

城市河流近自然修复过程中附着藻类群落恢复与环境驱动机制*

莫露清¹, 杨扬¹, 邵义萍^{1**}, 戴玉女¹, 陶然¹, 张晓萌¹, 余佰伦^{1,2}, 张杰¹, 区廷哲¹,
李明³, 禰倩红³, 朱文玲³, 周新民⁴, 黄家俊¹

(1: 暨南大学生态学系, 热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632)

(2: 广东省深圳市环境科学研究院, 深圳 518001)

(3: 广东省广州市水务局, 广州 510640)

(4: 广东省广州市河涌监测中心, 广州 510030)

摘要: 附着藻类在河流生态恢复过程中群落构建机制的研究是深入了解河流生态系统结构与功能恢复的关键。本研究以广州市实施低水位运行策略的代表性穿城河流——车陂涌（自然生境）、猎德涌（高度渠道化）、沙河涌（混合生境）为研究对象，系统分析了修复后连续四年（2020–2023年）丰水期附着藻类群落结构与功能响应的动态变化过程，探讨近自然修复措施影响下附着藻类群落恢复及环境驱动机制。结果显示：本研究共记录到193种附着藻类，隶属于6门53科90属，其中硅藻门占主导（51.26%）。现存量在空间变化均无显著差异（ $P>0.05$ ），年际间均有显著差异（ $P<0.001$ ），时间异质性高于空间异质性。空间上，车陂涌总物种数最高（184种）；猎德涌在丰度（ 2.17×10^9 cells/m²）、生物量（ 3.16×10^3 mg/m²）、香农多样性指数（3.14）及均匀度指数（0.66）均值方面最高。时间上，猎德涌的物种数和香农多样性指数年际增幅最大，分别为：41.43%和15.58%，沙河涌丰度和生物量增幅最高分别为92.62%、96.53%，均匀度指数0.6左右年际变化较为持平，反映所研究河流附着藻类恢复的有效性。基于生态位特征分析，附着藻类群落构建以协作关系为主，表现出资源高效利用和低竞争压力。校正随机率结果表明，确定性与随机性过程在修复过程中都有主导作用，且环境异质性影响这两种过程的相对作用。冗余分析表明，TN、TP、DO、水深和流速是河流附着藻类群落恢复的重要环境因子，可通过影响群落演替与分布格局，间接介导群落构建过程。研究结果为城市河流的近自然修复的有效性提供了一定的数据支撑及科学依据。

关键词: 城市河流；低水位运行；附着藻类恢复；群落构建；时空异质性；环境因子

Spatial-temporal variations and environmental drivers of attached algae communities during near-natural restoration of urban rivers*

Mo Luqing¹, Yang Yang¹, Tai Yiping^{1**}, Dai Yunv¹, Tao Ran¹, Zhang Xiaomeng¹, Yu Bailun³, Zhang Jie^{1,2}, Ou Tingzhe^{1,2}, Li Ming³, Xuan Qianhong³, Zhu Wenling³, Zhou Xinmin⁴ & Huang Jiajun¹

(1: Department of Ecology, Jinan University, Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Guangzhou 510632, P.R. China)

(2: Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, P.R. China)

(3: Guangzhou Municipal Water Affairs Bureau, Guangzhou 510632, P.R. China)

(4: Guangzhou River Monitoring Center, Guangzhou 510632, P.R. China)

* 2025-01-14 收稿；2025-03-24 收修改稿。

广州市水务科技创新项目（GZSWKJ2022-004, GZSWKJ2023-003, 440101-2021-10693）、广东省自然科学基金项目（2023A1515030019）、广东省国际科技合作基地项目（2019A050505005）、广州市科技计划项目（2024B03J1230）、国家重点实验室水灾害防治专项基金“一带一路”专项（2022491511）联合资助。

** 通信作者；Email: tyntytyp@jnu.edu.cn.

Abstract: The study of attached algae communities assembly mechanisms is essential for understanding the restoration of river ecosystem structure and function. This study analyzed attached algae communities in three representative rivers flowing through Guangzhou—Chebei River (natural habitat), Liede River (highly canalized), and Shahe River (mixed habitat)—that are subject to a low water level operation strategy. The analysis covered four consecutive flood seasons from 2020 to 2023, focusing on the recovery and environmental drivers of these communities under near-natural restoration measures. The results show that a total of 193 algal species across 6 phyla, 53 families, and 90 genera were recorded, with Bacillariophyta being dominant (51.26%). No significant spatial differences ($P>0.05$) in algal standing stock were found, while significant annual differences ($P<0.001$) occurred, indicating higher temporal than spatial heterogeneity. Chebei river had the highest total number of species (184), while Liede river showed the highest abundance (2.47×10^9 cells/m²) (3.16×10^3 mg/m²), Shannon Diversity Index (3.14), and Evenness Index (0.66). Annually, Liede river had the largest increases in number of species and Shannon Diversity Index (41.43%, and 15.58%, respectively), and Shahe river had the highest abundance and biomass increase (92.62%, and 96.53% respectively), with Evenness Index remaining stable at around 0.6. These findings highlight the effectiveness of near-natural restoration for attached algae recovery. Niche analysis revealed a collaborative community structure with efficient resource use and low competition. The standardized random rate analysis revealed that deterministic and stochastic processes both play dominant roles during restoration. Environmental heterogeneity impacts the relative dominance of these two processes. Redundancy analysis indicated that TN, TP, DO, water depth, and flow velocity are key factors affecting the recovery of rivers attached algae communities. The research results provide empirical support and a scientific basis for the effectiveness of near-natural restoration in urban river channels.

Keywords: Urban rivers; low water level operation; attached algae restoration; community construction; spatiotemporal heterogeneity; environmental factors.

城市河流作为城市生态系统的重要组成部分,其生物多样性和生态健康对于城市环境的可持续性具有重要意义^[1]。在城市化进程中,因生境破坏和长期接纳污水而造成城市河流水质恶化和生态退化^[2-3]。附着藻类,作为城市河流生态系统中的关键初级生产者,通过光合作用促进氧气产生,维持水体溶解氧水平,对水生生物的生存至关重要^[4];同时,它们通过吸收和转化营养物质,减少水体富营养化的风险,发挥着水质净化和生态健康的核心作用^[5]。分析多维环境因子对附着藻类群落的影响,特别是水质条件(如溶解氧、营养盐浓度)^[6-7]和水文特征(如流量、流速)^[7]等因素,解析附着藻类群落的恢复机制是理解水生生态系统动态发展的关键,能够为附着藻类群落构建过程提供重要的生态学依据,探讨随机性过程与确定性过程在附着藻类群落构建中的作用^[8-10],有助于增强城市河流尤其是近自然恢复过程中生物多样性发展的研究实践^[9-10]。

广州作为粤港澳大湾区的重要城市,其发达的水系网络在改善城市景观和维持水环境生态稳定性方面扮演着至关重要的角色。自2019年起,广州市采取了一系列措施来应对这些挑战,包括控源截污、清污分流,以及创新的低水位运行策略,以营造近自然生境,有效消除了河涌的黑臭现象,提升了水质,促进河流湿地生态的自修复^[11]。近年来,国际提倡基于近自然的水体修复理念以恢复水体生态健康,该理念通过最小化人为干预、模拟自然水生生态系统的结构和功能来促进水体自我修复,但这些近自然修复措施对于水体环境变化的敏感指示生物——附着藻类群落的恢复动态及响应机制研究还相对缺乏^[15],限制了该理论的发展和实践应用。为此,本研究以广州市典型城市河流——车陂涌、猎德涌、沙河涌为例,基于近自然修复后四年(2020~2023年)连续监测河流上下游全程样点的附着藻类群落组成与多样性,采用校正随机率、生态位宽度及生态位重叠指数和种间联结等分析,解析河流附着藻类群落恢复的结构特征与种间关系,探究其群落构建动态对环境变化的响应机制,并甄别其关键环境驱动因子,为河流生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究选取广州市覆盖主城区贯穿南北直通珠江的三条河流——车陂涌、猎德涌和沙河涌作为研究对象，主要功能为城市排水和调蓄，流域面积共计 119.26 平方公里。三条河流结合下游水闸联合调度，与珠江广州段相连，优化再生水补水流量和时段，河流平均水深范围为 0.37~0.67 m，平均流速范围为 0.15~0.21 m/s，平均流量范围为 0.55~1.35 m³/s，减少清淤频率，创造不同水位生境，提升水下光照强度，促进底泥自然净化。所研究河流整体水质均得到提升，以车陂涌综合水质条件最好，其次是沙河涌，而猎德涌的水质相对较差。

车陂涌作为主城区山溪补水的典型河流，且中游有城市污水处理厂尾水补水，全长 19.4 公里，弯曲度较高，河流中上游生境自然化程度较高，下游城区段河岸硬质化，水深较高；猎德涌作为尾水补水的典型河流，全长约 4.3 公里，该河流渠道化程度较高，弯曲度较低，原生境较单一，降水水位后浅水区域扩大，形成洲滩生境；沙河涌，上游主要补水来源为城市污水处理厂尾水，少量溪流补水，多支流汇入，全长 14.24 公里，弯曲度居中，降水水位后，浅水区域扩大，形成边滩生境，底质含沙量丰富。

考虑广州地区常年水温维持在 20℃ 以上，且目标河流下游均受闸坝调控，全年水位相对稳定，加之丰水期为附着藻类的生长旺季，故选择 2020~2023 年 9 月前丰水期开展连续四年每年一次的附着藻类定性与定量监测分析，以反映藻类恢复的动态变化。如图 1 所示，目标河流共设置 21 个调查点位，以确保各条河涌的全面覆盖，特别关注重要支流汇入口或合流处，从上至下游，车陂涌、猎德涌和沙河涌监测点位分别有 8 个（标记为 C₁~C₈）、6 个（标记为 L₁~L₆）和 7 个（标记为 S₁~S₇）。

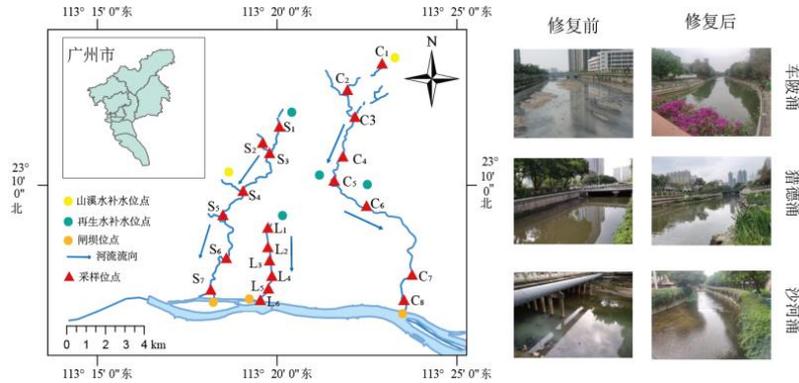


图 1 车陂涌 (C)、猎德涌 (L)、沙河涌 (S) 监测点位分布与修复前后生境对比

Fig. Distribution of monitoring sites and comparison of habitat before and after restoration at Chebei River (C), Liede River (L), and Shahe River (S)

1.2 样品采集与鉴定

附着藻类定性、定量样品均采用天然基质采样法收集，分别用甲醛溶液和鲁哥氏液固定样品^[6-7]，物种鉴定和生物量计算均参考《淡水浮游生物研究方法》^[13]。同期采集各位点混合水样，现场测定水深 (Depth)、流速 (V)、流量 (Q) 等指标，总氮 (TN)、总磷 (TP)、硝氮 (NH₃-N)、氨氮 (NO₃-N)、化学需氧量 (COD)、五日生化需氧量 (BOD₅)、磷酸盐 (PO₄-P) 含量根据《地表水环境质量标准 G3838-2002》标准方法室内测定。

1.3 数据处理与分析

本研究采用 ArcGIS 10.8 绘制采样点分布图，呈现研究区域空间布局；运用 Excel 2020 计算物种数、丰度和生物量并进行初步数据整理。其中，空间变化以各采样点三个重复样的平均值进行数据分析，时间

变化则基于每一年每条河所有采样点的平均值进行数据分析。后续数据分析在 R 4.3.3 中完成，正式分析前使用 `vegan` 包进行 `Hellinger` 转换对数据标准化。计算香农多样性指数 (H) 和均匀度指数 (J) 评估附着藻类群落特性，通过主坐标分析 (PCoA) 和置换多元方差分析 (PerMANOVA) 识别群落时空分布模式及差异性。

采用校正随机率 (MST) 分析确定性与随机性过程的相对重要性^[14]， MST 值 < 0.5 ，表明确定性过程占主导作用； MST 值 > 0.5 ，则表明随机性过程占主导作用。计算生态位宽度 (B_i) 和生态位重叠程度 (O_{ik}) 量化物种资源利用及竞争关系。

利用优势度指数 (Y) 筛选优势度排名前二十的物种并进行种间联结分析，通过方差比率 (VR) 和检验统计量 (W) 评估物种间相互作用的显著性，当 $VR = 1$ 、 $VR < 1$ 和 $VR > 1$ 分别表示物种间的无关联、负协变和正协变关系。采用统计量 W 检验 VR 值偏离 1 的显著程度，如果 $\chi^2_{0.95N} < W < \chi^2_{0.05N}$ 的概率有 90%，物种间总体无关联。为筛选关键环境因子，通过计算方差膨胀因子 (VIF) 剔除具有多重共线性的变量进而进行冗余分析，并通过线性拟合分析确定关键环境因子阈值。图形绘制与美化通过 R 4.3.3 和 Origin 2021 实现，部分图形经 Adobe Illustrator 2021 优化，确保结果展示清晰专业。

2 结果与分析

2.1 生物群落组成特征

2.1.1 物种组成时空变化特征 本研究共记录到 193 种附着藻类，隶属于 6 门 53 科 90 属，以硅藻门为主，共有 99 种 (51.26%)，其次为绿藻门和蓝藻门，分别为 52 种 (27.05%) 和 13 种 (6.70%) (图 2a)。从空间上看，河流上下游附着藻物种组成上无显著空间差异 ($P > 0.05$)，车陂涌共鉴定附着藻 184 种，隶属于 6 门 53 科 80 属；猎德涌共鉴定附着藻 155 种，隶属于 6 门 46 科 69 属；沙河涌共鉴定附着藻 175 种，隶属于 6 门 52 科 82 属。物种数排序为 184 种 (车陂涌) $>$ 175 种 (沙河涌) $>$ 155 种 (猎德涌) (图 2a)。从年际上看，增长率为 41.43% (猎德涌) $>$ 38.68% (沙河涌) $>$ 12.16% (车陂涌) (图 2b)，三条河流的附着藻类物种数量均有所增加，其中三条河流硅藻门物种数量均显著提升 ($P < 0.001$) (图 2b)，硅藻增长率排序为 51.74% (猎德涌) $>$ 50.00% (沙河涌) $>$ 36.00% (车陂涌) (图 2b)。

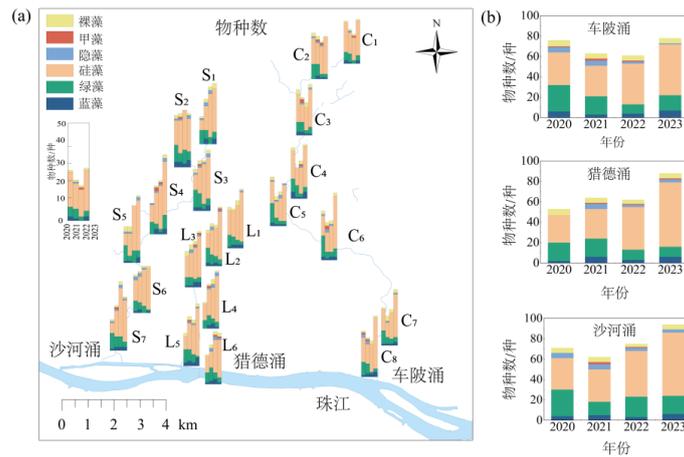


图 2 城市河流附着藻类物种组成的空间分布 (a) 和年际变化 (b)

Fig.2 Spatial distribution (a) and annual variations (b) of attached algae communities in urban rivers.

2.1.2 生物现存量时空变化特征 如图 3 所示，从空间上看，附着藻类丰度和生物量组成上均无显著的空间

差异 ($P>0.05$), 三条河流丰度排序为 2.17×10^9 cells/m² (猎德涌) $> 1.56 \times 10^9$ cells/m² (沙河涌) $> 1.30 \times 10^9$ cells/m² (车陂涌), 生物量排序为 3.16×10^3 mg/m² (猎德涌) $> 2.66 \times 10^3$ mg/m² (沙河涌) $> 2.50 \times 10^3$ mg/m² (车陂涌) (图 3a~b)。从时间上看, 三条河流附着藻丰度均呈现出显著的年际增长趋势 ($P<0.001$), 增幅排序为 92.62% (沙河涌) $> 91.24%$ (猎德涌) $> 82.10%$ (车陂涌), 但猎德涌在 2022-2023 年之间有回落现象(降幅为 33.43%); 三条河流附着藻生物量也呈现年际增长趋势 ($P<0.001$), 增幅对应为 96.53% (沙河涌) $> 93.95%$ (猎德涌) $> 93.37%$ (车陂涌) (图 3c~d)。

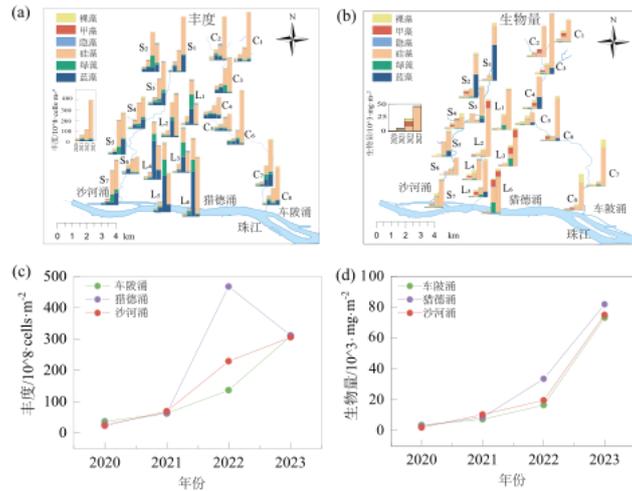


图 3 附着藻类丰度和生物量的空间 (a、b) 与时间 (c、d) 变化特征

Fig.3 Spatial (a, b) and temporal (c, d) variation characteristics of attached algae communities abundance and biomass

2.1.3 生物多样性时空变化特征 如图 4 所示, 在空间上, 三条河流附着藻类群落香农多样性指数和均匀度指数差异均不显著 ($P>0.05$), 香农多样性指数排序为: 3.14 (猎德涌) > 2.70 (车陂涌) > 2.58 (沙河涌); 均匀度指数排序为: 0.66 (猎德涌) > 0.57 (车陂涌) > 0.54 (沙河涌)。在时间上, 藻类群落香农多样性差异显著 ($P<0.001$), 增幅排序为: 15.58% (猎德涌) $> 8.96%$ (沙河涌) $> 2.56%$ (车陂涌); 均匀度指数除了猎德涌 2022 年出现陡降外, 年际变化较为稳定 (0.6 左右), 表明河流藻类多样性逐步稳定化。

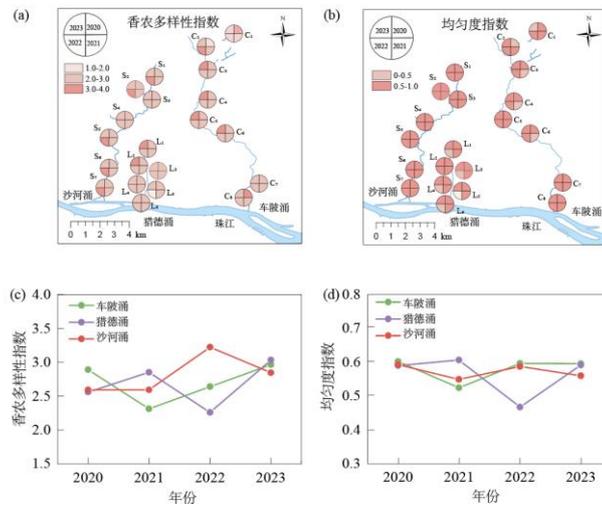


图 4 附着藻类香农多样性指数与均匀度指数的空间(a、b)和时间(b、d)分布特征

Fig.4 Spatial (a, b) and temporal (b, d) distribution of Shannon Diversity Index and Evenness Index of attached algae communities

2.1.4 群落变异特征 如图 5 所示, 基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析结果表明, 附着藻类群落组成在时空分布上存在差异性。时间上, 主坐标的第一轴能解释所研究河流藻类群落的变化为 18.42%~20.89%, 第二轴能解释的变化为 21.46%~25.05%; 空间上, 主坐标的第一轴能解释所研究河流藻类群落 15.32%的变化, 第二轴能解释 17.30%的变化。置换多元方差分析结果表明, 三条河流藻类群落不同年际间 ($R^2 = 0.49\sim 0.60$, $P = 0.001$) 和河流间 ($R^2 = 0.04$, $P = 0.02$) 存在时空分布差异性, 河流上下游无显著差异 ($P > 0.05$), 可能是由于丰水期水流的冲刷使附着藻在整个河段发生了迁移, 反映出同一气候条件下城市河流生态系统恢复的相似性和异质性。

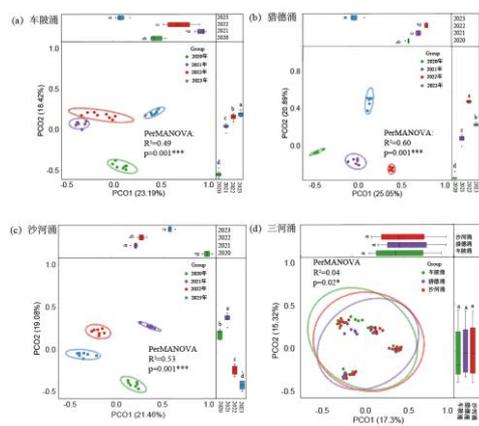


图 5 城市河流附着藻类群落组成时空分布的主坐标 (PCoA) 分析

Fig.5 Principal coordinates analysis (PCoA) of attached algae communities composition and its spatiotemporal distribution in urban rivers

2.2 生物生态位与种间联结

本研究采用生态位宽度和重叠指数, 量化三条河流在 2020 至 2023 年间近自然恢复过程中附着藻类群落的生态适应性和竞争关系。在时间上, 车陂涌和猎德涌的生态位宽度年均变化不显著 ($P > 0.05$), 均值分别为 2.53 和 2.19; 而沙河涌附着藻类生态位宽度的年际变化显著 ($P < 0.05$) 年均值为 2.50。空间上, 三

条河流的生态位宽度年平均差异不大,说明在近自然修复过程中,三条河流藻类群落的生态适应性总体上保持一致,不同河流的藻类群落在资源利用和环境适应方面没有发生显著的分化(图 6a-c)。

一般认为物种生态位重叠度超过 0.6 就会发生竞争,车陂涌每年超过 80%物种、猎德涌每年约 70%的物种以及沙河涌每年约 60%的物种生态位重叠指数低于 0.6,表明所研究河流藻类群落的大部分物种之间生态位重叠度较低,种间竞争相对较弱,群落结构处于相对稳定状态(图 6d-f)。

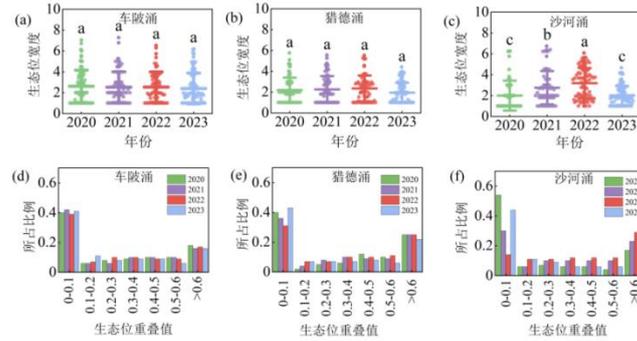


图 6 附着藻类生态位宽度及重叠度指数

Fig.6 Ecological niche breadth and overlap index of attached algae communities

种间联结反映了群落演替阶段的稳定性,本研究采用方差比率法(VR)对广州典型城市河流附着藻类群落优势度排名前二十的物种的种间联结进行测定,如表 1 所示,车陂涌附着藻群落种间联结 VR 从初始的 0.65 到 1.95,2021~2023 年 VR 均大于 1,检验统计量 W 值在 $\chi^2_{0.95N} < W < \chi^2_{0.05N}$ 范围外,显示种群间从不显著负联结向显著正联结转变,说明群落结构正向演替过程较为稳定,种间关系优化,群落自我调节能力增强,群落稳定性提升。而猎德涌群落由不显著负联结向不显著正联结转变,种间关联较弱到关联加强,显示藻类群落结构还在发展阶段;沙河涌物种间关联有波动,群落结构不稳定,但朝着正向关联发展。

表 1 河流附着藻类群落物种总体联结分析结果

Table.1 Results of the overall species association analysis of periphyton communities in urban rivers

城市河流	年份	方差比率(VR)	检验统计量(W)	临界值	检验结果
车陂涌	2020 年	0.65	13.04	2.17-14.07	不显著负联结
	2021 年	1.71	34.28	2.17-14.07	显著正联结
	2022 年	1.25	25.15	2.17-14.07	显著正联结
	2023 年	1.95	38.08	2.17-14.07	显著正联结
猎德涌	2020 年	0.30	1.80	1.15-11.07	不显著负联结
	2021 年	0.45	2.73	1.15-11.07	不显著负联结
	2022 年	1.18	7.10	1.15-11.07	不显著正联结
沙河涌	2020 年	0.18	1.29	1.64-12.59	显著负联结
	2021 年	0.40	2.85	1.64-12.59	不显著负联结
	2022 年	0.95	20.11	1.64-12.59	显著负联结
	2023 年	1.20	8.41	1.64-12.59	不显著正联结

2.3 生物群落构建机制

利用校正随机率量化模型计算确定性过程和随机性过程在附着藻类群落构建中的相对重要性。如图 7 所示,在时间上,2020 年车陂涌和沙河涌校正随机率(MST)均值分布高于 50% 阈值线,从随机性过程开始,到 2023 年,车陂涌和沙河涌校正随机率(MST)均值分布仍高于 50% 阈值线,以随机性过程结束;

2020年猎德涌校正随机率(MST)均值分布低于50%阈值线,则从确定性过程开始,到2023年,猎德涌校正随机率(MST)均值分布高于50%阈值线,以随机性过程结束。在空间上,车陂涌和猎德涌藻类群落的校正随机率(MST)均值分布高于50%阈值线,而沙河涌的校正随机率(MST)均值分布低于50%阈值线,这说明沙河涌附着藻类群落受确定性选择影响更大。

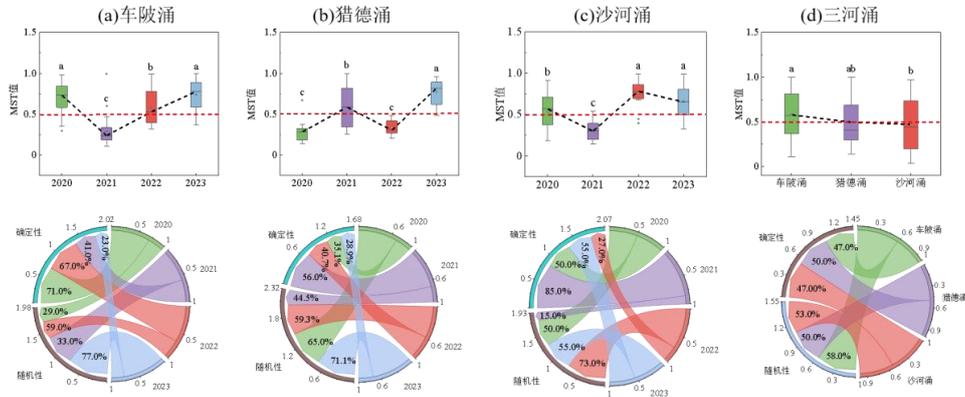


图7 三条河流附着藻类群落的随机性比率 MST 与贡献比例

Fig.7 Stochastic ratio MST and its contribution proportions of attached algae communities in urban Rivers

3 讨论

3.1 附着藻类群落恢复过程与时空分布特征

本研究结果显示,所研究河流的附着藻类群落中硅藻为主要藻类,绿藻和蓝藻次之。附着藻类群落结构特征受到水文、水质等条件的影响,河流形态变化及补水措施往往会导致水文条件的改变,附着藻会通过调整自身的生态适应性来维持其生态系统的平衡^[15]。低水位运行能提升水下光照强度,增加底质透气性,促进有机质和营养盐的降解,从而有效改善底质污染状况^[16]。河流水质好转为附着藻提供优良的生存环境,底质条件的优化为附着藻提供适宜的附着位点,这些物理化学条件有效保护和补充附着藻的种源,恢复细胞代谢活性,从治理前长期处于黑臭状态、藻类生长受到严重抑制甚至生物衰亡,到2020年实现了初级生物量积累(图3),为附着藻种群建立与发展提供先决条件。城市河流的物理、化学和生物基础条件构建后,广州河流附着藻类群落的物种多样性、丰度和生物量均有所提升(图2~4),表明低水位措施能够促进附着藻类主要类群的生长繁殖。

三条河流恢复情况在时空上呈现出差异,车陂涌的物种数最高(图2),这与其生境多样化有关,为更多种类的藻类提供了适宜的附着环境^[17]。而猎德涌在丰度、生物量、香农多样性指数和均匀度指数方面均表现最佳(图3~4)。这可能与其河流形态较为笔直且较短(弯曲度 $S = 1.12$)的特点有关,这种形态有利于水流的快速交换和更新,减少水流停滞对藻类生长的抑制作用,从而维持较高的均匀度^[18]。此外,猎德涌中心商业区,环境污染相对较高,这种环境条件可能促使了对环境变化敏感的藻类如硅藻(图2)在恢复期间迅速增长,以便更好地适应新的环境状况^[18]。此外,均匀度指数在三条河流年际变化较为稳定(0.6左右),反映了三条河流在恢复过程中生态位的均衡分配和低水位运行措施的持续性^[18]。结果表明,附着藻类群落的恢复不仅受物理化学条件的直接影响,还与河流形态和环境梯度密切相关。

3.2 附着藻类群落恢复的环境驱动

研究表明,水动力(Depth、V、Q), DO, 营养盐(TN、TP、PO₄-P、NO₃-N), 有机物(COD、BOD)是影响附着藻类群落结构的主要因素(解释度50.67%~64.44%)(图9a)。从2020-2021到2022-2023年,营养盐的影响格局发生了显著变化:在2020、2021年,DO与TN为关键因子(总解释率为35%~50%),

突显了氮营养盐和氧气在藻类群落恢复初期的重要性；在 2022、2023 年，TN、NO₃-N 及 PO₄-P 成为关键因子（总解释率 25%~30%）。TN 作为关键水质因子，解释率均超过 10%，持续发挥影响作用。这表明随着修复措施的推进，不同的营养盐因子在不同阶段对藻类群落的恢复产生了动态影响。

河流水体 TN 和 TP 显著降低（TN/TP 比值从 13:1 至 22:1）对附着藻类的丰度、生物量及多样性均有显著的正相关关系（ $P < 0.05$ ），经典的 Redfield 比率即藻类生长的最佳氮磷比为 16:1，被认为是藻类健康生长和生理平衡所需的理想比例^[19]。这种比值的动态变化可能为藻类创造了相对平衡的营养获取条件，从而有利于藻类群落的恢复进程。此外，COD、BOD 和 PO₄-P 等环境因子的改善，也对藻类群落的恢复有着正向效应^[20]。溶解氧的增加为藻类的光合作用和代谢活动提供了良好的条件，而 COD 和 BOD 的降低表明水体中有机污染的减少，从而减轻了对水生生物的胁迫作用。

水深和流速被识别为主要水动力影响因子^[6]，会影响光照强度、水流动力学和水质条件等环境因素，进而影响附着藻类的生长和分布^[16]。所研究河流下游均设置闸坝，形成上游水浅，下游水深的独立河段，并由于河流底质生境和地势差异，使得不同断面流速存在较大差异。水深作为关键水动力条件，在 2020、2021 和 2023 年均显著影响藻类丰度（解释为 10%~20%）（图 9a），这些变化体现了环境条件和藻类生长需求的动态响应。三条河流调查结果也表明，随着水深从 0.02 m 到 3.06 m 逐渐上升，水体 DO 显著降低、而 TN 和 TP 浓度显著增加（ $P < 0.05$ ），说明低水位运行影响了水质改善，且水动力条件通过调节水质间接影响藻类群落，低流速河段利于藻类附着生长，附着藻类的生物量（图 3a、图 3c）和丰度（图 3b、图 3d）也相对较高，这可能暗示着在特定的综合环境条件下，低流速对藻类附着生长有一定的促进作用。

根据拟合结果水深生境为 0.78~1.52 m 变化和 TN/TP 11:1~17:1 变化时（图 9b）的综合环境条件更有利于藻类的光合作用和群落恢复。环境因子存在相互作用共同影响着附着藻类群落的恢复，营养和光照条件适宜能满足藻类群落最大的竞争力和生产力^[16]，这些条件在金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究中得到了体现^[20]。综上所述，氮、磷营养盐、溶解氧和水深是影响广州市河流附着藻类群落恢复的主要环境驱动因素。

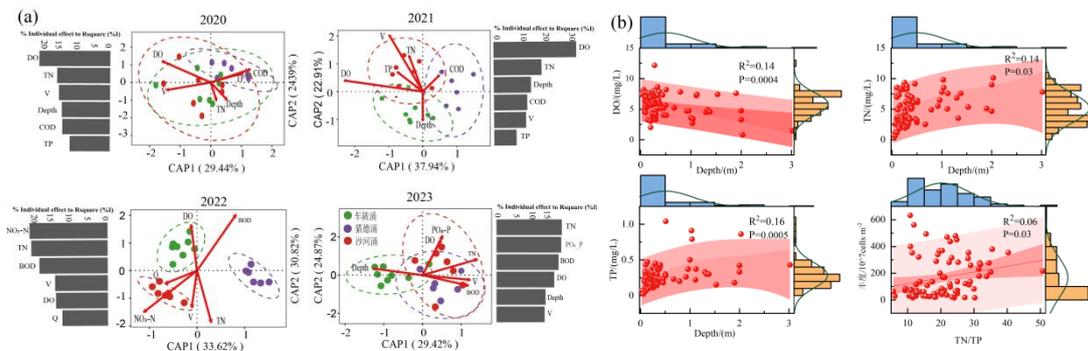


图 9 城市河流附着藻类群落结构对环境因子响应的 CAP 分析 (a) 与阈值分析 (b)

Fig.9 CAP (a) and threshold analysis (b) of attached algae communities responded to environmental factors in urban rivers

3.3 附着藻类群落的构建机制

生态位特征是理解群落结构和物种共存机制的关键^[21]，所研究河流藻类年均生态位宽度变化较小（图 7），表明藻类群落已经具有一定的适应性和资源利用能力^[21]。河涌藻类群落间的生态位重叠指数（图 7）也反映出较低的竞争压力^[21]。三条河涌藻类群落均有向正联结发展的趋势（表 1），这也印证了随着时间进程，附着藻群落有在恢复的趋势。鉴于藻类群落在适应性、资源利用能力、竞争压力以及恢复趋势上已呈现出特定特征，进一步探究其生态过程，有助于揭示藻类群落演变规律。

生态过程包括确定性过程和随机性过程，两者之间的平衡会影响群落中物种的聚集^[22]。车陂涌和沙河

涌初始阶段随机性占主导,可能是因为修复开始时污染程度高,水位高且水流交流频繁;同时,它们的弯曲度较高(分别为 $S = 1.48$ 和 $S = 1.27$),水流速度变化和河岸带面积增加以及营养物质富集,为藻类演替提供丰富生态位分化条件,有利于藻类群落扩散。弯曲的河流在弯道处形成漩涡和回流,减缓流速,为藻类提供良好的附着条件,降低冲刷风险;同时扩大表面积,增加河岸带和浅水区,这些区域光照和营养丰富,促进藻类生长^[21]。随着修复过程中环境改善和污染降低以及低水位措施下水流的稳定,藻类群落构建转向确定性过程主导,藻类群落适应性增强、内部竞争逐渐形成,使群落结构趋于稳定。但污染波动致环境不稳定,藻类群落仍在发展(表1),环境和藻类群落共同作用使构建过程再受随机性过程主导^[8]。

猎德涌初始阶段确定性过程占主导,可能是由于其河流短小、笔直致使水流速度较快且环境条件相对均一(图3),藻类对修复后的环境适应性增强,种间竞争关系逐渐形成,群落结构趋于稳定^[22]。但在四年间,确定性与随机性过程依次更替,这可能与猎德涌位于中心商业区,环境污染相对较高有关。水体的高有机污染和低溶解氧导致环境条件不稳定,污染程度的波动增加了随机性过程的影响,影响藻类扩散和附着。同时,丰水期间坝放闸也可能引入随机性因素,改变藻类群落结构^[23]。此外,藻类群落自身的演替过程也会导致确定性过程与随机性过程的交替^[24]。

在空间上,随机性在车陂涌和猎德涌($MST > 50\%$)的附着藻类群落里占主导作用,而确定性过程主导沙河涌($MST < 50\%$)的附着藻类群落构建。这种空间差异主要源于三河涌不同的初始环境异质性、生物多样性 and 河涌的弯曲程度。车陂涌底质异质性与水文连通性动态变化构成的多元生境,以及较好的水质条件和较高的弯曲度($S = 1.48$),为藻类演替提供了丰富的生态位分化条件,有利于藻类群落的扩散。猎德涌作为典型黑臭水体,水质和底质的显著改善使其选择性压力减弱,物种恢复急速上升(图2),但其笔直的河流($S = 1.12$)限制了生境的多样性,生境的单一性限制了系统恢复的稳定性,使其群落构建机制随机性过程占主导。沙河涌的底质主要为沙质,这限制了附着藻类的附着位点,且其弯曲程度($S = 1.27$)居中,水流速度(图9a)和沙质底质对藻类附着的影响,使得藻类群落的构建受到确定性过程主导,这与雅鲁藏布江下游浮游植物群落构建的研究结果相似,该研究显示确定性过程在浮游植物群落构建中起重要作用^[22]。

4 结论

综上,通过低水位运行策略和近自然修复措施,显著提高了附着藻类群落的恢复潜力,优化了群落结构和功能,提升了生态系统功能,具体体现为物种数、丰度、生物量、多样性的全面提升。环境异质性、扩散限制和物种间相互作用共同影响了所研究河流附着藻类群落的构建,其中,确定性过程和随机性过程都有主导其构建过程。但是除了上述因素,在附着藻类群落的恢复上尚有诸多无法解释的因素,未来城市河流近自然恢复策略应更多的考虑如区域营养效应、周边土地利用方式及长期性效果等综合因素。

5 参考文献

- [1] Fu H, Gaüzère P, García J M *et al.* Mitigation of urbanization effects on aquatic ecosystems by synchronous ecological restoration. *Water Research*, 2021, **204**: 117587. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117587.
- [2] Søndergaard M, Jeppesen E. Anthropogenic impacts on lake and river ecosystems, and approaches to restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2007, **44**(6): 1089-1094. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2007.01295.x.
- [3] Kiefer K, Müller A, Singer H *et al.* New relevant pesticide transformation products in groundwater detected using target and suspect screening for agricultural and urban micropollutants with LC-HRMS. *Water Research*, 2019, **162**: 114972. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114972.

- [4] Zhao K, Wang W, Huang H *et al.* Differences in seasonal dynamics, ecological driving factors and assembly mechanisms of planktonic and periphytic algae in the highly urban Fenhe River. *Ecological Processes*, 2024, **13**:70. DOI: 10.1186/s13717-024-00552-2.
- [5] Wang M, Wang W-X. Infiltration of freshwater food chain by nanoplastics: An examination of trophic transfer and biological impact. *Chemosphere*, 2023, **345**: 140541. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140541.
- [6] Liu C, Liu XY, Zhou JC *et al.* Response of stream benthic algal diversity to urbanization: A case study in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(24): 10041-10050.[刘婵, 刘心怡, 周佳诚等. 河流着生藻类多样性对城镇化的响应——以深圳市为例. *生态学报*, 2022, **42**(24): 10041-10050.]
- [7] Yu ZL, Chen W, Zhao R *et al.* 2021. Periphytic algae community structure and its relation to environment factors in the main stream of the Songhua River from 2014 to 2019. *Environmental Science*, **42**(1): 1-10. DOI: 10.13227/j.hjkk.202007175.
- [8] Yang SX, Yang Q, Li XD *et al.* Deterministic processes dominate the geographic distribution pattern and community assembly of phytoplankton in typical plateau rivers. *Biodiversity Science*, 2023, **31**(7): 43-57.[杨胜娟, 杨清, 李晓东等. 确定性过程主导高原典型河流浮游植物地理分布格局和群落构建. *生物多样性*, 2023, **31**(7): 43-57.]
- [9] Wu SH, Dong YZ, Stoeck T *et al.* Geographic characteristics and environmental variables determine the diversities and assembly of the algal communities in interconnected river-lake systems. *Water Research*, 2023, **233**: 119792. DOI: 10.1016/j.watres. 2023. 119792.
- [10] Chen K, Meng ZH, Li XM *et al.* Phytoplankton community structure and driving mechanism of its construction process in autumn in ZheLin Reservoir, Lake Poyang Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(2): 433-444.[陈康, 孟子豪, 李学梅等. 鄱阳湖流域柘林水库秋季浮游植物群落结构及其构建过程驱动机制. *湖泊科学*, 2022, **34**(2): 433-444.]
- [11] Chen WL, Wu Q, Li YP. Ecological restoration mechanism and practical effects of low water level operation in urban rivers. *Water Resources Protection*, 2024, **40**(02): 16-22.[陈文龙, 吴琼, 李一平. 城市河流低水位运行生态修复机制与实践效果. *水资源保护*, 2024, **40**(02): 16-22.]
- [12] Isabwe A, Yang JR, Wang YM *et al.* Riverine bacterioplankton and phytoplankton assembly along an environmental gradient induced by urbanization. *Limnology and Oceanography*, 2022, **67**(9): 1943-1958. DOI: 10.1002/lno.11805.
- [13] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [14] Ning DL; Deng Y; Tiedje JM *et al.* General framework for quantitatively assessing ecological stochasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**: 16892 - 16898. DOI: 10.1073/pnas.1904623116.
- [15] Sheng XR, Luo ZL, Sun G, *et al.* Community structure and dominant species niche characteristics of periphytic algae in the Beijing section of the Chaobai River. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, **14**(01):52-59.[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. *环境工程技术学报*, 2024, **14**(01):52-59.]
- [16] 李明, 陈文龙, 吴琼. 广州市城市河流低水位运行生态修复理念与实践. *中国水利*, 2023, (09): 31-35.
- [17] Li ZF, Jiang XM, Wang J *et al.* Species diversity and maintenance mechanisms of macroinvertebrates in the water source area of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(6): 2059-2086.[李正飞, 蒋小明, 王军, 等. 南水北调中线水源地河流大型无脊椎动物物种多样性及其维持机制. *湖泊科学*, 2023, **35**(6):2059-2086.]
- [18] Li Q, Li Z, Ding S *et al.* Analysis on the community structure and influencing factors of periphyton in Huangshui River. *Environmental Science and Technology*, 2024, **47**(01): 43-51. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1680.23.338.[李晴, 李墨, 丁森, 等. 湟水河着生藻类群落结构特征及影响因子分析. *环境科学与技术*, 2024, **47** (01): 43-51. DOI: 10.19 672/ j.cnki. 1003 -6504.

1680.23.338.]

- [19] Klausmeier CA, Litchman E, Daufresne T *et al.* Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*, 2004, **429**(6988), 174-177. DOI: 10.1038/nature02454.
- [20] Gao Q, Ni JR, Zhao XF *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the typical section of Chin-sha River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55** (03), 571-579. DOI:10.13209/j.0479-8023. 2019.022.[高琦,倪晋仁,赵先富等.金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究.北京大学学报(自然科学版),2019, **55**(03):571-579.]
- [21] Shang KY, Han Y, Gao X *et al.* Spatial Pattern of Periphytic Algae Communities in Major Tributaries of the Upper Jinsha River and the Environmental Drivers *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(05): 1392-1406.[尚坤钰,韩毓,高欣,等.金沙江上游主要支流着生藻类群落的空间格局及其影响因子.湖泊科学,2024,**36**(05):1392-1406.]
- [22] Chen YC, Yu Q, Zhu DJ *et al.* Possible influencing factors on phytoplankton growth and decay in rivers: review and perspective. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(04): 186-195.[陈永灿,俞茜,朱德军,等.河流中浮游藻类生长的可能影响因素研究进展与展望.水力发电学报,2014,**33**(04):186-195.]
- [23] Liu X, Song YT, Ni TC *et al.* Ecological evolution of algae in connected reservoirs under the influence of water transfer: Algal density, community structure, and assembly processes. *Science of The Total Environment*, 2024, **915**: 170086. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170086.
- [24] Lv H, Yang M, Cheng Y *et al.* Response of the algal-bacterial community to thermal stratification succession in a deep-water reservoir: Community structure, co-assembly patterns, and functional groups. *Environmental Research*, 2024, **915**: 119688. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119688.