

# 西藏浪错夏季大型浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系

扎西拉姆,周建设,王万良,张 驰,陈美群,刘海平,何文佳

(西藏自治区农牧科学院水产科学研究所/西藏土著鱼类繁育与利用技术工程研究中心,西藏 拉萨 850032)

**摘 要:**为探究西藏浪错大型浮游动物群落结构特征及其环境因子的关系,于2017年7月对西藏浪错大型浮游动物进行了调查。结果鉴定出大型浮游动物5门10种(属),密度变化范围在24.15~148.20个/L之间,平均密度为74.24个/L,生物量变化范围为0.84~2.62 mg/L。平均生物量为1.80 mg/L,该湖大型浮游动物生物量偏低,物种单一。对生物参数与环境因子进行Pearson相关分析得到,物种数与电阻呈显著负相关( $p<0.05$ )。典范对应分析结果显示,环境因子酸碱度、水温、溶解氧和氧化还原电位对浪错大型浮游动物的群落结构影响较明显;其中优势种无节幼体受温度的影响最显著。

**关键词:**大型浮游动物;种类组成;环境因子;西藏浪错

中图分类号:S932.8

文献标志码:A

## Relationship Between Large Zooplankton Community Structure Characteristics and Environmental Factors in Summer in Lang Tso Lake, Tibet

Zhaxilamu, ZHOU Jianshe, WANG Wanliang, ZHANG Chi, CHEN Meiqun, LIU Haiping, HE Wenjia

(Institute of Fishery Sciences, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences/Tibet Native Fish Breeding and Utilization Technology Engineering Research Center, Tibet Lhasa 850032, China)

**Abstract:** In order to explore the relationship between large zooplankton community structure and environmental factors in summer in Lang Tso lake, Tibet, the Large zooplankton in Lang Tso lake was investigated in July 2017. The results showed that there were 5 phyla and 10 species (genera) of large zooplankton, the density ranged from 24.15~148.20 ind./L, the average density was 74.24 ind./L, the biomass ranged from 0.839 to 2.616 mg/L, and the average biomass was 1.800 mg/L. The biomass of large zooplankton in the lake was low and the species were single. Pearson correlation analysis between biological parameters and environmental factors showed that the number of species was significantly negatively correlated with resistance ( $P<0.05$ ). Canonical correspondence analysis showed that environmental factors such as power of hydrogen, water temperature, dissolved oxygen and oxidation reduction indicator had a significant impact on the large zooplankton community in Lang Tso lake. Temperature had a significant effect on nauplius. The results of this survey provide basic data for the protection and scientific development and utilization of aquatic biodiversity in the water area, and fill the blank of the study on the community structure of large zooplankton in Lang Tso lake, Tibet.

**Key Words:** Large zooplankton; Species composition; Environmental factors; Lang Tso lake

浮游动物在水体中以体积较小的浮游植物、原生动物、细菌以及一些有机碎屑为食,同时为鱼类和其他大型水生生物的主要生物饵料<sup>[1]</sup>。因此,浮游动物是水域生态系统中一个重要的生物群体,在水生生态系统的能量流动和营养循环中发挥着重

要作用<sup>[2-3]</sup>。前人根据浮游动物个体大小将其分为巨型、大型、中型、小型和微型等5类<sup>[4]</sup>。此外,浮游动物的生命周期能够对水体中物理、化学和生物等参数的变化作出快速的反应,可以作为评价水体健康程度的极佳生物指标<sup>[5-6]</sup>。湖泊浮游动物群落结构状态可能受到许多环境因素的影响,比如其他生物的繁殖<sup>[7]</sup>,还有存在一些非生物条件,如温度、溶解氧、电导率和pH值等环境因子的变化<sup>[8-11]</sup>。

浪错地处西藏日喀则市昂仁县东南部<sup>[12]</sup>,经纬度分别为87°23'5.46"E和29°12'33.45"N,湖面海拔

收稿日期:2021-09-07

基金项目:农业农村部财政专项“西藏重点水域渔业资源与环境调查”。

作者简介:扎西拉姆(1983-),女,助理研究员,主要从事水生生物与生态环境研究,E-mail:Zhaxilhamu@163.com。

4 300 m,是一个面积为 12.1 km<sup>2</sup>高原淡水湖泊。据文献记载,该湖有硬刺裸鲤(*Gymnocypris scleracanthus*)和兰格湖裸鲤(*Gymnocypris chui*)两种西藏特有经济鱼类生存<sup>[13-15]</sup>,研究其生物资源具有较大的科学意义。对流域浮游动物的研究在环境生物学、湖泊学以及生态资源的利用与保护等领域均具有重要的意义。目前由于交通及自然环境条件的限制,对西藏地区湖泊水生生物方面的科学研究十分薄弱,未见到浪错浮游动物的研究报告。本研究主要针对桡足类、枝角类和无节幼体等大型浮游动物进行群落结构调查,旨在填补浪错大型浮游动物群

落结构的研究空白,为该水域水生生物的多样性保护和开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点布设

通过对浪错实地考察,设置 5 个浮游生物采样点,在入水口和出水口各设置 1 个采样点,分别为 S5 和 S4;在浪错北侧小岛内侧设 1 个站点,为 S1;S1-S5 和 S1-S4 之间各设一个采样点,分别为 S2 和 S3;一共有 S1,S2,S3,S4,S5 等 5 个采样断面(图 1)。

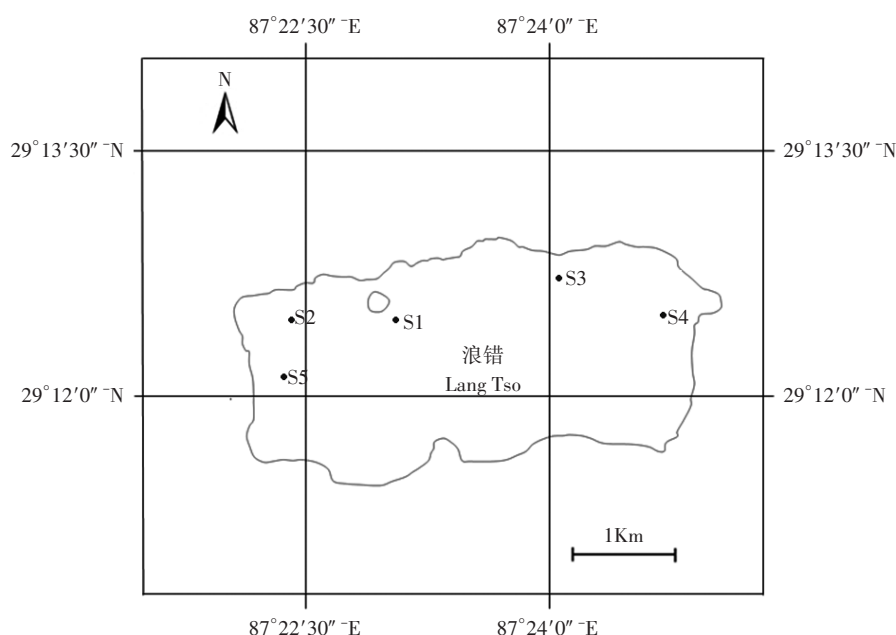


图 1 采样点分布图

### 1.2 样本采集与处理

大型浮游动物定量采集利用 1 L 有机玻璃采水器在距离水面 0.5 m 的水层中混合取 10 L 水样,用 13 号浮游生物网过滤<sup>[16]</sup>,过滤后留 50 mL 水样装瓶,现场用 5% 甲醛液固定。带回实验室静置沉淀 48 h,浓缩至 30 mL,倒入定量瓶中以备观察计数。每样取浓缩液 1 mL 在 1 mL 浮游动物记数框中镜检。逐一统计各种类浮游动物的个体数量,每瓶标本计数 2 片,取其平均值,2 片计数误差必须≤15%,否则要进行第 3 片计数,直至符合要求。生物种类利用 Nikon 50i 显微镜观察并鉴定。物种鉴定参照《淡水微型生物图谱》<sup>[17]</sup>《中国淡水轮虫志》<sup>[18]</sup>《中国动物志淡水桡足类》<sup>[19]</sup>和《中国动物志淡水枝角类》<sup>[20]</sup>。

### 1.3 计算浮游动物的优势度

根据公式  $Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$  计算得出 Simpson 优势度指数( $Y$ )。式中: $N$ 为所有物种的总密度, $n_i$ 为物种 $i$ 的密度, $f_i$ 为第 $i$ 种出现的比例<sup>[21]</sup>。

### 1.4 水质理化测量

现场使用便携式(YSI Pro30)测量溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)、电阻(Resistance, Res)、水温(Water temperature, WT)、酸碱度(Power of hydrogen, pH)和氧化还原电位(Oxidation reduction indicator, ORP);使用 FluoroQuik 水体叶绿素 A 荧光测定仪测定叶绿素 A(Chlorophyll A, Chl-a)的质量浓度,测量结果见表 1。

表1 各采样点部分理化指标

采样点	DO /(mg·L <sup>-1</sup> )	ORP /mV	WT /°C	Res /Ω	pH	Chl-a /(mg·L <sup>-1</sup> )
S1	6.32	28.40	12.10	1 959.00	9.86	2.36
S2	6.28	32.80	12.20	1 963.00	9.68	1.79
S3	5.99	39.30	12.80	1 956.00	9.93	2.64
S4	6.03	17.60	12.40	1 963.00	9.97	5.19
S5	6.15	30.50	12.70	1 962.00	9.95	1.83

1.5 数据处理与分析

采用 Excel2007 统计并处理数据,数据绘图使用统计分析软件 R 语言(R Programming Language);对生物参数与环境因子用 R 软件包进行典范对应分析(CCA)和 Pearson 相关性分析。用 Excel2007 计算出 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ ),3 个指标具体运算公式为:<sup>[21-25]</sup>

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$D = (S - 1)/\ln N \tag{2}$$

$$J = H'/\ln S \tag{3}$$

式中: $P_i$ 为第*i*种的个体所占比例,即 $P_i=n_i/N$ ;S为物种数;N为个体总数。

2 结果与分析

2.1 生物群落结构

对浪错 5 个采样点的大型浮游动物水样鉴定结果表明,共检出大型浮游动物 5 门 10 种(属),其中原生动物 1 种(属),占总数的 11.11%;轮虫 1 种(属),占总数的 11.11%;枝角类 5 种(属),占总数的 55.56%;桡足类 2 种(属),占总数的 22.22%;无节幼体 1 种(属),占总数的 11.11%(表 2)。各样点的浮游动物密度和生物量分布见表 3,各采样点浮游动物平均密度为 74.24 个/L,密度变化区间为 24.15~

表2 生物群落组成及其优势度

门类	种属名	拉丁名	优势种					比例/%
			S1	S2	S3	S4	S5	
原生动物	累枝虫	<i>Epistylis sp.</i>	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	11.11
轮虫	奇异巨腕轮虫	<i>Pedaliemira</i>	0.00	0.43	0.00	0.02	0.00	11.11
	长刺溞	<i>Daphnia longispina</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	方形网纹溞	<i>Ceriodaphniaquadrangula</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
枝角类	中型尖额溞	<i>Alonaintermedia</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.56
	老年低额溞	<i>Simocephalusvetulus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	圆形盘肠溞	<i>Chydorussphaericus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
桡足类	新月北镖水蚤	<i>Arctodiaptomusstewartianus</i>	0.89	0.00	0.06	0.02	0.40	22.22
	大型中镖水蚤	<i>Sinodiaptomussarsi</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
—	无节幼体	<i>nauplius</i>	0.00	0.11	0.44	0.55	0.13	11.11
优势度≥0.02 的种类数			1	2	2	3	2	—

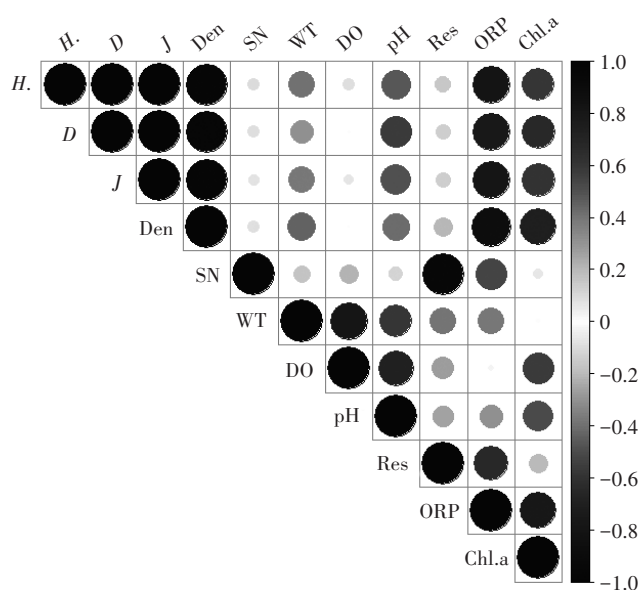
148.20 个/L;生物量变化范围为 0.84~2.62 mg/L,平均生物量为 1.81 mg/L。Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ )平均值分别为 0.28,2.30,0.21。密度组成上以无节幼体为主,其次为轮虫和桡足类。

2.2 生物参数与环境因子的 Pearson 相关性分析

为研究浪错浮游动物与水体环境之间的关系,将西藏浪错夏季浮游动物群落特征参数与环境因子作 Pearson 相关性分析,结果(图 2)显示:各项生物参数与环境因子之间的相关性良好,物种数 SN 与电阻 Res 呈显著负相关( $p<0.05$ )。

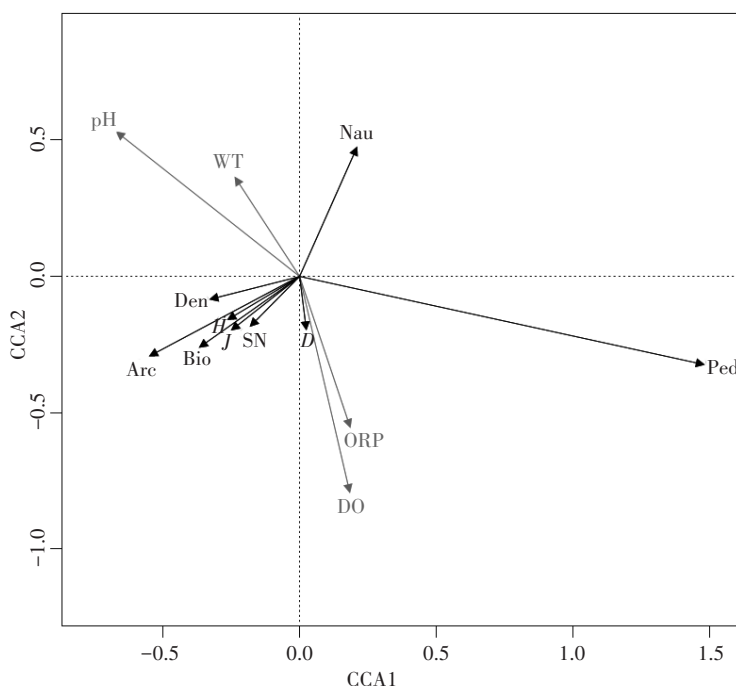
表3 大型浮游动物密度、生物量及其生物参数

采样点	种数	密度 /(个·L <sup>-1</sup> )	生物量 /(mg·L <sup>-1</sup> )	$H'$	$D$	$J$
S1	1	122.60	2.43	0.37	1.87	0.28
S2	1	24.15	0.93	0.18	2.83	0.14
S3	5	30.20	0.84	0.20	2.64	0.16
S4	2	148.20	2.23	0.37	1.80	0.28
S5	1	46.10	2.62	0.26	2.35	0.20
合计	10	371.25	9.04	1.37	11.49	1.06
平均数	2	74.25	1.81	0.28	2.30	0.21



图中  $H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数;  $D$  为 Margalef 丰富度指数;  $J$  为 Pielou 均匀度指数;  $Den$  为密度;  $SN$  为物种数;  $WT$  为水温;  $DO$  为溶解氧;  $pH$  为酸碱度;  $Res$  为电阻;  $ORP$  为氧化还原电位;  $Chl.a$  为叶绿素 A 的质量浓度。

图2 生物参数与环境因子的 Pearson 相关分析 ( $n=5$ )



$H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数;  $D$  为 Margalef 丰富度指数;  $J$  为 Pielou 均匀度指数;  $Den$  为密度;  $Bio$  为生物量;  $SN$  为物种数;  $Ped$  为优势种奇异巨腕轮虫;  $Arc$  为优势种新月北镖水蚤;  $Nau$  为优势种无节幼体;  $WT$  为水温;  $DO$  为溶解氧;  $pH$  为酸碱度;  $ORP$  为氧化还原电位。

图3 生物参数与环境因子的典范对应分析 (CCA)

### 3 讨论

本次调查结果显示浮游动物种类组成上与雅鲁藏布江和其支流尼洋河的浮游动物调查结果基

### 2.3 生物参数与环境因子的典范对应分析

为进一步探究各采样站点环境参数与浮游动物群落参数之间的相关性,对其进行典范对应分析 (CCA),环境因子在第一、二两轴对浪错大型浮游动物群落结构参数的累积贡献率为 86.97%;排序结果见图 3,由各环境因子参数与群落参数之间的箭头连线的长短和夹角显示,环境因子  $pH$ ,  $WT$ ,  $DO$  和  $ORP$  对浪错大型浮游动物群落影响较明显;排序结果表明,Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Margalef 丰富度指数 ( $D$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J$ )、密度 ( $Den$ )、生物量 ( $Bio$ )、物种数 ( $SN$ )、优势种新月北镖水蚤 ( $Arc$ ) 和优势种无节幼体 ( $Nau$ ) 受环境因子  $pH$ ,  $WT$ ,  $DO$  和  $ORP$  的影响较显著,其中  $D$  受到的影响最明显;优势种奇异巨腕轮虫 ( $Ped$ ) 离环境因子比较远可能受干扰比较小。

本一致<sup>[26-27]</sup>,密度组成上以无节幼体为主,其次为轮虫和桡足类。与 2015 年 4—5 月拉萨河浮游动物密度变化范围 45.00~125.00 个/L,平均密度 84.09 个/L 相比较<sup>[28]</sup>,浪错夏季浮游动物平均密度

74.24 个/L 属于偏低。导致这种结果的原因,可能是:①跟采样方法有关,本次调查主要针对大型浮游动物,采样工具为 13 号浮游生物网,该网具采集不到微型浮游动物;②跟浪错所处的地理位置有关,这里的平均海拔高于拉萨河流域平均海拔,夏季平均水温为 12.44 °C,属于偏低<sup>[29]</sup>。

通过大型浮游动物优势度的计算结果显示,主要优势种为奇异巨腕轮虫、无节幼体和新月北镖水蚤(表 2)。典范对应分析(CCA)结果表明,优势种无节幼体(Nau)受温度的影响较显著,从而可以说明夏季水温为西藏浪错无节幼体生长的最佳时期。据文献记载水温是影响浮游动物生长、发育、群落

组成和数量变化的决定性环境因子<sup>[30-32]</sup>,本次调查的时间为 7 月份,西藏地区正是气温最高、日照时间最长的夏季,这样的环境可能适合大型浮游动物繁殖,也可能较适合甲壳类动物和轮虫类动物的繁殖与生长,从而出现比较多的无节幼体和轮虫类浮游动物。浮游动物通常滤食浮游植物,所以浮游动物的密度随着浮游植物的密度变化而变化,但是这两者之间同时也会受到水体中细菌数量、腐屑量和鱼类摄食量的影响<sup>[33-34]</sup>。本次采样将浮游植物和大型浮游动物一并进行调查,调查结果见图 4,由图 4 可知,浮游动物密度基本是随着浮游植物密度的变化而发生变化<sup>[35]</sup>,较好地证明了以上观点。

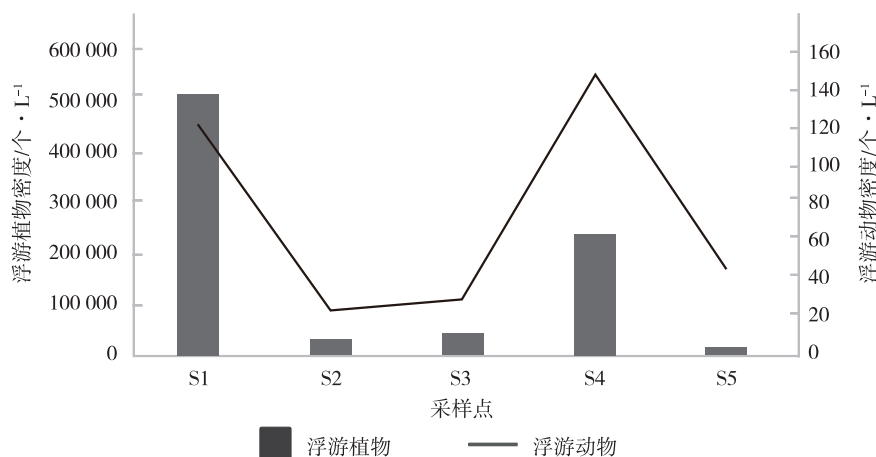


图 4 浪错调查断面浮游植物和浮游动物密度对比图

从生物密度方面分析,结果显示浪错大型浮游动物在采样点 S2, S3 和 S5 的平均密度较低,靠近湖心的采样点 S1 密度排在第 2,最高密度出现在出水口采样点 S4。导致这一现象的原因可能是采样点 S2 和 S5 离 219 国道和南玛村距离较近,采样时发现许多人为造成的生活垃圾;S2 采样点的 Shannon-Wiener 多样性指数为 0.18,生物参数为本次调查最低值,该值越低水体受污染程度越严重<sup>[36]</sup>,说明浪错受人为干扰较明显。S4 采样点位于下风口和出水口,具有较丰富的营养物质聚集,采样过程中发现该点长有很多水草,水体深度较浅,采样过程中未发现明显的生活垃圾等人为干扰迹象,该点环境条件比较适合大型浮游动物生长与繁殖。

## 4 结 论

(1) 调查显示浪错大型浮游动物密度组成上以无节幼体为主,其次为轮虫和桡足类;

(2) 调查发现浪错具有大型浮游动物物种单一,生物量较少和水温偏低等特征,属于典型的高原湖泊;

(3) 物种数(SN)与电阻(Res)Pearson 分析呈显著负相关( $p < 0.05$ );典范对应分析结果显示环境因子 pH, WT, DO 和 ORP 对浪错浮游动物群落影响较明显;其中优势种无节幼体(Nau)受温度的影响较显著;

(4) 西藏浪错夏季浮游动物丰度空间分布情况显示,各采样点的丰度从大到小依次为:S4, S1, S3, S2, S5。

### 参考文献:

- [1] KARLSON A M L, VIITASALO-FRÖSEN S. Assimilation of <sup>14</sup>C-Labelled Zooplankton Benthic Eggs by Macrobenthos [J]. Journal of Plankton Research, 2009, 31(4): 459-463.
- [2] SINHA B, MR I. Seasonal Variation in Zooplankton Population of Two Lentic Bodies at Assam State Zoo Cum Botanical Garden, Guwahati, Assam [J]. Ecology, Environment and Conservation,

- 2003, 9(3): 391-397.
- [3] KAMBLE A B, REDDY K R. Zooplankton Diversity of a Fresh Water Reservoir Mangi Solapur District (Maharashtra) [J]. Journal of Experimental Zoology India, 2012: 335-338.
- [4] DUSSART B H. Les Différentes Catégories de Plancton [J]. Hydrobiologia, 1965, 26(1-2): 72-74.
- [5] XU F L, JØRGENSEN S E, TAO S. Ecological Indicators for Assessing Freshwater Ecosystem Health [J]. Ecological Modelling, 1999, 116(1): 77-106.
- [6] JERNBERG S, LEHTINIEMI M, UUSITALO L. Evaluating Zooplankton Indicators Using Signal Detection Theory [J]. Ecological Indicators, 2017, 77: 14-22.
- [7] BARANYI C, HEIN T, HOLAREK C, et al. Zooplankton Biomass and Community Structure in a Danube River Floodplain System: Effects of Hydrology [J]. Freshwater Biology, 2002, 47(3): 473-482.
- [8] DEMOTT W R. The Role of Competition in Zooplankton Succession, [M]. Berlin Heidelberg: Springer 1989.
- [9] VAN DEN BRINK F W B, VAN KATWIJK M M, VAN DER VELDE G. Impact of Hydrology on Phyto- and Zooplankton Community Composition in Floodplain Lakes along the Lower Rhine and Meuse [J]. Journal of Plankton Research, 1994, 16(4): 351-373.
- [10] OKOGWU O I. Seasonal Variations of Species Composition and Abundance of Zooplankton in Ehom Lake, a Floodplain Lake in Nigeria [J]. Revista De Biologia Tropical, 2010, 58(1): 171-182.
- [11] DU X, FENG W S, LI W, et al. Response of Rotifer Community to Environmental Changes in Five Shallow Lakes in the Middle Reach of Changjiang River, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1083-1091.
- [12] WANG S B, XIE P, WU S K, et al. Crustacean Zooplankton Size Structure in Aquaculture Lakes: Is Larger Size Structure always Associated with Higher Grazing Pressure? [J]. Hydrobiologia, 2007, 575(1): 203-209.
- [13] 张 驰, 刘 飞, 王万良, 等. 兰格湖裸鲤肌肉生长抑制素基因 (MSTN) 的克隆及生物信息学分析 [J]. 水产学杂志, 2019, 32(5): 25-30.
- [14] 武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1992.
- [15] 张春光, 蔡 斌, 许涛清. 西藏鱼类及其资源 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [16] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 303-303.
- [18] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961: 20-21.
- [19] 沈嘉瑞. 中国动物志 (节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类) [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [20] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 (节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类) [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 43-74.
- [21] 朱 浩, 刘兴国, 陈晓龙, 等. 鲢鳙浮游动物群落特征及水质评价 [J]. 水生生物学报, 2020, 44(6): 1313-1321.
- [22] 林 青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [23] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 等. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [24] 郝 盟, 张家波, 魏 秘, 等. 易贡藏布江春季浮游生物群落结构特征初步研究 [J]. 水生态学杂志, 2020, 41(6): 57-64.
- [25] 陈佳琪, 赵 坤, 曹 玥, 等. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6644-6658.
- [26] 梁静香, 周永东, 王忠明, 等. 三门湾大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3187-3193.
- [27] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 等. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 121-130.
- [28] 张军燕, 高 志, 沈红保, 等. 拉萨河春季浮游生物群落结构特征研究 [J]. 淡水渔业, 2017, 47(4): 23-28, 62.
- [29] 巴 桑, 杨欣兰, 黄 香, 等. 拉萨河下游春、夏季浮游植物群落特征与水质评价 [J]. 高原科学研究, 2017, 1(1): 25-38.
- [30] MORAIS P, CHÍCHARO M A, BARBOSA A. Phytoplankton Dynamics in a Coastal Saline Lake (SE-Portugal) [J]. Acta Oecologica, 2003, 24: S87-S96.
- [31] 吴 利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 932-940.
- [32] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 等. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [33] 赵 萌, 王秀琳, 秦秀英, 等. 密云水库水生生物调查 [J]. 中国水产科学, 2001, 8(1): 53-58, 81.
- [34] 张武昌, 王 荣. 海洋微型浮游动物对浮游植物和初级生产力的摄食压力 [J]. 生态学报, 2001, 21(8): 1360-1368.
- [35] 扎西拉姆, 陈美群, 牟振波, 等. 西藏浪错夏季浮游植物组成与环境因子的关系 [J/OL]. 水产科学: 1-12 [2021-08-28]. <https://doi.org/10.16378/j.cnki.1003-1111.20148>.
- [36] 马迎群, 赵艳民, 迟明慧, 等. 嘉兴南湖水系浮游植物群落结构及其环境影响因子 [J]. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 42-48.