

林峰, 冯民权, 李鸿彬. 运城盐湖浮游生物群落结构及多样性的季节差异[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(11): 37-49. Lin Feng, Feng Minquan, Li Hongbin. Seasonal differences in the plankton community structure and diversity in Yuncheng Salt Lake[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11): 37-49.

# 运城盐湖浮游生物群落结构及多样性的季节差异

林峰, 冯民权\*, 李鸿彬

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 本研究旨在揭示低海拔的高盐水体(运城盐湖)湖泊中浮游生物群落结构及多样性分布特征的季节差异。通过各种多样性指数和RDA相关性分析,对春夏秋季浮游生物群落结构变化特征进行研究,结果表明共有浮游植物6门69种,浮游动物4门20种,其中浮游植物均以硅藻门和绿藻门为主,浮游动物以轮虫门数量较大。在季节变化上,浮游植物细胞密度和均匀度都表现为春季>秋季>夏季,物种总数和丰富度为春季>夏季>秋季,多样性指数则是夏季>春季>秋季,优势种上发生了由硅藻门到绿藻-隐藻门的转变。浮游动物个体密度和多样性指数都表现为秋季>夏季>春季,均匀度为秋季>春季>夏季,在物种总数和丰富度上呈现出夏季>秋季>春季的特点,且春夏秋季优势种都含有褶皱臂尾轮虫。此外,浮游生物群落结构和多样性在空间分布上各个季节各有差异,且受多种水环境因素的共同影响,主要与水温、盐度、各类氮、pH、COD显著相关。

**关键词:** 高盐水体; 群落结构; 多样性指数; 优势种

中图分类号: X176 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.0344.25.338 文章编号: 1003-6504(2025)11-0037-13

## Seasonal Differences in the Plankton Community Structure and Diversity in Yuncheng Salt Lake

LIN Feng, FENG Minquan\*, LI Hongbin

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to reveal the seasonal differences in the distribution characteristics of plankton community structure and diversity in low-altitude hypersaline water (Yuncheng Salt Lake) lakes. The results showed that there were 69 species of phytoplankton in 6 phyla and 20 species of zooplankton in 4 phyla, and the phytoplankton were mainly diatoms and chlorophytes, and the zooplankton were mainly rotifers. In terms of seasonal variation, phytoplankton cell density and uniformity were in spring > autumn > summer, and the total number and richness of species showed spring > summer > autumn, followed by diversity index in summer > spring > autumn, and the dominant species changed from Diatom to Chlorophyta-Cryptophyta. The density and diversity index of zooplankton were autumn > summer > spring, and the uniformity was autumn > spring > summer, and the total number and richness of species showed the characteristics of summer > autumn > spring, and the dominant species in spring, summer and autumn all contained *Brachiocis foldatura*. In addition, the structure and diversity of plankton communities were different in each season in terms of spatial distribution, and were affected by a variety of water environment factors, which were mainly related to water temperature, salinity, nitrogen, pH and COD in the water body.

**Key words:** hypersaline water bodies; community structure; diversity index; dominant species

盐湖中具有丰富的矿产资源和生物资源<sup>[1]</sup>,但近年来,由于工农业的发展需要,导致污染物的增加和湖泊自我调节能力的下降,盐湖水生态环境面临着巨大的风险和危机<sup>[2]</sup>。运城盐湖位于山西省运城市,是世界三大硫酸钠型内陆盐湖之一,总面积 132 km<sup>2</sup>,水

深最大 6 m<sup>[3,4]</sup>。随着环境问题的日益严重,研究盐湖浮游生物是有必要的,浮游生物不仅是水生生态和食物网的基础,也对生态环境的评价至关重要<sup>[5]</sup>。由于浮游植物占湖泊初级生产力的主要比例,且随季节的影响变化较大<sup>[6]</sup>,通过研究季节性浮游生物的群落结

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://tjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) [hjkyxjys@vip.126.com](mailto:hjkyxjys@vip.126.com)

收稿日期: 2025-02-27; 修回 2025-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679191); 山西省水利厅科学技术研究与推广项目(2024GM08); 陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-03); 运城盐湖生态环境评估项目(YHYJ-2023004)

作者简介: 林峰(2001-), 男, 硕士, 研究方向为湖泊生态环境评估, (电子信箱) [2976358039@qq.com](mailto:2976358039@qq.com); \*通讯作者, (电子信箱) [mqfeng@xaut.edu.cn](mailto:mqfeng@xaut.edu.cn)。

构多样性特征和水环境因子对其的影响,不仅可以探究近几年来由于环境变化和人为活动影响对运城盐湖浮游生物群落的变化结果,也可以探究浮游生物群落与多样性变化的空间分布特征、春夏秋冬季节差异及其影响因素。此外,运城盐湖含有各种各样的耐盐性浮游动植物<sup>[7]</sup>,研究它们的群落结构和多样性特征,可以为后期更好地治理盐湖、改善盐湖生态环境提供理论依据。

近年来,国外对于咸水生态系统中浮游生物的研究一直是国际上的热点话题。2000年以来,Oliva等<sup>[8]</sup>研究表明,墨西哥盐湖的浮游藻类群落结构季节变化与一些环境因子存在关系。随后,Harper等<sup>[9]</sup>研究表明,肯尼亚盐湖的浮游植物有显著的群落结构分布特征和多样性变化。且在近几年,Gerasimova等<sup>[10]</sup>也揭示了咸水和高盐陆海水域浮游原生生物群落的分类结构,Arunpandi等<sup>[11]</sup>又研究了较小的浮游生物对印度西南海岸热带河口系统的咸水拦河坝改变的水文响应。而国内对于盐湖浮游生物的研究主要集中在西藏、青海、新疆等地。近年来,杨欢等<sup>[12]</sup>对西藏5个盐湖浮游生物组成与微生物多样性进行了研究,余冬梅等<sup>[13]</sup>对青海察尔汗盐湖区生物种类进行了调查研究,还有史楠楠等<sup>[14]</sup>对新疆巴里坤盐湖浮游生物群落特征进行了分析,他们基本都检测出盐湖的浮游植物主要集中在硅藻门和蓝藻门,浮游动物轮虫数量较大,且多样性指数较淡水湖泊低。然而上述盐湖海拔都较高,对于低海拔的运城盐湖浮游生物的研究近几年来相对较少,其最早可以追溯到王宏毅等<sup>[15]</sup>对山西运城盐湖浮游生物的初步研究,2000年以后,李砧等<sup>[16]</sup>对运城盐湖盐池湖区的藻类分布进行了研究,2010年以后,王飞鹏等<sup>[4]</sup>又对运城盐湖藻类植物资源进行了探究。最近一次对运城盐湖浮游生物的实地调查则是2016年吕虹瑞等<sup>[7]</sup>对运城盐池湖区藻类植物群落结构特征及与盐度关系进行了研究报道。此外,谢树莲等<sup>[18]</sup>虽然也对运城盐湖藻类植物资源研究进展进行了总结,但只是对2016年以前的盐湖浮游植物做了进一步的综述,并没有对近10年盐湖的浮游植物产生的变化进行实地的检测。对于运城盐湖的浮游动物相关的研究,张宇等<sup>[7]</sup>在对运城盐湖生物多样性的综述研究中提到,只有20世纪90年代部

分学者对运城盐湖的浮游动物进行了研究,而近年来缺乏对其的调查。综上所述,和高海拔的新疆、西藏等地的盐湖不同,低海拔的运城盐湖浮游生物受工农业和人为扰动影响更强,季节变化可能更加明显<sup>[12,14]</sup>。历年来各学者虽然都对运城盐湖的浮游生物进行了不同程度的探讨,但从2016年以后,盐湖工农业、养殖业、旅游业等的发展对湖区浮游植物的影响缺乏实测数据和研究,且对浮游动物的研究更是稀少。其次,前人对于浮游生物也基本只是研究其种类组成和优势种的分布,对盐湖浮游动生物的多样性、丰富度、均匀度等方面缺乏探讨。此外,近年来也缺少对浮游生物进行季节性差异的研究,以此来探究季节变化对浮游生物群落结构及其多样性的影响。

本文旨在研究低海拔条件下,高盐水体(运城盐湖)中的浮游生物群落结构和多样性特征在春夏秋冬3个季节中的变化规律,通过计算盐湖各个采样点浮游生物的种类数量、密度、优势度以及它们的各类多样性指数,揭示不同季节盐湖浮游生物之间的差异性。最后通过RDA相关性分析方法,探究影响浮游生物多样性变化的主要水环境因子。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点的布置和样品采集

本次研究对象为山西运城盐湖(以下简称为盐湖),属于高盐类水体<sup>[9]</sup>,通过现场检测,春夏秋冬四季均为东北部区域盐度最高,平均可达95 mg/L左右,西南部最低,平均为34 mg/L左右,整个盐湖盐度平均值在50 mg/L左右,见表1。根据可行条件及实际情况,分春夏秋冬三季在盐湖均匀设置了10个采样点,采集浮游生物和水样样品,如图1所示。10个采样点将盐湖分成3个区域,即盐湖东北部盐田区域(S1、S2、S3)、中部盐湖大道(S4、S5)和西南部盐湖主体区域(S6、S7、S8、S9、S10),其中西南部为盐湖主体盐池区域,故采样点数量较多。

浮游植物的采集使用25号浮游生物网在水中拖曳采集,每个采样点采集浮游植物样品1 L,加入10~15 mL鲁哥氏液固定,经过48 h静置沉淀后,室内浓缩至50 mL,吸取0.1 mL的浓缩样品,在计数框面积

表1 春夏秋冬各采样点盐度大小分布  
Table 1 The distribution of salinity at each sampling point in spring, summer and autumn (mg/L)

采样点编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	平均值
(春)盐度	104.8	103.5	84.2	34.3	31.9	32.5	30.1	30.6	28.5	32.1	51.25
(夏)盐度	106.3	107.1	83.3	35.8	32.3	32.2	32.0	31.0	31.2	31.1	52.23
(秋)盐度	100.4	95.8	81.9	35.9	30.6	30.3	29.9	28.1	27.9	28.0	48.88

为 400 mm<sup>2</sup>, 单个计数面积为 0.2 mm<sup>2</sup>, 视野数为 100 的条件下对浮游植物细胞数进行统计<sup>[20]</sup>。浮游动物的采集使用 10 L 的水桶采集水样 10 L, 用孔径 38 μm 的浮游生物网现场过滤后将网头中的浮游动物放置在 100 mL 的样品瓶中, 并定容到标线, 加入鲁哥试剂 3~5 mL 进行固定<sup>[21]</sup>, 其中原生动物和轮虫以 2 mL 进行计数, 枝角类和桡足类以 5 mL 进行计数。此外, 水样的采集使用 2 L 的有机玻璃采水器在水面 0.5 m 以下进行采集, 并在采样完成后, 全程冷藏保存, 送至实验室进行各类水质指标的测定。其中, 盐度指标采用盐度计(AZ 8373)在现场进行测定, pH 和水温指标采用便携式水质参数检测仪(HI9829)在现场检测, COD、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub>)等指标按照国家环境保护总局制定的《水和废水监测分析方法》进行测定<sup>[22]</sup>。

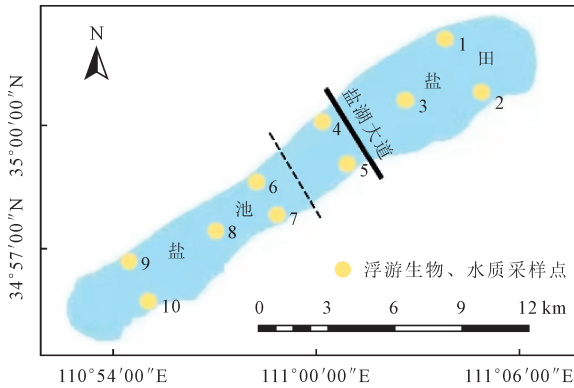


图1 运城盐湖浮游生物及水质采样点布置图  
Fig.1 Layout of plankton and water quality sampling points in Yuncheng Salt Lake

## 1.2 分析方法

### 1.2.1 浮游生物密度

每 1 L 水样中浮游生物的密度(现存量)计算公式如下:

$$N = \frac{A}{A_c} \times \frac{V_1}{V_0} \times P_n \quad (1)$$

式中,  $N$  为 1 L 标准水样中浮游生物的数量(cells);  $A$  为计数框面积(mm<sup>2</sup>);  $A_c$  为计数面积(mm<sup>2</sup>);  $V_1$  为 1 L 水样经浓缩后的体积(mL);  $V_0$  为计数框中所吸取的浓缩样品的体积(mL);  $P_n$  为计数出的浮游生物个数(cells)<sup>[23,24]</sup>。

### 1.2.2 Simpson 多样性指数

Simpson 多样性指数的最低值是 0, 最高值是

$(1-1/S)^{[25]}$ 。计算公式为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

式中,  $S$  表示物种数量;  $P_i$  表示物种  $i$  的个体数占群落中总个体数的比例<sup>[25]</sup>。

### 1.2.3 Shannon-Wiener 多样性指数

该指数是用来描述各种个体出现的不确定性, 不确定性越高, 多样性越高。Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )的计算<sup>[21]</sup>公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \log_2 P_i \quad (3)$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  种物种的个体数占总个体数的比例;  $S$  为总物种数<sup>[21]</sup>。

### 1.2.4 Margalef 丰富度指数

该指数是通过测得某生态区域内生物多样性程度来判断该区域污染程度的方法。Margalef 丰富度指数( $D'$ )的计算<sup>[26]</sup>方法为:

$$D' = \frac{S-1}{\ln N} \quad (4)$$

式中,  $S$  为样品中的种类数;  $N$  为样品中的个体总数<sup>[26]</sup>。

### 1.2.5 物种 Pielou 均匀度指数

物种 Pielou 均匀度指数是对不同物种在数量上的接近程度的衡量<sup>[21]</sup>。计算公式如下:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (5)$$

式中:  $H'$  为多样性指数;  $S$  为样品中的物种总数<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物

#### 2.1.1 种类数与种群密度

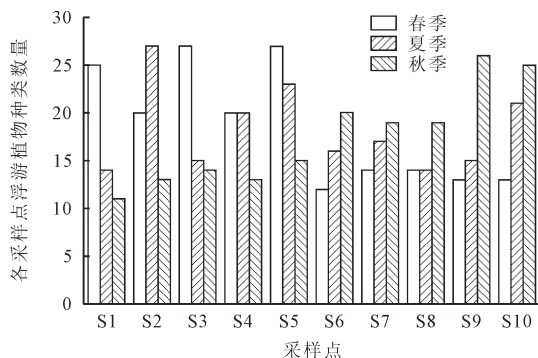
春夏秋三季共检测出盐湖浮游植物 6 门 8 纲 69 种, 均以硅藻门和绿藻门为主(表 2), 但在物种数量分布方面各个季节略有差异。在空间上, 春季盐湖东北部浮游植物物种种类数量明显大于西南部, 夏季盐湖两端及其中部的物种数量大于内湖地带, 而秋季, 虽然 S2 号点物种数量最高, 但整体空间分布上来看, 盐湖中部和西南部物种数量高于东北部, 见图 2(a)。在时间上, 三个季节浮游植物物种总数呈现出春季>夏季>秋季的特点, 见表 2。

表 2 春夏秋季浮游植物所处门类分布及各门类所占比例  
Table 2 Distribution of phyla and the proportion of phyla in spring, summer and autumn

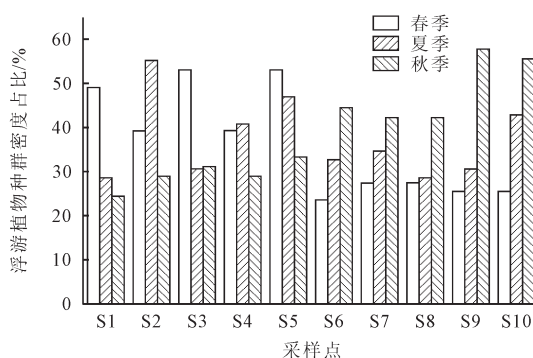
季节	门类占比/%						门类和	种类和
	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	隐藻门	裸藻门	甲藻门		
春季	39.2	11.8	33.3	5.9	7.8	2.0	6门	51种
夏季	40.8	10.2	32.7	6.1	8.2	2.0	6门	50种
秋季	44.4	8.9	28.9	6.7	8.9	2.2	6门	45种

由图2(b)可见,春季浮游植物种群密度在23.5%~52.9%之间,其中S6号点最小,S3和S5号点最高,涉及7门27种浮游植物,见表3。夏季采样点的种群密度在28.6%~55.1%之间,其中S1号点种群密度最小,S2号点最高,涉及7门27种浮游植物,见表3。而秋

季,各采样点种群密度在24.44%~57.78%之间,其中S1号点最低,S9号点最高,涉及5门26种浮游植物。从时间上来看,浮游植物种群密度最高值采样点从春季到秋季,发生了由盐湖中部向东北部再向西南部转变的现象。



(a)浮游植物种类数量变化图



(b)浮游植物种群密度占比图

图2 春夏秋冬各采样点浮游植物种类数量变化及其种群密度占比图

Fig.2 Changes in phytoplankton species and population density proportions at each sampling site in spring, summer and autumn

表3 春夏秋冬各采样点浮游植物门类分布及其各门类所含种类数量表

Table 3 The distribution of phytoplankton phyla at each sampling point in spring, summer and autumn and the number of species contained in each phyla

季节	门类	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
春季	硅藻门	12种	7种	14种	10种	8种	2种	5种	1种	2种	2种
	蓝藻门	3种	1种	3种	2种	2种	1种	0种	1种	1种	2种
	绿藻门	5种	7种	4种	4种	12种	5种	6种	8种	8种	7种
	隐藻门	3种	3种	3种	2种	2种	2种	2种	2种	1种	2种
	甲藻门	1种	1种	1种	1种	0种	0种	0种	1种	1种	0种
	裸藻门	1种	1种	2种	1种	3种	2种	1种	1种	0种	0种
夏季	硅藻门	8种	13种	9种	7种	6种	5种	6种	3种	3种	8种
	蓝藻门	0种	3种	1种	3种	1种	0种	2种	1种	0种	2种
	绿藻门	4种	8种	3种	7种	12种	7种	7种	7种	8种	7种
	隐藻门	2种	1种	1种	2种	2种	2种	2种	1种	2种	2种
	甲藻门	0种	1种	0种	0种	1种	1种	0种	1种	0种	1种
	裸藻门	0种	1种	1种	1种	1种	1种	0种	1种	2种	1种
秋季	硅藻门	7种	6种	9种	8种	5种	6种	5种	9种	12种	11种
	蓝藻门	0种	3种	0种	1种	0种	1种	2种	2种	2种	1种
	绿藻门	2种	3种	2种	1种	7种	8种	7种	6种	8种	10种
	隐藻门	1种	1种	2种	1种	3种	3种	3种	1种	2种	2种
	甲藻门	0种	0种	0种	1种	0种	0种	0种	0种	0种	0种
	裸藻门	1种	0种	1种	1种	0种	2种	2种	1种	2种	1种

### 2.1.2 浮游植物细胞密度与优势种

春季浮游植物的细胞密度在 $7.20 \times 10^5 \sim 1.95 \times 10^7$  cells/L之间,平均值为 $4.691 \times 10^6$  cells/L,夏季在 $2.60 \times 10^5 \sim 6.30 \times 10^6$  cells/L之间,平均值为 $2.885 \times 10^6$  cells/L,秋季则在 $1.9 \times 10^5 \sim 9.81 \times 10^6$  cells/L之间,平均值为 $3.201 \times 10^6$  cells/L(图3)。在时间变化上,浮游植物的细胞密度平均值表现为春季>秋季>夏季,然而从空间分布来看,整体上3个季节均为盐湖西南部浮游植物细胞密度>东北部。其次,与其他盐湖比较,运城盐湖浮游植物的密度要高于新疆巴里坤、西藏那曲地区盐湖,这可能是运城盐湖相对于这些盐湖海拔较低导致的<sup>[14,26]</sup>。

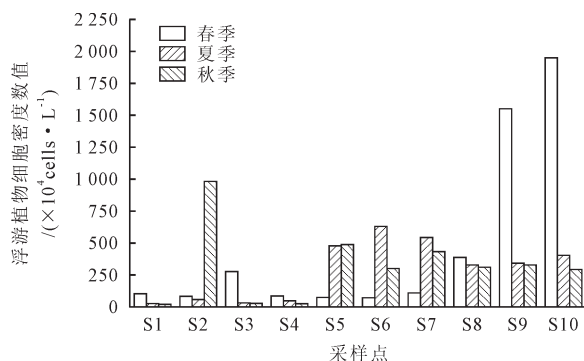


图3 春夏秋冬各采样点浮游植物细胞密度分布图  
Fig.3 Phytoplankton cell density distribution map of each sampling point in spring, summer and autumn

通过对各采样点优势度(优势度指数 $Y > 0.02$ )的

计算(表 4~6),可见春季浮游植物优势种主要是隐藻门的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)和硅藻门的尖针杆藻(*Synedra acus*)。而夏季和秋季优势种主要都是绿藻门的衣藻(*Chlamy domonas*)和隐藻门的蓝隐藻

(*Cryptophyta theta*)。可见,春夏秋 3 个季节优势种结构特征上发生了由硅藻门到绿藻-隐藻门的转变,但都是耐盐种,且从夏季开始盐湖西南部已演变为蓝隐藻优势种。

表 4 春季各采样点浮游植物优势种及优势度结果表

Table 4 Results of phytoplankton dominant species and dominance at each sampling point in spring

采样点	优势种	拉丁名	优势度	采样点号	优势种	拉丁名	优势度
S1	卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	0.030	S6	裸藻	<i>Euglena gracilis</i>	0.141
S2	小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>	0.020	S7	裸藻	<i>Euglena gracilis</i>	0.159
S3	卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	0.036	S8	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	0.542
S4	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	0.040	S9	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	0.857
S5	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	0.133	S10	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	0.854

表 5 夏季各采样点浮游植物优势种及优势度结果表

Table 5 Results of dominant phytoplankton species and dominance at each sampling site in summer

采样点	优势种 1	拉丁名	优势种 2	拉丁名	优势种 3	拉丁名	优势度
S1	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>					0.037
S2	小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>					0.024
S3	偏肿桥弯藻	<i>Cymbella ventricosa</i>					0.020
S4	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>					0.021
S5	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>					0.316
S6	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kiits	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>	0.022 0.163
S7	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>	湖生卵囊藻	<i>Nostoc lagoideum</i>	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>	0.022 0.186
S8	湖生卵囊藻	<i>Nostoc lagoideum</i>	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.031 0.208
S9	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>					0.210

表 6 秋季各采样点浮游植物优势种及优势度结果表

Table 6 Results of dominant phytoplankton species and dominance at each sampling site in autumn

采样点	优势种 1	拉丁名	优势种 2	拉丁名	优势度
S1	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kiits	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>	0.069 0.025
S2	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	0.334 0.128
S3	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>			0.049
S4	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kiits			0.063
S5	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.412
S6	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.350
S7	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.332
S8	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.472
S9	衣藻	<i>Chlamy domonas</i>			0.016
S10	蓝隐藻	<i>Cryptophyta theta</i>			0.306

2.1.3 多样性指数

由图 4 可见,春季盐湖浮游植物的 Simpson 多样性指数在 0.141 8~0.915 9 之间,平均值为 0.681 5,夏季在 0.645 2~0.938 2 之间,平均值为 0.813 5,而秋季在 0.509 0~0.879 0 之间,平均值为 0.680 0。从空间特征来看,春季浮游植物的 Simpson 指数从盐湖东北部向西南部递减,夏季浮游植物的 Simpson 指数由盐湖东北部向中部递减,再向西南部升高,但总体上呈现

东高西低的现象,而秋季的 Simpson 指数 S2 号点相对于春夏两季出现了骤减,但整体空间分布上和春夏季相似。从时间上来看,浮游植物的 Simpson 指数平均值表现为春季到夏季升高,但秋季又回到了春季水平。

此外,春季浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数在 0.598 3~4.075 8 之间,平均值为 2.808 2(图 4),夏季在 2.245 1~4.404 5 之间,平均值为 3.223 8,而秋季在

1.450 0~3.504 0之间,平均值为2.529 0。浮游植物的Shannon-Wiener多样性指数空间分布特征和Simpson指数一致。在时间上也是夏季>春季>秋季。

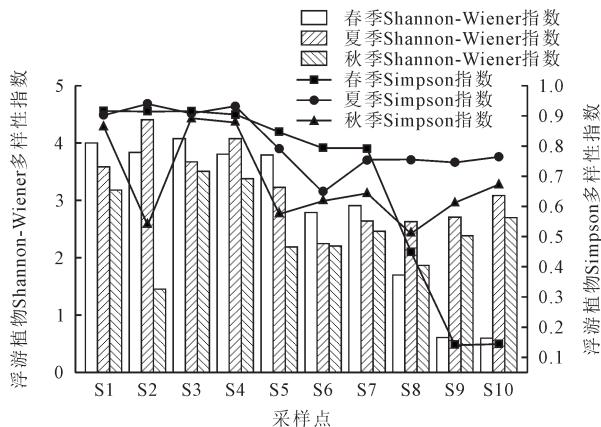


图4 春夏秋冬各采样点浮游植物Simpson、Shannon-Wiener多样性指数变化图

Fig.4 Changes in phytoplankton diversity index of Simpsons and Shannon-Wiener at each sampling site in spring, summer and autumn

2.1.4 丰富度与均匀度

由图5可见,春季浮游植物Margalef丰富度指数在0.714 9~1.923 9之间,平均值为1.224 3,夏季在

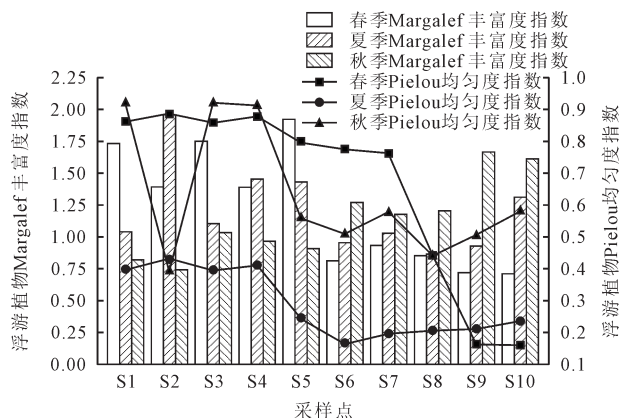


图5 春夏秋冬各采样点浮游植物Margalef丰富度、Pielou均匀度指数变化图

Fig.5 Changes in the richness of phytoplankton Margalef and Pielou evenness index at each sampling site in spring, summer and autumn

0.866 6~1.959 2之间,平均值为1.209 6,而秋季在0.745 4~1.666 3之间,平均值为1.142 0。在空间分布特征上,春季和夏季盐湖浮游植物Margalef丰富度指数均为东北部和中部>西南部,而秋季盐湖东北部虽然S3号点丰富度较高,但总体上却是盐湖西南部>东北部。在时间上,Margalef丰富度指数平均值呈现出春夏季较为接近,秋季略有降低。

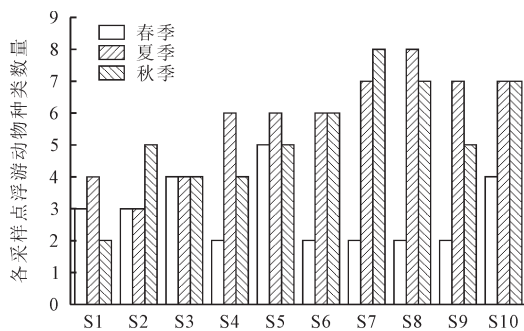
在Pielou均匀度指数方面,春夏秋三季平均值分别为0.659、0.290、0.632。在空间上,春夏季盐湖浮游植物的均匀度指数均是东北部>西南部,而秋季除S2号点外,整体上也是东北部>西南部。从时间上来看,其平均值呈现出春季>秋季>夏季的特点,且夏季浮游植物的均匀度指数大幅降低,群落结构极易受到破坏。

2.2 浮游动物

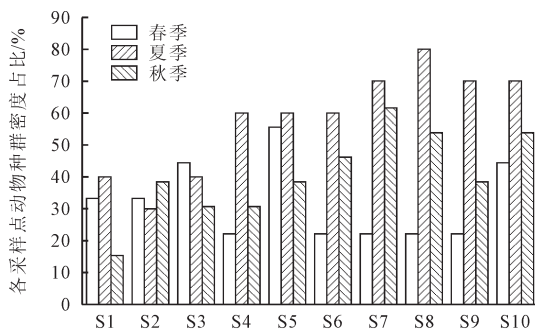
2.2.1 种类数与种群密度

春夏秋三季共检测出盐湖浮游动物4门5纲20种,其中春季以原生动物门和轮虫门为主,夏秋季以节肢动物门和轮虫门为主。如图6(a)所示,浮游动物在种类数量分布方面也有差异,在空间上,春季盐湖浮游动物种类数量表现为东北部>西南部,夏季和秋季相似,均是西南部>东北部。此外,在盐湖东北部,春夏季浮游动物种类数量相近,在西南部,则是夏秋季浮游动物种类数量相近。

此外,如图6(b)所示,春季浮游动物种群密度在22.2%~55.6%之间,其中S5号点最高,在空间上表现出盐湖东北部、中部的浮游动物种群密度高于西南部,夏季种群密度在30.0%~80.0%之间,其中S7、S8、S9、S10号点的种群密度较高,夏季盐湖浮游动物种群密度在空间上表现为西南部>盐湖东北部和中部,而秋季浮游动物种群密度在空间上依然是呈现出西南部>东北部和中部。从时间变化特征来看,3个季节盐湖浮游动物的种群密度平均值则是夏季>秋季>春季。



(a)浮游动物种类数量变化



(b)浮游动物种群密度占比

图6 春夏秋冬各采样点浮游动物种类数量变化及其种群密度占比图

Fig.6 Changes in zooplankton species and population density proportions at each sampling site in spring, summer and autumn

2.2.2 个体密度与优势种

如图 7 所示,春季盐湖浮游动物的个体密度在 20~1 624 ind./L 之间,平均值为 485 ind./L,夏季浮游动物的个体密度在 48~2 284 ind./L 之间,平均值为 893 ind./L,而秋季在 36~1 986 ind./L 之间,平均值为 940 ind./L。从整体空间分布来看,春夏秋三季盐湖浮游动物个体密度均表现为西南部>东北部,且密度最大值采样点也都出现在盐湖西南部,但不同的是春季最大值出现在 S10 号点,而秋季出现在 S6 号点。

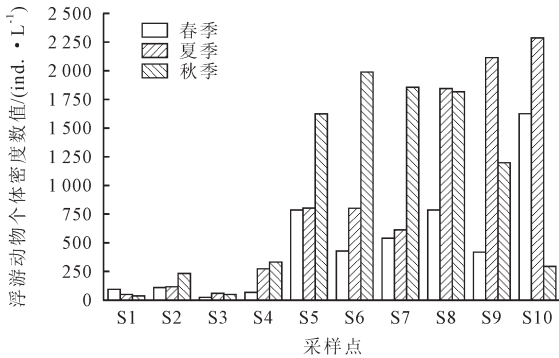


图 7 春夏秋冬各采样点浮游动物细胞密度分布图  
Fig.7 Zooplankton cell density distribution map of each sampling point in spring, summer and autumn

在时间上,3 个季节浮游动物的个体密度平均值则是秋季>夏季>春季。

此外,春季浮游动物优势种主要是褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*, 优势度  $Y$  在 0.222 5~0.921 3 之间) 和环顶六腕轮虫 (*Hexapoda longimana*,  $Y$  在 0.022 0~0.188 1 之间),前者轮虫优势度更高,见表 7。夏季浮游动物的优势种主要是褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*,  $Y$  在 0.020 4~0.782 2 之间)、中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*,  $Y$  在 0.052 0~0.368 6 之间)、锯缘真剑水蚤 (*Cyclops scyllarus*,  $Y$  在 0.032 6~0.133 3 之间),其中褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*) 优势度最高,且夏季整个盐湖都存在此物种,见表 8。而秋季优势种主要是无节幼体 (*Nauplius*,  $Y$  在 0.030 0~0.790 0 之间)、褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*,  $Y$  在 0.024 0~0.426 0 之间)、角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*,  $Y$  为 0.578 0),见表 9。从季节特征上来看,相同的是,春夏秋三季优势种都含有褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*),不同的是,夏季优势种相对于春季来说增加了桡足类,秋季相对于夏季来说优势种中轮虫类增加了角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*),桡足类也转变成了无节幼体 (*Nauplius*)。

表 7 春季各采样点浮游动物优势种及优势度结果表  
Table 7 Results of zooplankton dominant species and dominance at each sampling site in spring

采样点	优势种 1	拉丁名	优势种 2	拉丁名	优势种 3	拉丁名	优势种 4	拉丁名	优势度
S1	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.921
S2	旋匣壳虫	<i>Arcella gibbosa</i>	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>					0.205 0.223 0.040
S3	旋匣壳虫	<i>Arcella gibbosa</i>	半圆表壳虫	<i>Arcella hemisphaerica</i>	表壳圆壳虫	<i>Arcella</i>	盘状表壳虫	<i>Discoïd Roach</i>	0.160 0.040 0.040
S4	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.821
S5	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	环顶六腕轮虫	<i>Hexapoda longimana</i>					0.703 0.022
S6	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	环顶六腕轮虫	<i>Hexapoda longimana</i>					0.714 0.024
S7	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	环顶六腕轮虫	<i>Hexapoda longimana</i>					0.402 0.133
S8	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	环顶六腕轮虫	<i>Hexapoda longimana</i>					0.320 0.188
S9	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	环顶六腕轮虫	<i>Hexapoda longimana</i>					0.270 0.231
S10	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.856

2.2.3 多样性指数

由图 8 可见,春季盐湖浮游动物的 Simpson 多样性指数在 0.077 9~0.720 0 之间,平均值为 0.366 5,夏季盐湖浮游动物的 Simpson 指数在 0.213 7~0.777 8 之间,平均值为 0.544 7,而秋季在 0.197 5~0.793 8 之间,平均值为 0.595 7。从空间上看,春季浮游动物 Simpson 多样性指数从盐湖东北部到西南部为升高-降低-升高-降低的变化,故 S1 和 S10 号点 Simpson 指数较低,而

夏季浮游动物 Simpson 指数呈现出盐湖两端及其中部较高,内湖区域较低,秋季则是盐湖东北部和西南部 Simpson 指数大于中部。从时间上来看,浮游动物 Simpson 指数平均值表现为秋季>夏季>春季。

此外,春季浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数在 0.282 9~1.921 9 之间,平均值为 0.864 4,夏季在 0.736 1~2.404 4 之间,平均值为 1.583 3,而秋季在 0.503 3~2.492 6 之间,平均值为 1.745 1。浮游动物的

表 8 夏季各采样点浮游动物优势种及优势度结果表  
Table 8 Results of zooplankton dominant species and dominance at each sampling site in summer

采样点	优势种 1	拉丁名	优势种 2	拉丁名	优势种 3	拉丁名	优势种 4	拉丁名	优势度
S1	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	无节幼体	<i>Nauplius</i>	球状许水蚤	<i>Hypopyon</i>	锯缘真剑水蚤	<i>Cyclops scyllarus</i>	0.111 0.063 0.028 0.063 0.082 0.369
S2	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>					0.020 0.128 0.184
S3	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	无节幼体	<i>Nauplius</i>	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>			0.605 0.277
S4	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.033 0.052
S5	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	锯缘真剑水蚤	<i>Cyclops scyllarus</i>	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>			0.782 0.563
S6	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.461
S7	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.397
S8	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.028
S9	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.133 0.025 0.022
S10	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	锯缘真剑水蚤	<i>Cyclops scyllarus</i>	毛饰拟剑水蚤	<i>Paracyclops setiger</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>	

表 9 秋季各采样点浮游动物优势种及优势度结果表  
Table 9 Results of zooplankton dominant species and dominance at each sampling site in autumn

采样点	优势种 1	拉丁名	优势种 2	拉丁名	优势种 3	拉丁名	优势种 4	拉丁名	优势度
S1	无节幼体	<i>Nauplius</i>							0.790 0.087
S2	近剑水蚤	<i>Mesocyclops nearcticus</i>	无节幼体	<i>Nauplius</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	0.044 0.033 0.024 0.121
S3	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>	无节幼体	<i>Nauplius</i>	近邻剑水蚤	<i>Cyclops vicinus</i>	0.093 0.030 0.030
S4	近剑水蚤	<i>Mesocyclops nearcticus</i>							0.093 0.364
S5	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>	近邻剑水蚤	<i>Cyclops vicinus</i>			0.037 0.020
S6	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>							0.426
S7	角突臂尾轮虫	<i>Brachionus angularis</i>							0.578
S8	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>					0.112 0.042
S9	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	毛饰拟剑水蚤	<i>Paracyclops setiger</i>					0.315 0.035
S10	褶皱臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>	如愿真剑水蚤	<i>Eucyclops speratus</i>					0.149 0.025

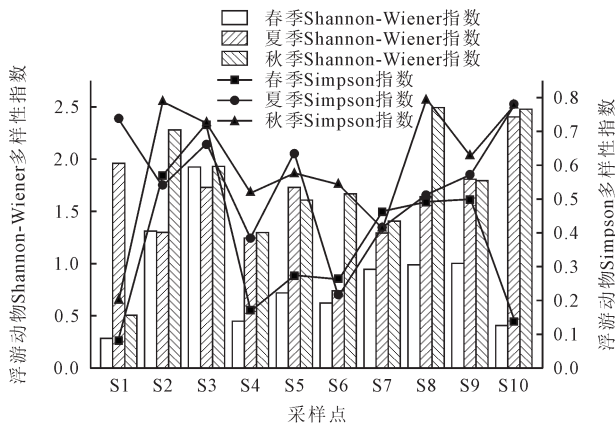


图 8 春夏秋冬各采样点浮游动物 Simpson、Shannon-Wiener 多样性指数变化图  
Fig.8 Changes in zooplankton diversity index of Simpsons and Shannon-Wiener at each sampling site in spring, summer and autumn

Shannon-Wiener 多样性指数空间分布特征和 Simpson 多样性指数一致。在时间上,也是秋季>夏季>春季。

### 2.2.4 丰富度与均匀度

由图 9 可见,春季盐湖各采样点浮游动物 Margalef 丰富度指数在 0.150 1~1.001 4 之间,平均值为 0.376 2,夏季 Margalef 丰富度指数在 0.423 9~0.936 0 之间,平均值为 0.776 1,而秋季在 0.279 1~1.058 2,平均值为 0.686 8。从整体空间分布特征来看,春季盐湖浮游动物 Margalef 丰富度指数呈现出东北部大于西南部,夏季 Margalef 丰富度指数表现为盐湖西南部和中部大于东北部,而秋季则是西南部大于中部和东北部。在时间上,浮游动物 Margalef 丰富度指数平均值表现为夏季>秋季>春季的特点。

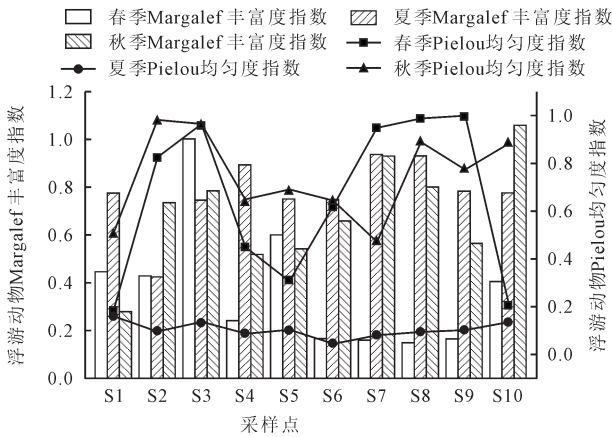


图9 春夏秋冬各采样点浮游动物Margalef丰富度、Pielou均匀度指数变化图

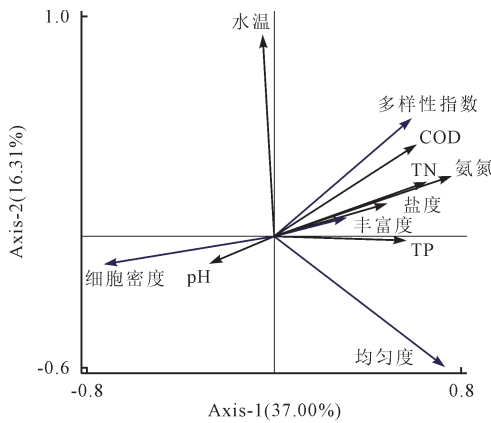
Fig.9 Changes in zooplankton Margalef richness and Pielou evenness index at each sampling point in spring, summer and autumn

在浮游动物 Pielou 均匀度指数方面,春季均匀度在 0.178 5~0.998 9 之间,平均值为 0.648 3,夏季在 0.045 2~0.160 2 之间,平均值为 0.104 3,而秋季在 0.468 8~0.980 7 之间,平均值为 0.744 6。从空间分布上来看,春季和秋季盐湖浮游动物 Pielou 均匀度指数

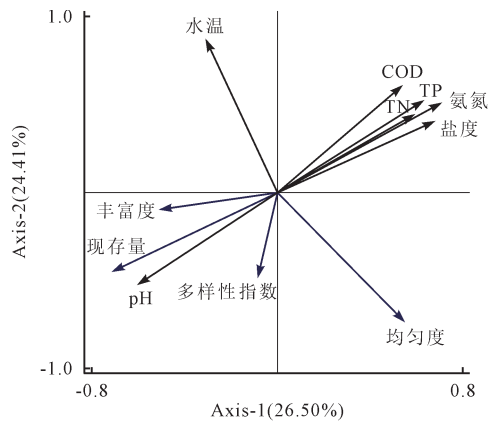
从东北部到西南部分布差异较大,且不均匀。但夏季盐湖的均匀度指数各采样点之间较为接近,空间变化较小。在时间上,呈现出秋季>春季>夏季的特点,且夏季各采样点均匀度指数都较低。

### 2.3 浮游生物多样性与水环境因子的相关性

如图 10 所示,通过 RDA 分析来研究盐湖浮游生物多样性特征与各类水环境因子之间的相关性,进而探究水环境因子对其的影响效果。结果表明,浮游动植物多样性变化是受多种水环境因子的共同影响,其中浮游植物多样性指数与水体中水温、COD、TN、TP、氨氮(NH<sub>4</sub>)、盐度呈正相关关系,响应强度为氨氮>COD>TN>水温>盐度>TP,且与 pH 呈负相关关系;而浮游动物多样性指数则与水体中水温、COD、TN、TP、氨氮、盐度呈负相关关系,且主要与水温、COD、氨氮、TP 的负响应较强,与 pH 呈正相关关系,和浮游植物恰好相反。其次,通过图 10 还可以发现,无论是浮游植物还是动物,它们的密度(现存量)都与 pH 呈正相关关系,与其他大多数水环境因子都成负相关关系。



(a)浮游植物群落特征与水环境因子的RDA分析图



(b)浮游动物群落特征与水环境因子的RDA分析图

图10 盐湖浮游生物群落特征与水环境因子的RDA分析图

Fig.10 RDA analysis of plankton community characteristics and water environment factors in salt lakes

此外,通过对浮游生物丰富度和均匀度与水环境因子做RDA分析可以发现,浮游生物的丰富度和均匀度也受多种水环境因子的共同影响,其中浮游植物丰富度与盐度、TN、氨氮、COD、TP显著正相关,与pH显著负相关,均匀度主要与TP、氨氮显著正相关,与水温负相关;而浮游动物丰富度主要与pH呈正相关关系,与氨氮、盐度、TN、TP、COD呈负相关关系,和浮游植物正好相反,但浮游动物的均匀度也主要与水温为显著负相关。由此可见,相同的是浮游动植物丰富度与水温关系都不太显著,但均匀度与水温均呈显著负相关,故夏季水温升高也是浮游动植物均匀度降低的主要原因。

## 3 讨论

### 3.1 群落结构

#### 3.1.1 门类分布和种类数量

本次分春夏秋冬三季在运城盐湖采集浮游生物,其中共检测出浮游植物6门69种,浮游动物4门20种。和其他盐湖相比,近年来关于巴里坤盐湖、西藏5个盐湖以及察尔汗盐湖区的浮游生物调查研究中表明,浮游植物均以硅藻和绿藻门为主<sup>[12,13,27]</sup>,浮游动物轮虫数量较大,这和本次研究结果一致。此外,运城盐湖浮游植物的门类数要高于西藏5个盐湖和察尔汗盐湖的调查结果,但低于巴里坤盐湖,种类数量比上述几

种盐湖都要高。在浮游动物方面,运城盐湖的门类数量比巴里坤、西藏盐湖都高,但种类数量却低于巴里坤盐湖<sup>[12-14]</sup>。这可能是由于各盐湖盐度不同,且海拔高低差异而导致各个盐湖的浮游生物门类、种类数量不同。其次察尔汗盐湖区海拔较高,且盐度相对较大,浮游生物物种数量最少,可见盐度和海拔越高,适合生存的浮游生物种类也就越少<sup>[13]</sup>。和淡水湖泊相比,根据山西漳泽湖泊和册田水库中浮游生物的群落结构特征,可以发现盐湖中浮游生物的门类分布和种类数量都小于淡水湖泊<sup>[28,29]</sup>,且盐湖浮游植物中没有检出金藻门和黄藻门,这是由于金藻门和黄藻门的生物主要生活在淡水域<sup>[29]</sup>,且大多数的浮游生物都适应于淡水环境,只有少量的耐盐种可在高盐水体中存活<sup>[30]</sup>。

### 3.1.2 优势种

本次采样检测中,3个季节运城盐湖中浮游植物优势种均以硅藻门和绿藻门为主,这和巴里坤盐湖、察尔汗盐湖区、西藏等5个盐湖的检出结果较为一致,而淡水湖泊优势种主要集中在绿藻门和蓝藻门。这是因为硅藻门所处的浮游植物结构简单,能够适应不同环境的水域,且耐盐性能极好,在盐度较大的水域中能够更好的繁殖<sup>[12-14,28-31]</sup>。另外,本次运城盐湖浮游动物的优势种主要是褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)、中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)和无节幼体(*Nauplius*),基本都是轮虫和桡足类,这与巴里坤盐湖浮游生物群落的研究结果较为相似<sup>[14]</sup>。尤其是褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*),3个季节均为优势种,且优势度大多均处于该采样点的最高值,杨欢等<sup>[12]</sup>在对西藏5个盐湖浮游生物组成与微生物多样性的研究中也发现了褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*),此物种最适温度为25~30℃之间,低于10℃则会死亡,可见夏季盐湖的水温在27℃左右,春秋季水温在10℃以上,其次,该物种抗盐能力和环境适应力强,能在盐湖中生产和繁殖。在季节变化方面,春季优势种主要是原生动物和轮虫类,而从夏季开始一直到秋季,优势种原生动物

消失,桡足类的种类和数量变多,轮虫种类减少,但数量剧增,这是因为从夏季开始,桡足类也开始变为成虫,到夏末秋初期间大量繁殖,故夏季开始桡足类数量急剧加大。

历年来,对运城盐湖浮游生物的研究较少,最早是王宏毅等<sup>[15]</sup>在对山西运城盐湖浮游生物初步研究中表明,浮游植物以硅藻门和绿藻门为主,浮游动物以原生动物和轮虫为主,且原生动物春季较多。其次,浮游动物中也大量检测出褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*),浮游植物种类春季高于夏季,浮游动物中原生动物出现在春季,轮虫类和桡足类主要出现在夏秋季<sup>[15]</sup>,以上都与本次的检出结果较为一致,但本次未检出黄藻门,这表明近年来黄藻风险的治理效果良好。最近的一次则是2016年吕虹瑞等<sup>[17]</sup>对运城盐池湖区藻类植物组成及其与盐度的关系进行了研究,通过对比,本次浮游植物中栅藻属(*Scenedesmus*)、脆杆藻属(*Fragilaria*)、舟形藻属(*Navicula*)、鳞孔藻属(*Lepocinclis*)等优势属消失,但增加了小环藻属(*Cyclotella*)、小球藻属(*Chlorella*)、卵囊藻属(*Oocystis*)、隐藻属(*Cryptomonas*)等优势属。大量的小环藻(*Cyclotella*)和尖针杆藻(*Synedra acus*)在此繁殖,说明水体正处于弱碱性和趋于富营养化方向<sup>[32]</sup>,且与春季不同的是,夏秋季盐湖西南部都具有大量的蓝隐藻(*Cryptophyta theta*),此物种对温度和光照的适应性强,适合在盐度不太高、有机质(氮磷)丰富、水流速度小且水温较高的环境中生存繁殖<sup>[4]</sup>。而夏季平均水温可达27.35℃,秋季为22.00℃,当夏季水温升高,蓝隐藻(*Cryptophyta theta*)便开始大量繁殖,同时也说明夏秋季盐湖西南部水域盐度相对于东北部较低,且氮磷含量丰富、水流速度极小,通过对夏秋季水质指标的检测(表10),结果证明符合实际情况。但是值得注意的是,蓝隐藻(*Cryptophyta theta*)的大量繁殖会影响水质、降低水体溶解氧、影响水生生物的生存和繁殖,以及可能产生有毒物质,还能改变pH,导致其他物种无法生存,降低盐湖浮游生物的多样性<sup>[4]</sup>。

表10 夏秋季盐湖西南部各采样点水质指标

Table 10 Water quality indicators of sampling sites in the southwest of salt lake in summer and autumn

夏季	S6	S7	S8	S9	S10	秋季	S6	S7	S8	S9	S10
水温/℃	27.38	27.30	27.65	27.31	27.13	水温/℃	22.31	21.58	23.74	19.98	22.41
pH	8.60	8.54	8.53	8.60	8.57	pH	8.68	8.70	8.70	8.68	8.72
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	8.11	9.59	10.73	12.13	11.6	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	9.68	9.06	8.96	7.94	8.58
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.138	0.223	0.140	0.173	0.146	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.193	0.183	0.167	0.172	0.186
盐度/(mg·L <sup>-1</sup> )	32.20	32.00	31.00	31.20	31.10	盐度/(mg·L <sup>-1</sup> )	30.30	29.90	28.10	27.90	28.00

## 3.2 多样性

### 3.2.1 Shannon-Wiener 多样性

根据史楠楠等<sup>[14]</sup>对巴里坤盐湖浮游生物群落特征的研究,春夏秋季浮游植物的Shannon-Wiener多样

性指数平均值分别为 2.104、2.153、2.307,浮游动物分别为 2.073、2.623、1.586。与之相比,运城盐湖浮游植物春夏秋冬的 Shannon-Wiener 指数都要高于巴里坤盐湖,但浮游动物除秋季外,整体上都要低于巴里坤盐湖。由于巴里坤盐湖海拔较高(约为 1 585 m),且受水位波动的影响,盐度变化较大,而运城盐湖海拔相对较低(约为 324 m),水温和气候温度变化趋势较为一致<sup>[3,7]</sup>,这可能是影响 2 个盐湖浮游生物多样性指数差异的主要原因。和淡水湖泊相比,运城盐湖浮游动植物的 Shannon-Wiener 多样性指数都比漳泽湖要低<sup>[31]</sup>,这可能是盐度差异所导致。从运城盐湖浮游生物多样性指数在季节时间变化上的特征来看,浮游植物是夏季>春季>秋季,且春秋两季的多样性指数较为接近,浮游动物则是秋季>夏季>春季,在空间分布上,各个季节也各有差异。此外,由于国内外尚未建立盐湖水质环境评价标准,因此浮游生物多样性指数仅用于评价盐湖物种多样性、丰富度和均匀度<sup>[33]</sup>。

### 3.2.2 丰富度和均匀度

和新疆巴里坤盐湖的浮游生物群落特征相比,运城盐湖春夏秋冬浮游植物的丰富度指数均低于巴里坤盐湖,且 2 个盐湖各季节丰富度指数的平均值相差不大<sup>[14]</sup>。其次,春夏季浮游动物的丰富度指数也均低于巴里坤盐湖,只有秋季略高<sup>[14]</sup>。此外,在均匀度方面,春秋两季盐湖浮游植物的均匀度略高于巴里坤盐湖,夏季浮游植物均匀度低于巴里坤盐湖,且春夏秋冬浮游动物的均匀度均低于巴里坤盐湖<sup>[14]</sup>。这可能是由于运城盐湖和巴里坤盐湖海拔和盐度不同而引起的差异。和淡水湖泊相比,运城盐湖浮游动植物的丰富度指数均低于册田水库和漳泽湖泊,但其均匀度与其相差不大<sup>[29,31]</sup>,可见盐湖盐度对浮游生物均匀度指数的变化影响不大。且通过 RDA 分析,证实浮游生物的均匀度指数和盐度的响应关系极小,是不显著的。此外,从季节时间变化上看,运城盐湖浮游植物的丰富度是春季>夏季>秋季,浮游动物的丰富度是夏季>秋季>春季,但均匀度又是秋季>春季>夏季,这些结果均与巴里坤盐湖的研究结果相似<sup>[14]</sup>。从空间分布上看,春夏秋冬运城盐湖浮游生物均匀度和丰富度分布特征受多种因素影响各有差异。总体而言,通过本次研究分析,运城盐湖浮游生物各类多样性指数较低且结构简单,生态环境脆弱,易受破坏。

### 3.3 水环境因子对浮游生物的影响

通过研究盐湖水质环境因子与浮游动植物各种多样性指数之间的相关性,进而探究影响浮游生物多样性变化的主要水环境因子,发现运城盐湖浮游生物群

落多样性的时空分布特征受多种水环境因子的共同影响,其中浮游生物多样性指数主要与  $\text{NH}_4$ 、COD、pH、盐度、水温显著相关,丰富度指数主要与  $\text{NH}_4$ 、盐度、TN、TP、pH 显著相关,而均匀度指数与水温呈显著负相关。和高海拔盐湖相比,史楠楠等<sup>[14]</sup>对高海拔的新疆巴里坤盐湖浮游生物研究中表明,浮游生物群落的多样性变化主要与盐度和水温有关,且盐度的升高会使浮游动物的多样性降低。其次,与海拔相对稍高的咸化湖泊相比,刘静等<sup>[34]</sup>对额河流域 3 个咸化湖泊浮游生物的初步研究中表明,浮游植物的多样性主要与盐度和 pH 显著相关,且与盐度呈正相关关系,以上这些都与本次研究结果一致。但和这些湖泊不同的是,运城盐湖浮游生物多样性特征还受到 TN、TP、 $\text{NH}_4$ 、COD 等其他水体理化因子的强影响作用,这可能是由于运城盐湖海拔相对于上述几个湖泊较低,且受人为和工业活动影响更大<sup>[14,34]</sup>,导致水体中的其他理化因子易引起浮游生物群落发生变化。和淡水湖泊相比,刘子萌等<sup>[29]</sup>对漳泽水库浮游植物的研究表明,水温、高锰酸盐指数、TP、DO 是影响浮游植物群落结构的关键因素,且宋高飞等<sup>[35]</sup>对武汉市湖泊浮游动物的研究表明,TN、TP、COD 和 Chl-*a* 是影响浮游动物多样性的主要因子。可见,无论是淡水湖泊还是低海拔的运城盐湖,TN、TP、COD 都是影响湖泊浮游生物群落多样性的主要因素,而淡水湖中浮游生物没有盐度对其的影响。综上所述,对于低海拔高盐度的运城盐湖来说,在影响浮游生物的水环境因子中,不仅要考虑盐度的变化,还要考虑 TN、TP、 $\text{NH}_4$ 、COD、水温等其他因素带来的影响。

## 4 结论

(1)春夏秋冬共检测出浮游植物 6 门 69 种,均以硅藻门和绿藻门为主,物种总数和丰富度呈现出春季>夏季>秋季的特点,细胞密度和均匀度表现为春季>秋季>夏季,多样性指数则是夏季>春季>秋季,优势种上发生了由硅藻门到绿藻-隐藻门的转变。此外,不同季节浮游植物群落和多样性特征在空间分布上各有差异。

(2)春夏秋冬共检测出浮游动物 4 门 20 种,数量均以轮虫门居多,物种总数和丰富度呈现出夏季>秋季>春季的特点,个体密度和多样性指数表现为秋季>夏季>春季,均匀度则为秋季>春季>夏季,优势种中 3 个季节都含有褶皱臂尾轮虫,分布广且数量大。此外,不同季节浮游动物群落和多样性特征在空间分布上各有差异。

(3)浮游生物群落和多样性的时空分布特征受多种水环境因子的共同影响,其中细胞密度(现存量)主

要与NH<sub>4</sub>、TN、盐度显著相关,多样性指数主要与NH<sub>4</sub>、COD、pH、盐度、水温显著相关,丰富度指数主要与NH<sub>4</sub>、盐度、TN、TP、pH显著相关,而均匀度指数都与水温呈显著负相关。

#### [参考文献]

- [1] 王家利,王芳. 盐湖微微型浮游植物多样性研究进展[J]. 生态学报, 2014,34(2):282-293.  
Wang Jiali, Wang Fang. Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(2):282-293.
- [2] 代晶晶,白龙洋,吴畅宇. 遥感技术在现代盐湖研究中的应用现状及发展前景[J]. 地质与勘探, 2025,61(2):279-287.  
Dai Jingjing, Bai Longyang, Wu Changyu. Application status and development prospects of remote sensing technology in modern salt lakes research[J]. Geology and Exploration, 2025,61(2):279-287.
- [3] 李沛蓉,樊青卓,李蓉蓉,等. 运城盐湖湿地入侵植物多样性及区系特征[J]. 生态学杂志, 2025,2(26):1-10.  
Li Peirong, Fan Qingzhuo, Li Rongrong, et al. Diversity and floristic characteristics of invasive plants in Yuncheng Salt Lake Wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,2(26):1-10.
- [4] 王飞鹏,李超,李砧,等. 运城盐湖藻类植物资源研究进展[J]. 盐业与化工, 2014,43(3):5-7.  
Wang Feipeng, Li Chao, Li Zhen, et al. Review of algae in Yuncheng Salt Lake[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2014,43(3):5-7.
- [5] Lim A S, Park N Y, Choi H S, et al. Influence of environmental parameters on marine plankton diversity in the southern coastal waters of Korea: emphasis on thermal stratification[J]. Marine Environmental Research, 2025,203:106829.
- [6] Zhang H X, Zheng J N, Wang R, et al. Response of lake phytoplankton to climate oscillation on the northeastern Tibetan Plateau: evidence from a 1400-year-old sedimentary archive[J]. Science Bulletin, 2024,69(9):1208-1211.
- [7] 张宇,张婕,郭东罡. 运城盐湖生物多样性研究:过去、挑战与未来[J]. 新兴科学和技术趋势, 2024(4):333-344.  
Zhang Yu, Zhang Jie, Guo Donggang. Research on biodiversity in Yuncheng Salt Lake: past, challenges, and future[J]. Emerging Science and Technology Trends, 2024(4): 333-344.
- [8] Oliva M G, Lugo A, Alcocer J, et al. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake[J]. Hydrobiologia, 2001,466(1):299-306.
- [9] Harper D M, Childress R B, Harper M M, et al. Aquatic Biodiversity and Saline Lakes: Lake Bogoria National Reserve, Kenya[M]// Aquatic Biodiversity: a Celebratory Volume in Honor of Henri J Dumont. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003:259-276.
- [10] Gerasimova E A, Balkin A S, Filonchikova E S, et al. Taxonomic structure of planktonic protist communities in saline and hypersaline continental waters revealed by metabarcoding[J]. Water, 2023,15(11):2008.
- [11] Arunpandi N, Jyothibabu R, Jagadeesan L, et al. Response of smaller plankton to the saltwater barrage-altered hydrography of a tropical estuarine system on India's southwest coast[J]. Ocean & Coastal Management, 2022,226:106257.
- [12] 杨欢,高美荣,韩学凯,等. 西藏五个盐湖浮游生物组成与微生物多样性[J]. 天津科技大学学报, 2022,37(5):30-37.  
Yang Huan, Gao Meirong, Han Xuekai, et al. Planktonic composition and microbial biodiversity in five salt lakes in Tibet[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2022,37(5):30-37.
- [13] 余冬梅,王建萍,陈亮,等. 察尔汗盐湖区生物种类调查及评价[J]. 盐湖研究, 2022,30(2):27-41.  
Yu Dongmei, Wang Jianping, Chen Liang, et al. Investigation of biological species on ecological environment in Qarhan Salt Lake area[J]. Journal of Salt Lake Research, 2022, 30(2):27-41.
- [14] 史楠楠,王智超,程勇,等. 新疆巴里坤盐湖浮游生物群落特征分析[J]. 水产学杂志, 2023,36(6):78-86.  
Shi Nannan, Wang Zhichao, Cheng Yong, et al. Characteristics of plankton community structure in Barkol Salt Lake, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023,36(6):78-86.
- [15] 王宏毅,张志端,高仁恒,等. 山西运城盐湖浮游生物初步研究[J]. 山西师大学报:自然科学版, 1988,2(S1):28-40.  
Wang Hongyi, Zhang Zhiduan, Gao Renheng, et al. Preliminary study on plankton in Yuncheng Salt Lake, Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi Teacher's University: Natural Science Edition, 1988,2(S1):28-40.
- [16] 李砧,谢树莲. 山西运城盐池湖区藻类及分布[J]. 湖泊科学, 2006,18(2):189-192.  
Li Zhen, Xie Shulian. Study on species and distribution of algae in salt lakes area in Yuncheng, Shanxi Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2006,18(2):189-192.
- [17] 吕虹瑞,王飞鹏,李超,等. 运城盐池湖区藻类植物组成及与盐度关系[J]. 山西大学学报:自然科学版, 2016,39(1):140-145.  
Lyu Hongrui, Wang Feipeng, Li Chao, et al. Floristics of algal and relationship with salinity around Yuncheng Salt Lake [J]. Journal of Shanxi University: Natural Science Edition, 2016,39(1):140-145.
- [18] 谢树莲,冯佳,高帆,等. 近十年运城盐湖藻类植物资源研究进展[J]. 新兴科学和技术趋势, 2023(4):376-381.  
Xie Shulian, Feng Jia, Gao Fan, et al. Progress on algal resources in Yuncheng Salt Lake in the past decade[J]. Emerging Science and Technology, 2023(4):376-381.
- [19] 寇琳琳,李振宏,夏彩香,等. 运城盐湖形成演化与盐离子来源[J]. 地质力学学报, 2024,30(6):933-951.

- Kou Linlin, Li Zhenhong, Xia Caixiang, et al. Formation and evolution of Yuncheng Salt Lake and sources of the saline ions[J]. *Journal of Geomechanics*, 2024,30(6):933-951.
- [20] 吴天浩,侯泽英,喻秋,等. 云贵高原典型湖泊浮游植物群落结构变化及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2023,43(12):231-237.
- Wu Tianhao, Hou Zeying, Yu Qiu, et al. Changes and influencing factors of phytoplankton community structure in a typical lake of Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023,43(12):231-237.
- [21] 李思嘉,侯敏驰,黄少峰,等. 抚仙湖丰水期与枯水期浮游生物群落对比研究[J]. *环境保护*, 2021,49(19):31-34.
- Li Sijia, Hou Minchi, Huang Shaofeng, et al. Comparisons in plankton community during wet and dry seasons in Fuxian Lake[J]. *Environmental Protection*, 2021,49(19):31-34.
- [22] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration. *Methods for Water and Wastewater Monitoring and Analysis*[M]. 4th edition. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [23] 黄中情,张志萍,沈剑,等. 洱海浮游植物群落结构变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2025,46(6):3393-3405.
- Huang Zhongqing, Zhang Zhiping, Shen Jian, et al. Changes of phytoplankton community structure in Erhai Lake and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3393-3405.
- [24] Mohan J, Saros J, Stone J R. On the matter of phytoplankton: a novel method using 3D computer models to calculate biovolume of microorganisms[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2021,19(5):331-339.
- [25] 孟洋洋,王丽雅,朱睿,等. 青藏高原湖泊浮游植物群落结构特征与驱动因素[J]. *湖泊科学*, 2025,37(2):415-428.
- Meng Yangyang, Wang Liya, Zhu Rui, et al. Characteristics and driving factors of phytoplankton community structure in lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025,37(2):415-428.
- [26] 陈立婧,杨菲,吴淑贤,等. 西藏那曲地区盐湖浮游植物群落结构的特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2013,22(4):577-585.
- Chen Lijing, Yang Fei, Wu Shuxian, et al. Characteristics of community structures of phytoplankton in the salt lakes in Naqu Region, Tibet[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013,22(4):577-585.
- [27] 史楠楠. 巴里坤盐湖浮游生物多样性研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2022.
- Shi Nannan. *Plankton Diversity of Barkol Salt Lake in Xinjiang, China*[D]. Ala'er: Tarim University, 2022.
- [28] 刘子萌,冯民权,杨锐婧,等. 漳泽水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *黑龙江大学工程学报(中英俄文)*, 2024,15(1):76-84.
- Liu Zimeng, Feng Minquan, Yang Ruijing, et al. Characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in Zhangze Reservoir[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2024,15(1):76-84.
- [29] 耿志远,赵乐乐,贾欣,等. 山西省册田水库浮游生物群落结构的季节差异及功能群特征[J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(1):101-113.
- Geng Zhiyuan, Zhao Lele, Jia Xin, et al. Seasonal differences and functional group characteristics of plankton community structure in Cetian Reservoir in Shanxi Province[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024,39(1):101-113.
- [30] 崇璘璇,贾沁贤,刘喜方,等. 西藏多格错仁盐湖表、底层浮游植物群落结构[J]. *上海海洋大学学报*, 2018,27(6):875-883.
- Chong Linxuan, Jia Qinxian, Liu Xifang, et al. Phytoplankton community structures in surface and bottom layers of the Dogai Coring Salt Lake, Northern Tibet[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018,27(6):875-883.
- [31] 刘子萌,冯民权,杨锐婧,等. 漳泽水库浮游生物群落结构和鲢、鳙食性及鱼产力评估[J]. *西安理工大学学报*, 2024,40 (3):392-399.
- [32] 魏南. 松花江哈尔滨段丰水期浮游植物多样性格局及环境相关性研究[J]. *黑龙江环境通报*, 2018,31(3):86-91.
- Wei Nan. Relationship between phytoplankton diversity and environment in Harbin Section of Songhua River[J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2018,31(3):86-91.
- [33] 戚春玲,尤斌,常玉婷. 艾比湖高背景指标对湖水水环境的影响[J]. *干旱环境监测*, 2021,35(3):107-111.
- Qi Chunling, You Bin, Chang Yuting. Effect of high background index on water environment of Ebinur Lake[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2021,35(3):107-111.
- [34] 刘静. 额河流域三个咸化湖泊浮游生物、大型底栖动物多样性初步研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2024.
- [35] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等. 武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J]. *河南师范大学学报:自然科学版*, 2022, 50(3):135-142.
- Song Gaofei, Zhu Yuxuan, Mi Wujuan, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. *Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition*, 2022,50(3):135-142.