

DOI: 10.5846/stxb201806011225

君珊, 王东波, 周健华, 白晓宇, 白凯. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子关系. 生态学报, 2018, 38(24): - .

Jun S, Wang D B, Zhou J H, Bai X Y, Bai K. Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子关系

君珊¹, 王东波^{1,*}, 周健华¹, 白晓宇², 白凯¹

1 呼伦贝尔市环境监测中心站, 呼伦贝尔 021008

2 呼伦贝尔市环境科学研究所, 呼伦贝尔 021008

摘要:于 2017 年 8 月对拉萨河浮游植物群落组成、丰度、功能群以及多样性指数进行调查, 利用典范对应分析法(CCA)分析浮游植物物种与水环境因子的关系。结果表明:流域种类组成以硅藻门(60.4%)为主, 其次是绿藻门(20.8%), 其余种类 18.8%; 物种平均丰度为 3857 cells/L, 硅藻门 94.6%, 蓝藻门 3.1%, 绿藻门 2.3%; 种类少、丰度低是拉萨河流域浮游植物群落结构的主要特征; 研究区优势种以菱形藻为主; MP、D 和 P 是划分出来的 15 类功能群中的优势功能群, 合计占总丰度的 93%, 剩余 12 类仅占 7%; Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数及 Pielou's evenness 指数平均值分别为 1.41、1.77 和 0.5, 单因素方差分析(ANOVA)表明三类多样性指数在各支流之间、干流与各支流之间无显著差异; CCA 排序结果表明: pH、化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、总磷(TP)是影响拉萨河流域浮游植物群落结构的主要环境因子; 同时, pH、TN、TP 也是影响浮游植物功能群分布格局的主要因子。

关键词:拉萨河; 浮游植物; 功能群; 环境因子; 典范对应分析

Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River

JUN Shan¹, WANG Dongbo^{1,*}, ZHOU Jianhua¹, BAI Xiaoyu², BAI Kai¹

1 Environmental monitoring center of Inner Mongolia, Hulunbeir 021008, China

2 Institute of Environmental Science of Inner Mongolia, Hulunbeir 021008, China

Abstract: An investigation was conducted on the phytoplankton community structure, abundance, functional groups, and diversity indices in the Lhasa River in August 2017; subsequently, canonical correspondence analysis (CCA) was used to study its relationships with environmental factors. The results showed that Bacillariophyta (60.4%) was the dominant phytoplankton, the second was Chlorophyta (20.8%), and the remaining 18.8% was composed of a variety of species. The average abundance was 3857 cells/L; Bacillariophyta, Cyanophyta, and Chlorophyta accounted for 94.6%, 3.1%, and 2.3%, respectively. Few species and low abundance are special characteristics of the phytoplankton community structure in the Lhasa River. The most dominant species of phytoplankton was *Nitzschia* sp. In total, 15 types of phytoplankton functional groups were identified: MP, D, and P were dominant, comprising 93% of all groups, with other phytoplankton functional groups accounting for the remaining 7%. The diversity indices of Margalef, Shannon-Wiener, and Pielou's evenness were 1.41, 1.77, and 0.5, respectively. The diversity index was not significantly different between the main stream and branches when analyzed using one-way analysis of variance. CCA indicated that the pH, chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were the main environmental factors that influenced phytoplankton assemblages and that pH, TN, and TP were the main environmental factors that influenced the functional

基金项目: 西藏自治区科技计划项目(Z2016C01G01108)

收稿日期: 2018-06-01; 修订日期: 2018-09-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecology2004yan@163.com

groups.

Key Words: Lhasa River; phytoplankton; functional groups; environmental factors; canonical correspondence analysis

河流是流域水生态系统重要的组成部分,科学地评价河流生态状况是真实的反映流域生态系统的前提^[1]。早期的流域水生态系统健康评价多集中于水质理化指标的研究^[2],随着研究的深入,人们发现常规的水质理化指标只能表征受监测水体的瞬时状态,无法有效反映污染物的协同效应或化合物的慢性毒性^[3],不足以全面反映河流的健康状况,因此,水质生物评价指标与方法逐步被引入河流健康评价体系之中。

浮游植物是自然水体的初级生产者和生物链的基础环节^[4],具有分布范围广、生活周期短等特点^[5]。浮游植物在生态系统的能量流动和物质循环中发挥着重要的作用^[6],其群落结构能对环境条件的变化做出复杂而快速的响应,可对水质变化提供早期预警信息,是反映河流健康的重要指示物种之一^[7]。国内外学者从浮游植物群落结构与环境因子响应关系^[8-9]、利用浮游植物进行水质评价等方面进行了大量研究^[10-11]。

拉萨河是高原河流,其生态系统比较脆弱,流域生态系统服务功能有着极其重要的存在价值,科学的评估其生态系统健康状况是开展流域的污染源治理、主导生态功能保护、退化生态系统修复、流域生态补偿机制建立和运行以及实施流域生态健康监管等工作的基础。目前对拉萨河浮游植物的研究主要集中在群落结构特征、种类组成等方面^[12-13],有关河流浮游藻类与水环境因子关系的研究较少,本次研究通过对拉萨河干支流上下游进行浮游藻类鉴定并采集水环境因子,通过典范对应分析得出拉萨河浮游藻类与水环境因子相关关系,填补高海拔地区河流水生态状况研究理论基础,为流域生态系统健康提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 采样点及采样频率

根据拉萨河河谷形态和地质状况,拉萨河大致分为上、中、下游 3 段。上游河段从源头的麦底藏布、色荣藏布到桑曲汇入口,长约 250 km,河床平均坡降 0.37%,中游河段从热振藏布到旁多扒曲汇入口,长约 60 km,河床平均坡降约 0.26%,下游河段从旁多到曲水县境内雅鲁藏布江汇入口,长约 240 km,河床平均比降约 0.19%,主要支流有麦曲、桑曲、乌鲁龙曲、扒曲、雪绒藏布、玛曲、彭波曲和堆龙曲等。

2017 年 8 月在干流设置采样点 10 处,7 条支流设置采样点 16 处。点位布置详见图 1。

1.2 样品采集与测定

浮游植物采样方法参照《水环境监测规范》(SL219—2013),定性样品使用 25 号浮游植物网(64 μm)在采水点表层匀速按照“ ∞ ”字型拖拽,样品收集至 100 mL 聚乙烯瓶中,加入鲁戈氏液固定;定量样品使用 10 L 塑料桶取 10 桶水,倒入 25 号浮游植物网过滤,将样品转移至 100 mL 聚乙烯塑料瓶中,每次取样尽可能将样品全部转移至样品瓶,采样完成后加入鲁戈氏液固定保存。浮游植物种类鉴定参照《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[14]、《淡水微型生物图谱》^[15]及《西藏藻类》^[16]等。实验室内将样品充分摇匀后立即用移液枪吸取 0.1 mL 注入浮游植物计数框内,用目镜视野法在 10 \times 40 倍显微镜下计数。每个样品至少计数 2 片,每片计数 50—100 个小格,同一个样品的两次结果与平均值之差不大于 $\pm 15\%$,即视为有效结果,取其平均值。浮游植物鉴定到可行的最低分类单元,通常为种级^[17]。

水质数据选取氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)、总氮(TN)、氟化物(F)、硫化物(S^{2-})、pH 值、石油类(Oil)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD_{Cr})、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)、六价铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As),其中重金属 7 项均低于检出限,本次调查中不参与计算。样品分析方法均参照国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》测定^[18]。

1.3 数据处理与分析

运用 Margalef 丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou's evenness 均匀度指数(J)以及优

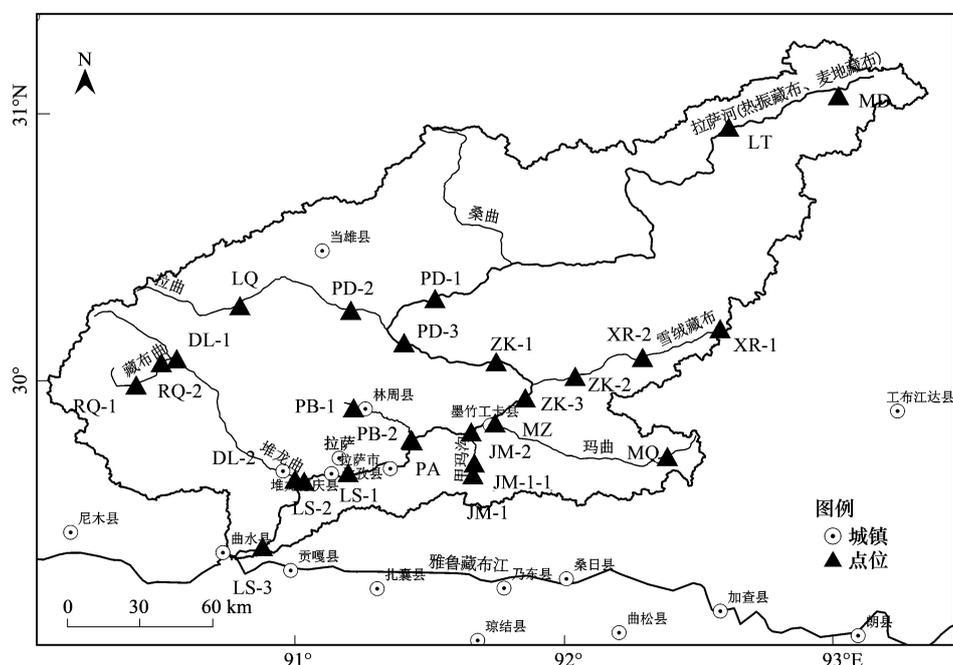


图1 拉萨河采样点位图

Fig.1 Sampling sites of river Lhasa

点位代码:MD:麦迪卡湿地;LT:林堤;PD-1:旁多电站上游;PD-3:旁多电站下游;ZK-1:直孔电站上游;ZK-3:直孔电站下游;PA:帕热湿地;LS-1:拉萨市上游;LS-2:拉萨市下游;LS-3:才纳削减断面;LQ:拉曲上游;PD-2:拉曲上下游;XR-1:雪绒藏布上游;XR-2:雪绒藏布中游;ZK-2:雪绒藏布下游;MQ:玛曲上游;MZ:玛曲下游;JM-1:甲玛沟上游;JM-1-1:甲玛沟中游;JM-2:甲玛沟下游;PB-1:彭波河上游;PB-2:彭波河下游;DL-1:堆龙曲上游;DL-2:堆龙曲下游;RQ-1:热泉上游;RQ-2:热泉下游

势度指数 (Y) 描述浮游植物群落特征^[19-20], 计算公式:

$$D = (S-1) / \ln N \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \cdot \ln P_i \quad (2)$$

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

$$Y = n_i / N \times f_i \quad (4)$$

式中, $P_i = n_i / N$; P_i 为第 i 种藻类的个数与样品中所有藻类个数的比值; n_i 为第 i 种藻类的个数; N 为所有藻类总个数; S 为样品中藻类种类数; f_i 为第 i 种藻类在各站位出现的频率。本文将优势度 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种。

参照 2002 年 Reynolds 等^[21] 和 2009 年 Padisák 等^[22] 以浮游植物生理生长特征及其环境适应性机制为基础, 在浮游植物生长的 C-R-S 策略分类基础上, 对具有相同适应性特征、易于在相同生境条件下共存的浮游植物种类进行功能分组。

运用 excel 2007 软件进行数据分析并作图, 采用主成分分析 (PCA) 中的因子分析法, 选择主成分因子载荷量 > 0.7 的环境因子与物种数据进行典范对应分析 (CCA), PCA 因子分析在 SPSS 19.0 中进行, CCA 使用 CANOCO 4.5 软件分析。物种数据使用浮游植物密度指标和功能群丰度, 按照物种在各样点出现的频度 $> 10\%$, 且至少在一个样点的相对密度 $\geq 1\%$, 物种及功能群数据矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换, 以文件格式 .spe 录入, 环境数据除 pH 值外都进行 $\lg(x+1)$ 转换, 以文件格式 .env 录入, 排序结果用物种-环境因子、功能区-环境因子关系的双序图表示^[23-24]。

2 结果与分析

2.1 种类组成及优势种

本次调查共计监测到浮游植物 5 门 22 科 46 属 53 种,硅藻门(Bacillariophyta)种类最多,32 个种,占总种类数的 60.4%;其次是绿藻门(Chlorophyta),有 11 个种,占总种类数的 20.8%;蓝藻门(Cyanophyta)有 8 个种类出现,占总种类数的 15.1%,甲藻门(Pyrophyta)和隐藻门(Cryptophyta)各 1 种出现,占总种类数的 1.9%。见图 2。

各采样断面中,干流上游浮游植物种类较为丰富,最高点为林提,22 个种类,最小值为一处支流,热泉的上游点位,仅采集到 7 个种类。干流的 10 个断面物种平均数为 14.2 种,略低于支流彭波河平均数 14.5 种。全流域最低值为甲玛沟,甲玛沟三处采样点,有一处未监测到浮游植物,平均物种数数量仅为 5.6。自上游至下游,上游种类数量偏高,下游趋于稳定(图 3)。

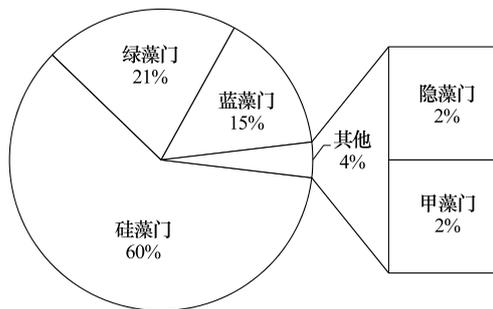


图 2 拉萨河流域浮游植物种类组成比例
Fig.2 Proportion of phytoplankton composition of Lhasa river

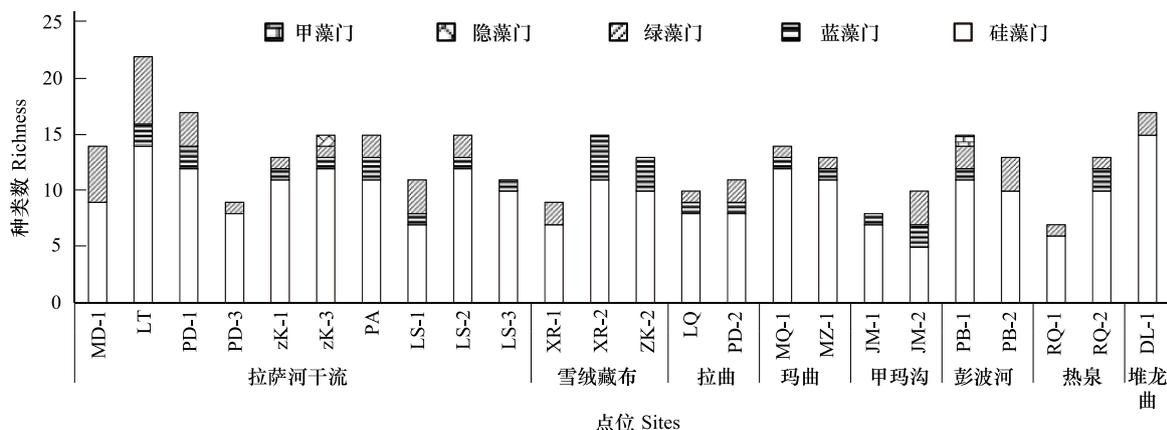


图 3 拉萨河流域各点位浮游植物种类组成
Fig.3 Proportion of phytoplankton composition of each sites Lhasa river

河流浮游植物密度相对湖泊低,加之拉萨河流域位于高海拔地区,水温低,采集到的浮游植物种类和密度均较低,本次调查定量样品取样量为 100 L,有 5 个断面藻类密度很低,浓缩后全片低于 20 个,视作未检出。优势种使用公式 $Y=ni/N \times fi$ 对定量结果进行计算,取 $Y \geq 0.02$ 的物种作为优势种,拉萨河流域干、支流浮游植物优势种及优势度详见表 1 和表 2。从表 1 可以看出,拉萨河干流自上游到下游除拉萨市下游优势种为桥弯藻外,其他监测点均为菱形藻;支流除玛曲上游为曲壳藻外,其余断面均为菱形藻。拉萨河流域各点位优势种种类少并且单一,21 个点位中 9 个点位出现 2 个优势种,其余均为 1 个优势种。

表 1 拉萨河干流浮游植物优势种

Table 1 Dominant species of phytoplankton at main stream of Lhasa River

	干流点位 Main stream sites								
	LT	PD-1	PD-3	ZK-1	ZK-3	PA	LS-1	LS-2	LS-3
优势种 Dominant species	菱形藻 (0.034)	菱形藻 (0.047)	菱形藻 (0.051)	菱形藻 (0.050)	菱形藻 (0.033)	菱形藻 (0.022)	菱形藻 (0.041)	桥弯藻 (0.040)	菱形藻 (0.026)
	曲壳藻 (0.022)					曲壳藻 (0.025)			

表 2 拉萨河主要支流浮游植物优势种

Table 2 Dominant species of phytoplankton at branch of Lhasa River

	支流点位 Branch sites											
	雪绒藏布		拉曲		玛曲		彭波河		热泉		堆龙曲	
	XR-1	XR-2	ZK-2	LQ	PD-2	MQ-1	MZ-1	PB-1	PB-2	RQ-1	RQ-2	DL-1
优势种	菱形藻		菱形藻	菱形藻			菱形藻	桥弯藻	菱形藻	菱形藻		
Dominant species	(0.041)	菱形藻	(0.029)	(0.033)	菱形藻	曲壳藻	(0.025)	(0.020)	(0.026)	(0.041)	菱形藻	菱形藻
	峨眉藻	(0.050)	曲壳藻	曲壳藻	(0.064)	(0.021)	曲壳藻	曲壳藻	舟形藻	异极藻	(0.024)	(0.035)
	(0.023)		(0.023)	(0.020)			(0.040)	(0.035)	(0.020)	(0.021)		

2.2 浮游植物丰度分析

拉萨河流域浮游植物的平均丰度为 3857 个/L。其中硅藻门丰度最大,为 3647.8 个/L,占总丰度的 94.6%;其次为蓝藻门丰度为 120.5 个/L,占总丰度的 3.1%;绿藻门丰度为 88.9 个/L,占总丰度的 2.3%;丰度最低的是裸藻门,1.5 个/L,占总丰度的 0.04%。

各采样点之间的浮游植物丰度也存在一定差异(图 4)。全部的 26 个调查点有 5 个断面藻类浓缩后全片数量低于 20 个,视作未检出。流域浮游植物密度最高点出现在干流林提断面,浮游植物密度为 2.2 万个/L,从上游到下游呈下降趋势;各支流上下游浮游植物变化不大,热泉浮游植物浓度较低,该区域地势较为平坦,河流属于草原型河流;其他支流均为山地河流。

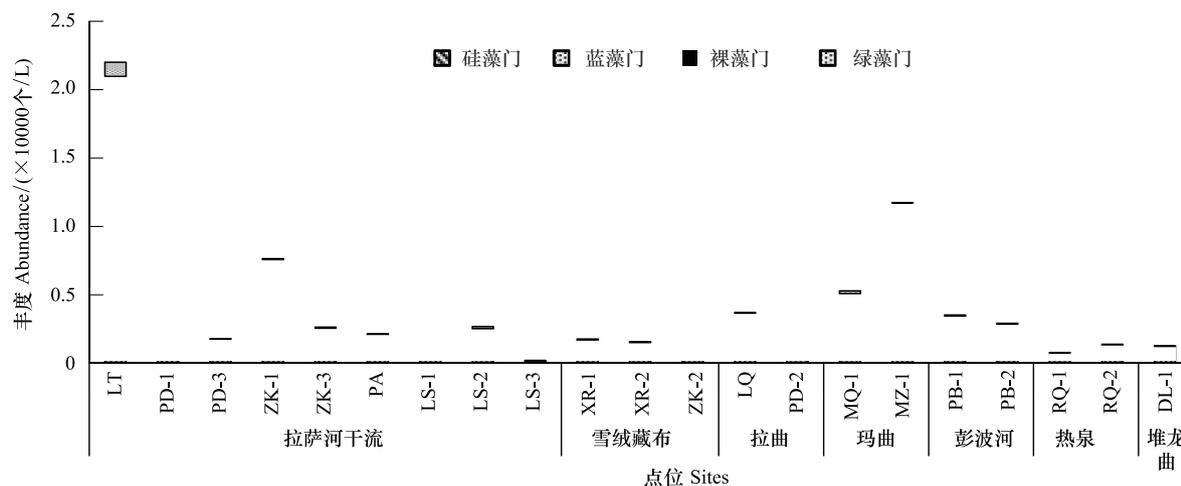


图 4 拉萨河流域浮游植物丰度

Fig.4 Abundance of phytoplankton of Lhasa River basin

2.3 浮游植物功能群分析

浮游植物功能群的出发点是把形态、生理和生态特征相似的浮游植物归为一组,群组内的浮游植物具有相同或相似的生存策略(生态位),每一个组可以反映特定生境类型。对监测到的浮游植物进行功能分类,如表 3。

分析拉萨河流域浮游植物功能群可以看出,整个流域共分出 15 个浮游植物功能群: B、C、D、H1、J、L0、M、MP、N、TD、W1、X1、X2、X3; 全流域以 MP、D 和 P 为优势功能群,3 类群体占总丰度的 93%, 剩余 12 类仅占 7%。如图 5。

拉萨河干流各样点均以 MP、D 为主占绝对优势,二者相对丰度加和大于 80%; 自上游至下游,MP 相对丰度升高,D 相对丰度降低。支流雪绒藏布上游 D 功能群相对丰度高,至下游降低;玛曲上游功能类群分类多于下游,下游功能类群 MP 占绝对优势;彭波河 MP 优势明显,相对丰度在 70%左右;热泉及堆龙曲的 MP 功能群相对丰度也较高。

根据功能群所表现出来的生境特征,拉萨河流域河流表现出扰动频繁、水体浑浊等特征。P 功能群特征

为中富营养水体,各点位中,ZK-3、XR-1、MQ-1 和 PB-1 的 P 功能群相对丰度较高,说明这几处河流水体呈中富营养型。详见图 6。

2.4 浮游植物多样性变化

分析拉萨河流域干、支流浮游植物多样性现状,见表 4。

由上表可以看出,拉萨河流域 Margalef 丰富度指数为 1.41 左右,Shannon-Wiener 多样性指数为 1.77 左右,而 Pielou's evenness 均匀度指数在 0.5 左右。拉萨河干流三项指数均在平均值上下,支流中拉曲三项多样性指数偏低。使用单因素方差分析(ANOVA)比较拉萨河流域干支流之间生物多样性差异性,结果表明,三类多样性指数在各支流之间及干流与各支流之间无显著差异。

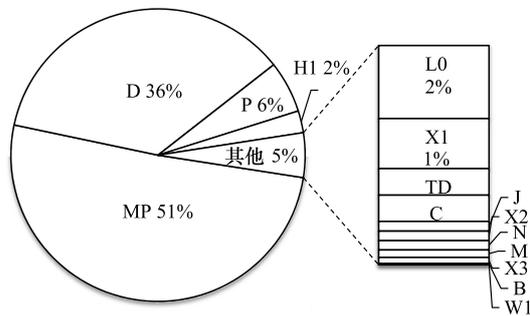


图 5 拉萨河流域浮游植物功能群相对丰度

Fig.5 Relative abundance of phytoplankton function groups of Lhasa River basin

图中 MP、D、P、H1、L0、X1、TD、C、J、X2、N、M、X3、B、W1 为浮游植物功能群分类代码

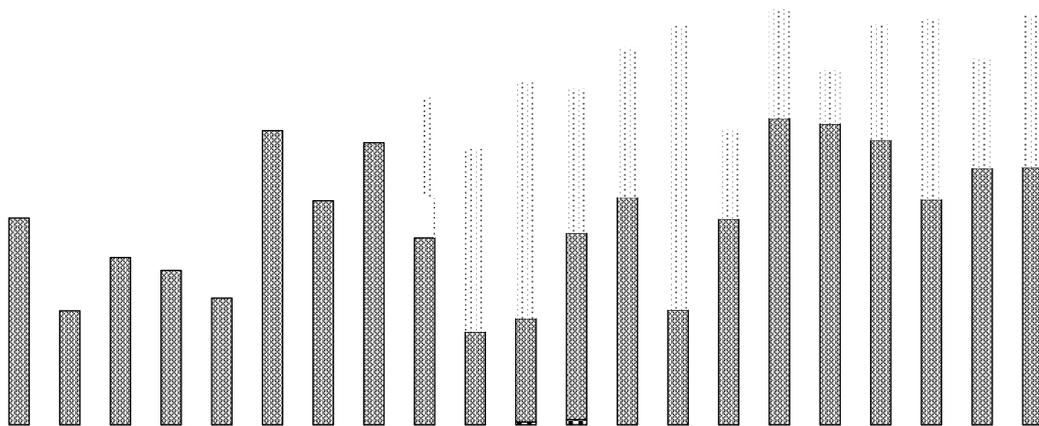


图 6 拉萨河流域各点位浮游植物功能群相对丰度

Fig.6 Relative abundance of phytoplankton function groups at each sites of Lhasa River basin

2.5 浮游植物丰度、功能群与环境因子关系

选取相关环境因子与浮游植物丰度、功能群丰度之

间进行典范对应分析(CCA)。共选取 10 项水质指标参与分析,采用主成分分析(PCA)提取特征值大于 1 的主成分,共有 5 个,累计贡献率 81.9%;选取载荷超过 0.7 的指标作为主要影响因子,筛选出 7 项环境因子指标,分别为 pH、NH₃-N、TP、TN、S²⁻、COD_{Mn}、COD_{Cr},其中 COD_{Mn}和 COD_{Cr}、NH₃-N 和 TN 相关系数分别为 0.995 和 0.889,相关性较强,可剔除其中一个指标,分别剔除 NH₃-N 和 COD_{Mn}。

浮游植物丰度依据频度 ≥ 10%、相对密度高于 1%的筛选原则,筛出浮游植物 19 种;浮游植物功能区依据相对密度高于 1%的方式筛选,筛出功能群 6 类,分别为 MP、D、P、H1、L0、X1。

在物种与环境因子的排序图中,箭头表示环境因子,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线与排序轴夹角的大小表示环境因子与排序轴相关性的大小,夹角越小说明关系越密切,箭头连线的长度表示环境因子与群落分布和种类分布间相关程度的大小,连线越长,相关性越大,反之越小^[25]。

表 3 拉萨河流域浮游植物功能群划分

Table 3 Phytoplankton function groups division of Lhasa River

功能类群 Functional groups	代表性藻种(属) Genus/Species represent in the groups	功能群生境特征 Habitat properties of functional groups
B	小环藻 <i>Cyclotella</i> .sp	中营养水体,对分层敏感
C	星杆藻 <i>Asterionella</i> .sp	富营养中小水体,对分层敏感
D	菱板藻 <i>Hantzschia</i> .sp、菱形藻 <i>Nitzschia</i> .sp	较浑浊的浅水水体
H1	束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> .sp、鱼腥藻 <i>Anabaena</i> .sp	富营养分层水体,浅水水体
J	四尾栅藻 <i>Scenedesmus. quadricauda</i> 、栅藻 <i>Scenedesmus</i> .sp、爪哇栅藻 <i>Scenedesmus.javaensis</i> 、盘星藻 <i>Pediastrum</i> .sp	混合的高富营养浅水水体
L0	等片藻 <i>Diatoma</i> .sp、双眉藻 <i>Amphora</i> .sp、羽纹藻 <i>Pinnularia</i> .sp	广适性
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> .sp	较稳定的中富营养水体,透明度不宜太低
MP	卵形藻 <i>Cocconeis</i> .sp、桥弯藻 <i>Cymbella</i> .sp、曲壳藻 <i>Achnanthes</i> .sp、双菱藻 <i>Surirella</i> .sp、舟形藻 <i>Navicula</i> .sp、异极藻 <i>Gomphonema</i> .sp、巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i> 、颤藻 <i>Oscillatoria</i> .sp、丝藻 <i>Ulothrix</i> .sp	频繁扰动的浑浊型浅水水体
N	平板藻 <i>Tabellaria</i> .sp、鼓藻 <i>Cosmarium</i> .sp	中营养型水体混合层
P	棒杆藻 <i>Rhopalodia</i> .sp、脆杆藻 <i>Fragilaria</i> .sp、钝脆杆藻 <i>Fragilaria capocina</i> 、峨眉藻 <i>Ceratoneis</i> .sp、扇形藻 <i>Meridion</i> .sp、直链藻 <i>Melosira</i> .sp	混合程度较高中富营养浅水水体
TD	水绵 <i>Spirogyra</i> .sp	中营养、静水或者流动缓慢、具有沉水植物
W1	裸藻 <i>Euglena</i> .sp	富含有机质,或农业废水和生活污水的水体
X1	布纹藻 <i>Gyrosigma</i> .sp、纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> .sp	混合程度较高的中-富营养浅水水体
X2	翼状茧形藻 <i>Amphiprora</i> .sp、衣藻 <i>Chamydomonas</i> .sp	混合程度较高的中-富营养浅水水体
X3	波缘藻 <i>Cymatopleura</i> .sp	浅水、清水、混合层

表 4 拉萨河流域干、支流浮游植物多样性指数

Table 4 Biodiversity indices of phytoplankton at main stream and brach of Lhasa River basin

多样性指数 Biodiversity indices	干流 Main stream		支流 Brach				总体 Total
	拉萨河干流	雪绒藏布	拉曲	玛曲	彭波河	热泉	
Marglef 丰富度指数 Richness index(<i>D</i>)	1.36±0.25	1.49±0.37	1.33±0.35	1.41±0.48	1.49±0.33	1.65±0.81	1.41±0.33
Shannon-Wiener 多样性指数 Biodiversity index(<i>H</i>)	1.79±0.22	1.81±0.22	1.54±0.49	1.82±0.53	1.92±0.06	1.78±0.42	1.77±0.26
Pielou's evenness 均匀度指数 Evenness index(<i>J</i>)	0.52±0.07	0.51±0.04	0.43±0.09	0.49±0.09	0.52±0.03	0.5±0.01	0.50±0.06

(1) 物种与环境因子的关系:CCA 排序结果见图 7,环境因子在第 1 轴、第 2 轴对拉萨河流域浮游植物丰度累积解释度为 53%;由各环境因子箭头连线的长短和夹角可以看出,各项环境因子对拉萨河流域浮游植物丰度影响均较为显著,而环境因子之间相关性较差;排序结果表明,束丝藻、棒杆藻、菱板藻及平板藻与环境因子箭头连线垂直投影距离较远,受环境因子影响较小;物种与环境因子对应关系表现如下:脆杆藻、钝脆杆藻、等片藻和直链藻对 pH 响应显著;卵形藻对 COD_{Cr} 响应显著;舟形藻、桥弯藻及纤维藻对 TN 响应显著,剩余物种除相关性较差的束丝藻、棒杆藻、菱板藻及平板藻外在二维平面投影集中于原点周边,距离较近,至各环境因子箭头连线距离相对较近,对环境因子均有响应,但水绵、颤藻、异极藻、曲壳藻等物种对 TP 响应明显;无物种落在 S^2 环境因子箭头连线上,但由于物种集中在原点,故该项指标对物种影响的贡献也较大。

(2) 浮游植物功能群与环境因子对应关系:由图 8 可以看出,环境因子在第 1 轴和第 2 轴对浮游植物功能群丰度累积解释度为 94.4%;丰度较大、占优势的 MP、D 功能群距离原点最近(二者丰度之和占总丰度的 87%),原点距离各类环境因子均为最近,说明对应分析的环境因子对两类功能群影响显著;P 功能群距离原

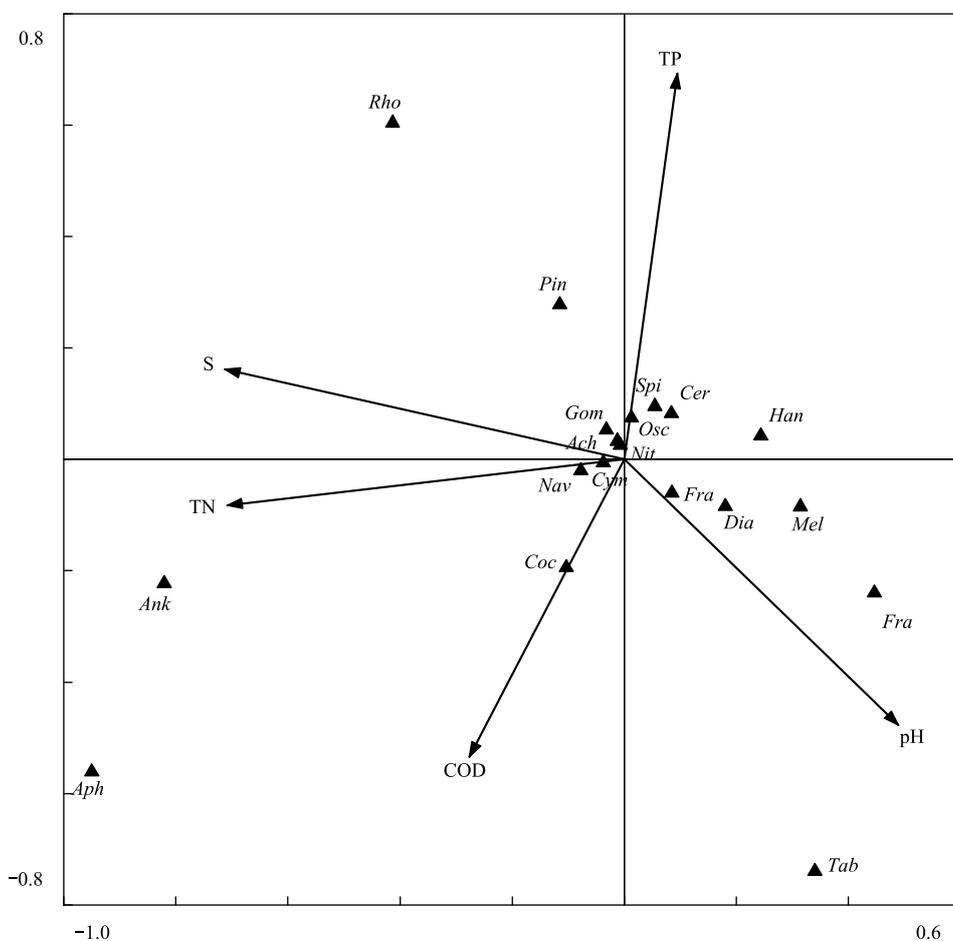


图7 拉萨河流域浮游植物丰度与环境因子典范对应分析

Fig.7 CCA biplot of phytoplankton species and environmental variables of Lhasa River basin

图中 pH 为酸碱度;TP 为总磷;TN 为总氮;H 为海拔;COD 为化学需氧量;S 为硫化物;物种代码——Nit:菱形藻, *Nitzschia*.sp; Ach:曲壳藻, *Achnanthes*.sp; Cym:桥弯藻, *Cymbella*.sp; Gom:异极藻, *Gomphonema*.sp; Nav:舟形藻, *Navicula*.sp; Fra:脆杆藻, *Fragilaria*.sp; Aph:束丝藻, *Aphanizomenon*.sp; Cer:峨眉藻, *Ceratoneis*.sp; Ank:纤维藻, *Ankistrodesmus*.sp; Dia:等片藻, *Diatoma*.sp; Coc:卵形藻, *Cocconeis*.sp; Han:菱板藻, *Hantzschia*.sp; Mel:直链藻, *Melosira*.sp; Spi:水绵, *Spirogyra*.sp; Osc:颤藻, *Oscillatoria*.sp; Pin:羽纹藻, *Pinnularia*.sp; Fra:钝脆杆藻, *Fragilaria capocina*; Rho:棒杆藻, *Rhopalodia*.sp; Tab:平板藻, *Tabellaria*.sp

点稍远,与 TP 投影距离最近,说明 TP 对 P 功能群有着明显的影响;L0 与 pH 投影距离最近,pH 对 L0 功能群影响显著;X1 受 TN 影响显著,但距离其他功能群类型较远;H1 受 COD_{Cr}影响显著,同样距离其他功能群类型较远。P、H1、L0 和 X1 分别占总丰度的 6%、2%、2%和 1%。

3 讨论

拉萨河是典型的高原河流。高原河流有其独有特征。海拔属于宏观尺度的环境因子,通常状况下,由于海拔的升高,水域温度降低,冰冻期延长^[26-27],物种的丰富度也随之降低^[28],浮游植物的总丰度呈现下降趋势^[29]。目前针对高原河流水生生物群落特征的动态变化及受水环境因子的影响的研究相对较少,与环境因子对应关系相关研究鲜有报道。此次调查自拉萨河源头至入雅鲁藏布江入河口主要干、支流进行水质和生物采样,做对应分析,通过以下几个方面对分析结果进行讨论:

3.1 浮游植物物种组成、丰度现状

拉萨河流域浮游藻类物种组成简单,物种丰富度低,合计采集到的物种数量为 53 种,丰富度最高的断面 22 种,流域内硅藻门物种丰富度占 60%,绝对优势;群落丰度最高值 2.2 万个/L,流域平均值仅 3857 个/L,相

对丰度最高依然是硅藻门物种,占 94.6%。

拉萨河干支流群落结构组成具有一定的独特性,物种丰富度及密度均较低,显著低于同纬度低海拔地区河流,淮河流域鉴定浮游植物种类 244 种^[30],平均密度 29.8×10^5 个/L^[31],赣江流域浮游植物种类数 312 种,平均密度 83.86×10^4 个/L^[32]。产生如此结果的原因,本次调查研究认为:

(1) 温度响应:水温是影响浮游植物种类及生物量的关键因子^[33]。随着水温的升高,大量浮游植物得以快速的生长和繁殖^[34]。当然,也有研究者指出,水温的变化与浮游植物生物量呈极显著正相关关系,与浮游植物物种丰富度呈极显著负相关关系^[35]。本文认为,浮游植物物种丰富度与密度在适宜的温度范围内是随着温度的升高而升高的,但超出物种的生态幅,超出耐受性的物种自然会消失,物种丰富度及密度会随之下降,而此时有适宜该温度的物种存在,在缺少其他物种的竞争下,该物种会大量繁殖而占据空余出来的资源空间,从而大量爆发,密度反而不会下降。如硅藻、金藻喜低温,蓝藻、绿藻喜高温^[36],研究区物种的丰富度及相对丰度结果中,硅藻门物种所占比例均较高,对上述现象有了很好的验证。

(2) 营养盐同样是浮游植物物种丰富度及密度的关键限制因子^[37]。研究认为,中营养型水体以甲藻门、隐藻门和硅藻门占优势,而富营养型水体以蓝藻门、绿藻门占优势^[38]。拉萨河流域物种丰富度及密度低,但群落结构组成以硅藻门为主,浮游植物相对丰度又以硅藻门 94.6% 如此之高的比例呈现,说明了河流水体中营养盐的含量较低。本文认为,拉萨河干支流位于高海拔地区,河岸带植被稀疏,河流补给中冰川融水占据很大比例,故地表径流携带进入水体的养分较少,可供浮游植物自养繁殖的资源较少,导致其独特的物种组成及丰度现状。

(3) 张军燕等^[12]对拉萨河春季浮游生物的调查结果显示物种平均密度约为 10.18 万个/L、浮游植物种类采集到 6 门 76 种(属),其中硅藻门占总种数的 53.94%,绿藻门和蓝藻门分别占 25% 和 15.97%;吕永磊等^[13]对拉萨河源头水域浮游生物调查结果显示物种平均密度为 201.98 万个/L、采集到 76 个种类,其中硅藻门占总种数的 63.2%,绿藻门和蓝藻门分别占 15.8% 和 7.9%。

本次研究中浮游植物各样点的平均密度为 3857 个/L,采集到浮游植物 5 门 53 种,硅藻门占总种类数的 60.4%;绿藻门和蓝藻门分别占 20.8% 和 15.1%。本次结果浮游植物的密度及种类数均较低,可能与采样季节有关,此次调查期为丰水期,水文特征波动较大,泥沙含量较高、水体透明度降低,不利于藻类生长。这可能是造成藻类少的一个重要原因。另浮游植物作为水生态系统的重要类群,其群落结构特征随季节波动较大,在今后的工作中增强对流域水生生物系统调查研究,探索其时空分布规律,为流域水生态工作提供基础数据。

3.2 拉萨河浮游植物功能群特征

拉萨河流域浮游植物功能群组成简单,15 个类别的功能群中,MP、D 和 P 三个类群占据了总丰度的 93%,可见拉萨河流域浮游植物功能群类型的强优势性。根据功能群所表现出来的生境特征,拉萨河流域河流表现出扰动频繁、水体浑浊等特征。

此次调查包括拉萨河干流及支流,河流落差较低,整体落差在 1800 米以上,在拉萨河干流下游,河道渐宽,但水流流速较大,水量较多,支流及上游水流湍急,从而导致水体扰动和浑浊,本文认为与浮游植物功能群

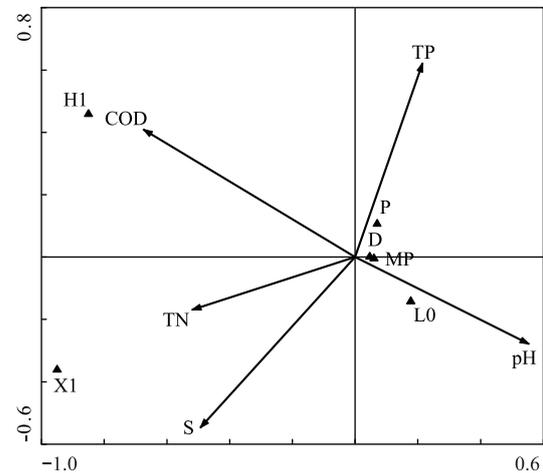


图 8 拉萨河流域浮游植物功能群与环境因子典范对应分析

Fig.8 CCA biplot of phytoplankton function group and environmental variables of Lhasa River basin

图中 pH 为酸碱度;TP 为总磷;TN 为总氮;H 为海拔;COD 为化学需氧量;S 为硫化物。MP、D、P、HI、LO、X1 为浮游植物功能群分类代码

特征表现相一致。

3.3 拉萨河浮游植物多样性特征

物种多样性是对一个群落或生境中种数目多少以及个体数目的分配情况,即物种丰富度以及均匀度表征,通过物种多样性可以直接或间接的反映生态系统的结构类型、稳定程度以及生境差异等。

拉萨河流域浮游植物多样性指数显示:整个流域所有的监测断面多样性指数均偏低,这与流域监测到的浮游植物物种丰富度低及种群丰度配置不均有关。

目前,生物多样性指数仍是我国水域生态学家评价水体质量状况使用较多的方法之一,很多学者还基于某些多样性指数对水质级别进行了划分^[39-41]。通过本研究不难发现,各断面多样性指数均较低,按照现有的评价标准,评价结果均在中度污染—重度污染。但是根据前文分析,造成多样性指数偏低的原因还可能是生境条件不适于浮游植物的生长,从而导致计算结果偏低。现场调查发现,流域内人口稀少,很少见到可输入河流的污染源,故利用多样性指数进行拉萨河流域水环境状况并不适用。

3.4 浮游植物种类、功能群与水环境因子的关系

浮游植物群落结构在不同水体具有不同的特征,其演替规律是众多环境因子在时间和空间上相互影响的结果^[42-43]。影响水体中浮游植物群落结构的环境因子很多,主要有营养盐、温度和光照^[44]。使用 PCA 和相关性检验,选取 5 类环境指标与浮游植物进行典范对应分析,分析结果的对物种丰度与环境关系、功能群与环境关系累积解释度能够分别达到 53% 和 94.4%。

环境因子中,已有研究表明,DO 与藻类生长呈显著正相关^[35,45-46],但此次分析中,DO 对主成分贡献很小,未作为特征指标进行对应分析,可见 DO 在高原河流中对浮游植物群落结构影响较小。筛选出的环境因子为 TN、TP、pH、S²⁻、COD_{Cr}。其中氮、磷是浮游植物生长繁殖重要的营养盐,也是常见的限制性营养因子^[47],COD_{Cr}通常作为反映点源污染的常规检测指标。

本次调查各物种种群丰度在排序轴中分布较为集中,少数物种距离环境因子较远,种群丰度受环境因子影响显著,排序图中 S²⁻对浮游植物丰度影响较小;脆杆藻、钝脆杆藻、等片藻和直链藻对 pH 响应显著;卵形藻对 COD_{Cr} 响应显著;舟形藻、桥弯藻及纤维藻对 TN 响应显著;水绵、颤藻、异极藻、曲壳藻等物种对 TP 响应明显。总体来看,蓝藻门和绿藻门对应响应的环境因子为 TN、TP。

本文研究结论与低海拔河流物种与环境因子对应关系有不同之处,源于拉萨河属于高原河流,有着特殊的环境特征,高海拔、低含氧量等宏观环境因子、水体中营养盐、化学成分等微观因子综合作用在水生生物种群群落,表现出不同的响应方式,在今后的研究中应结合多方面因素进行全面分析,才能更加彻底摸清高原河流浮游植物群落的变化规律及主要的驱动因子,为科学解释高海拔区域水生态系统状况提供依据。

4 结论

(1) 2017 年 8 月拉萨河流域共计监测到浮游植物 5 门 22 科 46 属 53 种,硅藻门(Bacillariophyta)种类最多,占总的种类数的 60.4%;其次是绿藻门(Chlorophyta)占总的种类数的 20.8%;蓝藻门(Cyanophyta)有 8 个种类出现,占总种类数的 15.1%,甲藻门(Pyrrophyta)和隐藻门(Cryptophyta)占总种类数的 1.9%;拉萨河干流自上游到下游除拉萨市下游优势种为桥弯藻外,其他监测点均为菱形藻;支流除玛曲上游为曲壳藻外,其余断面均为菱形藻。

(2) 拉萨河流域浮游植物平均丰度、物种丰富度均较低,与高海拔的宏观环境有关。硅藻门相对丰度最高,占总丰度的 94.6%,剩余物种丰度依次为蓝藻门 3.1%、绿藻门 2.3%,最低的为裸藻门 0.04%。

(3) 拉萨河流域浮游植物功能群分 15 类,其中 MP、D 和 P 为优势功能群占总丰度的 93%,剩余 12 类仅占 7%。根据功能群类型判断拉萨河流域河流表现出扰动频繁、水体浑浊等特征,与现场调查情况相一致。

(4) 筛选 5 项环境因子指标进行物种与环境的对应分析,结果如下:脆杆藻、钝脆杆藻、等片藻和直链藻对 pH 响应显著;卵形藻对 COD_{Cr} 响应显著;舟形藻、桥弯藻及纤维藻对 TN 响应显著;水绵、颤藻、异极藻、曲

壳藻等物种对 TP 响应明显;功能类群方面,MP、D 对筛选的环境因子响应显著,TP 对 P 功能类群影响显著;pH 对 L0 功能群影响显著;X1 受 TN 影响显著;H1 受 COD_{Cr} 影响显著。

参考文献 (References):

- [1] 胡金, 万云, 洪涛, 钟明, 万安, 安树青. 基于河流物理化学和生物指数的沙颍河流域水生态健康评价. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 783-790.
- [2] Fathi A A, Flower R J. Water quality and phytoplankton communities in Lake Qarun (Egypt). Aquatic Sciences, 2005, 67(3): 350-362.
- [3] 陈朝述, 李俊, 陈孟林, 于方明, 邓华, 周振明. 桂林市 4 个城中湖泊夏季浮游植物群落结构与水质评价. 水生态学杂志, 2015, 36(3): 25-30.
- [4] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters, 2004, 34(3): 236-248.
- [5] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194.
- [6] Horne A J, Goldman C R. Limnology. 2nd ed. New York: McGraw Hill Companies, 1994: 226-264.
- [7] 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 张全发. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, 32(10): 2875-2882.
- [8] Pramanik S, Gani A, Alfasane A, Khondker M. Seasonality of phytoplankton and their relationship with some environmental factors in a pond of old Dhaka. Bangladesh Journal of Botany, 2016, 45(1): 195-201.
- [9] 周宇建, 张永勇, 花瑞祥, 左其亭, 陈豪. 淮河中上游浮游植物时空分布特征及关键环境影响因子识别. 地理研究, 2016, 35(9): 1626-1636.
- [10] Koch R W, Guelda D L, Bukaveckas P A. Phytoplankton growth in the Ohio, Cumberland and Tennessee Rivers, USA: inter-site differences in light and nutrient limitation. Aquatic Ecology, 2004, 38(1): 17-26.
- [11] 周振明, 陈朝述, 刘可慧, 李俊, 陈孟林, 蒋瑜, 于方明. 漓江桂林市市区段夏季浮游植物群落特征与水质评价. 生态环境学报, 2014, 23(4): 649-656.
- [12] 张军燕, 高志, 沈红保, 李瑞娇, 余斌. 拉萨河春季浮游生物群落结构特征研究. 淡水渔业, 2017, 47(4): 23-28+62.
- [13] 吕永磊, 郝世鑫, 王宠, 孙东方, 王晓通, 刘海平, 商鹏. 拉萨河源头水域中浮游生物、鱼类资源调查与分析. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 407-413.
- [14] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [16] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏藻类. 北京: 科学出版社, 1992.
- [17] 王丽, 魏伟, 周平, 李杨, 孙庆业. 铜陵市河流冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2013, 24(1): 243-250.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, Swanton C. Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera: carabidae) by using a range of ecological indices. Biodiversity & Conservation, 2003, 12(5): 851-882.
- [20] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, Angel M V. Marine snow studies in the northeast Atlantic: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. Marine Biology, 1993, 116(4): 689-702.
- [21] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. Journal of Plankton Research, 2002, 24(5): 417-428.
- [22] Padišák J, Crossetti L O, 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.
- [23] Lopes M R M, de M Bicudo C E, Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. Hydrobiologia, 2005, 542(1): 235-247.
- [24] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 50(5): 673-687.
- [25] 张金屯. 数量生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2011: 162.
- [26] Rundle S D, Jenkins A, Ormerod S J. Macroinvertebrate communities in streams in the Himalaya, Nepal. Freshwater Biology, 1993, 30(1): 169-180.
- [27] Ao M, Alfred J R B, Gupta A. Studies on some lotic systems in the north eastern hill region of India. Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters, 1984, 15(1): 135-141.
- [28] Suren A M. Macroinvertebrate communities of streams in western Nepal: effects of altitude and land use. Freshwater Biology, 1994, 32(2):

323-336.

- [29] 张军燕. 玛曲至湖口段黄河干流浮游生物群落结构特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [30] 朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏, 王全喜. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价. 湖泊科学, 2017, 29(3): 637-645.
- [31] 邱阳凌, 林育青, 刘俊杰, 唐磊, 关铁生, 陈求稳, 陈凯, 王丽. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1665-1672.
- [32] 刘足根, 张柱, 张萌, 方红亚, 弓晓峰. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 375-384.
- [33] 代龚圆, 李杰, 李林, 宋立荣. 滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子. 水生生物学报, 2012, 36(5): 946-956.
- [34] 张才学, 龚玉艳, 孙省利. 湛江港湾潜在赤潮生物的时空分布及其影响因素. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1763-1770.
- [35] 吴卫菊, 杨凯, 汪志聪, 李根保, 刘永定. 云贵高原渔洞水库浮游植物群落结构及季节演替. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 69-75.
- [36] 张云, 马徐发, 郭飞飞, 李建柱, 熊邦喜. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, 27(5): 902-910.
- [37] 苟婷, 许振成, 李杰, 马千里, 王丽, 赵学敏, 梁荣昌, 郭俊成. 珠江流域西江支流贺江浮游藻类群落特征及水质分析. 湖泊科学, 2015, 27(3): 412-420.
- [38] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999: 176-198.
- [39] 杨敏, 张晟, 刘朔孺. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价. 环境科学, 2015, 36(7): 2480-2486.
- [40] Zhang N N, Zang S Y. Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland, China. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(11): 3657-3664.
- [41] Wang H W, Xing Q C, Zhao C L, Zhao H T, Ma L, Wang Y F, Cai D B. Investigation of phytoplankton and evaluation on water quality of Taizi River in Liaoyang area. Advanced Materials Research, 2014, 955-959: 403-406.
- [42] 江源, 王博, 杨浩春, 刘全儒, 周云龙. 东江干流浮游植物群落结构特征及与水质的关系. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1700-1705.
- [43] 王超, 李新辉, 赖子尼, 曾艳艺, 高原, 刘乾甫, 杨婉玲. 珠三角河网浮游植物生物量的时空特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5835-5847.
- [44] 韩欢欢, 范亚文. 黑龙江省安兴湿地秋季浮游植物群落结构. 湖泊科学, 2012, 24(4): 577-585.
- [45] 游亮, 崔莉凤, 刘载文, 杨斌, 黄振芳. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析. 环境科学与技术, 2007, 30(9): 42-44.
- [46] 汪星, 刘录三, 李黎, 周娟, 王瑜, 夏甫, 夏阳. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3403-3413.
- [47] 徐兴华, 陈椽, 宁爱丽, 潘静. 阿哈水库浮游植物数量与环境因子的关系. 安徽农业科学, 2012, 40(10): 6106-6109.