

环境 DNA 生物监测揭示城市河流鱼类群落组装机制*

何文祥¹, 邹艳婷^{2**}, 胡丹心¹, 郝辉擎², 吴竞泽², 郑康华¹, 刘子方², 李飞龙², 张 远²

(1: 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510006)

(2: 广东工业大学生态环境与资源学院, 广东省高等学校湾区生态安全与绿色发展基础研究卓越中心, 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室, 广州 510006)

摘要: 城市化的加剧导致城市河流水质恶化、栖息地丧失及生态系统退化, 对鱼类等水生生物群落产生了显著影响。解析随机性过程和确定性过程在群落组装中的相对影响对于鱼类保护至关重要。本研究采用环境 DNA (eDNA) 技术和传统调查方法, 对广州市城市河流 30 个点位进行鱼类监测, 进一步分析鱼类群落特征及其组装机制。结果表明: (1) 广州市城市河流鱼类群落呈现出高多样性特征, eDNA 技术监测到 15 目 39 科 139 种, 传统调查方法监测到 6 目 10 科 32 种属, 以鲤形目 (Cypriniformes)、虾虎鱼目 (Gobiiformes) 和鲇形目 (Siluriformes) 为主, 外来物种如齐氏罗非鱼 (*Coptodon zillii*) 等占据优势。(2) 环境因子对 eDNA 技术和传统调查方法鱼类群落结构差异的解释率分别为 49.26% 和 61.15%, 其中 pH、溶解氧以及高锰酸盐指数等对鱼类群落结构变化有显著影响, 这表明水质参数在塑造鱼类群落多样性和分布方面起着关键作用。(3) 群落组装机制分析表明, 确定性过程在广州河流鱼类群落组装中占主导地位, 但扩散限制等随机过程的影响亦不可忽视。

关键词: 城市河流; 环境 DNA; 鱼类群落; 群落组装; 环境过滤

Environmental DNA-based biotic monitoring reveals fish community assembly mechanisms in urban rivers*

He Wenxiang¹, Zou Yanting^{2**}, Hu Danxin¹, Hao Huibo², Wu Jingze², Zheng Kanghua¹, Liu Zifang², Li Feilong² & Zhang Yuan²

(1: Guangzhou Ecological and Environmental Monitoring Center of Guangdong Province, Guangzhou 510006, P.R.China)

(2: Guangdong Basic Research Center of Excellence for Ecological Security and Green Development, Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P.R.China)

Abstract: The deterioration of water quality, loss of habitats, and degradation of ecosystems in urban rivers, caused by intensified urbanization, have significantly impacted aquatic biological communities, including fish. In order to establish effective conservation strategies for fish populations, it is imperative to undertake a comprehensive analysis of the relative contributions of stochastic and deterministic processes in community assembly. In this study, fish monitoring was conducted at 30 sampling sites in Guangzhou's urban rivers using both environmental DNA (eDNA) and traditional survey methods. The subsequent analysis focused on the composition and assembly mechanisms of fish communities. The results demonstrated that: (1) The fish communities inhabiting the urban rivers of Guangzhou demonstrated notable biodiversity. The eDNA monitoring survey identified 15 orders, 39 families, and 139 species, whereas the conventional survey recorded 6 orders, 10 families, and 32 species (genera). The fish assemblage was predominantly composed of Cypriniformes, Gobiiformes, and Siluriformes, with invasive species such as *Coptodon zillii* demonstrating ecological dominance. (2) The analysis revealed that environmental factors accounted for 49.26% and 61.15% of the observed variance in community structure, as measured by eDNA and traditional survey data, respectively. Key water quality parameters, in-

* 2025-01-12 收稿; 2025-04-17 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42477489) 资助。

** 通信作者; E-mail: 18230527059@163.com。

cluding pH, dissolved oxygen, and the permanganate index, exerted significant effects on the restructuring of fish communities. This underscores their pivotal role in shaping community diversity and spatial distribution patterns. (3) Analysis of community assembly mechanisms indicated that deterministic processes primarily governed the assembly of fish communities in Guangzhou's rivers, while the impact of stochastic processes, including dispersal limitation, remained significant.

Keywords: Urban rivers; eDNA; fish communities; community assembly; environmental filtering

鱼类作为水生生态系统中的关键指示物种^[1],其物种多样性和群落结构不仅是评估水体生态健康的重要生物指标,更是水域生态恢复与管理的核心内容^[2-3]。深入解析确定性过程(如环境过滤)和随机过程(如扩散限制、生态漂变等)对群落组装的相对贡献,对于制定科学的鱼类保护策略具有重要的理论指导意义^[4-5]。研究表明,强烈的环境过滤效应会使鱼类仅在适宜的栖息地中出现,并导致鱼类功能特征趋于聚集^[6-7]。而当随机过程占主导地位时,鱼类的空间分布表现出更大的随机性,促进了鱼类功能性状的分化^[8]。鱼类群落组装主要受环境过滤效应驱动时,即物种的分布格局和共存机制主要取决于环境因子的筛选作用,这强调了通过改善水质、恢复栖息地等环境治理措施来保护鱼类多样性的重要性^[9]。然而,当随机过程在群落组装中起主导作用时,保护策略应着重考虑维持景观连通性、消除人为屏障以及保护物种扩散廊道等空间管理措施^[10]。因此,明确鱼类群落组装的主导机制,不仅有助于深化对群落生态学理论的理解,更能为制定区域差异化的保护策略提供科学依据,从而更有效地维持鱼类多样性和生态系统功能的完整性^[11]。

近年来,量化确定性过程与随机性过程对群落构建相对贡献的方法学显著发展^[12],其理论框架主要源于生态位理论和中性理论的整合^[13]。生态位理论认为,群落结构的形成由确定性过程决定^[14]。相对地,中性理论则认为群落结构是由随机过程形成的^[15]。生态位理论和中性理论的验证可通过多种工具和算法实现。生态位理论可通过生态位宽度、生态位重叠、功能性状分析等方法,量化环境过滤和生态位分化的作用^[16];中性理论则多采用 Hubbell 中性模型拟合、距离衰减分析等方法,评估随机过程的影响^[17-18]。但同时,准确评估群落多样性水平是探究组装机制的前提,环境 DNA(eDNA)技术作为一种新兴的生物监测手段,克服了传统方法的局限性,能够对水生生态系统中的鱼类多样性进行全面、快速和非侵入性评估^[19-20]。Li 等^[21]通过 eDNA 技术揭示了云南热带河流鱼类群落组成对人类活动强度的响应,并通过中性模型分析表明,人类活动会增强确定性过程在群落构建中的相对贡献。Giam 等^[22]基于零模型分析了温带溪流鱼类群落的组装机制,为非随机结构提供了有力证据,表明鱼类群落组装主要受环境过滤控制。Chen 等^[23]通过 eDNA 宏条形码揭示人为干扰河口中本地和非本地鱼类群落特征,并进一步通过中性模型和零模型分析,揭示二者对人为压力存在分化的群落构建机制响应。目前,人们普遍认识到生态群落是由确定性过程和随机过程共同塑造的,但这两个过程的相对重要性在不同栖息地中有所差异^[24]。

城市河流作为城市水体的关键组成部分,不仅承担着复杂的生态功能,还在维持人类社会生活质量方面发挥着重要作用^[25]。然而,快速城市化与高强度人类活动显著加剧了水体污染程度,城市河流常面临“城市溪流综合症”等复合环境问题^[26-27],主要表现为营养物质和污染物浓度升高、栖息地结构的通道简化和均质化、生物丰富度降低以及耐受物种的优势增加^[28-29],这些已导致全球生态系统面临重要威胁,对鱼类群落产生了显著影响^[30-31]。然而,在城市河流生态系统中,鱼类群落组装机制的研究尚显不足^[32-33]。

广州作为中国城市化进程快速发展的代表性城市,其河流鱼类群落正面临显著威胁^[34-35]。因此,本研究主要通过 eDNA 技术,辅以传统调查方法对河流鱼类群落组成及其多样性进行评估,进而探讨城市化背景下鱼类群落多样性的环境驱动因素,并运用中性群落模型揭示鱼类群落组装机制,为河流生态系统的保护与恢复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

为探究城市化背景下河流鱼类群落特征及其组装机制,本研究在广州市域内选取珠江干流、流溪河、增江及近珠江口六大水道(顺德、市桥、沙湾、蕉门、虎门、洪奇沥水道)构建采样网络,布设 30 个样点(图 1,附表 I)。样点设计基于水文连通性、生态功能梯度及人类活动强度的空间异质性,遵循以下原则:平衡可达性

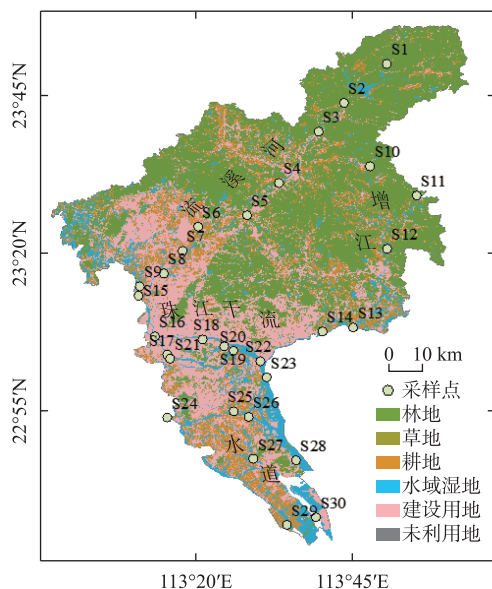


图1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

与生态代表性,确保实际操作的可能性以及样点充分反映研究区域的生态特征;覆盖水系结构关键节点,包括干流与支流交汇区、上游源头区、中游城市过渡带及下游河口敏感区;衔接现有生态环境监测断面,增强数据可比性。其中,流溪河布设9个点位(S1~S9);增江布设5个点位(S10~S14);珠江广州段布设9个点位(S15~S23);顺德水道布设1个点位(S24);市桥水道布设1个点位(S25);沙湾水道布设1个点位(S26);蕉门水道布设2个点位(S27、S30);虎门水道布设1个点位(S28);洪奇沥水道布设1个点位(S29)。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样品采集与测定 于2024年4—5月采用系统性分层混合采样策略,在目标水域预设样点进行eDNA样品采集。在采样点的不同位置(如深水区、浅水区等)使用采水器沿水流方向采集足够的水样,以确保样品能够代表该区域的物种信息,采样前用纯净水润洗采水器3次以减少交叉污染,采样时保持进样口位于水面下5~6 cm避免表层干扰。采集的水样均匀混合分装至3个1 L无菌采水袋中,以降低平行样本间的变异性以及提高检测的灵敏度。为评估采样过程中的潜在污染,每天

设置2~3个野外阴性,即用润洗后的采水器采集纯净水并装入采样瓶中。所有水样冷藏保存并在当天使用0.45 μm 混合纤维素滤膜进行真空抽滤,并将滤膜保存在-80 $^{\circ}\text{C}$ 下,以待后续DNA提取。

传统鱼类调查整合地笼捕捞与市场数据采集。在每个采样点,当天放置2~3个地笼,第2天回收,确保连续作业时间不少于12 h。此外,还通过走访当地集市、码头的渔民和鱼贩,系统收集了捕捞记录(包括渔获物种类组成和捕获频次等),以补充地笼采样数据的时空局限性。在野外对收集到的鱼类个体进行鉴定、计数和称重(精确到克),无法当场鉴定的鱼类样品浸泡在10%福尔马林缓冲液中,带回实验室进行鉴定。

同时使用便携式水质参数仪对每个样点的水温、pH、电导率、溶解氧(DO)等水质参数进行现场测定,保证测量过程中,设备与水体保持稳定接触,避免剧烈搅动水体。水体中总磷(TP)浓度采用钼酸铵分光光度法测定(GB/T 11893—1989);BOD₅采用稀释与接种法测定(HJ 505—2009);总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(HJ 636—2012);氨氮(NH₃-N)浓度采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009);高锰酸盐指数(COD_{Mn})根据GB/T 11892—1989测定。

1.2.2 DNA提取与PCR扩增 为防止人为污染,DNA提取和PCR扩增过程中严格遵循实验室方案,佩戴一次性手套和干净的实验服,用75%酒精擦洗实验台,并对实验室进行紫外线照射30 min。使用DNeasy Blood & Tissue Kit (Qiagen, Germany)对样品进行DNA提取,使用超微量分光光度计(北京凯奥科技发展有限公司)检测提取的DNA浓度。随后采用鱼类通用引物(Tele02-F:5'-AAACTCGTGCCAGCCACC-3';Tele02-R:5'-GGGTATCTAATCCCAGTTTG-3')对12S rRNA区域进行扩增。引物由上海生物工程有限公司合成。每个样本在3次重复的PCR重复中扩增,随后合并用于下一个步骤。所有PCR检测均采用阴性对照(无核酸酶水为DNA模板)。PCR反应体系共20 μL ,包含10 μL 酶mix,6 μL DEPC,上、下游引物各1 μL ,DNA模板2 μL 。95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性5 min,95 $^{\circ}\text{C}$ 变性15 s,56 $^{\circ}\text{C}$ 退火20 s,72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸15 s,72 $^{\circ}\text{C}$ 彻底延伸5 min,35个循环。取5 μL PCR产物在2%琼脂糖凝胶电泳上观察,剩下的产物用于下一代测序。测序数据从本地服务器下载,用obitools v4进行生信分析。

1.3 数据分析

将同一样品中的相同序列进行合并后,为去除测序和扩增过程中产生的错误、嵌合序列,使用Obitools v4进行降噪处理。根据不同样品中重复出现的相似序列的相似度和读数,将高度相似且读数较低的序列进

行清除,得到 ZOTUs(也可称为 ASVs/ESVs)。过滤低丰度(<10 读数)的分子分类单元(可能为假阳性、污染序列或未去除的嵌合体)。物种注释通过 BLAST 比对本本地化参考数据库完成,设置最低相似度阈值为 97%。最终生成的 ZOTUs 需满足以下标准:ZOTUs 需在至少 2/3 的生物重复样品中检出;对于序列数低于空白值的 ZOTUs,将其序列数赋值 0,视为在该采样点未出现;所有 ZOTUs 在所有采样点的总序列数低于总序列数的 0.001%,视为不可靠数据,ZOTUs 给予删除。

在 ArcGIS 10.3 中完成采样点位制图。鱼类群落差异通过冗余分析(RDA)解析,原始物种丰度数据经 Hellinger 转换(R 包“vegan”)以消除零膨胀偏差,基于 Bray-Curtis 相异度矩阵构建排序模型,揭示环境梯度与群落组成的关联性;距离衰减效应采用线性混合模型量化,对样本地理距离与群落组成相似性(基于 Bray-Curtis 距离)进行线性回归,并通过 Mantel 检验(999 次置换)评估显著性;为区分群落组装机制,通过中性模型(NCM)评估确定性过程和随机性过程在鱼类群落组装中的相对重要性;校正随机率通过 R4.2.2 中的“NST”包计算。

2 结果

2.1 鱼类群落物种组成

传统调查方法共捕获鱼类 294 尾,隶属于 6 目 10 科 32 种属(附表 II)。eDNA 技术监测共获得原始序列数 509823 条,经过筛选后获得有效序列 391613 条,隶属于 15 目 39 科 139 种(附表 III)。在 eDNA 技术监测结果中,鲤形目(Cypriniformes)占据了主导地位,共有 75 种,占比达到 53.96%,其次是虾虎鱼目(Gobiiformes)和鲇形目(Siluriformes),分别有 20 种和 9 种,占比分别为 14.39% 和 6.47%。在传统调查中,鲤形目同样占主导地位,有 22 种,占比为 68.75%,其次是鲇形目和虾虎鱼目,分别有 5 种和 3 种,占比分别为 15.63% 和 9.38%。此外,研究观察到河流中存在大量非本地鱼类物种,传统调查方法共检测到 4 种外来鱼类,包括麦瑞加拉鲮(*Cirrhinus mrigala*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)和伽利略罗非鱼(*Oreochromis galilaea*),其中齐氏罗非鱼在各个采样点的出现频次最高(图 2)。在 eDNA 监测中,齐氏罗非鱼和尼罗罗非鱼的相对丰度也占据着绝对优势,且 eDNA 技术捕获到了更多外来种,如下口鲶“清道夫”(*Hypostomus plecostomus*)和蟾胡鲇(*Clarias batrachus*)等。

通过两种调查方法在属水平上共获得 105 属,其中 eDNA 技术获得 99 属,传统调查法获得 27 属,其中 21 属为共有属,eDNA 技术对传统调查方法的覆盖度达 77.78%;在种水平上共获得鱼类 154 种,其中 eDNA 技术获得 139 种,传统调查法获得 32 种,其中 17 种为共有种,eDNA 技术对传统调查方法的覆盖度达 53.13%(图 3,附表 IV)。

2.2 鱼类群落多样性变化及其影响因素

传统调查方法中各点位监测到的物种数量普遍较少,最多仅监测到 4 种(图 4),且有 5 个点位未监测到鱼类;珠江广州段未考虑点位分布,9 个点位共监测到了 16 种鱼类。eDNA 技术监测到的物种多样性更为丰富,其中,S4 点位的物种数最多,共 91 种鱼类,水道中 S27 点位物种数最低,仅监测到 7 种。与城市化程度较高的珠江干流和水道相比,人类活动相对较少的流溪

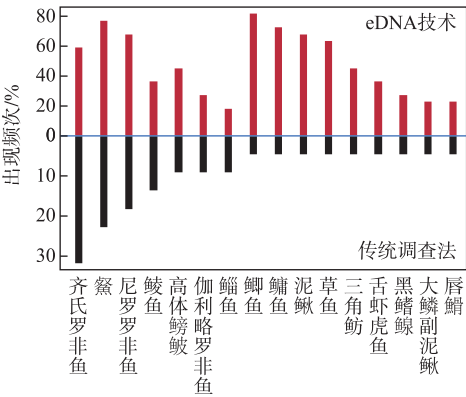


图 2 各物种在所有监测点位中的检出频次
Fig.2 Detection frequency of each species at all monitoring sites

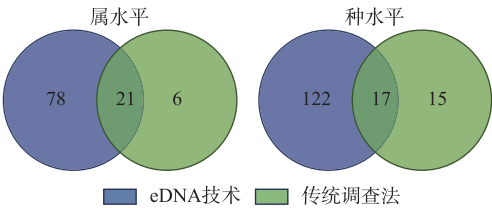


图 3 基于 eDNA 技术和传统调查法监测到的鱼类对比
Fig.3 Comparison of fish monitored by eDNA technology and traditional survey method

河和增江的物种多样性更高。

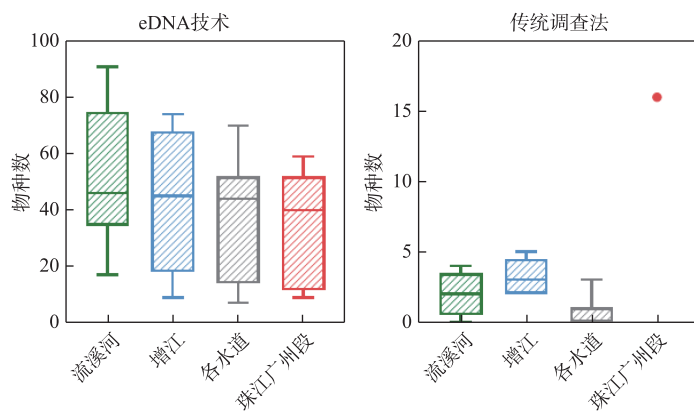


图4 各区域物种数分析

Fig.4 Analysis of the number of species in each region

为评估环境变量对鱼类群落组成的影响,首先对数据进行了消除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA)。结果表明,基于 eDNA 分析的数据中,梯度长度的第一轴值小于 4;而在传统调查分析中,第一轴值小于 3。根据 DCA 分析结果的标准,本研究采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 进行后续分析。RDA 分析结果如图 5 所示。RDA1 对 eDNA 监测的鱼类群落结构变异的解释率为 28.83%,RDA2 的解释率为 20.43%,其中,pH、DO 以及 COD_{Mn} 对鱼类群落结构的变化有显著影响。RDA1 对传统调查监测的鱼类群落结构差异的解释率为 46.74%,RDA2 对鱼类群落结构差异的解释率为 14.41%。其中,DO、TN 以及 COD_{Mn} 对鱼类群落结构的变化有显著影响。

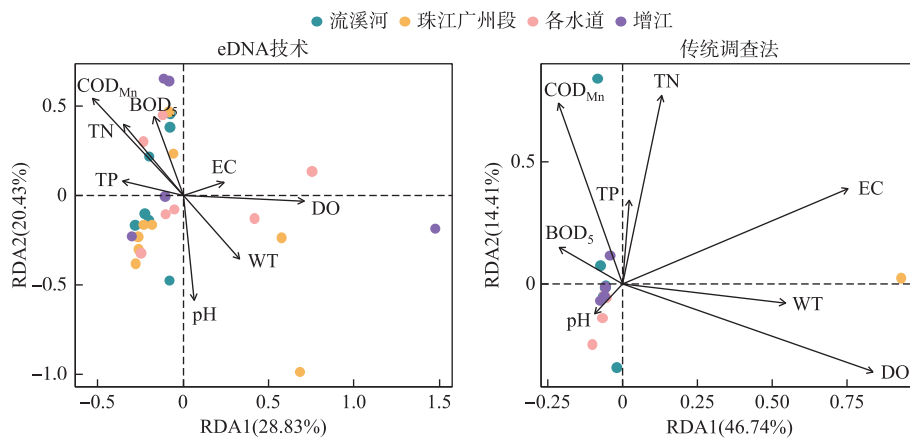


图5 鱼类群落结构环境影响因素分析

Fig.5 Analysis of environmental factors influencing fish community structure

2.3 鱼类群落组装机理

为探究地理因子对鱼类群落组装过程的影响,采用距离衰减模型分析方法分别对 eDNA 技术和传统调查方法获得的鱼类群落 Bray-Curtis 相似性与径流距离进行线性回归分析。结果表明,eDNA 技术监测的鱼类群落结构相似性呈现显著的随径流距离增加而衰减的模式 ($R^2 = 0.017, P = 0.05$),而传统调查方法无明显趋势(图 6)。

为进一步解析鱼类群落组装机理,对 eDNA 技术和传统调查法数据分别应用了中性群落模型。结果表

明,中性群落模型对 eDNA 技术和传统调查法获得的鱼类群落结构变化的解释率分别为 55.4% 和 34.4%。中性群落模型对 eDNA 数据的拟合效果优于传统调查数据,然而两种方法的物种迁移率(Nm 值)均较低。在物种迁移率较低背景下,鱼类群落的空间分布可能受到环境或生态位选择的限制。这一结果与距离衰减模型的分析结果一致,表明鱼类群落的空间分布受限于物种的迁移能力。由于标准随机率(NST)在分析过程中出现了大于 1 的情况,研究采用校正随机率(MST)来量化随机性过程和确定性过程在鱼类群落组装过程中的相对贡献,结果显示 MST 值大部分集中在 0~0.5 区间,进一步表明鱼类群落结构变化主要受到确定性过程的影响(图 7)。总体而言,随机性过程和确定性过程在不同程度上影响着广州市河流鱼类的群落组装,但确定性过程略占主导地位。

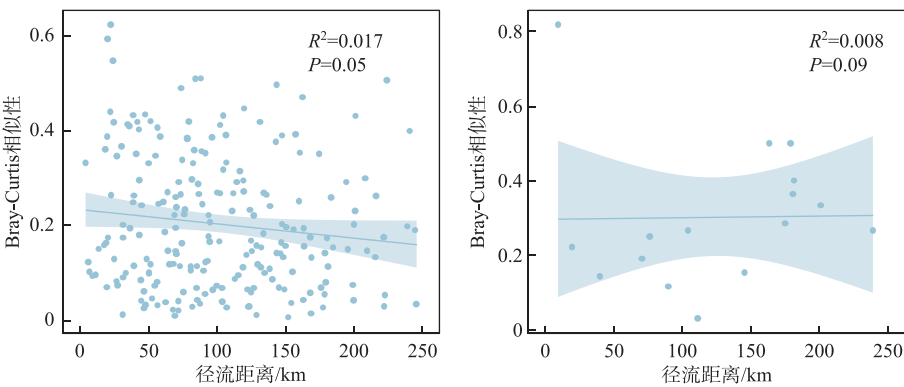


图 6 鱼类群落相似度与径流距离之间的线性回归

Fig.6 Linear regression of fish community similarity and runoff distance

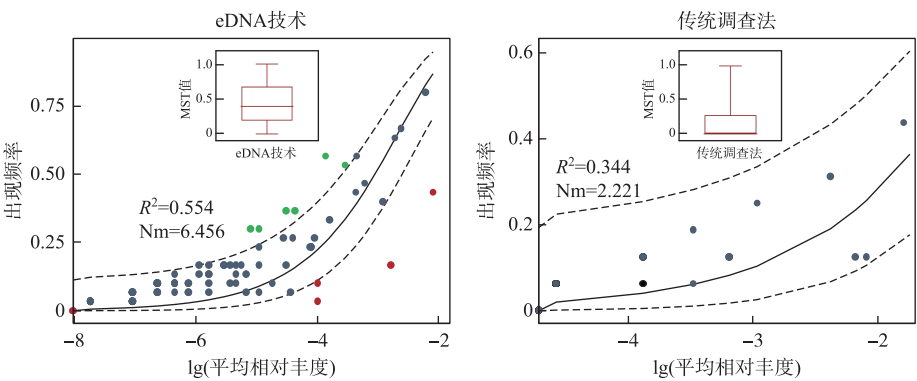


图 7 基于中性群落模型和校正随机率探究鱼类群落组装机制

Fig.7 Exploring fish community assembly mechanisms based on the neutral community model and modified stochasticity ratio

3 讨论

广州城市河流鱼类群落呈现出高多样性特征,但存在外来物种扩张与本地物种衰退的趋势。两种方法共获得鱼类 154 种,其中 eDNA 技术共监测到 139 种鱼类,传统调查捕获到了 32 种。进一步对鱼类群落分析发现,外来物种具有高检出频率,齐氏罗非鱼为优势度最高的物种,而本地物种丰度普遍下降,表明生物入侵已对本地鱼类群落构成严重生态威胁。这与夏雨果等^[36]的研究结果大致吻合,即广东省江河鱼类在 2010 年后出现的种类为 223 种,约 39% 的历史本地种类未出现,本地鱼类资源明显衰退。已有研究发现城

城市化导致外来物种丰富度的增加超过了本地物种的损失,这导致分类多样性的整体增加^[37]。但外来物种的持续存在可能通过改变营养结构^[38]、触发生态位重构及种间杂交导致的基因侵蚀等途径,威胁区域生态系统稳定性^[39-40]。相较于传统调查方法,eDNA 技术检测到了更多的鱼类,主要考虑到传统调查方法受到捕捞设备的局限,地笼主要捕获中下层水域鱼类,对复杂微生境(如沉水植被区、深潭区)及敏感物种的监测存在明显盲区,建议未来研究整合刺网、声呐探测等多维技术手段,以全面覆盖不同栖息地类型和鱼类生态习性^[41]。

城市河流鱼类群落结构显著受到 DO、pH、TN 及 COD_{Mn} 等水质参数的调控作用。传统调查数据反映的群落结构差异具有更高的环境解释率,这可能源于 eDNA 技术捕获了更丰富的生物信息,但却易受环境背景噪声干扰。城市化进程对城市河流水环境的影响集中体现在人为干扰引发的水质参数改变。研究证实,未经处理的生活污水和工业废水输入显著增加了水体中氮磷等营养物质及有机化合物负荷^[42],微生物降解过程可导致 DO 浓度急剧下降。同时,城市化显著改变河流底质组成(如沉积物粒径与渗透性)和河岸带植被覆盖度^[43],前者通过吸附-解吸等作用调控营养盐循环效率;后者则通过改变光照条件和地表径流,对水体温度、DO 时空分布及有机物输入产生级联效应。这些由城市化驱动的水质变化与本研究发现的 DO、pH、TN 及 COD_{Mn} 等关键调控因子高度耦合,证实了人类活动对河流生态系统的作用路径。作为水生生态系统的重要指示类群^[44],鱼类群落的呼吸代谢、营养获取和繁殖行为等关键生理过程对水质参数具有高度敏感性,大量研究已系统论证了水质参数对鱼类群落结构的决定性影响^[45-46]。但值得注意的是,气候因素与土地利用等其他因素也可能通过直接或间接途径影响鱼类栖息地适宜性。如降水模式变化可能通过改变水文连通性调控鱼类洄游路径,而流域内不透水地表扩张可能通过加剧地表径流携带污染物输入,与水质参数产生协同效应^[47-48]。这些未被量化的环境因子与水质参数的交互作用,可能解释了部分鱼类群落变化中尚未明确的原因。因此,未来研究需构建多尺度环境分析模型以全面解析城市化对水生生物多样性的影响机制。

在城市河流尺度鱼类群落组装的调控机制主要由确定性过程主导。城市中水闸、水泵站等水利设施通过截断水流,创造了不同的局部水文条件,导致栖息地碎片化^[49],但同时河流栖息地趋于同质化^[50],塑造出有别于传统模式的独特城市河流生态特征^[51]。城市化进程中的人类活动,导致了鱼类群落的空间异质性主要由人为因素引起的栖息地差异所驱动,而非单纯依赖于自然的地理分隔^[52]。这与 Li 等^[53]在黄河流域和高原河流研究中提出的随机过程主导论形成鲜明对比,这可能源于本研究区人类活动强度显著高于高原河流系统。相关研究证实,随着人类干扰强度增加,环境过滤等确定性过程在群落组装中的权重呈上升趋势,而扩散限制等随机过程的影响力相对减弱^[21,54]。一些研究也表明,在城市化强烈的区域,水质和栖息地的改变对物种群落有更大的影响^[55]。值得注意的是,确定性过程的实际贡献度仍低于理论预期,有研究表明随机性过程的影响可能被高估了,因为其本质上是多重确定性过程综合作用的结果。因此本研究可能高估了随机性过程的普遍性,但研究结果仍能反映出河流连通性与鱼类适应性机制对生态弹性的维持作用^[56]。

基于鱼类群落特征及组装机制,研究提出以多尺度生态修复为核心、适应性管理为保障的河流保护策略。针对广州市河流生态特征,亟需加强对外来物种(特别是高威胁种)的动态监测与管理体系建设,同时改善本地鱼类栖息环境,增强本地鱼类竞争力^[57]。确定性过程主导的群落组装机制表明,生态修复需以“改善环境驱动因子”为核心,多尺度(微生境-河段-流域)实施栖息地修复,结合关键物种保护与动态管理重建自然筛选机制^[58]。同时,需警惕气候变化等新兴压力源对确定性过程的干扰,推动适应性管理策略的迭代优化^[54]。扩散限制等随机过程仍对群落结构有一定影响,恢复水文连通性是鱼类保护的重要补充措施^[11]。优先拆除阻碍洄游的闸坝或改建生态鱼道,通过植被缓冲带建设与河道形态修复构建连续生态廊道,促进鱼类迁移扩散与基因交流^[59]。为保障修复效能,需建立涵盖鱼类群落结构、水文连通性及水质参数的立体监测网络,确保快速城市化地区城市生态系统的生态完整性和可持续性。

总体而言,研究揭示了在城市河流这一受人类活动强烈干扰的特定生态系统中,确定性过程占据主导地位,为后续相关研究在方法选择与机制分析上提供了重要参考,有助于推动城市河流生态研究的深入发展,为河流生态保护与修复策略的制定提供科学依据。

4 结论

1) 广州城市河流鱼类群落呈现出高多样性特征, eDNA 技术监测到 15 目 39 科 139 种, 传统调查方法监测到 6 目 10 科 32 种属, 以鲤形目、虾虎鱼目和鲇形目为主, 外来物种齐氏罗非鱼等占据优势。

2) 环境因子对 eDNA 技术和传统调查法鱼类群落结构差异的解释率分别为 49.26% 和 61.15%, 其中 pH、DO 以及 COD_{Mn} 等对鱼类群落结构的改变有显著影响, 这表明水质参数在塑造鱼类群落多样性和分布方面起着关键作用, 反映了环境质量对鱼类生态系统的深远影响。

3) 群落构建机制分析表明, 确定性过程在广州河流鱼类群落组装中占主导地位, 但扩散限制等随机过程的影响亦不可忽视。

5 附录

附表 I ~ IV 见电子版 (DOI: 10.18307/2025.0408)。

6 参考文献

- [1] McElroy ME, Dressler TL, Titcomb GC *et al.* Calibrating environmental DNA metabarcoding to conventional surveys for measuring fish species richness. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, **8**: 276. DOI: 10.3389/fevo.2020.00276.
- [2] Zhang C, Liu F, Liu HZ *et al.* Temporal changes in taxonomic and functional diversity of fish assemblages in the Upper Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 875789. DOI: 10.3389/fenvs.2022.875789.
- [3] Shi Y, Wang SP, Lin XL *et al.* Unraveling fish diversity and assembly patterns in a temperate river: Evidence from environmental DNA metabarcoding and morphological data. *Ecological Indicators*, 2023, **156**: 111111. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111111.
- [4] Chen X, Li ZF, Boda P *et al.* Environmental filtering in the dry season and spatial structuring in the wet: Different fish community assembly rules revealed in a large subtropical floodplain lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(46): 69875-69887. DOI: 10.1007/s11356-022-20529-y.
- [5] Tao J, Ding CZ, Chen JN *et al.* Boosting freshwater fish conservation with high-resolution distribution mapping across a large territory. *Conservation Biology*, 2023, **37**(3): e14036. DOI: 10.1111/cobi.14036.
- [6] Chen X, Li Z, Boda P *et al.* Environmental filtering in the dry season and spatial structuring in the wet: different fish community assembly rules revealed in a large subtropical floodplain lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(46): 69875-69887. DOI: 10.1007/s11356-022-20529-y.
- [7] Camara EM, Araújo FG, de Azevedo MCC *et al.* Unraveling trait-based fish community assembly in tropical reservoirs. *River Research and Applications*, 2024, **40**(2): 217-232. DOI: 10.1002/rra.4223.
- [8] Montanyès M, Weigel B, Lindegren M. Community assembly processes and drivers shaping marine fish community structure in the North Sea. *Ecography*, 2023, **2023**(10): e06642. DOI: 10.1111/ecog.06642.
- [9] Liu X, Zhang L, Wang YC *et al.* Microbiome analysis in Asia's largest watershed reveals inconsistent biogeographic pattern and microbial assembly mechanisms in river and lake systems. *iScience*, 2024, **27**(6): 110053. DOI: 10.1016/j.isci.2024.110053.
- [10] Ford BM, Roberts JD. Latitudinal gradients of dispersal and niche processes mediating neutral assembly of marine fish communities. *Marine Biology*, 2018, **165**(5): 94. DOI: 10.1007/s00227-018-3356-5.
- [11] Jia YT, Jiang YH, Liu YH *et al.* Unravelling fish community assembly in shallow lakes: Insights from functional and phylogenetic diversity. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2022, **32**(2): 623-644. DOI: 10.1007/s11160-021-09688-2.
- [12] Lu Q, Zhang SY, Du JQ *et al.* Multi-group biodiversity distributions and drivers of metacommunity organization along a glacial-fluvial-limnic pathway on the Tibetan Plateau. *Environmental Research*, 2023, **220**: 115236. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115236.
- [13] Liu HQ, Yang SX, Chao X *et al.* Environmental screening drives the assembly process of periphytic algae community in the lower reaches of Yarlung Zangbo River. *Environmental Science*, 2025, **46**(2): 889-899. DOI: 10.13227/j.hjxx.202402145. [刘惠秋, 杨胜娟, 巢欣等. 环境筛选驱动雅鲁藏布江下游着生藻类群落组装过程. 环境科学, 2025, **46**(2): 889-899.]
- [14] Tripathi BM, Stegen JC, Kim M *et al.* Soil pH mediates the balance between stochastic and deterministic assembly of bacteria. *The ISME Journal*, 2018, **12**(4): 1072-1083. DOI: 10.1038/s41396-018-0082-4.
- [15] Tucker CM, Shoemaker LG, Davies KF *et al.* Differentiating between niche and neutral assembly in metacommunities using null models of β -diversity. *Oikos*, 2016, **125**(6): 778-789. DOI: 10.1111/oik.02803.
- [16] Matthews TJ, Whittaker RJ. Neutral theory and the species abundance distribution: Recent developments and prospects for unifying niche

- and neutral perspectives. *Ecology and Evolution*, 2014, **4**(11): 2263-2277. DOI: 10.1002/ece3.1092.
- [17] Kembel SW. Disentangling niche and neutral influences on community assembly: Assessing the performance of community phylogenetic structure tests. *Ecology Letters*, 2009, **12**(9): 949-960. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01354.x.
- [18] Ning DL, Deng Y, Tiedje JM *et al.* A general framework for quantitatively assessing ecological stochasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(34): 16892-16898. DOI: 10.1073/pnas.1904623116.
- [19] Xie RL, Zhao GF, Yang JH *et al.* eDNA metabarcoding revealed differential structures of aquatic communities in a dynamic freshwater ecosystem shaped by habitat heterogeneity. *Environmental Research*, 2021, **201**: 111602. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111602.
- [20] Li XQ, Wu KY, Ni DF *et al.* Impacts of cascade dams on the diversity of fish species in an important tributary of the upper reaches of Yangtze River based on environmental DNA technology: A case study of Qijiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(19): 8865-8883. DOI: 10.20103/j.stxb.202307181531.
- [21] Li M, Cheng XP, Li SZ *et al.* Human activities strengthen the influence of deterministic processes in the mechanisms of fish community assembly in tropical rivers of Yunnan, China. *Journal of Environmental Management*, 2024, **368**: 122131. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122131.
- [22] Giam X, Olden JD. Environment and predation govern fish community assembly in temperate streams. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, **25**(10): 1194-1205. DOI: 10.1111/geb.12475.
- [23] Chen WJ, Wang JJ, Zhao YQ *et al.* Contrasting pollution responses of native and non-native fish communities in anthropogenically disturbed estuaries unveiled by eDNA metabarcoding. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, **480**: 136323. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.136323.
- [24] Heino J, Melo AS, Siqueira T *et al.* Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: Patterns, processes and prospects. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(5): 845-869. DOI: 10.1111/fwb.12533.
- [25] Lawson L, Edge CB, Fortin MJ *et al.* Temporal change in urban fish biodiversity—Gains, losses, and drivers of change. *Ecology and Evolution*, 2024, **14**(2): e10845. DOI: 10.1002/ece3.10845.
- [26] Wang YY, Wang WX, Liu LJ *et al.* Spatial heterogeneity of the effects of river network patterns on water quality in highly urbanized city. *Science of the Total Environment*, 2024, **937**: 173549. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173549.
- [27] Booth DB, Roy AH, Smith B *et al.* Global perspectives on the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, 2016, **35**(1): 412-420. DOI: 10.1086/684940.
- [28] Xu XM, Yuan YB, Wang ZL *et al.* Environmental DNA metabarcoding reveals the impacts of anthropogenic pollution on multitrophic aquatic communities across an urban river of western China. *Environmental Research*, 2023, **216**(Pt 1): 114512. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114512.
- [29] Andrade-Muñoz AS, Di Prinzio CY, Assef YA *et al.* Implications of wastewater discharges on environmental features and fish communities in an urban river. *Urban Ecosystems*, 2023, **26**(3): 779-791. DOI: 10.1007/s11252-023-01331-1.
- [30] Yang B, Qu X, Liu H *et al.* Urbanization reduces fish taxonomic and functional diversity while increases phylogenetic diversity in subtropical rivers. *Science of the Total Environment*, 2024, **908**: 168178. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168178.
- [31] Theis S, Chin ATM, Wallace A *et al.* Complexity and spatial structuring of fish communities across urbanized watersheds and waterfronts. *Urban Ecosystems*, 2024, **28**(1): 55. DOI: 10.1007/s11252-024-01640-z.
- [32] Zhou JZ, Ning DL. Stochastic community assembly: Does it matter in microbial ecology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2017, **81**(4): e00002-17. DOI: 10.1128/MMBR.00002-17.
- [33] Zhang T, Xu S, Yan RM *et al.* Similar geographic patterns but distinct assembly processes of abundant and rare bacterioplankton communities in river networks of the Taihu Basin. *Water Research*, 2022, **211**: 118057. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118057.
- [34] Zhang J, Xiao WY, Chen W. Transformation from rural industrialization to suburban industrialization in Guangzhou: Pattern and mechanism. *Land*, 2024, **13**(9): 1485. DOI: 10.3390/land13091485.
- [35] Zhang S, Zheng YT, Zhan AB *et al.* Environmental DNA captures native and non-native fish community variations across the lentic and lotic systems of a megacity. *Science Advances*, 2022, **8**(6): eabk0097. DOI: 10.1126/sciadv.abk0097.
- [36] Xia YG, Chen WT, Li XH *et al.* Fish diversity in inland rivers of Guangdong Province. *South China Fisheries Science*, 2024, **20**(4): 34-45. [夏雨果, 陈蔚涛, 李新辉等. 广东省内陆江河鱼类多样性. 南方水产科学, 2024, **20**(4): 34-45.]
- [37] Qiao JL, Liu Y, Fu HX *et al.* Urbanization affects the taxonomic and functional alpha and beta diversity of fish assemblages in streams of subtropical China. *Ecological Indicators*, 2022, **144**: 109441. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109441.
- [38] Gracida-Juárez CA, Ioannou CC, Genner MJ. Competitive dominance and broad environmental tolerance favour invasive success of Nile *Tilapia*. *Hydrobiologia*, 2022, **849**(5): 1161-1176. DOI: 10.1007/s10750-021-04778-5.
- [39] Dueñas MA, Hemming DJ, Roberts A *et al.* The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species: A systematic review. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **26**: e01476. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01476.
- [40] Champneys T, Genner MJ, Ioannou CC. Invasive Nile *Tilapia* dominates a threatened indigenous *Tilapia* in competition over shelter. *Hydrobiologia*, 2021, **848**(16): 3747-3762. DOI: 10.1007/s10750-020-04341-8.

- [41] Li ZY, Jiang PW, Wang LX *et al.* A comparison of seasonal composition and structure of fish community between environmental DNA technology and gillnetting in the Pearl River Estuary, China. *Ecological Indicators*, 2023, **147**: 109915. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109915.
- [42] Tóth R, Czeplédi I, Kern B *et al.* Land use effects in riverscapes: Diversity and environmental drivers of stream fish communities in protected, agricultural and urban landscapes. *Ecological Indicators*, 2019, **101**: 742-748. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.063.
- [43] Barrios M, Teixeira de Mello F. Urbanization impacts water quality and the use of microhabitats by fish in subtropical agricultural streams. *Environmental Conservation*, 2022, **49**(3): 155-163. DOI: 10.1017/s0376892922000200.
- [44] Akongyuure DN, Alhassan EH. Variation of water quality parameters and correlation among them and fish catch per unit effort of the Tono Reservoir in Northern Ghana. *Journal of Freshwater Ecology*, 2021, **36**(1): 253-269. DOI: 10.1080/02705060.2021.1969295.
- [45] Huang YQ, Pang RC, Li XT *et al.* Ecology health evaluation system based on fish movement behavior response. *Water*, 2023, **15**(23): 4066. DOI: 10.3390/w15234066.
- [46] Tiwari P, Tiwari MP. Evaluation of water quality and dam for sustaining the fish population dynamics. *Applied Water Science*, 2022, **12**(9): 233. DOI: 10.1007/s13201-022-01728-x.
- [47] Chen K, Midway SR, Peoples BK *et al.* Shifting taxonomic and functional community composition of rivers under land use change. *Ecology*, 2023, **104**(11): e4155. DOI: 10.1002/ecy.4155.
- [48] Comte L, Olden JD, Tedesco PA *et al.* Climate and land-use changes interact to drive long-term reorganization of riverine fish communities globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(27): e2011639118. DOI: 10.1073/pnas.2011639118.
- [49] Ning L, Sheng SQ, Meng Y. The interplay and synergistic relationship between urban land expansion and urban resilience across the three principal metropolitan regions of the Yangtze River Basin. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 31868. DOI: 10.1038/s41598-024-83200-1.
- [50] Pagotto JPA, Pessoa LA, Goulart E *et al.* Environmental degradation of streams leads to the loss of ecomorphologically similar fish species. *Hydrobiologia*, 2022, **849**(10): 2299-2316. DOI: 10.1007/s10750-022-04868-y.
- [51] Anim DO, Fletcher TD, Vietz GJ *et al.* Effect of urbanization on stream hydraulics. *River Research and Applications*, 2018, **34**(7): 661-674. DOI: 10.1002/rra.3293.
- [52] Luo KS, Zhang XJ. Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC. *Landscape and Urban Planning*, 2022, **219**: 104317. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104317.
- [53] Li XX, Xu QG, Xia R *et al.* Stochastic process is main factor to affect plateau river fish community assembly. *Environmental Research*, 2024, **254**: 119083. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119083.
- [54] Kuczynski L, Grenouillet G. Community disassembly under global change: Evidence in favor of the stress-dominance hypothesis. *Global Change Biology*, 2018, **24**(9): 4417-4427. DOI: 10.1111/gcb.14320.
- [55] Liu SF, Chen Q, Li JR *et al.* Different spatiotemporal dynamics, ecological drivers and assembly processes of bacterial, archaeal and fungal communities in brackish-saline groundwater. *Water Research*, 2022, **214**: 118193. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118193.
- [56] Heino J, Tolonen KT. Untangling the assembly of littoral macroinvertebrate communities through measures of functional and phylogenetic alpha diversity. *Freshwater Biology*, 2017, **62**(7): 1168-1179. DOI: 10.1111/fwb.12934.
- [57] Zhang S, Zhan AB, Zhao JD *et al.* Metropolitan pressures: Significant biodiversity declines and strong filtering of functional traits in fish assemblages. *Science of the Total Environment*, 2024, **944**: 173885. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173885.
- [58] Massicotte P, Proulx R, Cabana G *et al.* Testing the influence of environmental heterogeneity on fish species richness in two biogeographic provinces. *PeerJ*, 2015, **3**: e760. DOI: 10.7717/peerj.760.
- [59] Yeager LA, Layman CA, Allgeier JE. Effects of habitat heterogeneity at multiple spatial scales on fish community assembly. *Oecologia*, 2011, **167**(1): 157-168. DOI: 10.1007/s00442-011-1959-3.

附表 I 采样点位信息

Attached Tab.I Sampling site information				
所在河流/湖库	样点	经度	纬度	采样时间
流溪河 (9 个断面)	S1	113.8398	23.8331	2024.04.17-04.18
	S2	113.7269	23.7302	
	S3	113.6597	23.6546	
	S4	113.5544	23.5192	
	S5	113.4702	23.4343	2024.05.11-05.12
	S6	113.341	23.404	
	S7	113.2995	23.3399	
	S8	113.25	23.28	
	S9	113.1862	23.2463	
增江 (5 个断面)	S10	113.7955	23.5632	2024.04.17-04.18
	S11	113.9189	23.4861	
	S12	113.8408	23.3453	2024.05.07-05.08
	S13	113.7508	23.1376	
	S14	113.6697	23.1272	
	S15	113.1828	23.2216	
	S16	113.226	23.114	
	S17	113.2588	23.0663	
珠江干流 (9 个断面)	S18	113.3525	23.1065	
	S19	113.4098	23.0883	2024.04.11-04.12
	S20	113.434	23.0769	
	S21	113.2666	23.0557	
	S22	113.5051	23.0487	
	S23	113.5223	23.0064	
顺德水道 (1 个断面)	S24	113.2588	22.9003	
市桥水道 (1 个断面)	S25	113.4349	22.9166	
沙湾水道 (1 个断面)	S26	113.4744	22.902	
虎门水道 (1 个断面)	S28	113.5997	22.7873	2024.05.15-05.16
洪奇沥水道 (1 个断面)	S29	113.5756	22.6164	
蕉门水道 (2 个断面)	S27	113.4864	22.7914	
	S30	113.6523	22.6364	

附表 II 传统调查鱼类信息（灰色为监测到的外来物种）

Attached Tab.II Traditional Survey Fish Information (Gray indicates detected alien species)

目	科	种（属）	拉丁文名	流溪河 （S1~S9）	增江 （S10~S14）	珠江干流 （S15~S23）	各水道 （S24~S30）
鲮形目	鲮科	鲮鱼	<i>Mugil cephalus</i>			+	+
鲤形目	鲤科	鳊鱼	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	+			
虾虎鱼目	虾虎鱼科	虾虎鱼 sp.	<i>Rhinogobius</i> sp.			+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	舌虾虎鱼	<i>Glossogobius giuris</i>				+
鲤形目	鲤科	三角鲂	<i>Megalobrama terminalis</i>			+	
鲤形目	鲤科	翘嘴鲌	<i>Culter alburnus</i>			+	
鲈形目	丽鱼科	齐氏罗非鱼	<i>Coptodon zillii</i>	+	+	+	
鲤形目	鲇科	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>				+
鲈形目	丽鱼科	尼罗罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i>	+	+	+	
鲤形目	鲇科	南方拟鲮	<i>Pseudohemiculter dispar</i>	+			
鲤形目	鲤科	麦瑞加拉鲮	<i>Cirrhinus mrigala</i>			+	
鲤形目	鲤科	鲮鱼	<i>Cirrhinus molitorella</i>		+	+	
鲤形目	鲤科	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	+		+	
鲤形目	鲤科	宽鳍鱮	<i>Zacco platypus</i>	+	+		
鲤形目	鲤科	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>			+	
鲤形目	鲤科	黄尾鲮	<i>Xenocypris davidi</i>			+	
鲈形目	鲷科	黄鳍棘鲷	<i>Acanthopagrus latus</i>			+	
鲤形目	鲤科	花鲮	<i>Hemibarbus maculatus</i>		+		
鲤形目	鲤科	厚唇光唇鱼	<i>Acrossocheilus labiatus</i>	+			
鲤形目	鲤科	黑鳍鲮	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>		+		
鲤形目	鲤科	光唇鱼	<i>Acrossocheilus fasciatus</i>	+			
鲤形目	鲮科	高体鲮	<i>Rhodeus ocellatus</i>	+	+		
鲈形目	丽鱼科	伽利略罗非鱼	<i>Oreochromis galilaea</i>	+	+		
脂鲤目	脂鲤科	短盖巨脂鲤	<i>Piaractus brachypomum</i>			+	
虾虎鱼目	虾虎鱼科	弹涂鱼	<i>Periophthalmus cantonensis</i>				+
鲤形目	鲤科	大眼华鳊	<i>Sinibrama macrops</i>	+	+	+	
鲤形目	鲤科	大鳍鱮	<i>Acheilognathus macropterus</i>	+			
鲤形目	沙鳅科	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i>	+			
鲤形目	鲤科	唇鲮	<i>Hemibarbus labeo</i>				
鲤形目	鲤科	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>		+	+	
鲤形目	鲤科	鲮	<i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+	+
鲈形目	丽鱼科	彩虹鲷		+			

附表 III eDNA 监测鱼类信息（灰色为监测到的外来物种）

Attached Tab.III eDNA Monitoring Fish Information (Gray indicates detected alien species)

目	科	种	拉丁名	流溪河 (S1- S9)	增江 (S10- S14)	珠江干流 (S15- S23)	各水道 (S24- S30)
慈鲷目	慈鲷科	齐氏罗非鱼	<i>Coptodon zillii</i>	+	+	+	+
慈鲷目	慈鲷科	尼罗罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	尖鳍鲤	<i>Cyprinus acutidorsalis</i>	+	+	+	+
鲇形目	鲇科	大鳞鲇	<i>Liza macrolepis</i>			+	+
慈鲷目	慈鲷科	莫桑比克口 孵非鲫	<i>Oreochromis mossambicus</i>	+	+	+	+
骨舌鱼目	弓背鱼 科	饰妆铠弓鱼	<i>Chitala ornata</i>	+	+	+	+
鲇形目	鲇科	前鳞龟鲇	<i>Chelon carinatus</i>	+			+
鲤形目	鲷科	鲢鱼	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲷科	鳙	<i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	+	+	+	+
鲱形目	鲱科	花鲢	<i>Clupanodon thrissa</i>	+	+	+	+
慈鲷目	慈鲷科	加利略帚齿 非鲫	<i>Sarotherodon galilaeus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	越南鲮	<i>Acheilognathus tonkinensis</i>	+			
鲤形目	鲷科	赤眼鲮	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲷科	海南似鲮	<i>Toxabramis houdemeri</i>	+		+	+
慈鲷目	慈鲷科	奥利亚口孵 非鲫	<i>Oreochromis aureus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	琵琶湖鲃	<i>Biwia springeri</i>	+	+		+
鲤形目	鲷科	鲮鱼	<i>Cirrhinus molitorella</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼 科	黄鳍刺虾虎 鱼	<i>Acanthogobius flavimanus</i>			+	+
鲤形目	鲤科	湘华鲮	<i>Bangana tungting</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲷科	红鳍鲌	<i>Chanodichthys erythropterus</i>	+	+	+	+
鲇形目	甲鲇科	下口鲇	<i>Hypostomus plecostomus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲷科	三角鲂	<i>Megalobrama terminalis</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	高体鳊	<i>Rhodeus ocellatus</i>	+	+	+	+
攀鲈目	鰕科	乌鰕	<i>Channa argus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	银鲃	<i>Squalidus argentatus</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	间鳍	<i>Hemibarbus medius</i>	+	+		+
鲈形目	太阳鱼 科	斑点黑鲈	<i>Micropterus punctulatus</i>	+		+	+
鲤形目	鲈科	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	+	+	+	+
鲇形目	鲇科	越南隐鳍鲇	<i>Pterocryptis cochinchinensis</i>	+	+		+
鲤形目	条鲈科	美丽中条鲈	<i>Traccatichthys pulcher</i>	+	+		+

目	科	种	拉丁名	流溪河 (S1- S9)	增江 (S10- S14)	珠江干流 (S15- S23)	各水道 (S24- S30)
鲇形目	塘虱鱼科	蟾胡鲇	<i>Clarias batrachus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	鳊鱼	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	+	+	+	+
鲇形目	胡子鲇科	胡子鲇	<i>Clarias fuscus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	武昌鱼 X 三角鲂	<i>(Megalobrama amblycephala x Megalobrama terminalis) x (Megalobrama amblycephala x Megalobrama terminalis)</i>	+	+		+
鲇形目	鲇科	花鲇	<i>Silurus asotus</i>	+	+	+	+
鲤形目	条鳅科	多斑岭鳅	<i>Oreonectes polystigmus</i>	+	+		+
鲻形目	鲻科	鲮	<i>Liza haematocheilus</i>	+		+	
鲤形目	鲴科	长鳍马口鱼	<i>Opsariichthys evolans</i>	+	+		+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	波氏吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	+			+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	溪吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius duospilus</i>	+	+		+
鲱形目	鲱科	七丝鲚	<i>Coilia grayii</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	黑鳍鳈	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	马口鱼	<i>Opsariichthys bidens</i>	+			
鲤形目	腹吸鳅科	拟平鳅	<i>Liniparhomaloptera disparis</i>	+	+		+
慈鲷目	慈鲷科	坦噶尼喀口 孵非鲫	<i>Oreochromis tanganicae</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	侧条厚唇鱼	<i>Acrossocheilus parallens</i>	+			
鲤形目	鲤科	黑尾近红鲃	<i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	+	+	+	+
鲤形目	鳅科	<i>Cobitis nalbanti</i>	<i>Cobitis nalbanti</i>	+	+		+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	舌虾虎鱼	<i>Glossogobius giuris</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	+	+	+	+
鲤形目	条鳅科	平头鳅	<i>Oreonectes platycephalus</i>	+	+	+	+
鲇形目	鲇科	黄颡鱼	<i>Tachysurus fulvidraco</i>	+	+	+	+
鲤形目	鳅科	大鳞泥鳅	<i>Misgurnus mizolepis</i>	+		+	+
鲤形目	鲤科	乐山小鰾鮰	<i>Microphysogobio kiatingensis</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	五线无须鲃	<i>Barbodes semifasciolatus</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	倒刺鲃	<i>Spinibarbus denticulatus</i>	+	+	+	+
鲳形目	花鲳科	食蚊鱼	<i>Gambusia affinis</i>	+	+	+	+
攀鲈目	鰾科	月鰾	<i>Channa asiatica</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	长吻似鲃	<i>Pseudogobio esocinus</i>	+			+

目	科	种	拉丁名	流溪河 (S1- S9)	增江 (S10- S14)	珠江干流 (S15- S23)	各水道 (S24- S30)
虾虎鱼目	虾虎鱼科	粘皮鰕鰕虎鱼	<i>Mugilogobius myxodermus</i>	+	+	+	+
合鳃目	刺鳅科	大刺鳅	<i>Mastacembelus armatus</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	纹唇鱼	<i>Osteochilus salsburyi</i>	+	+		+
鲇形目	鲇科	中间黄颡鱼	<i>Tachysurus intermedius</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	墨脱华鲮	<i>Bangana dero</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	塘鳢科	尖头塘鳢	<i>Eleotris oxycephala</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	瑞贝卡狼牙 虾虎鱼	<i>Odontamblyopus rebecca</i>			+	+
		Chanodicht					
鲤形目	鲮科	hys recurviceps	<i>Chanodichthys recurviceps</i>	+	+	+	+
鲇形目	鲮科	斑点叉尾鲮	<i>Ictalurus punctatus</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	沙塘鳢科	萨氏华鲮鱼	<i>Sineleotris saccharae</i>	+	+		+
合鳃目	合鳃鱼科	黄鳢	<i>Monopterus albus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	单纹似鲮	<i>Luciocyprinus langsoni</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	<i>Hemiculter eigenmanni</i>	<i>Hemiculter eigenmanni</i>	+	+	+	+
鲮形目	鲮科	鲮鱼	<i>Mugil cephalus</i>	+		+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	丝鳍吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius filamentosus</i>	+			
鲤形目	鲤科	窄条光唇鱼	<i>Acrossocheilus stenotaeniatus</i>		+		+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	江河吻鰕虎鱼	<i>Rhinogobius fluviatilis</i>		+		+
鲤形目	鲤科	光倒刺鲃	<i>Spinibarbus caldwelli</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	唇鲮	<i>Hemibarbus labeo</i>	+	+		+
鲤形目	鲮科	拟细鲫	<i>Aphyocypris normalis</i>	+	+	+	+
鲈形目	太阳鱼科	蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	+		+	+
鲤形目	鲤科	高身鲫	<i>Carassius cuvieri</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	双带鰕鰕虎鱼	<i>Tridentiger bifasciatus</i>	+		+	+
鲈形目	单角鲀科	单角革鲀	<i>Aluterus monoceros</i>				+
鲤形目	鲤科	卡特拉鲮	<i>Labeo catla</i>		+	+	+
鲤形目	鳅科	横纹南鳅	<i>Schistura fasciolata</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	海南华鲮	<i>Sinibrama melrosei</i>	+			
鲤形目	鲤科	台湾梅氏鲮	<i>Metzia formosae</i>	+	+	+	+

				流溪河 (S1- S9)	增江 (S10- S14)	珠江干流 (S15- S23)	各水道 (S24- S30)
目	科	种	拉丁名				
虾虎鱼目	虾虎鱼科	须鳃虾虎鱼	<i>Taenioides cirratus</i>	+		+	+
鲮形目	青鲮科	弓背青鲮	<i>Oryzias curvinotus</i>	+	+	+	+
鲇形目	海鲇科	镰海鲇	<i>Arius arius</i>			+	+
鲤形目	鲤科	鳃	<i>Elopichthys bambusa</i>	+	+		+
虾虎鱼目	鰕虎鱼科	褐吻鰕虎鱼	<i>Rhinogobius brunneus</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	鳊	<i>Parabramis pekinensis</i>	+	+	+	+
攀鲈目	鰾科	线鰾	<i>Channa striata</i>	+	+	+	+
攀鲈目	鰾科	宽额鰾	<i>Channa gachua</i>		+	+	+
鲤形目	鲷科	真马口鱼	<i>Opsariichthys uncirostris</i>	+		+	+
鲈形目	太阳鱼科	大口黑鲈	<i>Micropterus salmoides</i>			+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	阿部鲷虾虎鱼	<i>Mugilogobius abei</i>			+	+
鲤形目	鲤科	青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	+		+	+
鲈形目	鲈科	鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>	+		+	+
鲤形目	鲤科	裂吻鱼	<i>Schismatorhynchus nukta</i>	+	+	+	+
虾虎鱼目	虎鱼科	斑纹舌鰕虎鱼	<i>Glossogobius olivaceus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	贝氏凹鼻鲴	<i>Incisilabeo behri</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	点纹银鲃	<i>Squalidus wolterstorffi</i>	+	+		+
慈鲷目	慈鲷科	黑颏帚齿非鲫	<i>Sarotherodon melanotheron</i>	+		+	+
虾虎鱼目	虾虎鱼科	斑鳍刺虾虎鱼	<i>Acanthogobius stigmethon</i>				
虾虎鱼目	虾虎鱼科	大鳍弹涂鱼	<i>Periophthalmus magnuspinnatus</i>			+	
鲤形目	鲤科	鸭绿小鰾	<i>Microphysogobio yaluensis</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	大鳞半鰾	<i>Hemiculterella macrolepis</i>	+			
鲤形目	鲷科	高丽东瀛鲤	<i>Nipponocypris koreanus</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	兴凯鲮	<i>Acheilognathus chankaensis</i>	+	+		
鲈形目	花鲈科	七星鲈鱼	<i>Lateolabrax japonicus</i>			+	
鲤形目	鲷科	特氏东瀛鲤	<i>Nipponocypris temminckii</i>	+	+		+
鲤形目	鲤科	须鲫	<i>Carassioides acuminatus</i>				+
鲤形目	鲤科	长背小鰾	<i>Microphysogobio longidorsalis</i>	+			+
鲤形目	鲤科	似鲃	<i>Pseudogobio vaillanti</i>	+			
虾虎鱼目	塘鰾科	乌塘鰾	<i>Bostrychus sinensis</i>	+		+	+
鲤形目	鲤科	短臀近红鲃	<i>Ancherythroculter wangi</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	中亚突吻鱼	<i>Capoeta capoeta</i>	+	+		
鲤形目	鲤科	越南棒花鱼	<i>Abbottina binhi</i>	+			

目	科	种	拉丁名	流溪河 (S1- S9)	增江 (S10- S14)	珠江干流 (S15- S23)	各水道 (S24- S30)
合鳃目	合鳃鱼科	山黄鳝	<i>Ophichthys cuchia</i>	+	+		+
鲤形目	鲈科	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i>	+	+	+	+
鲤形目	鲤科	断线麦穗鱼	<i>Pseudorasbora interrupta</i>	+	+	+	
鲑形目	银鱼科	太湖银鱼	<i>Neosalanx taihuensis</i>		+	+	+
鲤形目	鲮科	异鲮	<i>Parazacco spilurus</i>	+			
鲤形目	鲤科	舌唇鱼	<i>Lobocheilos melanotaenia</i>	+	+	+	+
鲤形目	爬鳅科	海南原缨口鳅	<i>Vanmanenia hainanensis</i>	+			
鲉形目	鲉科	弓斑东方鲀	<i>Takifugu ocellatus</i>		+	+	+
慈鲷目	慈鲷科	珍珠德州丽鱼	<i>Herichthys carpintis</i>				+
鲈形目	鲈科	北美鲈	<i>Trachinotus carolinus</i>			+	
鲈形目	鲈科	短吻鲈	<i>Leiognathus brevirostris</i>				+
脂鲤目	原唇齿脂鲤科	巴西鲮脂鲤	<i>Prochilodus costatus</i>		+	+	+
虾虎鱼目	背眼虾虎鱼科	<i>Eugnathogobius</i>					
		<i>bius</i>	<i>Eugnathogobius oligactis</i>	+	+	+	+
		<i>oligactis</i>					
鲤形目	鲤科	丁鲷	<i>Tinca tinca</i>				+
虾虎鱼目	塘鳢科	海南刺盖塘鳢	<i>Eleotris bosetoi</i>	+		+	+
鲤形目	雅罗鱼科	尖头大吻鲈	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>		+	+	+
鲤形目	鲤科	斑马鱼	<i>Danio rerio</i>			+	

附表 IV 传统调查与 eDNA 共同监测到的物种信息

Attached Tab.IV Species information co-detected by traditional surveys and eDNA.

目	科	种	拉丁名
鲈形目	鲈科	鲈鱼	<i>Mugil cephalus</i>
鲤形目	鲤科	鳊鱼	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>
虾虎鱼目	虾虎鱼科	虾虎鱼 sp.	<i>Rhinogobius</i> sp.
虾虎鱼目	虾虎鱼科	舌虾虎鱼	<i>Glossogobius giuris</i>
鲤形目	鲤科	三角鲂	<i>Megalobrama terminalis</i>
鲈形目	丽鱼科	齐氏罗非鱼	<i>Coptodon zillii</i>
鲤形目	鳅科	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>
鲈形目	丽鱼科	尼罗罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i>
鲤形目	鲤科	鳊鱼	<i>Cirrhinus molitorella</i>
鲤形目	鲤科	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>
鲤形目	鲤科	黑鳍鳊	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>
鲤形目	鲮科	高体鳊	<i>Rhodeus ocellatus</i>

鲈形目	丽鱼科	伽利略罗非鱼	<i>Oreochromis galilaea</i>
鲤形目	沙鳅科	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i>
鲤形目	鲤科	唇鲮	<i>Hemibarbus labeo</i>
鲤形目	鲤科	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>
鲤形目	鲤科	鲮	<i>Hemiculter leucisculus</i>
