

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20231214002

李喆, 唐富江, 刘欣, 等. 连环湖大银鱼稳产水域中的浮游植物群落特征及水质状况[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(2): 242-251

Li Z, Tang F J, Liu X, et al. Characteristics of phytoplankton communities and water quality in waters with stable yield of *Protosalanx chinensis* in Lake Lianhuan [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(2): 242-251 (in Chinese)

# 连环湖大银鱼稳产水域中的浮游植物群落特征及水质状况

李喆<sup>1</sup>, 唐富江<sup>1,\*</sup>, 刘欣<sup>2,#</sup>, 陈昕<sup>1</sup>, 王永康<sup>1</sup>, 李旭阳<sup>1</sup>

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 农业农村部黑龙江流域渔业资源环境科学观测实验站, 哈尔滨 150070

2. 北京市农林科学院生物技术研究所, 北京 100097

收稿日期: 2023-12-14 录用日期: 2023-12-25

**摘要:** 于2018年6月—2019年4月对连环湖大银鱼稳产水域阿木塔和牙门气湖区浮游植物群落特征及水质状况进行了调查研究。结果显示, 浮游植物8门120种, 密度和生物量的平均值分别为  $372.83 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.8043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。大银鱼生长(明水期)和繁殖孵化时期(冰封期)浮游植物群落特征不同, 综合分析呈现以绿藻为优势的群落特征。综合3个多样性指数的结果表明, 在明水期, 浮游植物的多样性较高; 在冰封期, 其分布更为均匀。根据3个多样性指数和评价标准, 显示大银鱼高产稳产水域水质在寡污型至 $\alpha$ -中污型之间。

**关键词:** 大银鱼; 高产稳产; 浮游植物; 水质

文章编号: 1673-5897(2024)2-242-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Characteristics of Phytoplankton Communities and Water Quality in Waters with Stable Yield of *Protosalanx chinensis* in Lake Lianhuan

Li Zhe<sup>1</sup>, Tang Fujiang<sup>1,\*</sup>, Liu Xin<sup>2,#</sup>, Chen Xin<sup>1</sup>, Wang Yongkang<sup>1</sup>, Li Xuyang<sup>1</sup>

1. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in Heilongjiang River Basin, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150070, China

2. Institute of Biotechnology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

Received 14 December 2023 accepted 25 December 2023

**Abstract:** From June 2018 to April 2019, the characteristics of phytoplankton communities and water quality were investigated in waters of Lake Lianhuan with stable yield of *Protosalanx chinensis*. The results showed that there were 120 species (including undetermined species) of phytoplankton, belonging to 8 Phyla. The means of density and biomass were  $372.83 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $2.8043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  respectively. The characteristic of phytoplankton communities during the period of *P. chinensis* growth (open water period), breeding and hatching (frozen period) were different, and the comprehensive analysis showed the community dominated by Chlorophyta. Three diversity indi-

基金项目: 农业农村部政府购买服务项目(13220166, 13230162); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2020TD07, 2023TD07)

第一作者: 李喆(1983—), 女, 博士研究生, 研究方向为水生生物生态学, E-mail: lizhe@hrfri.ac.cn

\* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: rivery2008@163.com

# 共同通信作者 (Co-corresponding author), E-mail: liuxiniocas@hotmail.com

ces showed that phytoplankton diversity was higher in the open water period while higher evenness was found in the frozen period. According to the evaluation criteria, the three diversity indices showed that the water quality of watery supporting high and stable yield of *P. chinensis* ranged from os to  $\alpha$ -ms.

**Keywords:** *Protosalanx chinensis*; high and stable yield; phytoplankton; water quality

20 世纪 90 年代以前,连环湖主养鱼类为“四大家鱼”,为响应国家号召和提高渔业资源利用效益,于 1995 投放大银鱼受精卵进行移植增殖示范<sup>[1]</sup>。开启了我高寒地区大银鱼移植工作的先河。目前,大银鱼已成为我国北方地区广泛成功移植的鱼类,创造了巨大的经济效益,但大银鱼种群数量波动剧烈、产量忽高忽低的问题一直困扰着产业的发展。位于“中国大银鱼第一县”的连环湖阿木塔湖和牙门喜湖区已连续多年实现稳产高产,成为大银鱼增殖稳产高产的典范。

浮游植物是水生态系统的微型初级生产者,对水质变化十分敏感,常常用来评价水质状况<sup>[2]</sup>。浮游植物也是鱼类直接和间接的饵料生物资源,对渔业生产至关重要。大银鱼为一年生小型鱼类,在早期阶段以浮游植物和小型浮游动物为饵料,逐渐转变为大型浮游动物和小型鱼虾等<sup>[3-4]</sup>。因此,大银鱼在生活史周期中直接和间接地通过下行效应影响着水体中浮游植物的群落结构。

阿木塔和牙门喜湖区地处连环湖下游,在科学的管理下,连续 5 年实现了大银鱼持续高产稳产。为揭示维持大银鱼稳产高产的条件和机理,项目组以该水域生态系统和大银鱼种群为研究对象,进行了调查研究。现将该湖区的浮游植物群落特征相关研究进行报道,为掌握大银鱼高产稳产水域浮游植物的群落特征以及水质状况积累资料。

## 1 材料与方 法 (Materials and methods)

### 1.1 调查水域概况 (Survey water profile)

连环湖(46°30' N ~ 46°50' N, 123°59' E ~ 124°15' E)是松嫩平原上的大型湖泊,位于黑龙江省杜尔伯特蒙古族自治县西部。该湖由 18 个湖区、九河沟和六河沟组成,因湖泊以河流相连,形似连环,得名连环湖。湖水微弱碱性,水中含丰富的矿物质和微量元素。连环湖属于温带大陆性半湿润季风气候,1 月平均气温为 -19.5 °C,7 月平均气温为 23.4 °C;6—8 月降水量占年降水量的 70%;年均风速为 5.4 m·s<sup>-1</sup>,大风天气集中出现在 4 月和 5 月<sup>[5]</sup>。本研究以连环湖中的阿木塔和牙门喜湖区为调查水域。湖泊平均水深为 3.0 m,养殖水域面积约为

6 667 hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。

### 1.2 采样点设置 (Sampling site setting)

在阿木塔和牙门喜湖区,共设置了 8 个采样点(图 1)。其中,在阿木塔湖区设置 5 个采样点(S1 ~ S5),在牙门喜湖区设置 3 个采样点(S6 ~ S8)。

### 1.3 样本采集与处理 (Sample collection and processing)

参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》<sup>[6]</sup>中的浮游植物样品采集和处理方法,分别于 2018 年 6—9 月逐月采集,12 月至次年的 4 月每 2 个月采集 1 次,共采集浮游植物 7 频次。其中,在 6—9 月以及次年 4 月采集的是明水期样品;在 12 月—次年 2 月采集的是冰封期样品。在每个频次的采样日,均采集了 16 份定性和定量浮游植物样品。浮游植物定量样本的获得是采集表层、底层混合水样 1 L,经 25#浮游生物网过滤收集,定性样本用 25#浮游生物网挂于船上,“∞”字形拖拽获得,定量和定性样本均现场用鲁哥式液固定保存,带回实验室。7 频次共采集浮游植物样品 112 份。

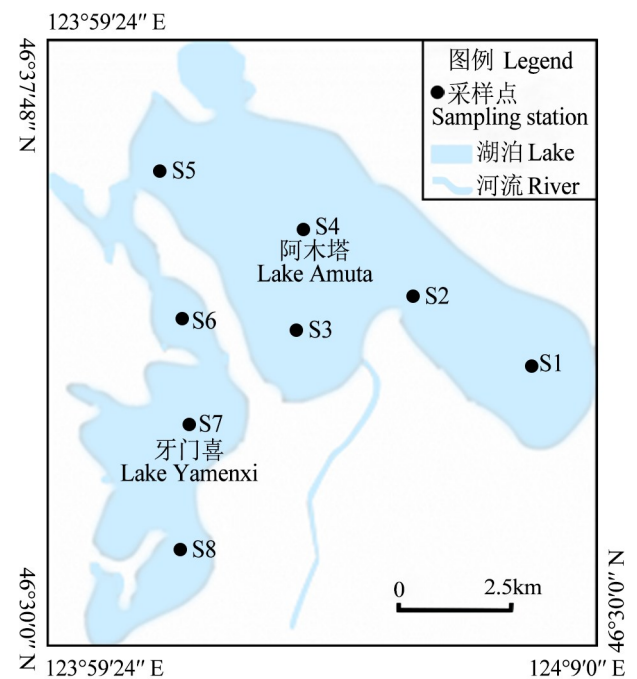


图 1 研究湖区和采样点分布图

Fig. 1 Map of study area and sampling stations

#### 1.4 数据分析(Data analysis)

浮游植物样本经过沉淀(48 h)、浓缩(48 h)至30 mL,抽样镜检、计数后换算回1 L水中浮游植物的密度,再用浮游植物的密度和同属个体平均湿质量计算生物量<sup>[6]</sup>。优势种是根据物种的优势度来确定的。优势度的计算是物种出现频率乘以个体密度占比。当优势度的数值大于等于0.02时,即确定该物种是优势种<sup>[7]</sup>。

选择 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 种类丰富度指数<sup>[8]</sup>,分析阿木塔和牙门喜湖区中的浮游植物多样性并评价水质状况<sup>[9-11]</sup>。

## 2 结果(Results)

### 2.1 种类组成及优势种(Species composition and dominant species)

2018年6月—2019年4月共采集到浮游植物8门120种(含未定种)(表1)。在120种浮游植物中,以绿藻门、硅藻门和蓝藻门藻类为主,其物种密度合计占浮游植物总物种密度的86.67%(表2)。2018年6—12月,共采集到浮游植物8门108种,2019年2—4月,共采集到7门57种(表2)。

在阿木塔和牙门喜两湖中均有硅藻门、绿藻门、蓝藻门浮游植物(表2)。绿藻门在6—8月所占比例较高,在50%~52.54%范围内,在9月—次年2月所占比例逐渐降低,开湖后4月又有所回升。蓝藻门在2018年9月—次年2月所占比例较高,在21.95%~36.67%范围内,6—8月占比较为稳定,在16%~17%。开湖后4月占比相对最低。硅藻门种类在6—9月占总物种数比例相对稳定,在23.17%~27.5%范围内。12月占比较低,次年2月至开湖硅藻比例在上升,开湖4月的占比最高,达42.59%。

浮游植物的优势种以绿藻门、蓝藻门、硅藻门的物种为主,有机物质丰富的小型水体常见种蛋白核小球藻在7个月均为优势种(图2)。

### 2.2 密度与生物量(Density and biomass)

阿木塔和牙门喜湖区的水体中浮游植物密度和生物量的平均值分别为  $372.83 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.8043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表3)。其中,绿藻门浮游植物的密度占浮游植物总密度的比例最大,73.61%;绿藻门和蓝藻门浮游植物的生物量占浮游植物总生物量的比例较大,分别为36.94%和33.62%,硅藻门次之,26.81%。6—9月,浮游植物总的密度和生物量都逐月增大,12月骤减,2月最低,次年4月开湖浮

表1 2018年6月—2019年4月阿木塔和牙门喜湖区浮游植物名录

Table 1 List of phytoplankton in Lake Amuta and Lake Yamenxi from June in 2018 to April in 2019

	门/物种名称 Phylum/species name	优势种类缩写名称 Dominant species abbreviation name
(一)	绿藻门 Chlorophyta	
1	柱状栅藻 <i>Scenedes musbijuga</i>	SM
2	四尾栅藻 <i>Scenedes musquadricauda</i>	SMM
3	齿牙栅藻 <i>Scenedes musdenticulatus</i>	
4	尖细栅藻 <i>Scenedes musacuminatus</i>	
5	弯曲栅藻 <i>Scenedes musarcuratus</i>	
6	栅藻 <i>Scenedes</i> sp.	
7	小球衣藻 <i>Chlamydomonas microsphaera</i>	
8	艾氏衣藻 <i>Chlamydomonas ehrenbergii</i>	
9	短鼓藻 <i>Cosmarium abbreviatum</i>	CAB
10	扁鼓藻 <i>Cosmarium depressum</i>	
11	鼻形鼓藻 <i>Cosmarium nastutum</i>	
12	宽带鼓藻 <i>Pleurotaenium coronatum</i>	
13	近膨胀鼓藻 <i>Cosmarium subtumidum</i>	
14	普通小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	CV
15	椭圆小球藻 <i>Chlorella ellipsoidea</i>	CE
16	蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	CP
17	具尾四角藻 <i>Tetraëdron caudatum</i>	
18	膨胀四角藻 <i>Tetraëdron tumidulum</i>	TT
19	三叶四角藻 <i>Tetraëdron trilobulatum</i>	
20	三角四角藻小形变种 <i>Tetraëdron trigonum</i> var. <i>gracile</i>	
21	短棘盘星藻 <i>Pediastrum boryanum</i>	
22	二角盘星藻纤细变种 <i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>	
23	四角盘星藻四齿变种 <i>Pediastrum tetras</i> var. <i>tetraadon</i>	
24	四角十字藻 <i>Crucigenia puadrata</i>	CPU
25	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	CT
26	卷曲纤维藻 <i>Ankistrodesmus convolutes</i>	
27	针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	
28	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	
29	镰形纤维藻奇异变种 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>	
30	单棘四星藻 <i>Tetrastrum hastiferum</i>	
31	短刺四星藻 <i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>	
32	异刺四星藻 <i>Tetrastrum heterocanthum</i>	
33	纤细新月藻 <i>Closterium gracile</i>	
34	新月藻 <i>Closterium</i> sp.	
35	纤细角星鼓藻 <i>Staurastrum gracile</i>	
36	丝藻 <i>Ulothrix</i> sp.	US
37	胶球藻 <i>Gloecapsa</i> sp.	
38	浮球藻 <i>Planktosphaeria gelatinosa</i>	PG
39	球囊藻 <i>Sphaerocystis schroeteri</i>	
40	月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp.	

续表1

	门/物种名称 Phylum/species name	优势种类缩写名称 Dominant species abbreviation name
41	蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i>	
42	韦氏藻 <i>Westella botryoides</i>	
43	并联藻 <i>Quadrigula chodatii</i>	
44	纺锤藻 <i>Elakatothrix gelatinosa</i>	
45	小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>	
46	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i>	OL
47	四刺顶棘藻 <i>Chodatella subsalsa</i>	
48	螺旋弓形藻 <i>Schroederia spiralis</i>	
(二)	蓝藻门 Cyanophyta	
49	小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	OT
50	巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>	
51	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	OS
52	卷曲鱼腥藻 <i>Anabaena circinalis</i>	
53	类颤藻鱼腥藻 <i>Anabaena oscillarioides</i>	AO
54	优美平裂藻 <i>Merismopedia elegans</i>	
55	点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	
56	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	CM
57	小色球藻 <i>Chroococcus minor</i>	
58	束缚色球藻 <i>Chroococcus tenax</i>	
59	针状蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis acicularis</i>	
60	不整齐蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis irregularis</i>	DI
61	针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis raphidioides</i>	DRH
62	针晶蓝纤维藻镰刀型 <i>Dactylococcopsis raphidioides</i> f. <i>falciformis</i>	DR
63	小席藻 <i>Phormidium tenue</i>	
64	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	
65	黏杆藻 <i>Gloeothece</i> sp.	
66	黏球藻 <i>Gloeo capsula</i> sp.	
67	不定腔球藻 <i>Coelosphaerium dubium</i>	
68	胶壁异球藻 <i>Xenococcus kernerii</i>	
69	湖生束球藻 <i>Gomposphaeria lacustris</i>	
(三)	硅藻门 Bacillariophyta	
70	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	CPL
71	扁圆卵形藻多孔变种 <i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	
72	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	SA
73	近缘针杆藻 <i>Synedra affinis</i>	
74	偏凸针杆藻 <i>Synedra vaucheriae</i>	
75	肘状针杆藻窄变种 <i>Synedra ulna</i> var. <i>contracta</i>	
76	扭曲小环藻 <i>Cyclotella comta</i>	CC
77	具星小环藻 <i>Cyclotella stelligera</i>	
78	钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	
79	短线脆杆藻 <i>Fragilaria brevistriata</i>	
80	螺旋颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>	
81	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	
82	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	

续表1

	门/物种名称 Phylum/species name	优势种类缩写名称 Dominant species abbreviation name
83	颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	MG
84	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	
85	小头舟形藻 <i>Navicula capitata</i>	
86	喙头舟形藻 <i>Navicula rhynchocephala</i>	
87	罗泰舟形藻 <i>Navicula rotacana</i>	
88	椭圆舟形藻 <i>Navicula sclonfelli</i>	
89	瞳孔舟形藻矩形变种 <i>Navicula pupula</i> var. <i>rectangularis</i>	
90	膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>	
91	箱形桥弯藻 <i>Cymbella cistula</i>	
92	胡斯特桥弯藻 <i>Cymbella hustedtii</i>	
93	卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>	
94	粗壮双菱藻 <i>Surirella robusta</i>	
95	卵形双菱藻 <i>Surirella ovata</i>	
96	微细异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i>	
97	微细异极藻近椭圆变种 <i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>subelliptica</i>	
98	中间异极藻矮小变种 <i>Gomphonema intricatum</i> var. <i>pumila</i>	
99	细布纹藻 <i>Gyrosigma kützingii</i>	
100	尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>	
101	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	
102	弯形弯楔藻 <i>Rhoicosphenia curvata</i>	
103	美丽双壁藻 <i>Diploneis purilla</i>	
104	窗纹藻 <i>Epithemia</i> sp.	
(四)	隐藻门 Cryptophyta	
105	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	
106	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	CA
(五)	裸藻门 Euglenophyta	
107	颤动扁裸藻 <i>Phacus oscillans</i>	
108	圆柱扁裸藻 <i>Phacus cylindrus</i>	
109	梨形扁裸藻 <i>Phacus pyrum</i>	
110	粒形扁裸藻 <i>Phacus granum</i>	
111	曲尾扁裸藻 <i>Phacus lismorensis</i>	
112	扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.	
113	膝曲裸藻 <i>Euglena geniculata</i>	
114	梭裸藻 <i>Euglena acus</i>	
115	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	
116	颗粒囊裸藻 <i>Trachelomonas granulata</i>	
(六)	黄藻门 Xanthophyta	
117	膝口藻 <i>Gonyostomum</i> sp.	
(七)	金藻门 Chrysophyta	
118	变形棕鞭藻 <i>Ochromonas vallesiace</i>	
119	分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>	
(八)	甲藻门 Pyrrophyta	
120	光甲藻 <i>Glenodinium</i> sp.	

表2 2018年6月—2019年4月阿木塔和牙门喜湖区浮游植物种类分布  
Table 2 Composition and numbers of phytoplankton species in Lake Amuta and Lake Yamenxi from June 2018 to April 2019

调查年 (月) Survey year (month)	物种数 (占该月总物种数的比例/%) Species number (proportion of the total number of species in the month/%)								总物种数 Total species number
	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	硅藻门 Bacillariophyta	隐藻门 Cryptophyta	裸藻门 Euglenophyta	黄藻门 Xanthophyta	金藻门 Chrysophyta	甲藻门 Pyrrophyta	
2018(06)	20(50)	7(17.5)	11(27.5)	0	1(2.5)	1(2.5)	0	0	40
2018(07)	28(50.91)	9(16.36)	14(25.45)	0	3(5.45)	0	0	1(1.82)	55
2018(08)	31(52.54)	10(16.95)	15(25.42)	0	3(5.08)	0	0	0	59
2018(09)	38(46.34)	18(21.95)	19(23.17)	2(2.44)	5(6.1)	0	0	0	82
2018(12)	11(36.67)	11(36.67)	3(10)	2(6.67)	1(3.33)	0	1(3.33)	1(3.33)	30
2019(02)	2(16.67)	4(33.33)	3(25)	2(16.67)	0	0	1(8.33)	0	12
2019(04)	20(37.04)	6(11.11)	23(42.59)	1(1.85)	2(3.7)	0	1(1.85)	1(1.85)	54
总物种密度 Total species number	48(40)	21(17.5)	35(29.17)	2(1.67)	10(8.33)	1(0.83)	2(1.67)	1(0.83)	120
2018(06—12)	45(41.67)	21(19.44)	28(25.93)	2(1.85)	9(8.33)	1(0.93)	1(0.93)	1(0.93)	108
2019(02—04)	20(35.09)	8(14.04)	23(40.35)	2(3.51)	2(3.51)	0	1(1.75)	1(1.75)	57

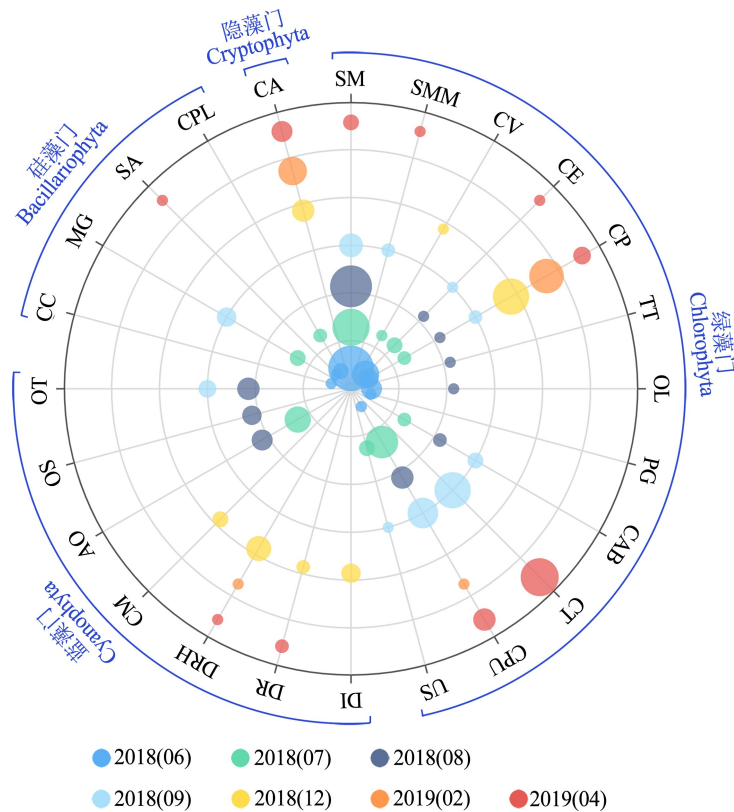


图2 2018年6月—2019年4月阿木塔和牙门喜湖区浮游植物优势种及其优势度  
注: SM ~ CA 均为优势种类的缩写, 具体代表优势种类名称见表1。

Fig. 2 Dominant species and dominance of phytoplankton in Lake Amuta and Lake Yamenxi from June in 2018 to April in 2019

Note: SM ~ CA were the abbreviations of advantage types; the specific names of advantage types were shown in Table 1.

游植物的密度和生物量都有所回升(表3)。6—9月,绿藻门浮游植物的密度和生物量都逐月增大;蓝藻门的密度和生物量在6—8月逐月增大,9月开始减少;硅藻门的密度和生物量在6—7月逐月增大,最大值在9月。绿、蓝、硅藻门浮游植物的密度和生物量均在12月骤减,次年2月最低,开湖4月时均有所回升(表3)。

### 2.3 多样性与水质评价(Diversity and water quality assessment)

由表4可知,6—9月,浮游植物群落的 Pielou 均匀度指数( $J$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 种类丰富度指数( $d$ )平均值均较为稳定,多样性较高。Pielou 均匀度指数12月升高后至次年4月冰融后逐渐减少,Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 种类丰富度指数12月开始逐渐下降,次年4月冰融后数值有所回升,与6—9月多样性相似。

综合几个多样性指数,在冰封期(12月、2月)阿木塔和牙门喜湖区水中浮游植物多样性低于明水期(6—9月以及次年4月),而浮游植物群落物种分布

的均匀程度在明水期低于冰封期。

水质评价包括生物评价方法和非生物评价方法,浮游植物多样性指数是利用生物对水质进行评价,是湖泊水质评价中常用方法<sup>[9-10]</sup>。结合  $H'$ 、 $J$ 、 $d$  对水质的评价标准(表5),综合3个多样性指数(表4、图3),阿木塔和牙门喜湖区水质类型为明水期(6—9月以及次年4月)为寡污-清洁型,12月为 $\beta$ -中污型至 $\alpha$ -中污型,2月相对最差 $\alpha$ -中污型。

### 3 讨论(Discussion)

大银鱼10月以前为幼鱼阶段,是大银鱼的主要生长期,浮游动物是其重要的饵料生物资源。在6—9月和次年4月,阿木塔和牙门喜湖区浮游植物中绿藻门的种类占总种类数的比例最高(表2)。硅藻门种类占比仅次于绿藻,在次年4月,硅藻门种类占比略高于绿藻。在浮游植物密度上,在明水期也是绿藻最高,在7月、8月蓝藻的密度仅次于绿藻,6月、9月、4月硅藻密度仅次于绿藻。在浮游植物生物量上,绿藻在6月、9月较高,7月、8月蓝藻的生物

表3 2018年6月—2019年4月阿木塔和牙门喜湖区浮游植物的密度和生物量  
Table 3 Density and biomass of phytoplankton in Lake Amuta and Lake Yamenxi from June in 2018 to April in 2019

调查年(月) Survey year (month)	密度/( $\times 10^4$ ind·L $^{-1}$ ) Density/( $\times 10^4$ ind·L $^{-1}$ )								总计/ ( $\times 10^4$ ind·L $^{-1}$ )
	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	硅藻门 Bacillariophyta	隐藻门 Cryptophyta	裸藻门 Euglenophyta	黄藻门 Xanthophyta	金藻门 Chrysophyta	甲藻门 Pyrrophyta	Total/ ( $\times 10^4$ ind·L $^{-1}$ )
2018(06)	179.78	11.92	34.2	0	0.63	1.26	0	0	227.79
2018(07)	336.97	64.63	58.67	0	1.26	0	0	0	461.53
2018(08)	392.82	154.37	32.32	0	2.2	0	0	0	581.71
2018(09)	865.01	99.15	104.48	10.67	2.51	0	0	0	1 081.82
2018(12)	28.33	39.69	15.88	7.92	0.63	0	0.63	0.31	93.39
2019(02)	4.08	1.57	0.94	2.2	0	0	0.31	0	9.1
2019(04)	114.03	12.75	17.06	10.32	0	0	0.04	0.31	154.51
调查年(月) Survey year (month)	生物量/(mg·L $^{-1}$ ) Biomass/(mg·L $^{-1}$ )								总计/ (mg·L $^{-1}$ )
	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	硅藻门 Bacillariophyta	隐藻门 Cryptophyta	裸藻门 Euglenophyta	黄藻门 Xanthophyta	金藻门 Chrysophyta	甲藻门 Pyrrophyta	Total/(mg·L $^{-1}$ )
2018(06)	0.5461	0.2116	0.513	0	0.0377	0.0628	0	0	1.3712
2018(07)	1.4189	2.1239	1.095	0	0.0628	0	0	0	4.7006
2018(08)	1.8108	2.9918	0.5735	0	0.0973	0	0	0	5.4734
2018(09)	3.2661	1.0628	2.627	0.0835	0.058	0	0	0	7.0974
2018(12)	0.0489	0.1364	0.0574	0.028	0.0215	0	0.0022	0.0143	0.3087
2019(02)	0.0027	0.0141	0.0126	0.01	0	0	0.0022	0	0.0416
2019(04)	0.1572	0.0599	0.3837	0.0229	0	0	0	0.0143	0.638

表4 2018年6月—2019年4月阿木塔和牙门喜湖区浮游植物的多样性指数  
Table 4 Diversity indices of phytoplankton in Lake Amuta and Lake Yamenxi  
from June in 2018 to April in 2019

调查年(月) Survey year (month)	$H'$			$J$			$d$		
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
2018(06)	3.84	2.94	3.26	0.87	0.65	0.79	8.69	6.14	7.35
2018(07)	4.32	1.83	3.37	0.86	0.65	0.76	11.27	3.03	8.28
2018(08)	4.1	2.59	3.62	0.91	0.68	0.79	11.28	4.25	9.1
2018(09)	4.06	3.55	3.79	0.82	0.66	0.73	13.42	9.1	12.24
2018(12)	3.63	1.79	2.69	0.95	0.84	0.89	6.59	2.55	4.44
2019(02)	2.32	0.72	1.34	1	0.72	0.95	3.64	0.91	1.89
2019(04)	3.42	2.82	3.15	0.84	0.75	0.81	9.15	5.11	6.7

表5  $H'$ 、 $J$ 、 $d$ 的评价标准<sup>[11]</sup>  
Table 5 Evaluation criteria based on  $H'$ ,  $J$  and  $d$ <sup>[11]</sup>

$H'$	水质类型 Water quality classification	$J$	水质类型 Water quality classification	$d$	水质类型 Water quality classification
>3	寡污-清洁型 os-clean	0.8 ~ 1.0	清洁型 Clean	>5	清洁型 Clean
1 ~ 3	$\beta$ -中污型 $\beta$ -ms	0.5 ~ 0.8	寡污-清洁型 os-clean	4 ~ 5	寡污型 os
0 ~ 1	$\alpha$ -中污型 $\alpha$ -ms	0.3 ~ 0.5	$\beta$ -中污型 $\beta$ -ms	3 ~ 4	$\beta$ -中污型 $\beta$ -ms
		0 ~ 0.3	$\alpha$ -中污型 $\alpha$ -ms	0 ~ 3	$\alpha$ -中污型 $\alpha$ -ms

量最高,绿藻仅次于蓝藻,在4月硅藻的生物量最高,绿藻次于硅藻。但总的来看,绿藻在明水期的总生物量(7.1991 mg·L<sup>-1</sup>)是最高的。可见,在大银鱼主要生长时期阿木塔和牙门喜湖区浮游植物群落特征表现为以绿藻种类、密度、生物量为主,表明这样的水体特征能够维持大银鱼的高产。

连环湖大银鱼12月开始繁殖,受精卵在冰下2个月后孵化出苗<sup>[12]</sup>。冰封期(12月、2月),阿木塔和牙门喜湖区的浮游植物群落特征与明水期不同。冰封期的种类数量较明水期有所下降(表2),其中12月是绿藻、蓝藻比例一样相对较高,2月各个藻门种类数均衡,其中蓝藻相对多些,密度、生物量也在冰封期较明水期下降,最高密度在冰封期(12月)与明水期(9月)比下降约90%,生物量最高值在冰封期(12月)与明水期(9月)比下降约95%(表4)。密度在12月蓝藻最高,绿藻次之,2月绿藻最高,蓝藻次之,生物量在12月、2月均是蓝藻最高。整体分析,大银鱼繁殖和孵化时期浮游植物以蓝藻、绿藻为主。

大银鱼的食物组成除了与其自身不同发育阶段摄食和消化器官有关以外,在很大程度上与其所处环境有关,即对食物既有一定的稳固性,又有可塑性<sup>[13]</sup>。大银鱼仔鱼和幼鱼时期以浮游生物为食,仔

鱼早期(10~20 d)以浮游植物为开口饵料,20~40 d时可主动摄取轮虫<sup>[14]</sup>,随着生长主要食物转变为大型浮游动物枝角类、桡足类<sup>[4,15]</sup>。在分析全长1.1~5 cm的大银鱼食性时,发现绿藻在其肠道内含物中比例较高,占60%,其中小球藻属为主,另外十字藻属也有摄入<sup>[16]</sup>。本研究调查水域的浮游植物群落特征从种类组成、密度来看均呈现绿藻为主。绿藻的优势种类中小球藻属有3个种类,分别为普通小球藻、椭圆小球藻和蛋白核小球藻,蛋白核小球藻在全年调查月份中均为优势种,并且在冰封期间优势度相对明水期更高;另外,十字藻属有2个优势种,分别为四足十字藻和四角十字藻,其中四角十字藻在明水期和冰封后的2月均为优势种,此时可作为大银鱼孵出后的食物。综合分析,连环湖大银鱼稳产水域(阿木塔和牙门喜湖区)浮游植物呈现以绿藻为优势的群落特征,蓝藻、硅藻次之。

另外,分析绿藻门的优势种,在明水期均有出现,其中柱状栅藻、椭圆小球藻、蛋白核小球藻、四角十字藻在5个月中的出现频率均为100%;冰封期呈现的优势种只有普通小球藻、蛋白核小球藻以及四角十字藻,其中仅有蛋白核小球藻在12月、2月调查期间均成为优势种。从优势度来看,明水期优势度合

计最高的是柱状栅藻(0.96),十字藻属的四角十字藻、四足十字藻次之,分别为 0.5 和 0.44,其次小球藻属的椭圆小球藻和蛋白核小球藻分别为 0.22 和 0.19。而冰封期仅蛋白核小球藻优势度合计较高(0.4)。大银鱼在明水期生长阶段摄食大量枝角类,枝角类的滤食

摄食方式在自然水体具有一定的控制藻类繁殖的能力<sup>[17-18]</sup>,绿藻中栅藻属种类比小球藻属种类更易被枝角类选择摄食<sup>[19]</sup>。明水期绿藻门的优势种类较多,优势度较高,可能与大银鱼生长时期大量摄食枝角类<sup>[20]</sup>,降低了枝角类对绿藻的下行效应有关。

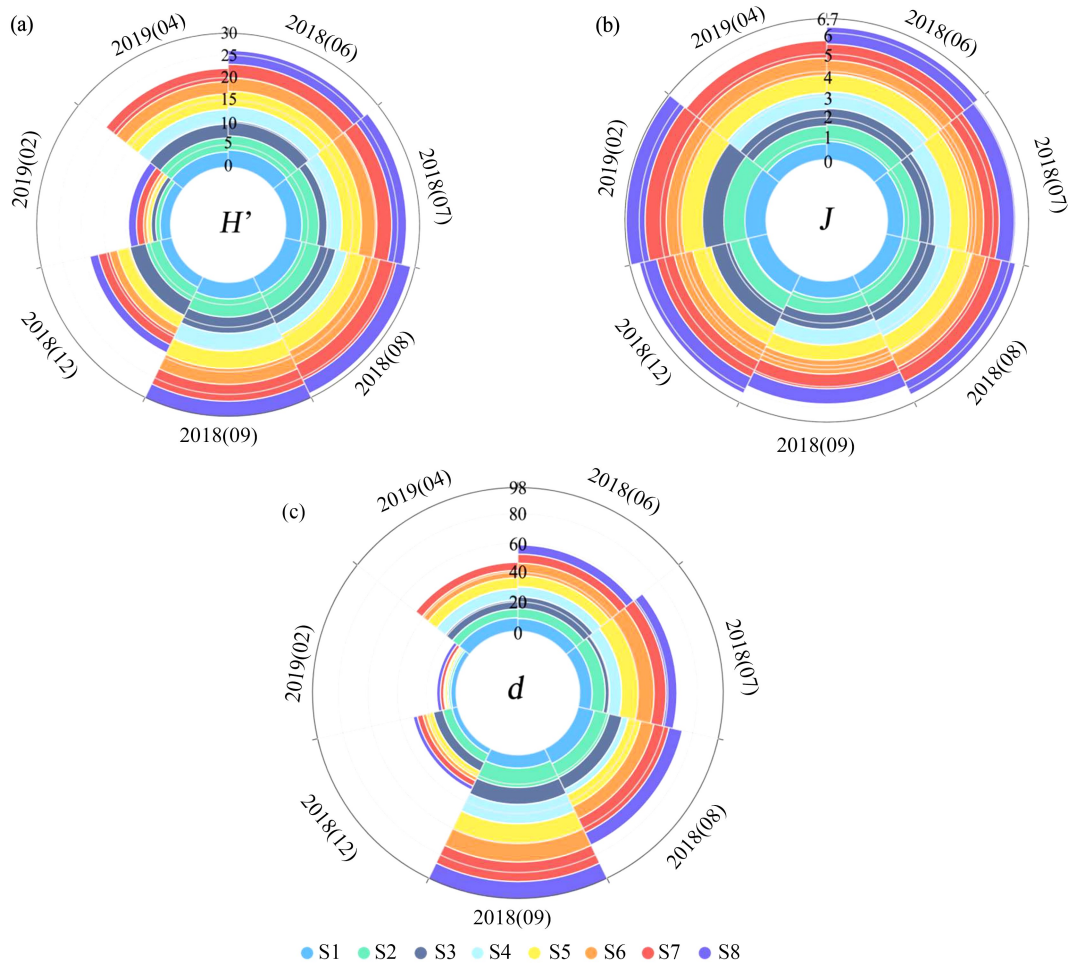


图 3 2018 年 6 月—2019 年 4 月基于浮游植物多样性指数的阿木塔和牙门喜湖区的水质评价

Fig. 3 Water quality evaluation of Lake Amuta and Lake Yamenxi based on phytoplankton diversity indice from June 2018 to April 2019

本研究水质的评价结果显示,Shannon-Wiener 多样性指数明水期均值均在 3 以上,冰封期在 3 以下,在 2 月多样性最低,7 月最高;Margalef 种类丰富度指数均值在明水期均在 6 以上,冰封期在 5 以下,最低值同样出现在 2 月,最高值出现在 9 月;Pielou 均匀度指数均值均较高,冰封期相对高些,明水期变化不大。总体来讲,冰封期(12 月、2 月)水体浮游植物多样性低于明水期(6—9 月以及次年 4 月),而浮游植物群落物种分布的均匀程度在明水期低于冰封期。

浮游植物的个体、种群及群落对周围环境的变

化十分敏感,浮游植物的种类分布、密度特征及优势种的生态耐性,也反映出水环境的污染程度<sup>[21-23]</sup>。浮游植物的种类以及种群分布、密度等特征可用以监测水质<sup>[2]</sup>。根据浮游植物多样性指数对水质的评价结果<sup>[24-26]</sup>,阿木塔和牙门喜湖区水质类型为明水期(6—9 月以及次年 4 月)为寡污-清洁型,冰封期(12 月和 2 月)为  $\beta$ -中污型至  $\alpha$ -中污型。由此得出,连环湖大水面移植大银鱼活动没有促使水体向富营养化转变,当前水质状况良好。水质、底质、天然饵料水平等生态状况是成功移植大银鱼的关键因素,有报



道成功移植大银鱼的水域水质在寡污型至 $\beta$ -中污型之间<sup>[27-28]</sup>。这与本研究调查结果相似,说明大银鱼对水质要求较高。

**通信作者简介:**唐富江(1979—),男,博士,副研究员,主要研究方向为渔业资源与生态学。

**共同通信作者简介:**刘欣(1980—),女,博士,助理研究员,主要研究方向为水环境污染特征与污染物迁移转化,水域微生物群落与功能微生物。

#### 参考文献(References):

- [1] 杜蒙县连环湖渔场. 依托资源优势 满足市场需求 不断加快大银鱼移植增殖步伐[J]. 渔业经济研究, 1997(4): 20-21
- [2] 陈佳林, 孔凡青, 余海军, 等. 白洋淀湿地浮游植物多样性分析及水质评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(19): 59-64, 74  
Chen J L, Kong F Q, Yu H J, et al. Biodiversity analysis of phytoplankton and water quality evaluation in Baiyangdian Wetland [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(19): 59-64, 74 (in Chinese)
- [3] 唐富江, 李喆, 李培伦. 大银鱼资源、生态与渔业技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2021: 104-109
- [4] 唐富江, 刘伟, 王继隆, 等. 兴凯湖大银鱼食物组成与食性转化[J]. 动物学研究, 2013, 34(5): 493-498  
Tang F J, Liu W, Wang J L, et al. Diet composition and transition of clearhead icefish (*Protosalanx hyalocranius*) in Lake Xingkai [J]. Zoological Research, 2013, 34(5): 493-498 (in Chinese)
- [5] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 504-505  
Wang S M, Dou H S. Chronicles of Chinese Lakes [M]. Beijing: Science Press, 1998: 504-505 (in Chinese)
- [6] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 15-31
- [7] 罗民波, 陆健健, 王云龙, 等. 东海浮游植物数量分布与优势种[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5076-5085  
Luo M B, Lu J J, Wang Y L, et al. Horizontal distribution and dominant species of phytoplankton in the East China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5076-5085 (in Chinese)
- [8] 王晓玉, 黄雁琳, 白贝贝, 等. 海安市河流和水渠水体中浮游植物群落结构特征[J]. 湿地科学, 2020, 18(4): 446-453  
Wang X Y, Huang Y L, Bai B B, et al. Characteristics of phytoplankton community structure in the waters of the rivers and canals in Hai'an City [J]. Wetland Science, 2020, 18(4): 446-453 (in Chinese)
- [9] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 120-136
- [10] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91  
Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(2): 87-91 (in Chinese)
- [11] 高远, 慈海鑫, 亓树财, 等. 沂河4条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 176-180  
Gao Y, Ci H X, Qi S C, et al. Seasonal changes of phytoplankton diversity and assessment of water quality in four tributaries of Yi River [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 176-180 (in Chinese)
- [12] 唐富江, 高文燕, 李慧琴, 等. 大银鱼生物学与渔业生态学研究进展[J]. 水产学报, 2020, 44(12): 2100-2111  
Tang F J, Gao W Y, Li H Q, et al. Biology and fishery ecology of *Protosalanx chinensis*: A review [J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(12): 2100-2111 (in Chinese)
- [13] 邬红娟, 徐木生, 曹克驹. 道观河水库大银鱼移植生物学效应: 2. 摄食生态[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 145-148  
Wu H J, Xu M S, Cao K J. The biological effects of transplanting *Protosalanx hyalocranius* in Daoguanhe Reservoir (II): Feeding ecology [J]. Journal of Lake Science, 1999, 11(2): 145-148 (in Chinese)
- [14] 施炜纲, 徐东坡, 刘凯, 等. 大银鱼的胚胎发育及仔鱼习性[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(5): 391-396  
Shi W G, Xu D P, Liu K, et al. The embryonic development and habit of larvae in large icefish *Protosalartx hyalocranius* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(5): 391-396 (in Chinese)
- [15] 文琳, 石江同, 赵创成. 李湾水库大银鱼移植增殖成效显著[J]. 河南水产, 1999(2): 24  
Wen L, Shi J T, Zhao C C. The transplantation and proliferation of whitebait in Liwan Reservoir have achieved remarkable results [J]. Henan Fisheries, 1999(2): 24 (in Chinese)
- [16] 荣长宽, 岳炳宜. 天津大银鱼仔鱼和幼鱼食性的初步研究[J]. 天津农学院学报, 1997, 4(4): 11-14  
Rong C K, Yue B Y. A preliminary study of the feeding habits of Tianjin *Eperlanus chinensis* Basilewsky at the neonate and infant stage of life [J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 1997, 4(4): 11-14 (in Chinese)

- [17] 操璟璟, 廖庆生, 蒋继宏, 等. 不同温度条件下几种枝角类浮游动物的抑藻净水效应研究[J]. 生物学杂志, 2010, 27(1): 57-60  
Cao J J, Liao Q S, Jiang J H, et al. Inhibitory capabilities and purification abilities of several cladocerans on algae under different temperature conditions [J]. Journal of Biology, 2010, 27(1): 57-60 (in Chinese)
- [18] 王军霞, 刘存歧, 张晶, 等. 白洋淀2种枝角类的摄食生态[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 630-635  
Wang J X, Liu C Q, Zhang J, et al. Grazing behavior of two dominant species of cladoceran in Lake Baiyangdian [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2013, 33(6): 630-635 (in Chinese)
- [19] 邵元启. 巢湖春夏季节蓝藻与大型枝角类的相互作用研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2013: 5-8  
Shao Y Q. The interactions research between cyanobacteria and large-bodied cladocerans in the spring-summer Chaohu Lake [D]. Hefei: Anhui University, 2013: 5-8 (in Chinese)
- [20] 高文燕. 大庆市小龙虎泡和齐家泡浮游动物群落结构及其影响因素[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 47-50  
Gao W Y. Community structure of zooplankton and its influencing factors in Xiaolonghu Lake and Qijia Lake in Daqing [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 47-50 (in Chinese)
- [21] 董旭辉, 羊向东, 王荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 570-574  
Dong X H, Yang X D, Wang R. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2006, 26(5): 570-574 (in Chinese)
- [22] 李永函, 赵文. 水产饵料生物学[M]. 大连: 大连出版社, 2002: 10-12  
Li Y H, Zhao W. Aquatic Feed Biology [M]. Dalian: Dalian Publishing House, 2002: 10-12 (in Chinese)
- [23] 林碧琴, 姜彬慧. 藻类与环境保护[M]. 沈阳: 辽宁民族出版社, 1999: 322-346
- [24] Kumar R, Kumari R, Prasad C, et al. Phytoplankton diversity in relation to physicochemical attributes and water quality of Mandakini River, Garhwal Himalaya [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(12): 799
- [25] Korneva L G, Solovyeva V V. Dynamics of morphofunctional groups of phytoplankton in the Rybinsk Reservoir and assessment of the reservoir water quality by the community index [J]. Water Resources, 2021, 48(1): 65-72
- [26] Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, et al. Geo-climatic factors weaken the effectiveness of phytoplankton diversity as a water quality indicator in a large sediment-laden river [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 792: 148346
- [27] 初兆万, 马素珍, 娄英文, 等. 提高水库大银鱼产量的技术措施[J]. 齐鲁渔业, 1999, 16(1): 27-29  
Chu Z W, Ma S Z, Lou Y W, et al. Technical measures for raising output of *Protosalanx hyalocranius* in reservoir [J]. Shandong Fisheries, 1999, 16(1): 27-29 (in Chinese)
- [28] 黄永军. 沙那水库大银鱼健康增养殖技术总结[J]. 现代农业, 2019(3): 86-87 ◆