

doi: 10.7541/2023.2022.0319

拉萨河下游周丛藻类群落结构特征及其与环境因子的关系

扎西拉姆 张 驰 王万良

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

摘要: 为探究西藏拉萨河下游周丛藻类群落结构时空特征及其驱动因子分析, 研究于2018年2月(枯水期)、6月(平水期)、9月(丰水期)采用人工基质法对拉萨河下游进行3次周丛藻类群落结构调查。调查结果显示拉萨河下游共有周丛藻类7门53属104种, 优势度 ≥ 0.02 的藻类有28种, 全部隶属于硅藻门。其中肘状针杆藻(*Synedra ulna*)、长等片藻(*Diatom aelongatum*)和中型脆杆藻(*Fragilaria intermedia*)为前三优势种。拉萨河下游周丛藻类年平均生物量为 0.047 mg/cm^2 , 其中曲水县平均生物量最高(0.121 mg/cm^2), 其次为尼玛江热乡(0.052 mg/cm^2)和拉萨市(0.04 mg/cm^2), 墨竹工卡县平均生物量最低(0.015 mg/cm^2)。拉萨河下游周丛藻类生物量空间分布为: 曲水县>尼玛江热乡>拉萨市>阿朗乡>扎雪乡>达孜县>墨竹工卡县; 拉萨河下游周丛藻类丰度时间分布为: 平水期>丰水期>枯水期。水质评价结果显示上游3个采样点水质状况为轻度污染-清洁过度, 下游4个采样点水质状况为轻度污染-中污型过度。通过对周丛藻类群落参数与环境参数的典范对应分析显示, 大部分周丛藻类优势种与水温、流速和pH呈负相关性, 与总氮、溶解氧、电导率呈正相关性。研究为西藏拉萨河水生生物的多样性保护提供基础数据。

关键词: 拉萨河; 周丛藻类; 种类组成; 时空变化

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)07-1168-10



拉萨河是雅鲁藏布江流域五大支流之一, 平均海拔4000 m以上, 年均水温较低, 属于典型的高原河流^[1-3]。由于特殊的地理环境与气候条件, 拉萨河流域生存着独特的水生生物群落。其中周丛藻类(Periphytic algae)也称着生藻类, 是附着于其他基质上的微型水生植物, 是生态系统中的初级生产者^[4,5], 也是西藏特有鱼类的主要生物饵料^[6]。但随着拉萨河流域基本建设项目的大力实施和城市建设力度的不断加大, 对沿河生态环境和渔业资源造成了明显的影响。同时, 随着全球气候变暖, 高原地区的冰川河流发生较大变化, 高原河流的水质理化因子和生态系统受到不同程度的影响^[7]。目前拉萨河周丛藻类研究报道较少, 魏俊伟等^[3]2019年9月份对拉萨河周丛藻类群落结构进行调查, 发现水温、溶解氧、流速和pH为影响周丛藻类的主要环境因子, 未见周丛藻类研究报道。

周丛藻类具有繁殖速度快、物种数量庞大、对环境因子的变化反应敏感等特点, 能够较好地解

释水体生态环境状态^[8,9], 已经被广泛应用于河流生态环境监测中。如胡建成等^[10]调查金沙江周丛藻类发现, 周丛藻类季节变化较明显, 能够较好地评价河流生态健康状况, 胡愈忻等^[11]调查长江流域周丛藻类群落结构, 发现主要优势类群属于硅藻门和蓝藻门, 干流硅藻门的舟形藻为最大优势类群。马宝珊等^[12]在雅砻江下游调查周丛藻类, 发现周丛藻类群落结构主要受到水质和水文条件的影响。肖妮娜等^[13]赣江流域调查了周丛藻类, 发现整个流域上下游的藻类群落结构差异显著, 受环境因子的影响较明显。胡建成等^[14]在赤水河进行周丛藻类群落结构调查, 并利用生物参数评价河流生态现状。可见, 周丛藻类已经广泛应用于水域生物资源调查与生态环境评价领域, 该物种在水域生态环境评价方面具有更好的适宜性。但是以上调查对象大部分属于内地河流, 并不能说明高原河流周丛藻类群落结构的基本特征。为了较深入地研究高原河流水生生物群落结构特征, 本研究选择典型的高

收稿日期: 2022-08-01; **修订日期:** 2022-11-06

基金项目: 西藏重要水产种质资源调查、繁育、增殖放流效果评估及开发利用项目; 西藏自治区自然科学基金(XZ2017ZR G-36)资助
[Supported by the Natural Science Foundation Project of Tibet Autonomous Region (XZ2017ZR G-36)]

通信作者: 扎西拉姆, 女, 助理研究员; 研究方向为高原水生生物与生态环境。E-mail: Zhaxilhamu@163.com

原河流拉萨河为研究对象, 于2018年枯水期、平水期和丰水进行三个水期的周丛藻类群落结构调查。将为高原河流生态环境和渔业资源保护提供基础数据, 并填补采用人工基质采样调查高原河流周丛藻类群落结构的研究空白。

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

拉萨河地处雅鲁藏布江中游东侧, 横穿拉萨市区, 在当地具有“幸福之水”的美称, 是一条西藏拉萨地方饮用和灌溉的重要水源^[15], 该河源头海拔约5200 m, 汇入雅鲁藏布江入口海拔为3580 m, 全程落差1620 m^[16]。本研究在拉萨河下游阿朗乡至曲水县分别对不同水期进行3次采集水样, 根据流域地理及生态环境的特点, 在调查水域内设置7个采样断面(图1)。分别位于阿朗乡(S1)、扎雪乡(S2)、尼玛江热乡(S3)、墨竹工卡县(S4)、达孜县(S5)、拉萨市(S6)、曲水县(S7)。采样时间分别为2018年2月枯水期、6月平水期和9月丰水期。

1.2 采样方法

本研究以塑料带人工基质法采集样本, 每个采样带长10 cm、宽3.2 cm(图2), 将其固定在25 cm长的木棍上, 每条木棍挂6条带, 木棍中央挂一个重物, 两端系上侧绳, 侧绳和主绳连接固定在岸边, 借助重物的拉力把采样带固定在水下50 cm处。挂带14d后取下5条采样带分别装入5个采样瓶里^[17], 现场用鲁哥试剂固定, 到实验室用毛刷刷洗采样带上的藻类, 并用蒸馏水清洗3遍装入50 mL采样瓶中, 将其静止48h后浓缩至10 mL用以鉴定物种和计数。定量观察0.1 mL藻类计数框中用×40倍显微镜鉴定, 观察2片

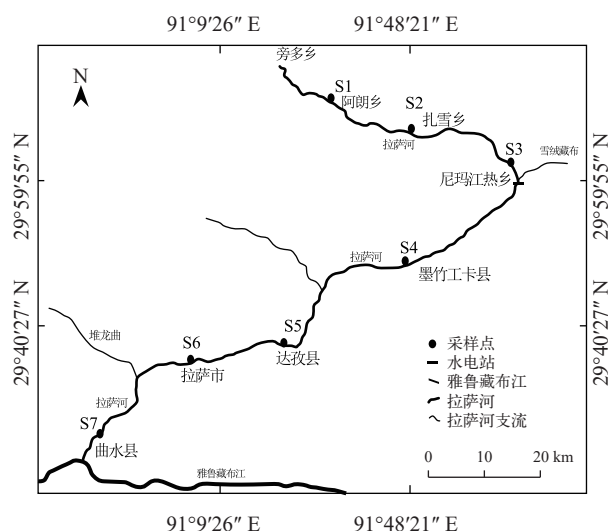


图1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points

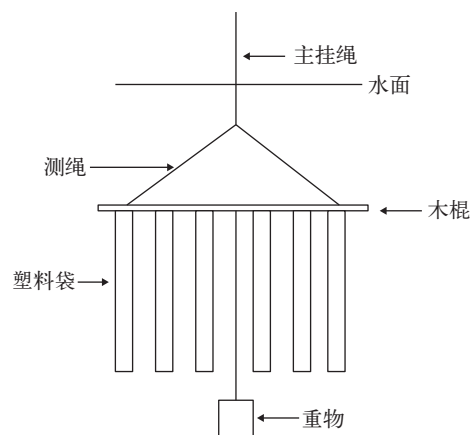


图2 采样工具

Fig. 2 Sampling kit

取其平均值, 2片误差必须小于15%, 否则需要观察第三片, 直到符合要求。硅藻鉴定时采用了酸化处理, 以消解细胞内含物, 使硅藻细胞表面纹理清晰可见, 提高藻类鉴定准确率^[17], 大部分藻类鉴定到种。枯水期拉萨河流域处于冬季冰封期, 采取破冰取样。3个水期一共采集样本105份。种类鉴定过程中主要参考书籍为《中国淡水藻类》^[18]《中国西藏硅藻》^[19]《淡水微型生物图谱》^[20]等。

1.3 测量环境参数

使用便携式水质理化测量仪(YSI Pro30)测量水温(Water temperature, WT)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)、酸碱度(Power of hydrogen, pH)、电导率(Conductivity, CON); 直读式流速仪测量河水流速(Flow velocity Flo); GPS定位仪测定采样点海拔高度(Elevation ELE)。各采样点采取2 L水带回实验室, 并采用国家标准测定法碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测量总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorus, TP)和叶绿素a(Chlorophyll a, Chl.a)等含量^[21]。

1.4 数据整理与分析

采用Microsoft Office Excel 2007和分析软件R语言(R Programming Language)统计与分析数据, 采用R软件包进行典范对应分析(CCA)。采用以下4个公式计算出周丛藻类(Y)优势度、(H')Shannon-Wiener多样性指数、(D)Margalef丰富度指数和(J)Pielou均匀度指数^[9-14]。公式中 n_i 为*i*物种的密度, N 为总的生物个体总数, f_i 为第*i*物种出现频率; P_i 为第*i*种的个体数百分比, S 为物种数。

$$(1) \text{ 优势度 } Y = (n_i / N) \times f_i$$

$$(2) \text{ Shannon-Wiener多样性指数 } H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$(3) \text{ Margalef丰富度指数 } D = (S-1) / \ln N$$

(4) Pielou均匀度指数 $J=H'/\ln S$

2 结果

2.1 环境参数

如表 1 所示, 全年平均水温较低, 季节性变化显著, 本研究最低记录为枯水期阿郎乡 1.7℃、最高记录为平水期尼玛江热乡 19.2℃; 河流流速最慢出现在尼玛江热乡采样点, 这跟直孔电站水库截流有关; 此次调查发现河流水温跟海拔高度和水流流速具有密切的关系, 阿郎乡和扎雪乡为海拔较高的 2 个采样点, 年平均水温低于 10℃; 尼玛江热乡采样点位于直孔电站水库入水口, 平均流速 0.03 m/s。电导率没有明显的季节性差异, 平均电导率为 146.69 μS/cm; 全年河水总氮和总磷含量均较低; 叶绿素 *a* 含量采样点中间较低, 两头较高, 说明中间段生物丰度较低。

2.2 周丛藻类群落结构

本研究一共监测到周丛藻类 7 门 104 种属, 其中硅藻门(Bacillariophyta)有 65 种, 占藻类总种数的

63%; 其次为绿藻门(Chlorophyta)24 种, 占藻类总种数的 23%; 蓝藻门(Cyanophyta)6 种, 占藻类总种数的 6%; 裸藻门(Euglenophyta)5 种, 占藻类总种数的 5%; 隐藻门(Cryptophyta)2 种, 占藻类总种数的 2%; 甲藻门(Dinoflagellata)和黄藻门(Xanthophyta)各 1 种, 分别占总种类数的 1%(图 3)。这结果与魏俊伟等 2019 年调查拉萨河流域着生藻类群落结果相似, 该研究发现硅藻门种类数目占总种类数的比例大于 50%; 也跟巴桑等^[22]和君珊等^[1]等调查拉萨河流域浮游植物群落结构特征相似, 拉萨河周丛藻类主要由硅藻门、绿藻门和蓝藻门种类组成。

2.3 周丛藻类群落种类组成

拉萨河下游周丛藻类群落结构从空间分布上看(图 4), 曲水县周丛藻类种类数量最多(64 种), 占总种类数的 62%; 其次是尼玛江热乡发现周丛种类 63 种, 占总种类数的 61%; 直孔电站上游阿郎乡和扎雪乡分别为 49 种和 51 种, 分别占总种类数的 47%和 49%; 然后是直孔电站下游墨竹工卡县 46 种

表 1 拉萨河下游环境参数
Tab. 1 Environmental parameters of lower Lhasa River

地点 Site	水温 Temperature (℃)	溶氧 DO (mg/L)	电导率 Conductivity (μS/cm)	pH	流速 Flow velocity (m/s)	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	叶绿素 <i>a</i> Chl. <i>a</i> (mg/L)	海拔 Elevation (m)
S1	8.90±5.11 (1.7—13)	6.77±0.72 (6.13—7.78)	140.40±5.72 (133.4—147.4)	8.54±0.10 (8.4—8.62)	0.17±0.09 (0.1—0.3)	0.68±0.12 (0.5—0.85)	0.03±0.04 (0—0.1)	4±0.82 (3—5)	4032
S2	8.70±4.88 (1.9—13.1)	6.82±0.65 (6.28—7.74)	138.50±4.25 (132.5—141.7)	8.45±0.08 (8.36—8.55)	0.23±0.09 (0.1—0.3)	0.92±0.27 (0.7—1.3)	0.07±0.08 (0—0.2)	2±1.41 (1—4)	3907
S3	11.70±6.92 (2.5—19.2)	6.16±0.95 (5.39—7.5)	146.47±16.61 (126.9—167.5)	8.47±0.02 (8.4±6—8.5)	0.03±0.05 (0—0.1)	1.58±0.93 (0.88—2.9)	0.14±0.15 (0—0.4)	1.67±1.70 (1—4)	3890
S4	10.03±4.55 (3.9—14.8)	7.01±0.67 (6.28—7.9)	140.10±7.18 (134.2—150.2)	8.56±0.11 (8.44—8.71)	0.37±0.09 (0.3—0.5)	0.70±0.22 (0.4—0.9)	0.03±0.04 (0—0.1)	1.33±1.25 (1—3)	3845
S5	11.87±5.63 (4.3—17.8)	6.62±0.94 (6.34—7.88)	152.83±9.08 (143.4—165.1)	8.55±0.05 (8.49—8.56)	0.27±0.09 (0.2—0.4)	0.32±0.27 (0—0.67)	0.03±0 (0—0.1)	1±0.82 (1—2)	3730
S6	11.13±5.42 (4.1—17.3)	6.55±1.00 (5.53—7.91)	150.90±10.56 (141.8—166.6)	8.55±0.01 (8.53—8.56)	0.17±0.09 (0.1—0.3)	0.57±0.10 (0.5—0.72)	0 (0—0.1)	1±0.82 (1—2)	3658
S7	12.33±5.51 (4.7—17.5)	6.76±1.47 (5.29—8.77)	157.80±6.81 (150—166.6)	8.42±0.11 (8.42—8.67)	0.13±0.05 (0.1—0.2)	0.99±0.16 (0.81—1.2)	0 (0—0.1)	3±0.82 (2—4)	3501

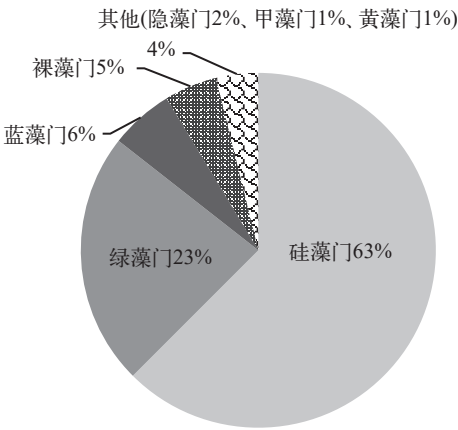


图 3 拉萨河下游周丛藻类的种类组成及比例

Fig. 3 Species composition and proportion of periphytic algae in the lower reaches of Lhasa River

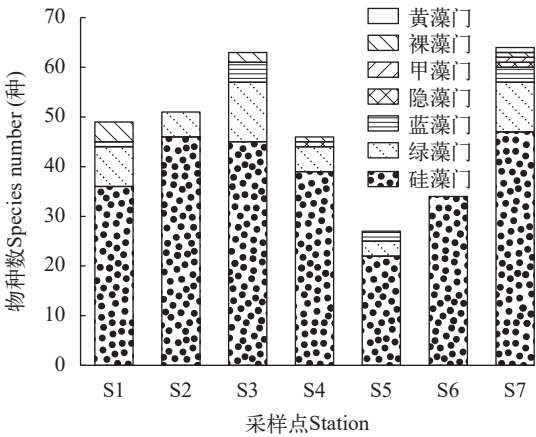


图 4 拉萨河下游各采样点周丛藻类种类组成

Fig. 4 Species composition of periphytic algae at sampling points in the lower reaches of Lhasa River

属, 占总种类数的44%。拉萨市和达孜县周丛藻类种类数量比较少, 分别为34种和27种, 占总种类数的33%和26%。总体来说, 拉萨河下游周丛藻类空间动态为采样点上游到下游藻类种类数变化呈S曲线, 直孔电站水库上游藻类种类数逐渐递增, 电站水库下游种类数逐渐减少, 直到曲水县种类数开始升高的趋势。

2.4 周丛藻类生物量时空变化

本次调查全年拉萨河下游各采样点周丛藻类生物量均值分别为0.035、0.035、0.052、0.015、0.029、0.04和0.121 mg/cm², 年平均生物量为0.047 mg/cm²(图 5)。其中曲水县平均生物量最高(0.121 mg/cm²), 其次是尼玛江热乡(0.052 mg/cm²)和拉萨市(0.04 mg/cm²), 墨竹工卡县平均生物量最低(0.015 mg/cm²), 7个采样点大致呈现出周丛藻类生物量中间区域较低, 两端较高的趋势。从时间分布上看, 周丛藻类生物量从大到小依次为平水期>丰水期>枯水期。由于采样过程中遭到洪水和人为的破坏, 平水期墨竹工卡县和曲水县两个点没能一次性采样完整, 先后进行了2次重复补样, 这可能会对藻类的生物量有一定的影响。

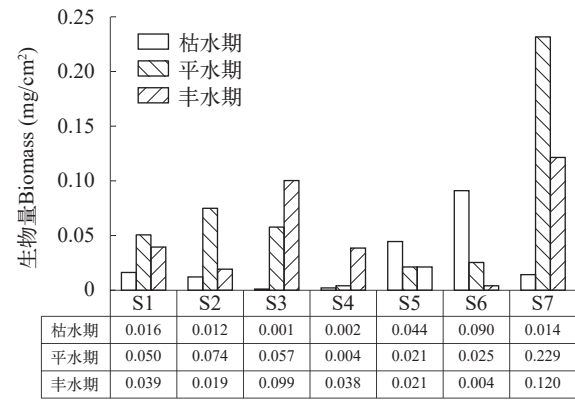


图 5 拉萨河下游周丛藻类生物量分布

Fig. 5 The biomass of periphytic algae around different sampling sites in the lower reaches of Lhasa River

2.5 周丛藻类群落参数

如表 2 所示, Shannon-Wiener 多样性指数最高出现在尼玛江热乡丰水期, 其次为扎雪乡丰水期; Pielou 均匀度指数最高出现在尼玛江热乡的平水期, 其次为扎雪乡的丰水期; Margalef 丰富度指数最高出现在尼玛江热乡的丰水期, 其次为扎雪乡的丰水期。

2.6 周丛藻类优势类群

从表 3 可见, 通过调查发现拉萨河下游周丛藻类主要优势类群为硅藻, 分别为钝脆杆藻、中型脆杆藻、长等片藻、中间异极藻、肘状针杆藻和长圆舟形藻等28个优势藻类, 分别设置编码如表 3 所示为(A1—A28)。从时空分布上看, 优势度≥0.02 的种类数最多为10种, 分别是阿郎乡和拉萨市的丰水期; 优势度≥0.02 的种类数最少为4种, 为达孜县的平水期(表 3)。其中前三优势种分别为肘状针杆藻、长等片藻和中型脆杆藻。

2.7 周丛藻类优势类群聚类相关性分析

为了深入了解拉萨河下游周丛藻类物种分布变化规律, 将周丛藻类优势类群分布数据进行聚类与Pearson相关性分析。结果显示: 枯水期先聚集6个小组群, 然后聚集为4个组群, 最后聚集为2个大组群, 分析结果显示6个小组群是具有正相关关系的藻类聚集在一起; 平水期先聚集6个小组群, 后聚集为5个组群, 最后聚集3个大组群, 相关性分析显示6个小组群是具有正相关关系的藻类聚集在一起; 丰水期先聚集7个小组群, 最后聚集3个大组群, 相关性分析显示7个小组群是具有正相关关系的藻类聚集在一起(图 6)。

2.8 周丛藻类优势类群与环境因子的关系

通过对周丛藻类的优势类群群落结构参数与环境指数进行典范对应分析(CCA), 结果如图 7 所示, 第一轴和第二轴对周丛藻类群落结构的累积贡献率分别为枯水期78.23%、平水期101.46%和丰水期73.07%。根据上述聚类分析结果将周丛藻类优势类群大致分为III类群(图 7), 分别显示该类群与

表 2 拉萨河下游周丛藻类生物参数

Tab. 2 Biological parameters of periphytic algae in the lower reaches of Lhasa River

采样点Station	Shannon-Wiener 多样性指数(H')			Pielou均匀度指数(J)			Margalef丰富度指数(D)		
	2	6	9	2	6	9	2	6	9
S1	2.98	3.78	4.57	0.75	0.79	0.86	0.80	1.61	2.02
S2	4.64	3.75	4.65	0.72	0.77	0.88	0.84	1.76	2.19
S3	3.17	3.78	4.91	0.78	0.94	0.85	0.82	1.13	2.86
S4	2.81	3.45	3.95	0.81	0.70	0.87	0.66	1.96	1.20
S5	2.19	2.95	2.63	0.61	0.68	0.71	0.60	1.05	0.69
S6	0.89	2.37	2.8	0.28	0.68	0.68	0.42	0.53	1.02
S7	1.92	4.06	3.99	0.52	0.8	0.77	0.56	2.05	1.86

表 3 拉萨河下游周丛藻类优势类群及优势度

Tab. 3 Dominant species and dominant degree of periphytic algae in the lower reaches of Lhasa River

藻Algae	S1			S2			S3			S4			S5			S6			S7			编号 No.
	2	6	9	2	6	9	2	6	9	2	6	9	2	6	9	2	6	9	2	6	9	
脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.										0.03												A1
钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	0.01		0.03	0.03			0.06	0.03		0.13				0.03					0.06	0.08		A2
中型脆杆藻 <i>Fragilaria intermedia</i>		0.02	0.03		0.03	0.06	0.06		0.03		0.04		0.17	0.11						0.14		A3
普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>	0.04	0.03								0.07	0.1					0.02						A4
长等片藻 <i>Diatom aelongatum</i>	0.13			0.08	0.05	0.04		0.03	0.02	0.07	0.03		0.20	0.24	0.02	0.29	0.02	0.08			0.07	A5
双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i>				0.03												0.02	0.02			0.03		A6
缢缩异极藻 <i>Gomphonema constrictum</i>																0.03						A7
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	0.02													0.08					0.05			A8
线形菱形藻 <i>Nitzschia linearis</i>												0.06			0.09		0.02			0.05		A9
埃伦桥弯藻 <i>Cymbella ehrenbergii</i>										0.05										0.07		A10
膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>	0.03		0.02	0.04	0.02		0.04										0.03					A11
偏肿桥弯藻 <i>C. ventricosa</i>							0.02															A12
卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>							0.03															A13
美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	0.02																					A14
纤细异极藻 <i>Gomphonema gracile</i>																			0.02		0.04	A15
中间异极藻 <i>Gomphonema intricatum</i>		0.04	0.02	0.05	0.03	0.04			0.02		0.06	0.16			0.02		0.02	0.04	0.02			A16
著名羽纹藻 <i>Pinnularia nobilis</i>		0.03	0.03						0.03													A17
放射针杆藻 <i>Synedra actinastroides</i>		0.03									0.03											A18
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>			0.04	0.03			0.04										0.03					A19
双头针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i>			0.03			0.03		0.03		0.03				0.03								A20
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	0.12	0.03	0.03	0.07	0.1	0.07	0.09	0.06	0.05	0.22	0.09	0.12	0.03		0.24		0.23	0.14	0.07		0.03	A21
变异直链藻 <i>Melosira varians</i>														0.02								A22
颗粒直链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>		0.07	0.05		0.05	0.05		0.06								0.04	0.11	0.04	0.05			A23
短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i>	0.02									0.04	0.07		0.03									A24
简单舟形藻 <i>Navicula simplex</i>	0.04		0.03			0.03		0.03		0.08	0.09	0.03			0.05		0.03		0.04	0.03		A25
系带舟形藻 <i>Navicula cincta</i>																			0.05			A26
长圆舟形藻 <i>Navicula oblonga</i>		0.03		0.16					0.02	0.03				0.03			0.06	0.08	0.05			A27
缢缩异极藻头状变种 <i>Gomphonema constrictum</i> var. <i>capitata</i>														0.03		0.03						A28
优势度 ≥ 0.02 的种类 Number of species with dominance ≥ 0.02	9	8	10	8	6	7	6	6	6	5	7	8	5	4	8	6	6	10	7	6	7	

某环境因子的相关性。枯水期第I类群与总氮(TN)和溶解氧(DO)呈正相关性; 第II类群与水温(WT)和电导率(CON)呈负相关性, 与总氮(TN)呈正相关性。第III类群与流速(Flo)呈负相关性, 水温(WT)和pH呈正相关性。平水期第I类群与水温(WT)和电导率(CON)呈负相关性, 与溶解氧(DO)呈正相关性。第II类群与总氮(TN)呈负相关性, 与流

速(Flo)和pH呈正相关性。第III类群与总氮(TN)、水温(WT)和电导率(CON)呈正相关性, 与流速(Flo)和pH呈负相关性。丰水期第I类群与pH呈较显著负相关性; 第II类群与总氮(TN)、水温(WT)和电导率(CON)呈负相关性, 与pH呈正相关性; 第

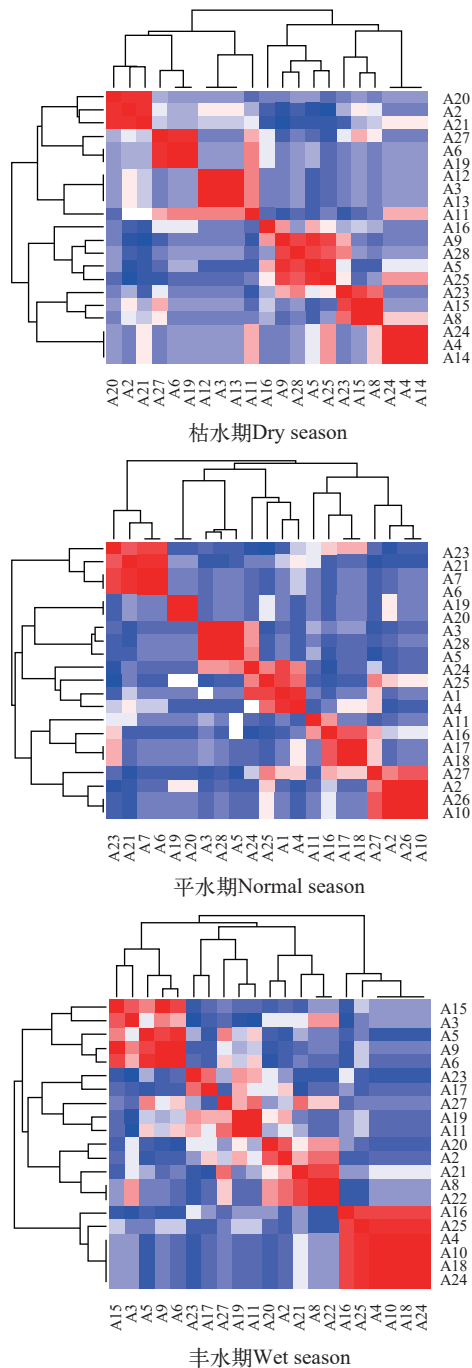


图6 周丛藻类优势类群聚类热图(红色为正相关关系、蓝色为负相关关系)

Fig. 6 Heat map of dominant algal clusters in periphytic algae (Red is positively correlated, blue is negatively correlated)

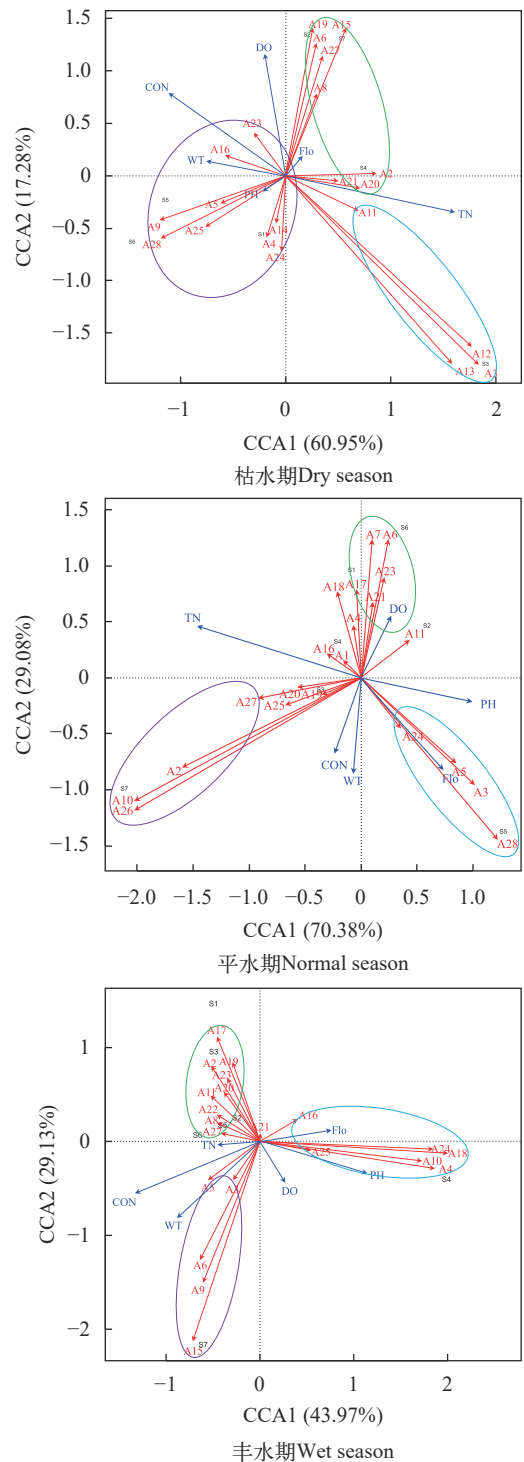


图7 周丛藻类优势类群与环境因子典范对应分析(CCA)

Fig. 7 Canonical Correspondence Analysis (CCA) between dominant species and environmental factors of periphytic algae

III类群与电导率(CON)和水温(WT)呈正相关性,与流速(Flo)呈负相关性。

3 讨论

3.1 周丛藻类群落结构时空动态及水质评价

从空间分布上看,拉萨河下游周丛藻类曲水县采样点丰度最高,其次是阿郎乡及其邻近采样点尼玛江热乡,即本研究设计的两端采样点藻类丰度较高,而中间区域采样点藻类丰度偏低,其中墨竹工卡县采样点(直孔电站下游)藻类丰度最低。导致此结果的主要原因可能跟直孔电站水库的建设有关,周丛藻类的丰度跟水温、流速、溶解氧和pH等环境因素有直接关联,人为活动尤其是采取河水截流等方式的各类水利工程直接对该河流水体理化因子发生变化,对周丛藻类丰度造成显著影响^[12, 23]。本文认为人为活动对周丛藻类的生长、繁殖也会造成较大影响;例如,拉萨市、达孜县等人口较密集的采样点周丛藻类生物量较低。尼玛江热乡藻类种类较多的主要原因可能跟直孔电站水库建设有关,该点位于直孔电站水库区,检测发现该点水流速度最低(0.03 m/s),水体营养物质的含量较高,该点总氮、总磷含量分别为1.29和0.17 mg/L(表1)。文献记载水体流速越高周丛藻类丰度越低,因为快速流动的水体会冲刷藻类,从而降低藻类的着生能力^[24, 25];孟顺龙等^[26]研究发现藻类细胞密度与水体氮磷含量呈正相关关系,与本研究结果相似。

本研究周丛藻类季节变化较明显,枯水期和丰水期的藻类丰度低于平水期,其中枯水期最低。其原因可能是枯水期为冬季,河流处于冰封期,光照强度较弱,藻类的光合作用受到了限制;此时水温达到全年最低,平均水温3.3℃(表1),可能有些喜光喜温物种消失。丰水期进入高原地区的雨季,气温上升的同时各大雪山迅速融化,水位上涨,洪水期到来,此时拉萨河水体泥沙含量升高,透明度降低,流速加快,藻类生长受到环境条件的限制。邓洪平等^[27]和韦丽丽等^[28]研究发现,河流流量大、流速快及洪水的冲刷作用不利于周丛藻类的附着。平水期高原地区属于春季,水温回暖,日照时间较长,水体透明度较高,比较适合周丛藻类生长。文献记载周丛藻类的生长与物理扰动、水体营养状况、光照、悬浮物、水温及水位变化等密切相关^[29]。

通过Shannon-Wiener指数(H')评价拉萨河下游水质状况, $0 < H' \leq 1$ 为重污染, $1 < H' \leq 2$ 为 α -中污型, $2 < H' \leq 3$ 为 β -中污型, $3 < H' \leq 4.5$ 为轻污染, $H' > 4.5$ 为清洁。评价结果如表4所示,结果显示丰水期水质状况最好,其次是平水期,枯水期水质状

况最差。从水质评价结果能看出,采样点上游水质优于下游,其中拉萨市采样点水质现状最差,此结果可能是导致该点生物多样性最少的原因(图4),周年藻类调查中发现该点只出现了硅藻门藻类。水质评价结果能够再次证明拉萨河流域受人为干扰比较明显,人口稀少的上游3个采样点水质状况为轻度污染-清洁过度,人口较密集的直孔电站以下4个采样点水质状况主要为轻度污染-中污型过度。

3.2 周丛藻类群落结构与环境因子的关系

通过对周丛藻类群落结构参数与环境指数的典范对应分析显示,水温(WT)、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)、电导率(CON)、流速(Flo)和总氮(TN)等环境因素对周丛藻类群落结构产生的影响较显著(图7),该结果与国内其他河流研究结果相似^[30-33]。溶解氧是水生植物生理活动的重要环境因素,生物需要氧气维持生命活动,水体中溶解氧的含量决定着周丛藻类的丰度^[34]。本研究结果显示平水期和丰水期周丛藻类两个类群与溶解氧含量呈显著正相关,表明溶解氧含量越高周丛藻类丰度越高。但是枯水期周丛藻类第二类群与溶解氧含量呈显著负相关,本文认为导致此结果的原因可能跟冬季水面冰封有关,水面冰封后水体光照强度减弱,从而降低藻类进行光合作用释放氧气的的能力。

文献记载在水体磷含量较高时,藻类的生长速率与总氮(TN)含量呈正相关^[35]。孟顺龙等^[26]研究发现藻类细胞密度与水体氮磷含量呈正相关关系,本研究结果显示3个水期的周丛藻类第一类群与总氮含量呈较显著正相关性,与其他研究结果一致。本文认为这可能跟高原河流特殊性有关,本次调查发现拉萨河下游生物参数和环境参数均偏低,属于贫营养型水体,这种比较极端环境的高原水体中氮磷等营养盐含量越高可能对藻类的生长越有益。

研究表明pH为水体中重要的环境因子,对水生生物群落组成方面起着较大的影响,随着水体pH的改变水生生物的生理生化也受到不同程度的变化,

表4 拉萨河下游水质评价结果

Tab. 4 Results of water quality assessment in the lower reaches of Lhasa River

采样点 Station	枯水期Dry season	平水期Normal season	丰水期Wet season
S1	β -中污型	轻度污染	清洁
S2	清洁	轻度污染	清洁
S3	轻度污染	轻度污染	清洁
S4	β -中污型	轻度污染	轻度污染
S5	β -中污型	β -中污型	β -中污型
S6	重污型	β -中污型	β -中污型
S7	α -中污型	轻度污染	轻度污染

pH还可以与水体其他环境因子同时作用于水生生物^[36, 37]。本研究结果显示大部分周丛藻类群落参数与水体pH呈负相关性, 其中丰水期第一类群与pH呈显著负相关性, 这可能跟拉萨河下游水体偏碱性有一定的关系, 全年pH为8.40—8.71。

本研究发现流速较低的采样点曲水县(0.13 m/s)和尼玛江热乡(0.03 m/s)周丛藻类密度较高。典范对应分析结果显示全年大部分周丛藻类优势种与流速呈负相关, 其中第三类群与流速呈较显著负相关关系。据文献记载水体流速与周丛藻类的生物量呈负相关性, 因为水体的流速会冲刷藻类, 从而降低周丛藻类的固着能力^[24, 25], 对周丛藻类生长影响较大^[27, 28], 与本研究结果相似。

通过典范对应分析显示大部分周丛藻类优势种与水温呈较显著负相关性, 导致此结果的原因可能是拉萨河流域周丛藻类主要优势类群为硅藻, 硅藻属于喜低温物种^[28]。这与马宝珊等^[12]研究雅砻江的周丛藻类时发现部分硅藻的密度与海拔呈正相关关系相似, 因为正常情况下海拔越高水温越低^[1], 即部分硅藻密度与海拔呈正相关性。邓洪平等^[27]和郑凌凌等^[30]研究指出硅藻喜低温物种, 在温度较低的季节大量繁殖。

河流的上游到下游存在一定的海拔落差, 但本研究显示拉萨河下游海拔与生物参数没有形成显著关系。而相关研究表明, 不同高度水域的非生物因子存在差异, 同时对水生生物产生的影响程度也不一样^[38]。本文认为海拔可能不同地域的研究结果才能显示其对生物群落影响程度。

4 结论

本次调查一共监测到拉萨河下游周丛藻类7门53属104种, 主要优势类群为硅藻门; 拉萨河下游周丛藻类生物量空间分布为S7>S3>S6>S1>S2>S5>S4; 拉萨河下游周丛藻类丰度时间分布为平水期>丰水期>枯水期。水质评价结果为人口稀少的上游3个采样点水质状况为轻度污染-清洁过度, 人口较密集的下游4个采样点水质状况为轻度污染-中污型过度。通过对周丛藻类群落参数与环境参数的典范对应分析显示, 大部分周丛藻类优势种与水温、流速和pH呈负相关性, 与总氮、溶解氧、电导率呈正相关性。

参考文献:

[1] Jun S, Wang D B, Zhou J H, *et al.* Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 787-798. [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其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 787-798.]

[2] Chen X, Jin T T, Su H D, *et al.* Construction and application of health assessment index system for Lhasa River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 799-809. [陈歆, 靳甜甜, 苏辉东, 等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 799-809.]

[3] Wei J W, Li H R, Wang X Z, *et al.* Structure characteristics and driving variables of epilithic algae community in Lhasa River Basin of Qinghai- Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1879-1888. [魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 等. 青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1879-1888.]

[4] Hauer F R, Lamberti G A. *Methods in Stream Ecology* [M]. Amsterdam: Academic Press, 2006: 107- 119.

[5] Azim M E, Beveridge M, Dam A, *et al.* *Periphyton and Aquatic Production: an Introduction* [M]. CAB International, 2005.

[6] Ma B S. Study on the biology and population dynamics of *Schizothorax o'connori* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011: 7-17. [马宝珊. 异齿裂腹鱼个体生物学和种群动态研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 7-17.]

[7] Wang N L, Yao T D, Xu B Q, *et al.* Spatial and temporal patterns, trends and impacts of glacier changes in the Tibetan Plateau and its surrounding areas under the background of global warming [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, **34**(11): 1220-1232.]

[8] Stevenson R J. *An Introduction to Algal Ecology in Freshwater Benthic Habitats* [M]. Algal Ecology. Amsterdam: Academic Press, 1996: 3-30.

[9] Wang X L, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 431-440. [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 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 431-440.]

[10] Hu J C, Song Z B, Zhou J C, *et al.* Comparative study on planktonic and periphytic algal community patterns and their relationships with environmental variables in the upper reaches of the Jinsha River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 590-599. [胡建成, 宋志斌, 周佳诚, 等. 金沙江上段浮游藻类和着生藻类群落格局及其与环境因子的关系比较研究 [J]. *生态学报*, 2022, **42**(2): 590-599.]

[11] Hu Y X, Cao L, Qu R C, *et al.* Community composition and assessment on the aquatic ecosystem of periphytic algae in the Yangtze River basin [J]. *Environmental Science*: 1-15[2022-02-24]. DOI: 10.13227/j.hjlx.202111229. [胡愈妍, 曹亮, 屈仁超, 等. 长江流域着生藻类群落结构的时空格局及其生态评价 [J/OL]. *环境科学*: 1-15[2022-02-24]. DOI: 10.13227/j.hjlx.202111229.]

- [12] Ma B S, Wei K J, Xu J, *et al.* Diversity and spatial distribution of periphytic algae in the lower reaches of Yalong River and its main tributary Anning River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, **28**(12): 1602-1611. [马宝珊, 魏开金, 徐进, 等. 雅砻江下游及其主要支流安宁河着生藻类多样性与空间分布 [J]. 中国水产科学, 2021, **28**(12): 1602-1611.]
- [13] Xiao X N, Zhang M, Feng B, *et al.* Algal community structure and its relationship with water environmental factors in Ganjiang River Basin during wet season [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(04): 900-910. [肖妮娜, 张萌, 冯兵, 等. 丰水期赣江流域着生藻类群落结构及其与水环境因子的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(04): 900-910.]
- [14] Hu J C, Guo S H, Tang T, *et al.* Using benthic diatom-based multi-metric indices to assess ecological conditions of the Chishui River [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(3): 94-104. [胡建成, 郭姝含, 唐涛, 等. 基于着生硅藻多参数指标评价赤水河生态状况 [J]. 中国环境监测, 2020, **36**(3): 94-104.]
- [15] Bu D, Xu Z Y, Wu J Z X, *et al.* Study on the impact of mineral processing plant on environment in Lhasa river catchments [J]. *Journal of Tibet University (Natural Science Edition)*, 2009, **24**(2): 33-38. [布多, 许祖银, 吴坚扎西, 等. 拉萨河流域选矿厂分布及其对环境的影响 [J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2009, **24**(2): 33-38.]
- [16] Chen L, Wang D B, Jun S, *et al.* Macroinvertebrate community structure and relationships with environmental factors in the Lhasa River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 757-769. [陈丽, 王东波, 君珊, 等. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2019, **39**(3): 757-769.]
- [17] Li B B. Study on the periphytic algal and evaluation of the river ecological integrity in downstream of Jialing River [D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 13-14. [李斌斌. 嘉陵江下游周丛藻类调查及河流生态完整性评价 [D]. 重庆: 西南大学, 2017: 13-14.]
- [18] Hu H J, Wei Y X eds. *Freshwater Algae- systems, Classification and Ecology in China* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 1-1023. [胡鸿钧, 魏印心等. 中国淡水藻类: 系统分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 9-478.]
- [19] Zhu H Z, Chen K Y. *Diatoms in Xizang, China* [M]. Beijing: Science Press, 2000. [朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 87-341.]
- [20] Zhou F X, Chen J H. *Atlas of Freshwater Microflora (Second Edition)*. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 54-180. [周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 54-180.]
- [21] State Environmental Protection Administration. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods (Fourth Edition)* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 24-780. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 24-780.]
- [22] Ba S, Yang X L, Huang X, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship of water quality in spring and summer at the lower reach of the Lhasa River [J]. *Plateau Science Research*, 2017, **1**(1): 35-48. [巴桑, 杨欣兰, 黄香, 等. 拉萨河下游春、夏季浮游植物群落特征与水质评价 [J]. 高原科学研究, 2017, **1**(1): 35-48.]
- [23] Zhu Y X, Mi W J, Li B, *et al.* The influences of two hydraulic structures on periphytic algal communities in the middle channel of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4): 817-825. [朱宇轩, 米武娟, 李波, 等. 南水北调中线干渠两个水工构筑物对着生藻类群落的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(4): 817-825.]
- [24] Townsend S A, Douglas M M. Benthic algal resilience to frequent wet-season storm flows in low-order streams in the Australian Tropical Savanna [J]. *Freshwater Science*, 2014, **33**(4): 1030-1042.
- [25] Burrows R M, Beesley L, Douglas M M, *et al.* Water velocity and groundwater upwelling influence benthic algal biomass in a sandy tropical river: implications for water-resource development [J]. *Hydrobiologia*, 2020, **847**(5): 1207-1219.
- [26] Meng S L, Wang J, Qiu L P, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus mass concentrations on the growth and competition of *Chlorella vulgaris* and *Anabaena* sp. strain PCC [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(4): 658-664. [孟顺龙, 王菁, 裴丽萍, 等. 氮磷质量浓度对普通小球藻和鱼腥藻生长竞争的影响 [J]. 生态环境学报, 2015, **24**(4): 658-664.]
- [27] Deng H P, Chen F, Wang M S, *et al.* Community structure and species diversity of diatoms in downstream of Jialing River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(2): 330-335. [邓洪平, 陈锋, 王明书, 等. 嘉陵江下游硅藻群落结构及物种多样性研究 [J]. 水生生物学报, 2010, **34**(2): 330-335.]
- [28] Wei L L, Zhou Q, Xie C X, *et al.* Community structure of periphyton and biological assessment of water quality in the Yili River, Xinjiang Uyghur Autonomous Region [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(6): 29-38. [韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 新疆伊犁河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价 [J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(6): 29-38.]
- [29] Chen C J, Han Z Y, Zhu Y M, *et al.* Periphyton and its application in water Purification [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(11): 2820-2826. [陈重军, 韩志英, 朱荫涓, 等. 周丛藻类及其在水质净化中的应用 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(11): 2820-2826.]
- [30] Schneider S C, Kahlert M, Kelly M G. Interactions between pH and nutrients on benthic algae in streams and consequences for ecological status assessment and species richness patterns [J]. *Science of the Total Environment*, 2013(444): 73-84.
- [31] Soininen J. Assessing the current related heterogeneity and diversity patterns of benthic diatom communities in a

- turbid and a clear water river [J]. *Aquatic Ecology*, 2004, **38**(4): 495-501.
- [32] Taniwaki R H, Matthaei C D, Cardoso T K M, *et al.* The effect of agriculture on the seasonal dynamics and functional diversity of benthic biofilm in tropical headwater streams [J]. *Biotropica*, 2019, **51**(1): 18-27.
- [33] Myrstener M, Rocher- Ros G, Burrows R M, *et al.* Persistent nitrogen limitation of stream biofilm communities along climate gradients in the Arctic [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(8): 3680-3691.
- [34] Liu Y L, Ge J W, Li Y Y, *et al.* Correlations between the volume of dominant periphytic algae species and the water quality parameters in Gufu River [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2182-2191. [刘奕伶, 葛继稳, 李艳元, 等. 古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2182-2191.]
- [35] Wang J. Effects of nitrogen and phosphorus nutrients on the growth of *Microcystis aeruginosa* of different water sources [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. [王静. 不同水源条件下氮磷营养物对铜绿微囊藻生长的影响研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.]
- [36] Mirzahasanlou J P, Ramezanpour Z, Nejdassattari T, *et al.* Temporal and spatial distribution of diatom assemblages and their relationship with environmental factors in Balikhli River (NW Iran) [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2020, **20**(1): 102-111.
- [37] Shi F N, Yang H, Liu X W, *et al.* Spatial- temporal distribution of phytoplankton in Waihai of Dianchi Lake and its nonlinear correlation analysis with environmental factors [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(7): 1070-1079. [施凤宁, 阳辉, 刘湘伟, 等. 滇池外海藻类时空分布及其与环境因素间非线性相关分析 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(7): 1070-1079.]
- [38] Jiang X M, Xiong J, Xie Z C, *et al.* Longitudinal patterns of macroinvertebrate functional feeding groups in a Chinese river system: A test for river continuum concept (RCC) [J]. *Quaternary International*, 2011(244): 289-295.

PERIPHYTIC ALGAE COMMUNITY STRUCTURE AND RELATIONSHIP TO ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE LOWER REACHES OF LHASA RIVER

TA SHILHAMO, ZHANG Chi and WANG Wan-Liang

(Institute of Fisheries Science, Tibet; Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

Abstract: To understand the spatial and temporal dynamics of periphytic algae colony structure and its relationship with environmental factors in the lower reaches of Lhasa River in Tibet Autonomous Region, artificial matrix method was used to investigate the Periphytic algae community structure in the lower reaches of Lhasa River in February (dry season), June (normal season) and September (wet season). Results showed that 104 species belonging to 53 genera and 7 phyla of periplexus were identified, 28 species belonging to diatoms with dominance ≥ 0.02 . The first three dominant species were *Synedra ulna*, *Diatom aelongatum* and *Fragilaria intermedia*. The average annual biomass was 0.047 mg/cm^2 , and the highest was found in Qushui County (0.121 mg/cm^2), followed by Nimajiangre Township (0.052 mg/cm^2) and Lhasa City (0.04 mg/cm^2), and the lowest was found in Mozhugongka County (0.015 mg/cm^2). The spatial distribution of Periphytic algae biomass in the lower reaches of Lhasa River were Qushui County>Nimajiangre Township>Lhasa City>Alang Township>Zhaxue Township>Dazi County>Mozhugongka county. The temporal distribution of Periphytic algae abundance in the lower reaches of Lhasa River was as follows: normal season>wet season>dry season. The water quality assessment results showed that the water quality of the three sampling points in the upstream was slightly polluted to clean, and the water quality of the four sampling points in the downstream was slightly to moderately over polluted. The canonical correspondence analysis of periphyton community parameters and environmental parameters showed that most dominant species of periphyton were negatively correlated with water temperature, flow rate and pH, and positively correlated with total nitrogen, dissolved oxygen and electrical conductivity. The results of this survey provided the basic data for the conservation and scientific utilization of aquatic biodiversity in Lhasa River basin, Tibet Autonomous Region.

Key words: Lhasa River; Periphytic algae; Specific composition; Temporal and spatial variation