

西藏巴松错夏季浮游植物群落的分布

刘洋^{1,2}, 安瑞志^{1,2}, 王陈^{1,2}, 潘成梅^{1,2}, 巴桑^{1,2}

(1. 西藏大学地球第三极碳中和研究中心, 西藏拉萨 850000;

2. 西藏大学生态环境学院青藏高原湿地与流域生态系统实验室, 西藏拉萨 850000)

摘要:揭示西藏巴松错浮游植物群落结构的水平和垂直分布特征及其与环境间的关系,为进一步研究高寒湖泊生态系统提供基础资料。于2020年7月对巴松错出入河流及其湖体设置15个水平采样点,并选择湖中心样点B15进行垂直分层采样,同时测定水体相关理化指标。调查共采集水样275个,分析了浮游植物物种组成、细胞丰度、生物量和物种多样性等群落结构特征,并探讨浮游植物对水平和垂直环境梯度变化的响应。结果表明:(1)巴松错夏季共鉴定浮游植物167种,隶属于5门8纲20目29科66属,物种组成为硅藻-绿藻-蓝藻型;(2)在水平方向上,平均细胞丰度为 1.845×10^4 个/L,平均生物量为0.012 mg/L;在垂直方向上,平均细胞丰度为 1.006×10^4 个/L,平均生物量为0.006 mg/L;(3)巴松错夏季浮游植物群落结构水平分布较为均匀,群落复杂程度相对较高,较垂直分布更稳定;(4)RDA分析结果表明,电导率是影响巴松错夏季浮游植物水平群落变异的主要环境因子,浊度是影响垂直变异的主要环境因子。

关键词:浮游植物;群落结构;水平分布;垂直分布;巴松错

中图分类号:Q179.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)06-0104-09

作为湖泊生态系统的初级生产者,浮游植物的动态分布受多因素控制,与水体透明度、浊度、水温、盐度、DO和pH等水环境因子密切相关,同时受到水平和垂直环境梯度的影响(Ptácnik et al, 2008)。孙萍等(2020)调查了热带东印度洋春季浮游植物群落结构水平和垂向上浮游植物种类及丰度的差异性,邢冰伟等(2020)分析了九寨沟国家级自然保护区长海夏季浮游植物群落结构的水平和垂直分布,然而有关青藏高原湖泊浮游植物群落结构水平和垂直分布方面的相关研究鲜有报道。

青藏高原高寒湖泊分布星罗密布,占中国湖泊总面积一半以上,是高原陆-气系统的基本组成要素(靳铮等, 2020)。相对于其他湖泊而言,高寒湖泊受人类活动干扰较小,对气候变化的响应更快、更敏感,基本保持原始生态系统。自然状态下湖泊水生生物群落组成及其对环境的响应,已引起国内外学

者的广泛关注(王捷等, 2015; 陈立婧等, 2013; Li et al, 2021)。巴松错位于尼洋河最大支流巴河的宽谷中,是西藏东南部最大的高山冰川堰塞湖之一,在维持区域生态平衡、调节气候、保持生物多样性和提高居民生产、生活等方面起着重要作用。目前,有关巴松错的水生生物学研究主要集中在浮游植物(安瑞志等, 2020; 2021)和原生动植物(杨欣兰等, 2022)等方面,但针对巴松错浮游植物的系统和持续研究仍较少。

为了解西藏巴松错浮游植物群落结构水平和垂直分布差异及其与环境的关系,于2020年7月对巴松错出入河流及其湖体的浮游植物进行了水平和垂直分层定性定量采集,研究分析了浮游植物物种组成、细胞丰度、生物量和物种多样性等群落结构特征,掌握巴松错水平和垂直上浮游植物群落分布格局和规律,并探讨浮游植物对水平和垂直环境梯度变化的响应,以期为进一步研究高寒湖泊生态系统提供资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

巴松错(29°59'~30°04'N, 93°53'~94°01'E)位于念青唐古拉山东端南麓、西藏东南部和林芝市西北部工布江达境内,属尼洋河水系,外观狭长呈新月形,分为东、西2个湖盆,湖面平均海拔3 469 m,最大湖深约120 m,湖泊面积25.9 km²,流域面积1 290 km²。

收稿日期:2021-12-17 修回日期:2023-09-25

基金项目:国家自然科学基金(32070418, 31660620);西藏大学培育基金(ZDQMJH19-34);2022年中央财政支持地方高校改革发展专项资金(藏财预指[2022]1号)。

作者简介:刘洋,女,1988年生,实验师,主要从事高寒湿地浮游植物生态学研究。E-mail:ly@utibet.edu.cn

通信作者:巴桑,男,1970年生,教授,主要从事高寒湿地与流域生态系统研究。E-mail:hbasang2003@aliyun.com

该湖泊四面环山,气候温和,属于典型的高原温带半湿润季风气候,年均降水量 646 mm,主要集中在 4–10 月,年平均气温 6.3 ℃,年无霜期 175 d,年日照时数为 2 016 h(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1981)。湖水补给主要为天然降水和仲措弄巴曲、新措弄巴曲、白朗曲、罗结曲和扎拉河的冰川融雪水,经由巴河流出,最终汇入尼洋河(中国科学院青藏高原综合科学考察队,1984)。

1.2 样点设置

2020 年 7 月,根据巴松错的生态环境特征、功能分区与梯度结构等特征,在巴松错出入河流及其湖体设置 15 个水平采样点(图 1),并选择湖中心样点 B15 进行垂直分层采样,现场使用传统挂锤式测得 B15 样点水深为 109.5 m,使用赛氏盘测定水体透明度为 0.69 m;现场以 1 m 为间隔测定温度,以 $\geq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的温度变化梯度为温跃层深度(黄磊等,2015),以表层水温改变 $\geq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所对应的深度为混合层深度

(黄亚男等,2017),以湖底以上 0.5 m 水深作为底层深度(中国科学院南京地理与湖泊研究所,2015),并绘制相应的垂直变化曲线,据此确定垂直采样深度。采样点的基本信息见表 1。

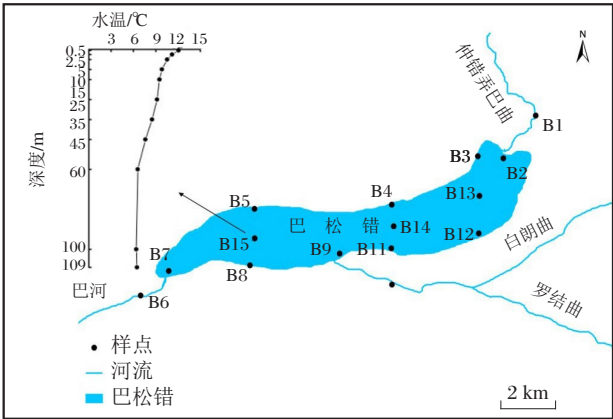


图 1 巴松错采样点分布

Fig.1 Sampling sites in Basomtso Lake

表 1 巴松错采样点基本信息

Tab.1 Basic information of sampling sites in Basomtso Lake

水平采样点					垂直采样点				
样点名称	位置	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	样点名称	分层	经度(E)	纬度(N)	海拔/m
B1-0.5	仲措弄巴曲	94°1'51.96"	30°3'26.44"	3446.2	B15-0.5	表层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B2-0.5	东部入湖河口区	94°1'9.60"	30°2'33.45"	3441.0	B15-2.5	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B3-0.5	北部湖岸区	94°0'36.20"	30°2'35.98"	3447.4	B15-5	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B4-0.5	北部湖岸区	93°58'43.52"	30°1'36.00"	3444.8	B15-10	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B5-0.5	北部湖岸区	93°55'43.89"	30°1'30.80"	3440.0	B15-15	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B6-0.5	巴河	93°53'14.83"	29°59'43.41"	3420.6	B15-25	变温层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B7-0.5	西部出湖河口区	93°53'51.65"	30°0'13.82"	3439.6	B15-35	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B8-0.5	南部湖滨区	93°55'37.92"	30°0'20.80"	3445.3	B15-45	温跃层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B9-0.5	中部入湖河口区	93°57'35.33"	30°0'35.38"	3445.9	B15-60	等温层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B10-0.5	罗结曲	93°58'43.84"	29°59'56.96"	3478.0	B15-100	等温层	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B11-0.5	南部湖滨区	93°58'42.93"	30°0'41.91"	3444.3	B15-109	底部	93°55'44.13"	30°0'54.25"	3453.1
B12-0.5	南部湖滨区	94°0'37.39"	30°1'0.42"	3444.8					
B13-0.5	湖心区	94°0'38.27"	30°1'46.85"	3442.2					
B14-0.5	湖心区	93°58'46.09"	30°1'9.19"	3442.7					
B15-0.5	湖心区	93°55'44.13"	30°0'54.24"	3453.1					

1.3 样品采集及鉴定

浮游植物定性、定量样品根据《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉和黄祥飞,1991)进行采集,物种鉴定参考相关文献(迟若文,1990;中国科学院青藏高原综合科学考察队,1992;朱蕙忠和陈嘉佑,2000;胡鸿钧和魏印心,2006)。水深小于 40 m 的水样使用有机玻璃采水器采集,水深 40 m 以上的水样则使用卡盖式采水器(QCC15)采集,河流水样直接使用 2 L 采水器采集。其中 1 L 水样用于定性样品,现场使用 25 号浮游生物网过滤浓缩至 50 mL,并立即用 4% 的甲醛溶液固定保存;1 L 水样

用于定量样品,现场立即用 15 mL 鲁哥氏碘液固定,带回实验室沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL。计数时,移取 0.1 mL 浓缩匀液至 0.1 mL 计数框,在 OLYMPUS CX23 显微镜下进行物种鉴定,每个样品计数 2~3 次。浮游植物生物量(湿重)通过体积换算间接获得(Sun & Liu, 2003; Hillebrand et al, 1999; Kremer et al, 2014)。

pH、电导率(EC)、盐度(Salt)及总溶解盐(TDS)使用 PCSTestr35 防水型多参数笔式测试仪(EUTECH, 美国)测定;水温(WT)和电阻率(RES)使用 HI98192 微电脑电阻率测定仪测定;溶解氧(DO)使

用 HI98193 微电脑溶解氧测定仪 (HANNA, 意大利) 测定; 浊度 (TUR) 使用 HI98703 微电脑多量程浊度测定仪 (HANNA, 意大利) 测定; 氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 使用 HI83399 水质检测仪 (HANNA, 意大利) 测定。

1.4 数据处理与分析

为了避免单一多样性指数造成结果偏差, 利用 Gleason-Margalef 丰富度指数 D (Margalef, 1969)、Simpson 优势度指数 S (Simpson, 1997)、Shannon-Wiener 多样性指数 H' (Shannon & Weaver, 1949) 和 Pielou 均匀度指数 E (Pielou, 1966) 这 4 个指数来计算巴松错夏季浮游植物的多样性。计算公式如下:

$$D = \frac{N_s - 1}{\ln N}$$
$$S = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$
$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$

①

②

③

$$E = \frac{H'}{\ln N_s}$$

④

式中: N 为同一样点中个体总数; N_s 为物种数; P_i 为第 i 种个体所占比例。

采用 Excel 2016 和 Origin 2022 软件进行数据分析、统计和绘图, 采用 ArcGIS 10.6 软件绘制地图。用 R X64 4.0.2 软件包 Vegan 进行 BIOENV 分析, 环境因子均进行 $\lg (x+1)$ 转换。使用 CANOCO 5.0 软件对多样性水平和垂直分布做去趋势对应分析 (DCA), 排序轴长度均小于 3, 故采用冗余分析 (RDA)。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子

本研究从 15 个样点采集获得 25 个湖水样品, 巴松错夏季水体理化因子的水平和垂直变化情况见图 2 和表 2。

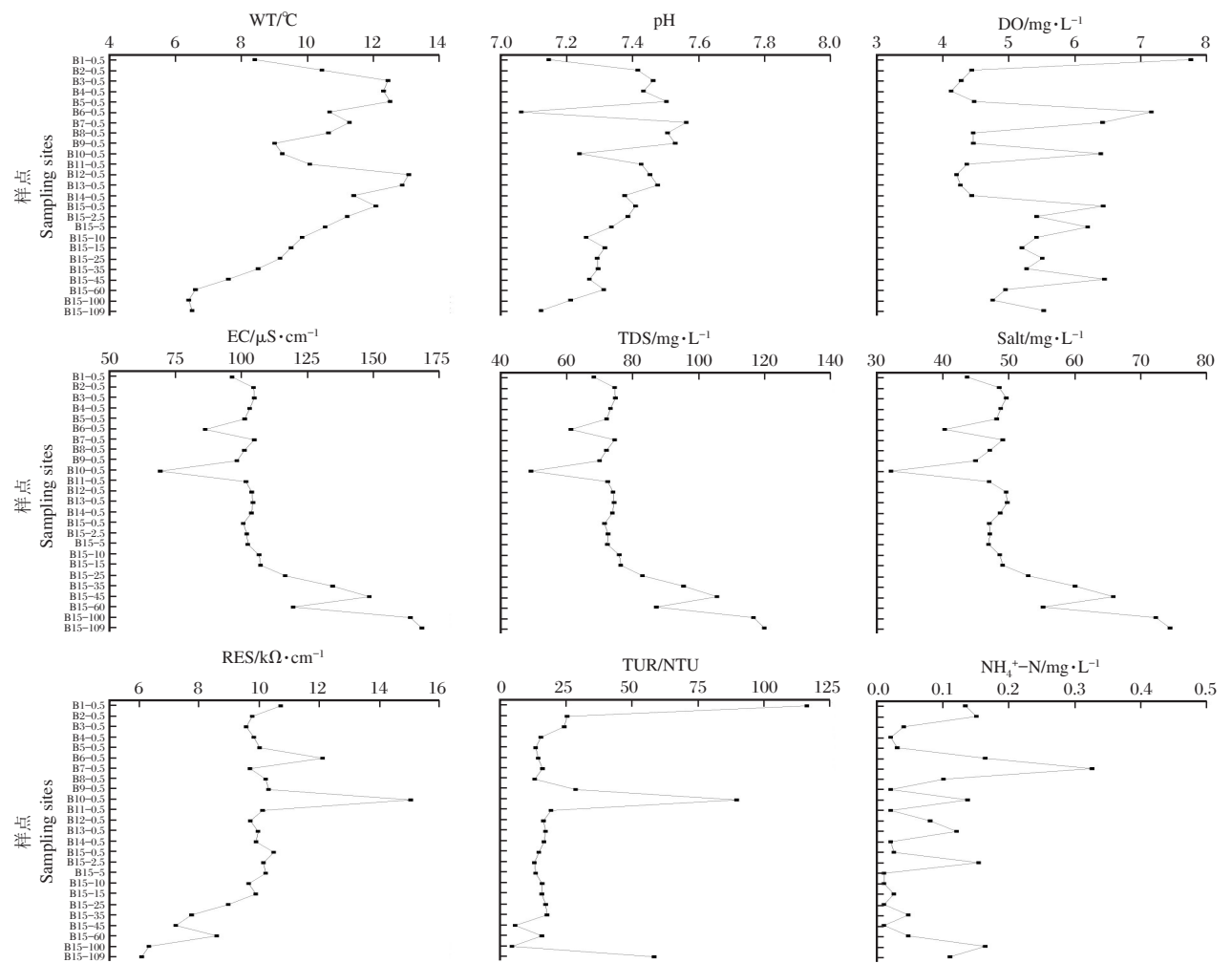


图2 巴松错夏季水体理化因子变化

Fig.2 Horizontal and vertical distribution of water physical and chemical factors during summer season in Basomtso Lake

表2 巴松错夏季水体理化因子

Tab.2 Horizontal and vertical distribution of water physical and chemical factors during summer season in Basomtso Lake

水体理化因子	水平		垂直	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
WT/℃	8.40~13.07	11.09	6.40~12.07	8.90
pH	7.06~7.56	7.40	7.12~7.41	7.29
DO/mg·L ⁻¹	4.12~7.75	5.17	4.75~6.44	5.55
EC/μS·cm ⁻¹	69.20~104.83	98.91	100.63~168.27	124.52
TDS/mg·L ⁻¹	48.97~74.53	70.19	71.27~119.67	88.52
Salt /mg·L ⁻¹	32.07~49.67	46.21	46.83~74.3	56.22
RES/kΩ·cm ⁻¹	9.55~15.03	10.48	6.07~10.47	8.65
TUR/NTU	12.60~115.67	28.88	3.97~57.87	16.98
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.02~0.33	0.09	0.01~0.16	0.06

2.2 巴松错浮游植物群落结构

2.2.1 物种组成 巴松错夏季共鉴定浮游植物167种,隶属于5门8纲20目29科66属,水平方向物种数大于垂直方向,物种组成均以硅藻门-绿藻门-蓝藻门为主,裸藻门和隐藻门种类较少,仅出现在水平方向(表3)。

巴松错夏季浮游植物群落多集合韦恩图如图3。

在水平方向上,各样点浮游植物的共有种类仅有1种,为肘状针杆藻(*Synedra ulna*)。相比较于水平方向,在垂直方向上,各样点浮游植物不存在共有种类。

表3 巴松错夏季浮游植物组成

Tab.3 Summer phytoplankton composition in Basomtso Lake

组成分布	硅藻门	绿藻门	蓝藻门	裸藻门	隐藻门	总物种数
水平方向	33属 104种	15属 17种	10属 12种	2属 4种	1属 1种	138种
垂直方向	24属 48种	2属 2种	1属 1种	-	-	51种
总计	36属 130种	16属 19种	11属 13种	2属 4种	1属 1种	167种

2.2.2 细胞丰度和生物量 巴松措夏季浮游植物细胞丰度和生物量的水平和垂直变化如图4。在水平方向上,细胞丰度的变化范围是0.195×10⁴~7.095×10⁴个/L,平均值为1.845×10⁴个/L,不同样点间细胞丰度差异性较大,最高值在B13-0.5,为7.095×10⁴个/L,最低值在B12-0.5,为0.195×10⁴个/L;硅藻门细胞丰度占比相对最高,为22.22%~100%,其次是绿藻门和蓝藻门,细胞丰度变化范围分别

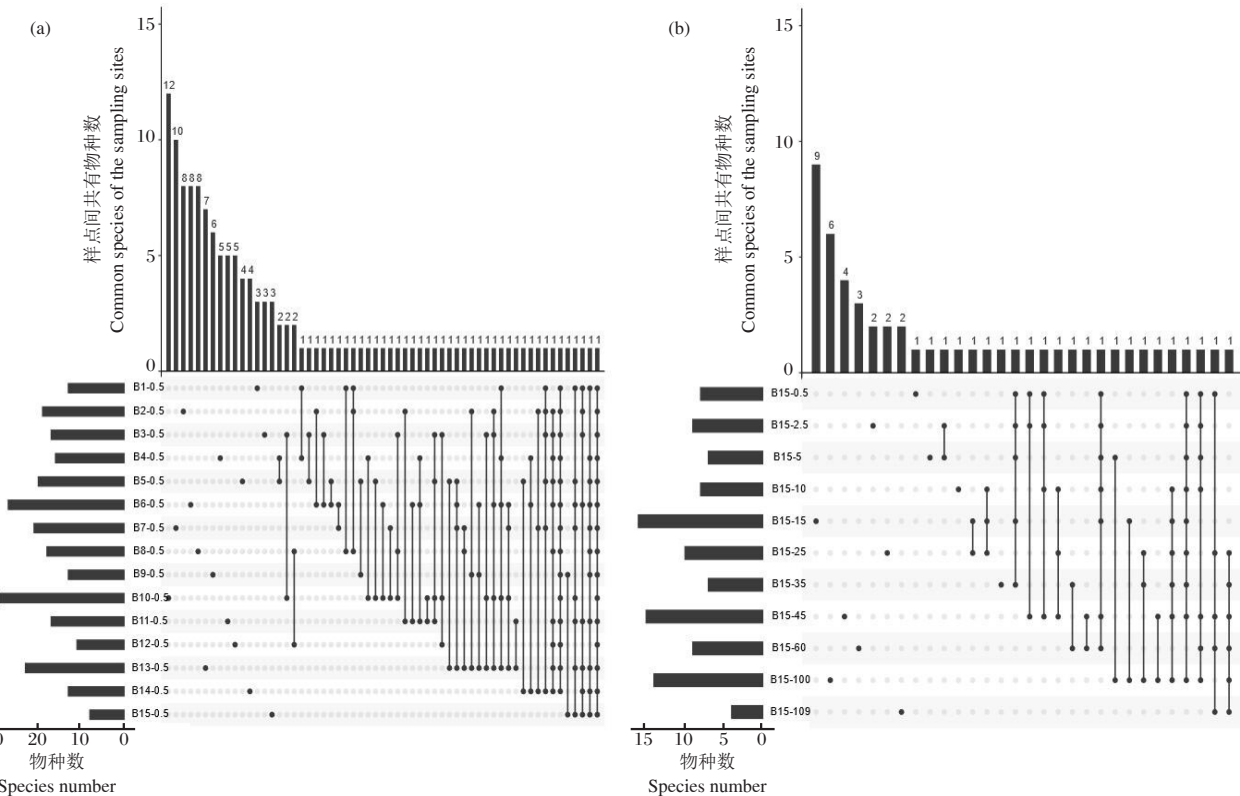


图3 巴松错夏季浮游植物群落水平(a)和垂直(b)分布

Fig.3 Multi-set Venn diagram of phytoplankton species between horizontal and vertical distributions of summer phytoplankton communities in Basomtso Lake

为 $0\sim0.628\times10^4$ 和 $0\sim1.256\times10^4$ 个/L, 占比为 $0\sim55\%$ 和 $0\sim38.89\%$; 生物量为 $0.003\sim0.044$ mg/L, 平均值为 0.012 mg/L, 不同样点间浮游植物生物量差异性较大, 最高值在 B13-0.5, 最低值在 B14-0.5; 硅藻门生物量占比相对最高, 变化范围为 $10.98\%\sim100\%$, 其次是绿藻门和蓝藻门, 生物量变化范围分别为 $0\sim0.013$ 和 $0\sim0.008$ mg/L, 占比为 $0\sim88.94\%$ 和 $0\sim27.49\%$;

在垂直方向上, 细胞丰度的变化范围是 $0.21\times10^4\sim2.79\times10^4$ 个/L, 平均值为 1.006×10^4 个/L, 不同垂直分层细胞丰度差异性较大, 最高值在 B15-100, 为 2.79×10^4 个/L, 最低值在 B15-109, 为 0.21×10^4 个/L, 硅藻门细胞丰度占比相对最高, 变化范围为 $54.55\%\sim$

100% , 蓝藻门仅在 B15-109 样点出现, 占该样点丰度的 45.45% , 绿藻门在 B15-5 和 B15-15 样点出现, 分别占细胞丰度的 6.25% 和 2.33% ; 生物量的变化为 $0.001\sim0.027$ mg/L, 平均值为 0.006 mg/L, 不同垂直分层浮游植物生物量差异性较大, 最高值在 B15-15, 为 0.027 mg/L, 最低值在 B15-25, 为 0.001 mg/L; 硅藻门生物量占比相对最高, 为 $31.81\%\sim100\%$, 蓝藻门仅在 B15-109 样点出现, 占该样点生物量的 68.19% , 绿藻门在 B15-5 和 B15-15 样点出现, 分别占生物量的 11.56% 和 0.86% ;

2.2.3 多样性指数 巴松措各站点夏季浮游植物物种多样性的水平和垂直变化如图 5。在水平方向上,

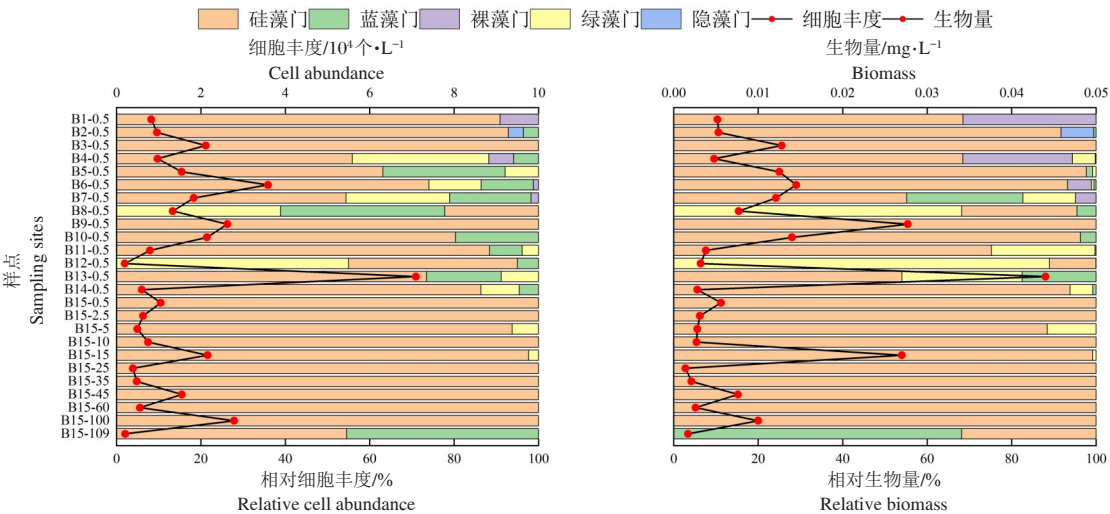


图 4 巴松措夏季浮游植物细胞丰度和生物量的水平和垂直变化

Fig.4 Horizontal and vertical distributions of phytoplankton cell abundance and biomass during summer in Basomtso Lake

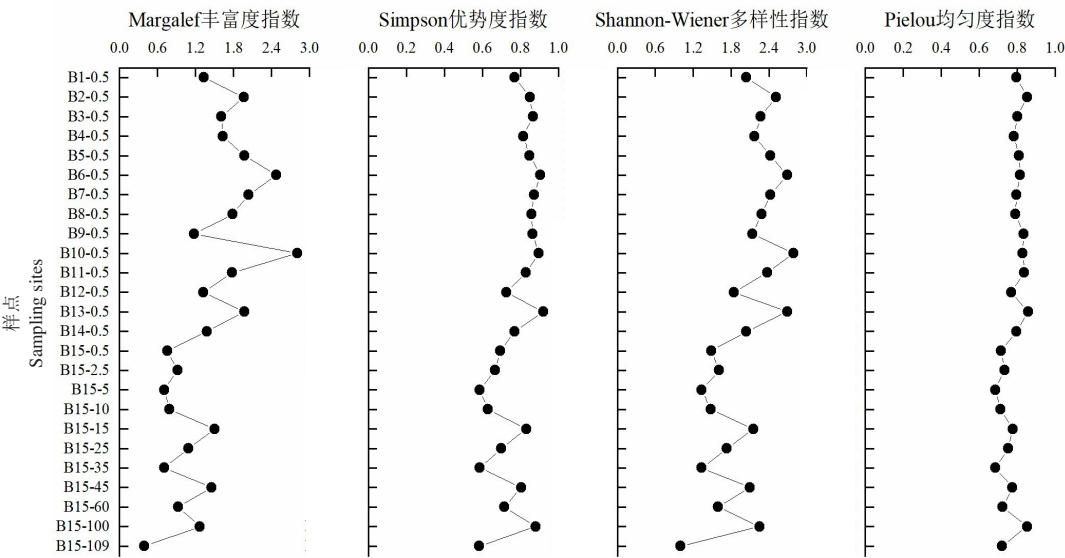


图 5 巴松措夏季浮游植物物种多样性的水平和垂直变化

Fig.5 Horizontal and vertical distribution of phytoplankton species diversity during summer in Basomtso Lake

Margalef 丰富度指数为 0.756~2.807, 均值 1.734; Simpson 优势度指数为 0.695~0.921, 均值为 0.832; Shannon-Wiener 多样性指数为 1.487~2.792, 均值为 2.28; Pielou 均匀度指数为 0.715~0.858, 均值为 0.806; 在垂直方向上, Margalef 丰富度指数为 0.392~1.507, 均值为 0.955; Simpson 优势度指数为 0.583~0.881, 均值为 0.698; Shannon-Wiener 多样性指数为 0.998~2.251, 均值为 1.643; Pielou 均匀度指数为 0.685~0.853, 均值为 0.739。总体上看, 水平方向的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均高于垂直方向。

2.3 多样性与环境因子的关系

BIOENV 分析发现, pH、DO、EC、TDS、Salt 和 RES 对巴松错夏季浮游植物群落多样性水平分布的影响较大; EC 和 TUR 对巴松错夏季浮游植物群落多样性垂直分布的影响较大。

为进一步分析上述最优环境因子对巴松错夏季浮游植物群落多样性水平和垂直分布的影响, 对群落多样性与环境因子进行 RDA 分析(图 6)。结果表明, 在水平方向上, 第 1 排序轴与第 2 排序轴对群落多样性的方差的解释率分别为 48.45% 和 0.94%, 群落多样性与环境因子的相关性分别为 0.7117 和 0.4762, 前 2 轴累计方差为 49.39%, 上述环境因子对巴松错夏季浮游植物群落多样性水平分布的影响大小顺序为 EC、TDS、DO、Salt、pH 和 RES, 其中 EC($P=0.038$, $F=6.1$)是显著解释性变量, 对群落变异的解释率为 31.9%, 是影响巴松错夏季浮游植物水平群落变异的主要环境因子。在垂直方向上, 第 1 排序轴与第 2 排序轴对群落多样性的方差的解释率分别为 57.67% 和

0.3%, 群落多样性与环境因子的相关性分别为 0.7693 和 0.4424, 前 2 轴累计方差为 57.97%, 上述环境因子对巴松错夏季浮游植物群落多样性垂直分布的影响大小顺序为 TUR 和 EC, 其中 TUR($P=0.008$, $F=12.1$)是显著解释性变量, 对群落变异的解释率为 57.4%, 是影响巴松错夏季浮游植物群落垂直变异的主要环境因子。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

本研究共鉴定出浮游植物 167 种, 隶属于 5 门 8 纲 20 目 29 科 66 属, 少于本课题组之前报道的 242 种(安瑞志等, 2021), 可能和 2 次调查的采样周期、样点范围及分类鉴定的详细程度等因素有关。这也反映了巴松错浮游植物群落仍然处于动态演替过程中。从浮游植物种类来看, 物种组成以硅藻占绝对优势, 其次为绿藻和蓝藻, 这与本课题组 2017~2018 年间对巴松错浮游植物调查结果基本一致(安瑞志等, 2021), 主要原因可能是大多数硅藻都是狭冷性物种, 适合在较寒冷和贫营养的水环境中生活(潘成梅等, 2021), 而巴松错是一个过水型湖泊, 其水位相较于吞吐型或封闭型湖泊更为稳定(廖梦娜等, 2020), 浮游植物常年在较低温水环境下生存, 已形成了动态的适应性机制, 这一结果与色林错(刘洋等, 2022)、浪错(扎西拉姆等, 2021)的研究结果报道基本一致。

巴松错夏季浮游植物群落的分布具有较明显的水平和垂直空间差异, 主要体现在物种数、细胞丰度和生物量等方面。结果表明, 浮游植物垂直方向的物种数、细胞丰度和生物量均低于水平方向。在

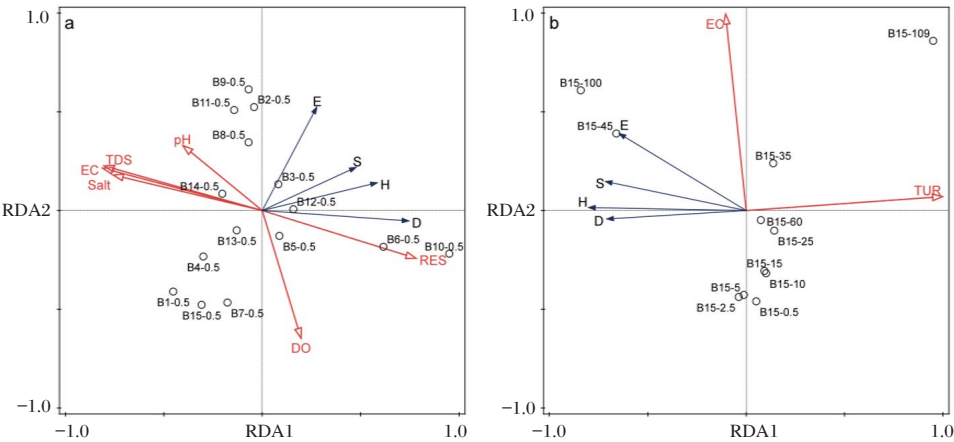


图6 巴松错夏季浮游植物水平(a)和垂直(b)分布与环境因子的RDA分析

Fig.6 Redundancy analysis of the horizontal (a) and vertical (b) distribution of phytoplankton species and environmental factors during summer in Basomtso Lake

水平方向上,生物量最高值出现在湖心区域的B13-0.5样点,为0.044 mg/L,这主要是因为该样点EC(104.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$)最高,高EC与有机质降解和离子的输入有着极大的联系,能够使藻类的光合作用得到较好的补充,为浮游植物的大量繁殖提供了较好的营养条件(李锋,2021)。在垂直方向上,生物量最大值出现在B15-15,为0.027 mg/L,主要原因可能是巴松错为深水湖泊,在夏季具有明显的温跃层,水体混合交换弱,水深15 m是巴松错浮游植物最适的生长区域,形成了浮游植物上下层分布的明显差异,这与潘继征等(2009)的研究和邢冰伟等(2020)的研究结果基本一致。

巴松错夏季浮游植物群落的水平和垂直分布差异不仅体现在物种数、细胞丰度和生物量上,还体现在物种多样性上。物种多样性是生物与环境因子长期作用和适应的结果,用来衡量浮游植物群落结构是否稳定(邱小琮等,2011)。基于浮游植物对湖泊生态系统群落稳定性进行生物学评价有很多方法,本文选择了应用最为广泛的Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数这4个指数进行评价分析。结果表明,水平方向的4个指数值均高于垂直方向,表明巴松错夏季浮游植物群落结构水平分布较为均匀,群落复杂程度相对较高,较垂直分布更稳定,这与柯志新等(2011)和籍辰旭等(2021)的研究结果基本一致。

3.2 浮游植物多样性与环境因子的关系

环境因子是浮游植物群落分布的主要影响因素,水体透明度、浊度、溶解氧、EC、pH、水温和盐度等环境因子都对浮游植物群落分布产生影响(赵秀侠等,2018)。本研究中,BIOENV分析结果显示,在水平方向上,pH、DO、EC、TDS、Salt和RES对巴松错夏季浮游植物物种多样性的影响较大;在垂直方向上,EC和TUR对巴松错夏季浮游植物物种多样性垂直分布的影响较大。但不同环境因子对浮游植物群落结构变化的影响也存在差异。王宇飞等(2015)的研究发现影响汉丰湖夏季浮游植物群落结构特征的主要因素是温度、DO、pH、TN、TP、DN和DP;牛远等(2016)的研究发现环境变量较好地解释了抚仙湖夏季热分层时期浮游植物群落组成的空间变化,WT、EC和pH是最关键影响因子,而营养盐的作用并不显著。本研究中,RDA分析结果表明,EC是影响巴松错夏季浮游植物水平群落变异的主要环境因子,TUR是影响垂直变异的主要环境因子。EC与水体

营养盐含量有关系,而营养盐为浮游植物提供充足的营养,EC通过影响浮游植物的代谢活动和繁殖从而影响浮游植物的群落结构(赵秀侠等,2021)。而浊度(TUR)是由于水中含有泥沙、黏土、有机物、无机物、浮游生物等悬浮物质所造成的,可使光散射或吸收,影响浮游植物对光的吸收(聂小芬等,2021)。本研究采样时间为夏季,降雨径流所携带的陆源物质发生沉降,也会引起水体浊度升高,透明度降低,光合作用减弱,在垂向上易于产生生物分层,对浮游植物的垂直分布具有一定的抑制作用(安瑞志等,2021)。因此,浮游植物多样性的变化是多种环境因子在水平与垂直分布共同作用的结果。

本研究只涉及到1个季节以及水体中的部分理化因子,不能得出巴松错浮游植物水平与垂直分布的季节动态变化,今后有待于加强对其季节动态变化研究,并进行初级生产力估算的研究,以便为碳中和背景下高寒湖泊固碳潜力的计量及估算提供数据支持。

参考文献

- 安瑞志,潘成梅,刘洋,等,2020. 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[J]. 高原科学研究,4(2):27-36.
- 安瑞志,潘成梅,塔巴拉珍,等,2021. 西藏巴松错浮游植物功能群垂直分布特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,33(1):86-101.
- 陈立婧,杨菲,吴淑贤,等,2013. 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,22(4):577-585.
- 迟若文,1990. 西藏硅藻图集[M]. 拉萨:西藏人民出版社.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 黄磊,王君波,朱立平等,2015. 纳木错水温变化及热力学分层特征初步研究[J]. 湖泊科学,27(4):711-718.
- 黄亚男,纪道斌,龙良红,等,2017. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析[J]. 长江流域资源与环境,26(3):461-470.
- 籍辰旭,陈逍遥,陈火柴,等,2021. 三沙湾春季浮游植物群落结构特征[J]. 渔业研究,43(1):42-52.
- 靳铮,张雪芹,次旦央宗,2020. 藏南羊卓雍错湖面非封冻期温湿变化及辐射平衡分析[J]. 干旱区研究,37(4):947-955.
- 柯志新,黄良民,谭焯辉,等,2011. 2007年夏季南海北部浮游植物的物种组成及丰度分布[J]. 热带海洋学报,30(1):131-143.
- 廖梦娜,金伊丽,李晨瑜,等,2020. 藏东南巴松错200年沉积

- 过程及其对硅藻记录的影响[J].生态学报,40(3):1089-1100.
- 李锋,2021.二滩水库浮游植物群落结构与水环境因子时空变化及其相关性研究[D].重庆:西南大学.
- 刘洋,安瑞志,巴桑,2022.西藏色林错-普若岗日国家公园潜在建设区夏季浮游植物群落生态特征[J].水生生态学杂志,43(6):51-58.
- 聂小芬,杨正健,王从锋,等,2021.澜沧江梯级水库建设下水体电导率和浊度时空分布特征[J].三峡大学学报(自然科学版),43(1):18-24.
- 牛远,孔祥虹,余辉,等,2016.抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征[J].生态学杂志,35(7):1865-1871.
- 潘成梅,刘洋,安瑞志,等,2021.西藏麦地卡湿地的浮游植物——1.优势种的时空生态位[J].湖泊科学,33(6):1805-1819.
- 潘继征,熊飞,李文朝,等,2009.抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子[J].生态学报,29(10):5376-5385.
- 邱小琮,赵红雪,2011.宁夏沙湖浮游植物群落结构及多样性研究[J].水生生态学杂志,32(1):20-26.
- 孙萍,李艳,潘玉龙,等,2020.热带东印度洋春季浮游植物群落结构空间特征分析[J].海洋学报,42(8):76-88.
- 邢冰伟,徐季雄,曹玥,等,2020.九寨沟国家级自然保护区长海夏季浮游植物群落结构及生态评价[J].湖泊科学,32(4):1088-1099.
- 王捷,李博,冯佳,等,2015.西藏西南部湖泊浮游藻类区系及群落结构特征[J].水生生物学报,39(4):837-844.
- 王宇飞,赵秀兰,何丙辉,等,2015.汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J].环境科学,36(3):922-927.
- 杨欣兰,潘瑛子,巴桑,2022.巴松措原生动物群落结构季节及垂直分布[J].生态学报,42(08):3216-3227.
- 赵秀侠,方婷,杨坤,等,2018.安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系[J].植物科学学报,36(5):687-695.
- 赵秀侠,卢文轩,梁阳阳,等,2021.安徽三座通江湖泊秋季浮游植物群落结构特征及其影响因子[J].生态学杂志,40(1):67-75.
- 扎西拉姆,陈美群,牟振波,等,2022.西藏浪错夏季浮游植物组成与环境因子的关系[J].水产科学,41(1):137-142.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队,1981.西藏水利[M].北京:科学出版社.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队,1984.西藏河流与湖泊[M].北京:科学出版社.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队,1992.西藏藻类[M].北京:科学出版社.
- 中国科学院南京地理与湖泊研究所,2015.湖泊调查技术规程[M].北京:科学出版社.
- 朱蕙忠,陈嘉佑,2000.中国西藏硅藻[M].北京:科学出版社.
- Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, et al, 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae[J]. Journal of Phycology, 35(2): 403-424.
- Kremer C T, Gillette J P, Rudstam L G, et al, 2014. A compendium of cell and natural unit biovolumes for >1200 freshwater phytoplankton species[J]. Ecology, 95(10): 2984.
- Li Z X, Gao Y, Wang S Y, et al, 2021. Phytoplankton community response to nutrients along lake salinity and altitude gradients on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecological Indicators, 128: 107848.
- Margalef R, 1969. Diversity and Stability in Ecological Systems[M]. Upton: Brookhacen National Laboratory: 13-26.
- Pielou E C, 1966. The measurements of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 13:131-144.
- Ptacinik R, Lepist L, E Willén, et al, 2008. Quantitative responses of lake phytoplankton to eutrophication in Northern Europe[J]. Aquatic Ecology, 42(2):227-236.
- Shannon C E, Weaver W, 1949. The mathematical theory of communication[M]. Urbana:University of Illinois Press.
- Simpson E H, 1997. Measurement of Diversity[J]. Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, 11(6):812-812.
- Sun J, Liu D Y, 2003. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. Journal of Plankton Research, 25(11): 1331-1346.

(责任编辑 郑金秀)

**Horizontal and Vertical Distributions of the Summer Phytoplankton
Community in Basomtso Lake of Xizang, China**

LIU Yang^{1, 2}, AN Rui-zhi^{1, 2}, WANG Chen^{1, 2}, PAN Cheng-mei^{1, 2}, BA Sang^{1, 2}

(1. Center for Carbon Neutrality in the Earth's Third Pole, Tibet University, Lhasa 850000, P.R. China;
2. Laboratory of Wetland and Catchment Ecosystem in Tibetan Plateau, School of Ecology
and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, P.R. China)

Abstract: In this study, we explored the horizontal and vertical distributions of the phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Basomtso Lake of Tibet, aiming to provide basic data for the further study of plateau lake ecosystems. In July 2020, horizontal water samples were collected at 15 sampling sites (B1–15) and vertical samples were collected at 11 depths at B15, the sampling site near the center of Basomtso Lake. Physical and chemical parameters of the lake water were also measured. A total of 275 water samples were collected for phytoplankton analysis, focusing on species composition, cell abundance and biomass, and species diversity. The response of phytoplankton to changes in horizontal and vertical environmental gradients were analyzed by redundancy analysis (RDA). Results show that: (1) A total of 167 phytoplankton species from 66 genera, 29 families, 20 orders, 8 classes and 5 phyla were identified, with dominance by bacillariophyta–chlorophyta–cyanophyta. Species richness of the horizontal distribution was higher than that of the vertical distribution. (2) Horizontally, the average cell abundance and biomass were 1.845×10^4 cells/L and 0.012 mg/L, and vertically, the average cell abundance and biomass were 1.006×10^4 cells/L and 0.006 mg/L. (3) The Margalef richness, Simpson dominance, Shannon–Wiener diversity and Pielou evenness indices of the summer phytoplankton community in the horizontal distribution were all higher than those of the phytoplankton community in the vertical distribution. These indices show that the horizontal distribution was more uniform, and that community complexity and stability were higher than in the vertical distribution. (4) RDA showed that electrical conductivity (EC) was the primary environmental factor associated with the horizontal distribution of phytoplankton, and turbidity (TUR) was the primary environmental factor associated with the vertical distribution of phytoplankton in Basomtso Lake. The results of this study provide basic data for further study of alpine lake ecosystems.

Key words : phytoplankton ; community structure ; horizontal distribution ; vertical distribution ; Basomtso Lake