

Community Structure of Phytoplankton and Their Canonical Correspondence Analysis with Environmental Factors in Qingcaosha Reservoir

Ting Wu, Linghui Li, Qingwan Gong, Qinghui Huang, Jianhua Li

College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 1531295@tongji.edu.cn

Received: May 15th, 2017; accepted: Jun. 3rd, 2017; published: Jun. 6th, 2017

Abstract

In order to reveal the community structure characteristics of phytoplankton and the relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir, the phytoplankton species composition, abundance and 12 environmental factors at 12 sampling sites were analyzed from January 2014 to November 2014. A total of 207 phytoplankton species were identified, which belong to 88 genera and 8 phyla. The dominant species were *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Cyclotella meneghiniana*, *Cryptomonas ovate*, *Chroomonas acuta*, *Chroococcus minutus*, *Merismopedia punctata* and *Microcystis aeruginosa*, etc. Phytoplankton species in Qingcaosha Reservoir were mainly composed by Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanophyta. Phytoplankton abundance varied seasonally with the maximum value (2.81×10^6 cells/L) in June and minimum (2.19×10^5 cells/L) in January. Mean Margalef index, Pielou index and Shannon-Wiener index were $3.50 (\pm 0.74)$, $0.35 (\pm 0.17)$ and $2.41 (\pm 0.72)$. The phytoplankton community structure was of Cryptophyta-Bacillariophyta type in winter, of Bacillariophyta-Chlorophyta type in spring, of Bacillariophyta-Cyanophyta type in summer and of Cyanophyta-Bacillariophyta type in autumn. Phytoplankton spatial differences are large, the diversity of front portion was significantly higher than the rear reservoir area. Canonical correlation analysis (CCA) showed that temperature, dissolved oxygen, pH, total N and total P had the closest relationships with the phytoplankton community structure in the reservoir.

Keywords

Water Source, Phytoplankton, Environmental Factors, Canonical Correspondence Analysis, Water Quality Evaluation

青草沙水库浮游植物群落特征与水环境因子的典范对应分析

吴 婷, 李灵慧, 龚庆碗, 黄清辉, 李建华

作者简介: 吴婷(1991-), 四川人, 硕士研究生, 主要从事水域生态学研究。

文章引用: 吴婷, 李灵慧, 龚庆碗, 黄清辉, 李建华. 青草沙水库浮游植物群落特征与水环境因子的典范对应分析[J]. 水资源研究, 2017, 6(3): 254-264. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.63030>

同济大学环境科学与工程学院, 上海
Email: 1531295@tongji.edu.cn

收稿日期: 2017年5月15日; 录用日期: 2017年6月3日; 发布日期: 2017年6月6日

摘要

为揭示青草沙水库浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系, 于2014年1月至2014年11月, 逐月对青草沙水库12个位点浮游植物种类组成、种群细胞密度及12项水体理化指标进行了调查分析。结果表明: 调查期间共检出浮游植物8门88属207种, 主要优势种有颗粒直链藻(*Aulacoseira granulata*)、颗粒直链藻最窄变种(*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*)、变异直链藻(*Melosira varians*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)、尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、点形平裂藻(*Merismopedia punctata*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)等。浮游植物群落组成以硅藻为主, 蓝绿藻其次; 浮游植物细胞密度季节差异大, 6月最高, 为 2.81×10^6 cells/L, 1月最低, 为 2.19×10^5 cells/L, 全年Margalef指数、Pielou指数及Shannon-Wiener指数分别为 $3.50 (\pm 0.74)$ 、 $0.35 (\pm 0.17)$ 及 $2.41 (\pm 0.72)$, 利用TLI(Σ)指数综合评价青草沙水库水体处于轻度富营养化状态。青草沙水库浮游植物群落结构变化规律为冬季隐-硅藻型、春季硅-绿藻型、夏季硅-蓝藻型、秋季蓝-硅藻型。水库浮游植物空间差异较大, 库区中后部多样性明显高于前部。典范对应分析(CCA)表明, 温度、溶解氧、pH、总氮和总磷与青草沙水库浮游植物群落结构关系最为密切。

关键词

水源地, 浮游植物, 水环境因子, 典范对应分析, 水质评价

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

浮游植物是水环境中浮游生物的重要组成部分, 在改善和调节水环境生态系统中物质循环和能量流动方面发挥着重要的作用[1], 其群落结构演变与水体营养化进程密切相关。浮游植物具有个体小、细胞结构简单、对生境变化敏感等特点, 其种类组成、密度和优势种等特征易受水环境变量的影响而在较短时间内发生改变, 相对于其他生物类群更能及时反映水生生态系统的变化[2]。因此, 可以利用浮游植物群落特征指标在特定水域的时空变化规律来分析和判断水质变化[3]。国内外许多湖泊、水库以及河流都进行过大量浮游植物的研究, 并根据浮游植物生物指标对其水环境状况进行了分析评价[1] [4]。而对于采取整体生态系统的方法来进行水环境管理, 浮游植物数据在管理和政策方面都有很重要的地位[5]。

青草沙水库位于长江口长兴岛北侧($31^{\circ}25'N \sim 31^{\circ}29'N$, $121^{\circ}34'E \sim 121^{\circ}42'E$), 由长兴岛头部和北部外侧的中央沙、青草沙以及北小泓、东北小泓等水域组成。青草沙水库过境水源水量丰沛, 水体自净力强, 开发潜力巨大, 是目前国内最大的蓄淡避咸的河口江心水库, 是上海最大的水源地。其最高蓄水位 7.0 m, 有效库容 4.38 亿 m^3 , 目前供水量已达 500 万 m^3 /天, 受益人口约 1300 万。青草沙水库水力停留时间较长(最长时间达到 68 天), 因此水库易发生富营养化现象, 对饮用水水质维护不利。与此同时, 由于青草沙水库水源地取用长江下游的长江口原水, 长江口水量和水质是直接影响青草沙水库水域水质优劣的重要因素。青草沙水库作为上海战略饮用

水水源地, 维持其优良的水质对保障上海市饮用水安全以及社会经济发展具有重要战略意义。有文献对青草沙 2011 年和 2012 年的浮游植物群落与水环境因子的关系做了比较深入的研究[6] [7], 而 2013 年之后的研究还未见报道, 本文在前期研究的样点和时间基础上增加了位于库尾的一个库外采样点和一个采样月份, 是目前为止青草沙浮游植物群落与水环境因子关系研究中采样点覆盖面最广时间周期最长的一次研究。

为了继续对上海水源地水库进行研究, 笔者研究了青草沙水库浮游植物的种类及群落结构, 结合生物指标和理化指标, 综合分析了青草沙水库的水环境状况, 并结合典范对应分析(CCA), 探讨浮游植物群落结构与水环境因子的关系, 以为青草沙水源地水质管理和富营养化的控制提供周年数据和科学依据。

2. 材料和方法

2.1. 采样点的设置与采样频率

根据青草沙水库形态、水文条件, 由上游到下游共设置 12 个采样点(图 1), 其中 S1、S12 号站点位于青草沙水库库外的库首与库尾; 其余各点均在库内, S2、S3 号站点位于青草沙入库库首, S4-S6 号站点位于库区中部, S7-S11 号站点位于库尾。2014 年 1~11 月, 每月定期定性定量采集浮游植物样品和水环境因子样品。

2.2. 浮游植物的采集与鉴定分析

现场用 25 号浮游生物网定性采集, 于水面表层呈“∞”状拖动, 每秒 20~30 cm, 约 2 min。将浓缩于网头的水样收集于 50 mL 聚乙烯标本瓶, 用 4% 福尔马林现场固定, 以待镜检鉴定。

浮游植物定量水样用 1 L 采水器采集表层水样 1 L, 置于采样瓶中, 加入 15 mL 鲁哥氏液固定, 静置 48 h 后吸去上清液留 30 mL 备用。显微镜检计数时, 充分摇匀, 吸取 0.1 mL 滴入计数框内, 用视野法计数, 计算 1L 水中浮游植物的数量。种类鉴定及计数方法主要参考《中国淡水浮游植物: 系统, 分类及生态》[8]。

2.3. 水质理化指标的测定

环境因子样品的采集与浮游植物样品的采集同步进行, 现场采用美国哈希(HQ40D)便携式多参数水质分析仪测定水温、pH、溶解氧(DO); 透明度(SD)采用塞式透明度盘现场测定。

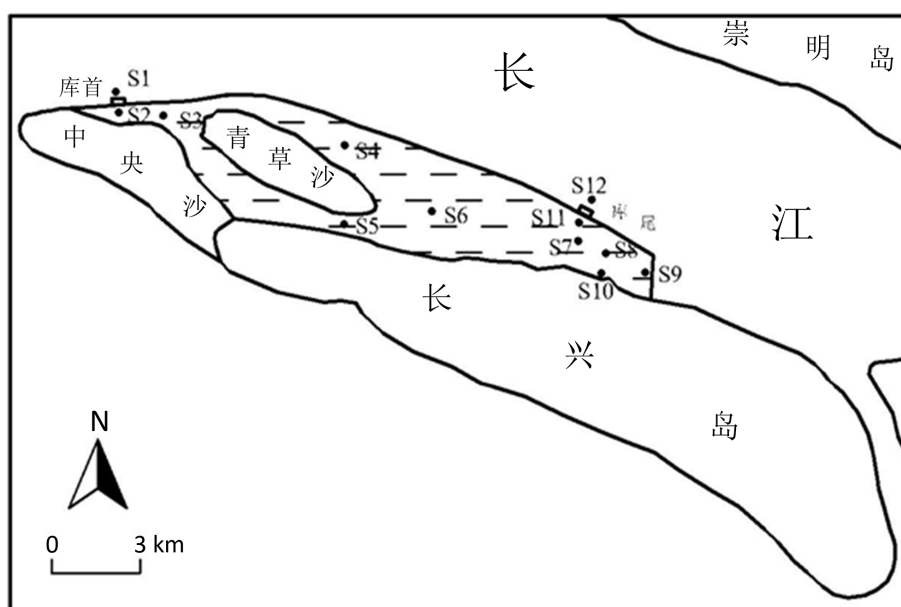


Figure 1. Distribution of sampling sites of Qingcaosha Reservoir
图 1. 青草沙水库采样点分布

原水样用过硫酸钾消解法测定总氮(TN)与总磷(TP)。抽滤水样采用纳氏试剂比色法测定氨氮(NH₃-N)，紫外分光光度法测定硝态氮(NO₃⁻-N)，紫外分光光度法测定正磷酸盐(PO₄³⁻-P)。溶解性有机碳(DOC)的含量使用有机碳分析仪(岛津 TOCVcph)测定。使用浮游植物荧光仪(Phyto-PAMWalz)通过活体藻细胞叶绿素荧光来测定水体中 Chl a 含量，在 Meas.Freq.为 32 的条件下测量微藻荧光 Chl a 含量，并通过热乙醇法进行校正。

2.4. 数据处理与分析

2.4.1. 优势度指数

浮游植物优势度分析采用 Mcnaughton 优势度指数(Y)，优势种根据每个种的优势度值(Y)来确定，Y 值大于等于 0.02 的藻种定义为优势种，计算公式见：

$$Y = \left(\frac{ni}{N} \right) * fi \quad (1)$$

式中：ni 为采集样品中第 i 个种的个体数量(cell/L)，N 为采集样品中所有种类总个数(cell/L)，fi 为采集样品中第 i 个种出现的频率。

2.4.2. 多样性指数

对固定的浮游植物进行分类鉴定后，把每个采样点所采集到的浮游植物按不同种类准确统计个体数并计算出每一种类的细胞密度。计算浮游植物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数，公式分别为：

Shannon-Wiener 物种多样性指数

$$H = -\sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

Margalef 物种丰富度指数

$$D = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (3)$$

Pielou 物种均匀度指数

$$J = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

式中：N 为样品中所有种类的总细胞密度，S 为样品中种类总数，ni 为第 i 个种的个体数量(cell/L)。

2.4.3. 典范对应分析

浮游植物群落与水环境因子间的典范对应分析(Canonical correlation analysis，简称 CCA)利用 CANOCO4.5 分析软件和 CANODRAW4.5 作图软件进行，物种数据采用主要浮游植物的细胞密度数据，按照该物种在各样点出现的频度 > 10%，至少在一个站位的相对密度≥1%的条件进行筛选，物种数据经 lg(x + 1)转换，环境数据除 pH 值外都进行 lg(x + 1)转换[9]。

2.5. 营养状态评价方法

综合营养状态指数

营养状态评价方法采用营养状态指数法(TLI) [10]，选取叶绿素 a(Chl a)、TP、TN、透明度(SD)作为评价指标。根据中国湖泊(水库)部分参数与 Chla 的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}² 值[11]，r_{ij} 是参数 i,j 与基准参数 chl-a 的相关系数，计算各参数的营养状态指数的相关权重得出综合营养状态指数计算公式如下：

$$TLI(\sum) = 0.23TLI(Chl a) + 0.22TLI(TP) + 0.22TLI(TN) + 0.22TLI(SD) \quad (5)$$

式中：叶绿素 *a*(Chl*a*)单位为 $\mu\text{g/L}$ ，透明度(SD)单位为 m，其它指标单位均为 mg/L 。

3. 结果与分析

3.1. 水质理化指标

青草沙水库水质调查结果(表 1)表明, 水体温度年季变化明显, 最高温度 26.9°C , 出现在 7 月, 最低温度 4.15°C , 出现在 1 月。2014 年 3~4 月及 2014 年 9~10 月的季节性过渡时间水温有明显的升高与降低。pH 值变化范围在 7.23~8.27 之间。DO 在 1 月最高, 为 11.29 mg/L , 8 月最低 8.17 mg/L 。SD 年际变幅在 0.34~0.54 m, 这与水体浮游植物数量以及长江来水含沙量密切相关。TN 浓度在 $1.49\sim 2.39 \text{ mg/L}$ 之间变化, $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量较低, $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主要的氮形态, TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均在 3 月出现最高值, 9 月出现最低值; TP 浓度在 $0.10\sim 0.26 \text{ mg/L}$ 之间变化, 2 月最高, 8 月和 9 月最低, 其中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量较低。Chl *a* 浓度在 $5.22\sim 7.78 \mu\text{g/L}$ 之间变化, 3 月最低, 7 月最高。

3.2. 综合营养状态指数评价

如图 2 所示, 青草沙水库水体月平均综合营养指数 TLI(Σ)在 54.26~57.57 之间波动, 变化幅度不明显, 3 月最低, 10 月最高。根据水体营养状态分级标准, 调查期间青草沙水库水体全年各区域均处于轻度富营养状态。空间差异上, 库内各点综合营养指数 TLI(Σ)明显低于库外 S1 和 S12 两点, 水体进入库区后, 其 TLI 综合营养指数呈现逐渐下降的趋势, 说明水环境质量逐渐变好。

3.3. 浮游植物的群落结构特征

3.3.1. 浮游植物种类

调查期间, 在青草沙水库共检出浮游植物 207 种(包括种下分类单位), 隶属 8 门 88 属。其中, 绿藻门的种类最多, 82 种, 占总种数的 39.61%; 其次是硅藻门, 71 种, 占总种数的 34.30%; 蓝藻门 39 种, 占总种数的 18.84%, 裸藻和隐藻各 4 种, 各占总种数的 1.93%; 甲藻门、金藻门和黄藻门分别为 3、3 和 1 种, 各占总种数的 1.45%、1.45% 和 0.48%。

3.3.2 优势种

浮游植物优势度分析采用 Mcnaughton 优势度指数(Y), 优势种根据每个种的优势度值(Y)大于等于 0.02 的藻种定义为优势种。调查期间, 青草沙浮游植物整体优势度指数 $Y \geq 0.02$ 的浮游植物仅有 2 门 4 种, 分别为颗粒

Table 1. Average monitoring results of chemical and physical index in Qingcaosha Reservoir

表 1. 青草沙水库理化指标监测情况每月平均值

采样时间	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$	DO(mg/L)	SD/m	TN(mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	TP(mg/L)	SRP(mg/L)	DOC(mg/L)	Chl <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	TLI(Σ)
2014-1	7.77	3.15	11.29	0.51	2.25	0.08	1.94	0.11	0.04	20.39	14.30	54.48
2014-2	8.24	6.81	10.35	0.50	2.24	0.22	1.92	0.26	0.05	2.03	9.18	56.52
2014-3	7.92	8.52	9.92	0.40	2.39	0.37	1.94	0.19	0.06	2.13	5.22	55.20
2014-4	8.27	15.91	9.59	0.37	2.04	0.25	1.83	0.14	0.03	1.99	11.96	55.83
2014-5	7.23	17.17	8.63	0.31	2.14	0.24	1.88	0.17	0.03	2.60	14.20	57.79
2014-6	8.13	22.77	8.60	0.54	1.76	0.09	1.47	0.23	0.04	2.64	14.16	55.88
2014-7	7.80	26.91	9.33	0.37	1.65	0.19	1.34	0.12	0.03	2.40	37.78	57.39
2014-8	8.18	25.71	8.17	0.38	1.82	0.22	1.37	0.10	0.04	2.30	21.26	55.63
2014-9	7.87	23.07	9.03	0.39	1.49	0.36	1.28	0.10	0.03	4.56	35.52	56.06
2014-10	7.96	17.20	8.69	0.34	1.76	0.09	1.24	0.14	0.04	4.25	23.52	57.44
2014-11	8.18	15.63	8.79	0.38	1.75	0.19	1.50	0.12	0.05	8.65	15.44	55.16

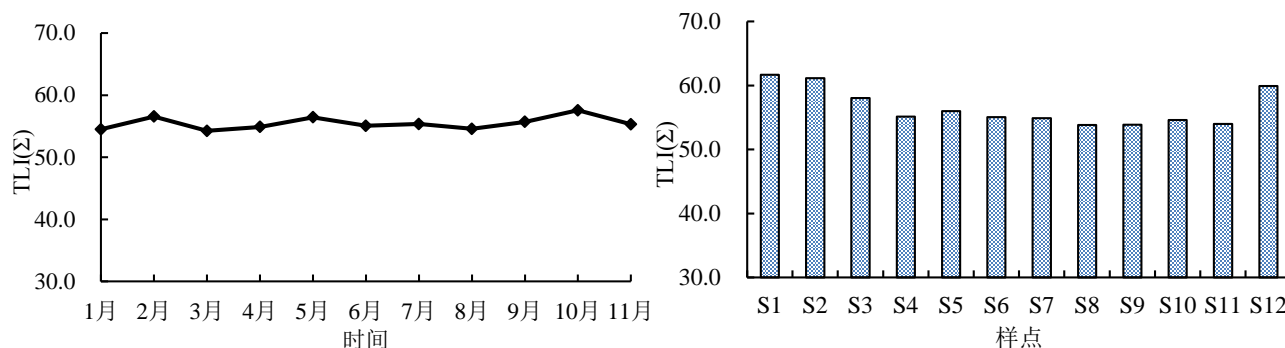


Figure 2. Temporal and spatial variation of TLI in the reservoir

图 2. 水库综合营养指数法 TLI(Σ)的时空变化

直链藻(*Aulacoseira granulata*)、颗粒直链藻最窄变种(*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*)、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)和变异直链藻(*Melosira varians*)。青草沙水库各月共检测到浮游植物优势种 4 门 20 种,属于蓝藻门和绿藻门的优势种类均为 7 种,其次为硅藻门,为 4 种,占总数的 20.0%。全年来看,3 月各样点优势种类最多,为 8 种,以硅藻和绿藻为主,其次为 8 月,为 6 种,主要为蓝藻和硅藻。2 月优势种类最少,仅两种,2 月隐藻占绝对优势。从季节变化上看,冬季 1~2 月,耐低温的直链藻属、隐藻属在数量上占绝对优势。春季时气温略有回升,优势种为硅藻和绿藻并存,包括颗粒直链藻、变异直链藻、镰形纤维藻(*Ankistrodesmus falcatus*)、游丝藻(*Planctonema lauterbornii*)、细丝藻(*Ulothrix oscillarina*)等。5 月后气温明显上升,蓝藻开始作为优势种出现。夏季和秋季优势种主要以蓝藻为主,夏季和秋季温度较高,蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、点形平裂藻(*Merismopedia punctata*)、巨颤藻(*Oscillatoria princeps*)、卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)等占据优势。11 月后温度骤降,硅藻和隐藻开始出现,耐低温的硅藻如颗粒直链藻、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)和隐藻门大规模繁殖成为优势种。

3.3.3. 细胞密度

调查期间,青草沙水库浮游植物细胞密度月均值变化范围为 $2.19 \times 10^5 \sim 2.81 \times 10^6$ cells/L,其中,6 月最高,1 月最低(图 3(a))。各采样点浮游植物细胞密度平均值变化范围为 $2.48 \times 10^5 \sim 2.04 \times 10^6$ cells/L,其中,S6 号采样点浮游植物细胞密度平均值最大,其次是 S5 号采样点和 S4 号采样点,分别为 1.65×10^6 cells/L、 1.22×10^6 cells/L,S1 号采样点浮游植物细胞密度平均值最低(图 3(b))。在青草沙水库水体中,硅藻门、绿藻门、蓝藻门和隐藻门浮游植物细胞密度较高,分别占浮游植物总细胞密度的 43.89%、26.40%、18.25%和 11.30%,裸藻门、甲藻门、金藻门和黄藻门浮游植物细胞密度较低,三门浮游植物细胞密度之和仅为浮游植物总细胞密度的 1.64%。

3.3.4. 多样性指数

如图 4 所示,计算得 Shannon-Wiener 多样性指数 H'的月平均值变化范围为 0.96~2.84。Shannon-Wiener 指数库外明显小于库内,库区前部小于后部。青草沙平均水质基本属于中等,进入库区后水质逐渐转好。Margalef 丰富度指数 D 月平均变化范围为 1.77~4.48。青草沙库区除库口内部的 S2 点外其他内部各点物种丰富度指数(D)均在 3.5~4.5 之间。S1、S2 点物种丰富度指数较小,水质相对较差,但水体进入青草沙库区过后逐步趋于稳定。Pielou 均匀度指数 J 月平均变化范围为 0.25~0.81。库区前部样点与库中和库区后部差异较大,库区中后部生物多样性较高。

3.4. 浮游植物群落与环境因子的典范对应分析(CCA)

典范对应分析(CCA)可反映浮游植物群落组成与环境因子之间的对应关系。根据青草沙水库浮游植物出现频度和相对丰度,选取 12 种(属)的浮游植物(表 2)用于 CCA 排序分析,分析结果见图 5。本研究中两个物种排

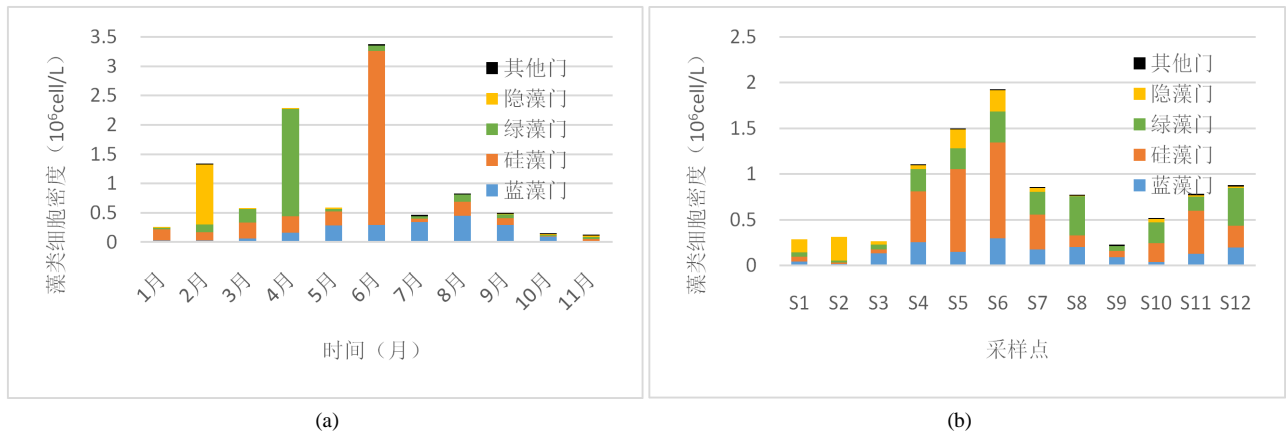


Figure 3. Phytoplankton densities of different months (a) and different sites (b)
 图 3. 浮游植物细胞密度月均值(a)及各采样点浮游植物细胞密度平均值(b)

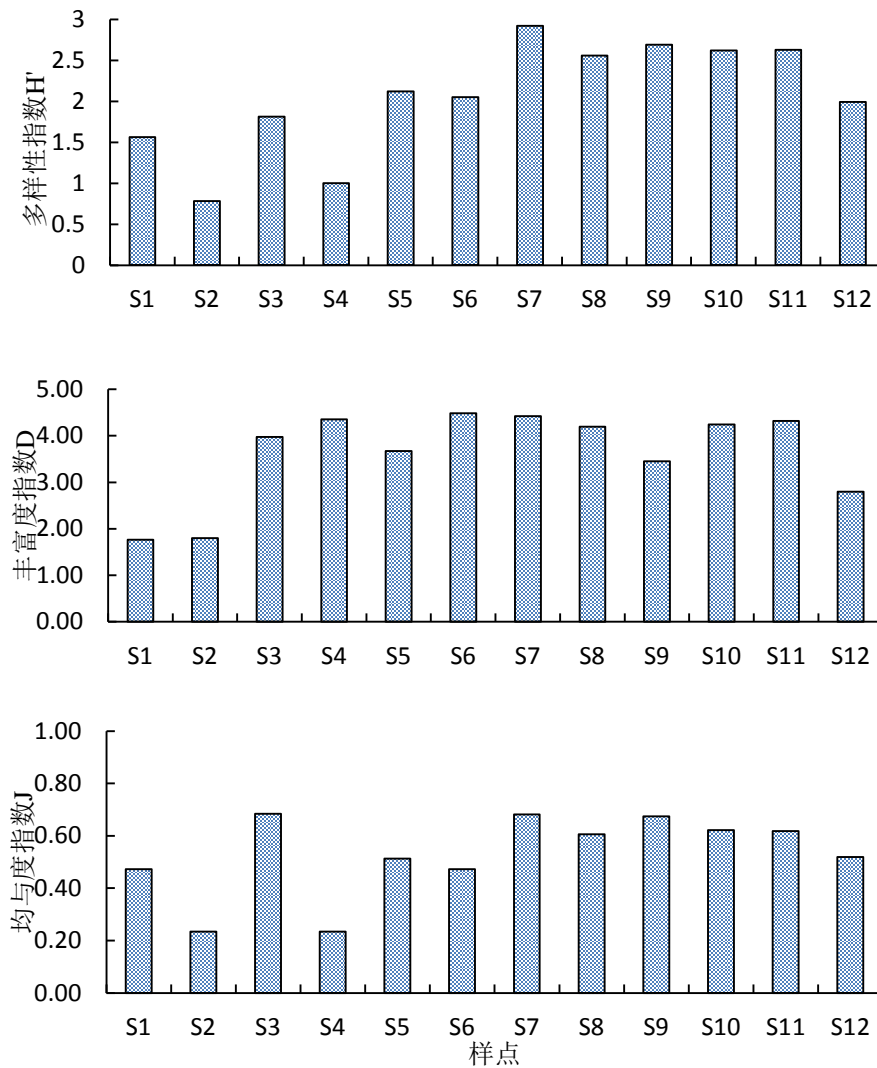


Figure 4. Diversity index, Evenness index and evenness index of phytoplanktonat different sampling sites in Qingcaosha Reservoir
 图 4. 青草沙水库浮游植物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数

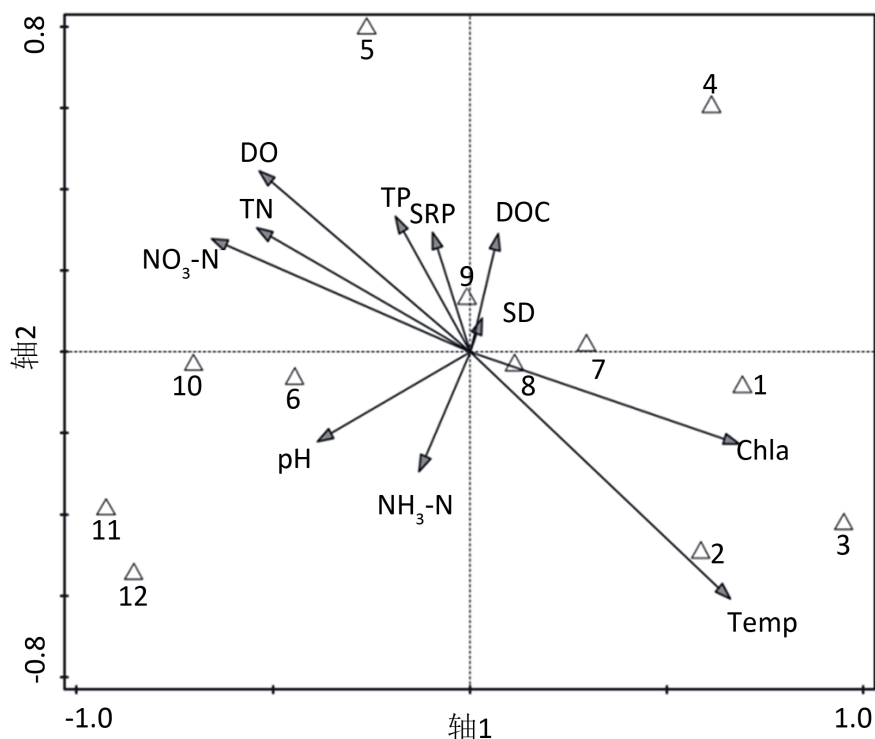


Figure 5. CCA diagram of phytoplankton dominant species and environment factors
图 5. 浮游植物群落与环境因子 CCA 排序图

Table 2. List of phytoplankton species in Qingcaosha reservoir for CCA
表 2. CCA 分析青草沙水库浮游植物种类名录

编号	种属名	拉丁文名	编号	种属名	拉丁文名
蓝藻门		Cyanophyta	6	变异直链藻	<i>Melosira varians</i>
1	微囊藻属	<i>Microcystis</i>	7	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>
2	微小色球藻	<i>Chroococcus minutus</i>	8	颗粒直链藻最窄变种	<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>
3	点形平裂藻	<i>Merismopedia punctata</i>	9	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
隐藻门		Cryptophyta	绿藻门		Chlorophyta
4	尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>	10	游丝藻	<i>Planctonema lauterbornii</i>
5	卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	11	多形丝藻	<i>Ulothrix variabilis</i>
硅藻门		Bacillariophyta	12	细丝藻	<i>Ulothrix oscillarina</i>

Table 3. Summary statistics for CCA analysis between species and environmental factors in Qingcaosha Reservoir
表 3. 青草沙水库浮游植物与环境因子间 CCA 分析统计信息

参数 Statistic	轴 1 (Axis1)	轴 2 (Axis2)	轴 3 (Axis3)	轴 4 (Axis4)
特征值 Eigenvalues	0.376	0.181	0.076	0.047
物种与环境因子相关关系 Species-environment correlation	0.844	0.702	0.511	0.3838
物种变异累积百分数 Cumulative percentage variance of species	15.44	22.87	25.9	27.89
物种与环境因子变异累积百分数 Cumulative percentage of variance of species-environment relation	50.75	75.17	85.36	91.67
特征值总和 Sum of all eigenvalues	0.680			

序轴和两个环境排序轴的相关系数都为 0，排序结果可靠。由表 3 可见，前 4 轴共解释了环境因子 91.67% 的信息，其中，第 1 轴贡献率最大，达到 50.75%。CCA 排序的全部特征值解释了浮游植物群落变异程度的 27.89%，前 2 轴共解释了浮游植物变异程度的 22.87%。

CCA 排序图反映出 12 种(属)浮游植物对环境因子的不同适应特点(图 4)。在 12 个环境因子中，温度、溶解氧以及硝态氮对浮游植物群落结构影响最大，pH、总磷、总氮的影响次之，透明度、DOC、活性磷、氨氮的影响较小。青草沙水库浮游植物在 CCA 第 1、第 2 排序轴上得到较好的分化，蓝藻种类主要集中在第 4 象限，与温度正相关，与 TN、TP 呈负相关。微囊藻属和微小色球藻与温度的正相关性最为明显。绿藻门种类主要集中在第 3 象限，与 pH 正相关。隐藻主要集中在第 1 和 2 象限，TP、DOC、SD、DO 与总氮对其均有影响。硅藻门中颗粒直链藻及其最窄变种与温度呈显著的相关性，梅尼小环藻则与温度呈显著负相关，与 TP 呈正相关。硅藻门中的优势种颗粒直链藻及其变种、变异直链藻和梅尼小环藻相对排于两排序轴中心位置，对青草沙水库水体具有较强的适应性。

4. 结论与讨论

4.1. 浮游植物群落结构的动态变化

浮游植物群落种类组成、密度分布及丰度通常呈季节性变化，其群落动态的特征是评价水体富营养程度的重要指标之一。研究表明[12]，在没有人为污染的自然淡水水体中，浮游植物季节性变化的一般规律是：春秋季节以喜低温的硅藻、金藻为主，夏季以喜高温的蓝藻、绿藻为主，冬季浮游植物种类和数量都很少。而青草沙水库浮游植物群落变化规律为春季硅藻、绿藻向夏秋季的硅藻、蓝藻，冬季的硅藻、隐藻转变。庞清江等[13]指出，中营养型湖泊常以甲藻、隐藻和硅藻类占优势，富营养型湖泊则常以绿藻和蓝藻占优势。青草沙水库浮游植物种类组成以硅藻为主，绿藻和蓝藻其次。浮游植物细胞密度季节差异较大，6 月最高，以硅藻为主，直链藻为该月的优势种；1 月和 11 月较低，小环藻、隐藻、直链藻为优势种。

本研究中，青草沙 TN、TP 变化范围分别为 1.49~2.39 mg/L 和 0.10~0.26 mg/L，与周金金等[14]人水库投入运行前营养盐调查数据(TN 变幅与 0.5~2.5 mg/L，TP < 0.2 mg/L)相比，TN 略有下降，TP 则有月份超过前值。但是，调查期间浮游植物细胞密度小于 2.81×10^6 cells/L，与周莉莉[7] 2012 年调查数据相比有明显下降，说明青草沙水体富营养化趋势有所缓解。根据卢宁在 2010 年的研究报告《青草沙水库水质变化及藻类演替规律初步研究》中可知，本次调查中青草沙浮游植物优势种种类变化并不大，蓝藻门的微囊藻、隐藻门的隐藻、硅藻门的直链藻和小环藻属为青草沙的传统优势种，均出现在三个时间段内。

青草沙水库浮游植物群落结构空间差异较大，进入库区中后部多样性明显提高，形成这种空间差异的主要原因可能是光照。决定浮游植物生长的重要因素是光、水温和营养盐，而光照对浮游植物生长重要影响是最大的。Kimmel 等将水库上游看作河流带，河流带具有流速大、水滞留时间短、有效营养和悬浮固体含量高和光照低等环境特征[15]。非生物的浑浊度常限制了光的透射，从而减少了有光层，所以，单位面积内初级生产力常受光的限制。

4.2. 影响浮游植物群落变化的主要环境因子

本次研究发现，温度、pH、DO 以及氮磷与青草沙水库浮游植物群落结构关系最为密切。相关研究表明，温度是制约浮游植物数量与分布的重要因素，水温的升高对浮游植物数量的增加具有主导作用，夏季随着温度升高，光照加强，喜高温的蓝藻大量繁殖成为优势种，秋冬季光照减弱，温度下降，蓝藻数量开始减少，硅藻和绿藻数量上升[16] [17]。青草沙水库浮游植物群落结构的季节差异性较大，CCA 分析表明，水温可能是影响这一差异的最重要因素，其中水温与蓝藻主要种群呈显著正相关。pH 和 DO 作为水体重要的生态因子，与浮游植物的生长关系十分密切[18]。当浮游植物的现存量上升到一定数量后，其生命活动对水体中 CO₂ 和 DO 含量

产生一定的影响,进而影响水体 pH 的变化。CCA 结果显示, TP 和 TN 也是影响青草沙水库浮游植物群落分布的最重要营养盐因子,氮磷与部分硅藻正相关,与蓝藻呈负相关。青草沙水库 TN、TP 含量较高,绝对浓度高于浮游植物生长的阈值,不存在绝对浓度限值[19],其对青草沙水库浮游植物群落影响机理可能为间接作用。石晓丹等[9]研究表明,浓度较高的氮磷营养盐通过促进硅藻和部分绿藻的生长抑制蓝藻和部分绿藻的生长来影响浮游植物群落结构。

致 谢

上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司在水质监测方面提供的支持和帮助。

基金项目

上海市科学技术委员会科研计划项目(13DJ1400104)。

参考文献 (References)

- [1] 亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 569-576. YANG Liangjie, YU Pengfei, ZHU Junquan, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and related affecting factors in Heng-Shan Reservoir, Zhejiang, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 569-576. (in Chinese)
- [2] PÉREZ, J. R., LOUREIRO, S., MENEZES, S., et al. Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(3): 688-702. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0174-9>
- [3] SUIKKANEN, S., LAAMANEN, M. and HUTTUNEN, M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(3): 580-592.
- [4] PTACNIK, R., LEPISTÖ, L., WILLÉN, E., et al. Quantitative responses of lake phytoplankton to eutrophication in Northern Europe. Aquatic Ecology, 2008, 42(2): 227-236. <https://doi.org/10.1007/s10452-008-9181-z>
- [5] MCQUATTERS-GOLLOP, A., EDWARDS, M., HELAOUËT, P., et al. The continuous plankton recorder survey: How can long-term phytoplankton datasets contribute to the assessment of good environmental status? Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 162: 88-97.
- [6] 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. ZHOU Xinpu, ZHANG Wei, WANG Liqin, et al. Community structure of phytoplankton and their canonical correspondence analysis with environment factors in Qingcaosha Reservoir. Journal of Shanghai Ocean University. 2015, 24(4): 532-543. (in Chinese)
- [7] 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]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014. ZHOU Lili. Research on phytoplankton and environmental management system of estuarine reservoir. East China Normal University, 2014. (in Chinese)
- [8] 胡鸿, 魏印心. 中国淡水浮游植物: 系统, 分类及生态[J]. 北京: 科学出版社, 2006. HU Hong, WEI Yinxin. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy, ecology. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 石晓丹, 阮晓红, 邢雅囡, 等. 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, 2008, 29(11): 2999-3008. SHI Xiaodan, RUAN Xiaohong, JIN Yanan, et al. Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in winter and summer in shallow lakes of plain river network areas, Suzhou. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29(11): 2999-3008. (in Chinese)
- [10] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 89-94. CAI Qinghua. Comprehensive evaluation of eutrophication of lakes. Journal of Lake Science, 1997, 9(1): 89-94. (in Chinese)
- [11] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. JIN Xiangcan, LIU Shukun, ZHANG Zongshe, et al. China lake environment. Beijing: Ocean Press, 1995. (in Chinese)
- [12] WANG, X., LU, Y., HE, G., et al. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(8): 920-927.
- [13] 庞清江, 李白英. 东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护, 2003, 19(5): 42-44. PANG Qingjiang, LI Baiying. Assessment of eutrophication of Dongping Lake water body. Water Resources Protection, 2003,

19(5): 42-44. (in Chinese)

- [14] 周金金, 高乃云, 赵世焮, 等. 青草沙水库投入运行前原水中氮和磷动态变化特征研究[J]. 给水排水, 2010, 36(12): 49-52.
ZHOU Jinjin, GAO Naiyun, ZHAO Shigu, et al. Nitrogen and phosphorus dynamic changing features of raw water before Qingcaosha reservoir operation. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(12): 49-52. (in Chinese)
- [15] THORNTON, K. W., KIMMEL, B. L. and PAYNE, F. E. *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1990.
- [16] AGAWIN, N. S. R., DUARTE, C. M. and AGUSTI, S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 591-600.
<https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0591>
- [17] LEHMAN, P. W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 580-590. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0580>
- [18] VERMA, B. S., SRIVASTAVA, S. K. Study of factors affecting phytoplankton primary productivity in a pond of Patna, Bihar, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2016, 15(1): 291.
- [19] 许秋瑾, 郑丙辉, 朱延忠, 等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 453-457.
XU Qiujin, ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, et al. Nutrient status evaluation for tributary of Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2010, 30(4): 453-457. (in Chinese)