

DOI: 10.5846/stxb202101050044

杨欣兰, 潘瑛子, 巴桑. 巴松措原生动物群落结构季节及垂直分布. 生态学报, 2022, 42(8): 3216-3227.

Yang X L, Pan Y Z, Ba S. Seasonal and vertical distribution of protozoa community structure in Basom-tso Lake. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3216-3227.

巴松措原生动物群落结构季节及垂直分布

杨欣兰¹, 潘瑛子¹, 巴桑^{2,*}

¹ 西藏自治区农牧科学院水产科学研究所, 拉萨 850000

² 西藏大学理学院青藏高原湿地与流域生态实验室, 拉萨 850000

摘要:为揭示我国西藏高原湖泊原生动物群落结构特征及垂直分布格局,于 2017 年 11 月及 2018 年 5 月和 9 月,在巴松措中心分 7 层设置采样点,利用 25 号浮游生物网采集原生动物。采用活体观察和固定染色相结合的方法,共鉴定到原生动物 195 种(其中春季 86 种,夏季 93 种,秋季 80 种),隶属于 2 门 11 纲 24 目 43 科 59 属。其中以肉鞭门种类较丰富,砂壳类纤毛虫占优势。垂直分布的物种组成和群落结构复杂表现为:表层>中层>底层,物种多样性、丰富度和优势度指数表现为:表层>中层>底层,均匀度指数大多数为 1;季节分布的物种组成和群落结构复杂程度表现为:夏季>春季>秋季,物种多样性、丰富度指数表现为:夏季>秋季>春季,优势度指数表现为:夏季>秋季>春季,均匀度指数表现为:秋季>春季>夏季;优势物种和群落结构都会随水深的增加而减少。总体呈现出物种多样性较低、均匀度较高,具有明显的时空异质性。

关键词:原生动物;群落结构;垂直分布;巴松措;西藏

Seasonal and vertical distribution of protozoa community structure in Basom-tso Lake

YANG Xinlan¹, PAN Yingzi¹, BA Sang^{2,*}

¹ Institute of Fisheries Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China

² Laboratory of Wetland and Catchments Ecology in Tibetan Plateau, Faculty of Natural Sciences, Tibet University, Lhasa 850000, China

Abstract: In order to reveal the structural characteristics and vertical distribution patterns of the protozoan community in lakes on the Tibet Plateau in China, a survey was conducted in the center of Basom-tso lake in November 2017, May and September 2018. Sample sites were collected at 7 different depths of water using the 25# plankton net by a combination of in vivo observation and fixed staining, 195 species (86 species in spring, 93 species in summer and 80 species in autumn) were identified, which belongs to 2 phyla, 11 classes, 24 orders, 43 families, 59 genera. The dominant species were found to be the phylum sarcophagus and the sand shell ciliates. The composition of vertical distribution species and the structure of complex community were shown as: surface layer>middle layer>bottom layer. The species diversity, richness and dominance index were shown as: surface layer>middle layer>bottom layer and the uniformity index was mostly 1. The composition of seasonal distribution species and the structure of complex community were shown as: summer>spring>autumn. The species diversity and richness index were shown as: summer>autumn>spring, the dominance index was shown as: summer>autumn>spring, and the evenness index was shown as: autumn>spring>summer. The dominant species and community structure will decrease with the increase of water depth. The survey had revealed an obvious temporal and spatial heterogeneity with low species diversity and high uniformity.

基金项目:国家自然科学基金项目(31660620,31960738)

收稿日期:2021-01-05; 网络出版日期:2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbasang2003@aliyun.com

Key Words: protozoa; community structure; vertical distribution; Basom-tso lake; Tibet

湖泊生态系统是流域与水体生物群落、各种有机和无机物质之间相互作用的开放且复杂的水域生态系统。淡水湖泊为人类生存和发展提供了不可或缺的自然资源和生存环境^[1-3]。西藏湖泊星罗棋布,巴松措(湖)作为西藏东部最大的典型冰川堰塞型淡水湖泊,因人为干扰较少而至今仍保持着相对稳定的原始状态,因此,可作为研究湖泊稳态和生态平衡的典型淡水水体。该湖泊水深可达 167m,平均约 100 m,为当地居民提供了多种生态系统服务功能,因此,揭示该水域生态环境质量具有重要的生态学意义^[4-11]。

原生动物是一类形态多样且分布广泛的单细胞生物。其作为生态系统中重要的组成部分,在物质循环与能量传递过程中发挥着枢纽作用。因其生命周期简短,且对环境的变化反应敏感,一直作为水体环境及生态环境质量的指示者^[12-14]。研究该湖泊原生动物群落特征与垂直分布年际动态变化规律,可为深入揭示其生态环境质量及其服务功能提供重要的第一手资料。有关巴松措水体生物多样性研究至今尚未见有报道。本文以巴松措水体为研究对象,初步探讨了该水域原生动物群落结构及垂直分布,为丰富青藏高原生态冰川堰塞湖中淡水湖泊的生物多样性分布、以及生态学特征资料提供了重要的基础资料,并为湖泊生态系统的优化管理与保护提出科学依据。

1 材料和方法

1.1 样区概况

巴松措(湖)位于尼洋河最大支流巴河的宽谷中(93°55′39.95″E, 30°01′06.04″N),为雅鲁藏布江支流尼洋河水系中最大的高山冰川堰塞湖之一海拔 3460 m,湖泊面积 26 km²(长 13 km,宽约 2 km,最大湖深约 167 m),平均湖深约 100 m。水域面广,负氧离子浓度较高,空气细菌含量低;湖水丰沛,冰封期极短。由于受到印度洋湿润气流的影响,湖泊所在区域形成了高原温带半湿润季风气候,空气湿润,雨量充沛,年无霜期 175 d,年平均气温 6.3℃,年均降水量 646 mm,年日照时数 2016 h^[15-18]。湖泊所在区域山地除冰川作用外,又受流水切割而形成高山深谷(相对高度差达约 2000 m)的深切地形。巴松措形成于新错和仲错两股古冰川流水相汇而造成的“U”槽谷中,湖口由终碛垅堵塞而成。巴松措补给水源主要为仲错弄巴曲(河)、新错弄巴曲(河)、白朗曲(河)、罗结曲(河)和扎拉河冰川融雪水以及天然降水^[19-21]。该湖泊长年水温较低,属于高山型冷水湖泊。湖体周围从低热河谷灌丛到寒寂荒凉高山稀疏垫状植被带,中间依次出现有常绿阔叶林、针阔混交林、云冷杉林、高山柳与杜鹃灌丛、高山草甸等植被垂直带;呈现出由东南向西北由常绿阔叶林-高山松林-高山栎林、亚高山灌丛到高山草甸的水平地带性,其森林覆盖率为 80.0%^[22]。

1.2 样点设置

采样时间为 2017 年 11 月及 2018 年 5 月和 9 月。根据国家标准方法《水质—微型生物群落监测 PFU 法》(GB/T12990-91)、地表水监测断面的布设原则、巴松措水域的自然环境特征及水体功能与梯度结构等特征设置采样断面和深度,本次研究采用传统的挂锤式测得最大水深为 108 m,按水深设置了 0.5、2.5、5、15、30、60 m 和 100 m 共 7 个梯度,由浅到深依次用 B1—B7 来表达分层采集的水样(图 1)。

1.3 样品的采集与处理

原生动物样品和水化环境样品的采集和处理均参照我国行业规范的研究方法进行^[23]。水样用 QCC 15 卡盖式采水器与有机玻璃采水器,将采水器于水下相应位置,静置 5—10 min 后采得水样(设置 3 个平行);定量样品的采集方法同上,采到水样后立即用 10% 鲁哥氏液固定;在室内静置 24 h 后浓缩至 50 mL,移取 0.1 mL 浓缩匀液至 0.1 mL 计数框,在 10×40 倍显微镜下全片计数原生动物数量(重复 3 次)。

1.4 物种鉴定

在室内借助 Olympus 研究型光学显微镜,采用活体镜检和固定染色法相结合鉴定物种^[24],原生动物物种鉴定主要参考文献:《原生动物学》、《淡水微型生物与底栖动物图谱》、《中国黄渤海的自由生纤毛虫》、《西藏

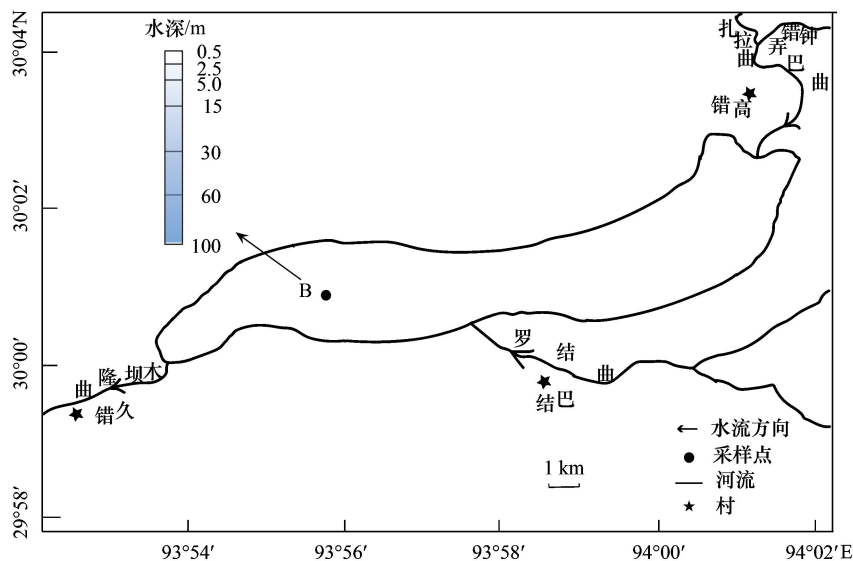


图 1 巴松措样点分布图
Fig.1 Sampling site (B) of Basom-tso lake

水生无脊椎动物》^[23, 25—28],采用 Lynn(2008,2017)分类系统进行分类^[29]。

1.5 数据处理与分析

采用 Gleason-Margalef 丰富度指数(d)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Simpson 优势度指数(S)等指数,计算公式如下:

- 1) 丰度:
$$RS = (V_s \times n) / (V \times V_a)$$
- 2) Gleason-Margalef 丰富度指数:
$$d = (N_s - 1) / \ln(N);$$
- 3) Shannon-Wiener 多样性指数:
$$H = - \sum P_i \times \ln P_i \quad (P_i = N_i / N);$$
- 4) Pielou 均匀度指数:
$$E = H / \ln(N_s);$$
- 5) Simpson 优势度指数:
$$S = \sum N_i(N_i - 1) / (N(N - 1));$$
- 6) Mcnaughton 优势度系数:
$$Y = f_i \times N_i / N;$$
- 7) Jaccard 相似性系数:
$$J = c / a + b - c;$$

式中, RS 为 1 L 水样中原生动物的数量(个/L); V_s 为样品浓缩后的体积(mL); n 为计数体积观察所获得的个体数(个); V 为采样体积(1 L); V_a 为计数样品体积(1 mL); N 为同一样点中个体总数; N_i 为第 i 种的个体数; N_s 为物种数; f_i 为第 i 种出现的频率; a 、 b 分别为 a 地和 b 地的种类数, c 为 a 、 b 两地共有的种类数^[29—34]。

原生动物出现的频率和相对丰度计算依据 McNaughton 优势度 $Y \geq 0.02$ 时定为优势种。群落结构公式采用 Excel 计算和绘图,使用 R 语言进行主成分分析 PCA 和 Pearson 相关分析;地图用 ArcGIS 12.0 制作。

2 结果与分析

2.1 原生动物群落结构

2.1.1 原生动物物种组成

巴松措共鉴定到原生动物 195 种(属),隶属于 2 门 11 纲 24 目 43 科 59 属。其中春季有 86 种(属),隶属于 2 门 10 纲 22 目 42 科 57 属;优势类群、次优势类群、罕见类群依次为砂壳目占比 31.40%,表壳目占比 16.28%,隐(藻)滴目占比 1.16%,其余为常见类群(占比 51.19%);夏季有 93 种(属),隶属于 2 门 8 纲 21 目 30 科 53 属;优势类群、次优势类群、罕见类群依次为砂壳目占比为 32.26%,变形目占比 11.83%,隐(藻)滴目

占比 1.08%,其余为常见类群(占比 54.83%);秋季分布有 80 种(属),隶属于 2 门 7 纲 17 目 34 科 49 属;优势类群、次优势类群、罕见类群依次为砂壳目占比占比为 37.50%,变形目占比 17.50%,隐(藻)滴目占比 1.25%,其余为常见类群(占比 43.75%);砂壳目为该湖泊原生动物群落年际优势类群,年际变化趋势为:春季 31.40%>夏季 32.26%>秋季 37.50%,见图 2。

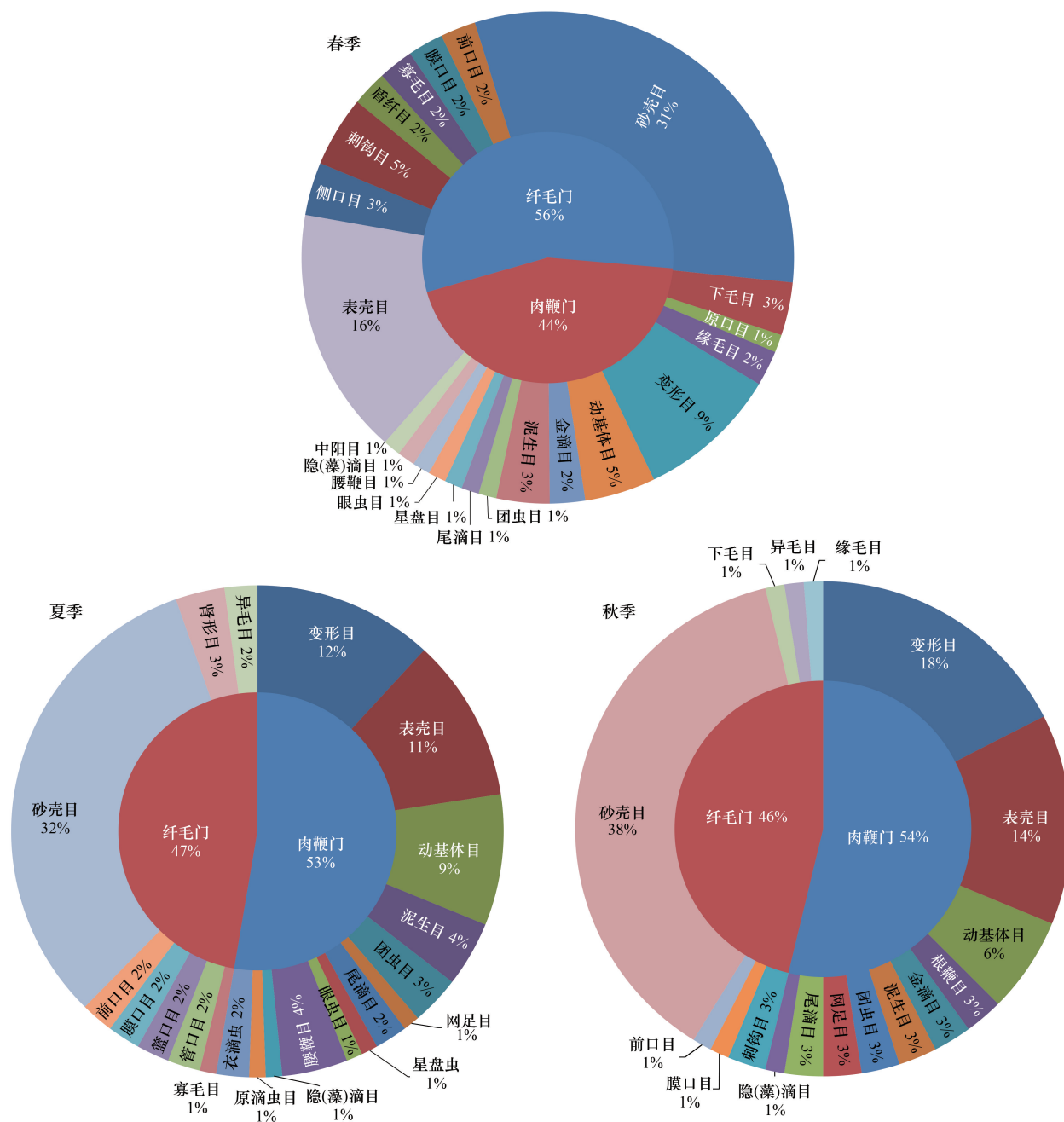


图 2 巴松措原生动物群落结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of protozoan community structure of Basom-tso lake

2.1.2 原生动物的优势种

根据 McNaughton 优势度系数 $Y \geq 0.02$ 确定优势种,并用属名的首三位字母加种名的首三位字母作为优势种拉丁名的简写。春季有 9 个优势物种,其中纤毛虫物种数占 55.56%,肉鞭虫占 44.44%,排名前三位优势物种依次是飞燕角腰鞭虫 (*Ceratium hirundinella*)、斜纹螺纹虫 (*Coxiella declivis*) 和半缘筒壳虫 (*Tintinnidium*)。

semiciliatum)。夏季共有 13 种,其中肉鞭虫占 92.31%,纤毛虫占 7.69%;前三位优势物种为卵形尾滴虫(*Cercomonas ovatus*)、易变小鞭毛虫(*Mastigella commutans*)和卵形单领鞭虫(*Monosiga ovata*)。秋季共有 5 种,其中纤毛虫占 60%,肉鞭虫占 40%;前三位优势物种为淡水筒壳虫(*Tintinnidium fluviatile*)、盖厢壳虫(*Pyxidicula operculata*)和小旋口虫(*Spirostomum minus*)。春秋季节优势种主要为砂壳纤毛虫;夏季的优势物种主要为肉鞭虫。优势种数和优势度指数从大到小依次为夏季>春季>秋季,呈现出明显的时空差异性,见表 1。

表 1 巴松措原生动植物优势物种分布表

季节 Season	优势种类 Dominant species
春季 Spring (9 种)	飞燕角腰鞭虫 <i>Ceratium hirundinella</i> (B1)、半缘筒壳虫 <i>Tintinnidium semiciliatum</i> (B3、B5)、表壳圆壳虫 <i>Cyclopyxis arcelloides</i> (B3、B4)、球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i> (B6)、透明螺足虫 <i>Cochliopodium bilimbosum</i> (B3、B4)、小筒壳虫 <i>Tintinnidium pusillum</i> (B3)、斜欹螺纹虫 <i>Coxiella declivis</i> (B6、B7)、有角拟铃虫 <i>Tintinnidium corniger</i> (B4)、榛果拟铃虫 <i>Tintinnidium corylicarpa</i> (B4), 合计 9 种, 优势度为 0.34
夏季 Summer (13 种)	波动叶鞭虫 <i>Phyllomitus undulans</i> (B1)、华美绿梭虫 <i>Chlorogonium elegans</i> (B2)、可变波豆虫 <i>Bodo variabilis</i> (B5)、放射星盘虫 <i>Astrodisculus radians</i> (B5)、卵形单领鞭虫 <i>Monosiga ovata</i> (B3)、卵形尾滴虫 <i>Cercomonas ovatus</i> (B1)、微小无吻虫 <i>Clautriavia parva</i> (B5)、易变小鞭虫 <i>Mastigella commutans</i> (B1)、淡水筒壳虫 <i>Tintinnidium fluviatile</i> (B6)、开氏棘变形虫 <i>Acanthamoeba catellanii</i> (B5)、蛞蝓囊变形虫 <i>Saccamoeba limax</i> (B5)、球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i> (B5)、杂葫芦虫 <i>Cucurbitella mespiliformis</i> (B7); 合计 13 种, 优势度为 0.41
秋季 Autumn (5 种)	淡水筒壳虫 <i>Tintinnidium fluviatile</i> (B1、B6)、蜉蝣筒壳虫 <i>Tintinnidium ephemeridum</i> (B4、B6)、盖厢壳虫 <i>Pyxidicula operculata</i> (B1、B4)、小旋口虫 <i>spirostomum minus</i> (B7)、圆柱拟铃虫 <i>Tintinnidium cylindrata</i> (B4), 共有 5 种, 优势度为 0.23
共有种类 Common species	春夏季共有球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i> , 夏秋季共有淡水筒壳虫 <i>Tintinnidium fluviatile</i>

2.1.3 原生动物的群落特征参数

春季分布的原生动物种类数为 13.9,随水深度增加其种类数和丰度均呈降低趋势,丰度均值为 2782 个/L;群落 Shannon 多样性指数(均值为 2.52)与 Margalef 丰富度指数(均值为 2.55)随水深延伸而降低;Simpson 优势度指数(均值为 0.84)无明显规律;Pielou 均匀度指数(均值为 0.98)在 0.5 m 水深为 0.88,其余各水层均为 1。

夏季分布的原生动物种类数随着水层加深其呈降低趋势(均值为 15),最深层样点有少量上升现象,丰度变化趋势与种类数的变化一致(均值为 3114 个/L);群落 Shannon 多样性指数(均值为 2.45)与 Simpson 优势度指数(均值为 0.10)随水深变化无明显规律;Margalef 丰富度指数(均值为 2.70)随水深的增加而降低;Pielou 均匀度指数(均值为 0.92)在水深 15 m 之后保持在 1.0 水平。

秋季分布的原生动物种类数随水深下降其呈现降低趋势(均值为 13.6),丰度则无明显规律(均值为 1186 个/L);群落 Shannon 多样性指数(均值为 2.60)与 Margalef 丰富度指数(均值为 2.58)随水深增加呈下降趋势;Simpson 优势度指数无明显变化规律(均值为 0.07);Pielou 均匀度指数无明显变化(均值为 1.00)。

总体上分析,原生动物种类数随着季节变化的趋势为:夏季>春季>秋季,丰度的季节变化趋势为:夏季>春季>秋季,Shannon 多样性指数季节变化规律为:秋季>春季>夏季,Margalef 丰富度指数季节变化规律为:夏季>秋季>春季,Simpson 优势度指数季节变化规律为:春季>夏季>秋季,Pielou 均匀度指数季节变化规律为:秋季>春季>夏季(表 2)。该湖泊原生动物种类组成丰富多样,群落结构相对复杂,随水深的增加而相对简单,优势种类变化不明显。春季原生动物群落结构较夏秋季复杂多样,优势种类明显,该湖泊原生动物群落特征指数波动性不明显,相对稳定,这与湖泊水环境相对稳定有关。

2.2 原生动物群落结构垂直分布

2.2.1 原生动物物种数与丰度垂直分布

为了研究巴松措原生动物垂直分布机制,将原生动物按五大优势类群的物种数和丰度进行分类并绘制占

比图,结果显示:各水层物种数和丰度均以砂壳目类群为主要优势。砂壳目类群物种数沿水深呈上升趋势(春季除 30 m 和 100 m 处、夏季除 5 m 和 30 m 处、秋季除 60 m 处);变形目类群沿水深增加之占比呈减低趋势(春季除 5 m 和 100 m 处、夏季除 15 m 处、秋季除 60 m 处);表壳目类群物种数无明显的垂直分布,但春季在 15 m 处达到最大值,夏季于 5 m 处未见该类群物种;动基体目类群物种仅出现于 5 m 以浅的水体中,其他类群物种数受垂直分布影响不大。

表 2 巴松措原生动物群落特征参数

Table 2 Characteristic parameters of protozoan community in the Basom-tso lake

季节 Season	样点 Sites	物种数 Species number NS	丰度 Richness/ (个/L) RS	多样性指数 Shannon index H	优势度指数 Simpson index S	均匀度指数 Pielou Index E	丰富度指数 Margalef index d
春季 Spring	B1	23	5350	2.75	0.12	0.88	3.81
	B2	15	3350	2.71	0.06	1	2.79
	B3	14	2600	2.64	0.06	1	2.63
	B4	13	3225	2.56	0.07	1	2.47
	B5	15	2200	2.71	0.06	1	2.79
	B6	9	1000	2.20	0.10	1	1.78
	B7	8	1750	2.08	0.11	1	1.60
夏季 Summer	B1	23	7500	2.53	0.13	0.81	3.54
	B2	22	4500	2.48	0.13	0.80	3.39
	B3	19	2600	2.51	0.15	0.85	3.19
	B4	16	2300	2.77	0.06	1	2.96
	B5	13	2200	2.56	0.07	1	2.47
	B6	8	1200	2.08	0.11	1	1.60
	B7	9	1500	2.20	0.10	1	1.78
秋季 Autumn	B1	18	1100	2.89	0.05	1	3.27
	B2	15	900	2.71	0.06	1	2.79
	B3	15	1200	2.71	0.06	1	2.79
	B4	12	1600	2.48	0.08	1	2.30
	B5	12	1600	2.48	0.08	1	2.30
	B6	14	1100	2.64	0.06	1	2.63
	B7	10	800	2.30	0.09	1	1.95

丰度(RS):春季 19475(个/L);夏季 21800(个/L);秋季 8300(个/L)

砂壳目类群丰度沿水深呈上升趋势(春季除 30 m 和 100 m 处、夏季除 30 m 处、秋季除 2.5 m 和 60 m 处);变形目类群沿水深增加之占比呈减低趋势(春季除 5 m 和 100 m 处、夏季除 5 m、30 m 和 60 m 处、秋季除 60 m 处);表壳目类群丰度无明显的垂直分布,但春季在 15 m 处达到最大值,夏季于 5 m 处未见该类群物种;动基体目类群物种仅出现于 5 m 以浅的水体中,其他类群丰度受垂直分布影响不大,详见图 3。

2.2.2 物种聚类分析

为了深入了解巴松措(湖泊)原生动物物种分布和在样点间的季节与垂直分布变化规律,将原生动物物种分布数据进行聚类分析。结果显示:春季原生动物物种聚类特点是,其中 B6、B7 先聚成小组群,然后再与 B3、B4 聚集的小组群相聚,之后依次与 B5、B2、B1 聚集为一个大组群;夏季原生动物物种聚类结果是,从深层至表层依次聚群;秋季原生动物物种聚类结果是,先是 B4、B5、B7 聚合为一组,之后依次与 B6、B3 相聚,再次与 B1 与 B2 聚合小群相聚形成大群组。从整个聚类分析的结果可以看出,B6、B7 水层处原生动物的物种分布较为稳定,物种分布聚类分析变化较大的水层主要在 30 m 以上水域,具有明显的时空差异性特征,见图 4。

2.2.3 群落特征参数与水层深度的相关矩阵

为深入研究水深对原生动物群落结构特征的动态影响,将水深和原生动物群落特征参数进行了 Pearson

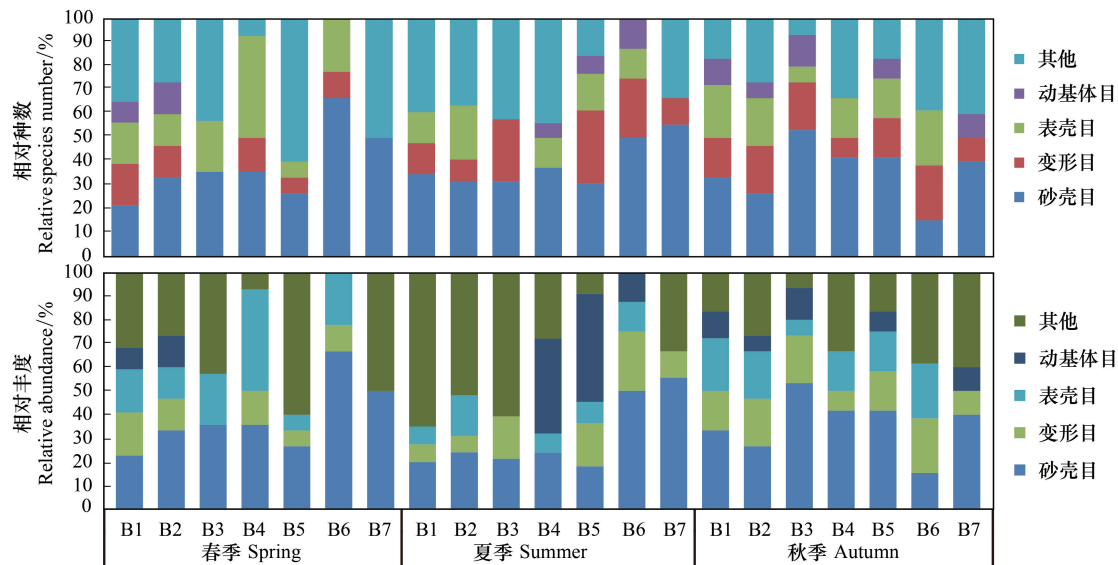


图3 巴松措原生动物主要类群的物相对种数和相对丰度

Fig.3 Relative species number and relative abundance of main groups in protozoan communities in Basom-tso lake

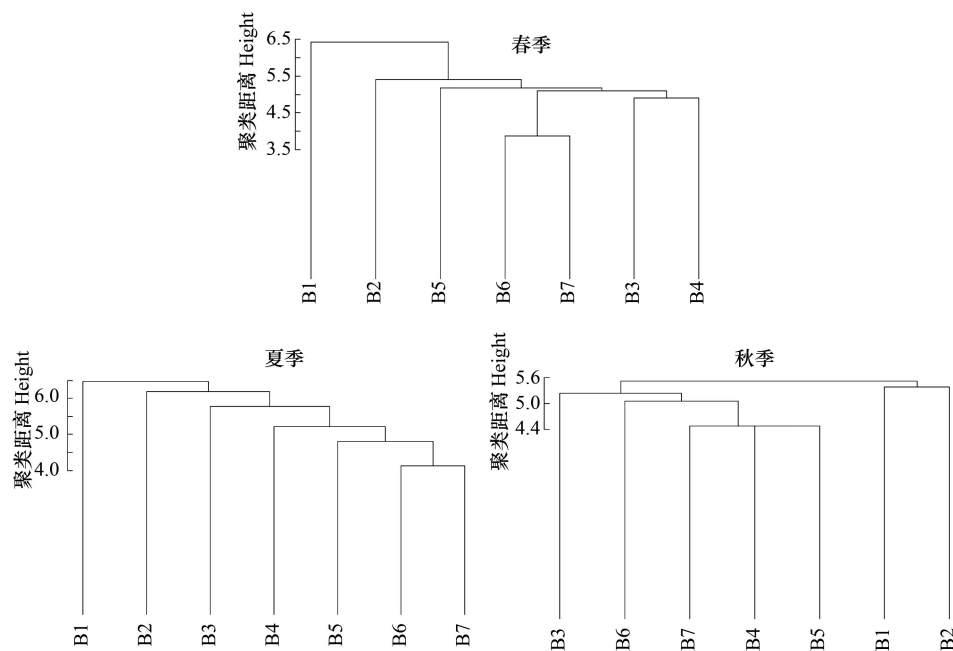


图4 巴松措各样点的聚类分析

Fig.4 The clustering analysis among sampling sites at Basom-tso lake

B1—B7: 水层 0.5—100m

相关性分析。结果显示,水深与春季原生动物物种数、Margalef 丰富度指数($P<0.05$)及 Shannon 多样性指数($P<0.01$)均呈负相关关系;水深与夏季原生动物物种数和 Margalef 丰富度指数皆呈显著负相关关系($P<0.01$);水深与秋季动物种类数和丰度呈负相关关系($P<0.05$),与 Simpson 优势度指数呈正相关关系($P<0.05$),且三个季节群落特征参数与水深相关曲线相似,说明该湖泊水环境较为稳定,见图 5。

2.2.4 群落结构主成分分析

将巴松措原生动物物种分布的数据按季节(春、夏、秋)首字母(C、S、A)加数字的形式编号进行主成分分



图5 巴松措各水层与春、夏、秋季原生动动物群落参数 Pearson 相关矩阵

Fig.5 The Pearson correlation matrix of protozoan in Spring, Summer and Autumn at Basom-tso lake

NS:物种数 Species number, RS:丰度 Richness, H:多样性指数 Shannon index, S:优势度指数 Simpson index, E:均匀度指数 Pielou index, d:丰富度指数 Margalef index, WD:水深 Water depth

析,用三个图分别分析 PCA 轴的解釋率、物种解釋率和样点的解釋率及贡献值。结果显示:春季 PCA 排序第 1 轴的解釋率为 25.6%,主轴 1 和 2 的累计解釋率为 44.2%。原生动物中贡献率排名前三的种类是半缘筒壳虫(*Tintinnidium semiciliatum*)、表壳圆壳虫(*Cyclopyxis arcelloides*)、普通表壳虫(*Arcella vulgaris*),并且随着水层位置上升时,物种对各样点(水层)的贡献率也逐渐降低,排名前三的样点是 B1、B2 和 B3。夏季 PCA 排序第 1 轴的解釋率为 24%,主轴 1、2 的累计解釋率为 45.5%。夏季原生动物中贡献率排名前三的种类是淡水筒壳虫(*Tintinnidium fluviatile*)、后湖马氏虫(*Mayorella hohuensis*)、坚果领细壳虫(*Stenosemella nucula*),同样是随着水层的升高,其对样点的贡献率也随之降低,排名前三的样点是 B1、B2 和 B3。秋季的 PCA 排序第一轴解釋率为 19.8%,主轴 1、2 的累计解釋率为 39.3%。秋季原生动物中贡献率排名前三的是淡水筒壳虫(*Tintinnidium fluviatile*)、盖厢壳虫(*Pyxidicula operculata*)和蜉蝣筒壳虫(*Tintinnidium ephemeridum*),并且排名前三的样点是 B1、B2 和 B6。结果表明:原生动物排名前三的物种有较大差异,其对样点的贡献排名相对稳定,见图 6。

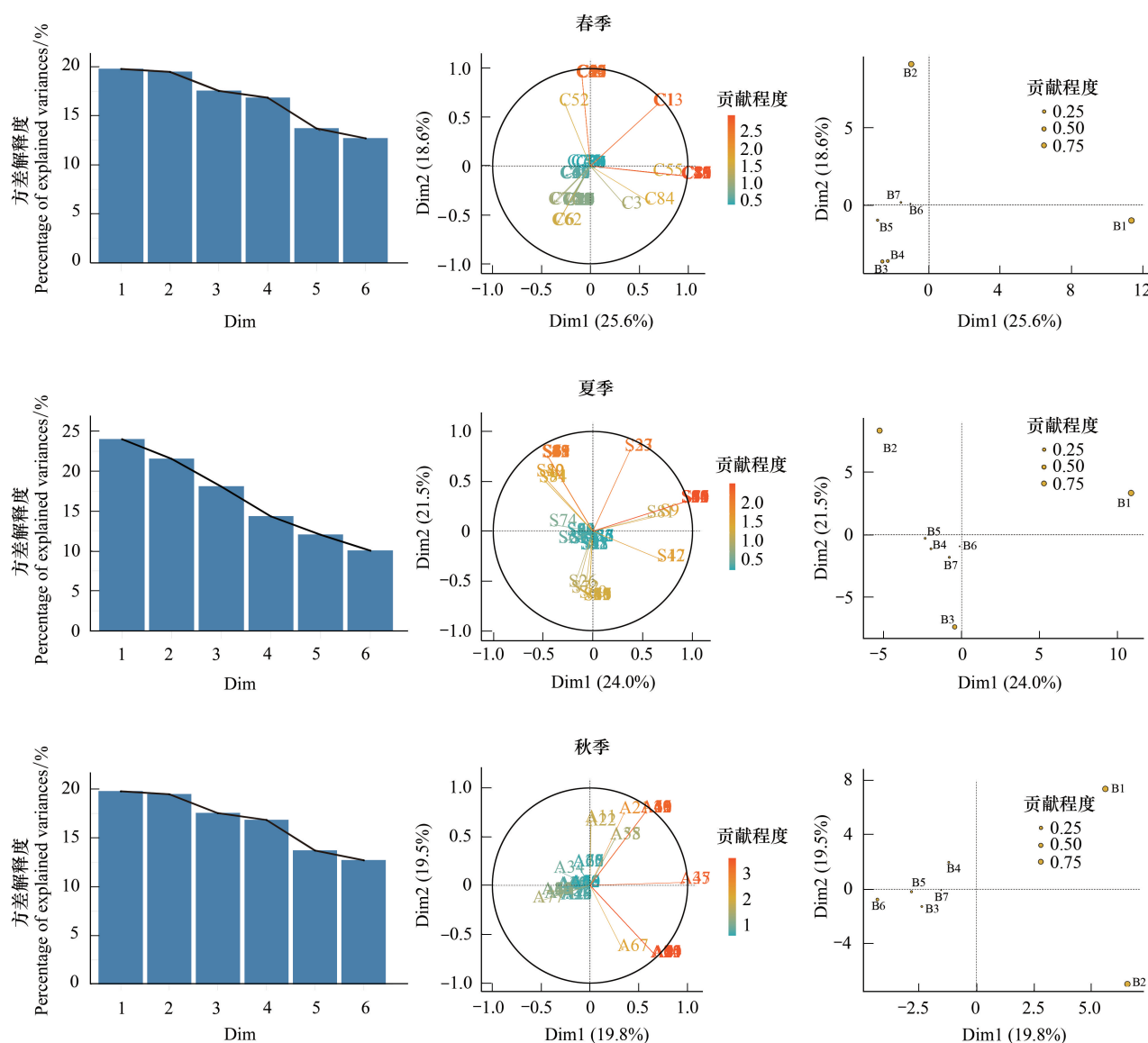


图 6 巴松措春、夏、秋季原生动物 PCA 分析结果

Fig.6 The PCA analysis result of protozoan in Spring, Summer and Autumn in Basom-tso lake

3 讨论

3.1 原生动物群落结构季节分布

本次研究的鉴定结果显示该湖泊原生动物是以砂壳目、表壳目、变形目、动基体目和其他类群为主体的群落结构构架,优势物种的主要成分是肉鞭门物种,较姜建国等^[35]和张荣坤等^[36]对东湖和白石水库等其他水体^[37-39]复杂丰富。物种组成多样且分布均匀,优势度不明显,物种数较低且丰度较少,群落特征参数数值较低,存在明显的优势物种,具有显著的季节差异。

巴松措为深水湖泊,位于中国西藏边陲林芝市内,四季分明,受地理环境影响较明显,春季群落结构较为复杂、秋季则最为简单。其原因可能湖泊生态系统中分布的原生动物群落中不同种类能适应不同的水域环境,并形成相对稳定的群落结构;一旦环境因子发生变化(温度、营养素、pH等),该群落结构的稳定性就会直接或间接的发生变化^[40]。巴松措水体受季节影响变化较大,这与其地理位置和海拔高度有关。巴松措属高原湖泊,水源来自冰川融雪水,其气温年际变化会直接影响到湖泊水体水温的波动(水体温度波动尤为显著)。生活在该湖泊的原生动物在长期自然进化过程中适应了这种相对低温低氧环境而生存,从而产生了一些适应该环境的土著种类^[41-42]。随着每年春季气温上升,融雪水经地表流入湖泊,为湖泊补充了水源,同时也为水体引入了很多矿质元素,引起了春季湖水原生动物群落结构发生了较大变化(种群数量都有所升高)。夏季光照较为充足,植物的光合作用会释放氧气,强烈的日照会提高湖泊的水温和溶解氧,致使该湖泊原生动物种数上升。随着雨季到来,地表径流水会不断稀释湖泊原生动物群落,充足的光照、适宜的温度和丰富的养料会滋养适宜物种快速繁殖。因此,夏季湖泊原生动物群落结构较简单,且肉鞭毛类物种占据优势。秋季气温骤降、植物凋谢造成水体处在低温缺氧状态,促使大部分原生动物无法适应急速变化的环境,其中砂壳类纤毛虫能够较好的适应低温和低氧的环境而快速繁衍^[43],导致该湖泊秋季原生动物群落结构较为简单;在水体中出现了较多的自养型原生动物成为优势物种,这一结果与其他湖泊原生动物群落多样性研究结果较为一致^[44-46]。

3.2 原生动物群落结构的垂直分布

水体深度是影响浮游生物垂直分布的主要区域性环境因子,运用统计学结果分析水深与原生动物群落结构之间关系很有意义。有文献^[47]表明巴松措是跃层情况较为复杂的深水型湖泊水体,且有杂志报道巴松措地下水情况较为复杂应有内流河,具体情况还需长时间、高频率、多季节的观测数据结果提供可靠的科学依据,所以在分析的时候将湖泊大致按跃层分为表(0.5—5 m)、中(15—30 m)、底(60—100 m)三个水层讨论。

表 3 巴松措原生动物群落垂直分布特征

Table 3 Vertical distribution of characteristic parameters of protozoan community in the Basom-tso

季节 Season	水层 Water depth	物种数 Species number NS	丰度(RS) Richness/ (个/L)	多样性指数(H) Shannon index	丰富度指数(d) Margalef index	均匀度指数(E) Pielou index	优势度指数(S) Simpson index
春季 Spring	表	23	4350	2.73	3.0	0.96	3.07
	中	15	2900	2.60	2.6	1	2.63
	深	9	1310	2.09	1.7	1	1.69
夏季 Summer	表	23	6000	2.54	3.5	0.82	3.37
	中	18	2500	2.64	2.9	1	2.71
	深	9	1305	2.14	1.7	1	1.69
秋季 Autumn	表	18	1000	2.90	3.1	1	2.95
	中	14	1400	2.60	2.5	1	2.30
	深	13	950	2.47	2.3	1	2.29

湖泊水深分层:表层为 0.5—5 m、中层为 15—30 m、底层为 60—100 m

利用相关性分析结果发现三个季节原生动物的物种数皆受水深的影响,Margalef 群落丰富度指数在春夏

季也显示出受水深影响(表层>中层>深层),即会随水深的增加而降低。春季 Shannon 群落多样性指数随水深的增加而降低;秋季的 Simpson 群落优势度指数会随水深的增加而增加。是根据该湖泊原生动物群落结构和种群数量垂直分布特征:表层>中层>底层(其中秋季:中层>表层>底层);为聚类分析结果可以看出各样点越深的位置整体的生活环境越相近,物种的分布也会优先聚为一类;为进一步印证巴松措原生动物群落结构季节与垂直分布特征,采取 PCA 进行分析。分析结果也显示砂壳目类群物种贡献率较大,且多位于表层水体,随水深增加原生动物种类及数量分布越少,底层整体种类和数量分布较少,群落结构简单,与相关性分析和聚类分析的结果一致。其原因是随着水深的增加,可见光、透明度及含氧量等因素会随之降低,甚至会归为零。氧气含量、水温和水压也会随水深而改变,各种适宜原生动物生存的生物因子、物理条件和化学环境都发生了较大变化。原生动物可以分为自养型、异养型以及杂食型等六大营养类群,在光源充足的情况下,自养型原生动物会呈较多的现象,但是随着光变暗,水压升高,环境相对恶劣的情况下,异养型、杂食型原生动物适宜生存而大量繁殖^[48-50],形成了随着水深增加会出现耐受性物种优势度而群落多样性降低的现象。底层水域环境较为极端恶劣,极度减少了原生动物常见种的生存和繁殖^[51-52],有壳类原生动物对生存环境的要求并不严格且适应性较强,能适应这种极端环境而生存,从而整体形成了原生动物群落结构随水深增加变得简单化,见表 3;位于中层水体的原生动物群落结构变化较大,呈现复杂到简单的趋势。概因湖泊透明度在采样时最高可达 11.4 m,可见光无法达到中层水体,又在此区间有水体跃层现象^[47]。使水体内环境发生变化,直接降低自养型生物和对环境敏感的一些常见水生生物,影响大多数原生动物常规物种的存活。一些异养型和杂食型原生动物对环境的影响反应相对较低,可迅速繁殖生存,致使群落结构和优势物种也跟着变化。在此水层中采样得到的原生动物的组成主要为砂壳类纤毛虫和肉鞭门中表壳目生物,因它们属于带壳类原生动物,对环境的适应能力较高,因此受环境变化影响较低,且据杂志报道巴松措水下 20 m 能见度低生物稀少且可见鱼类粪便,且水下有大型植被,说明巴松措的水体环境较为复杂,中层水体的原生动物可从其他生物粪便中汲取养分,但无法大量的生殖繁育,这也可以解释中层原生动物群落结构相对稳定但丰度降低的特点。此结果也需有持续检测的数据支撑,有待进一步考究;而 60 m 之下的水体则处于水位较深且常年无光低氧高压的环境,致使环境更为稳定,砂壳类群物种和其他类群的比例常年不变,基本不受季节的影响。

参考文献(References):

- [1] Chadov B F. Mutations in the regulatory genes in drosophila melanogaster//International Conferences on Biodiversity and dynamics of ecosystems in North Eurasia. Novosibirsk: IC&G, 2000.
- [2] Sittler E C Jr, Cooper J F, Sturmer S J, Ali A. Titan's ionospheric chemistry, fullerenes, oxygen, galactic cosmic rays and the formation of exobiological molecules on and within its surfaces and lakes. Icarus, 2020, 344: 113246.
- [3] 谷唯实, 赵祥华. 当前高原湖泊治理的现状 & 思路转变. 环境科学导刊, 2020, 39(S1): 152-154, 169-169.
- [4] 李应鑫, 李石华, 彭双云. 云南省九大高原湖泊流域 NDVI 时空演变及其与气候的响应关系. 水土保持研究, 2020, 27(4): 192-200.
- [5] 朱立平, 彭萍, 张国庆, 乔宝晋, 刘翀, 杨瑞敏, 王君波. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用. 湖泊科学, 2020, 32(3): 597-608.
- [6] Cui R Y, Fu B, Mao K M, Chen A Q, Zhang D. Identification of the sources and fate of NO_3^- -N in shallow groundwater around a plateau lake in southwest China using NO_3^- isotopes ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and a Bayesian model. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110897.
- [7] 闫立娟. 气候变化对西藏湖泊变迁的影响(1973—2017)[J]. 地球学报, 2020, 41(04): 493-503.
- [8] Tang F, Huang T, Fan R, Luo D, Yang H, Huang C C. Temporal variation in sediment C, N, and P stoichiometry in a plateau lake during sediment burial. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1706-1718.
- [9] 马学志, 王永波, 赵辰辰, 倪振宇. 青藏高原东南部巴松措现代沉积过程及其对气候变化的响应. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1169-1181.
- [10] 张宏鹏, 琼达. 巴松措旅游景区建设存在的问题及对策. 四川林勘设计, 2018, (3): 63-67.
- [11] 王忠斌, 米玛次仁. 巴松措国家级森林公园管理质量的游客满意度动态监测. 西藏科技, 2011, (5): 23-25, 45-45.
- [12] Ghartey-Kwansah G, Aboagye B, Adu-Nti F, Opoku Y K, Abu E K. Clearing or subverting the enemy: role of autophagy in protozoan infections. Life Sciences, 2020, 247: 117453.
- [13] Wei W, Jiang C Q, Yang W T, Miao W, Xiong J. Proteomic identification and expression of oral apparatus constituents in cell regeneration of giant

- ciliate *Stentor coeruleus* (strain WHEL). *Gene*, 2020, 743: 144624.
- [14] Urbański L J, Di Fiore A, Azizi L, Hytönen V P, Kuuslahti M, Buonanno M, Monti S M, Angeli A, Emameh R Z, Supuran C T, De Simone G, Parkkila S. Biochemical and structural characterisation of a protozoan beta-carbonic anhydrase from *Trichomonas vaginalis*. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 2020, 35(1): 1292-1299.
- [15] 索朗, 扎堆. 浅谈巴松措特有鱼类国家级水产种植资源保护区建设的意义. *西藏科技*, 2016, (5): 37-38.
- [16] 土登达杰, 扎堆. 建设巴松措特有鱼类国家级水产种植资源保护区的自然条件及社会经济利益简析. *西藏科技*, 2016, (12): 20-21.
- [17] 钟华邦. 地质素描——西藏巴松错堰塞湖. *地质学刊*, 2010, 34(1): 103-103.
- [18] 廖梦娜, 金伊丽, 李晨瑜, 李凯. 藏东南巴松措 200 年沉积过程及其对硅藻记录的影响. *生态学报*, 2020, 40(3): 1089-1100.
- [19] 罗珍, 仁增拉姆, 陈虎林, 黄香. 西藏巴松措冷季水化学特征及其影响因素[J/OL]. *中国环境科学*: 1-13 [2021-08-16]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210618.007>.
- [20] 徐秀美, 胡淑芹, 旦珍. 旅游扶贫背景下农牧民生计资本可持续性评价——以巴松措景区为例. *旅游研究*, 2019, 11(3): 36-45.
- [21] 刘雪舒. 西藏巴松措景区工布藏族古村落景观形态研究[D]. 四川农业大学, 2015.
- [22] 王苏民, 窦鸿身. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 章宗涉, 黄祥飞. *淡水浮游生物研究方法*. 北京: 科学出版社, 1991.
- [24] 熊昀青. 水质评价和监测的生物学方法进展. *上海环境科学*, 2000, 19(2): 79-81.
- [25] 蒋燮治, 沈愠芬, 龚循矩. *西藏水生无脊椎动物*. 北京: 科学出版社, 1983.
- [26] 沈愠芬. *中国原生动物学会. 原生动物学*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] 宋微波, 沃伦 A, 胡晓钟. *中国黄渤海的自由生纤毛虫*. 北京: 科学出版社, 2009.
- [28] 周凤霞, 陈剑虹. *淡水微型生物与底栖动物图谱(第二版)*. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [29] Pielou E C. *Ecological Diversity*. New York: Wiley, 1975.
- [30] Shannon C E, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [31] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163(4148): 688.
- [32] Pratt J R, Cairns J Jr. Functional groups in the protozoa: roles in differing ecosystems. *Journal of Protozoology*, 1985, 32(3): 415-423.
- [33] Margalef R. *Diversity and Stability in Ecological Systems*. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1969.
- [34] Broady P A. Diversity, distribution and dispersal of Antarctic terrestrial algae. *Biodiversity & Conservation*, 1996, 5(11): 1307-1335.
- [35] 姜建国, 张颖, 吴生桂. 东湖原生动物群落结构变化与水质差异的相关研究. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 40-44.
- [36] 张荣坤, 尹东鹏, 赵文, 魏杰, 蔡志龙. 白石水库浮游动物群落结构及鱼产力研究. *吉林水利*, 2021, (4): 1-6, 17-17.
- [37] 陆丹, 张静, 耿昭克, 闵敏. 三江源重点河段湖泊浮游动物群落结构与水质评价. *人民长江*, 2019, 50(5): 41-46.
- [38] 董云仙. 云南九大高原湖泊浮游动物研究进展. *环境科学导刊*, 2015, 34(5): 5-10.
- [39] 龚路军. 五个湖泊浮游生物和主要理化指标的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [40] 谭晓丽, 施心路, 刘桂杰, 白昕. 哈尔滨人工湖泊中原生动物群落变化规律. *生态学报*, 2005, 25(10): 2650-2657.
- [41] 纪毓鹏, 李明坤, 韩东燕, 王晶, 张崇良, 任一平. 山东南部近海脊腹褐虾时空分布及其与环境因子的关系. *中国海洋大学学报*, 2020, 50(7): 56-62.
- [42] 王丽虹, 杨磊, 刘玲, 何亮, 蒋万祥, 申恒伦, 朱天顺, 潘保柱. 南四湖沉水植物物种多样性和功能多样性对水深梯度的响应. *生态学报*, 2020, 40(17): 6233-6242.
- [43] 赵楠. 黄海纤毛虫的丰度和生物量[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008.
- [44] 宗威斌. 平湖市重要水域原生动物、轮虫群落结构的时空变化及水质评价[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [45] 刘晓曦, 陈丽, 蒋伊能, 尚丽, 张涛, 李蕊, 赵帅营, 陈光杰. 抚仙湖浮游植物群落时空变化特征及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 793-803.
- [46] 孙长青. 滇池浮游动物的群落结构和种群数量变化的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [47] 安瑞志, 潘成梅, 刘洋, 巴桑. 巴松措(湖)夏季浮游植物优势种群分布格局与共存机制研究. *高原科学研究*, 2020, 4(2): 27-36.
- [48] 谢永红, 李春永, 杨中兰. 阳宗海浮游生物群落结构研究. *水资源保护*, 2015, 31(4): 47-51.
- [49] Tayo T, Longjam N, Perme B. Protozoan diseases of livestock in Arunachal Pradesh-An overview. *Veterinary World*, 2011, 4(7): 332-336.
- [50] Dubar M, Zaffino M L, Remen T, Thilly N, Cunat L, Machouart M C, Bisson C. Protozoans in subgingival biofilm: clinical and bacterial associated factors and impact of scaling and root planing treatment. *Journal of Oral Microbiology*, 2020, 12(1): 1693222.
- [51] Graham J M, Kent A D, Lauster G H, Yannarell A C, Graham L E, Triplett E W. Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system. *Microbial Ecology*, 2004, 48(4): 528-540.
- [52] Bahri S. Protozoan and myxozoan infections in wild gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) from North Lake of Tunis, Tunisia. *Acta Parasitologica*, 2012, 57(2): 114-121.