

苏文杭, 闫龙, 王海龙, 等. 雅砻江干流着生藻类群落特征及生态位分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 41-53. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.004

SU Wenhong, YAN Long, WANG Hailong, et al. Characteristics and niche analysis of periphyton communities in mainstream of Yalong River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 41-53. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.004

雅砻江干流着生藻类群落特征及生态位分析

苏文杭¹, 闫龙², 王海龙¹, 胡鹏², 胡龔航³, 李鑫雨²

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:【目的】为调查雅砻江干流全流域着生藻类的群落现状及其在雅砻江不同江段中的群落差异,【方法】基于2023年5月对雅砻江干流29个断面着生藻类的采样调查,结合生境评价分析不同江段着生藻类群落结构特征变化及优势种生态位,并利用RDA以及Pearson相关性分析优势种对环境因子的响应。【结果】结果显示:共采集到着生藻类96种,硅藻门占比89.6%;上游江段着生藻类种类数共7种,细胞密度平均为4 296.3 cells/cm²,优势物种优势度平均,优势物种生态位宽度在1.35~2.05之间,生态位重叠程度为0.628,显著优于中下游生境较好江段和中下游生境较差江段,表明上游江段因未受建坝影响,其着生藻类群落组成更加稳定,种间竞争更小,对环境的利用能力更强。RDA及Pearson分析结果显示,着生藻类优势物种与氨氮、电导率、总碳、溶解性总硅以及硝酸铵盐呈正相关关系,与溶解氧、水温以及溶解性总碳呈现负相关关系。【结论】研究表明:雅砻江中下游水电站的建设对于部分环境因子产生影响,从而使干流不同江段的着生藻类群落特征产生较大的差异。研究成果对雅砻江水生态保护修复具有参考价值。

关键词: 着生藻类; 生态位宽度; 水环境; 环境因子; 气候影响; 影响因素; 雅砻江

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV214

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0041-13



与作者互动
听语音·聊科研

Characteristics and niche analysis of periphyton communities in mainstream of Yalong River

SU Wenhong¹, YAN Long², WANG Hailong¹, HU Peng², HU Yanhang³, LI Xinyu²

(1. College of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: [Objective] To investigate the current status of periphyton communities across the entire mainstream of the Yalong River and the community differences among different river sections. [Methods] Based on a sampling survey of periphyton in 29

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-08-15; 录用日期: 2024-08-21; 网络出版日期: 2024-08-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202003, 2022YFC3205000, 2021YFC3200202); 国家优秀青年科学基金(52122902); 水生态安全保障人才创新团队项目(WR0145B022021)

作者简介: 苏文杭(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wenhang_su@163.com

通信作者: 闫龙(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yanlong@iwahr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

cross-sections of the Yalong River mainstream in May 2023, combined with habitat evaluation, the variations in periphyton community structure and the ecological niches of dominant species across different river sections were analyzed. Redundancy analysis (RDA) and Pearson correlation analysis were used to examine the responses of dominant species to environmental factors. [Results]The result showed that a total of 96 species of periphyton were collected, with Bacillariophyta accounting for 89.6%. In the upper reaches, 77 species were identified, with an average cell density of 4 296.3 cells/cm². The dominance of dominant species was relatively balanced, with niche width ranging from 1.35 to 2.05 and niche overlap at 0.628, significantly higher than those in both the better and poorer habitat sections of the middle and lower reaches. This indicated that the upper reaches, unaffected by dam construction, exhibited a more stable composition of periphyton communities, lower interspecies competition, and stronger ability to utilize environmental resources. The RDA and Pearson analysis result showed that the dominant species of periphyton were positively correlated with ammonia nitrogen, conductivity, total carbon, dissolved total silicon, and ammonium nitrate, but negatively correlated with dissolved oxygen, water temperature, and dissolved total carbon. [Conclusion]It has been demonstrated that the construction of hydropower stations in the middle and lower reaches of the Yalong River affects certain environmental factors, leading to significant differences in the characteristics of periphyton communities across different river sections. The findings provide a reference for aquatic ecological conservation and restoration in the Yalong River.

Keywords: periphyton; niche width; water environment; environmental factor; climate impact; influence factor; Yalong River

0 引言

河流中水生生物对于河流生境的变化非常敏感, 水体当中的营养物质、温度以及理化性质的改变都潜移默化地作用于生活在水中的生物^[1-4]。着生藻类作为一种栖息地较为固定的水生生物^[5-6], 居于食物链的末端, 生活周期短, 对于环境变化敏感, 常常作为河流环境变化的指示生物^[7], 很多学者通过一些特殊区域的着生藻类群落特征来分析人类活动对于河流产生的影响^[8-9]。但在许多河流中, 不同河段的生境变化较为多样, 包括温度、海拔、以及人类活动的影响等^[4-11]。尤其对于高山河流, 河段的差异更为显著, 一般来说, 高山河流的上游区域高程落差大、流速快, 并且人类活动较少; 而中下游区域人类活动强度更高, 且水动力条件、水温以及化学因子相对于上游区域有较大差异^[12-14]。这些环境因子的变化影响着生藻类的多样性以及丰度, 在这些复杂因素的影响下将难以判断着生藻类对于人类活动或是自然环境改变的响应, 因此识别着生藻类对于复杂因素干扰的响应差异对于利用着生藻类判断人类活动影响有着重要意义。

要区分出着生藻类对于人类活动的响应, 就需要明确着生藻类受到不同环境变化时产生的响应。对于水体温度的变化响应上, CÁSSIA^[15]发现水体温度的上升会使着生硅藻的丰富度产生显著降低; 马宝珊等^[16]通过在安宁河采样发现大部分着生藻类与温度呈负相关, 而极少数藻类与水温呈正相关。对于河流流速的响应上, OWEN^[9]通过在加利福尼亚州的鳗鱼

河的采样分析, 认为在静水时着生藻类的丰度相对于流水状态下要更高。而在坝下河段, 着生藻类的响应则呈现为更加复杂的响应情况, NATAŠA^[17]通过对 23 座水坝中栖息于不同生境条件的着生藻类进行采样分析, 发现频繁的水利干扰对着生藻类的物种多样性以及丰富度产生了显著的负面影响; 贾兴焕^[8]通过对比自然河段与坝下着生藻类的群落差异, 发现电站的运行会使河流中着生藻类的优势物种发生变异, 坝下河段的着生藻类丰富度相对更高, 而多样性无显著差异。因此在前人的研究基础上, 就同一条河流的着生藻群落差异, 可以分析出河流不同河段的环境差异。通过筛选优势物种可以区分不同区域的主要物种组成, 不同的优势物种可以反映不同区域的特点^[18-19], 同时分析其生态位情况可以判别在河流的不同区域着生藻类对于环境的适应状况^[20-21], 以此判别着生藻类对于气候环境变化的响应。在此基础上, 不同的着生藻类对于特定环境因子的响应则可以分析得到特定外界干扰对于河流的影响, 为河流健康评价做出指导。

本次研究选择雅砻江作为研究区, 雅砻江为金沙江的第一大支流, 纬度跨度大, 海拔气候差异明显且下游水电开发强烈, 水电开发所导致的河流生境剧烈变化, 以及大坝对于河流水量调控与营养物质运移的影响对于下游水电开发区域的水生生物产生了巨大的影响, 建坝之后的生物群落与建坝以前产生了显著的差异^[22-23], 同时雅砻江的上游热巴至两河口段还规划作为南水北调西线的潜在水源区^[24], 长远来看, 对上游区域进行调水同样会使河流的生态状况产生剧

烈变化。现有雅砻江的研究中多集中在锦屏大河湾等受水电开发影响的河段, 缺少对全流域的调查研究。因此本文拟针对不同海拔、气候以及生境类型, 在雅砻江干流进行系统采样, 明确在雅砻江不同河段中着生藻类的群落差异并对其优势物种及生态位特征进行分析, 通过 RDA 与 Pearson 相关性分析研究着生藻类群落演替的主要影响因素, 为进一步的调水规划以及生态修复提供支撑。

1 研究区概况

雅砻江发源于巴颜喀拉山南麓位于青藏高原东部, 地理位置介于 $96^{\circ}52'E-102^{\circ}48'E$ 、 $26^{\circ}32'N-33^{\circ}58'N$ 之间(见图 1), 干流全长 1 571 km, 天然落差 3 830 m, 年径流量 609 亿 m^3 。雅砻江流域多年平均降雨量为 500~2 470 mm, 由北向南递增的同时, 自西向东递增。得益于其丰富的水能资源, 雅砻江规划建设的水电站数量达到 21 座, 其中, 上游 10 座水

电站, 中游 6 座水电站, 下游 5 座水电站。目前已建成水电站 7 站, 卡拉和孟底沟 2 座水电站正在建设, 均分布于中下游, 上游水电站均属于规划阶段。此外, 南水北调西线工程也规划从上游的热巴和两河口河段进行调水。因此现状下雅砻江上游处于较少人类干扰的天然状态, 但是未来上游水电站建设完毕并开始调水时, 上游河段将会受到强烈的人类干扰。

2 研究方法

2.1 野外采样

2.1.1 采样点分布

本次研究于 2023 年 5 月份对雅砻江上游源头至下游河口进行采样, 共布设 29 个采样点。采样点均分布于雅砻江的干流, 部分采样点位于规划水电站的坝址处, 具体的采样点分布如图 1 所示。

2.1.2 环境因子监测

在采样现场使用水质仪(YSI)对于采样点现场的

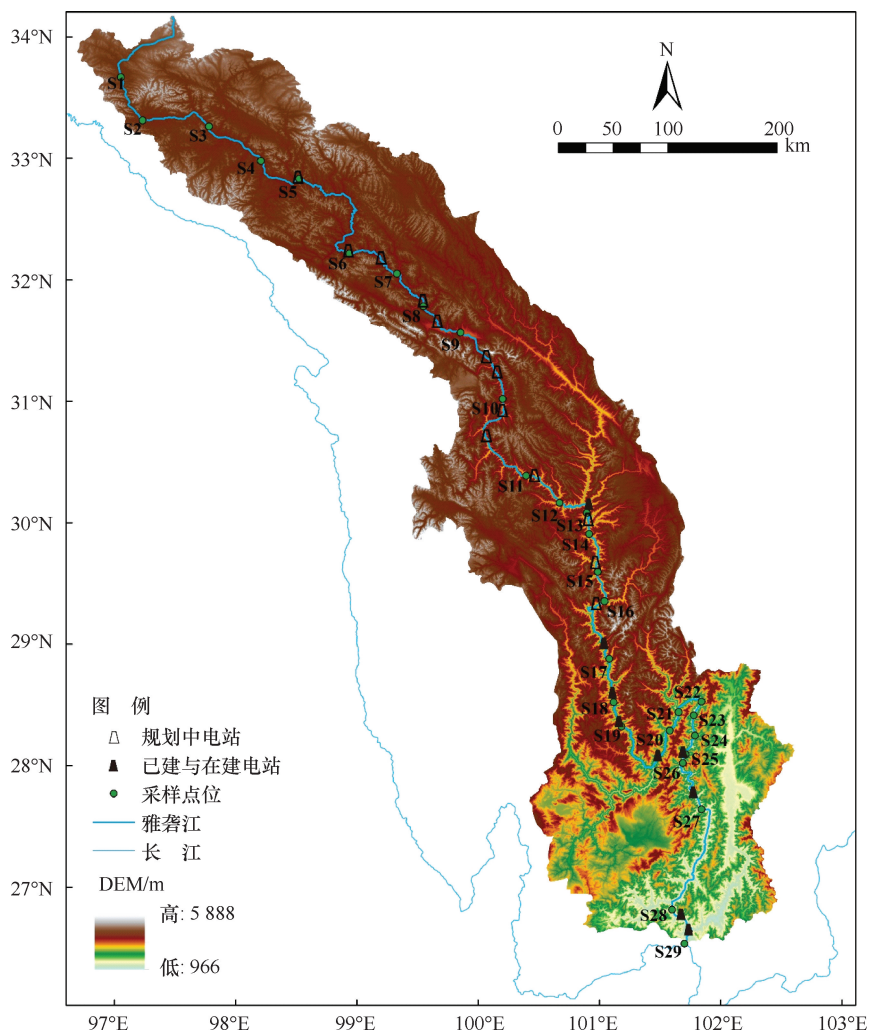


图 1 雅砻江地理概况及水电开发现状

Fig. 1 Geographical overview and hydropower development status of Yalong River

水温、水体电导率、pH、叶绿素含量进行监测; 另外采集 1 L 水样送至实验室检测水样的总氮、溶解性总氮、亚硝酸盐氮、氨氮、总磷、溶解性总磷、溶解性磷酸盐、硝酸盐氮、全硅、溶解性总硅、总碳以及溶解性总碳。

2.1.3 着生藻类采集

在采样点内上下 100 m 范围内, 挑选 4 块位于不同水深、流速的石块, 用边长 5 cm 的正方形塑料片盖住, 刷除其余部分着生藻, 将方形片区域内的着生藻刷入白瓷盘中, 最后移至采样瓶内, 加入鲁哥试剂送至实验室进行检测。

2.2 数据分析

由于雅砻江上中下游的差异性较大, 并且不同河段受外界干扰的程度也不尽相同, 因此, 本研究参照雅砻江的上中下游划分以及生境评价将雅砻江干流分为三个部分进行研究分析, 分别分为上游、中下游生境较好江段以及中下游生境较差江段。生境评价的方法参照前人研究^[25], 对采样点河段的底质、栖息地复杂性、流速及水深的结合特性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型 10 个指标进行评价, 对于每一个指标进行评价, 每一项满分为 20。生境评价总得分大于 150 认定为优; 总分低于 150 大于 120 认定为良; 低于 120 大于 90 认定为中; 低于 90 大于 60 为差; 低于 60 为劣。通过对于每个采样点进行评价, 最后分类的结果如表 1 所列, 雅砻江上游河段生境全为良, 在中下游的 20 个断面中 8 个为良、12 个为中, 与前人在雅砻江的研究结果一致^[26], 因此将生境评价低于 120 分的河段视为生境较差河段。

表 1 雅砻江河段的划分

Table 1 Division of Yalong River sections

上 游	生境评价	中下游生境较好	生境评价	中下游生境较差	生境评价
S1	130	S10	133	S11	117
S2	132	S13	145	S12	111
S3	138	S14	147	S17	111
S4	137	S15	148	S18	116
S5	149	S16	143	S19	100
S6	148	S22	147	S20	112
S7	149	S23	148	S21	114
S8	148	S25	141	S24	118
S9	138			S26	106
				S27	120
				S28	103
				S29	116

本文采用 Mcnaughton 优势度指数来判定优势种的组成, 选取 Mcnaughton 优势度指数(Y) >0.02 的藻类为优势种^[27-28]; 对优势物种的生态位宽度(B_i)、生态位重叠指数(O_{ik})进行计算, 其中生态位宽度采用 Shannon 生态位宽度计算; 通过 Levins 生态位重叠指数计算各个物种生态位重叠情况, 计算公式为

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

$$B_i = - \sum_{j=1}^r (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (2)$$

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sum_{j=1}^r (P_{ij})^2} \quad (3)$$

式中, n_i 为物种 i 的丰度; N 为所有物种的总丰度; f_i 为物种 i 出现的频率; P_{ij} 为物种 i 在样方 j 的多度。

在对各个江段着生藻优势物种的生态位宽度分析完毕之后, 通过聚类分析将各个江段的优势物种分为三类, 分别为广生态位物种、中生态位物种以及狭生态位物种。

通过 RDA (Redundancy Analysis) 冗余分析, 研究各个江段中优势物种对于环境因子的响应, 所挑选的环境因子经过 Pearson 相关性分析(剔除相关系数 >0.9 的环境因子), 且除 pH 的环境因子以及着生藻类密度均以 $\lg(x+1)$ 进行对数变换。分析过程中以着生藻类的密度作为因变量, 环境因子作为自变量, RDA 分析过程于 Canoco 5 软件当中完成。通过 IBM SPSS Statistics 26 软件完成干流优势物种与主要影响环境因子的 Pearson 相关性分析。

3 结果分析

3.1 采样点环境因子概况

水环境监测结果如表 2 所列, 上游区域的电导率、总氮、溶解性总氮、硝酸盐氮以及总碳要明显高于中下游江段, 而中下游的溶解氧、氨氮、全硅以及溶解性总碳要高于上游, 其中中下游生境较差的江段溶解氧要高于生境较好的江段; 此外, 中下游生境较差江段的叶绿素含量要明显高于其他江段, 溶解性总磷相较于其他区域更低。

3.2 着生藻类的群落组成

本次调查共采集到着生藻类 96 种, 隶属于 4 门 6 纲 14 目 27 科 41 属。其中以硅藻门占绝对优势, 共 86 种, 占比 89.6%; 蓝藻门 6 种, 占比 6.3%; 绿藻门 3 种, 占比 3.1%; 黄藻门 1 种, 占比 1%。其中

表 2 采样点环境因子均值以及范围

Table 2 Mean values and ranges of environmental factors at sampling points

环境因子	上游	中下游生境较好	中下游生境较差
水温 WT/℃	7.67(2.20~11.50)	13.66(10.10~17.60)	15.83(10.80~23.60)
溶解氧 DO/mg · L ⁻¹	6.21(5.45~7.04)	6.76(6.40~7.26)	7.03(6.52~7.40)
电导率 SPC/μs · cm ⁻¹	475.36(381.90~593.00)	304.14(220.80~378.30)	314.70(278.50~358.30)
酸碱度 pH	8.81(8.63~9.02)	8.77(8.64~8.90)	8.73(8.62~8.91)
叶绿素/μg · L ⁻¹	0.77(0.09~1.68)	0.45(0.17~1.12)	1.20(0.07~4.96)
总氮 TN/mg · L ⁻¹	0.74(0.48~0.95)	0.65(0.51~0.86)	0.64(0.47~0.84)
溶解性总氮 DIS-N/mg · L ⁻¹	0.70(0.45~0.92)	0.51(0.36~0.63)	0.49(0.30~0.62)
氨氮 NH ₃ -N/mg · L ⁻¹	0.05(0.03~0.06)	0.07(0.03~0.12)	0.09(0.04~0.16)
硝酸铵盐 NO ₃ -NH ₄ /mg · L ⁻¹	0.54(0.31~0.76)	0.34(0.3~0.46)	0.29(0.22~0.39)
总磷 TP/mg · L ⁻¹	0.010(0.005~0.020)	0.01(0.003~0.020)	0.02(0.004~0.080)
溶解性总磷 DIS-P/mg · L ⁻¹	0.008(0.004~0.010)	0.009(0.003~0.020)	0.020(0.003~0.060)
全硅 Si/mg · L ⁻¹	2.98(2.52~3.45)	3.4(2.93~3.61)	3.18(1.24~3.56)
溶解性硅 DIS-Si/mg · L ⁻¹	0.72(0.20~1.20)	0.40(0.36~0.43)	0.39(0.35~0.41)
总碳 C/mg · L ⁻¹	49.51(38.43~60.69)	35.80(31.72~40.12)	36.32(32.36~40.25)
溶解性总碳 DIS-C/mg · L ⁻¹	1.45(0.70~2.01)	4.45(3.61~5.11)	5.02(3.76~6.48)

上游着生藻类物种数共 77 种, 着生藻细胞密度平均为 4 296.3 cells/cm², 中下游生境较好江段采集着生藻类物种数共 72 种着生藻细胞密度平均为 1 942.3 cells/cm², 中下游生境较差江段采集着生藻物种数共 68 种, 着生藻细胞密度平均为 557.6 cells/cm²。在中下游生境较好的江段中, 14、15 号样点的细胞密度相对于该江段其他采样点较高, 12、21、29 号等位于库区和坝下日水位变幅剧烈的采样点的着生藻类种类数相对较低。总体来说, 着生藻类细胞密度在雅砻江的上游江段较高, 中下游生境较好的江段中着生藻类物种数以及着生藻密度平均高于生境较差的江段。生藻类密度及种类分布情况如图 2 所示。

通过对于不同江段物种优势度的计算, 筛选优势度大于 0.02 的物种, 结果如表 3 所列。不同江段的优势物种均为硅藻, 总的优势物种有 12 种, 属于脆杆藻属、等片藻属、舟形藻属以及桥弯藻属; 其中, 上游的优势物种种类最多达到 11 种, 中下游生境较好与较差江段分别为 5 种与 6 种, 并且中下游的优势物种与上游的优势物种基本重叠, 除中下游生境较差江段中的系带舟形藻外, 其他优势物种均被上游江段包含在内。普通等片藻、膨大曲壳藻、线形曲壳藻以及短小曲壳藻在雅砻江全江段均为优势物种; 中型等片藻、微型舟形藻、膨胀桥弯藻和优美桥弯藻只在上游江段为优势物种; 系带舟形藻只在中下游生境较差江段为优势物种。

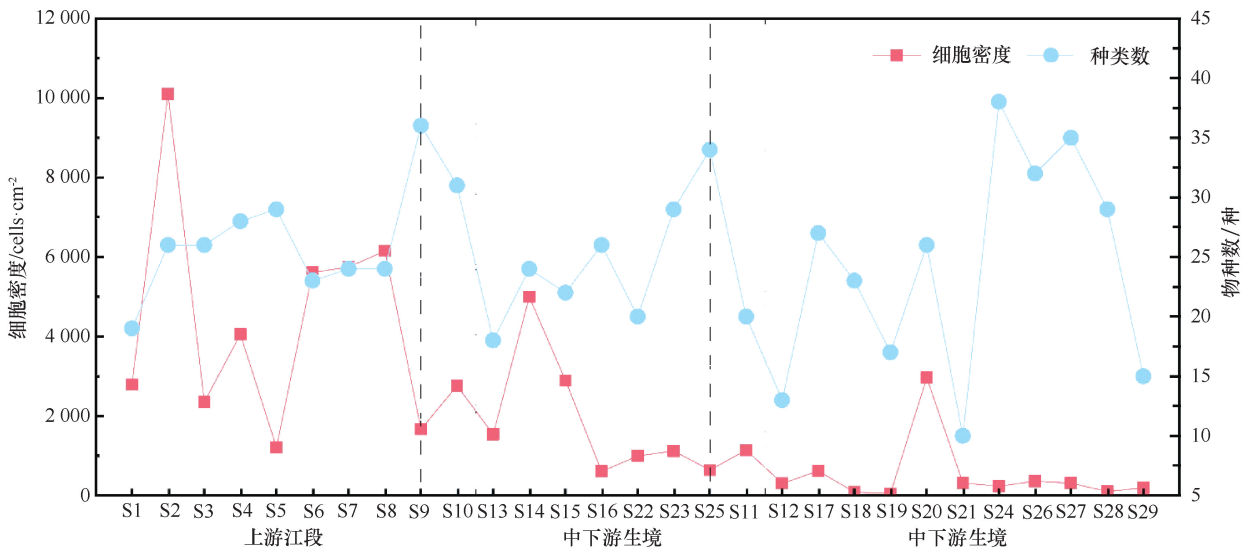


图 2 雅砻江着生藻类密度及种类

Fig. 2 Densities and species of periphyton in Yalong River

表 3 雅砻江不同江段优势物种

Table 3 Dominant species in different sections of Yalong River

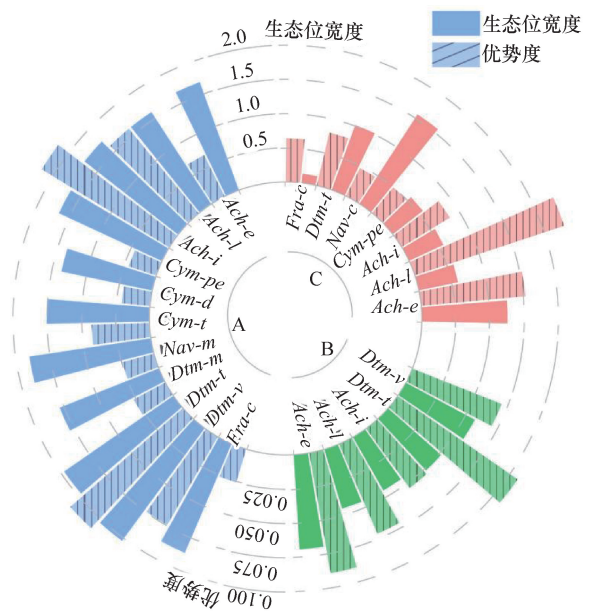
上游		中下游生境较好		中下游生境较差	
优势物种	对应名称	优势物种	对应名称	优势物种	对应名称
克罗顿脆杆藻	<i>Fra-c</i>	普通等片藻	<i>Dtm-v</i>	克罗顿脆杆藻	<i>Fra-c</i>
普通等片藻	<i>Dtm-v</i>	纤细等片藻	<i>Dtm-t</i>	普通等片藻	<i>Dtm-v</i>
纤细等片藻	<i>Dtm-t</i>	膨大曲壳藻	<i>Ach-i</i>	系带舟形藻	<i>Nav-c</i>
中型等片藻	<i>Dtm-m</i>	线形曲壳藻	<i>Ach-l</i>	极小桥弯藻	<i>Cym-pe</i>
微型舟形藻	<i>Nav-m</i>	短小曲壳藻	<i>Ach-e</i>	膨大曲壳藻	<i>Ach-i</i>
膨胀桥弯藻	<i>Cym-t</i>			线形曲壳藻	<i>Ach-l</i>
优美桥弯藻	<i>Cym-d</i>			短小曲壳藻	<i>Ach-e</i>
极小桥弯藻	<i>Cym-pe</i>				
膨大曲壳藻	<i>Ach-i</i>				
线形曲壳藻	<i>Ach-l</i>				
短小曲壳藻	<i>Ach-e</i>				

3.3 雅砻江各个河段优势物种及其生态位宽度

优势种生态位分析结果如图 3 所示, 上游江段生态位宽度在 1.35~2.03 之间, 且生态位宽度较为平均, 各个优势物种中普通等片藻、纤细等片藻、膨大曲壳藻以及线形等片藻的优势度较为突出达到 0.070 以上, 其他优势物种的优势度普遍在 0.025 左右; 中下游生境较好的江段, 优势物种相对于其他江段较少, 但优势度均较高, 各个物种的优势度都在 0.050 以上, 其中纤细等片藻的优势度较为突出优势度达到 0.10 以上, 该江段中各个物种的生态位宽度同样较为平均, 生态位宽度基本在 1 左右, 短小曲壳藻的生态位宽度较宽达到 1.38; 在中下游生境较差的江段, 线形曲壳藻以及短小曲壳藻的优势度相对突出, 在 0.075 以上, 普通等片藻、系带桥弯藻以及短小曲壳藻的生态位宽度在 1 以上。从全流域来看, 普通等片藻与短小曲壳藻在全流域各个江段都有较高的生态位宽度。

通过对各江段优势物种的生态位宽度进行聚类分析, 可以将上游江段中普通等片藻与纤细等片藻划分为广生态位优势物种, 将膨胀桥弯藻与优美桥弯藻划分为狭生态位优势物种, 其余为中生态位优势物种; 在中下游生境较好江段短小曲壳藻为广生态位物种, 膨大曲壳藻与线形曲壳藻为狭生态位物种; 在中下游生境较差江段系带舟形藻与短小曲壳藻为广生态位物种, 克罗顿脆杆藻、极小桥弯藻、膨大曲壳藻与线形曲壳藻为狭生态位物种。

在以往的研究中, 一般认为两个物种的生态位重叠值达到 0.6 以上, 则认为这两种物种有较强的竞争关系, 在特定区域内对于同一种的资源需求有交叉^[29]。各个江段优势物种生态位重叠情况如图 4 所示。由图 4 可知, 雅砻江上游江段中膨胀桥弯藻与中



A—上游江段; B—中下游生境较好江段; C—中下游生境较差江段

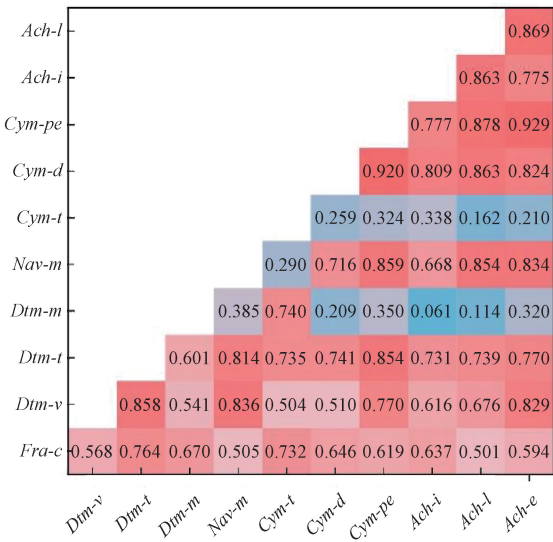
图 3 优势物种的优势度及生态位宽度

Fig. 3 Dominance and niche width of dominant species

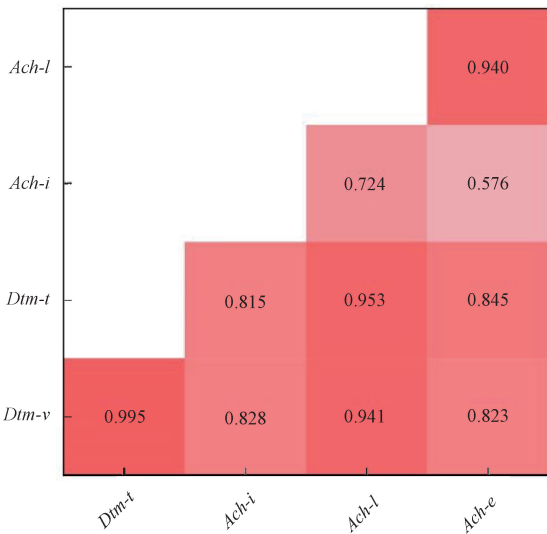
型等片藻与其他物种的生态位重叠值较小, 而其他物种之间的生态位重叠值基本都有超过 0.6 的情况, 各个物种的生态位重叠值平均为 0.628; 在雅砻江的中下游, 不同物种间的生态位重叠值基本都大于 0.600, 有着较强的竞争关系, 在生境较好的江段, 生态位重叠值平均为 0.844, 在生境较差江段, 生态位重叠值平均在 0.883。

3.4 优势物种对环境因子的响应

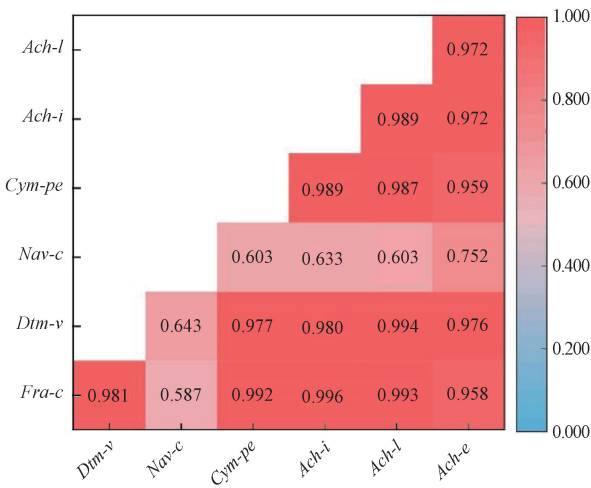
通过 RDA 分析可以得到各个江段优势物种与环境因子的响应关系(见图 5), 从干流全江段上来看, 各个优势物种与电导率、溶解性总硅、硝酸铵盐、以及溶解性总氮呈较为显著的正相关关系, 与水温、溶



(a) 上游江段



(b) 中下游生境较好江段



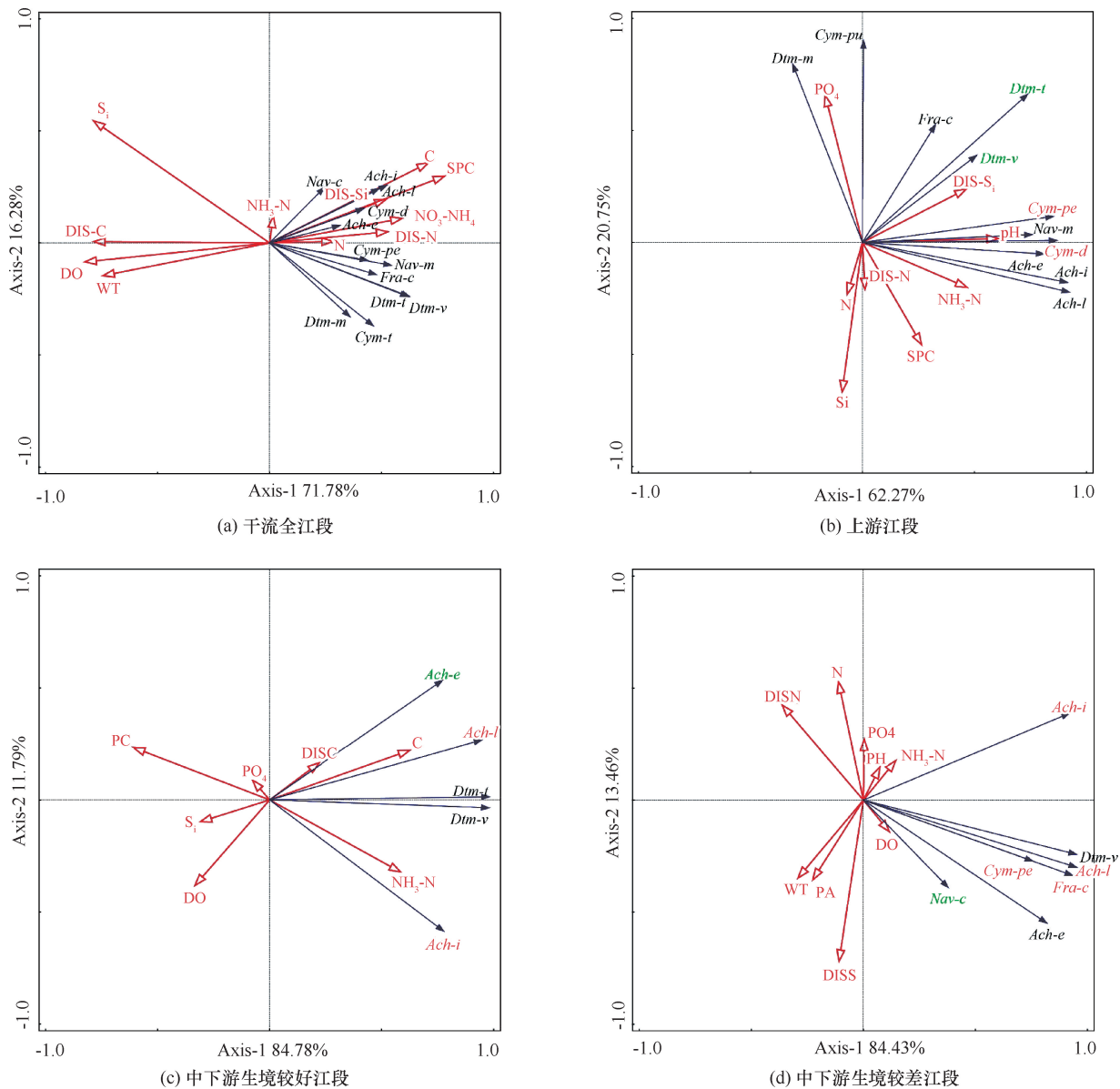
(c) 中下游生境较差江段

图4 雅砻江各个江段优势物种生态位重叠情况
Fig. 4 Niche overlap of dominant species in each section of Yalong River

解性总碳以及溶解性呈负相关关系；等片藻属优势物种对总硅同样表现出负向响应。在雅砻江的上游江段多数优势物种与电导率 SPC、酸碱度 pH、氨氮 NH₃-N 以及溶解性硅 DIS-Si 呈现正相关，而中型等片藻与膨胀桥弯藻则对于与溶解性磷酸盐 PO₄ 呈现正相关，与总硅 Si、电导率 SPC、总氮 N 以及溶解性总氮 DIS-N 呈现负相关，其他优势物种对于环境因子没有明显负响应；在中下游生境较好的江段中优势物种与总碳 C、溶解性碳 DIS-C 以及氨氮 NH₃-N 呈现正相关，与总硅 Si、电导率与纯水电导率之比 PC 以及溶解氧 DO 呈现较为明显的负相关；生境较差的河段中膨大曲壳藻对于氨氮 NH₃-N 呈现正相关，其他优势物种与溶解氧呈正相关，与溶解性总氮呈负相关。总体来说，在特定的区域内着生藻类对于氨氮的浓度有普遍正响应，但是在更大空间尺度上着生藻类则主要受到电导率、硝酸铵盐、溶解性总氮、溶解氧、水温以及溶解性总碳的影响。

雅砻江上游江段中广生态位优势物种普通等片藻 Dtm-v 与纤细等片藻 Dtm-t 对于溶解性硅有着显著的响应，而狭生态位优势物种纤细桥弯藻 Cym-t 与极小桥弯藻 Cym-pe 对于酸碱度、氨氮以及溶解性硅呈现有正相关。膨大曲壳藻 Ach-i 与线形曲壳藻 Ach-l 在中下游全江段均为狭生态位优势物种，在生境较好的江段对于氨氮以及溶解性碳与总碳分布有较为显著的正向响应，而在生境较差的江段对于环境因子并无显著的正向响应，在生境较好江段与电导率与纯水电导率之比、总硅与溶解氧呈现负相关，在生境较差江段与水温、水压与溶解性氮等环境因子呈现负相关。短小曲壳藻 Ach-e 在中下游全江段均为广生态位优势物种，在生境较好的江段对于环境因子的响应与线形曲壳藻相似，而在生境较差的江段和系带桥弯藻对环境因子的响应类似与溶解氧呈现正相关，与总氮以及溶解性氮呈现负相关。

雅砻江干流着生藻类优势物种与环境因子相关关系如图 6 所示。由图 6 可知，雅砻江流域着生藻类优势物种基本呈现为与电导率、总碳、溶解性总硅以及硝酸铵盐呈正相关关系，而与溶解氧、水温以及溶解性总碳呈现负相关关系，与 RDA 分析结果一致。由此也可以发现雅砻江干流不同河段优势物种演替的规律，在上游河段环境因子呈现为水温与溶解氧较低而盐度较高，高盐度也使上游河段水体有着更高的电导率，因此所有优势物种都在雅砻江上游大量出现。中下游生境较好的河段与生境较差的河段相比其水温、电导率、溶解氧以及溶解性总碳平均更低，硝酸铵盐



(绿色为广生态位物种, 红色为狭生态位物种)

图5 各个江段优势物种与环境因子的关系

Fig. 5 Relationship between dominant species and environmental factors in each river section

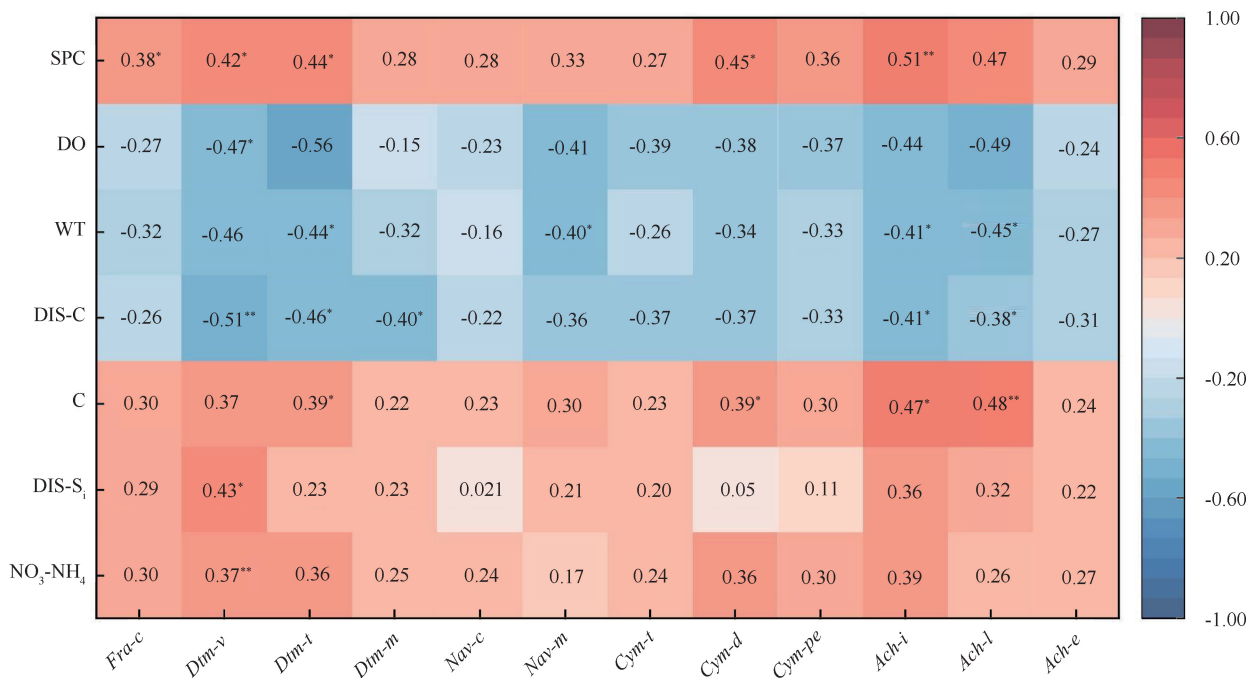
浓度更高, 总碳以及溶解性总硅差异不大。而中下游生境较好的江段优势物种如普通等片藻、纤细等片藻、膨大曲壳藻以及线形曲壳藻均与溶解性总碳有着显著的负相关关系, 同时纤细等片藻、膨大曲壳藻以及线形曲壳藻与水温同样呈显著的负相关关系; 而中下游生境较差江段优势物种克罗顿脆杆藻、普通等片藻、膨大曲壳藻以及线形曲壳藻与水体电导率呈显著的正相关。总体来说, 中下游着生藻类的群落演替主要受到电导率、水温、溶解性总碳以及硝酸铵盐影响。由于生境较差的河段一般位于库区, 而水电站的蓄水使库区表层有着相对于坝下更高的水温以及更高

浓度的营养盐^[30-31], 导致了坝上坝下的着生藻类群落差异。

4 结果讨论

4.1 不同江段的群落差异性

雅砻江上游至下游的地形、生境、气候等特征有着巨大的差异, 不同的物种对于这种变化将产生不同的响应。就着生藻而言, 上游着生藻类无论是物种数还是丰度都要高于中下游江段; 海拔以及纬度的差异会对着生藻类群落的组成产生影响, 这种差异性也将影响着环境因子从而间接地影响着着生藻类的多样性。同时有研究表明大多数着生藻类在水温降到



*代表显著相关, $P < 0.05$; **代表极显著相关, $P < 0.005$

图6 雅砻江干流着生藻类优势物种与环境因子相关关系

Fig. 6 Correlation between dominant periphyton species and environmental factors in mainstream of Yalong River

15 °C 以下, 藻垫和着生基质间便开始发生脱落, 因此, 只有少数的物种可以在低温区域长期生长繁殖^[10,32]。而雅砻江上游的水温平均仅为 7.7 °C, 远低于中下游, 因此可以推测有其他外部因素对于雅砻江干流区域的着生藻生长有着更大的影响, 在雅砻江的中下游除了气候以及海拔的差异, 更大的差异在于人类的干扰, 中下游大规模开发的梯级电站会使生境发生改变, 从而间接影响下游着生藻类的相对丰度^[33-34], 而本次研究所选择的生境较好江段则是在水电站下游中受人类干扰较小以及生境修复后的区域, 因此着生藻类的丰度相对于较差区域仍要更高一些。

吴乃成等^[35]对于雅砻江(锦屏段)及其主要支流着生藻类群落进行调查, 并对其与环境因子的关系进行了研究; 马宝珊等^[16]对锦屏电站以及其下游干流及支流安宁河的着生藻类进行了采样调查, 分析了区域内干支流的着生藻类群落结构以及优势种与环境因子的关系, 并且对于梯级建坝对于着生藻类的影响进行了讨论。上述两项研究都对雅砻江流域的着生藻类进行了调查, 在着生藻类的构成上本研究与马宝珊等^[16]的调查较为一致, 着生藻类对于环境因子的响应上同样相符。但前人的研究基本集中于锦屏以及锦屏以下的河段, 并未关注上游以及中游未受建坝影响的河段, 同时二者对于着生藻类群落的研究更偏向于

对整体采样数据进行分析, 没有划分河段进行对比。

通过一定区域内从优势物种的数量以及各个优势物种的优势度可以判断当前区域内的生态系统稳定程度, 优势物种较多且优势度较为平均的区域被认为是生态系统更为稳定的区域^[35]; 在雅砻江上游中的优势物种相对于中下游要相对更多且优势度较为一致, 中下游中虽然生境较差的江段优势物种要多于生境较好的江段, 但是生境较好的江段中优势物种的优势度更为平均。

分析区域内物种的生态位宽度可以反映出该物种在这个区域对于资源的利用程度, 生态位宽度越宽所反应的则是物种对于环境资源的利用能力越大, 而生态位的重叠情况则反应了物种之间的竞争关系^[21,36]。生态位宽度越高的物种对于环境的适应能力也要更强, 因此对于生态位较高的物种进行监测可以更快速地判断河流环境的变化, 在上游为广生态位物种的普通等片藻与纤细等片藻在中下游生境较好的江段优势度仍然较高, 生态位宽度在该江段也处于中等, 而在生境较差江段优势度显著降低, 且纤细等片藻也不再是优势物种; 说明在下游生境较差的江段, 环境变化相对于生境较好的江段差异更为显著, 在未受干扰河流中, 一般来说河流生境的一致性较高, 上游生境与下游变化较为平缓, 但是在雅砻江中下游江段, 因为水电站建设, 导致水电站的上游流速变缓, 水位变幅

大,下游区域来水量减小导致上下游的生境一致性丧失,同时,由于水电站下游日水位变幅较大,生态系统的稳定性也大大降低^[37-38]。而本次研究选择的生境较好江段,一般位于电站建设影响较小区域以及部分人为生境修复后的区域,因此,雅砻江中下游生境较好的江段与上游生境更为接近,更稳定的环境使该区域的着生藻类群落的结构更加稳定。而对于狭生态位物种,其可利用的环境资源较少,因此对于狭生态位物种的监测更能反映单一环境变量的变化^[39]。

而通过对于生态位重叠的分析,可以发现上游与中下游共有的优势物种明显都有着较高的生态位重叠情况,同时在上游各个物种的生态位重叠平均远低于中下游的江段。优势物种作为一个区域内主要的组成部分,在上游中各个优势种的生态位宽度高,且生态位重叠情况更低,因此在上游中的着生藻类密度要远高于中下游;而在中下游江段,生境较好的江段,虽然优势物种相对于其他区域较少,但其物种数平均与上游一致,各个优势物种对于环境的利用能力高,但生态位重叠情况较高,因此在着生藻类的密度上要低于上游江段,生态位重叠的增大,可能源于电站建设对于营养物质的拦截,生境较好的江段一般都在梯级电站的下游部分,虽然各个优势物种对于环境资源的利用能力较强,但是营养物质减少使物种间的竞争更加激烈^[40];在生境较差的江段,除个别优势物种的生态位宽度较高,其他物种生态位低于其他江段,生态系统稳定性较低,只有个别物种的优势度与生态位宽度较高,且该区域中优势物种的生态位重叠情况较高,也许是中下游生境较差的江段着生藻类密度较低的原因。

盛祥锐等^[41]在潮白河北京段对2021年春季与秋季两个季节的着生藻类进行了采集,并统一分析了两个季节中着生藻类的优势物种组成以及其生态位宽度与生态位重叠。研究基于生态位对于潮白河的着生藻类物种情况进行了研究,但并未对两个季节间着生藻类的演替进行分析,同时也缺少了着生藻类演替的影响因素。李雪等^[42]在扎龙湿地春季、夏季以及秋季的着生藻类进行了采样,并对不同季节着生藻类群落结构进行了比较,针对性分析了物种之间的联系。本文虽未对区域内时间上的物种变化进行分析,但对于区域内的物种变化进行了详细的对比分析,并对影响物种群落演替的因素进行了分析,可以更好地分析目前研究区内存在的问题。

4.2 优势物种对于环境因子的响应

通过RDA以及Pearson相关性分析的结果中相同

的物种在不同的区域对于环境因子的响应也不同,根据前人的研究,着生藻类一般受到氮、磷以及硅的影响较多。雅砻江中大多数的优势种在不同江段都对氨氮有着正向的响应,但是在不同区域对于氨氮的响应并不相同,在上游以及中下游生境较好的江段,优势物种对于氨氮的响应更为显著,原因是在生境较差的区域大多为梯级电站的库区以及上游静水区域,氨氮更加富集^[43],在中下游生境较差的江段优势物种甚至对于总氮与溶解性氮呈现出负相关的情况,说明在该区域氮的浓度已经超过了最适合着生藻生长的范围^[2]。雅砻江中大多数的物种对于磷的变化没有响应,只有在上游江段中型等片藻与膨胀桥弯藻对于磷酸盐有正向的响应。溶解性硅仅在上游与优势物种有正相关,但是着生藻所依靠的主要为附着沉积物中的硅质,对于水体中的溶解硅需求相对较小^[44-45],这种响应可能是因为上游中更高的硅藻密度也使水体中的溶解硅更为富集,在硅藻死亡沉积后,会在水中溶解产生溶解硅^[46]。在雅砻江的干流中,环境因子对于着生藻类的影响在中下游江段更加明显,中下游大量的水电站建设使坝上的区域生境偏向于静水导致营养盐更加富集、水温更高以及水体电导率升高的现象,使中下游江段生境较好江段与生境较差江段的优势物种产生了差异。在未来的水库管理和保护工作中可利用生态沟渠、前置库、生态塘、人工湿地等生态工程构建生态水系统,对库周径流实现多级净化,削减入库营养负荷。

BONDAR^[47]在奥地利的伦茨湖下游搭建水槽进行着生藻类对于水库放水产生的水力达峰以及热达峰进行了试验,量化了水库建设对于坝下着生藻类的影响。本文目前仅结合电站上下游的环境因子变化以及着生藻类对于环境因子的响应,分析雅砻江流域梯级电站建设对于着生藻类的影响。在未来的研究工作中可以针对设计试验,对于库区以及坝下的着生藻类群落演化情况,进一步分析水电站建设对于着生藻类群落演变的驱动机制。

同时,区域内的优势物种也可以指示不同的环境特征,有研究表明硅藻对于环境的变化十分敏感,可以被认为是环境变化的有力指标^[11,48],在雅砻江的中存在有中型等片藻、微型舟形藻和优美桥弯藻为只存在于上游的优势物种,其中中型等片藻为冷水物种,一般在低营养、低电导率的水中达到最大的丰度,指示几乎没有人为干扰的环境,为清洁种^[49];微型舟形藻一般生长于偏碱性环境中;膨胀桥弯藻一般长在贫至中营养且电导率适中的水体中^[50]。而只

在中下游生境较差江段中为优势种的系带舟形藻一般丰富于中度至高度电导率的溪流中, 这些水体中的氯化物、钠和硫酸盐浓度往往较高, 对微咸和营养丰富的内陆水域具有亲和力, 其所指示的环境特征恰好与上游特有的优势物种相反。

5 结 论

(1) 本次调查共采集到着生藻类 96 种, 隶属于 4 门 6 纲 14 目 27 科 41 属, 其中以硅藻门为绝对优势。上游江段着生藻类种类数 77 种, 细胞密度平均为 $4\ 296.3\ \text{cells}/\text{cm}^2$, 优势物种优势度平均, 均显著优于中下游生境较好江段和中下游生境较差江段。

(2) 雅砻江上游着生藻类优势物种的生态位宽度在 1.35~2.03 之间, 高于中下游江段; 生态位重叠程度为 0.628, 显著低于中下游江段。中下游生境较好与生境较差河段生态位重叠程度差异不大, 而生境较好河段优势物种的生态位宽度要显著高于生境较差河段。

(3) 通过不同江段的 RDA 分析, 造成雅砻江流域着生藻类群落产生演替的主要影响环境因子为电导率、溶解氧、水温、溶解性总碳、总碳、溶解性总硅以及硝酸铵盐。其中雅砻江上游区域着生藻类优势物种主要与电导率、pH、氨氮以及溶解性硅呈现正相关, 部分优势物种与总硅、总氮以及溶解性总氮呈现负相关。在中下游生境较好的江段中优势物种与总碳、溶解性碳以及氨氮呈现正相关, 与总硅以及溶解氧呈现较为明显的负相关。

参考文献 (References):

- [1] 李国忱, 刘录三, 汪星, 等. 硅藻在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2617-2624.
LI G C, LIU L S, WANG X, et al. Applications of diatom in river health assessment: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2617-2624.
- [2] 丁蕾, 支崇远. 环境对硅藻的影响及硅藻对环境的监测[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2006, 24(3): 13-16.
DING L, ZHI C Y. Environmental effects on diatom and its monitor of environment [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2006, 24(3): 13-16.
- [3] 刘园园, 阿依巧丽, 张森瑞, 等. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3833-3843.
LIU Y Y, A Y, ZHANG S R, et al. Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3833-3843.
- [4] ACUÑA V, WOLF A, UEHLINGER U, et al. Temperature

- dependence of stream benthic respiration in an Alpine river network under global warming [J]. Freshwater Biology, 2008, 53(10): 2076-2088.
- [5] 计叶, 吴雨蒙, 许秋瑾. 水环境的生物监测方法及其应用[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 616-622.
JI Y, WU Y M, XU Q J. Biological monitoring method of water environment and its application [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 616-622.
- [6] STEVENSON R J, BOTHWELL M L, LOWE R L, et al. Algal ecology: Freshwater benthic ecosystem [M]. San Diego, USA: Academic press, 1996.
- [7] 谭香, 张全发. 底栖硅藻应用于河流生态系统健康评价的研究进展[J]. 水生生物学报, 2018, 42(1): 212-220.
TAN X, ZHANG Q F. A review of diatoms in biomonitoring and ecosystem health assessment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(1): 212-220.
- [8] 贾兴焕, 蒋万祥, 李凤清, 等. 大型水电站对河流底栖藻类群落的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1731-1738.
JIA X H, JIANG W X, LI F Q, et al. Impacts of large hydropower station on benthic algal communities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1731-1738.
- [9] OWEN C, GRACE C, JUNE F, et al. Relationship between river water flow rate, periphyton abundance and macroinvertebrate communities [J]. California Ecology and Conservation Research, 2023, 20(7): 1731-1738.
- [10] 宋志斌. 海拔和纬度对高原河流着生藻类多样性地理格局的影响研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2023.
SONG Z B. Study on Altitudinal and Latitudinal Patterns of Benthic Algae in Plateau Rivers [D]. Lasa: Xizang University, 2023.
- [11] DALU T, MWEDZI T, WASSERMAN R J, et al. Land use effects on water quality, habitat, and macroinvertebrate and diatom communities in African highland streams [J]. Science of The Total Environment, 2022, 846: 157346.
- [12] WU Q H, KE L H, WANG J D, et al. Satellites reveal hotspots of global river extent change [J]. Nature Communications, 2023, 14: 1587.
- [13] 姚昆, 张存杰, 何磊, 等. 雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 199-208.
YAO K, ZHANG C J, HE L, et al. Dynamic evaluation and prediction of ecological environment vulnerability in the middle-upper reaches of the Yalong River [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(4): 199-208.
- [14] 杨爱民, 朱磊, 陈署晃, 等. 1975—2015 年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3863-3874.
YANG A M, ZHU L, CHEN S H, et al. Geo-informatic spectrum analysis of land use change in the Manas River Basin, China during 1975—2015 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3863-3874.
- [15] DA SILVA C F M, TORGAN L C, SCHNECK F. Temperature and surface runoff affect the community of periphytic diatoms and have distinct effects on functional groups: Evidence of a mesocosms

- experiment[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 839(1): 37-50.
- [16] 马宝珊, 徐滨, 魏开金, 等. 安宁河中游着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *淡水渔业*, 2020, 50(6): 30-39.
MA B S, XU B, WEI K J, et al. Periphytic algal community and its relation to the environmental conditions in the middle Anning River, China [J]. *Freshwater Fisheries*, 2020, 50(6): 30-39.
- [17] SMOLAR-ŽVANUT N, MIKOŠ M. The impact of flow regulation by hydropower dams on the periphyton community in the a River, Slovenia [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(5): 1032-1045.
- [18] MCNAUGHTON S J. Relationships among functional properties of Californian grassland[J]. *Nature*, 1967, 216(5111): 168-169.
- [19] VADAS R L, HUGHES R M, BAE Y J, et al. Assemblage-based biomonitoring of freshwater ecosystem health via multimetric indices: A critical review and suggestions for improving their applicability[J]. *Water Biology and Security*, 2022, 1(3): 100054.
- [20] LESSER J S, JAMES W R, STALLINGS C D, et al. Trophic niche size and overlap decreases with increasing ecosystem productivity[J]. *Oikos*, 2020, 129(9): 1303-1313.
- [21] AHMAD M, SHARMA P, RATHEE S, et al. Niche width analyses facilitate identification of high-risk endemic species at high altitudes in western Himalayas[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107653.
- [22] 杨青瑞, 陈求稳, 马徐发. 雅砻江下游鱼类资源调查及保护措施[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(3): 94-98.
YANG Q R, CHEN Q W, MA X F. Status of fish resources and protection measures in the lower reaches of yalong river[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(3): 94-98.
- [23] 刘猛, 张逸譔, 刘园, 等. 雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[J]. *淡水渔业*, 2022, 52(2): 22-33.
LIU M, ZHANG Y H, LIU Y, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2022, 52(2): 22-33.
- [24] 朱发昇, 李长春, 侯爱冰. 国家重大战略和水资源演变背景下河西走廊水安全保障的思考[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(6): 20-25.
ZHU Fasheng, LI Changhun, HOU Yuanbing. Thought on water security guarantees in the Hexi Corridor under the background of major national strategies and water resource evolution[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(6): 20-25.
- [25] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936.
ZHENG B H, ZHANG Y, LI Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 928-936.
- [26] 邹曦, 杨荣华, 杨志, 等. 长江流域典型支流生境健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(5): 29-39.
ZOU X, YANG R H, YANG Z, et al. Habitat health assessment of typical tributaries of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(5): 29-39.
- [27] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 328-336.
XUE H, ZHENG B H, MENG F S, et al. Community structures of periphyton and their relationship with aquatic environmental factors in the Gan River, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 328-336.
- [28] 李锦荣, 崔巍, 王茹, 等. 草原荒漠区红砂和珍珠猪毛菜群落分布特征分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(2): 179-194.
LI Jinrong, CUI WEI, WANG Ru, et al. The distribution characteristics of the communities of *Reaumuria songarica* and *Salsola passerina* in steppified desert area [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(2): 179-194.
- [29] WATHNE J A, HAUG T, LYDERSEN C. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 194: 233-239.
- [30] 李璘君, 杨世伟, 王远铭, 等. 混合式抽水蓄能电站水温影响研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 133-143.
LI L J, YANG S W, WANG Y M, et al. Study on the effect of water temperature in a hybrid pumped storage power station [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 133-143.
- [31] 秦勇, 孙鹤, 李姗泽, 等. 河道型水库沉积物有机碳空间分布特征及其埋藏效应[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(2): 123-132.
QIN Yong, SUN He, LI Shanze, et al. Spatial variation and burial effect of sedimentary organic carbon in the channel-type reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(2): 123-132.
- [32] 梁霞. 周丛藻类环境响应与水质处理应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
LIANG X. Effect of Periphyton on Water Environment and its Application in Water Quality Treatment [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [33] JIA X H, JIANG W X, LI F Q, et al. Impacts of large hydropower station on benthic algal communities [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1731-1738.
- [34] WU N C, TANG T, ZHOU S C, et al. Changes in benthic algal communities following construction of a Run-of-river dam [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(1): 69-79.
- [35] 吴乃成, 唐涛, 黎道丰, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类群落与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1697-1703.
WU N C, TANG T, LI D F, et al. Benthic algal communities in Jinping reach of Yalong River and its main tributaries in relation to environmental variables [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1697-1703.
- [36] CARSCADDEN K A, EMERY N C, ARNILLAS C A, et al. Niche breadth: Causes and consequences for ecology, evolution, and conservation [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 2020, 95(3): 179-214.
- [37] 王纤纤. 雅鲁藏布江流域着生藻类群落结构时空分布特征及与水体理化因子的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
WANG Q Q. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of

- Community Structure Periphytic Algae and Its Relationship with Physicochemical Factors of Water Environment in the Yarlung Zangbo River Basin[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [38] 简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(6): 12-18.
JIAN D, HUANG D M, CHANG X L, et al. The succession of Zoobenthos in the mainstream of Hongshui River after the formation of the cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(6): 12-18.
- [39] 何晓枫, 黄翔, 陈旻, 等. 梯级开发对河流生境连通性的影响与优化路径[J]. 水力发电学报, 2023, 42(8): 32-41.
HE X F, HUANG X, CHEN M, et al. Impact of hydropower cascade development on river habitat connectivity and its path to optimization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8): 32-41.
- [40] 谷金普, 葛继稳, 唐佳, 等. 古夫河着生藻类优势种生态位研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10): 1456-1463.
GU J P, GE J W, TANG J, et al. Niche analysis of dominant species of periphytic algae in gufu river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(10): 1456-1463.
- [41] 盛祥锐, 罗遵兰, 孙光, 等. 潮白河北京段着生藻类群落结构及其优势种生态位特征[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 52-59.
SHENG X R, LUO Z L, SUN G, et al. Community structure and dominant species niche characteristics of periphytic algae in the Beijing section of the Chaobai River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(1): 52-59.
- [42] 李雪, 夏伟, 范亚文, 等. 扎龙湿地藻类优势种生态位及其种间联结性动态分析[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4098-4108.
LI X, XIA W, FAN Y W, et al. Dynamic analysis of niche and interspecific association of dominant algae species in Zhalong wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4098-4108.
- [43] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 27-30.
ZHANG Y, ZHENG B H, LIU H L, et al. Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(6): 27-30.
- [44] HOUSE W A, LEACH D V, ARMITAGE P D. Study of dissolved silicon, and nitrate dynamics in a fresh water stream [J]. Water Research, 2001, 35(11): 2749-2757.
- [45] BENNION H, KELLY M G, JUGGINS S, et al. Assessment of ecological status in UK lakes using benthic diatoms[J]. Freshwater Science, 2014, 33 (2): 639-654.
- [46] 朱俊, 刘丛强, 王雨春, 等. 乌江渡水库中溶解性硅的时空分布特征[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 330-333.
ZHU J, LIU C Q, WANG Y C, et al. Spatial-temporal variation of dissolved silicon in Wujiangu reservoir [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 330-333.
- [47] BONDAR-KUNZE E, KASPER V, HEIN T. Responses of periphyton communities to abrupt changes in water temperature and velocity, and the relevance of morphology: A mesocosm approach[J]. Science of The Total Environment, 2021, 768: 145200.
- [48] KIRAN M T, SAXENA A, TIWARI A. Diatom mediated heavy metal remediation: A review [J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123068.
- [49] 齐雨藻, 李家英, 谢淑琦. 中国淡水藻志[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
QI Y Z, LI J Y, XIE S Q. Chinese Freshwater Algae Flora[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [50] SPAULDING S A, POTAPOVA M G, BISHOP I W, et al. *Diatoms.org*: Supporting taxonomists, connecting communities [J]. Diatom Research, 2021, 36(4): 291-304.

(责任编辑 王璐)