

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2010.01022

溪流大小及其空间位置对鱼类群落结构的影响

严云志¹ 占姚军¹ 储玲¹ 陈毅峰² 邬春华³

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽省高校生物环境与生态安全省级重点实验室, 芜湖 241000;
2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 3. 安徽省祁门县渔政站, 祁门 245600)

摘要: 2008年10月和2009年10月分别对黄山地区阊江流域与青弋江流域1—3级浅水溪流中鱼类群落结构进行了研究, 着重探讨了溪流大小及其空间位置对鱼类群落空间分布的影响。研究共捕获35种鱼类, 阊江和青弋江分别为26和29种, 其Jaccard相似性系数为57.1%; 两流域间每样点的物种数差异显著, 个体数差异极显著。在溪流级别梯度(1—3级)下, 鱼类的物种数和个体数都呈上升的变动趋势, 且物种数的变化相对个体数较显著。综合相关分析、逐步多元回归分析与典范相关分析的结果, 阊江和青弋江中鱼类物种数的空间变化主要与下游量级相关, 而个体数的空间变化主要与水宽相关。因此, 阊江和青弋江1—3级浅水溪流中鱼类群落结构的分布格局是溪流大小和空间位置的共同作用结果, 且溪流大小和空间位置分别决定鱼类的个体数与物种数的空间分布。

关键词: 溪流鱼类群落; 溪流级别; 空间位置; 青弋江; 阊江

中图分类号: Q142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2010)05-1022-09

溪流是淡水生态系统的重要组成部分, 维持溪流鱼类多样性, 为溯河洄游性鱼类提供繁殖场所是溪流的重要生态功能之一。相对于湖泊等静水生态系统而言, 溪流作为一种流动性水体, 其水文环境特征主要体现为极高的空间异质性与显著的周期性季节动荡^[1]。鱼类是原生性水生动物中的最高等类群, 在溪流生态系统中具有重要地位与功能, 对该生态系统稳定性的维系十分关键。因此, 尽管溪流鱼类生态学研究在国内一直相对匮乏, 且已有少量研究主要聚焦于资源调查与区系分析^[2], 但在国际上是目前淡水群落生态学的焦点之一^[3]。

溪流鱼类群落结构是一系列非生物环境因子(如地理、物理和化学环境等)和生物环境因子(如竞争和捕食)的共同作用产物。沿着从源头至河口的纵向梯度, 溪流呈现为一个由溪流级别递增所构成的线性等级结构: 栖息地多样性、复杂性和稳定性逐渐上升, 溪流鱼类物种多样性及其群落稳定性也相

应上升^[4-7]。此外, 溪流鱼类群落结构还受到景观等大尺度空间因子的影响^[8], 溪流不仅是一个线性等级结构, 还是一个由诸多河段构成的复杂的“网络状几何体(Network geometry)”^[9]。因此, 对于特定流域而言, 某河段的鱼类群落结构受栖息地条件及其空间位置的共同影响^[10]。目前, 有关溪流纵向梯度变化对鱼类群落结构的影响已有大量报道, 并总结出了很多具有一般性的规律^[3], 但有关溪流空间位置影响鱼类群落的报道甚少, 且已有的少量报道的研究结果存在众多争议^[11]。

本研究以黄山山区的阊江流域和青弋江流域为研究地点, 对两个流域的低级别(1—3级)溪流的鱼类群落结构进行了研究, 着重探讨了溪流大小及其空间位置对鱼类群落空间分布的影响及其作用机制, 一方面为我国溪流鱼类生态学研究提供基础资料, 另一方面也为黄山山区溪流鱼类多样性的科学管理提供理论依据。

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-06-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB119200); 安徽省自然科学基金(090413080); 安徽省教育厅自然科学基金(KJ2009A110; KJ2008B221)资助

作者简介: 严云志(1976—), 男, 安徽桐城人; 博士; 研究方向为鱼类生态学。E-mail: yanyunzhi7677@126.com

通讯作者: 陈毅峰, E-mail: chenyf@ihb.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究地区

黄山山区(E117°41'-118°53'; N29°24'-30°31')位于安徽省南部, 地处我国中亚热带北缘、常绿阔叶林、红壤黄壤地带, 总面积达 9807 km², 其中水域面积约 296 km², 森林覆盖率达 50%。全年四季分明, 年均气温约 7.8℃; 雨量充沛, 年均约 2400 mm, 且主要集中在 4—9 月份(约占全年的 79%)。黄山山区的主要河流有青弋江、阊江、秋浦河和新安江, 其中新安江经千岛湖流入钱塘江属钱塘江水系, 而其他三条河流均属长江水系, 因此黄山是长江和钱塘江的分水岭^[12]。作为山地水体, 这些河流具有支流繁多、河道狭窄且蜿蜒曲折、坡度大、河床岩石等特点, 其中蕴育有种类繁多、生态各异的山溪鱼类资源^[13,14]。

阊江流域位于黄山主峰的西南侧, 主要水源地位于安徽省祁门县, 流域面积约 1914 km², 在祁门县境内主要由北河和阊江两河流构成, 两河在倒湖汇合后流入鄱阳湖。牯牛降国家级自然保护区位于北河上游。青弋江流域位于黄山主峰的东北侧, 主要水源地位于安徽省黄山区(原太平县)、黟县和石台县, 流域面积约 7195 km²。20 世纪 50 年代, 因蓄水电需要, 当地政府在泾县桃花潭镇陈村修建大型发电站, 蓄水后的陈村水库后被命名为太平湖。

1.2 研究样点设置与标本采集

分别选择倒湖和太平湖上游所有浅水溪流(1—3 级)作为阊江和青弋江流域的研究溪流, 于每溪流的中段设置一个 50 m 长的河段作为研究样点。由于溪流中急滩(Riffle)、深潭(Pool)、湍流(Run)和死水

(Backwater)等水流流态差异往往造成鱼类群落结构差异, 为了避免水流流态差异对捕捞渔获物的影响, 本研究在设置研究样点时尽可能确保每样点都包含急滩和深潭两种流态(它们是溪流中最常见的两种流态, 且常交替重复出现)。本研究共设置 93 个研究样点, 阊江和青弋江分别为 43 和 50 个(图 1)。

考虑到溪流中周期性水文动荡对鱼类群落的影响, 本研究的标本采集均选择在旱季进行, 阊江和青弋江流域的采样时间分别为 2008 年 10 月和 2009 年 10 月。采集工具为背式电瓶, 一人电鱼, 两人以捞网捕捞。每样点的采集路线均选择“之”形, 采集时间控制在 30min。采集后的标本在新鲜状态下进行鉴定, 统计物种数与个体数。疑难种以甲醛进行固定, 带回实验室进一步鉴定。其余活体标本释放至采集地。

1.3 栖息地环境因子测定及溪流空间位置定义

由于本研究着重探讨溪流大小及其空间位置对鱼类群落的影响, 因此仅选择水宽、水深来反映栖息地环境条件。每样点取样后, 在取样河段的三个等距截面测量水宽, 并在每截面的三个等距点测量水深; 取平均值反映溪流大小。

根据溪流级别(Stream order)概念^[15](即两级别相同溪流汇合引起汇合后溪流级别的上升)对每研究样点的级别进行定义。再以流量量级(Link)^[16]、汇合量级(C-link)^[17]和下游量级(D-link)^[18]来反映溪流的空间位置。流量量级代表某河段上游所有不分支源头溪流的数量, 汇合量级代表某河段下游两溪流汇合的全部数量, 下游量级代表某河段下游连接溪流的流量量级(图 2)。本研究对溪流级别及其空间位置的定义是根据 1: 300000 的地图进行的。

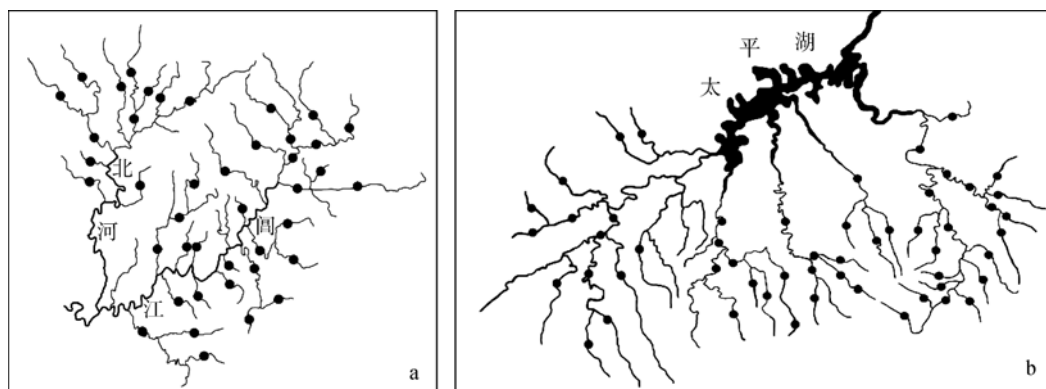
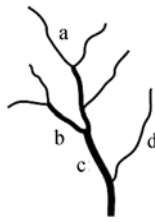


图 1 阊江(a)和青弋江(b)研究样点示意图, 黑色圆圈示采样样点
Fig. 1 Sampling sites in the Chang (a) and Qingyi (b) Rivers, showed by black circles



样点 Site	溪流级别 Stream order	流量量级 Link	汇合量级 C-link	下游量级 D-link
a	1	1	4	2
b	2	2	2	5
c	3	5	1	6
d	1	1	1	6

图2 溪流空间位置定义示意图(溪流级别、流量量级、汇合量级与下游量级)

Fig. 2 Hypothetical example of a stream network for delineating spatial position variables: stream order, link magnitude (link), confluence link (C-link), and downstream link (D-link)

1.4 数据分析

物种的优势度以相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)计算: $IRI = Fi \times Pi \times 10^4$, 式中 Fi 为物种 i 的出现频率, Pi 为物种 i 的相对多度; 视 IRI 大于 100 的物种为优势种。流域间物种组成的相似性指数根据 Jaccard 相似性公式计算: $Cj = c / (a + b - c)$, 式中 a 、 b 分别为两流域的全部物种数, c 为两流域中共有物种数。

采用 t -检验检视流域间每样点物种数和个体数的差异显著性。采用 One-way ANOVA 分别对 1—3 级溪流间物种数、个体数及溪流大小(宽、深)进行检验, 若存在差异, 再用 Post-hoc 比较各组平均值, 以检验其差异显著性。采用双尾 Pearson 相关分析分别解析各环境变量对物种数和个体数的影响; 再运用多元逐步回归分析确定环境因子对物种数和个体数的综合作用。为提高数据的正态性, 对所有变量数据进行了 $\log$ 转换。上述数据分析在 SPSS 11.5 软件中进行操作, 视 $P < 0.05$ 为显著性水平。

采用典型对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA; CCANOCO 4.5)解析溪流大小及其空间位置对鱼类群落结构的影响。采集样点数不超过 2 的物种不纳入分析, 以降低稀有物种的权重。根据向前选择程序(Forward selection procedure)确定哪些变量最终被保留在 CCA 分析中, 即以手动选择(Manual selection)对每个变量的贡献率和显著性进行计算, 并应用 Monte Carlo 置换检验, 将显著性($P < 0.05$)变量选入模型。全部变量数据都进行了 $\log(x+1)$ 转换, 以降低极端数值的负面影响。

2 结果

2.1 鱼类多样性概况

本研究共采集标本 7064 尾, 共计 35 种, 隶属于

4 目、11 科、32 属。闽江和青弋江浅水溪流中鱼类种数分别为 26 和 29 种, 其中共有种 20 种, 两流域间的 Jaccard 相似性指数为 57.1%。长麦穗鱼、无须鲮、黑鳍鲈、银鲈、大鳍鲈、黄颡鱼 6 种鱼类仅采集于闽江, 而似鲃、中华花鳅、洛氏鲮、餐、颌须鲃、鲃、赤眼鲮、蛇鲃、鳅 9 种鱼类仅采集于青弋江。闽江和青弋江中的优势种分别为 4 和 7 种, 其中宽鳍鲈和高体鲮是两流域共有的优势种, 泥鳅和沙塘鳢是闽江中的另外 2 种优势种, 吻虾虎鱼、光唇鱼、原缨口鳅、稀有花鳅和似鲃是青弋江中的另外 5 种优势种(表 1)。

闽江每样点采集的物种数为 0—14(平均值: 4.69 ± 3.56)种, 个体数为 0—97(平均值: 26.46 ± 22.83)尾; 青弋江每样点采集的物种数和个体数分别为 0—13(6.26 ± 3.09)种和 0—394(119.06 ± 90.90)尾。 t -检验结果显示, 两流域间每样点的平均物种数间的差异达到显著性($t = -2.37, P < 0.05$), 而个体数差异极显著($t = 2.37, P < 0.01$)。

2.2 溪流级别梯度下鱼类多样性及溪流大小的变化

沿 1—3 级溪流的级别梯度, 鱼类的物种数和个体数都呈现出逐渐增加的变化趋势(图 2)。One-way ANOVA 检验显示, 在物种数上, 闽江中 3 级溪流 [(10 ± 2) 种]显著高于 1 级 [(7 ± 3) 种]和 2 级 [(7 ± 3) 种]溪流($P < 0.05$), 但 1、2 级溪流间无显著性差异($P > 0.05$); 青弋江中的物种数[1 级: (6 ± 3) 种; 2 级: (9 ± 3) 种; 3 级: (12 ± 2) 种]在 1—3 级溪流间均存在显著性差异($P < 0.05$), 即随着溪流级别上升其物种数也显著性增高。闽江中 1—3 级溪流间鱼类个体数[1 级: (26 ± 12) 尾; 2 级: (33 ± 13) 尾; 3 级: (72 ± 23) 尾]差异与物种数一致, 即 3 级溪流显著高于 1、2 级溪流($P < 0.05$)而后两者间无显著性差异($P > 0.05$); 但青弋江中 1—3 级溪流间的个体数无显著性差异($P > 0.05$)。

在 1—3 级溪流间, 随着溪流级别上升, 闾江和青弋江中溪流的水宽和水深均呈现出逐渐上升的变化趋势。经 One-way ANOVA 检验, 该差异均达到显著性水平($P < 0.05$): 尽管 2 级和 3 级溪流间的水深

或水宽无显著性差异, 但 1 级溪流的水深或水宽显著小于 2、3 级溪流($P < 0.05$)(图 3)。双尾 Pearson 相关性分析结果表明, 闾江和青弋江中溪流的水宽和水深都与溪流级别呈显著性相关($P < 0.05$)。

表 1 闾江和青弋江 1—3 级浅水溪流鱼类的出现频率、相对多度及重要性指数

Tab. 1 Occurring frequency, relative abundance and index of relative importance of fish collected from 1—3 ordered shading streams in the Chang and Qingyi Rivers

物种 Species			出现频率 Frequency (%)		相对多度 Relative abundance (%)		重要性指数 IRI	
			闾江 Chang	青弋江 Qingyi	闾江 Chang	青弋江 Qingyi	闾江 Chang	青弋江 Qingyi
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	85.7	92.0	43.3	45.5	3718.5	4188.1
		马口鱼 <i>Opsarrichthys bidens</i>	7.1	14.0	0.4	0.4	3.5	5.6
		光唇鱼 <i>Acrossocheilus fascitus</i>	21.4	32.0	2.7	3.2	58.2	101.1
		光倒刺鲃 <i>Spinibarbus hollandi</i>	7.1	—	0.3	—	2.0	—
		鲫 <i>Carassius auratus</i>	16.7	20.0	1.8	0.5	30.7	11.4
		麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	7.1	26	2.2	0.8	15.8	20.9
		长麦穗鱼 <i>P. elongata</i>	16.7	—	1.6	—	26.9	—
		棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	14.3	10.0	3.2	10.0	46.4	10.4
		银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	4.8	10.0	0.3	0.3	1.3	3.4
		似鮡 <i>Pseudogobio vaillanti</i>	—	32.0	—	3.1	—	101.1
		小鲈 <i>Sarcocheilichys parvus</i>						
		黑鳍鲈 <i>S. nigripinni</i>	2.4	—	0.6	—	1.3	—
		颌须鲈 <i>Gnathopogon spp.</i>	—	4.0	—	0.1	—	0.2
		蛇鲈 <i>Saurogobio dabryi</i>	—	2.0	—	0.1	—	0.2
		餐 <i>Hemiculter leucisculus</i>	—	4.0	—	0.9	—	3.4
		洛氏鲮 <i>Phoxinus lagowskii</i>	—	6.0	—	3.2	—	19.5
		赤眼鲮 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	—	2.0	—	0.1	—	0.2
		高体鲮 <i>Rhodeus bitterling</i>	64.3	30.0	17.5	4.7	1131.0	140.6
		无须鲮 <i>Acheilognathus. gracilis</i>	7.1	—	0.3	—	2.1	—
		兴凯鲮 <i>A. chankaensis</i>	23.8	18.0	2.7	1.4	64.4	26.6
	鳅科 Cobitidae	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	42.9	40.0	3.7	1.4	160.1	57.1
		中华花鳅 <i>Cobitis sinensis</i>	—	20.0	—	1.1	—	22.5
		稀有花鳅 <i>C. rarus</i>	16.7	42.0	0.7	3.3	10.9	142.5
	平鳍鳅科 Homalopteridae	花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>	4.8	4.0	0.1	0.1	0.4	0.1
		原缨口鳅 <i>Vanmanenia stenosoma</i>	11.9	50.0	0.9	5.6	10.8	278.8
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Siluridae	鲇 <i>Silurus asotus</i>	—	4.0	—	0.1	—	0.1
		黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	9.5	—	0.3	—	3.1	—
		切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	9.5	10.0	0.4	0.3	3.7	3.0
鲈形目 Perciformes	鳊科 Bagridae	大鳍鲮 <i>Mystus macropterus</i>	2.4	—	0.1	—	0.2	—
	钝头鲈科 Amblycipitidae	司氏鲈 <i>Liobagrus styani</i>	16.7	18.0	0.6	0.6	10.5	10.0
	虾虎鱼科 Gobiidae	吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius spp.</i>	33.3	78.0	1.9	14.4	63.9	1125.5
	塘鳢科 Eleotridae	沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	35.7	30.0	3.8	4.7	134.0	140.6
合鳃目 Synbranchiformes	刺鳅科 Mastacembelidae	刺鳅 <i>Mastacembelus aculeatus</i>	16.7	4.0	1.1	0.1	19.7	0.1
	鱼旨科 Serranidae	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	—	2.0	—	0.1	—	0.1
	合鳃科 Synbranchidae	黄鳝 <i>Monopterus alba</i>	28.6	8.0	1.3	0.1	38.4	0.9

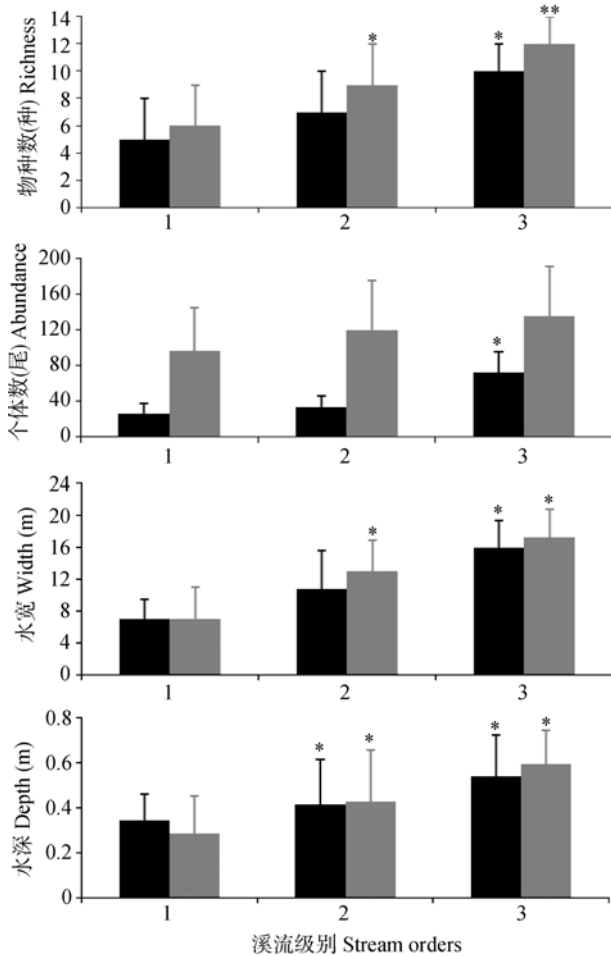


图 3 阆江(黑柱)和青弋江(灰柱)1—3 级溪流间鱼类多样性(物种数和个体数)及溪流大小(水宽和水深)的比较

Fig. 3 Variations in fish diversity (including species richness and abundance) and stream sizes (including water width and depth) among 1-3 ordered streams in the Chang and Qingyi Rivers
同组柱间不同标注(*)反映差异达到显著性水平 (One-way ANOVA, $P < 0.05$)
Different symbols (*) representing significant difference (One-Way ANOVA, $P < 0.05$)

2.3 溪流大小及其空间位置对鱼类多样性的影响

根据双尾 Pearson 相关性分析结果, 阆江中鱼类物种数与溪流级别和下游量级呈显著性正相关

($P < 0.05$), 个体数与水宽呈显著性正相关($P < 0.05$); 青弋江中鱼类物种数与水宽、溪流级别、流量量级、下游量级均成显著性正相关($P < 0.05$), 但与汇合量级呈显著性负相关($P < 0.05$), 个体数仅与水宽呈显著性正相关($P < 0.05$)(表 2)。进一步, 逐步多元回归分析结果表明, 阆江中仅下游量级显著地影响鱼类物种数的空间分布($P < 0.05$), 而个体数仅与水宽显著性相关($P < 0.05$); 青弋江中下游量级和水宽均显著性影响鱼类的物种数($P < 0.05$), 而个体数则仅与水宽显著性相关($P < 0.05$)(表 3)。

典型对应分析(CCA)的向前选择程序显示, 阆江中显著影响鱼类群落空间分布的环境因子包括水宽、溪流级别、流量量级和下游量级, 而水深和汇合量级对鱼类无显著性影响; 青弋江与阆江一致(表 4)。CCA 所形成的 4 个轴共解释了不同样点间鱼类全部空间变异的 20.8%(阆江)和 14.7%(青弋江), 其中第 1 和第 2 轴分别解释 7.7%和 5.6%的变异(阆江)与 9.7%和 2.0%的变异(青弋江)。阆江中的第 1 轴主要与溪流级别相关, 第 2 轴主要与流量量级、下游量级和水宽相关, 且均成正相关; 青弋江中的 4 个环境变量都主要与第 1 轴相关, 其中水宽为负相关, 其他为正相关(表 4)。

3 讨 论

3.1 流域间的物种组成

本研究共采集 35 种鱼类, 其中阆江和青弋江分别为 26 和 29 种, 两流域间物种组成的相似性指数仅为 57.1%。由于本研究仅对两流域的 1—3 级浅水溪流中鱼类群落进行了研究, 且是单季度采样, 因此结果所显示的流域间较低的物种相似性可能并不能反映真实情况。例如, 本研究调查发现的, 仅分布阆江的 6 种鱼类中, 仅长麦穗鱼的出现频率超过 10%, 为偶见种, 而其他 5 种鱼类的出现频率均不足

表 2 溪流大小及其空间位置与鱼类物种数和个体数的相关性系数
Tab. 2 Correlation coefficients between streams sizes / their spatial position and fish species richness / abundance

		水宽 Width	水深 Depth	溪流级别 Order	流量量级 Link	汇合量级 C-link	下游量级 D-link
阆江	物种数 Richness	0.025	0.279	0.376*	0.231	-0.018	0.430*
Chang	个体数 Abundance	0.397*	0.160	0.313	0.295	-0.144	0.219
青弋江	物种数 Richness	0.471*	0.116	0.453*	0.426*	-0.383*	0.534**
Qingyi	个体数 Abundance	0.413*	0.075	0.025	0.084	-0.126	0.057

注: *示显著相关($P < 0.05$), **示极显著相关($P < 0.01$)

Note: * and ** representing the significant and highly significant correlation, respectively

表 3 逐步多元回归分析解析溪流大小及其空间位置对鱼类物种数和个体数的影响

Tab. 3 Stepwise multiple regression analysis determining the stream sizes and their spatial position affecting fish species richness and abundance

流域 Watershed	因变量 Dependent variable	模型 Model	自变量 Independent variable	β	R^2	t	P
阆江 Chang	物种数	1	(Constant)		0.468	-6.392	<0.001
	Richness		D-link	0.383		2.700	0.010
	个体数	1	(Constant)		0.455	-4.431	0.003
	Abundance		width	-0.424		3.576	0.020
青弋江 Qingyi		1	(Constant)		0.647	13.581	<0.001
			D-link	0.534		4.233	<0.001
	物种数	2	(Constant)		0.766	5.482	<0.001
	Richness		D-link	0.423		3.358	0.002
			width	0.329		2.610	0.012
	个体数	1	(Constant)		0.590	3.281	0.005
			width	0.416		2.207	0.021

表 4 典范相关分析(CCA)统计学概要

Tab. 4 Canonical correspondence analysis summary statistics

流域 Watershed	统计学变量 Statistic	第 1 轴 Axis 1	第 2 轴 Axis 2	第 3 轴 Axis 3	第 4 轴 Axis 4
阆江 Chang	特征值 Eigenvalue	0.173	0.124	0.118	0.049
	物种—环境相关性 Species-environment correlation	0.809	0.750	0.827	0.609
	累积变异百分比 Cumulative percentage variance				
	物种 By species only	7.7	13.3	18.6	20.8
	物种与环境 By species and environment	37.3	64.0	89.4	100
	与轴间的相关性 Interset correlations with axes				
	溪流级别 Order	0.634	0.464	0.002	-0.021
	流量量级 Link	-0.2675	0.31	0.680	-0.126
	下游量级 D-link	0.5071	0.555	0.017	-0.147
	水宽 Width	0.0548	0.642	-0.221	0.265
	特征值 Eigenvalue	0.172	0.036	0.031	0.023
	物种—环境相关性 Species-environment correlation	0.782	0.674	0.494	0.397
	累积变异百分比 Cumulative percentage variance				
	物种 By species only	9.7	11.7	13.4	14.7
青弋江 Qingyi	物种与环境 By species and environment	65.5	79.3	91.1	100
	与轴间的相关性 Interset correlations with axes				
	溪流级别 Order	0.597	0.165	-0.203	0.171
	流量量级 Link	0.649	0.352	-0.050	0.065
	水宽 Width	-0.573	0.242	0.096	0.215
	下游量级 D-link	0.657	-0.237	0.154	0.106

10%，均为稀有种；仅分布青弋江的 9 种鱼类中，也仅似鲃和中华花鳅是偶见种，其他 7 种鱼类都是稀有种。但是，这些稀有种通常是长江中下游水系中的广布种，如黑鳍鲈、银鲃、黄颡鱼、鲃、鳊等。因此，两流域间稀有种的采集随机性可能是造成两流域物种相似性较低的主要原因。

3.2 溪流级别与物种数

“溪流级别”概念一开始被用来反映激流生态系统中溪流大小^[15]，由 Kuehne 于 1962 年首次引用到溪流生态学领域^[19]；此后，溪流级别一直是溪流鱼类生态学家描述溪流鱼类群落空间分布的一个重要空间尺度^[3]。有关溪流级别梯度下的鱼类群落空

间分布规律已有大量报道,一般认为,随着溪流级别上升,栖息地的多样性和复杂性也逐渐增加,因此鱼类的物种数也随之上升^[6],但这种上升可能是线性的^[20]或非线性的^[10];也有研究发现,溪流鱼类物种数在下游河段上升趋势存在一个渐近值,甚至会出现明显的下降现象^[21],究其原因可能是河流连续系统中的中度干扰理论与人为干扰。由于溪流级别梯度对鱼类群落的影响难以形成普遍性规律,因此有人对该空间尺度在溪流鱼类生态学中的运用表示质疑,并建议采用一些非人为主观的、可以直接测量的环境变量来反映鱼类的空间分布规律^[22]。Matthews 认为,溪流鱼类的空间分布差异在本质上是鱼类对局域性栖息地环境特征的响应,而不过是溪流级别变化的直接作用结果^[3]。在本研究结果中,尽管不同流域间(阆江和青弋江)溪流级别梯度下的物种数和个体数的统计分析结果存在一定差异,但在总体上都反映了:1)物种数随溪流级别梯度逐渐上升,且这种上升具有显著性;2)个体数也呈现出上升趋势,但常无统计学中的显著性。该结果同 Paller 的研究结果相似,即相对于物种数而言,溪流鱼类个体数的时空分布规律往往具有更高的随机性和不稳定性^[23]。此外,本研究结果还显示,青弋江和阆江 1—3 级溪流间的水宽和水深均显著不同,这进一步证实了不同级别溪流间的溪流大小及其栖息地多样性存在显著性差异的观点^[6]。

本研究侧重于解释溪流大小和空间位置对鱼类群落的影响,因此未评价水底基质、水生植被类型、岸边植被覆盖等小尺度空间因子及气温、降雨量、景观等大尺度空间因子对鱼类群落的影响。事实上,溪流鱼类群落是多重空间尺度的环境因子综合作用结果^[24]。由于本研究在典型对应分析中仅解析了溪流大小及其空间位置对鱼类群落的影响,因此造成了研究结果中 CCA 的 4 个轴对鱼类群落空间变异的解释程度较低,即阆江的 20.8%和青弋江的 14.7%。

3.3 溪流大小与鱼类群落结构

溪流大小是决定鱼类群落结构的重要机制之一^[25],这是因为溪流大小直接关系到栖息地的多样性、复杂性^[26]及其稳定性^[27],即溪流越大,栖息地多样性和复杂性越高,鱼类多样性及群落稳定性也相对较高。本研究以特定溪流的水宽和水深作为反映溪流大小的变量,结果显示水宽是决定鱼类群落

结构的显著变量,而水深对鱼类群落无明显影响。在通常情况下,沿着溪流从上游至下游的纵向梯度,栖息地的物理环境因子的主要变化常表现为:坡度降低、流量增大、水面变宽、水位变深、水底基质减小、水温上升、溶氧下降,等等^[3]。因此,水宽和水深在理论上都可用来反映溪流的相对大小。但是,浅滩激流和深潭是溪流生态系统中最常见的两种水流流态类型,且它们往往交替重复出现^[1],而本研究为了降低特定溪流中水流流态差异对鱼类群落的影响,设置样点时尽可能保证每样点采集水体同时包含这两种流态,这可能造成研究样点中水深无法真正体现各溪流的实际大小,因而水深对鱼类群落无显著性影响。

3.4 溪流空间位置与鱼类群落结构

Fausch, *et al.* 研究发现特定支流的河口处鱼类物种数往往高于该支流的其他河段,并认为空间位置差异可能会引起鱼类群落的变化^[8]。Gorman 提出了“对于同级的溪流而言,直接汇入大河的溪流鱼类群落结构往往比源头性溪流具有更高的物种丰富度”假说^[28]。Osborne and Wiley^[18]和 Grenouillet, *et al.*^[10]比较研究了各类空间位置定义对溪流鱼类群落的影响,并发现下游量级(D-link)的影响最为显著。但 Smith and Kraft 的研究结果却显示汇合量级(C-link)对鱼类群落的影响更为显著^[11]。本研究结果中,尽管 Pearson 相关分析、多元逐步回归与典型对应分析的结果存在一定差异,但都显示出 D-link 对阆江和青弋江鱼类物种数的空间分布具有显著性影响,这点与 Osborne and Wiley 和 Grenouillet, *et al.* 的研究结果相同。D-link 对鱼类物种数空间分布具有显著性影响这一现象说明了“迁入-灭绝假说”^[29]可能是溪流鱼类群落空间分布的一个重要机制。相对于源头性低级别溪流而言,下游高级别溪流中的鱼类物种数往往更高,由于大多数鱼类具有在不同水体间迁移的习性,因此下游溪流中丰富的物种库为与其直接相连的低级别溪流提供了物种迁入的源泉,从而构成了 Gorman 的假说^[28]。溪流下游的鱼类迁入速率较高但灭绝速率较低,而上游的情况正好相反^[30],这种上、下游的“迁入-灭绝”速率差异导致了 D-link 在决定溪流鱼类群落空间分布中的重要性。

参考文献:

- [1] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: structure and function of running waters, 2nd edition [M]. Springer, Netherlands. 2007, 5
- [2] Huang L L, Wu Z Q. Stream fish fauna composition and biogeographical analysis of the northwestern, Jiangxi Province [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(2): 448—451 [黄亮亮, 吴志强. 赣西北溪流鱼类区系组成及其生物地理学特征分析. 水生生物学报, 2010, **34**(2): 448—451]
- [3] Matthews W J. Patterns in freshwater fish ecology [M]. Chapman and Hall, New York. 1998, 55—56
- [4] Grossman G D, Ratajczak R E, Crawford M, *et al.* Assemblage organization in stream fishes: effects of environmental variation and interspecific interaction [J]. *Ecological Monograph*, 1998, **68**(3): 395—420
- [5] Dauwalter D C, Splinter D K, Fisher W L, *et al.* Biogeography, ecoregions, and geomorphology affect fish species composition in streams of eastern Oklahoma, USA [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2008, **82**(3): 237—249
- [6] Matthews W J. Fish faunal “breaks” and stream order in the eastern and central United States [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1986, **17**(2): 81—92
- [7] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130—137
- [8] Fausch K D, Karr J R, Yant P P. Regional application of an index of biotic integrity based on stream fish communities [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1984, **113**(1): 39—55
- [9] Benda L, Poff N L, Miller D, *et al.* The network dynamics hypothesis: how channel networks structure riverine habitats [J]. *Bioscience*, 2004, **54**(5): 413—427
- [10] Grenouillet G, Pont D, Hérissé C. Within-basin fish assemblage structure: the relative influence of habitat versus stream spatial position on local species richness [J]. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 2004, **61**(1): 93—102
- [11] Smith T A, Kraft C E. Stream fish assemblages in relation to landscape position and local habitat variables [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, **134**(2): 430—440
- [12] Wang L X, Fang J X. Study on the sustainable utilization of biological and tourist resources in Mt. Huangshan [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2006, (2): 69—70 [汪立祥, 方建新. 黄山生物资源和旅游资源永续利用研究. 国土与自然资源研究, 2006, (2): 69—70]
- [13] Diao Z S, Shen J R. Geographical distribution of fish in southern mountainous of Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 1981, (1): 82—88 [刁铸山, 沈菊人. 安徽省皖南山区的鱼类及其地理分布. 安徽农业科学, 1981, (1): 82—88]
- [14] Xu Y J. Fish resources in Xin'an River, Huangshan (Anhui reach) [J]. *Journal of Huangshan University*, 1981, (2): 89—95 [徐亚君. 黄山新安江(安徽江段)鱼类资源. 徽州师专学报, 1981, (2): 89—95]
- [15] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. *Transactions of American Geophysical Union*, 1957, **38**(6): 913—920
- [16] Shreve R L. Statistical law of stream numbers [J]. *Journal of Geology*, 1966, **74**(1): 1737
- [17] Fairchild G W, Horwitz R J, Nieman D A, *et al.* Spatial variation and historical change in fish assemblages of the Schuylkill River drainage, southeast Pennsylvania [J]. *American Midland Naturalist*, 1998, **139**(2): 282—295
- [18] Osborne L L, Wiley M J. Influence of tributary spatial position on the structure of warmwater fish communities [J]. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 1992, **49**(4): 671—681
- [19] Kuehne R A. A classification of streams, illustrated by fish distribution in an eastern Kentucky creek [J]. *Ecology*, **74**(4): 1659—1673
- [20] Naiman R J, Melillo J M, Lock M A, *et al.* Longitudinal patterns of ecosystem processes and community structure in a subarctic river continuum [J]. *Ecology*, 1987, **68**(5): 1139—1156
- [21] Oberdorff T, Guilbert E, Lucchetta J C. Patterns of fish species richness in the Seine River basin, France [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **259**(3): 157—167
- [22] Hughes RM, Omernick J M. An alternative for characterizing stream size [A]. In: Fontaine III T D, Bartel S M (Eds.), *Dynamics of lotic ecosystems* [C]. Ann Arbor, Ann Arbor Science Publishers. 1983, 87—101
- [23] Paller M H. Relationships between fish assemblage structure and stream order in South Carolina coastal plain streams [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1994, **123**(2): 150—161
- [24] Mesquita N, Coelho M M, Filomena M M. Spatial variation in fish assemblages across small Mediterranean drainages: effects of habitat and landscape context [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2006, **77**(2): 105—120
- [25] Matthews W J, Robison H W. The distribution of the fishes of Arkansas: a multivariate analysis [J]. *Copeia*, 1988, (2): 358—374
- [26] Gorman O T, Karr J R. Habitat structure and stream fish communities [J]. *Ecology*, 1978, **59**(3): 507—515
- [27] Schlosser I J. A conceptual framework for fish communities in small warmwater streams [A]. In: Matthews W J, Heins D C (Eds.), *Evolutionary ecology of North American stream fishes* [C]. Norman, Oklahoma University Press. 1987, 17—26
- [28] Gorman O T. Assemblage organization of stream fishes: the effects of rivers on adventitious streams [J]. *American Naturalist*, 1986, **128**(4): 611—616

- [29] MarArthur R H, Wilson E O. The theory of island biogeography [M]. New Jersey, Princeton University Press. 1967, 60—83
- [30] Taylor C M, Warren M L. Dynamics in species composition of stream fish assemblages: environmental variability and nested subsets [J]. *Ecology*, 2001, **82**(8): 2320—2330

EFFECTS OF STREAM SIZE AND SPATIAL POSITION ON STREAM-DWELLING FISH ASSEMBLAGES

YAN Yun-Zhi¹, ZHAN Yao-Jun¹, CHU Ling¹, CHEN Yi-Feng² and WU Chun-Hua³

(1. Provincial Key Laboratory of Biotic Environmental and Ecological Safety, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072; 3. Fishery and Aquiculture Government of Qimen County in Anhui Province, Qimen 245600)

Abstract: The spatio-temporal pattern of stream fish assemblages and the causal mechanism are the basis for scientific protection and sustainable utilization of fish species diversity. Both habitat structure and spatial position of streams are the mechanisms determining fish assemblages by influencing environmental capacity and fish immigration-extinction rate, respectively. In this study, spatial pattern in fish assemblages were studied by specimens electro-fishing collected from shallow streams (1–3 orders) of the Chang and Qingyi Rivers in the Huangshan Mountain, Anhui Province, in October, 2008 and 2009 respectively, and the effects of stream size (width and depth) and spatial position (order, link, C-link, and D-link) on fish assemblages were analyzed. Among the 35 fish species collected wholly, 26 and 29 species were involved in the Chang and Qingyi Rivers, respectively, which suggested 57.1% of Jaccard's similarity index in species composition between the two rivers. Species richness and abundance each site were 4.69 ± 3.56 species and 26.46 ± 22.83 specimens in the Chang River, and 6.26 ± 3.09 species and 119.06 ± 90.90 specimens in the Qingyi River. Species richness and abundance of each site was significantly different between the two rivers. Along up-stream-downstream gradient in stream orders, both species richness and abundance increased, while significant difference was only observed in species richness but not in abundance. Stream width and depth were both significantly correlated with stream orders, suggesting the significant difference in width and depth among 1–3 orders. Two-tailed Pearson's correlation analysis detected that the factors significantly influencing species richness were stream order and D-link in the Chang River, while stream width, stream order, link and D-link in the Qingyi River. This analysis also detected that those influencing species abundance were both stream width in the Chang and Qingyi Rivers. Stepwise multiple regression analysis discovered the significant effects of D-link (Chang), D-link and stream width (Qingyi) on species richness, but stream width (both Chang and Qingyi) on abundance. Canonical correspondence analysis indicated that stream width, stream order, link, and D-link significantly determined fish assemblages in the Chang and Qingyi Rivers. In conclusion, downstream link (D-link) and stream width were the dominant factors affecting the spatial patterns in fish species richness and abundance, respectively, which suggested that spatial pattern in fish assemblages from shallow streams in the Chang and Qingyi Rivers were resulted from the combined roles of stream size and spatial position.

Key words: Stream-dwelling fish assemblage; Stream order; Spatial position; The Qingyi River; The Chang River