

上海青草沙水库生态护坡区浮游植物的群落结构

申利亚, 赵丹, 马婕, 牛文卉, 陈立婧

Phytoplankton community structure of ecological slope protection area of Shanghai Qingcaosha reservoir

SHEN Liya,ZHAO Dan,MA Jie,NIU Wenhui,CHEN Lijing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203289>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响

Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure

上海海洋大学学报. 2019, 28(2): 237 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180302254>

杭州湾人工湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系

Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 757 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200202922>

扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应

Phytoplankton community structure in Jiajiang in Yangzhong Estuary and its relation to environmental factors

上海海洋大学学报. 2019, 28(4): 607 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802372>

西藏多格错仁盐湖表、底层浮游植物群落结构

Phytoplankton community structures in surface and bottom layers of the Dogai Coring Salt Lake, Northern Tibet

上海海洋大学学报. 2018, 27(6): 875 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180402299>

文章编号: 1674-5566(2022)02-0400-11

DOI:10.12024/jsou.20210203289

上海青草沙水库生态护坡区浮游植物的群落结构

申利亚^{1,2}, 赵丹^{1,2}, 马婕^{1,2}, 牛文卉^{1,2}, 陈立婧^{1,2}

(1. 上海海洋大学水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋动物系统分类与进化上海高校重点实验室, 上海 201306)

摘要: 2017 年上海青草沙水库建设了生态护坡, 为探究其对水体浮游植物群落结构的影响, 于 2018 年逐月对该水库生态护坡区和库内对照区的浮游植物群落进行调查比较。共鉴定出生态护坡区浮游植物 201 种, 库内对照区 194 种, 两区域物种达中等相似, 且种类组成均为绿藻-硅藻-蓝藻型。生态护坡区和库内对照区优势种以蓝藻门和硅藻门为主, 且基本相同, 优势度较大的优势种为隐球藻属未定种(*Aphanocapsa* sp.)、湖泊伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)、小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.) 和模糊沟链藻(*Aulacoseira ambigua*)。生态护坡区浮游植物群落密度、生物量年均值依次为 $(578.46 \pm 455.30) \times 10^4$ cells/L、 (1.55 ± 1.03) mg/L, 库内对照区依次为 $(663.46 \pm 588.67) \times 10^4$ cells/L、 (1.61 ± 0.98) mg/L, 两区域浮游植物现存量无显著差异 ($P > 0.05$)。主坐标 COA 分析表明生态护坡区和库内对照区浮游植物群落结构差异不显著 ($P > 0.05$)。上述结果表明生态护坡的建设对水库浮游植物群落基本不造成影响。

关键词: 生态护坡; 浮游植物; 群落结构; 沉水植物

中图分类号: X 171 **文献标志码:** A

浮游植物作为湖泊水库等水源地的初级生产者^[1], 是整个水生态系统物质循环和能量流动的基础, 对维持水生态系统的生态平衡起着重要作用^[2]。对于水库而言, 浮游植物是一个非常重要的类群, 它的群落组成及演替影响着水源地饮水的健康^[3]。由于其对环境变化反应很敏感, 优势种、种类组成、生物量、群落结构会因水体营养盐含量及其他因素的变化而发生改变, 浮游植物常被作为水质净化程度和生态修复水平的指示生物^[4]。

生态护坡是一种以植物为核心, 结合植物学、生态学、工程力学等多种学科, 构建而成的综合性护坡系统, 其最基本的功能是防洪排涝和稳定岸坡, 护坡上的植被和微生物可以截留和降解城市地表径流中的污染物, 提高水体自净能力, 水下的坡脚部分具有高孔隙率, 为水生动植物、两栖类动物以及微生物提供了栖息、繁衍和避难

的场所^[5], 是一个典型的生态交错群落区, 具有调节水文、维护生态系统稳定性的作用。近年来众多的研究成果^[6-11]表明, 生态护坡坡脚的沉水植物对淡水水域中的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)等多种污染物均有着较好的去除效果, 同时, 沉水植物可直接或间接影响水体浮游植物的群落结构, 抑制藻类大量生长, 防治水体富营养化。青草沙水库 2011 年 6 月全面投入运行, 是上海市优良水源地和城市供水战略储备地, 水库边滩的生态护坡于 2017 年 9 月建成, 然而该水库的生态护坡对于水体浮游植物的影响目前还未有人研究。

笔者于 2018 年逐月对该水库生态护坡区和库内对照区的水环境因子及浮游植物进行调查, 比较两个区域浮游植物群落的差异性, 探究生态护坡对水体浮游植物群落结构是否有影响, 可为后人实施生态修复工程提供现实参考。

收稿日期: 2021-02-24 修回日期: 2021-03-27

基金项目: 蓝色粮仓项目湖泊生态增殖模式与净水渔业技术体系(2019YFD0900605); 上海市科学技术委员会部分地方院校能力建设(19050501900)

作者简介: 申利亚(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游生物生态学与水生态修复。E-mail: 2807857412@qq.com

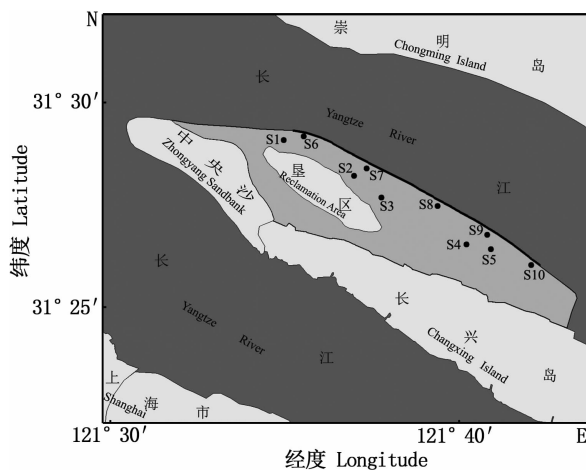
通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青草沙水库面积 67.2 km²,生态护坡位于该水库北堤上游至下游水闸段,全长约 14 km。2017 年 9 月建成生态护坡时除在坡面上种植一些湿生植物、挺水植物外,同时也在坡脚配置了 29.26 万 m² 的沉水植物群落,横向平均种植宽度为 20 m,主要为常绿苦草 (*Vallisneria natans*)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*)、龙须眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*)、狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 和菹草 (*Potamogeton crispus*)^[12]。

如图 1 所示,根据水库地形,在靠近护坡的近岸水域布设生态护坡区采样点 (S6-S10),在与护坡同侧的库区设置库内对照区采样点 (S1 ~ S5)。



图中黑色加粗线为生态护坡区域。

The black bold line in the figure is the ecological slope protection area.

图 1 上海青草沙水库采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Shanghai Qingcaosha reservoir

1.2 样品采集与处理

2018 年每月下旬逐月对该水库生态护坡区和库内对照区进行浮游植物样品采集和水环境因子的测定。浮游植物参照《淡水浮游生物调查技术规范 (SC/T 9402—2010)》采集 1 L 定量样品,现场加入 10 mL 甲醛溶液和 15 mL 鲁哥氏碘液进行固定,带回实验室在分液漏斗中静置 48 h,浓缩定容至 50 mL。取 0.1 mL 摇匀的样品在

OLYMPUS-CX21 光学显微镜下放大 400 倍进行浮游植物物种鉴定和计数,随机计数 100 个视野,细胞总数应达 300 个以上,每个样品计数两片取其平均值后换算为 1 L 水样中的细胞密度 (cells/L)。生物量由藻类的平均体积与密度相乘获得。种类鉴定主要参考水利部水文局等^[13]、胡鸿钧^[14]和王全喜等^[15]的研究。

在采集浮游植物的同时,使用 YSI6600EDS 现场测定水温 (WT)、酸碱度 (pH)、叶绿素 a (Chl. a),塞氏盘测定透明度 (SD),日本 BPL8-PS7FL 回声测深仪测定水深 (D),HACH 便携式测定仪测定溶氧 (DO)。实验室内用 HACH-DR3900 分光光度计进行总氮 (TN)、总磷 (TP)、亚硝酸盐 (NO₂⁻-N)、氨氮 (NH₃-N) 和高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 的测定。

1.3 数据统计与分析

利用 Jaccard 种类相似性指数 (S_j)^[16]、物种优势度指数 (Y)^[17]、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')^[18]、Pielou 物种均匀度指数 (J)^[19] 和 Margale 物种丰富度指数 (D)^[20] 分析生态护坡区和库内对照区的浮游植物群落结构特征,计算公式分别如下:

$$S_j = c / (a + b - c) \quad (1)$$

$$Y = N_i / N \cdot f_i \quad (2)$$

$$H' = - \sum (N_i / N) \ln (N_i / N) \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中: a 为一个地区的物种类数总和; b 为另一个地区的物种类数总和; c 为两地区共有物种和;当 S_j 值为 0 ~ 0.25 时为极不相似;0.25 ~ 0.50 时为中等不相似,0.50 ~ 0.75 时为中等相似,0.75 ~ 1.00 时为极为相似。 N_i 为第 i 种物种的个体数; N 为群落中所有物种的总个体数; f_i 为第 i 种物种在各样点出现的频率; S 为样点中所有物种的种类数,当 $Y \geq 0.02$ 时为优势种。

运用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 LSD 多重比较分析水环境因子、浮游植物密度、生物量以及多样性指数在上述两区域分布的差异性 ($P < 0.05$ 为差异显著)。采用 R3.5.1 中 vegan 包进行主坐标 (PCOA) 分析,比较两个区域间浮游植物群落结构的差异性 or 相似性。其余图表在 Excel 2010 和 Origin 2019 中完成。

2 结果与分析

2.1 水环境因子

由表 1 可知:全年护坡区平均水深(D)显著低于对照区($P < 0.05$);透明度(SD)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量

(COD_{Mn})和叶绿素(*Chl. a*)表现为库内对照区略高于生态护坡区,但均不具显著差异($P > 0.05$);温度(WT)、pH、氨氮(NH_3-N)、亚硝态氮(NO_2-N)则为护坡区略高于对照区,但区域间也无显著差异($P > 0.05$)。

表 1 生态护坡区与库内对照区水环境因子年均值及范围

Tab. 1 Annual mean value and range of water environmental factors in ecological slope protection area and control area in reservoir

水环境因子 Environmental factors	生态护坡区 Ecological slope protection area		库内对照区 Control area in reservoir	
	均值及标准差 Average and Standard deviation	范围 Range	均值及标准差 Average and Standard deviation	范围 Range
D/m	5.02 ± 0.98	4.02 ~ 7.30	9.87 ± 11.14	8.62 ~ 12.10
SD/m	0.75 ± 0.17	0.59 ~ 1.17	0.77 ± 0.23	0.54 ~ 1.35
WT/°C	20.53 ± 8.87	6.88 ~ 32.96	20.47 ± 8.96	6.78 ~ 32.20
pH	8.11 ± 0.78	6.88 ~ 9.19	8.03 ± 0.76	6.87 ~ 9.19
DO/(mg/L)	9.53 ± 2.02	7.88 ~ 14.22	9.63 ± 2.02	7.92 ~ 14.21
TN/(mg/L)	1.58 ± 0.64	0.80 ~ 2.60	1.69 ± 0.59	0.90 ~ 2.36
TP/(mg/L)	0.10 ± 0.05	0.03 ~ 0.19	0.11 ± 0.05	0.04 ~ 0.21
COD_{Mn} /(mg/L)	3.35 ± 1.20	0.62 ~ 4.72	3.69 ± 1.24	0.52 ~ 5.07
<i>Chl. a</i> /(μ g/L)	18.62 ± 2.85	11.07 ~ 22.35	18.80 ± 3.04	10.17 ~ 22.04
NH_3-N /(mg/L)	0.06 ± 0.07	0.03 ~ 0.28	0.05 ± 0.06	0.02 ~ 0.24
NO_2-N /(mg/L)	0.016 ± 0.014	0.004 ~ 0.054	0.014 ± 0.010	0.005 ~ 0.033

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类组成

生态护坡区 2018 年共发现浮游植物 8 门 201 种,其中:绿藻门种类最多达 72 种,占 35.82%;硅藻门 70 种,占 34.83%;蓝藻门 32 种,占 15.92%;裸藻门 18 种,占 8.96%;甲藻门 5 种,占 2.49%;黄藻门和金藻门均为 2 种,各占 1%;隐藻门 1 种,占 0.50%。库内对照区共发现浮游植物 8 门 194 种,以硅藻门种类最多,为 83 种,占 42.78%;绿藻门次之,65 种,占 33.51%;蓝藻门 24 种,占 12.37%;裸藻门 16 种,占 8.25%;甲藻门 3 种,占 1.55%;金藻门 2 种,占 1.03%;黄藻门和隐藻门均为 1 种,各占 0.52%。

两个区域出现的共有物种数为 148 种,相似性指数 S_j 为 0.60,达到中等相似。从物种组成上看,两区域间各月份物种构成比例差异较小,群落结构均为绿藻-硅藻-蓝藻型。见图 2。

季节上,生态护坡区和库内对照区均呈现出冬春季硅藻门种类数最多,夏秋季绿藻门种类数最多,蓝藻门物种数夏季较高,其余季节相对较

低的特点。由此可见,生态护坡的建设并未改变水体浮游植物的种类组成。

2.2.2 浮游植物优势种

由表 2 可知,生态护坡区和库内对照区浮游植物优势种主要集中在蓝藻门和硅藻门,且种类大都相同。隐球藻属未定种(*Aphanocapsa* sp.)优势度最大,为两区域的 4 季共有优势种。湖泊伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)其次,为两区域春、夏、秋季共有优势种。小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.)为两区域春、夏、冬季优势种,模糊沟链藻(*Aulacoseira ambigua*)为春、秋、冬季优势种。泽丝藻属未定种(*Limnithrix* sp.)和依沙束丝藻(*Aphanizomenon ississatschenkoi*)为两区域夏、秋季优势种,史氏棒胶藻(*Rhabdogloea smithii*)为两区域春、冬季优势种,细小平裂藻(*Merismopedia minima*)为两区域夏季优势种。微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)仅在护坡区冬季为优势种,微小色球藻(*Chroococcus minutus*)为对照区春、夏、冬季优势种,但护坡区仅为冬季优势种。链形小环藻(*Cyclotella acus*)在护坡区春、

夏、冬季为优势种,在对照区春、冬季为优势种。栅藻属未定种为两区域冬季优势种。

的季节分布上有些许不同外,生态护坡的建设几乎没有对水体浮游植物优势种的形成产生影响。

因此,除微小色球藻和链形小环藻在两区域

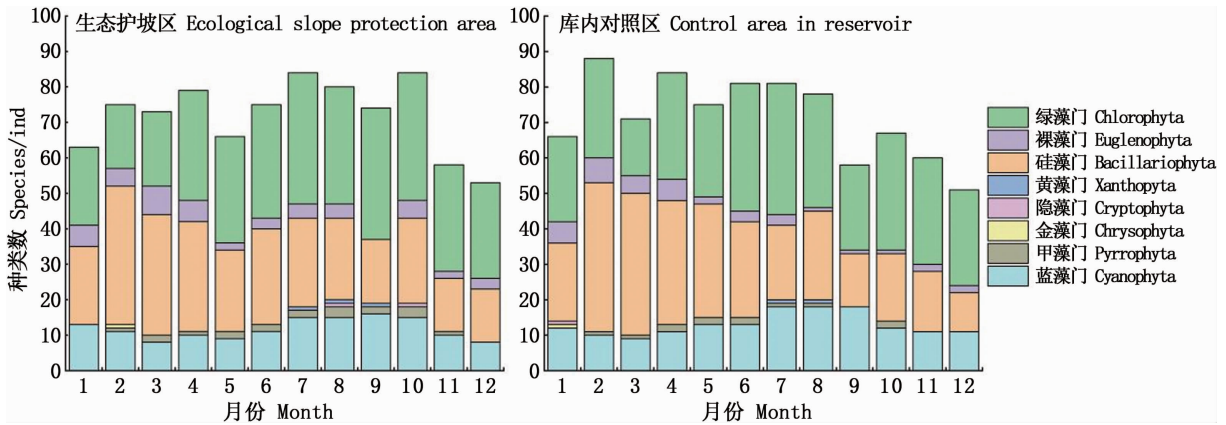


图 2 生态护坡区和库内对照区浮游植物种类组成周年变化
Fig. 2 Annual variation of phytoplankton species composition in ecological slope protection area and control area in reservoir

表 2 不同季节生态护坡区和库内对照区优势种及优势度
Tab. 2 Dominant species and dominance degree in different seasons of ecological slope protection area and control area in reservoir

物种 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	生态护坡区 Ecological slope protection area	库内对照区 Control area in reservoir	生态护坡区 Ecological slope protection area	库内对照区 Control area in reservoir	生态护坡区 Ecological slope protection area	库内对照区 Control area in reservoir	生态护坡区 Ecological slope protection area	库内对照区 Control area in reservoir
	蓝藻门 Cyanophyta							
隐球藻属未定种 <i>Aphanocapsa</i> sp.	0.28	0.30	0.28	0.38	0.37	0.41	0.34	0.37
湖泊伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	0.10	0.12	0.23	0.26	0.16	0.28		
泽丝藻属未定种 <i>Limnothrix</i> sp.			0.03	0.03	0.05	0.03		
依沙束丝藻 <i>Aphanizomenon ississatschenkoi</i>			0.03	0.03	0.02	0.02		
细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>			0.05	0.03				
微小平裂藻 <i>Merismopediat enuissima</i>							0.07	
微小色球藻 <i>Chroococcu sminutus</i>		0.04		0.02			0.05	0.02
史氏棒胶藻 <i>Rhabdogloeas mithii</i>	0.09	0.08					0.06	0.05
硅藻门 Bacillariophyta								
链形小环藻 <i>Cyclotella acus</i>	0.08	0.04	0.02				0.03	0.03
小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	0.08	0.12	0.08	0.09			0.11	0.18
模糊沟链藻 <i>Aulacoseira ambigua</i>	0.07	0.05			0.09	0.11	0.08	0.04
绿藻门 Chlorophyta								
栅藻属未定种 <i>Scenedesmus</i> sp.							0.04	0.03

2.2.3 浮游植物现存量

2018 年生态护坡区浮游植物生物密度年均值为 $(578.46 \pm 455.30) \times 10^4$ cells/L, 变化范围为 $(124.32 \sim 1416.41) \times 10^4$ cells/L, 最低值出现

在 1 月, 最高值出现在 9 月。库内对照区生物密度年均值为 $(663.46 \pm 588.67) \times 10^4$ cells/L, 范围为 $(178.27 \sim 1937.68) \times 10^4$ cells/L, 最低值出现在 11 月, 最高值出现在 8 月。从季节分布看,

两个区域生物密度均表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季(图 3)。生态护坡区春季生物密度略高于库内对照区,夏、秋、冬季 3 个季节均为对照区略高于护坡区。对各月份两个区域间的生物密度进行 ANOVA 分析,结果显示均不存在显著差异($P > 0.05$),通过 LSD 多重比较发现春夏秋冬四季两个区域之间也无显著差异($P > 0.05$)。

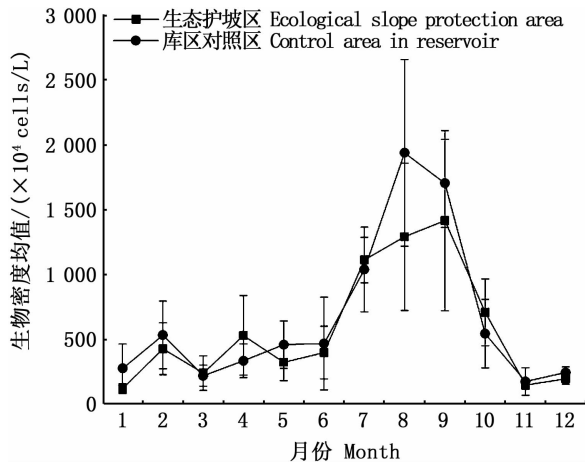


图 3 生态护坡区和库内对照区浮游植物生物密度周年变化

Fig. 3 Annual variation of phytoplankton density in ecological slope protection area and control area in reservoir

从相对生物密度来看,蓝藻门在两区域均占据绝对优势,硅藻门次之,绿藻门位列第 3,其余门类所占比例极低。生态护坡区蓝藻门生物密度占全年总生物密度的 75.82%,硅藻门占 16.12%,绿藻门占 7.74%,其余门类共占 0.30%。库内对照区蓝藻门生物密度占总生物密度的 80.54%,硅藻门占 13.99%,绿藻门占 5.32%,其余各门共占比 0.16%。两区域月份间各门类细胞密度组成及变化趋势也较为相似(图 4),总体上,硅藻门在春冬 2 季占比较大,其中在冬末(2 月份)为绝对优势门类,绿藻门在春末和冬初占比略大。蓝藻门除 2 月外,其余月份均占优势,且在夏末秋初(8、9 月份)时占比极高(90%以上)。

生态护坡区浮游植物年平均生物量为 (1.55 ± 1.03) mg/L,全年为 0.23 ~ 3.31 mg/L,最高值出现在 7 月,最低值出现在 12 月,库内对照区生物量年均值为 (1.61 ± 0.98) mg/L,范围为 0.36 ~ 3.28 mg/L,8 月最高,12 月最低(图 5)。ANOVA 分析表明各月份两区域间生物量无显著差异($P > 0.05$)。季节上,两区域生物量的差别与生物密度相似,表现为春季护坡区生物量略高于对照区,其余 3 个季节对照区略高于护坡区,但 LSD 多重比较显示春夏秋冬两个区域之间均无显著差异($P > 0.05$)。

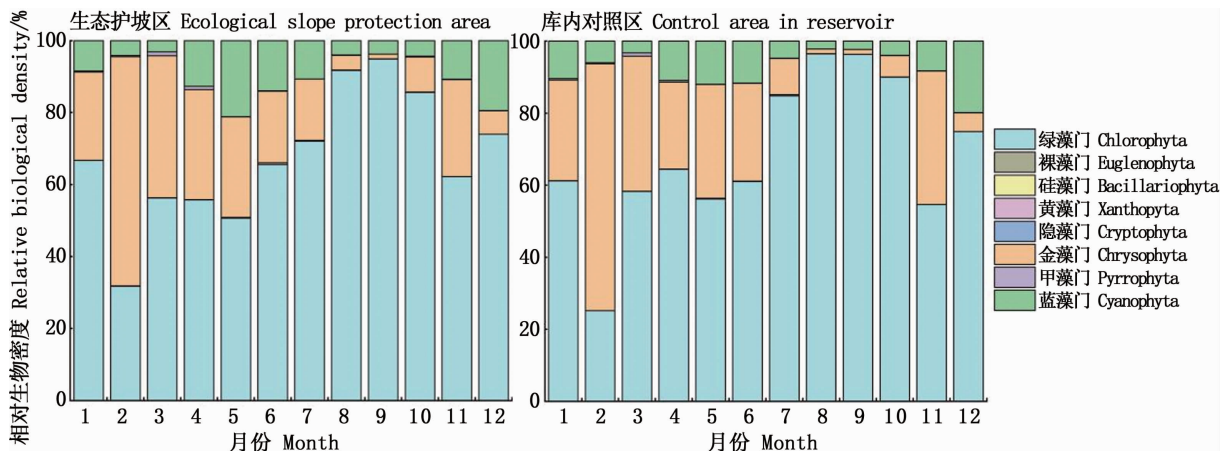


图 4 生态护坡区和库内对照区相对生物密度周年变化

Fig. 4 Annual variation of relative biological density between ecological slope protection area and control area in reservoir

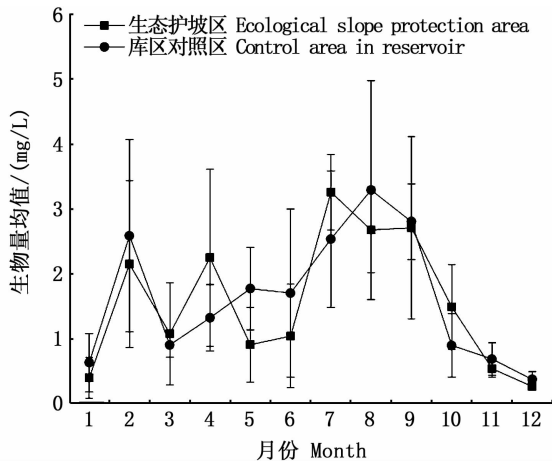


图5 生态护坡区和库内对照区生物量周年变化
 Fig.5 Annual variation of biomass in ecological slope protection area and control area in reservoir

护坡区蓝藻门生物量占全年总生物量的47.94%,硅藻门占39.87%,绿藻门占8.44%,其余门类共占3.75%;库内对照区蓝藻门生物量占总生物量的51.56%,硅藻门占41.47%,绿藻门占5.07%,余下门类共占1.90%。从全年看,两个区域浮游植物的生物量均主要由蓝藻门和硅藻门贡献,且由图6相对生物量周年变化情况可知,护坡区和对照区各月份生物量组成也无明显差别,表现为冬春、夏初和秋末(1—6月、11月)个体较大的硅藻为优势门类,夏秋季(7—10月)耐受高温的蓝藻占优势,绿藻相对生物量在冬初(12月)最大。

结合生物密度和生物量在两区域的分布来看,生态护坡的建设未能起到显著降低水体浮游植物的现存量、改变其群落结构的作用。

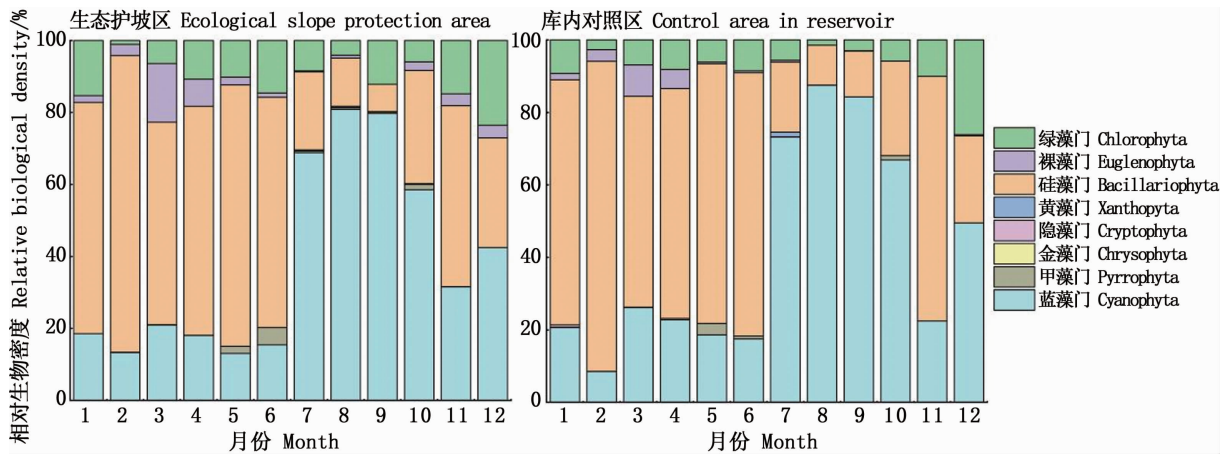


图6 生态护坡区和库内对照区相对生物量周年变化
 Fig.6 Annual variation of relative biomass in ecological slope protection area and control area in reservoir

2.2.4 浮游植物多样性指数

如图7所示,Shannon-Wiener多样性指数(H')生态护坡区周年变化范围为1.45~2.57,年均值为 2.06 ± 0.33 ;库内对照区范围为1.32~2.45,年均值为 1.93 ± 0.26 。Pielou均匀度指数(J)护坡区周年变化范围为0.42~0.68,年均值为 0.56 ± 0.06 ;对照区范围为0.35~0.65,年均值为 0.53 ± 0.06 。Margale丰富度指数(D)护坡区年均值为 2.72 ± 0.46 ,范围为1.74~3.34,对

照区年均值为 2.51 ± 0.41 ,范围为1.77~3.01。

3种多样性指数均仅呈现出夏秋季(7—10月)生态护坡区高于库内对照区,其余月份高低交错的共同特征。方差分析表明全年两区域间 H' ($F_{H'} = 0.793, P > 0.05$)、 J ($F_J = 0.522, P > 0.05$)、 D ($F_D = 1.426, P > 0.05$)均无显著性差异,故生态护坡的存在也未能显著提高水体浮游植物群落的多样性。

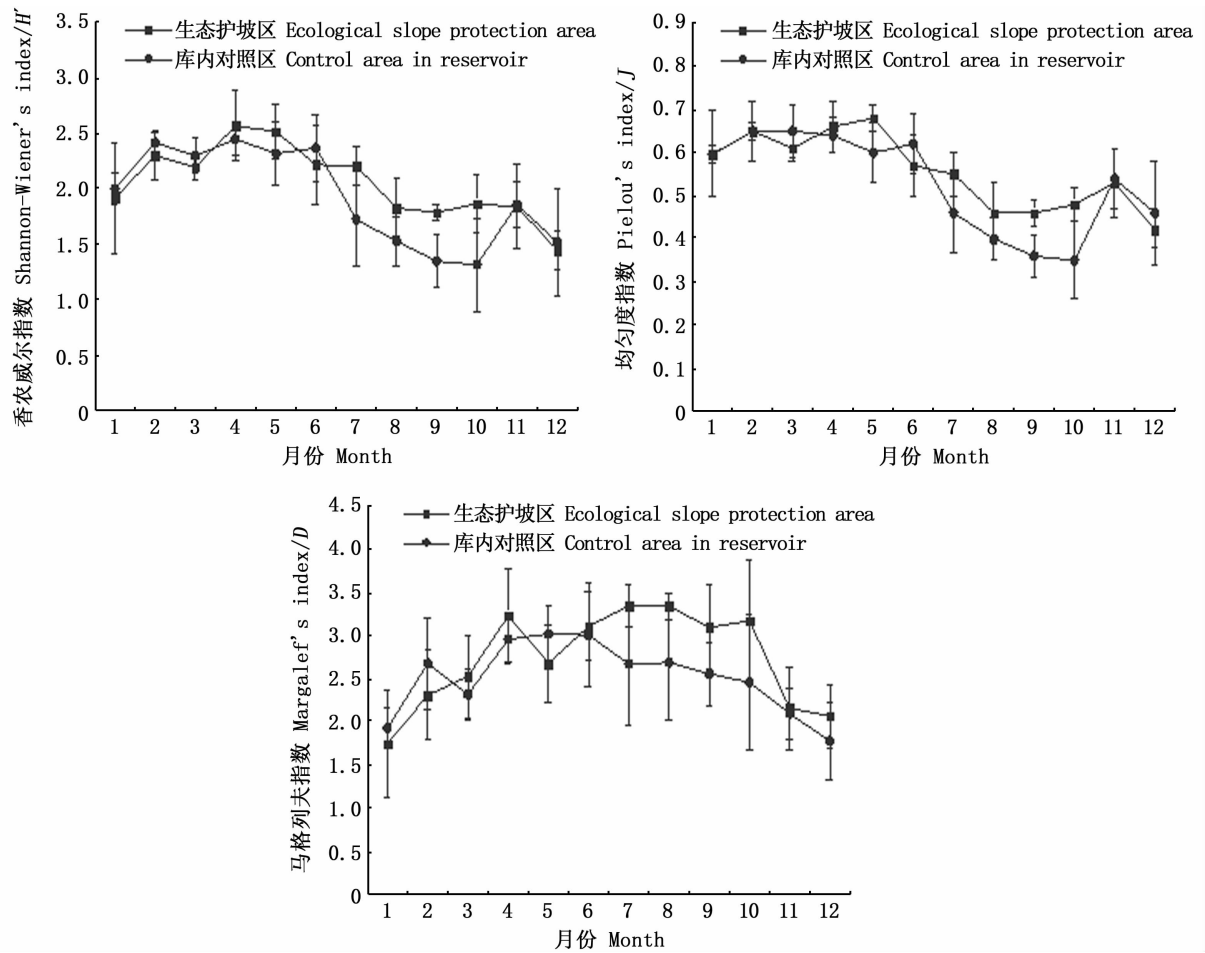


图7 生态护坡区和库内对照区3种多样性指数周年变化

Fig.7 Annual variation of three diversity indices in ecological slope protection area and control area in reservoir

2.2.5 浮游植物群落结构的 PCOA 分析

通过 PCOA 对该水库生态护坡区和库内对照区浮游植物群落 β 多样性进行比较(图8),选取全年所有物种的密度数据基于 Jaccard 矩阵距离进行排序,总解释率为 53.83%,降维后生态护坡区的中心坐标为(-0.012,0.006),库内对照区的中心坐标为(0.012,-0.006),两区域中心距离很近。同时对两区域浮游植物群落 Jaccard 排序距离进行 ANOVA 分析。结果表明,生态护坡区与库内对照区浮游植物群落结构无显著性差异($P>0.05$)。

整体来看,2018 年青草沙水库的生态护坡基本未对水体浮游植物群落结构造成影响。

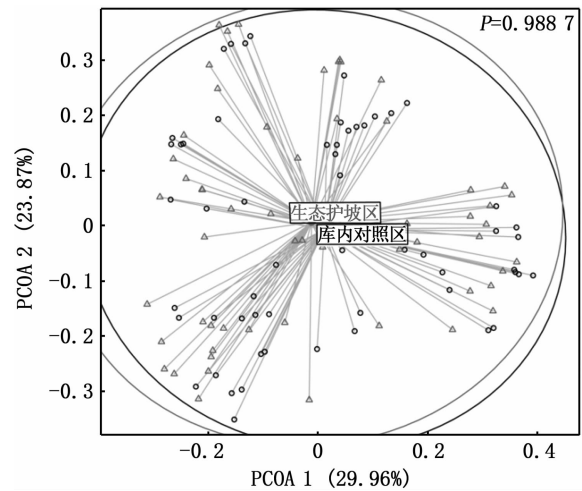


图8 生态护坡区和库内对照区浮游植物群落 PCOA 分析

Fig.8 PCOA analysis of phytoplankton communities in ecological slope protection area and control area in reservoir

3 讨论

在水生态系统中,沉水植物和浮游植物同为重要的初级生产者,二者在一些可利用资源的摄取上是竞争关系。与浮游植物相比,沉水植物个体大且生命周期长的优点使其在争夺生存空间、光照,吸收营养盐等方面具有绝对优势,直接抑制浮游植物的生长^[21]。此外,沉水植物还可通过向水中持续分泌不利于藻类生长的化感物质以及提高覆盖区内以藻类为食的浮游动物数量间接抑制浮游植物的生长^[22]。因此,沉水植物对浮游植物群落的影响非常之大,其一旦形成较大的密度就能够显著降低水体中浮游藻类的现存量、提高多样性并改变藻类群落结构^[23]。刘巧等^[24]通过对杭州湾生态修复区与非修复区浮游植物进行周年调查比较,结果表明两个区域的浮游植物种类为中等不相似。陈亮^[25]研究惠州西湖浮游植物群落对生态系统修复的响应发现示范区与平湖优势种差异很大,平湖全年大部分时间为蓝藻,而示范区则为隐藻、硅藻和甲藻门的物种,示范区年均多样性、均匀度、丰富度指数显著高于平湖。胡莲^[26]在对比云龙湖水库沉水植物围隔区和大库水体浮游植物群落时发现,沉水植物的旺盛生长显著抑制了浮游藻类的生物密度和生物量,降低了暴发水华的风险。王振方等^[27]研究发现异龙湖沉水植物覆盖率较大的西区和修复示范区的浮游植物群落结构均与东区具有极显著差异。

但是,上海青草沙水库生态护坡区和库内对照区的浮游植物物种为中度相似,各季节优势种类基本相同,浮游植物现存量和生物多样性差异并不显著,PCOA 分析也表明整体上生态护坡区和库内对照区的浮游植物群落结构无显著差异。综合而言,2018 年该水库生态护坡对水体浮游植物群落结构基本未造成影响。为什么青草沙水库的生态护坡未取得其他水域中相同的抑制藻类的效果呢?可能是生态护坡区的沉水植物生长状态不佳,与浮游植物竞争不占优势所致。沉水植物是植株体全部没于水下营固着生存的大型水生植物,其生长受到一定条件的限制,风浪过大的环境不利于沉水植物的定植^[28]。与湖泊河流相对稳定的静水环境相比,青草沙水库位于长江入海口,常年受到季风和海陆风的强烈影

响^[29],岸边风浪大,水体波动大,护坡区的沉水植物在不断被冲刷的过程中容易随浪飘走。此外,水库进水闸门全年处于打开状态,水体流动性较大,平均流速可达 0.184 m/s^[30]。有研究^[31]表明,当水体流速 > 0.1 m/s 时,沉水植物的生长就会受到限制、生物量较低^[31]。因此,受风浪和水流的影响,实际情况下生态护坡区的很多沉水植物没有存活,覆盖率非常低,在与藻类竞争中不占优势,不足以对浮游植物群落产生足够的影响。这可能是本研究中生态护坡区与库内对照区相比浮游植物群落结构没有差异、未得到改善的主要原因。

本研究还发现个别优势种在两区域季节上的分布略微不同,如微小色球藻 (*Chroococcus sminutus*) 仅在生态护坡区冬季为优势种,而在库内对照区的春、夏、冬 3 季均为优势种。李绍炳^[31]通过培养实验指出微小色球藻最适生长的 pH 范围为 7.1 ~ 8.1,2018 年春季对照区 pH 为 8.06,相比护坡区 (pH = 8.33) 更适合微小色球藻的生长;夏季库内对照区 TN 为 1.69 mg/L,护坡区 TN 为 1.47 mg/L,微小色球藻隶属于蓝藻门,更喜欢在营养水平较高的水环境中生存,因此其在库内对照区春夏季也为优势种。链形小环藻 (*Cyclotella acus*) 在对照区春冬季为优势种,而在护坡区春、夏、冬 3 季是优势种,张鑫等^[32]研究表明,链形小环藻具有较强的 N 亲和性,在 N 营养相对缺乏的情况下,对资源的竞争能力更强,故在 TN 含量相对较低的夏季护坡区成为了优势种。

总的来说,在自然环境下青草沙水库生态护坡区的沉水植物大量缺失,导致其未能改变水体浮游植物群落结构。在这类风浪大、流速快的大型过水性水库,建议将抗风浪强的植物种植在定植毯上,并使用配重块将定植毯沉于水底^[31,33],以达到抗冲刷、提高沉水植物存活率的目的,实现更好的修复效果。

参考文献:

- [1] 曹毅,李丽,陈丽平,等.上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征[J].上海海洋大学学报,2020,29(5):734-745.
- CAO Y, LI L, CHEN L P, et al. Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around city of Shanghai, China[J]. Journal of

- Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 734-745.
- [2] SONG S Q, SUN J, LUAN Q S, et al. Size-fractionated phytoplankton biomass in autumn of the Changjiang (Yangtze) River estuary and its adjacent waters after the Three Gorges Dam construction [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(3): 268-275.
- [3] 张家路, 王银平, 蔺丹清, 等. 安庆新洲水域浮游植物群落结构特征[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 680-688.
- ZHANG J L, WANG Y P, LIN D Q, et al. Characteristics of community structure of phytoplankton of Xinzhou waters in Anqing[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(5): 680-688.
- [4] MARÍA-JOSÉ V, ROMO S. Phytoplankton changes in a shallow mediterranean lake (Albufera of Valencia, Spain) after sewage diversion [J]. Hydrobiologia, 2003, 506(1/3): 281-287.
- [5] ZHOU Y W, ZHOU X H, HAN R M, et al. Reproduction capacity of *Potamogeton crispus* fragments and its role in water purification and algae inhibition in eutrophic lakes [J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 1421-1428.
- [6] 孔宇, 王子杰, 闵辰琦, 等. 生态护坡植物在河道水质净化中的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(5): 1233-1236, 1241.
- KONG Y, WANG Z J, MIN C Q, et al. Research progress of ecological slope protection plants in river water purification [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(5): 1233-1236, 1241.
- [7] 姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 971-978.
- YAO Y, HE F, HU S H, et al. Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 971-978.
- [8] 马婕, 申利亚, 何培民, 等. 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(1): 103-112.
- MA J, SHEN L Y, HE P M, et al. Succession characteristics and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in river courses in the urban area of Suzhou City [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(1): 103-112.
- [9] 董淮晋, 何连生, 黄彩红, 等. 利用轮藻和金鱼藻组合治理白洋淀富营养化水体研究[J]. 湿地科学, 2013, 11(4): 505-509.
- DONG H J, HE L S, HUANG C H, et al. Using Submersed Plants *Chara* sp. and *Ceratophyllum demersum* to Control Eutrophication in Baiyangdian Lake [J]. Wetland Science, 2013, 11(4): 505-509.
- [10] FERREIRA T F, CROSSETTI L O, MARQUES D M L M, et al. The structuring role of submerged macrophytes in a large subtropical shallow lake: clear effects on water chemistry and phytoplankton structure community along a vegetated-pelagic gradient [J]. Limnologia, 2018, 69: 142-154.
- [11] 黄小龙, 郭艳敏, 万斌, 等. 沉水植物恢复对城市富营养化湖泊生态环境影响[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 17-21.
- HUANG X L, GUO Y M, WAN B, et al. Effect of submerged macrophytes restoration on the ecological environment of urban eutrophic lake [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(7): 17-21.
- [12] 吴晓敏. 青草沙水库北堤水生态修复策略与范围分析 [J]. 净水技术, 2018, 37(S1): 4-7, 13.
- WU X M. Water ecological restoration strategy and range analysis of north dam of Qingcaosha reservoir [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(S1): 4-7, 13.
- [13] 水利部水文局, 长江流域水环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- DENG J. Atlas of common algae in inland waters of China [M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2012.
- [14] 胡鸿钧. 中国淡水藻类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- HU H J. Freshwater algae in China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980.
- [15] 王全喜, 曹建国, 刘妍, 等. 上海九段沙湿地自然保护区及其附近水域藻类图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- WANG Q X, CAO J G, LIU Y, et al. Atlas of algae in Shanghai Jiuduansha wetland nature reserve and its adjacent waters [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] 崇璘璇, 刘儒汗, 尹丽平, 等. 网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(2): 237-246.
- CHONG L X, LIU R H, YIN L P, et al. Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(2): 237-246.
- [17] CARLSON R E. A trophic state index for lakes [J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369.
- [18] SHANNON C E, WEAVER W, WIENER N. The mathematical theory of communication [M]. The University of Illinois Press, 1949.
- [19] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology [J]. 2011, 24(2): 7-12.
- [20] MARGALEF D R. Information theory in ecology [J]. General System, 1958, 3(1): 36-71.
- [21] 张盛斌. 针对城区河道的生态护坡技术研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- ZHANG S B. Study on the technology of ecological slope for urban river [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
- [22] 郭雅倩, 薛建辉, 吴永波, 等. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展 [J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(3): 58-68.
- GUO Y Q, XUE J H, WU Y B, et al. Research progress on

- purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(3): 58-68.
- [23] 高海龙. 富营养化浅水湖泊沉水植物恢复研究[D]. 南京:南京大学, 2017.
- GAO H L. Research on the recovery of the submerged macrophyte in eutrophicated shallow lakes [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [24] 刘巧, 刘萌萌, 杨娜, 等. 杭州湾生物修复区与非修复区浮游植物群落结构比较[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 412-419.
- LIU Q, LIU M M, YANG N, et al. Comparative analysis of phytoplankton community structure in bioremediation area and non-remediation area of Hangzhou Bay [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 412-419.
- [25] 陈亮. 惠州西湖浮游植物群落结构特征及其对生态系统修复的响应[D]. 广州:暨南大学, 2010.
- CHEN L. Phytoplankton community structures and their response to ecosystem restoration in Huizhou West Lake, a tropical lake in southern China [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010.
- [26] 胡莲. 云龙湖水库沉水植物的恢复及净化效能原位围隔试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2006.
- HU L. In situ enclosure experiment for recovery and purification ability of the submerged plants in Yunlonghu reservoir [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [27] 王振方, 张玮, 杨丽, 等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2249-2257.
- WANG Z F, ZHANG W, YANG L, et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan province, China [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2249-2257.
- [28] 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.
- [29] 江成. 水体扰动对藻生长机制与 QCS 水库富营养化控制的影响研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- JIANG C. Effect of water turbulence on the algal growth mechanism and eutrophication control in QCS reservoir [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [30] 姚东方. 长江口芦苇生态浮床对浮游生物及鱼类群落结构的影响[D]. 上海:上海海洋大学, 2014.
- YAO D F. The effects of the artificial floating beds on the community structure of plankton and fish in the Yangtze estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [31] 李绍炳. 微小色球藻的生态因子及优化培养条件的初步研究[D]. 湛江:广东海洋大学, 2012.
- LI S B. Ecological factors and culture optimization of *Chroococcus minutus* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012.
- [32] 张鑫, 易齐涛, 谢凯, 等. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物优势种的营养动力学[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 713-722.
- ZHANG X, YI Q T, XIE K, et al. Nutrient kinetics of dominant species of phytoplankton in the artificial lakes formed from land subsidence by mining activities in the Huainan coalmine subsidence areas [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3): 713-722.
- [33] 楼春华, 战楠, 夏妍, 等. 一种模块式沉水植物定植毯及其安装方法; CN110668577A [P]. 2020-01-10.
- LOU C H, ZHAN N, XIA Y, et al. Modular submerged plant field planting blanket and installation method thereof; CN110668577A [P]. 2020-01-10.

Phytoplankton community structure of ecological slope protection area of Shanghai Qingcaosha reservoir

SHEN Liya^{1,2}, ZHAO Dan^{1,2}, MA Jie^{1,2}, NIU Wenhui^{1,2}, CHEN Lijing^{1,2}

(1. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Universities Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In 2017, a large reservoir named Qingcaosha in Shanghai built an ecological slope protection. In order to explore its impact on the structure of the phytoplankton community, a monthly survey and comparison study of the phytoplankton community in the ecological slope protection area of the reservoir and the control area in the reservoir was carried out in 2018. A total of 201 species of phytoplankton in the ecological slope protection area and 194 species in the control area in the reservoir were identified. The species in the two regions were moderately similar, and the species composition was both Chlorophyta-Bacillariophyta-Cyanophytatype. The dominant species in the ecological slope protection area and the control area of the reservoir mainly belonged to Chlorophyta and Bacillariophyta, which were basically the same. The dominant species with a high degree of dominance were *Aphanocapsa* sp. , *Pseudanabaena limnetica*, and *Cyclotella* sp. and *Aulacoseira ambigua*. The annual mean biological density and biomass of the community at ecological slope protection area were $(578.46 \pm 455.30) \times 10^4$ cells/L and (1.55 ± 1.03) mg/L, respectively, and those of the control area in the reservoir were respectively $(663.46 \pm 588.67) \times 10^4$ cells/L and (1.61 ± 0.98) mg/L. There was no significant difference in phytoplankton stock between the two areas ($P > 0.05$). The PCOA analysis of the principal coordinates showed that there was no significant difference in phytoplankton community structure between the ecological slope protection area and the control area in the reservoir ($P > 0.05$). The above results all demonstrate that the construction of the ecological slope protection has little impact on the phytoplankton community of the reservoir.

Key words: ecological slope protection; phytoplankton; community structure; submerged plant