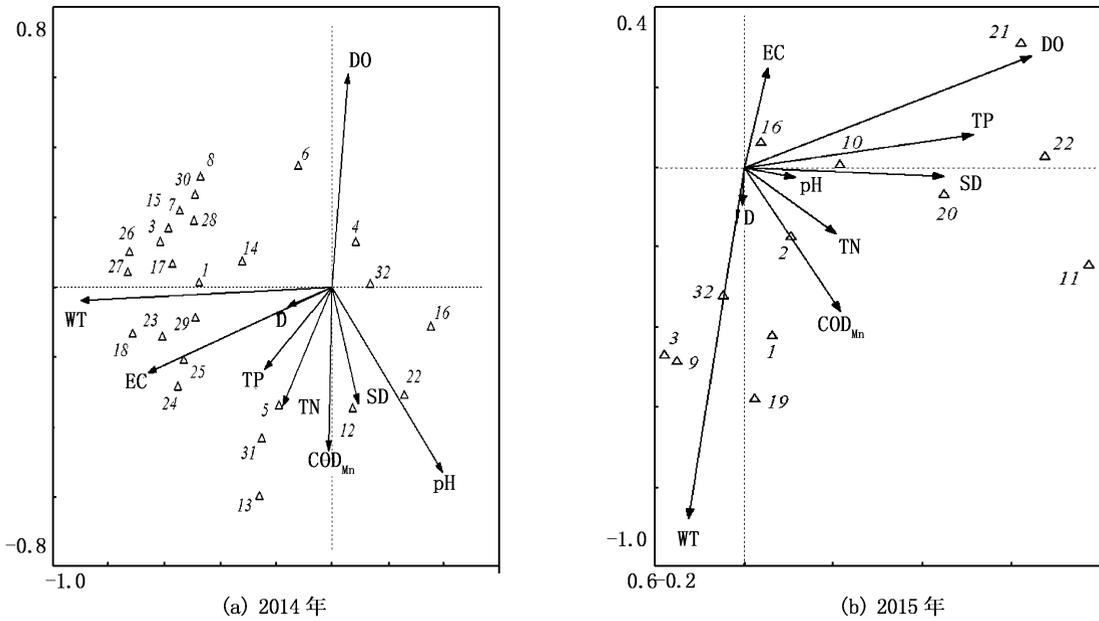


图 6 青草沙水库浮游藻类物种与环境因子的 RDA 排序图
 Fig. 6 RDA ordination diagram between planktonic algae species and environmental factors in Qingcaosha Reservoir

3 讨论

3.1 青草沙水库浮游藻类优势种类群的演替

2015 年与 2014 年相比,青草沙水库优势种类数有下降的趋势,主要减少了绿藻门的种类,优势种的种类依然以蓝藻、绿藻为主,它们大多是耐污性比较强的种类,这与亚热带地区其他水库中的优势种类群特征类似^[24-25]。由于黄丝藻属未定种的出现和小环藻属未定种优势度的提高,两者在 2015 年占据绝对优势地位,比 2014 年明显增加的原因可能与长江来水中这两种藻的生物密度的增加有密切关系,取代了蓝藻门和绿藻门的许多优势种,从而使 2015 年优势种类数大量减少且没有明显的季节变化,同时也是两年共同优势种较少的一个原因。对比 2014 年和 2012 年^[10],优势种的季节性变化特征相似,种类数均表现出夏秋季多、冬春季少的特征,优势种所属门类均属绿藻最多,并呈现夏秋季蓝藻多、冬春季硅藻多的特点。总体上,2012、2014、2015 年各个季节的优势种类数呈现下降趋势。

本调查期间青草沙水库已运行了 4、5 年,一般于冬季关闭下游闸门进行蓄水,其余季节进行换水,可能由于这种运行方式改变了水库的理化环境,致使两年间浮游藻类优势种更替变化明

显。2015 年优势度较大的黄丝藻在长江口亦大量出现并成为优势种^[26],青草沙水库地处长江口,水体容易受到长江口流域来水水质的影响,因此对长江口水域的监测至关重要,今后应加大对长江口来水中浮游藻类动态变化的关注力度。

3.2 青草沙水库浮游藻类优势种对环境因子的响应

水温是影响青草沙水库藻类生长最基本的生态因子,这与国内外一些学者的研究中提出的水温是影响浮游藻类生长的最直接因素这一结论相一致^[7,27]。水温对藻类的数量分布和生长速率的影响很大,不同藻类生长的最适温度不同,库区水温对优势种类群的影响十分明显,冬春季温度低,适合黄藻、硅藻的增殖;夏季水温逐渐升高,促使蓝藻和绿藻大量繁殖;秋季之后入冬,又是黄藻和硅藻生长旺盛之际。优势种类群的演替存在明显的季节规律,优势种的生物密度、生物量会随季节的更替而改变,一般会随水温的上升而增多,因此大多数优势种与水温呈正相关关系。这也与路娜、陈立婧等对水温与藻类关系的分析相一致^[17,28]。

蓝藻对高温和强光适应性强,具有极好的抗紫外能力,能在低光条件下获得优势,生理代谢水平低^[29],因此青草沙水库蓝藻门的种类也容易

在温度较高的夏季(平均水温 28.3 °C)和秋季(平均水温 20.5 °C)占优势,与 RDA 分析中大多数蓝藻尤其是不定微囊藻与水温呈较好正相关的结果相符。黄丝藻属生长旺盛季节为春季,黄丝藻属未定种在 2015 年冬春季有较大优势度,余涛对巢湖的研究结果^[30]也表明小型黄丝藻只在冬春成为优势种。硅藻数量暖季少冷季多^[31],因为温带硅藻都是在比较低的温度时生长,而不适宜在高温环境中生存,小环藻属未定种两年均在冬季优势度最大,适宜的水温可能是其优势度和密度升高的较大因素,这与大多硅藻门种类尤其是小环藻属未定种与水温呈负相关的结果相吻合。

营养盐是影响浮游藻类群落结构分布和数量的重要因素,能直接影响其动态变化。2015 年优势种生物密度与总氮、总磷呈正相关关系。一般情况下,水体中氮磷浓度的增加会引起浮游藻类密度的剧增,在合适的氮磷比值范围内,浮游藻类的增殖速度与水体氮磷含量呈正相关关系,许多研究也表明营养盐能促进藻类的增殖,与浮游藻类密度有正相关性^[32-33]。

pH 过低或过高会抑制藻细胞体内某些酶类的活性,影响藻类代谢,导致其生长繁殖速率下降^[34],碱性系统易于捕获大气中的 CO₂,更利于藻类光合作用,因此较高的生产力通常出现于碱性水环境中^[35],有研究表明 pH 8.5 时水体碳酸系统稳定性较高,此时藻类生长最好^[36]。水库两年的 pH 均值为 8.4、8.5,弱碱性的环境适宜藻类的生长繁殖。除此以外,青草沙水库处于亚热带季风气候区,全年降雨量相对较多,而降雨的季节性变化又是影响营养盐浓度和水动力学过程的关键因素,从而会间接影响浮游藻类优势种的生态特征。浮游藻类优势种的变化较为迅速,加上群落结构的演替也较复杂,仍需进行长期且深入的调查。

总之,水库在保持水质清澈的同时需要更好地利用生态湿地资源,加强调控来提高水库的生物多样性。在水库今后的管理调控中,应做好实时监测和应急响应工作,在可能暴发藻类的区域、季节采取相应的防控预警措施,防止水源地水质的进一步恶化,以保证居民饮用水的安全。

参考文献:

- [1] 蒋增辉. 青草沙水库浮游藻类的调查及控制[J]. 净水技术, 2012, 31(5): 9-14, 54.
JIANG Z H. Investigation and control of phytoplankton in Qingcaosha reservoir [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(5): 9-14, 54.
- [2] 孙陆宇, 温晓蔓, 禹娜, 等. 上海青草沙水库后生浮游动物群落结构[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(1): 119-128.
SUN L Y, WEN X M, YU N, et al. Community structure of metazoan zooplankton in Qingcaosha reservoir, Shanghai[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(1): 119-128.
- [3] 王铭玮. 上海城市水源地蓝藻暴发的影响因素及控制管理体系研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
WANG M W. Research on factors, control and management system of cyanobacteria blooming in water source in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [4] MARCHETTO A, PADEDD B M, MARIANI M A, et al. A numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs [J]. Journal of Limnology, 2009, 68(1): 106-121.
- [5] KAMENIR Y, DUBINSKY Z, ZOHARY T. Phytoplankton size structure stability in a meso-eutrophic subtropical lake [J]. Hydrobiologia, 2004, 520(1/3): 89-104.
- [6] WETZEL R G. Limnology[M]. New York: Saunders College Publishing, 1983: 342-407.
- [7] REYNOLDS C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984: 1-5, 83-122.
- [8] LUNGAYIA H B O, M' HARZI A, TACKX M, et al. Phytoplankton community structure and environment in the Kenyan waters of Lake Victoria [J]. Freshwater Biology, 2000, 43(4): 529-543.
- [9] 刘歆璞, 张玮, 王丽卿, 等. 青草沙水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(4): 532-543.
LIU X P, ZHANG W, WANG L Q, et al. Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha Reservoir[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(4): 532-543.
- [10] 周莉莉. 河口水库浮游植物变化特征及环境管理体系探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
ZHOU L L. Research on phytoplankton and environmental management system of estuarine reservoir [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [11] 赵冉, 孙振中, 张玉平, 等. 青草沙邻近水域网采浮游植物群落结构特征[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(3): 9-18.

- ZHAO R, SUN Z Z, ZHANG Y P, et al. The netz-phytoplankton assemblage structure of Qingcaosha Reservoir adjacent waters[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(3): 9-18.
- [12] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 41-47.
- CHEN W M, HUANG X F, ZHOU W P, et al. Lake ecosystem observation method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 41-47.
- [13] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 72-79.
- HUANG X F. Survey, observation and analysis of lake ecology[M]. Beijing: China Standard Press, 2000: 72-79.
- [14] 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第四卷: 硅藻门, 中心纲[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 13-17.
- QI Y Z. Flora algarum sinicarum aquae dulcis (tomus IV) bacillariophyta, centreae [M]. Beijing: Science Press, 1995: 13-17.
- [15] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 23-903.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-903.
- [16] 王全喜. 中国淡水藻志: 第十一卷: 黄藻门[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 43-57.
- WANG Q X. Flora algarum sinicarum aquae dulcis: tomus XI: Xanthophyta [M]. Beijing: Science Press, 2007: 43-57.
- [17] 陈立婧, 吴竹臣, 胡忠军, 等. 上海崇明岛明珠湖浮游植物群落结构[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1599-1605.
- CHEN L J, WU Z C, HU Z J, et al. Phytoplankton community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1599-1605.
- [18] 连光山, 林玉辉, 蔡秉及. 大亚湾浮游动物群落的特征[C]//大亚湾海洋生态文集. 北京: 海洋出版社, 1990: 274-281.
- LIAN G S, LIN Y H, CAI B J. Characteristics community of zooplankton in Daya Bay [C]//Collections of Papers on Marine Ecology in the Daya Bay. Beijing: Ocean Press, 1990: 274-281.
- [19] 路学堂. 东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华可能性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- LU X T. The research on phytoplankton community, driving environmental factors and the possibility of cyanobacterial bloom in Dongping Lake, China [D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [20] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2265-2271.
- QIU X C, ZHAO H X, SUN X X. Studies on relationship of phytoplankton and water environmental factors in Shahu Lake [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2265-2271.
- [21] 万莉. 四明湖水库浮游生物群落结构及其动态[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- WAN L. The community structure and dynamics of plankton in Siminghu reservoir [D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.
- [22] 蒋荣根. 厦门湾及其邻近海域富营养化特征分析与评价[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2014.
- JIANG R G. Analysis and assessment on the characteristics of eutrophication in the Xiamen bay and its adjacent coastal waters[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2014.
- [23] 陶晶晶. 滴水湖及其外围水体浮游植物群落结构与水质评价[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- TAO J J. Study on the change structure of phytoplankton community and water quality evaluation in Dishui Lake and its surrounding waters [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013.
- [24] 胡韧. 珠海水库富营养化现状、浮游植物群落特征与蓝藻水华风险分析[D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- HU R. Eutrophication, phytoplankton assemblage and blue-green algal blooms in Zhuhai reservoirs [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2009.
- [25] 胡韧, 熊江霞, 韩博平. 具有短水力滞留的小型富营养化水库浮游植物群落结构与动态[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1319-1326.
- HU R, XIONG J X, HAN B P. Structure and dynamics of phytoplankton assemblage in a small eutrophic reservoir with a short residence time [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1319-1326.
- [26] 刘笑. 长江口浮游植物与轮虫群落生态研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- LIU X. The characteristics of community structure of phytoplankton and the rotifer in Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [27] 路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 950-956.
- LU N, YIN H B, DENG J C, et al. Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 950-956.
- [28] 张丽霞. 南湾水库水质与藻类变化关系和不同光强对铜绿微囊藻的影响[D]. 信阳: 信阳师范学院, 2009.
- ZHANG L X. The relationship of the algae and Nanwan reservoir and the impact of different light on the *Microcystis Aeruginosa* [D]. Xinyang: Xinyang Normal University, 2009.
- [29] 余涛. 巢湖浮游植物群落结构研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2010.
- YU T. Phytoplankton community structure in Chaohu Lake [D]. Hefei: Anhui University, 2010.

- [30] 郭沛涌, 林育真, 李玉仙. 东平湖浮游植物与水质评价 [J]. 海洋湖沼通报, 1997(4): 37-42.
GUO P Y, LIN Y Z, LI Y X. Study on phytoplankton and evaluation of water quality in Dongping Lake [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1997(4): 37-42.
- [31] 景钰湘. 上海滴水湖浮游藻类群落结构特征及水质评价 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
JING Y X. The characteristics of community structure of planktonic algae and water quality assessment in Dishui Lake, Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [32] 梁晓霞. 晋阳湖浮游藻类群落结构与水体生态修复研究 [D]. 太原: 山西大学, 2009.
LIANG X X. Studies on community structures of plankton and ecological restoration of water in Jinyang Lake [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2009.
- [33] 王镜岩, 朱圣庚, 徐长法. 生物化学(上) [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 397-398.
WANG J Y, ZHU S G, XU C F. Biological chemistry (volume one) [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 397-398.
- [34] MELACK J M. Photosynthetic activity of phytoplankton in tropical African soda lakes [J]. Hydrobiologia, 1981, 81/82 (1): 71-85.
- [35] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 294-298.
LIU C G, JIN X C, SUN L, et al. Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater [J]. Journal of Agro-environment Science, 2005, 24(2): 294-298.

Composition of planktonic algae community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha Reservoir

YAN Wenyi¹, WANG Shaoxiang², GU Jing², CHEN Lijing¹

(1. Key Laboratory of Genetic Resources for Freshwater Aquaculture and Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Qingcaosha Reservoir Management Branch, Shanghai SMI Raw Water Co. Ltd, Shanghai 201913, China)

Abstract: Planktonic algae were investigated and researched monthly from January 2014 to December 2015 in Qingcaosha Reservoir, an important water source in Shanghai. There were 25 dominant species in 2014, and only 12 dominant species in 2015. *Microcystis incerta*, *Pseudoanabaena* sp., *Cyclotella* sp., *Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis* and *Klebsormidium scopulinum* were common dominant species arising in two years. Compared with the data of 2014, the dominant species were substantially reduced in 2015, and the seasonal variation of dominant species was less obvious than in 2014. As a whole, the dominant species were more in summer and autumn than in winter and spring. The majority of dominant species groups was Cyanophyta and Chlorophyta. Dominant species groups showed the characteristics of more Cyanophyta in summer, autumn and more Chlorophyta in spring, summer. Algae of Bacillariophyta and Xanthophyta became dominant species more likely in spring and summer. Redundancy Analysis showed that water temperature, dissolved oxygen, total nitrogen, total phosphorus were the main environmental variables affecting most dominant species density. As for *Microcystis incerta*, the important dominant species, its density was positively related with water temperature. As for *Tribonema* sp. and *Cyclotella* sp., their density had negative correlation with water temperature.

Key words: Qingcaosha Reservoir; planktonic algae; dominant species; species composition; environmental factors