



雅鲁藏布江中游着生藻类群落生态网络与种间联结性特征解析

赵康¹, 曾庆慧¹, 刘卫², 包宇飞³, 张丰搏¹, 唐家璇^{1,4}, 李坪峰⁵, 王义成¹, 胡鹏^{1*}

1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038

2. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司加查水电厂, 山南 856000

3. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038

4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072

5. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 拉萨 850000

* E-mail: hp5426@126.com

1 研究背景

青藏高原是世界上较为脆弱的生态系统之一, 其生态健康不断受到气候变化、人类活动和自然灾害的影响, 因而高原寒区河流生态系统对全球气候变化和人类活动的干扰高度敏感. 着生藻类作为高原寒区河流生态系统中重要的初级生产者, 在物质循环和能量流动中扮演着重要角色, 其生物群落的变化反映了环境因子的变化对高原生态系统的影响. 然而, 由于高原寒区具有高海拔、低温、强紫外线等特殊条件, 且水文条件极为复杂, 区域内着生藻类群落结构、生态位特征及其种间联结性也呈现出与平原河流、湖泊等地不同的特点^[1].

生态位理论是评价物种群落生物多样性机制、物种间竞争或共存关系等种群状况的重要手段. 结合生态位宽度和生态位重叠指数, 能够准确地表征物种在某一环境资源中的利用效率和对环境的适应能力^[2,3], 为理解物种与环境以及物种与其他物种之间的关系提供了理论基础, 深入了解着生藻类的生态位宽度和生态位重叠能够反映其对环境适应性及种间竞争与共存机制. 种间联结性揭示了不同物种在空间分布上的相互关联性, 是表征群落数量和结构特征

的指标, 也是群落结构形成和演替的基础, 这对于探索高寒河流生态系统的生物多样性维持机制具有重要意义^[4,5].

2 本文工作

本研究以雅鲁藏布江中游着生藻类为研究对象, 于2023年10月(秋季)、2024年2月(冬季)、2024年5月(春季)在干流布设点位并进行着生藻类采样调查, 采用生态位宽度、生态位重叠指数、种间联结性对区域内群落演替、优势种种间关系进行了研究, 结合生态网络和非度量多维尺度分析(NMDS), 揭示了着生藻类群落季节性差异. 以期对高原寒区河流生态系统稳定性评估和生物多样性保护提供基础数据支持和研究基础, 为深入理解高寒河流生态系统中的物种共存机制提供重要参考, 同时为区域生态保护和资源管理提供科学依据.

3 本文结论

研究区内着生藻类群落丰度高且受季节性变化影响显著. 三个季节, 着生藻类群落均以硅藻门为主, 硅

英文全文见: Zhao K, Zeng Q H, Liu W, et al. Analysis of ecological network and interspecific association characteristics of periphytic algae in the middle reaches of Yarlung Zangbo River. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1800505, <https://doi.org/10.1007/s11431-025-2985-7>

藻门属于狭冷性物种, 不仅在低温环境下保持正常的生理代谢活动, 而且能够分散到水体底部并固定它们在光区内的位置, 在低温和较弱光照的情况下具有显著的竞争优势, 并维持光合作用. 冬季、秋季的着生藻类群落和春季群落的差异较大, 且春季时期的各采样点间属种差异大. 从秋季到春季, 水温的升高促进了小型物种的增殖, 进而增加了初级生产力, 加快了群落的演替速度, 影响了着生藻类群落结构.

与低海拔山地河流和湖泊相比, 高海拔河流^[6,7]着生藻类群落物种数明显较少, 细胞密度也较低, 从优势类群的角度来看, 低海拔地区通常以硅藻门、绿藻门和蓝藻门的优势物种为特征, 而硅藻门在大多数高海拔河流系统中占绝大多数. 因此, 硅藻是高海拔河流的核心功能群, 可作为生态监测的生物指标, 是评估生态系统健康的关键指标. 在高海拔地区, 着生藻类群落的特征是Margalef丰富度指数相对较低, 但Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数较高. 这一结果表明, 物种组成相对有限, 但个体在分类群中分布更为均匀, 从而形成了结构稳定的群落. 这种格局反映了青藏高原极端环境条件对着生藻类群落中的物种具有生态过滤作用, 使少数高度适应性物种得以平衡生存和共存, 形成了“低富高均匀”的生态格局. 这种群落结构在资源有限和环境压力的条件下呈现出典型的生态适应策略.

雅鲁藏布江中游干流着生藻类物种间的相互作用以协同为主, 可能是由于着生藻类群落附着的基质接纳了水体中沉降的营养物质, 为着生藻类物种间的物

质转移提供了条件, 便于着生藻类通过互惠共生的关系进行生长繁殖. 冬季的网络稳定性更强且物种间连通性更好, 考虑是由于在极端环境下, 着生藻类群落物种间竞争关系减弱, 更依赖于相互协作来维持高原河流的水生态网络的稳定性^[8], 且冬季水体较不稳定, 着生藻类物种之间通过建立更多的正相关联系来增强群落稳定性, 共同抵御外界环境的干扰. 春季着生藻类物种网络结构较为松散, 稳定性较差, 物种多样性维持能力较弱, 可能是由于温度升高, 着生藻类大量繁殖, 种间竞争激烈, 导致物种的丰度较低, 进而导致稳定性较差. 根据三个季节的生态网络特征, 春季的网络结构稳定性较差, 表明需要在这个季节加强氮和磷浓度的监测, 以防止富营养化. 相比之下, 冬季的网络表现出更大的稳定性, 表明在这个季节定期监测生态网络可以作为评估水体生态稳定性的有效方法.

本研究中, 优势种总体关联性呈显著正关联, 表明研究区内群落处于稳定的正向演替阶段. 卡方检验结果和总体联结性结果显示, 三个季节优势种的总体关联性均为显著正关联, 表明优势种之间的生境和资源具有相似性且群落趋于稳定. 种间联结性显示, 三个季节优势种的种间联结以正联结为主, 仅在冬季的脆杆藻和普通等片藻、中型脆杆藻和普通等片藻两组种对间出现负联结, 种对内的物种在群落种表现出较弱的分离性, 考虑是由于等片藻属对关键营养盐的吸收效率更高, 进而抑制了脆杆藻属藻类的生长, 且等片藻属通常在冬季稳定的低营养条件占优, 而脆杆藻属

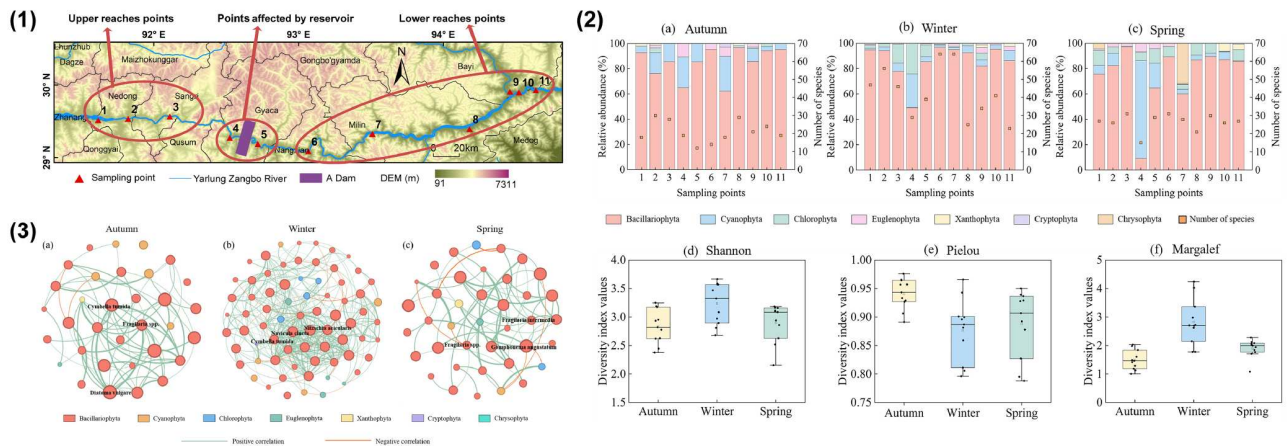


图 1 (网络版彩图) (1) 研究区示意图; (2) 不同季节着生藻类群落物种组成图; (3) 不同季节着生藻类群落共现网络图

Figure 1 (Color online) (1) Schematic diagram of the research area; (2) species composition map of algae communities in different seasons; (3) network diagram of co-occurrence of algal communities in different seasons.

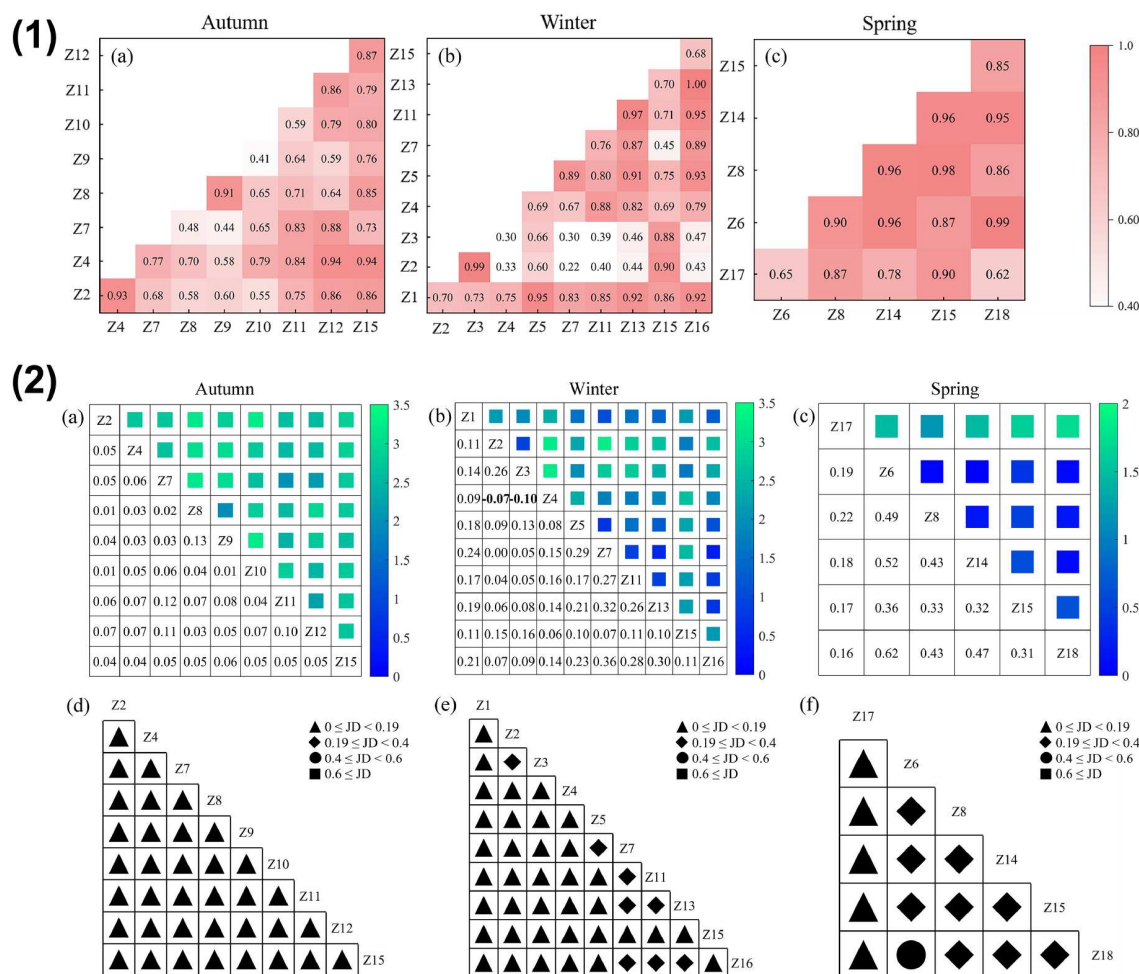


图 2 (网络版彩图) (1) 生态位重叠值; (2) 种间关联值(AC值和JD值)

Figure 2 (Color online) (1) Ecological niche overlap value; (2) inter-species association values (AC value and JD value).

在营养盐丰富的条件下增长迅速, 二者表现出相反的趋势。JD值和AC值均显示春季的短缝藻和长菱形藻表现出较高的正联结关系, 考虑是因为春季水体营养水平较高, 二者能够在富硅条件下共同繁殖, 同时能够在相似光照强度的水层中共存。相关研究表明^[9], 负联结数量较多表明群落处于演替阶段, 正联结数量较多则表明物种演替趋于动态平衡, 接近形成稳定群落,

随着各种群之间达到动态平衡状态时, 种间联结会呈现总体上的显著正联结^[10]。

综上所述, 雅鲁藏布江中游着生藻类群落处于较为稳定的正向演替阶段, 短缝藻和长菱形藻之间强烈的正相关和高生态位重叠表明, 这些物种对环境变化具有很强的适应性, 可以作为长期生态监测和水质评估的指示物种。

参考文献

- Zhao B, Zeng Q, Wang J, et al. Impact of cascade reservoirs on nutrients transported downstream and regulation method based on hydraulic retention time. *Water Res*, 2024, 252: 121187
- Xu H, Wang X, Qu Q, et al. Variations and factors characterizing ecological niches of species in a stable grassland plant community. *Ecol Indic*,

- 2021, 128: 107846
- 3 Venier L A, Fahrig L. Habitat availability causes the species abundance-distribution relationship. *Oikos*, 1996, 76: 564
 - 4 Ding Z, Ma K. Identifying changing interspecific associations along gradients at multiple scales using wavelet correlation networks. *Ecology*, 2021, 102: e03360
 - 5 Shen Y, Holyoak M, Goodale E, et al. Mixed-species bird flocks re-assemble interspecific associations across an elevational gradient. *Proc R Soc B*, 2022, 289: 20221840
 - 6 Liu Y, Fu J, Cheng D, et al. The spatial pattern of periphytic algae communities and its corresponding mechanism to environmental variables in the Weihe River Basin, China. *Hydrol Res*, 2020, 51: 1036–1047
 - 7 Shang K Y, Han Y, Gao X, et al. Spatial pattern of periphytic algae communities in major tributaries of the upper Jinsha River and the environmental drivers. *J Lake Sci*, 2024, 36: 1392–1402
 - 8 Yang S, Yang Q, Li X, et al. Deterministic processes dominate the geographic distribution pattern and community assembly of phytoplankton in typical plateau rivers. *Biodiversity Sci*, 2023, 31: 23092
 - 9 Huo X K, Wang Y G, Zhou L T, et al. Characterization of the ecological niche and interspecific connectivity of plankton in Baiyangdian Lake by combining ecological networks (in Chinese). *Environ Sci*, 2024, 45: 5298–5307 [霍笑康, 王永刚, 周灵同, 等. 结合生态网络解析白洋淀浮游生物生态位和种间联结性特征. *环境科学*, 2024, 45: 5298–5307]
 - 10 Zhao K, Zeng Q, Liu W, et al. Analysis of ecological network and interspecific association characteristics of periphytic algae in the middle reaches of Yarlung Zangbo River. *Sci China Tech Sci*, 2025, 68: 1800505