

西藏麦地卡湿地的浮游植物

—2.功能群特征及其与环境因子的关系^{*}

潘成梅^{**}, 刘 洋^{**}, 安瑞志, 巴 桑^{***}

(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:为揭示青藏高原湿地浮游植物功能群时空分布特征与环境因子的关系,本文于2019年7月(丰水期)和2019年10月(枯水期)在麦地卡湿地调查浮游植物功能群组成和生物量,并运用Spearman相关性分析、冗余分析(RDA)和典范对应分析(CCA)等方法,对麦地卡湿地浮游植物功能群时空分布特征及其与环境因子的关系进行分析。结果表明:1)根据功能群分类方法,麦地卡湿地浮游植物可划分为27个功能群,分别为A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、L_O、M、MP、N、P、S1、S2、T、T_B、T_C、W1、W2、X1、X2、X3和Z;在时间维度上,丰水期有26个功能群,枯水期有23个功能群;在空间维度上,河流湿地有24个功能群,湖泊湿地有23个功能群,沼泽湿地有12个功能群。2)丰水期,以功能群A、D、L_M、L_O、MP、N、P、T、T_B和X3为主,枯水期以功能群A、D、J、L_M、L_O、MP、N、P、T和T_B为主,其中A和T功能群为2个水情期的共有绝对优势功能群,功能群J仅为枯水期的绝对优势功能群。3)生态状态指数(*Q*)范围为1.80~4.86,平均值为3.80,表明麦地卡湿地水质状态为“好”。4)相关性分析表明,浊度、COD_{Cr}、总磷和硝态氮与部分优势功能群生物量具有显著相关性;RDA分析表明,盐度和总氮是影响丰水期优势功能群生物量的主要环境因子。CCA分析表明,总氮和硝态氮是影响枯水期优势功能群生物量的主要环境因子。

关键词:麦地卡湿地;浮游植物;功能群;环境因子;时空分布

Phytoplankton in Mitika Wetland, Tibet, China:2. Characteristics of functional groups and their relationship with environmental factors^{*}

Pan Chengmei^{**}, Liu Yang^{**}, An Ruizhi & Ba Sang^{***}

(Laboratory of Wetland and Catchments Ecology in Tibetan Plateau, Faculty of Natural Sciences, Tibet University, Lhasa 850000, P.R.China)

Abstract: In order to reveal the relationship between temporal and spatial distribution characteristics of phytoplankton functional groups and environmental factors in Qinghai-Tibet Plateau in wetlands, the composition and biomass of phytoplankton functional groups were investigated in the Mitika Wetland in July 2019 (wet season) and October 2019 (dry season). The Spearman correlation analysis, redundancy analysis (RDA) and canonical correspondence analysis (CCA) were used to analyse the temporal and spatial distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in the Mitika Wetland. The results showed that: 1) According to the functional group classification method, the phytoplankton in the Mitika Wetland can be divided into 27 functional groups, which were A, B, C, D, E, F, G, H1, J, K, L_M, L_O, M, MP, N, P, S1, S2, T, T_B, T_C, W1, W2, X1, X2, X3, Z. In the time dimension, there were 26 functional groups in the wet season, 23 functional groups in the dry season. In the spatial dimension, there were 24 functional groups in river wetland, 23 functional groups in lake wetland and 12 functional groups in swamp wetland. 2) In the wet season, functional groups A, D, L_M, L_O, MP, N, P, T, T_B and X3 dominated. In the dry season, functional groups A, D, J, L_M, L_O, MP, N, P, T and T_B dominated. Functional groups

* 2021-08-26 收稿; 2021-11-01 收修改稿。

国家自然科学基金项目(32070418,31660620)、2022年中央支持地方高校发展专项资金项目(藏财预指〔2022〕01号)和西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目(2019-GSP-S050)联合资助。

** 并列第一作者; E-mail: panchengmei@aliyun.com; ly@utibet.edu.cn.

*** 通信作者; E-mail: hbasang2003@aliyun.com.

A and T were the common absolute dominant functional groups in two hydrological periods, and functional group J was the absolute dominant functional group only in dry period. 3) Ecological status index values ranged from 1.80 to 4.86, with an average value of 3.80, indicating that the water quality of the Mitika Wetland was "good". 4) Correlation analysis showed that turbidity, COD_{Cr}, total phosphorus and nitrate nitrogen were significantly correlated with the biomass of partial dominant functional groups. RDA analysis showed that salinity and total nitrogen were the main environmental factors affecting the biomass of dominant functional groups in the wet season. CCA analysis showed that total nitrogen and nitrate nitrogen were the main environmental factors affecting the biomass of dominant functional groups in the dry season.

Keywords: Mitika Wetland; phytoplankton; functional groups; environmental factors; spatio-temporal distribution

浮游植物是湿地生态系统中初级生产者的重要组成部分和生态指示性类群,其物种组成、丰度、生物量以及优势种能直接反映湿地水质的状况^[1-2]。但至今为止常规传统的系统分类学并没有考虑藻类对环境响应的物种特异性和环境特异性,导致鉴定得出的藻类群落结构变化与环境因子之间的关系不准确^[3],难以体现浮游植物在湿地生态系统中的生态特征和生境类型^[4-5]。因此,国内外学者便将具有相同或相近的生态位的优势种组合定义为功能群,以生理生长特征和生态适应性为基础,把生理、形态和生存策略相似或相同的浮游植物归为一个功能群,作为浮游植物对生境变化的响应的基本单元^[6]。

1980 年 Reynolds 借鉴 Grime 在 1977 年提出的陆地植物生态学功能群的概念,将功能群的概念引入水生态系统,从个体环境适应性、生态位竞争机制角度出发,将具有相同环境适应策略的浮游植物种类划分为同一个类群,形成了具有相同生态适应特征的分组,经数次改善将浮游植物划分为 31 个不同的功能群(functional group, FG)^[7-8]。以此为基础,众多学者进行了研究,2009 年 Padisák 等进行了优化完善并鉴定划分了 39 个功能群^[9]。近年来,该方法已被广泛应用于水生态学研究^[10-11]。国内外研究功能群在湿地浮游植物生态学方面应用的报道日益增多^[12-14]。然而有关青藏高原湿地浮游植物功能群方面的相关研究鲜有报道^[1],至今有关麦地卡湿地的生物学研究主要集中在种子植物、原生动物等方面^[15-16],浮游植物相关研究报告较少^[17]。

为了解青藏高原湿地浮游植物功能群时空分布特征与环境因子的关系,本文选取西藏四大国际湿地之一的麦地卡湿地为研究对象,于 2019 年 7 月(丰水期)和 2019 年 10 月(枯水期)在麦地卡湿地主要水系进行了定性和定量样品采集,共采集水样 252 个,利用功能群划分的方法对麦地卡湿地浮游植物进行分类,对该湿地浮游植物功能群的时空分布特征及与水环境动态质量变化规律进行了研究,旨在探索麦地卡湿地浮游植物功能群时空分布特征与环境因子的关系,为研究麦地卡湿地生态系统和稳定发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究设计

本研究选取麦地卡湿地三大核心区 14 个样点进行样品采集,其中河流湿地 7 个,湖泊湿地 6 个,沼泽湿地 1 个。采样时间分别为 2019 年 7 月(丰水期)和 10 月(枯水期)。研究区域概况、样点设置、样品采集方法和处理以及浮游植物的鉴定等内容在文献[17]中进行详细的描述,水环境因子数据分析总结见表 1。

1.2 计算

浮游植物生物量利用合适的体积公式将浮游植物丰度转化为生物量(鲜重),并假设其比重为 1.0,即生物量为浮游植物的丰度乘以各自体积的平均湿重^[18-20]。

Q 指数(生态状态指数)由 Padisák 公式确定^[21]:

$$Q = \sum_{i=1}^s P_i \cdot F_i \quad (1)$$

式中,*S* 为浮游植物功能群的数量,*P_i* 为第 *i* 功能群生物量占总生物量的比例,*F_i* 为第 *i* 个功能群的赋值。*Q* 指数为 0~5 时分别表示:0~1 差;1~2 耐受;2~3 中等;3~4 好;4~5 极好。

1.3 数据处理与分析

利用 Excel 2016 和 OriginPro 2019 软件进行数据分析、统计和绘图;对麦地卡湿地浮游植物功能群进行筛选(该功能群的相对生物量至少在一个采样点大于 10%,即表明为优势功能群^[22-23]),运用 SPSS 25.0 软件

表 1 麦地卡湿地水环境因子
Tab.1 Water environmental factors in Mitika Wetland

环境因子	丰水期				枯水期			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
WT/℃	14.05	9.03	11.04	1.3	9.37	1.81	5.46	2.37
pH	9.20	8.35	8.72	0.29	9.28	7.85	8.60	0.38
EC/(μS/cm)	180.67	53.00	107.76	32.59	214	45.67	120.86	41.88
Salt/(mg/L)	0.09	0.02	0.05	0.02	0.10	0.02	0.06	0.02
TDS/(mg/L)	90.00	27.00	53.69	16.16	107.00	23.00	60.45	20.9
DO/(mg/L)	8.00	5.19	6.54	0.74	8.58	6.65	7.28	0.53
TUR/NTU	9.08	1.46	3.94	2.26	10.90	0.65	3.07	2.85
TN/(mg/L)	0.80	0.26	0.46	0.13	0.64	0.15	0.33	0.16
NH ₃ -N/(mg/L)	0.40	0.13	0.25	0.08	0.17	0.10	0.13	0.02
COD _{Cr} /(mg/L)	19.00	0.00	9.86	4.46	17.00	2.00	10.93	3.81
TP/(mg/L)	0.02	0.00	0.0046	0	0.02	0.00	0.0039	0
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.27	0.00	0.14	0.11	0.11	0.00	0.03	0.03

对优势功能群生物量与环境因子进行了相关性分析,并结合散点图对优势功能群生物量在某一环境因子的分布范围进行预测;对优势功能群生物量和环境因子数据均进行 $\lg(x+1)$ 转换,使用 CANOCO 5.0 软件对优势功能群生物量作去趋势对应分析(DCA),丰水期排序轴长度小于 3,选择冗余分析(RDA);枯水期排序轴长度大于 3,选择典范相关分析(CCA)。

2 结果与分析

2.1 浮游植物功能群划分

根据功能群分类方法对麦地卡湿地浮游植物进行分类,可分为 27 个功能群,包括 A、B、C、D、E、F、G、H₁、J、K、L_M、L₀、M、MP、N、P、S1、S2、T、T_B、T_C、W1、W2、X1、X2、X3 和 Z;其中在时间维度上,丰水期 26 个功能群,特有的功能群为 E、S2、X2 和 Z,枯水期 23 个功能群,特有的功能群为 K;在空间维度上,河流湿地 24 个功能群,特有的功能群为 A、C、E、F、G、H₁、L_M、M、S2、T_B、T_C、W1 和 W2,湖泊湿地 23 个功能群,特有的功能群为 A、C、E、F、G、H₁、K、M、W1、W2、X2 和 Z,沼泽湿地有 12 个功能群,特有的功能群为 T_C。各功能群的代表性种(属)、生境及其 C-R-S 生长策略见表 2。在麦地卡湿地 2 个水情期中,功能群 B、D、J、L₀、MP、N、P、S1、T、T_B、X3 的出现频率均大于 50%,出现频率较高,为麦地卡湿地浮游植物常见的功能群;功能群 A、C、E、F、G、M、T_C、X1、W1、W2 的出现频率在 20%~50% 之间,仅在适宜的生境中出现;功能群 K、H₁、L_M、S2、X2、Z 的出现频率在 20% 以下,出现频率较低,为麦地卡湿地的偶见或罕见功能群(图 1)。

2.2 浮游植物优势功能群时空变化及水质生态状态评价

2.2.1 优势功能群时空变化 将相对生物量至少在一个采样点大于 10% 的浮游植物功能群定义为该采样点的优势功能群,至少在一个采样点大于 50% 的则定义为功能类群占据绝对优势^[23]。根据麦地卡湿地丰水期和枯水期浮游植物功能群相对生物量和总生物量可知,麦地卡湿地丰水期以功能群 A、D、L_M、L₀、MP、N、P、

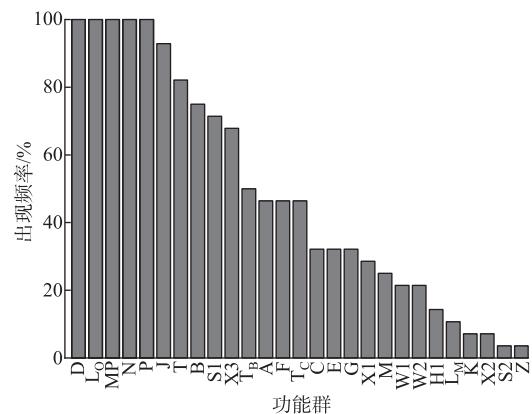


图 1 麦地卡湿地浮游植物功能群出现频率

Fig.1 Frequency of phytoplankton functional groups in Mitika Wetland

T、T_B 和 X3 为主(图 2a);枯水期以功能群 A、D、J、L_M、L_O、MP、N、P、T 和 T_B为主(图 2b);丰水期,功能群 A 和 T 是麦地卡湿地浮游植物的绝对优势功能群,枯水期,功能群 A、J 和 T 是麦地卡湿地浮游植物的绝对优势功能群.

表 2 麦地卡湿地浮游植物功能群组成
Tab.2 Composition of phytoplankton functional groups in Mitika Wetland

功能群	代表性种(属)	生长策略	生境	F 值
A	根枝藻属 <i>Rhizoclonium</i>	R	贫营养、洁净、深水	5
B	广缘小环藻 <i>Cyclotella bodanica</i>	CR	中营养、中小型或大型浅水	3
C	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	R	富营养、中小型水体	5
D	菱形藻属 <i>Nitzschia</i> , 针杆藻属 <i>Synedra</i>	R	浑浊的浅水水体	2
E	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i>	CS	贫营养或异养型、小型、浅水	3
F	球囊藻 <i>Sphaerocystis schroeteri</i> , 卵囊藻属 <i>Oocystis</i>	CS	中富营养、清水湖泊	5
G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i> , 实球藻 <i>Pandorina morum</i>	CS	富营养、停滞水体	4
H1	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	CS	富营养、分层、含氮低、浅水	0
J	盘星藻属 <i>Pediastrum</i> , 栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	CR	高营养、混合、浅水	1
K	细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	CS	营养丰富、浅水水体	4
L _M	角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	S	富到超营养、中小型水体	0
L _O	色球藻属 <i>Chrococcus</i> , 羽纹藻属 <i>Pinnularia</i>	S	贫到富营养、中到大型水体	5
M	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	S	富到超富营养、中小型水体	0
MP	桥弯藻属 <i>Cymbella</i> , 舟形藻属 <i>Navicula</i>	CR	经常性搅动、浑浊、浅水	5
N	鼓藻属 <i>Cosmarium</i> , 平板藻属 <i>Tabellaria</i>	R	中营养、温跃层	5
P	新月藻属 <i>Closterium</i> , 脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	R	中富营养、浅水、温跃层	5
S1	念珠藻属 <i>Nostoc</i>	R	中富营养、混合浑浊、透明度低	0
S2	大螺旋藻 <i>Spirulina major</i>	R	温暖、浅水、高碱	2
T	亮绿转板藻 <i>Mougeotia laetevirens</i> , 近缘黄丝藻 <i>Tribonema affine</i>	R	具有光限制、表层持续混合水体	5
T _B	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i> , 异极藻属 <i>Gomphonema</i>	R	高度潮湿的环境	2
T _C	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	R	富营养化、静止水体	3
W1	裸藻属 <i>Euglena</i> , 扁裸藻属 <i>Phacus</i>	R/CS	有机污染、浅水	2
W2	囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i>	R/CS	中营养、浅水	0
X1	纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> , 硬弓形藻 <i>Schroederia robusta</i>	C	超富营养、浅水	4
X2	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	C	中富营养、浅水	3.5
X3	小球藻属 <i>Chlorella</i> , 尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>	C	浅水、洁净、混合层	4
Z	滇蜀等隔藻 <i>Diatomella balfouriana</i>	S	无扰动、营养不良、湖泊	5

从河流湿地上看,M1 样点优势功能群从枯水期的 D、L_M、L_O、T、T_B 转变为枯水期的 L_M、T;M3 样点优势功能群从丰水期的 D、N、T、T_B 转变为丰水期的 T、T_B;M5 样点优势功能群从丰水期的 D、MP、N、T_B 转变为枯水期的 L_O、MP、N、T_B;M8 样点优势功能群从丰水期的 D、MP、N、P、T_B 转变为枯水期的 A、T;M9 样点优势功能群从丰水期的 MP、N、P、T_B 转变为枯水期的 T;M12 样点优势功能群从丰水期的 MP、P、T_B 转变为枯水期的 D、J、MP、T_B;M14 样点优势功能群从丰水期的 L_M、N、P、T_B 转变为枯水期的 A. 从湖泊湿地上看,M2 样点优势功能群从丰水期的 MP、P、T、X3 转变为枯水期的 L_O、MP、N、P;M4 样点优势功能群从丰水期的 D、MP 转变为枯水期的 J;M6 样点优势功能群从丰水期的 D、L_O、MP、N 转变为枯水期的 J、MP;M7 样点优势功能群从丰水期的 T 转变为枯水期的 D、J、MP、N;M10 样点优势功能群从丰水期的 A 转变为枯水期的 J、MP;M13 样点优势功能群从丰水期的 D、MP、P 转变为枯水期的 J、MP. 从沼泽湿地上看,M11 样点优势功能群从丰水期的 MP、T 转变为枯水期的 L_O、MP、T.

总体来看,麦地卡湿地浮游植物优势功能群时空变化明显,河流湿地优势功能群从丰水期的 D、L_M、L_O、MP、N、P、T 和 T_B 转变为枯水期的 A、D、J、L_M、L_O、MP、N、T 和 T_B,湖泊湿地优势功能群从丰水期的 A、D、L_O、MP、N、P、T 和 X3 转变为枯水期的 D、J、L_O、MP、N、P,沼泽湿地优势功能群从丰水期的 MP、T 转变为枯水期

的 L_o 、 MP 、 T 。

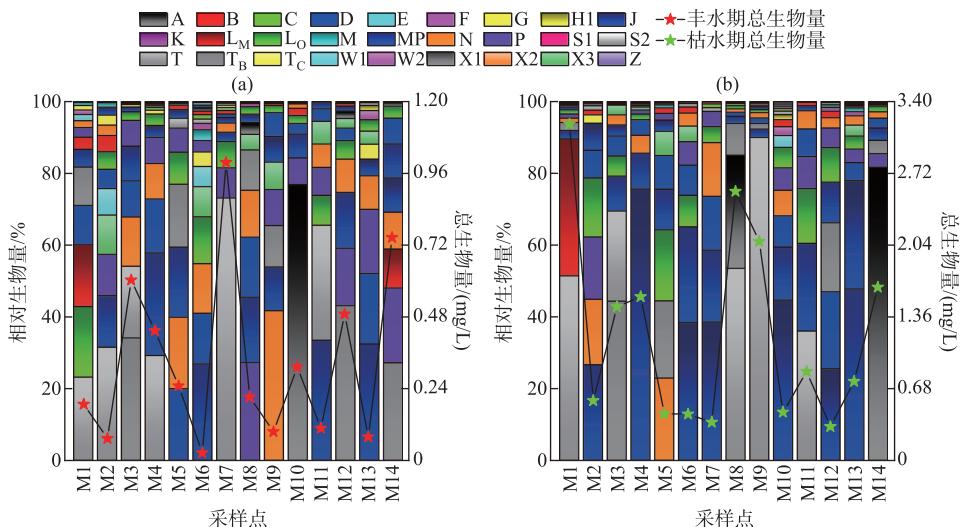


图 2 麦地卡湿地丰水期(a)和枯水期(b)浮游植物功能群相对生物量和总生物量

Fig.2 Relative biomass and total biomass of phytoplankton functional groups in wet season (a) and dry season (b) of Mitika Wetland

2.2.2 Q 指数评价 基于浮游植物功能群的 Q 指数对麦地卡湿地的水质进行评价,每个功能类群的赋值见表 2,丰水期和枯水期 Q 指数见图 3。丰水期,麦地卡湿地浮游植物功能群的 Q 指数平均值为 4.02,范围为 3.04~4.86;枯水期, Q 指数平均值为 3.58,范围为 1.80~4.84。根据 Q 指数得出,目前麦地卡湿地水质状态为“好”。

2.3 浮游植物优势功能群与环境因子的关系

2.3.1 优势功能群与环境因子的 Spearman 相关性分析 麦地卡湿地各环境因子与优势功能群生物量之间的 Spearman 相关性分析结果显示,丰水期,功能群 N 生物量与 TUR 呈极显著正相关,功能群 D、 T_B 生物量与 TP 浓度呈极显著负相关,功能群 A 生物量与 NO_3^- -N 浓度呈极显著正相关;功能群 A 生物量与 pH、 COD_{Cr} 呈显著负相关,功能群 T 生物量与 pH、 COD_{Cr} 浓度呈显著正相关,功能群 A 生物量与 TN 浓度呈显著正相关,功能群 L_o 生物量与 TP 浓度呈显著负相关,功能群 MP 生物量与 TUR 呈显著正相关。枯水期,功能群 A 生物量与 COD_{Cr} 呈极显著负相关,功能群 MP 生物量与 TP 浓度呈极显著正相关,功能群 T_B 生物量与 TP 和 NO_3^- -N 浓度呈极显著负相关。

根据麦地卡湿地浮游植物优势功能群生物量与环境因子的相关性分析结果,对与优势功能群生物量呈极显著相关的环境因子的分布情况进行预测(图 4 和图 5)。由图 4 可见,丰水期,功能群 N 集中出现在 TUR 为 1.3~5.2 NTU 范围内;功能群 D、 T_B 集中出现在 TP 浓度为 0~0.01 和 0~0.005 mg/L 范围内;功能群 A 集中出现在 NO_3^- -N 浓度为 0.18~0.27 mg/L 范围内。由图 5 可见,枯水期,功能群 A 集中出现在 COD_{Cr} 为 7.9~17.6 mg/L 范围内;功能群 MP 集中出现在 TP 浓度为 0~0.005 mg/L 的范围内;功能群 T_B 集中出现在 TP 和 NO_3^- -N 浓度为 0~0.005 和 0~0.058 mg/L 范围内。

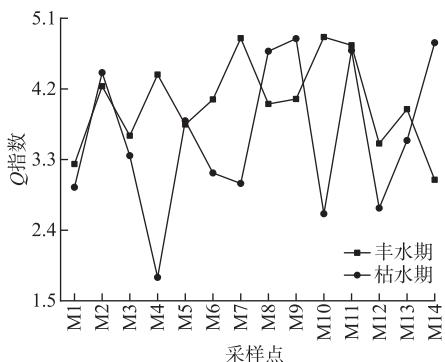


图 3 麦地卡湿地丰水期和枯水期浮游植物功能群 Q 指数变化

Fig.3 Q index changes of phytoplankton functional group in wet season and dry season of Mitika Wetland

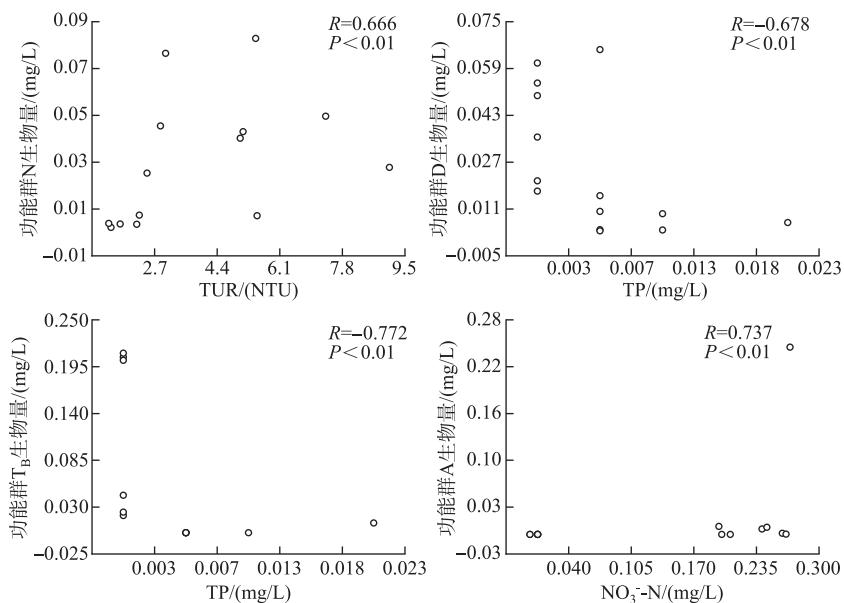


图 4 麦地卡湿地丰水期浮游植物优势功能群生物量与部分水环境因子的相关性

Fig.4 Correlation between biomass of dominant functional groups of phytoplankton and some water environmental factors in the wet season of Mitika Wetland

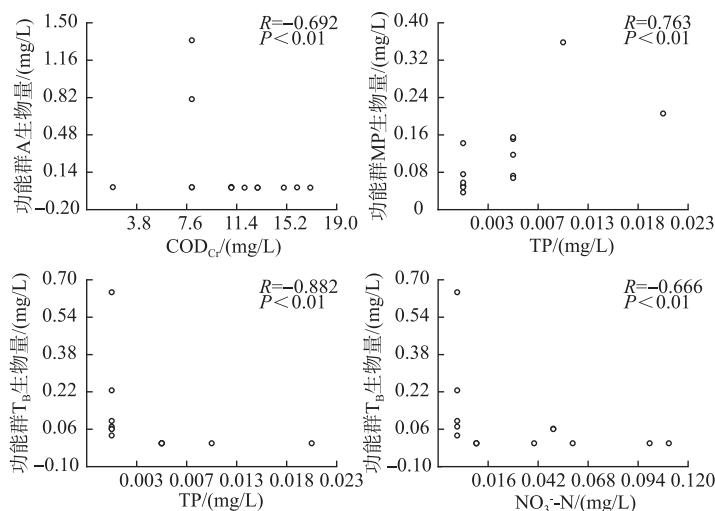


图 5 麦地卡湿地枯水期浮游植物优势功能群与部分水环境因子的相关性

Fig.5 Correlation between biomass of dominant functional groups of phytoplankton and some water environmental factors in the dry season of Mitika Wetland

2.3.2 优势功能群与环境因子的冗余分析和典范对应分析 为了探究环境因子对麦地卡湿地浮游植物群落分布的影响,将丰水期优势功能群(A、D、L_M、L_O、MP、N、P、T、T_B和X3)生物量进行去除趋势对应分析(DCA),结果排序轴长度小于3,表明优势功能群的分布可使用线性模型,共有12个环境因子pH、EC、WT、TDS、Salt、DO、TUR、COD_{cr}、TN、NH₃-N、TP和NO₃⁻-N进行RDA分析。应用蒙特卡拟合方法对因子进行显著性检验,通过筛选,盐度($P=0.02$, $F=4.0$)和总氮($P=0.048$, $F=3.2$)是显著解释性变量,对群落变异的解释

率分别为 24.9% 和 16.7%, 是影响麦地卡湿地丰水期浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子, 影响并不显著的环境因子用虚线表示, 结果如图 6a 所示。第 1 排序轴与第 2 排序轴对优势功能群生物量方差的解释率分别为 55.48% 和 23.94%, 优势功能群生物量与因子的相关性分别为 0.9735 和 0.9972, 前两轴累计方差为 84.01%, 表明前两轴能较好地反映优势功能群生物量与因子的关系, 且主要是由第 1 排序轴决定。Salt 与第 1 排序轴、第 2 排序轴都呈正相关; TN 浓度与第 1 排序轴呈负相关, 与第 2 排序轴呈正相关。功能群 A、L_M、T、T_B 与 Salt 呈显著正相关, 功能群 D、L_O、MP、N、P、X3 与 Salt 呈显著负相关; 功能群 A、D、L_O、MP、P、X3 与 TN 浓度呈显著正相关, 功能群 L_M、N、T、T_B 与 TN 浓度呈显著负相关。

将枯水期优势功能群 (A、D、J、L_M、L_O、MP、N、P、T 和 T_B) 生物量进行 DCA 分析, 结果排序轴长度大于 3, 表明优势功能群的分布使用单峰模型 CCA, 对同样的 12 个环境因子应用蒙特卡拟合方法对环境因子进行显著性检验。通过筛选, 总氮 ($P=0.04, F=3.9$) 和硝态氮 ($P=0.018, F=2.9$) 是显著解释性变量, 对群落变异的解释率分别为 24.8% 和 15.7%, 是影响麦地卡湿地枯水期浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子, 影响并不显著的环境因子同样用虚线表示, 结果如图 6b 所示。第 1 排序轴与第 2 排序轴对优势功能群生物量方差的解释率分别为 78.01% 和 45.02%, 优势功能群生物量与因子的相关性分别为 0.9889 和 0.9988, 前两轴累计方差为 73.79%, 表明前两轴能较好地反映优势功能群生物量与因子的关系, 且主要是由第 1 排序轴决定。TN 浓度与第 1 排序轴、第 2 排序轴都呈负相关; NO₃⁻-N 浓度与第 1 排序轴呈正相关, 与第 2 排序轴呈负相关。功能群 A、L_M 与 TN 浓度呈显著正相关, 功能群 D、J、L_O、MP、N、P、T 和 T_B 与 TN 浓度呈显著负相关; 功能群 D、J、L_O、MP、N、P 与 NO₃⁻-N 浓度呈显著正相关, 功能群 A、L_M、T 和 T_B 与 NO₃⁻-N 浓度呈显著负相关。

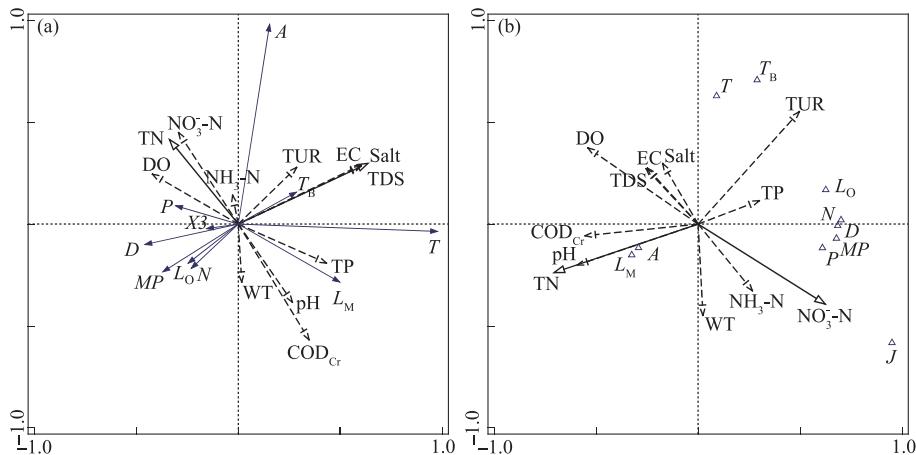


图 6 麦地卡湿地丰水期(a)和枯水期(b)浮游植物功能群与环境因子的分析

Fig.6 Analysis of phytoplankton functional groups and environmental factors in wet season (a) and dry season (b) of Mitika Wetland

3 讨论

3.1 浮游植物功能群组成

研究浮游植物功能群的时空变化特征是监测水域环境变化的重要手段之一^[24]。调查期间, 麦地卡湿地 2 个水情期物种分属于 27 个功能群, 存在明显的时空分布差异。在时间维度上, 丰水期的生物量显著低于枯水期的 ($P<0.01$), 且 E、S2、X2 和 Z 功能群为丰水期特有, K 功能群为枯水期特有; 表明麦地卡湿地浮游植物功能群具有明显的季节性, 一方面可能是麦地卡湿地自然环境差异显著^[25], 其属于高原亚寒带半湿润气候, 冷暖分明(年最高温 22.4℃, 最低温 -36.8℃^[17]), 水温均值在 2 个水情期相差 5.58℃, 平均海拔较高 (4900 m); 丰水期降雨量较多(76%), 枯水期较少(24%), 使得丰水期浊度提高, 营养物质浓度减少。另一方面可能是构成功能群属种的生理生态特性具有差异, K 功能群(细小隐球藻)在营养丰富的浅水水体中适合

生长^[26];E 功能群(锥囊藻属)适合生长于贫营养的小型浅水^[27];S2 功能群(大螺旋藻)在温暖高碱的浅水中适宜生长(表 2);X2 功能群(衣藻属)适合生长于中富营养的浅水中^[27];Z 功能群(滇蜀等隔藻)适合在无扰动、营养不良的湖泊中生长(表 2). 在空间维度上,功能群类型在河流湿地最多(24),其次为湖泊湿地(23),沼泽湿地最少(12),原因可能是在按照麦地卡湿地生态环境类型,选取代表性样地时,选择了 7 个河流湿地、6 个湖泊湿地和 1 个沼泽湿地,造成不同湿地类型的功能群分布存在差异.

3.2 浮游植物优势功能群时空变化

浮游植物优势功能群演替主要是由水体营养盐、稳定性及浮游植物的形态、生理适应特征、悬浮机制、营养盐吸收利用效率、光能捕获能力以及固碳速率等相互作用的结果^[4]. 这些因素共同决定着浮游植物对其特定生长环境的选择机制,成为浮游植物在水环境中生存或者消失的限制因素^[28-29]. 麦地卡湿地的水体为贫营养型^[17],外源营养物质相对单一或匮乏,故功能群 A、D、L_M、L_O、MP、N、P、T、T_B 为 2 个水情期的共有优势功能群. 其中 A 功能群的代表性属种根枝藻属,适合生长在贫营养、洁净的深水水体中,生长策略为 R 型^[30];T 功能群的代表性物种为亮绿转板藻和近缘黄丝藻,生长策略为 R 型,光照是限制因子,适合生长在表层持续混合的水体中^[31],为麦地卡湿地浮游植物的绝对优势功能群;R 型(耐受)种类表示在物质充足但能量受限的条件下占优势的功能群^[32]. 不同水情期由于生境差异,也出现不同的优势类群^[33],丰水期水体扰动程度相对较大,浊度增加,而 X3 功能群的代表性属种为小球藻属和尖布纹藻,生长策略为 C 型,生长生境为充分混合的寡营养浅水水体^[34],故其为丰水期特有优势功能群;枯水期水体流动性差,营养物质相对容易富集^[35],J 功能群代表性属种为盘星藻属和栅藻属,生长策略为 CR 型,适合在高营养、混合的浅水生长^[31],故其为枯水期特有绝对优势功能群;其中 C 型(竞争)种类表示在物质及能量供给都充足的条件下占优势的功能群,S 型(机会殖民)种类表示在物质有限但能量充足的条件下占优势的功能群^[33].

一般不同的水生态系统会造成不同的生物以及非生物过程,进而影响浮游植物生物量分布以及优势功能群的组成^[36]. 从河流湿地浮游植物优势功能群分析,2 个水情期共有优势功能群为 D、L_M、L_O、MP、N、T 和 T_B,P 功能群为丰水期特有优势功能群,A 和 J 功能群为枯水期特有优势功能群. 按照功能群对环境的指示作用分析,D、L_M、L_O、MP、N、P 和 T_B 功能群对流动性水环境的耐受性较强^[37],由表 1 可知,D 功能群代表性属种为菱形藻属和针杆藻属,生长生境为浑浊的浅水水体;L_M 功能群代表性属种为角甲藻,适合生长在富到超营养、中小型水体,但在全年的出现频率极低(20% 以下);L_O 功能群代表性属为色球藻属和羽纹藻属,生长生境为贫到富营养、中到大型水体;MP 功能群代表性物种为桥弯藻属和舟形藻属,对混合搅动的浅水水体具有耐受性^[30];N 功能群代表性属为鼓藻属和平板藻属,对低营养的水体具有耐受性^[14];P 功能群代表性属为新月藻属和脆杆藻属,对中程度的低光照和低碳含量具有耐受性^[14];T_B 功能群代表性属为曲壳藻属和异极藻属,对水体的冲刷作用具有耐受性^[38];符合浮游植物在河流湿地生长的特点. 功能群 A 对酸碱度升高具有敏感性^[30],功能群 J 对高光照有敏感性^[31],麦地卡湿地河流水质属弱矿化水,以重硫酸根离子和钙离子为主^[25],且枯水期日照时间长,太阳辐射强,故其在枯水期易形成优势功能类群. 从湖泊湿地浮游植物优势功能群分析,共有优势功能群为 D、L_O、MP、N、P,特有优势功能群从丰水期的 A、T 和 X3 功能群转变为枯水期的 J 功能群. 其中功能类群 D、L_O、MP、N、P 在全年的出现频率较高(50% 以上),为常见功能群. 根据湖泊湿地特性可知,水体的流动性在 2 个水情期都较差,水体浊度在丰水期更大,水体营养浓度在枯水期更高;功能类群 A、T 和 X3 适合生长在具有低光照、寡营养、混合分层的水体中^[30-31],更容易在丰水期形成优势功能类群. 功能群 J 适合生长在高营养、混合的浅水水体中^[31],在枯水期更易形成优势功能群. 从沼泽湿地浮游植物优势功能群分析,共有优势功能群为 MP 和 T, L_O 功能群为枯水期特有优势功能群. 从生境分析,错查错(M11)属于高寒沼泽泥炭湿地,底质为厚泥炭土,有机质含量较高^[25],因此功能群 MP 和 T 易形成生长优势,枯水期水量补给以地下水为主,而 L_O 功能群对营养分层的水体具有耐受性,故其在该水情期更易形成优势功能群.

利用浮游植物功能群的 Q 指数对麦地卡湿地的水质进行评价发现,丰水期和枯水期麦地卡湿地水质状态均处于“好”. 从浮游植物物种组成上看,硅藻—绿藻—蓝藻结构指示水体呈贫营养型;从浮游植物生境上看,优势功能群 A、D、J、L_M、L_O、MP、N、P、T、T_B 和 X3 指示贫到中营养、搅动、浑浊或洁净的小型到大型浅水水体. 因此,从功能群上推测,麦地卡湿地水体处于营养相对较低的状态,这与 Q 指数判定麦地卡湿地水质

状态处于“好”的结果一致,原因可能是麦地卡国家级自然保护区地处偏远,且环境极端,受人为干扰较少,生态环境相对保持稳定,加之湿地内补给水主要以高山冰川融雪、地下水和天然降水为主,外源营养物质来源相对单一和匮乏,使得湿地内营养物质浓度普遍较低^[25].

3.3 浮游植物优势功能群与环境因子的关系

溶解氧、化学需氧量、水温、盐度、浊度、TDS 和 EC 等环境因子是影响浮游植物群落分布的主要因素,并且特定功能群对生境的选择与适应性也不同^[1]. 麦地卡湿地浮游植物优势功能群生物量与水环境因子的相关性分析表明,丰水期,TUR、TP、NO₃⁻-N 对部分优势功能群有极显著的影响. 一般情况下,浊度通过影响太阳光的折射从而影响浮游植物的光合作用^[39],但功能群 N 适合生长在持续或半持续的混合水层中,因此随着浊度的增加,功能群 N 生物量也增加;Reynolds 指出最适合浮游植物生长的 N/P 为 16,当 N/P 比大于 16 时,浮游植物生长受磷限制,小于 16 时浮游植物生长受氮限制^[22],麦地卡湿地 2 个水情期浮游植物 N/P 比均大于 16,故其生长受磷限制. 总磷指示水体的营养水平^[40],麦地卡湿地水体呈贫营养型,功能群 D、T_B 对营养缺乏具有敏感性,故随着总磷浓度升高,功能群 D、T_B 生物量减少;硝态氮为浮游植物生长直接提供氮元素^[41],但麦地卡湿地水体硝态氮浓度极低,甚至出现了下限值,功能群 A 对低营养具有耐受性,因此随着硝态氮浓度的升高,会增加功能群 A 生物量. 枯水期 COD_{Cr}、TP、NO₃⁻-N 对部分优势功能群有极显著的影响. COD_{Cr}(水体的化学需氧量)越大,其水质越差^[42];根据功能群 A 的生境可知,随着 COD_{Cr} 的增大,功能群 A 生物量减少;功能群 MP 生物量会随着 TP 浓度升高而增大,功能群 T_B 生物量会随着 TP 和 NO₃⁻-N 浓度的升高而减少. 对与优势功能群生物量呈极显著相关的环境因子的分布范围进行预测,结果表明,这些环境因子的分布范围均接近于水环境因子的平均值,这可能是浮游植物群落与环境因子相互作用形成的动态适应机制,这与安瑞志等^[1]对巴松错的研究结果和闵文武等^[43]对渭河流域的研究结果基本一致.

丰水期,冗余分析表明,盐度和总氮是影响麦地卡湿地浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子;枯水期典范对应分析表明,总氮和硝态氮是影响浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子. 表明不同水情期浮游植物优势功能群分布特征受环境因子影响差异较明显,君珊等^[44]通过对拉萨河流域浮游植物群落结构的研究得出,浮游植物群落分布特征受环境因子影响差异显著,钱奎梅等^[45]通过对鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征研究也得出,浮游植物功能群分布特征受环境因子影响差异明显. Salt、TDS、TN、TP、NH₃-N 和 NO₃⁻-N 等都是影响浮游植物生长和繁殖的营养盐成分^[6],丰水期与枯水期相比,盐度较低,总氮和硝态氮浓度较高,但总体硝态氮浓度较低,甚至部分样点都出现了下限值,原因可能是麦地卡湿地水体整体较清洁(贫营养型),丰水期降雨量大,水体冲刷作用较强,枯水期水体富集能力较强. 丰水期由 RDA 分析可知,优势功能群 L_M、T、T_B 与盐度呈显著正相关,与总氮浓度呈显著负相关;优势功能群 D、L_O、MP、P 和 X3 与盐度呈显著负相关,与总氮浓度呈显著正相关. 根据功能群对环境的指示作用分析,优势功能群 L_M、T、T_B 更适合在具有冲刷作用的水体中生长繁殖,功能群 D、L_O、MP、P 和 X3 在营养物质相对丰富水体中更易形成优势,麦地卡湿地丰水期水体正符合这一特点. 枯水期由 CCA 分析可知,优势功能群 A、L_M 与 TN 浓度呈显著正相关,与 NO₃⁻-N 浓度呈显著负相关;优势功能类群 D、J、L_O、MP、N、P 与 TN 浓度呈显著负相关,与 NO₃⁻-N 浓度呈显著正相关. 按照功能群对环境的指示作用分析,功能群 A、L_M 对水体混合、低光照具有敏感性,功能类群 D、J、L_O、MP、N、P 对混合的营养物质相对丰富的水体具有耐受性,符合麦地卡湿地枯水期水体特点.

4 结论

- 1) 麦地卡湿地浮游植物共 27 个功能群,丰水期比枯水期功能群种类多;河流湿地最多,沼泽湿地最少.
- 2) 麦地卡湿地浮游植物优势功能群时空变化明显,总体上,功能群 A、D、L_M、L_O、MP、N、P、T、T_B 为 2 个水情期的共有优势功能群,其中功能群 A 和 T 为 2 个水情期的共有绝对优势功能群,功能群 X3 为丰水期特有优势功能群. 功能群 J 为枯水期特有绝对优势功能群.
- 3) 2 个水情期 Q 指数平均值分别为 4.02 和 3.58,表明水质整体状态为“好”.
- 4) 相关性分析表明,TUR、COD_{Cr}、TP 和 NO₃⁻-N 与浮游植物优势功能群生物量具有显著相关性. RDA 分析表明,盐度和总氮是影响丰水期浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子. CCA 分析表明,总氮和硝态氮是影响枯水期浮游植物优势功能群生物量的主要环境因子.

5 参考文献

- [1] An RZ, Pan CM, Taba LZ *et al.* Vertical distribution characteristics of phytoplankton functional groups in Basongcuo, Tibet and their relationship with environmental factors. *J Lake Sci.*, 2021, **33**(1) : 86-101. DOI:10.18307/2021.0114.[安瑞志, 潘成梅, 塔巴拉珍等. 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. 湖泊科学, 2021, **33**(1) : 86-101.]
- [2] Zhu YQ, Lv J, Li QZ *et al.* Seasonal variation of phytoplankton community in subtropical reservoirs and its relationship with environment: comparison of two functional group classification methods. *Acta Applied Ecologica Sinica*, 2019, **30**(6) : 2079-2086. DOI:10.13287/j.1001-9332.201906.030.[朱忆秋, 吕俊, 李乔臻等. 亚热带水库浮游植物群落的季节变化及其与环境的关系:两种功能群分类法的比较. 应用生态学报, 2019, **30**(6) : 2079-2086.]
- [3] Zhao GN, Pan BZ, Ding YT *et al.* Characteristics of phytoplankton functional groups and water quality evaluation in typical tributaries of Weihe River and northern foot of Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, (8) : 1-12. DOI:10.5846/stxb201906131257.[赵耿楠, 潘保柱, 丁一桐等. 渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价. 生态学报, 2021, (8) : 1-12.]
- [4] Fan XC, Dai CF, Lu XX *et al.* Succession and driving factors of phytoplankton functional groups in Jinhewan urban wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(16) : 5726-5738. DOI:10.5846/stxb201710251916.[范小晨, 代存芳, 陆欣鑫等. 金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子. 生态学报, 2018, **38**(16) : 5726-5738.]
- [5] Lu XX, Liu Y, Fan YW. Succession of phytoplankton functional groups in Hulan River Wetland in summer and autumn and its driving factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(5) : 1264-1273. DOI:10.5846/stxb201306061369.[陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子. 生态学报, 2014, **34**(5) : 1264-1273.]
- [6] Ge Y, Zhou YF, Wang CH *et al.* Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7) : 3027-3039.[葛优, 周彦锋, 王晨赫等. 阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系. 中国环境科学, 2019, **39**(7) : 3027-3039.]
- [7] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci.*, 2015, **27**(1) : 11-23. DOI:10.18307/2015.0102.[胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1) : 11-23.]
- [8] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5) : 417-428. DOI:10.1093/plankt/24.5.417.
- [9] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1) : 1-19. DOI:10.1007/s10750-008-9645-0.
- [10] Varol M. Phytoplankton functional groups in a monomictic reservoir: Seasonal succession, ecological preferences, and relationships with environmental variables. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(20) : 20439-20453. DOI:10.1007/s11356-019-05354-0.
- [11] Li L, Li QH, Chen JA *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton functional groups and role of environment factors in a deep subtropical reservoir. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, **36**(3) : 761-771. DOI:10.1007/s00343-018-7051-7.
- [12] Ma CX, Yin ZL, Yu HX. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in Sanhuapao Wetland Reserve and its influencing factors. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, **44**(11) : 45-51.[马成学, 尹子龙, 于洪贤. 三环泡湿地保护区浮游植物功能群季节演替及影响因子. 东北林业大学学报, 2016, **44**(11) : 45-51.]
- [13] Yin ZL, Cheng LF, Yu HX *et al.* Characteristics of phytoplankton functional groups and water quality evaluation in Zhalong Wetland in summer. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, **44**(4) : 56-62.[尹子龙, 程李芳, 于洪贤等. 扎龙湿地夏季浮游植物功能群特征及水质评价. 北方农业学报, 2016, **44**(4) : 56-62.]
- [14] Wu AQ, Guo N, Qin XB. Seasonal variation of phytoplankton functional groups in typical wetlands in cold region and its relationship with environmental factors. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2015, **35**(5) : 1341-1349. DOI: 10.13671/j. hjkxb.2014.0729.[武安泉, 郭宁, 覃雪波. 寒区典型湿地浮游植物功能群季节变化及其与环境因子关系. 环境科学学报, 2015, **35**(5) : 1341-1349.]

- [15] Lan JJ, Luo J. Diversity of seed plant resources in maidica wetland natural reserve in Tibet. *Journal of Plateau Agriculture*, 2018, **2**(1): 19-25.[拦继酒, 罗建. 西藏麦地卡湿地自然保护区种子植物资源多样性. 高原农业, 2018, **2**(1): 19-25.]
- [16] An RZ, Zhang P, Da Z et al. Niche and interspecific association of dominant protozoan species under different hydrologic periods in the mitika wetland of Tibet, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(2): 126-138.[安瑞志, 张鹏, 达珍等. 西藏麦地卡湿地不同水文期原生动物优势种生态位及其种间联结性. 林业科学, 2021, **57**(2): 126-138.]
- [17] Pan CM, Liu Y, An RZ et al. Phytoplankton in the Mitika Wetland, Tibet, China: 1. Spatio-temporal niche of dominant species. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1805-1819. DOI:10.18307/2021.0616.[潘成梅, 刘洋, 安瑞志等. 西藏麦地卡湿地的浮游植物——1.优势种的时空生态位. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1805-1819.]
- [18] Sun J, Liu DY. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(11): 1331-1346. DOI:10.1093/plankt/fbg096.
- [19] Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschtel D et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(2): 403-424. DOI:10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
- [20] Kremer CT, Gillette JP, Rudstam LG et al. A compendium of cell and natural unit biovolumes for 71200 freshwater phytoplankton species. *Ecology*, 2014, **95**(10): 2984. DOI:10.1890/14-0603.1.
- [21] Padisák J, Borics G, Grigorszky I et al. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14. DOI:10.1007/s10750-005-1393-9.
- [22] Colin SR, Vera H, Carla K et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [23] Huang GJ, Li QH, Chen G et al. Functional grouping of phytoplankton in Hongfeng Lake Reservoir of Guizhou Plateau and its temporal and spatial distribution characteristics. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(17): 5573-5584. DOI:10.5846/stxb201312253027.[黄国佳, 李秋华, 陈椽等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征. 生态学报, 2015, **35**(17): 5573-5584.]
- [24] Huang GJ, Li QH, Chen G et al. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Plateau. *Acta Scientiae Circumstologica Sinica*, 2015, **35**(2): 418-428. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0747.[黄国佳, 李秋华, 陈椽等. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 418-428.]
- [25] Chen HL, He F, Ba S et al. Preliminary study on hydrochemical characteristics of Mitika wetland in Tibet. *Chinese Journal of Plateau Science*, 2020, **4**(1): 14-19.[陈虎林, 何峰, 巴桑等. 西藏麦地卡湿地水化学特征初探. 高原科学研究, 2020, **4**(1): 14-19.]
- [26] Dong J, Li GB, Song LR. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 735-742. DOI:10.18307/2014.0511.[董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群1960s以来演变特征. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 735-742.]
- [27] Yang W, Zhang FY, Sun YC et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its influencing factors in Nanhu Lake, HuaiBei. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3079-3086.[杨威, 张菲云, 孙雨琛等. 淮北南湖浮游植物功能群的季节演替及影响因子研究. 中国环境科学, 2020, **40**(7): 3079-3086.]
- [28] Xiao LJ, Wang T, Hu R et al. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5099-5109. DOI:10.1016/j.watres.2011.07.012.
- [29] Reynolds CS ed. Ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [30] Zhang H, Peng YQ, Zou XN et al. Characteristics of phytoplankton functional grouping and its relationship with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir. *China Environmental Science*, 2021: 1-13.[张辉, 彭宇琼, 邹贤妮等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系. 中国环境科学, 2021: 1-13.]
- [31] Chen Q, Li QH, Hu YM et al. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Province. *Environmental Science Research*, 2018, **31**(7): 1266-1274.[陈倩, 李秋华, 胡月敏等. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析. 环境科学研究, 2018, **31**(7): 1266-1274.]
- [32] Wang XL, Zhang M, Yin J. Composition characteristics and influencing factors of phytoplankton functional groups in Chao-hu Lake. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 431-440. DOI:10.18307/2018.0214.[王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群

- 的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, 30(2): 431-440.]
- [33] Liu TL, Chen HR, Hong CC et al. Relationship between metazoan zooplankton community structure and environmental factors in Suzhou urban river. *Journal of Zoology*, 2021, 56(5): 674-685. DOI: 10.13859/j.cjz.202105005. [刘同琳, 陈皓若, 洪陈聪等. 苏州城区河道后生浮游动物群落结构与环境因子的关系. 动物学杂志, 2021, 56(5): 674-685.]
- [34] Zheng C, Lu KH, Xu Z et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the siminghu reservoir. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2688-2697. DOI: 10.13227/j.hjkx.201709194. [郑诚, 陆开宏, 徐镇等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子. 环境科学, 2018, 39(6): 2688-2697.]
- [35] Li L, Li QH, Jiao SL et al. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in Aha reservoir and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3604-3611. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0031. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3604-3611.]
- [36] Du CL, Yang L, Zhao Y et al. Temporal and spatial distribution characteristics of zooplankton community in Dianshan Lake and its relationship with environmental factors. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4513-4522. DOI: 10.13227/j.hjkx.201903099. [杜彩丽, 杨丽, 赵诣等. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2019, 40(10): 4513-4522.]
- [37] Zhang JF, Hu XH, Ma PM et al. Seasonal succession and key driving factors of phytoplankton functional groups in Tangpu Reservoir. *Journal of Water Ecology*, 2021, 42(3): 55-62. DOI: 10.15928/j.1674-3075.201906080146. [张俊芳, 胡晓红, 马沛明等. 汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 55-62.]
- [38] Xiang R, Li QY, Yu Y et al. Characteristics of planktonic diatom functional groups in ruxi river and their correlation with environmental factors. *Journal of Environmental Science*, 2017, 38(8): 3290-3301. DOI: 10.13227/j.hjkx.201701111. [向蓉, 李巧玉, 喻燚等. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析. 环境科学, 2017, 38(8): 3290-3301.]
- [39] An R, Wang FY, Yu HX et al. Characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Xiaoxingkai Lake. *Environmental Science Research*, 2016, 29(7): 985-994. [安睿, 王凤友, 于洪贤等. 小兴凯湖浮游植物功能群特征及其影响因子. 环境科学研究, 2016, 29(7): 985-994.]
- [40] Xia YF, Hu XD, Xu JX et al. Seasonal succession characteristics and water quality evaluation of phytoplankton functional groups in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 2019, 31(1): 134-146. DOI: 10.18307/2019.0113. [夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价. 湖泊科学, 2019, 31(1): 134-146.]
- [41] Yang L, Zhang W, Shang GX et al. Succession characteristics of phytoplankton functional groups in Dianshan Lake and their relationship with environmental factors. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3158-3167. DOI: 10.13227/j.hjkx.201710030. [杨丽, 张玮, 尚光霞等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2018, 39(7): 3158-3167.]
- [42] Zheng TT, Zhao ZJ, Zhao XQ et al. Analysis of water quality change and driving force of human factors in Xingyun Lake, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2018, 30(1): 79-90. DOI: 10.18307/2018.0108. [郑田甜, 赵祖军, 赵筱青等. 云南星云湖水质变化及其人文因素驱动力分析. 湖泊科学, 2018, 30(1): 79-90.]
- [43] Min WW, Wang PP, Li LJ et al. Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei river basin. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1397-1406. [闵文武, 王培培, 李丽娟等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1397-1406.]
- [44] Jun S, Wang DB, Zhou JH et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Lhasa River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 787-798. DOI: 10.5846/stxb201806011225. [君珊, 王东波, 周健华等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2019, 39(3): 787-798.]
- [45] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016. *J Lake Sci*, 2019, 31(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009—2016年). 湖泊科学, 2019, 31(4): 1035-1044.]