

太湖流域河流鱼类群落的时空分布*

李其芳¹, 严云志^{1**}, 储玲¹, 朱仁¹, 高俊峰², 高永年²

(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: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 确定河流鱼类群落的时空分布格局及其形成机制是开展鱼类物种多样性保护与管理的科学基础。基于 2013 年 10 月和 2014 年 5 月共 2 次对太湖流域 57 个河道样点的调查数据, 初步研究太湖流域河流鱼类群落结构及其多样性的季节动态和空间分布特点。共采集鱼类 5051 尾, 计 46 种, 其中鲤科鱼类 26 种, 占全部物种数的 57%。10 月份的鱼类多样性显著高于 5 月份, 且 2 个季度的鱼类群落结构存在显著性差异。5 个主要水系间的鱼类多样性差异显著, 总体上, 沿江水系和洮涌水系鱼类多样性较低, 黄浦江水系居中, 而南河水系和苕溪水系较高; 鱼类群落结构也随水系而显著变化, 主要表现为黄浦江水系与洮涌、苕溪和沿江水系呈显著差异。在 2 个一级生态分区之间, 鱼类多样性无显著差异但群落结构显著不同, 主要因鲃、鲫、似鳊等优势种及宽鳍鱲、尖头鲈、中华青鲮、食蚊鱼等偶见种的空间分布差异所引起; 在 4 个二级生态分区之间, 鱼类多样性和群落结构均存在显著的空间变化。

关键词: 太湖流域; 河流鱼类; 群落结构; 物种多样性; 时空分布

Spatial and temporal patterns of stream fish assemblages within Taihu Basin

LI Qifang¹, YAN Yunzhi^{1**}, CHU Ling¹, ZHU Ren¹, GAO Junfeng² & GAO Yongnian²

(1: Provincial Key Laboratory of Biotic Environmental and Ecological Safety, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, P.R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China)

Abstract: Identifying the distribution of species composition and their abundance of fishes is basic for the conservation and management of fish diversity. Based on the data collected from 57 stream segments within the Taihu Lake Basin during October 2013 and May 2014, we examined how the stream fish assemblages vary spatially and seasonally in this study area. A total of 5051 individuals representing 46 species were collected, among which Cyprinidae fishes are amounted to 26 species. Fish diversity in October was significantly higher than that in May, and fish assemblage structures also significantly differed seasonally. Significant variations among different subbasins were observed for both fish species diversity and assemblage structures. The Yanjiang and Zhaoge subbasins had relatively lower species diversity, while those in the Nanhe and Tiaoxi subbasins were relatively higher. Assemblage structures in the Huangpujiang subbasin showed significantly difference from those in the Zhaoge, Tiaoxi and Yanjiang subbasins. When the spatial variations in fish assemblages among ecoregions were considered, fish assemblage structures, not species diversity, showed significantly variation between two ecoregions at level-1; while both assemblage structures and species diversity differed significantly among four ecoregions at level-2. This among-ecoregion variations in assemblage structures resulted from the spatial distribution of some dominant fishes, such as *Hemiculter leucisculus*, *Carassius auratus* and *Pseudobrama simoni*, and some rare fishes, such as *Zacco platypus*, *Phoxinus oxycephalus*, *Oryzias latipes sinensis* and *Gambusia affinis*.

Keywords: Taihu Basin; stream fish; assemblage structure; species diversity; spatio-temporal pattern

太湖流域(30°29'~32°08'N, 119°19'~121°80'E)地处长江下游尾间与杭州湾之间,北抵长江、东临东海、南滨钱塘江、西以天目山和茅山等山丘为界,流域面积达 36500 km²,占我国国土面积的 0.38%。流域内

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-001-03)和国家自然科学基金项目(31172120)联合资助。2015-09-05 收稿;2016-02-29 收修改稿。李其芳(1989~),女,硕士研究生;E-mail: qifang335@163.com。

** 通信作者;E-mail: yanyunzhi7677@126.com。

的地势呈西部高东部低、四周高中间低,地貌分为山地丘陵和平原两大类,其中山地丘陵主要分布在流域西部地区,而北部、东部和南部则主要为平原^[1-3].高永年等^[4]根据海拔和河网密度等变量将该流域分为2个一级生态分区,即西部丘陵河流生态区和东部平原河流湖泊生态区.太湖流域气候属我国亚热带气候,四季分明、雨水丰沛、热量充裕,年平均降雨量约1200 mm,其中60%~70%集中在5—9月份.流域内河网密布,河道总长 1.2×10^6 km,河道面积2392 km²^[5],水系主要分为西部的南河、西南部的苕溪、东南部的黄浦江、西北部的洮滬及东北部的沿长江水系^[3,6].

太湖流域的鱼类物种繁多且习性多样;据不完全统计,该流域的鱼类共计107种,隶属于14目25科;根据其生态习性,可分为多种类型,如:纯淡水鱼类(可进一步分为喜静水或缓流、喜急流的定居型物种以及半洄游型物种)、溯河和降河洄游型鱼类、咸淡水鱼类等^[7-8].在近50年时间里,太湖鱼类物种逐渐减少:1960s—1970s,太湖鱼类计101种^[7];至21世纪初(2003年),仅被报道60种^[9];至2010年,物种进一步减少为47种^[10].同历史资料相比,太湖鱼类物种组成的主要变化趋势表现为:1)原常见鱼类的种类数量明显下降,2)大多数洄游性鱼类已基本绝迹,定居性鱼类成为区域内的主要鱼类,3)半洄游性鱼类也逐渐减少(尽管鲢、鳙等依靠人工放流维持在一定种群数量),4)目前的鱼类物种组成中,除人工放养的“四大家鱼”以外,绝大多数现存种均为小型鱼类^[10].究其原因,主要是因为人类破坏了鱼类的栖息地、产卵场和育肥场及人类对渔业资源的过度捕捞^[11],此外太湖城镇化发展、土地利用方式变化等对流域内水环境造成极大的干扰,造成流域内水质恶化直接影响水生生物的生存^[12-13].

截至目前,有关太湖流域的鱼类调查研究多局限于太湖湖区^[9-10,14]或者太湖支流或局部河段^[15-16],有关全流域河流鱼类物种组成及其数量的时空分布格局尚未见报道.基于2013年10月、2014年5月对全流域57个河道样点的调查数据,本文研究太湖流域鱼类群落的时空分布规律,着重解析生态分区、水系间鱼类群落的空间变化及其季节动态,为太湖流域的水生态学研究积累基础资料,也为其鱼类多样性的保护及其资源的合理利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 调查样点设置

本研究共设置57个调查河段,覆盖在研究区域内各一级和二级生态分区(太湖湖区除外)^[4,17]及不同水系^[3,6]之间(图1).在野外调查过程中,根据可抵达性、可操作性及避开明显人为干扰等原则,选取各调查河段的具体采集样点.57个调查样点,2个一级生态分区的样点数分别为21个(西部丘陵河流生态区,II区)和36个(东部平原河流湖泊生态区,II2区),4个二级生态分区的样点数分别为10个(湖西丘陵森林农田交错河源生境水生态亚区,III亚区)、11个(浙西山区森林河源生境水生态亚区,II2亚区)、23个(沪苏嘉农田河网生境水生态亚区,II3亚区)和13个(武锡虞农田河网生境水生态亚区,II4亚区);此外,流域内5个水系间的样点分布情况为:洮滬水系7个样点、南河水系6个样点、苕溪水系15个样点、黄浦江水系20个样点、沿江水系9个样点(图1).

1.2 鱼类标本采集

2013年10月、2014年5月对样点进行采样.调查渔具视样点水深来选择,可涉水水域(水深不足1 m),采用背式电鱼器(电瓶:20 A,12 V;电鱼器:3000 W)直接涉水取样;不可涉水区域(水深超过1 m),采用船运电捕器(电瓶:100 A,12 V;电鱼器:32000 W)并借助皮筏艇进行取样.每个样点取样时间约30 min,采样河长100 m,以尽可能确保不同样点间数据的可比性.在新鲜状态下对鱼类的分类地位进行现场鉴定,统计并记录渔获物的物种组成、物种数和个体数,疑难种以8%福尔马林溶液固定后带回实验室进一步鉴定.

1.3 统计分析

根据特定物种的出现频率(F)和相对多度(P)来确定该物种的常见性和优势度, F 和 P 的计算公式分别为:

$$F_i = S_i / S \times 100\% \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N \times 100\% \quad (2)$$

式中, S_i 为*i*物种的出现样点数, S 为所有样点总数, N_i 为*i*物种的个体数, N 为所有渔获物个体总数. $F \geq$

40% 的鱼类物种为常见种, $F < 10\%$ 的鱼类物种为稀有种, 介于两者之间的鱼类物种为偶见种; $P \geq 10\%$ 属优势种, $P < 10\%$ 属非优势种^[18]. 进一步, 根据 F 和 P 计算每个物种的相对重要性 (IRI), 公式为:

$$IRI_i = P_i \cdot F_i \quad (3)$$

除了以样点的物种数和个体数反映样点的物种多样性以外, 还计算出样点鱼类的香农威纳指数 (H'):

$$H' = -\sum P_i \cdot \log_2 P_i \quad (4)$$

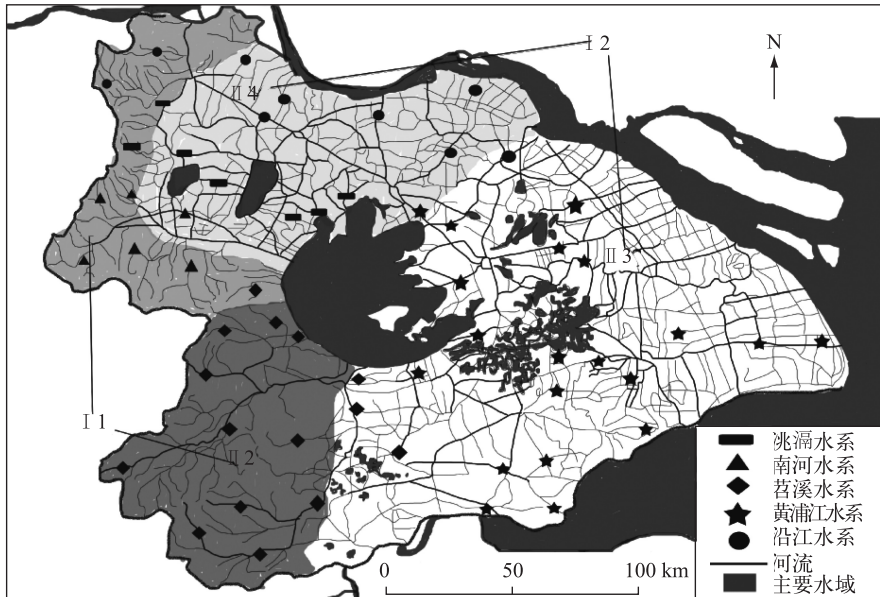


图 1 太湖流域鱼类调查样点示意(I 和 II 分别代表一级和二级生态分区, 1~4 分别代表各分区编号)

Fig.1 Fish sampling sites within Taihu Basin

(I and II represented the ecoregions defined at level I and level II, respectively;

1~4 represented the codes of each ecoregion at level I or II)

运用多因素方差分析 (Multi-way ANOVA), 检验生态分区、水系与季节对鱼类多样性的影响, 包括物种数、个体数和 H' . 为满足正态性和方差齐性, 对全部变量数据进行了 $\lg(x+1)$ 转换. 因鱼类多样性存在不同水系间及不同二级生态分区间的显著差异, 进一步分别使用 SNK (Student-Newman-Keuls) 多重比较解析水系间及二级生态分区间的鱼类多样性变化. 数据分析在 SPSS 19.0 软件下完成, 视 $P < 0.05$ 为显著性水平.

基于 Bray-Curtis 相似性系数构建关于鱼类数量的群落结构的相似性矩阵, 运用双因素交叉相似性分析 (Two-way ANOSIM) 检验水系和时间对鱼类群落结构的影响, 运用单因素相似性分析 (One-way ANOSIM) 分别解析一级生态分区间与二级生态分区间鱼类群落结构的差异, 视 P 值 (< 0.05) 确定群落结构差异显著性, 视 R 值确定鱼类群落的分离程度: $R > 0.75$, 群落完全分离; $0.5 < R \leq 0.75$, 群落少量重叠但仍明显分离; $0.25 < R \leq 0.5$, 群落存在明显重叠但仍部分分离; $R \leq 0.25$, 群落重叠明显几乎不可分. 运用相似性百分比分析 (similarity percentages, SIMPER) 分别检验维持群内相似性的关键贡献物种与维持群间不相似性的关键物种. 为减低极端数据的负面影响, 全部数据经 $\lg(x+1)$ 转换后用于分析. 数据分析在 PRIMER 5.0 软件下完成.

2 结果

2.1 渔获物概况

共采集鱼类标本 5051 尾, 计 46 种, 隶属于 8 目、14 科, 其中鲤科鱼类 26 种, 占全部物种数的 57%, 鲤科鱼类共 4142 尾, 占总数量的 82%. 总体上, 鲫、鲃、似鳊和麦穗鱼的出现频率大于 40%, 属研究区域内的常见种; 斑条鲮、彩石鲮、子陵吻虾虎鱼、棒花鱼、红鳍原鲃、中华沙塘鳢、鲤、食蚊鱼和寡鳞飘鱼出现频率介于

10%~40%之间,属于偶见种;另外32种鱼类的出现频率均低于10%。相对多度除宽鳍鱮、中华青鲂、泥鳅外均较低(不足1%),属稀有种。根据相对重要性指数,鲫和鳊的重要值指数超过1000,似鳊超过500,均为研究区域内的优势种;而斑条鲮、麦穗鱼、彩石鲂、子陵吻虾虎鱼的重要值指数也都大于100,为研究区域内的相对优势种(表1)。此外,嵊县小鳊、马口鱼、圆尾斗鱼、司氏鳊、大银鱼、间下鱊仅在10月份采集到,北鳊、达氏鲃、切尾拟鲮、白边拟鲮仅在5月份采到。5月和10月各采集鱼类37种和43种,其中34种在2个季节均采集到。

2.2 鱼类多样性

运用多因素方差分析解析季节、水系、一级和二级生态分区对鱼类多样性的影响,结果显示,鱼类的物种数、个体数和 H' 值的季节变化显著($P<0.05$)(表2),其中10月份的鱼类多样性(物种数为 6.82 ± 2.40 种;个体数为 56.37 ± 46.23 尾; H' 值为 1.96 ± 0.55)均显著高于5月份(物种数为 5.22 ± 4.03 种;个体数为 32.30 ± 27.59 尾; H' 值为 1.46 ± 0.73)($P<0.05$)。就鱼类多样性的空间变化而言,物种数、个体数和 H' 值在不同水系间均存在显著差异($P<0.05$);二级生态分区间的物种数和个体数均呈显著差异($P<0.05$), H' 值无显著差异($P>0.05$);但一级生态分区对鱼类多样性无显著影响($P>0.05$)(表2)。此外,季节、水系、一级和二级生态分区对鱼类物种数、个体数和 H' 值均无显著性交互影响($P>0.05$)。

进一步,运用SNK(Student-Newman-Keuls)检验进行多重比较检验不同水系及不同二级生态分区间的鱼类多样性的差异,结果显示,沿江和洮湍水系的鱼类物种数显著低于南河和苕溪水系($P<0.05$),黄浦江水系则居中;洮湍水系的鱼类个体数显著低于黄浦江、南河和苕溪水系($P<0.05$); H' 值的显著性变化仅出现于沿江水系与南河水系间,后者显著大于前者($P<0.05$)(表3)。就4个二级生态分区的鱼类物种数和个体数而言,其显著性变化主要表现为:物种数在II2和II3亚区显著高于II4亚区($P<0.05$),而个体数在II3亚区显著高于II4亚区($P<0.05$);而西部丘陵河流水生态区(一级分区)的2个二级生态亚区II1和II2间的鱼类多样性无显著差异($P>0.05$)。

2.3 鱼类群落结构

运用相似性分析(ANOSIM)解析季节、水系、一级和二级生态分区对鱼类群落结构的影响,结果显示,不同季节、水系、一级和二级生态分区间的鱼类群落结构均存在显著差异($P<0.05$);不同季节间群落结构的分离程度较低(Global $R=0.04$),不同一级(Global $R=0.24$)和二级生态分区(Global $R=0.20$)间的分离程度相对较高,而不同河流间的分离程度居中(Global $R=0.16$)。

5个水系间群落结构的两两比较结果显示,黄浦江水系的鱼类群落与洮湍、苕溪和沿江3个水系均存在显著差异($P<0.05$),而苕溪与沿江水系间的群落结构也呈显著差异($P<0.05$);由 R 值可见,黄浦江水系鱼类与洮湍和苕溪水系的分离程度相对较高($R>0.25$),而其他两两水系间的群落结构分离程度较低($R<0.25$)(表4)。就4个二级生态分区而言,其鱼类群落结构差异仅见于隶属不同一级生态分区的二级生态分区之间,即:II1亚区与II3、II4亚区之间,以及II2亚区与II3、II4亚区之间($P<0.05$),但相同一级生态分区的二级生态亚区间(II1与II2亚区、II3与II4亚区)的鱼类群落无显著差异($P>0.05$)(表5)。

考虑到生态分区层次上鱼类群落结构的差异主要发生在不同一级生态分区之间,运用相似性百分比分析仅解析了I级生态分区和II级生态分区间群落结构差异的贡献物种(累计贡献率达90%的关键物种),结果显示,鳊、鲫和似鳊3种鱼类的多度变化(在I级生态区中具有更高多度)的贡献率分别达到10%以上,是造成2个一级生态分区间结构差异的主要贡献物种,此外,宽鳍鱮和尖头鱊仅出现于生态分区I,青鲂的多度在生态分区I是生态分区II的100倍以上,中华沙塘鳢和子陵吻虾虎鱼在I区的多度也高于II区的10倍左右,但是,寡鳞飘鱼、食蚊鱼和短颌鲚在II区的多度更大,超出I区的数十倍(表6)。

3 讨论

与湖泊、水库等静水系统不同,河流系统的水文、水位等条件受季节性干旱和洪涝的影响,因而具有更高的季节动态^[19],这必然会对局域鱼类群落的物种组成及其数量产生重要影响^[20-21]。此外,鱼类自身的周期性生活史事件(繁殖、洄游、死亡等)也影响着局域鱼类群落结构及其多样性,如:繁殖活动可引起大量补充群体的增加、洄游鱼类的周期性栖息地转化可引起局域鱼类群落组成的变化等^[22-24]。本研究结果显示,10

表1 太湖流域鱼类的物种组成、*P*、*F* 和 *IRI*

Tab.1 Species composition, frequency of occurrence, relative abundance and index of relative importance of fish collected from the Taihu Basin

目	科	种	<i>P</i> /%	<i>F</i> /%	<i>IRI</i>	
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	翘嘴鲌 <i>Culter ilishaeformis</i>	0.30	7.89	2.37	
		达氏鲌 <i>C. dabryi</i>	0.10	3.51	0.35	
		短须鲮 <i>Acheilognathus barbatulus</i>	0.57	5.26	2.99	
		斑条鲮 <i>A. taenianalis</i>	6.28	38.60	242.41	
		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	0.77	16.67	12.84	
		鲫 <i>Carassius auratus</i>	17.58	76.32	1341.71	
		鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	16.87	65.79	1109.88	
		红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	1.74	23.68	41.20	
		福建小鰾鲌 <i>Microphysogobio fukiensis</i>	0.12	3.51	0.42	
		嵯县小鰾鲌 <i>M. chengsiensis</i>	0.02	0.88	0.02	
		黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	0.30	8.77	2.63	
		华鳊 <i>S. sinensis</i>	0.02	0.88	0.02	
		彩副鲮 <i>Paracheilognathus imberbis</i>	0.61	4.39	2.68	
		麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	3.03	42.11	127.59	
		似鲮 <i>Pseudobrama simoni</i>	14.31	53.51	765.73	
		棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	3.31	28.95	95.82	
		宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	3.25	4.39	14.27	
		马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	0.08	1.75	0.14	
		彩石鲂鮈 <i>Rhodeus lighti</i>	8.99	33.33	299.64	
		尖头鲌 <i>Phoxinus oxycephalus</i>	0.51	5.26	2.68	
		银鲌 <i>Squalidus argentatus</i>	0.06	2.63	0.16	
		寡鳞鲈 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	2.85	10.53	30.01	
		细鳞鲌 <i>Xenocypris microlepis</i>	0.04	1.75	0.07	
		赤眼鲮 <i>Spualio barbatus</i>	0.10	1.75	0.18	
		鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	0.18	5.26	0.95	
		鳅科 Cobitidae	北鳅 <i>Lefua costata</i>	0.06	2.63	0.16
			泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1.47	7.90	11.61
			中华花鳅 <i>Cobitis sinensis</i>	0.18	0.88	0.16
			大斑花鳅 <i>C. macrostigma</i>	0.36	0.88	0.32
		鲈形目 Perciformes	塘鳢科 Eleotridae	黄魮鱼 <i>Hypseleotris swinhonis</i>	0.32	7.02
中华沙塘鳢 <i>Odontobutis sinensis</i>	1.76			20.18	35.52	
鳢科 Channidae	乌鳢 <i>Channa argus</i>		0.18	6.14	1.11	
斗鱼科 Belontiidae	圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>		0.06	1.75	0.11	
虾虎鱼科 Gobiidae	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	7.72	31.58	243.80		
鲇形目 Siluriformes	刺鲃科 Mastacembelidae	刺鲃 <i>Mastacembelus aculeatus</i>	0.08	3.51	0.28	
	鲿科 Siluriformes	切尾拟鲿 <i>Pesudobagrus truncatus</i>	0.04	0.88	0.04	
		白边拟鲿 <i>P. albomarginatus</i>	0.02	0.88	0.02	
		黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	0.12	5.26	0.63	
钝头鲿科 Amblycipitidae	司氏缺 <i>Liobagrus styani</i>	0.02	0.88	0.18		
鲿形目 Cyprinodontiformes	鲿科 Cyprinodontidae	中华青鲿 <i>Oryzias latipes sinensis</i>	1.70	6.14	10.44	
	胎鲿科 Poeciliidae	食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	3.35	13.16	44.09	
鲑形目 Salmoniformes	银鱼科 Salangidae	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranium</i>	0.08	2.63	0.21	
合鳃鱼目 Synbranchiformes	合鳃鱼科 Synbranchidae	黄鳝 <i>Monoperus albus</i>	0.08	3.51	0.28	
颌针鱼目 Beloniformes	鱮科 Hemiramphidae	间下鱮 <i>Hemirhamphus intermedius</i>	0.04	0.88	0.35	
鲱形目 Clupeiformes	鲱科 Engraulidae	短颌鲱 <i>Coilia brachygnathus</i>	0.40	7.02	2.81	

表 2 基于多因素方差分析检验季节、水系、一级和二级生态分区间鱼类多样性的变化

Tab.2 Variations in fish species diversity across seasons, sub-basins and ecoregions at level I, II based on Multi-way ANOVA

	物种数	个体数	H' 值
季节	7.94 **	6.60 *	17.19 **
水系	4.04 **	2.98 *	3.61 **
一级生态分区	0.35	2.00	2.09
二级生态分区	3.88 *	2.72 *	1.41

* 表中的数值代表 F 值; * 和 ** 分别代表 P<0.05 和 P<0.01.

表 3 太湖流域 5 个水系间鱼类物种数、个体数和 H' 值的变化

Tab.3 Variation in fish species richness, abundance and H' among five subbasins of Taihu Basin

水系	物种数(种)	个体数/尾	H' 值
洮滬水系	4.20±2.20 ^a	21.10±16.71 ^a	1.51±0.78 ^{ab}
南河水系	6.67±1.56 ^b	42.67±27.16 ^b	2.02±0.39 ^a
苕溪水系	7.20±6.44 ^b	46.13±35.68 ^b	1.79±0.67 ^{ab}
黄浦江水系	6.23±2.61 ^{ab}	50.50±41.98 ^b	1.78±0.67 ^{ab}
沿江水系	4.17±2.46 ^a	40.28±53.12 ^{ab}	1.31±0.75 ^b

* 同一列中的不同小写字母代表差异显著 (P<0.05).

表 4 基于相似性分析检验 5 个水系间鱼类群落结构的空 间变化

Tab.4 Variations in fish assemblage structures across five subbasins based on ANOSIM

水系	洮滬水系	南河水系	苕溪水系	黄浦江水系	沿江水系
洮滬水系		0.08	-0.01	0.31	0.05
南河水系	ns		-0.12	-0.05	0.06
苕溪水系	ns	ns		0.26	0.12
黄浦江水系	**	ns	**		0.21
沿江水系	ns	ns	*	**	

* 右上侧为 R 值, 左下角为 P 值; ns、* 和 ** 分别代表 P>0.05、P<0.05 和 P<0.01.

表 5 基于相似性分析检验 4 个二级生态分区间鱼类群落结构的空 间变化

Tab.5 Variations in fish assemblage structures across four ecoregions at level II based on ANOSIM

二级生态分区	II1 亚区	II2 亚区	II4 亚区	II3 亚区
II1 亚区		0.05	0.17	0.15
II2 亚区	ns		0.35	0.23
II4 亚区	*	**		0.09
II3 亚区	**	**	ns	

* 右上侧为 R 值, 左下角为 P 值; ns、* 和 ** 分别代表 P>0.05、P<0.05 和 P<0.01.

月份的太湖流域河流鱼类物种数、个体数及 H' 值都显著高于 5 月份。因研究区域内绝大多数鱼类的繁殖活动集中在春、夏季, 因此 5 月和 10 月分别代表研究区域内绝大多数鱼类的繁殖期和非繁殖期, 那么相对于 5 月而言, 10 月有大量的当年生补充群体加入, 这导致 10 月鱼类多样性的显著性上升。朱仁等^[24]基于全年对黄山殷溪河(与太湖流域一致, 同属我国亚热带季风气候区) 的鱼类调查数据, 观察到鱼类多样性的显著下降现象发生在 11 月, 并认为其主要与冬季低温(水温接近 4℃)、资源贫乏有关。因此, 鱼类自身潜

在的繁殖期群体补充及越冬死亡现象, 可解释本研究结果中鱼类多样性的显著性季节变化; 进一步, 鱼类多样性的季节变化导致了鱼类群落结构的季节动态。

表 6 基于相似性百分比分析解析 I1 与 I2 生态区鱼类群落结构差异的关键物种

Tab.6 The species contributing the dissimilarity in fish assemblage structures between two I-ecoregions

关键物种	平均多度		平均不相似性	贡献率/ %	累积 贡献率/%
	I1 生态区	I2 生态区			
鳊	5.15	9.50	7.89	10.88	10.88
似鳊	6.03	6.97	7.86	10.84	21.72
鲫	6.13	9.38	7.51	10.36	32.08
子陵吻虾虎鱼 [#]	8.53	1.06	6.41	8.85	40.93
彩石鲂鮈	3.25	4.76	4.91	6.77	47.70
斑条鲮	0.98	4.09	4.76	6.56	54.26
麦穗鱼	1.13	1.59	3.75	5.18	59.43
棒花鱼 [#]	1.63	1.50	3.51	4.84	64.28
中华沙塘鳢 [#]	2.10	0.16	3.43	4.73	69.00
宽鳍鱲 [#]	4.33	0	2.45	3.39	72.39
红鳍原鲌	0.43	1.04	2.34	3.23	75.62
食蚊鱼	0.04	2.44	2.30	3.17	78.79
泥鳅 [#]	1.83	0.51	1.86	2.57	81.36
寡鳞飘鱼	0.02	2.10	1.67	2.30	83.66
中华青鲮 [#]	2.13	0.01	1.62	2.23	85.89
鲤	0.03	0.56	1.47	2.03	87.92
尖头鲮 [#]	0.50	0	1.07	1.47	89.40
短颌鲚	0.05	0.26	0.76	1.05	90.44

[#]所示物种在 I1 生态区具有更高多度。

因人类居住密度、土地利用强度等对水体理化环境及水质的影响,目前太湖流域五大水系间的水质条件不同;李娟英等^[6]经研究发现,太湖流域西部丘陵地带的苕溪和南河水水质较好,处于中度富营养化水平,而其他水系则处于重度富营养化水平;吴召仕等^[3]的研究结果进一步表明,沿江水系的营养水平最高且污染最严重,而苕溪水系的营养水平最低且水质最好。考虑到水体污染对河流鱼类物种组成及其数量的潜在影响^[25],这可能是本研究观察到的太湖流域不同水系间鱼类物种多样性的差异——沿江水系和洮滬水系的鱼类多样性偏低,黄浦江水系居中,而南河水系和苕溪水系偏高的原因;此外,就鱼类群落结构而言,沿江和苕溪水系间鱼类群落也存在显著性差异。黄浦江水系的鱼类群落同其他四大水系的差异较大,显著差异于苕溪、洮滬和沿江水系的鱼类群落结构。太湖流域的五大水系中,以苕溪、南河和洮滬水系为太湖上游的入湖水系,而黄浦江和沿江水系为其下游的出湖水系;同沿江水系的入江口全部被建闸控制不同,黄浦江是太湖流域目前唯一的敞口入江水系^[26-30]。已有研究表明,在流域生态系统中,不同河段或不同支流由于所处流域内空间位置上的差异,即使其非生物环境条件较为一致,但其生物环境因子及其生态过程往往存在差异,这将导致这些河段或支流具有不同的鱼类群落结构^[31-32]。因黄浦江下游与长江干流直接相通,潜在的下游生态过程可能对黄浦江鱼类群落施加重要影响,因而导致黄浦江水系与其他水系鱼类群落结构的差异。

河流鱼类的物种组成及其数量的空间分布,不仅取决于河道内的水文条件、理化环境及栖息地特征等,还受整个集水区的地形地貌、景观特征等影响^[32-35],究其原因,是因为集水区的景观特征可影响溪流水源的补给,营养、矿物质和沉积物等的输入,进而影响溪流生态系统的水流流态、营养水平、水热状况、沉积和冲刷作用过程^[34,36]。流域的水生态分区往往是根据陆地的地形地貌、土地利用/覆盖等景观特征构建而成^[36-37],因而已有很多研究发现河流鱼类群落的空间分布同水生态分区间存在密切关联,这反映了流域集水区陆地景观特征对鱼类群落的影响^[38-40]。在本研究区域内,根据海拔和河网密度等数据可将太湖流域分为 2 个一级水生态分区,即西部的丘陵河流生态区与动物的平原河流湖泊生态区^[4];进一步,Gao 等^[17]还根据太湖流域的土地利用/覆盖类型及其强度,将太湖流域分为 5 个二级生态亚区(含太湖湖区这一生态亚区)。在一级生态分区空间尺度上,尽管河流鱼类的物种多样性无显著的空间变化,但其鱼类群落结构差异

显著,该差异主要由区域内部分物种的分布和数量变化所引起,如鳊、鲫和似鳊等优势物种在东部平原河流湖泊生态区有着更广泛的分布且数量更高,而宽鳍鱲和尖头鱲仅出现于西部丘陵河流生态区。西部丘陵生态区的海拔较高,其河流具有落差较大、水流较清急等特点^[4],因而适于宽鳍鱲等典型的急流性物种等分布;尖头鱲作为受最近一次冰川的影响而在长江流域仍零星分布的一种孑遗种,常栖息于海拔较高、水温较低的山涧溪流^[40-41]。相反,东部平原生态区的河流落差较小,水流较为缓和^[4],因而更适于鳊、鲫等缓流性或静水性物种所分布。本研究还发现,在二级生态分区空间尺度上,尽管鱼类群落结构及其多样性均存在显著性空间变化,但其群落结构的显著差异仅出现于隶属不同一级生态分区的二级生态亚区间(即:相同一级生态分区的二级生态亚区间的群落结构均无显著差异),而鱼类多样性的空间变化可发生于同属东部平原河流湖泊生态区的 II3 亚区和 II4 亚区之间。为何太湖流域鱼类物种组成(群落结构)与数量(多样性)对一级和二级生态分区的响应不同呢?这可能是因为,不同类型的环境因素在影响河流鱼类群落中的相对重要性,既取决于特定研究所选取的空间尺度大小^[41],又受特定区域的环境要素特点所影响^[33],甚至还视群落特征变量(如物种组成、物种数等)而异^[18]。

综上所述,受河流周期性水文变化(丰水、枯水)及鱼类自身生活史事件(群体补充、越冬死亡)的影响,太湖流域河流鱼类群落结构及其多样性具有显著性的季节动态。不同水系的水体环境及水质条件存在差异,且不同水系在流域网络中所处的空间位置及其同长江干流的连通性不同,这造成了五大水系间的河流鱼类群落的空间变化。不同水生态分区的地形地貌、海拔、土地利用/覆盖类型及其强度存在差异,因而河流鱼类群落的空间分布与水生态分区存在密切关联。进一步表明,太湖流域河流鱼类物种多样性的空间分布,主要取决于水体环境和集水区土地利用/盖度(太湖流域二级生态分区的依据)的作用,而鱼类群落结构的分布则主要受流域网络的空间过程(如黄浦江作为唯一连通长江干流的水系,其鱼类群落结构与其他水系的不同)以及地形地貌和海拔(一级生态分区的依据)的联合影响。

4 参考文献

- [1] Xie Hongbin, Yu Xiaogan, Zhang Yunlin. Preliminary study on the coincident relationship between water environment and human activity in Taihu Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, **10**(5): 393-400 (in Chinese with English abstract). [谢红彬, 虞孝感, 张运林. 太湖流域水环境演变与人类活动耦合关系. 长江流域资源与环境, 2001, **10**(5): 393-400.]
- [2] Gao Junfeng. Flood response to land use change in Taihu Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(2): 150-156 (in Chinese with English abstract). [高俊峰. 太湖流域土地利用变化及洪涝灾害响应. 自然资源学报, 2002, **17**(2): 150-156.]
- [3] Wu Zhaoshi, Cai Yongjiu, Chen Yuwei *et al.* Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bio-assessment of the main river systems in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5): 686-694 (in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/2011.0504. [吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜等. 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 686-694.]
- [4] Gao Yongnian, Gao Junfeng. Delineation of aquatic ecoregions in Taihu lake basin. *Geographical Research*, 2010, **29**(1): 111-117 (in Chinese with English abstract). [高永年, 高俊峰. 太湖流域水生生态功能分区. 地理研究, 2010, **29**(1): 111-117.]
- [5] Cui Guangbai, Chen Xing, Yu Zhongbo. Research on the mechanism of eutrophication control in Taihu Basin. *Sciencepaper Online*, 2007, **2**(6): 424-429 (in Chinese with English abstract). [崔广柏, 陈星, 余钟波. 太湖流域富营养化控制机理研究. 中国科技论文, 2007, **2**(6): 424-429.]
- [6] Li Juanying, Cao Hongyu, Cui Yu *et al.* Water environmental characteristics analysis and eutrophication assessment on lakes in Taihu Basin. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**: 7-13 (in Chinese with English abstract). [李娟英, 曹宏宇, 崔昱等. 太湖流域主要水系水环境特征分析与富营养化评价. 水生态学杂志, 2012, **33**: 7-13.]
- [7] Gu Qingyi, Qiu Qianru. The characteristics of the fish fauna in Taihu Lake and discussion of the adjustment and transformation. *Freshwater Fisheries*, 1978, (6): 33-37 (in Chinese with English abstract). [谷庆义, 仇潜如. 太湖鱼类区系的特点及其改造和调整的探讨. 淡水渔业, 1978, (6): 33-37.]
- [8] Ni Yong, Zhu Dequan eds. *The fishes of the Taihu Lake*. Shanghai: Shanghai Scientific Technology Press, 2005 (in Chi-

- nese).[倪勇,朱德全.太湖鱼类志.上海:上海科学技术出版社,2005.]
- [9] Zhu Songquan. Ichthyological survey of Lake Taihu during 2002–2003. *J Lake Sci*, 2004, **16**(2): 120-124(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2004.0204.[朱松泉. 2002–2003年太湖鱼类学调查. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 120-124.]
- [10] Mao Zhigang, Gu Xiaohong, Zeng Qingfei *et al.* Status and changes of fishery resources(2009–2010) in Lake Taihu and their responses to water eutrophication. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 967-973(in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/2011.0621.[毛志刚,谷孝鸿,曾庆飞等.太湖渔业资源现状(2009–2010年)及与水体富营养化关系浅析.湖泊科学,2011, **23**(6): 967-973.]
- [11] Su Hailei, Wu Fengchang, Li Huixian *et al.* Aquatic biota of Taihu Lake and comparison with those of the North American Great Lakes. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **24**(12): 1346-1354(in Chinese with English abstract).[苏海磊,吴丰昌,李会仙等.太湖生物区系研究及与北美五大湖的比较.环境科学研究,2012, **24**(12): 1346-1354.]
- [12] Liu Zhaode, Yu Xiaogan, Wang Zhixian. The current water pollution of Taihu drainage basin and the new management proposals. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(4): 467-474(in Chinese with English abstract). [刘兆德,虞孝感,王志宪.太湖流域水环境污染现状与治理的新建议.自然资源学报,2003, **18**(4): 467-474.]
- [13] Fan Chengxin, Zhu Yuxin, Ji Zhijun *et al.* Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 235-241(in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/2002.0307.[范成新,朱育新,吉志军等.太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征.湖泊科学,2002, **14**(3): 235-241.]
- [14] Tang Shengkai, Zhang Tongqing, Shen Zhenhua *et al.* Investigate of the fish fauna and fish yield analysis in Lake Taihu. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, (2): 376-379(in Chinese with English abstract). [唐晟凯,张彤晴,沈振华等.太湖鱼类学调查及渔获物分析.江苏农业科学,2010, (2): 376-379.]
- [15] Chen Xiaohua, Li Xiaoping, Cheng Xi. Spatial-temporal distribution of fish assemblages in the upstreams of Huangpu River and Suzhou Creek. *Biodiversity Science*, 2008, **16**(2): 191-196(in Chinese with English abstract). [陈小华,李小平,程曦.黄浦江和苏州河上游鱼类多样性组成的时空特征.生物多样性,2008, **16**(2): 191-196.]
- [16] Huang Liangliang, Li Jianhua, Zou Limin *et al.* Effect of bank type on fish biodiversity in the middle-lower reaches of East Tiaoxi River, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(12): 3415-3423(in Chinese with English abstract).[黄亮亮,李建华,邹丽敏等.东苕溪中下游河岸类型对鱼类多样性的影响.生态学报,2011, **31**(12): 3415-3423.]
- [17] Gao Y, Gao J, Chen J *et al.* Regionalizing aquatic ecosystems based on the river subbasin taxonomy concept and spatial clustering techniques. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2011, **8**(11): 4367-4385.
- [18] Yan YZ, Xiang XY, Chu L *et al.* Influences of local habitat and stream spatial position on fish assemblages in a dammed watershed, the Qingyi Stream, China. *Ecology of Freshwater Fish*, 2011, **20**: 199-208.
- [19] Allan JD, Castillo MM. Stream ecology: Structure and function of running waters; 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2007.
- [20] Grossman GD, Moyle PB, Jr Whitaker JO. Stochasticity in structural and functional characteristics of an Indiana stream fish assemblage: a test of community theory. *The American Naturalist*, 1982, **120**(4): 423-454.
- [21] Matthews WJ. Fish faunal “breaks” and stream order in the eastern and central United States. *Environmental Biology of Fishes*, 1986, **17**: 81-92.
- [22] Welcomme RL. The biology and ecology of the fishes of a small tropical stream. *Journal of Zoology*, 1969, **158**: 485-529.
- [23] Wang Wenjian, Chu Ling, Si Chun *et al.* Spatial and temporal patterns of stream fish assemblages in the Qiupu Headwaters National Wetland Park. *Zoological Research*, 2013, **34**(4): 417-428(in Chinese with English abstract). [王文剑,储玲,司春等.秋浦河源国家湿地公园溪流鱼类群落的时空格局.动物学研究,2013, **34**(4): 417-428.]
- [24] Zhu Ren, Si Chun, Chu Ling *et al.* The spatio-temporal distribution of fish population the headwaters of the Qing Yi River: A study based on the habitat patches. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(4): 686-694(in Chinese with English abstract). DOI: 10.7541/2015.91.[朱仁,司春,储玲等.基于栖息地斑块尺度的青弋江河源溪流鱼类群落的时空格局.水生生物学报,2015, **39**(4): 686-694.]
- [25] Lima-Junior SE, Cardone IB, Goitein R. Fish assemblage structure and aquatic pollution in a Brazilian stream: some limitations of diversity indices and models for environmental impact studies. *Ecology of Freshwater Fish*, 2006, **15**(3): 284-290.
- [26] Wei Songshan. The chang of Taihu Lake drainage in the history. *Journal of Fudan University: Social Sciences*, 1979, (2): 58-64(in Chinese with English abstract).[魏嵩山.太湖水系的历史变迁.复旦学报:社会科学版,1979, (2):

- 58-64.]
- [27] Sun Yuhua. The front research of Hangzhou bay water achievements reached the advanced international level. *Advance in Earth Sciences*, 1991, **6**(5): 100 (in Chinese). [孙煜华. 杭州湾水系锋面研究成果达国际先进水平. 地球科学进展, 1991, **6**(5): 100.]
- [28] Han Changlai, Mao Rui. The structure characteristics and the functional variation of the river systems in Taihu Lake catchment. *J Lake Sci*, 1997, **9**(4): 300-306 (in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/1997.0403. [韩昌来, 毛锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 300-306.]
- [29] Wang Dapeng, Wang Zhoulong, Li Deyi *et al.* River network fractal spatial difference of Taihu basin. *Zhejiang Hydrootechnics*, 2006, (3): 5-7 (in Chinese with English abstract). [王大鹏, 王周龙, 李德一等. 太湖流域水系分形特征的空间分异研究. 浙江水利科技, 2006, (3): 5-7.]
- [30] Gu Xiejun, Xu Dongjiong, Cai Huanxing *et al.* Feature analysis and comparison on ecological risk of eutrophication in lakes and reservoir in Taoge River. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2011, (3): 13-17 (in Chinese with English abstract). [顾谢军, 徐东炯, 蔡焕兴等. 洮湍水系湖库富营养化生态风险的特点与比较. 环境监控与预警, 2011, (3): 13-17.]
- [31] Grenouillet G, Pont D, Hérisse C. Within-basin fish assemblage structure: the relative influence of habitat versus stream spatial position on local species richness. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, **61**: 93-102.
- [32] Li Yanhui, Yan Yunzhi, Zhu Ren *et al.* The spatial distribution of fish population the headwaters of the Wan He River: A study based on the river network. *Journal of Fishery Science of China*, 2014, **21**(5): 988-999 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.3724/SP.J.1118.2014.0988. [李艳慧, 严云志, 朱仁等. 基于河流网络体尺度的皖河河源溪流鱼类群落的空间格局. 中国水产科学, 2014, **21**(5): 988-999.]
- [33] Allan JD. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Evolution Systems*, 2004, **35**: 257-284.
- [34] Wang L, Seelbach PW, Hughes RM. Introduction to landscape influences on stream habitats and biological assemblages. In: HughesRM, Wang L, Seelbach PW eds. Landscape influences on stream habitats and biological assemblages. American Fisheries Society, Symposium 48. 2006: 1-23.
- [35] Lange K, Townsend CR, Gabrielson R *et al.* Responses of stream fish populations to farming intensity and water abstraction in an agricultural catchment. *Freshwater Biology*, 2014, **59**(2): 286-299.
- [36] Omernik JM. Perspectives on the nature and definition of ecological regions. *Environmental Management*, 2004, **34** (Supply 1): 27-38.
- [37] Van Sickle J, Hughes RM. Classification strengths of ecoregions, catchments, and geographic clusters for aquatic vertebrates in Oregon. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**(3): 370-384.
- [38] Larsen DP, Omernik JM, Hughes RM *et al.* Correspondence between spatial patterns in fish assemblages in Ohio streams and aquatic ecoregions. *Environmental Management*, 1986, **10**(6): 815-828.
- [39] Whitter TR, Hughes RM, Larsen DP. Correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, **45**(7): 1264-1278.
- [40] Pinto BCT, Araujo FG, Rodrigues VD *et al.* Local and ecoregion effects on fish assemblage structure in tributaries of the Rio Paraíba do Sul, Brazil. *Freshwater Biology*, 2009, **54**(12): 2600-2615.
- [41] Zhu Ren, Yan Yunzhi, Sun Jianjian *et al.* Feeding habits of fish assemblage in headwater streams of Chencun Reservoir in Huangshan Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 359-366 (in Chinese with English abstract). [朱仁, 严云志, 孙建建等. 黄山陈村水库河源溪流鱼类群落的食性. 生态学杂志, 2012, **31**(2): 359-366.]