

鄱阳湖物理生境特征及其对鱼类群落结构的影响

李敬鸿^{1,2}, 林鹏程², 黎明政², 刘焕章², 袁春营¹

(1. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457;

2. 中国科学院水生生物研究所 水生生物多样性与保护重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 湖泊鱼类群落结构与物理生境特征密切相关。为了探究鱼类群落结构与物理生境特征之间的关系, 在鄱阳湖设立 17 个采样点, 通过采集鱼类样本研究其群落结构, 并利用遥感技术分析样点物理生境特征(包括岸线分形维数、距离指数和高程值)及其空间区域差异。结果表明, 依据 17 个采样位点的物理生境特征, 鄱阳湖丰水期物理生境空间上可以划分为 3 个区域, 分别为北方区、南方区和主湖区, 但枯水期鄱阳湖生境没有显著的区域划分规律。丰水期鄱阳湖鱼类可以分为北方群、南方群和主湖区群 3 个类群, 而枯水期鱼类组成没有明显规律。从功能类群上看, 鄱阳湖鱼类以杂食性、湖泊定居性和偏好于底层以及中下层栖息的中小型鱼类为主。不同区域的鱼类功能群之间存在时间和空间上的变化, 北方区和南方区鱼类功能群组成相似, 主湖区与北方区和南方区存在差异。总体上, 鱼类群落结构的时空变化和差异与物理生境特征具有良好的一致性; 未来鄱阳湖鱼类的保护工作需要关注湖泊物理生境特征, 不同区域应制定不同的保护措施。

关键词: 鄱阳湖; 鱼类群落; 物理生境特征; 功能群

中图分类号: Q142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)05-0095-08

鄱阳湖是我国第一大淡水湖, 位于江西省北部(28°22'~29°45'N, 115°47'~116°45'E), 也是长江中下游最大的通江湖泊(朱海虹, 1997; 徐德龙等, 2001)。湖盆由南向北倾斜, 具有明显的季节变化与洪泛平原变化节律, 洪泛平原具有丰富的生物多样性和较高的生产力。有研究表明, 鄱阳湖共有鱼类 139 种、鸟类 310 种、两栖爬行动物 78 种、浮游动物 207 种、浮游植物 154 种、维管植物 102 种、沼生植物 74 种(吴申浩, 2020); 同时, 鄱阳湖作为长江中下游目前仅存的 3 个大型通江湖泊之一, 是江河湖复合生态系统的典型代表, 其鱼类群落结构特征具有重要的研究价值(黄金国和郭志永, 2007)。

湖泊鱼类群落结构组成受湖泊物理生境特征的影响极大。描述湖泊物理生境特征的主要参数有湖泊面积、容积、长度、宽度、岸线发展系数和平均深度等, 这些形态特征影响着湖泊的理化性质和水生生物

物分布规律(邬红娟和李俊辉, 2014)。许小华等(2014)根据高程数据计算发现, 鄱阳湖水下地势整体平缓, 地形坡度起伏小于 1.65 m 的面积占鄱阳湖总面积的 90.69%; 霍雨(2015)根据分形理论对鄱阳湖岸线进行研究, 发现 1975-2010 年鄱阳湖岸线逐渐变短、变直、趋于规则化; 张范平等(2020)通过研究长时间系列监测数据和现有成果, 发现鄱阳湖水文节律在过去十几年发生了重大变化, 主要表现为受江湖关系的变化影响, 秋季水位快速变化, 并直接影响了鄱阳湖湿地生境。

遥感技术是一种非接触的远距离探测技术, 具有多时相、大范围、光谱信息丰富等特点。遥感技术兴起于 20 世纪 80 年代, 不仅其本身成为许多行业跨入高新技术门槛的有力手段, 也大大促进了遥感学科的相关研究(李博等, 2007; 雷声等, 2011); 朱鹤等(2019)通过分析鄱阳湖近 50 年的遥感影像发现, 20 世纪 90 年代以前, 鄱阳湖水面变化受人类开发利用活动影响明显; 张矿(1993)通过遥感影像提取河道岸线并计算分形维数, 结合实地考察发现分维值与河道形态的实际情况具有相关性; 孙芳蒂和马荣华(2020)通过遥感反演鄱阳湖水位数据, 提出了一种适用于高时频遥感数据的水体快速识别方法; 翟俊等(2019)基于多元卫星遥感数据对鄱阳湖岸线及湿地进行监测与分析, 认为自 2013 年以来鄱阳湖湿地面积有所增加。

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900806); 生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006); 中国生物多样性监测与研究网络内陆水体鱼类多样性监测专项网。

作者简介: 李敬鸿, 1995 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为遥感应用与鱼类生态学资源保护。E-mail: ljhg66@sina.com

通信作者: 袁春营, 1965 年生, 男, 教授, 主要从事水产养殖与环境调控研究。E-mail: ycy201388@163.com

在面对复杂的生境和面积较大的区域时,人工调查存在明显的局限性。如流域调查工作中遇到地形复杂危险的区域,人工调查难以开展,其调查结果可能不能满足科研需要;而遥感技术可以高效完成复杂生境的调查工作,在流域生境调查中可发挥重要的作用。为了能够在较为宏观的尺度上对鄱阳湖鱼类群落结构特征有深刻认识,本文利用遥感技术对鄱阳湖湖区生境进行分类,并探讨不同生境下鱼类群落物种组成以及功能群的差异。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点设置

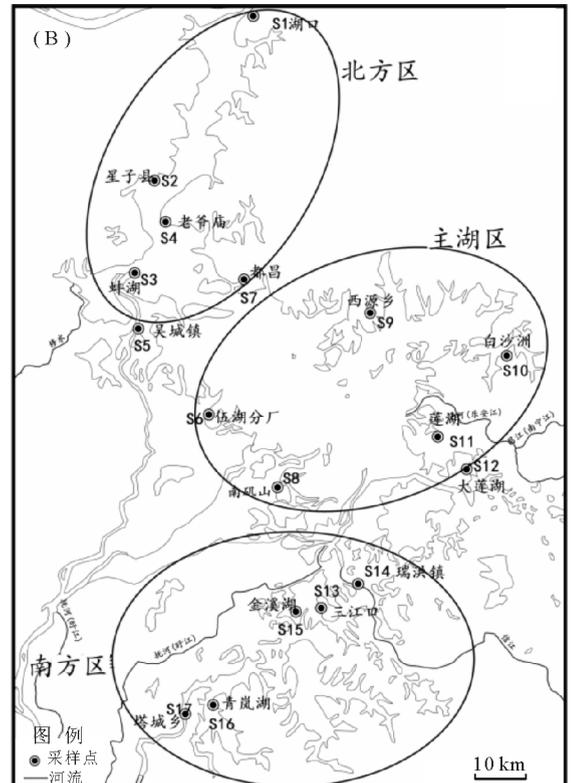
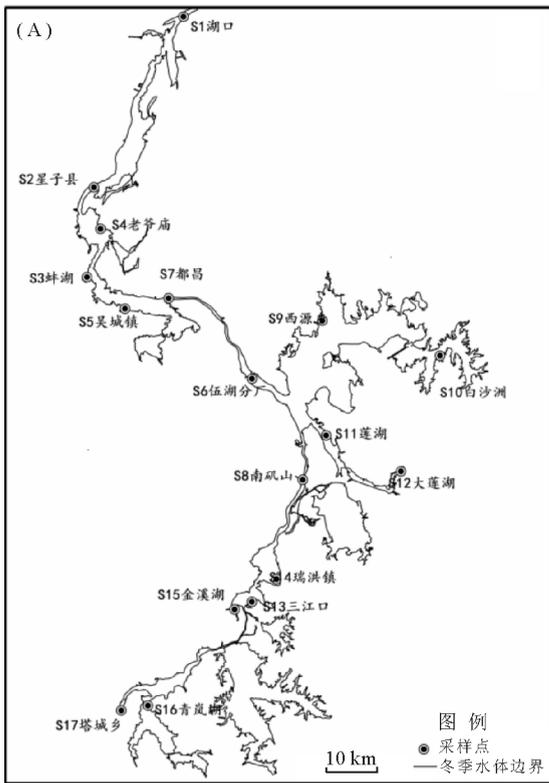
本研究在鄱阳湖湖区设置采样位点共计 17 个,以此获得较为完整的渔获物数据和具有代表性的生境参数。采样位点分别为:S1.湖口、S2.星子县、S3.蚌湖、S4.老爷庙、S5.吴城镇、S6.伍湖分厂、S7.都昌、S8.南矶山、S9.西源乡、S10.白沙洲、S11.莲湖、S12.大莲湖、S13.三江口、S14.瑞洪镇、S15.金溪湖、S16.青岚湖、S17.塔城乡。

青岚湖、S17.塔城乡,详见图 1。

1.2 数据获取与鱼类鉴定

本文选取 2 景 Landsat TM 影像用以提取分析水体边界(李生生等,2018),对应采样时间 2018 年枯水期(1 月)和 2018 年丰水期(7 月和 8 月),均选取无云层干扰且仪器误差较小的影像;另取一景分辨率 30 m 的数字高程影像,用以计算鄱阳湖湖底地形数据。遥感数据基于 Google Earth Engine 云平台 and ArcGIS 进行计算和校对。

本研究设置的 17 个采样位点,在丰水期和枯水期分别进行 1 次采样调查,每个位点进行 4 次采样。渔获物数据获取的主要方式为人工捕捞,所用渔具主要为流刺网、虾笼和箱式脉冲捕鱼机。对采集到的鱼类样本现场进行物种鉴定和生物学指标的测量,标本使用 10% 的福尔马林溶液固定。鱼类物种鉴定参考相关文献(陈宜瑜,1998;褚新洛等,1999;乐佩琦,2000;张世义,2001;伍汉霖和钟俊生,2007;张春光和赵亚辉,2016)。



(A) 枯水期,1月;(B)丰水期,7-8月

图 1 鄱阳湖采样位点及区域划分

(A) Dry season, January; (B) Rainy season, July and August

Fig.1 Location of the sampling sites and regional division in the Poyang Lake

1.3 生境指标计算

用边长为 10 km 的网格对鄱阳湖湖区生境进行网格化,并分别计算每一网格内的物理生境特征

参数,包括分形维数(Fractal dimension)、距离指数和高程值。以每一个网格特定的数值描述生境,再根据该值对生境进行聚类分析,得到区域划分结果。

分形维数是描述不规则形状特征的良好参数,分形维数值是大于1小于2的常数,其数值越大,则表明其形状越不规整;相反,分形维数值越小,则表明目标物形状越规整。本文采用盒计法计算鄱阳湖岸线分形维数(Grassberger & Procaccia, 1983; 孙博玲, 2004; 陈颢和陈凌, 2005; 刘健等, 2009; 江齐英和牛瑞卿, 2010)。

距离指数是以高程数据和水位遥感影像为基础,通过计算分析得出的最低水位线与采样季节现场水位之间的距离,距离指数值表征的是该区域水面延展性的高低;值越高,说明其水面延展性越好。

高程值是描述湖底地形的优质参数,其值的高低直接反映区域地形地势。分形维数、距离指数和高程数据计算均在 ArcGIS 中完成计算,并根据计算结果进行区域划分。

1.4 鱼类群落聚类分析

聚类分析在鱼类群落划分中应用广泛,一般根据其出现与否计算其等价矩阵(杨严鸥, 1999; 张大治和牛永强, 2005)。根据丰枯水两个时期的渔获物采样结果,建立 1/0(出现/不出现)矩阵。使用 R 软件中的 Vegan 包,根据 Jaccard 相似性系数计算不同位点的距离矩阵,最后采用 Ward 法进行聚类,得到两个时期鄱阳湖的鱼类层次聚类结果(Singh et al, 2005; Oksanen et al, 2009)。

1.5 鱼类分组与生境聚类相似性计算

相似性度量(Similarity measurement)可综合评定两个事物之间的相近程度,在生物学中也叫 Ochiai 系数,或 Ochiai-Barkman 系数(K)。

$$K = \frac{n(A \cap B)}{\sqrt{n(A) \times n(B)}} \quad (1)$$

式中: A 和 B 是集合, $n(A)$ 是 A 的元素个数; $n(B)$ 是 B 的元素个数。两种事物越接近,其相似性度量越大;两个事物越疏远,则其相似性度量越小(郑家亨, 1995; 陈大力等, 2014)。

1.6 鱼类功能群划分

本文根据鱼类的营养类型、栖息水层、生态类群、水流偏好和个体大小,将鄱阳湖湖区鱼类进行功能群划分(LeRoy Poff & David Allan, 1995),探究不同鱼类功能群组成和差异。

营养功能群按鱼类食性划分,包括草食性、底栖无脊椎动物食性、浮游动物食性、浮游植物食性、肉食性、软体动物食性和杂食性。

栖息水层功能群划分为底层、中上层和中下层;生态类型群功能群划分按河海洄游鱼类、河流鱼类、湖泊定居性鱼类、江河洄游鱼类、江湖洄游鱼类和江湖洄游/湖泊定居性鱼类进行分类。

水流偏好功能群划分为亲流型、静水缓流型和广适型;个体大小功能群划分为大型鱼类、中小型鱼类和小型鱼类 3 个类别。

2 结果

2.1 鄱阳湖湖区物理生境特征

依据 17 个采样位点所在网格的岸线分形维数、距离指数和高程值进行聚类分析,2018 年枯水期在聚类距离为 1.5 的水平上,17 个采样位点可以划分为 3 个组群。因枯水期鄱阳湖退水,湖区内的生境较为复杂零散,因此这 3 个组群没有明显的空间分布规律。

2018 年丰水期在聚类距离为 1.2 的水平上,17 个采样位点可划分为 3 个区域,其空间分布规律明显,分别为与长江连通的通江水道区域,记为北方区(S1、S2、S3、S4、S7)。其岸线平缓,岸线分形维数均低于 1.2;地势相对较高,平均高程值在 15 m 左右(以 D_WGS_1984 为基准面作为参考,下同);且水面狭窄,距离指数小于 2 km。

第二个组群为南方区(S5、S8、S11、S15、S13、S14、S16、S17),以大型封闭的子湖泊为主,如金溪湖、青岚湖等。其岸线曲折,大多数位点的岸线分形维数在 1.3~1.4;水面相对较宽,距离指数值约为 5 km;且南方区地势起伏较大,高程值一般在 3.70~20.14 m。

第三个组群为主湖区(S6、S9、S10、S12),位于鄱阳湖湖区中心地带。其岸线蜿蜒,岸线分形维数值在 1.3 左右;水面开阔,距离指数值在 10~20 km;地势低矮,高程值均在 0~10 m。生境区域划分的聚类结果见图 2。

2.2 鱼类群落组成

鱼类群落组成研究使用 2018 年枯水期(1 月,湖口水位 7.69 m)和 2018 年丰水期(7 月和 8 月,13.71 m 和 16.09 m)渔获物采样数据。累计采集鱼类样本 28 686 尾,共计 1 623.25 kg,包括 7 目、20 科、61 属、90 种;其中,鲤形目 60 种,鲟形目 13 种,鲇形目 12 种,鲱形目 2 种,合鳃目、鲟形目、鳗鲡目各 1 种,鄱阳湖鱼类功能群划分详见表 1。

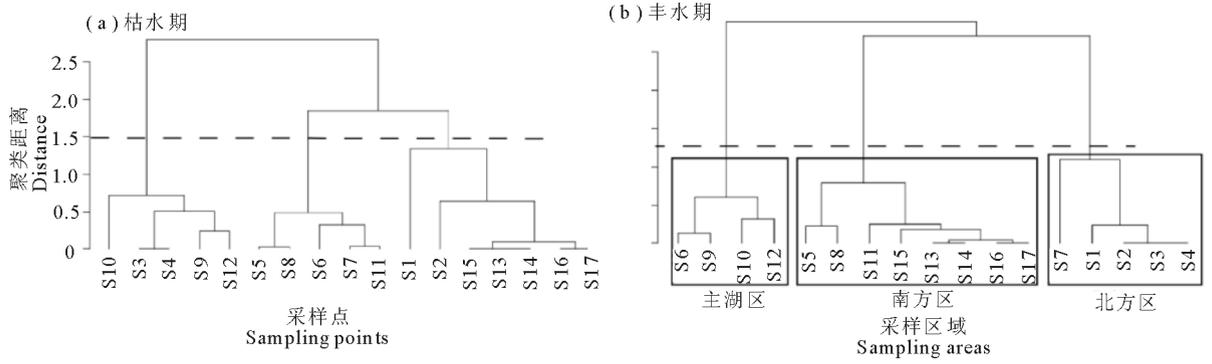


图2 鄱阳湖 17 个采样点枯水期(a)和丰水期(b)生境聚类

Fig.2 Habitat clustering of the 17 sampling points in Poyang Lak during dry season (a) and rainy season (b)

表 1 鄱阳湖鱼类功能群划分

Tab.1 Classification of fish functional groups in Poyang Lake

功能群	时 间		空 间			
	枯水期	丰水期	北方区	南方区	主湖区	
营 养 类 型	草食性	6.56	4.88	4.55	5.88	5.77
	底栖无脊椎动物食性	1.64	1.22	0.00	1.47	1.92
	浮游动物食性	8.20	8.54	6.06	7.35	11.54
	浮游植物食性	14.75	13.41	13.64	13.24	15.38
	肉食性	16.39	13.41	15.15	14.71	17.31
	杂食性	52.46	58.54	60.61	57.35	48.08
栖 息 水 层	底层	40.98	48.78	48.48	48.53	42.31
	中上层	22.95	19.51	18.18	22.06	26.92
	中下层	36.07	31.71	33.33	29.41	30.77
生 态 类 群	河海洄游鱼类	1.64	1.22	0.00	1.47	1.92
	河流鱼类	19.67	35.37	30.30	29.41	17.31
	湖泊定居性鱼类	57.38	45.12	48.48	48.53	55.77
	江湖洄游鱼类	21.31	18.29	21.22	20.59	25.00
水 流 偏 好	广适型	29.51	24.39	27.27	27.94	32.69
	静水缓流型	52.46	41.46	43.94	44.12	50.00
	亲流型	18.03	34.15	28.79	27.94	32.69
个 体 大 小	小型鱼类	36.07	31.71	28.79	27.94	32.69
	中小型鱼类	39.34	42.68	42.42	48.53	40.38
	大型鱼类	24.59	25.61	28.79	23.53	26.92

注：“枯水期”和“丰水期”分别表示 17 个采样位点所有鱼类功能群枯水期和丰水期的组成情况；“北方区”、“南方区”和“主湖区”分别表示丰水期 3 个区域鱼类功能群的组成情况。

Note: “Dry season” and “Rainy season” respectively indicate the composition of all fish functional groups in dry season and rainy season at the 17 sampling sites; “Northern zone”, “Southern zone” and “Main lake zone” respectively indicate the composition of fish functional groups in rainy season of each zone.

鄱阳湖鱼类聚类分析表明,2018 年枯水期鄱阳湖鱼类在聚类距离为 0.82 的水平上,17 个样点采集的所有鱼类分为 3 个类群(图 3),聚类结果与生境聚类结果类似,未见明显的空间规律。2018 年丰水期鄱阳湖 17 个样点的鱼类聚类结果表明,样点 S3、S9 和 S17 与整体偏离,其余 14 个位点可分为 3 个类群,根据其空间所在位置记为北方群(S1、S4、S5、S7)、南方群(S2、S6、S8、S13、S15、S16)和主湖区群(S10、S11、S12、S14)。

相似度计算结果表明,鱼类分组和生境聚类结果存在较高的相似度。其中,根据物理生境特征划

分的北方区与鱼类分组的北方区相似度为 75.0%,南方区与南方群的相似度为 61.7%,主湖区与鱼类分组的主湖区群相似度为 50.0%。

2.3 鄱阳湖鱼类功能群划分

2018 年鄱阳湖丰水期和枯水期在本研究所设置的 17 个样点共采集鱼类 90 种,将鱼类进行功能群划分。结果表明,从营养类型上看,鄱阳湖鱼类以杂食性为主,枯水期和丰水期杂食性鱼类占比均超过 50.0%;从栖息水层上看,以底层和中下层鱼类为主,两者占比在 70.0%以上;从生态类群上看,湖泊定居性鱼类是鄱阳湖的主要类群,枯水期占比为

57.4%,而丰水期湖泊定居性鱼类占比降低,为45.1%;从水流偏好功能群上看,鄱阳湖以偏好静水缓流的鱼类为主,其次是河流鱼类;鄱阳湖鱼类个体

大小功能群划分结果表明,鄱阳湖以小型和中小型鱼类为主,枯水期和丰水期大型鱼类均占25.0%左右(表1)。

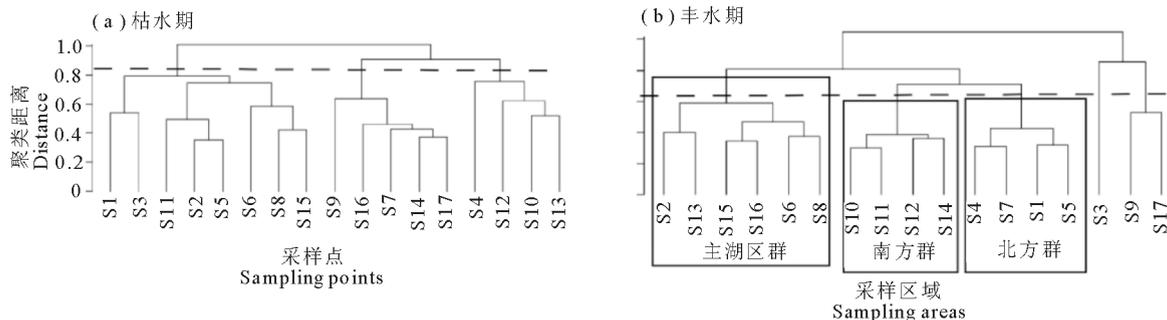


图3 鄱阳湖17个采样点枯水期(a)和丰水期(b)鱼类聚类

Fig.3 Fish functional group clustering of the 17 sampling sites in Poyang Lake during dry season (a) and rainy season (b)

3 讨论

3.1 鄱阳湖物理生境与季节变化

鄱阳湖是我国长江中下游仅存的3个通江湖泊之一,具有“丰水一片、枯水一线”的特征,是洪泛平原的典型代表。本研究发现,鄱阳湖物理生境在“枯水一线”时期(1月)表现出较为零散复杂的特点,其17个采样位点生境在空间上未见明显的区域聚集规律;而在“丰水一片”时期(7月和8月),鄱阳湖生境表现出区域聚集的规律,17个采样位点可分为北方区、南方区和主湖区;其中,北方区为与长江连通的通江水道区域,南方区生境主要为抚河信江的支流尾间和大型封闭子湖泊,主湖区生境位于鄱阳湖流域中心位置,是鄱阳湖主要蓄水区域。

3.2 鄱阳湖鱼类群落组成与季节变化

本研究设置17个采样位点共采集鱼类90种,其中枯水期共采集鱼类61种,丰水期82种。丰水期鄱阳湖水面面积广阔,枯水期裸露的滩涂区域重新被水面覆盖,形成鱼类良好的索饵场,因此丰水期鄱阳湖鱼类物种数相较于枯水期有明显升高。在采集的所有鱼类中,主要是鲤形目,共60种,占全部物种的2/3;除此之外,鲈形目有13种,鲇形目有12种。鲤形目中,鲤科鱼类最多,共计53种。总体上看,鄱阳湖鱼类主要以鲤形目、鲤科鱼类为主,具有典型东亚特有的江湖鱼类特点。

本次采集到的鱼类物种数相较于之前几次鄱阳湖鱼类资源调查,物种丰富度有所降低。20世纪50年代中期,记录到鱼类108种;90年代初期,记录到鱼类105种;21世纪初期,记录到鱼类101种(郭治之等,1964;郭治之和刘瑞兰,1995;张堂林和李钟杰,2007),但与2010年调查记录的72种相比,有明

显的上升(常剑波和曹文宣,1999)。可能的原因是三峡大坝修建以前,长江流域自然生态环境有利于鱼类生存繁衍,因此鱼类物种数明显较高。自1994年三峡大坝开始修建,2010年鄱阳湖鱼类物种数降低为72种,随着长江流域全面禁渔工作的开展,鄱阳湖鱼类物种数有所恢复,但远没有达到历史资料记载的数量。因此,本研究调查结果与历史资料记载相差较大。

鱼类群落聚类结果表明,枯水期鄱阳湖鱼类群落物种组成未有明显规律,丰水期鄱阳湖鱼类则可分为3个类群,根据其空间位置可记为北方群、南方群和主湖区群。张旭等(2020)分析了鄱阳湖和修水丰水期24个采样位点的鱼类系统发育群落结构,发现24个采样位点可以分为修水类群和鄱阳湖湖区类群,其中湖区类群鱼类组成可进一步分为北方群、南方群和东部群;本研究结果与此高度一致。

丰水期生境可以在空间上划分北方区、南方区和主湖区,鱼类群落的分布与之具有一致性。枯水期生境复杂,没有空间位置上的划分规律,鱼类群落组成也未能呈现类群划分的规律。通过计算丰水期物理生境聚类结果与鱼类分组之间的相似度,发现鱼类分组的北方群与生境聚类的北方区相似度为75.0%,鱼类分组的主湖区群与生境聚类的主湖区相似度为50.0%,南方群与南方区的相似度为61.7%。大量研究表明,鱼类群落结构以及空间分布与生境因子有关(王晓刚和严忠民,2008;张燕,2019;邸琰茗等,2021);本研究结果支持此观点。

3.3 鱼类群落功能群组成与季节变化

3.3.1 营养类型 以往的研究表明,虽然鱼类群落中的物种组成会发生显著变化,但鱼类利用食物的方式以及营养功能群结构组成还是保持相对稳定

(Lance, 2000; 黎明政等, 2021)。因此, 采用营养功能群划分鱼类群落有至关重要的作用。整体上看, 鄱阳湖鱼类丰水期和枯水期杂食性鱼类都占绝对比例, 为总物种数的 50% 以上。对比鄱阳湖丰水期 3 个区域的营养类型功能群组成, 发现北方区和南方区的组成相似, 主湖区与北方区和南方区的杂食性鱼类占比有所降低, 但依旧保持绝对占比。

鄱阳湖鱼类营养功能群组成存在季节性变化。其中枯水期到丰水期, 杂食性鱼类和浮游动物食性鱼类所占比例都有所增加, 草食性、底栖无脊椎动物食性、浮游植物食性和肉食性鱼类其所占百分比均呈现下降趋势。

3.3.2 栖息水层 从栖息水层上看, 鄱阳湖主要以底层和中下层鱼类为主, 鱼类栖息水层功能群的季节性差异不明显, 变化在 4% 以内。

鄱阳湖丰水时期北方区和南方区的栖息水层功能群组成相似, 且区别于主湖区, 主要体现在底层和中上层鱼类占比的变化, 中下层鱼类占比几乎没有变化。主要原因是主湖区水面开阔, 利于中上层鱼类活动。与北方区和南方区相比, 主湖区鱼类中的中上层鱼类占总物种数的比例高, 而中下层鱼类的占比较低。

3.3.3 生态类群和水流偏好 大量研究表明, 鱼类会根据栖息生境变化进行迁徙, 选择更适宜的生境栖息繁衍(Fernandes, 1997; 石瑞花和徐士国, 2008; Ru & Liu, 2013)。河流鱼类在丰水期存在由河流向湖区迁移的行为, 丰水期河流鱼类的组成比例会升高; 另一方面, 河流鱼类的迁徙导致湖区鱼类总物种数增加, 而湖泊定居性鱼类主要以湖泊为栖息地, 理论上其物种数季节性变化不大。因此, 丰水期湖泊定居性鱼类占总物种数的比例低于枯水期。

丰水期南方区和北方区生态类群功能群组成相似, 主湖区与北方区和南方区之间存在差异。主湖区的湖泊定居性鱼类明显高于其他两个区域, 而河流鱼类占比显著下降, 主要原因是南方群和北方群与河流的相对距离较近, 而主湖区远离河流, 受到河流的影响相对较小。因此, 整体上看, 湖泊鱼类群落结构会受到生境因素的影响。

鱼类水流偏好与其生态类群密切相关, 因此其生态类群的组成和季节变化与生态类群功能群相似。以水流偏好为静水缓流的鱼类为主要类群, 枯水期静水缓流鱼类占总物种数的比例高于丰水期, 亲流型鱼类占总物种数的比例远低于丰水期。

志谢: 感谢中国科学院南京地理湖泊研究所宋春桥老师及其课题组对本文遥感数据分析的指导与帮助; 对协助鱼类采样的课题组和同学表示诚挚的感谢。

参考文献

- 常剑波, 曹文宣, 1999. 通江湖泊的渔业意义及其资源管理对策[J]. 长江流域资源与环境, 4(2): 153-157.
- 陈大力, 沈岩涛, 谢槟竹, 等, 2014. 基于余弦相似度模型的最佳教练遴选算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 35(12): 1697-1700.
- 陈宜瑜, 1998. 中国动物志: 硬骨鱼纲: 鲤形目(中卷)[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈颢, 陈凌, 2005. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社.
- 褚新洛, 郑葆珊, 戴定远, 1999. 中国动物志: 硬骨鱼纲: 鲇形目[M]. 北京: 科学出版社.
- 邸琰茗, 张蕾, 叶芝菡, 等, 2021. 北运河上游南沙河段与下游城市副中心段鱼类群落分布特征及影响因子研究[J]. 环境科学学报, 41(1): 156-163.
- 郭治之, 刘瑞兰, 1995. 江西鱼类的研究[J]. 南昌大学学报(理科版), 4(3): 222-232.
- 郭治之, 鄒多祿, 刘瑞兰, 等, 1964. 鄱阳湖鱼类调查报告(江西野生动物资源调查报告之一)[J]. 南昌大学学报(理科版), (2): 121-130.
- 黄金国, 郭志永, 2007. 鄱阳湖湿地生物多样性及其保护对策[J]. 水土保持研究, 14(1): 305-306, 309.
- 霍雨, 2015. 近 30 年来鄱阳湖岸线形态变化研究[J]. 江苏科技信息, (5): 76-78.
- 江齐英, 牛瑞卿, 2010. 长江三峡库岸几何形态的分形分维研究[J]. 人民长江, 41(9): 42-44, 103.
- 乐佩琦, 2000. 中国动物志: 硬骨鱼纲: 鲤形目(下卷)[M]. 北京: 科学出版社.
- 雷声, 张秀平, 许小华, 2011. 鄱阳湖湿地植被秋冬季变化多元遥感监测分析[J]. 人民长江, 42(11): 60-63.
- 黎明政, 王美荣, 朱其广, 等, 2012. 鄱阳湖通江水道鱼类群落结构特征[A]//中国海洋湖沼学会, 中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会论文集. 中国科学院海洋研究所.
- 李博, 陈华, 杨健, 2007. 遥感技术的发展趋势分析[J]. 中国资源综合利用, 25(9): 39-41.
- 李生生, 王广军, 梁四海, 等, 2018. 基于 Landsat-8 OLI 数据的青海湖水体边界自动提取[J]. 遥感技术与应用, 33(4): 666-675.
- 刘健, 张奇, 左海军, 等, 2009. 鄱阳湖流域径流模型[J]. 湖泊科学, 21(4): 570-578.
- 石瑞花, 许士国, 2008. 河流生物栖息地调查及评估方法[J]. 应用生态学报, 19(9): 2081-2086.

- 孙博玲,2004.分形维数(Fractal dimension)及其测量方法[J].东北林业大学学报,32(3):116-119.
- 孙芳蒂,马荣华,2020.鄱阳湖水文特征动态变化遥感监测[J].地理学报,75(3):544-557.
- 王晓刚,严忠民,2008.河道汇流口水力特性对鱼类栖息地的影响[J].天津大学学报,41(2):204-208.
- 邬红娟,李俊辉,2014.湖泊生态学概论[M].武汉:华中科技大学出版社.
- 吴申浩,2020.鄱阳湖洪泛平原鱼类群落与功能多样性的联系[D].南昌:南昌大学.
- 伍汉霖,钟俊生,2007.中国动物志:硬骨鱼纲:鲈形目(五):虾虎鱼亚目[M].北京:科学出版社.
- 徐德龙,熊明,张晶,2001.鄱阳湖水文特性分析[J].人民长江,32(2):21-22,27.
- 许小华,雷声,王小笑,等,2014.基于DEM的鄱阳湖水下地形分析[J].人民长江,45(21):30-32,61.
- 杨严鸥,1999.黄河水系鱼类分布的模糊聚类分析[J].湖北农学院学报,(2):66-68.
- 翟俊,祝汉收,姜珊,等,2019.鄱阳湖岸线及周边湿地变化监测[A]//中国环境科学学会.中国环境科学学会科学技术年会论文集(第3卷).
- 张春光,赵亚辉,2016.中国内陆鱼类物种与分布[M].北京:科学出版社.
- 张大治,牛永强,2005.宁夏鱼类区系及地理区划的聚类分析[J].宁夏大学学报(自然科学版),26(3):260-263.
- 张范平,胡松涛,张梅红,2020.鄱阳湖湿地面临的主要问题及原因分析[J].南昌工程学院学报,39(1):53-59.
- 张矿,1993.长江河道形态的分形计算[J].人民长江,(7):49-51.
- 张世义,2001.中国动物志:硬骨鱼纲:鲟形目 海鲢目 鲱形目 鼠鱖目[M].北京:科学出版社.
- 张堂林,李钟杰,2007.鄱阳湖鱼类资源及渔业利用[J].湖泊科学,4(4):434-444.
- 张旭,杨婷越,罗小红,等,2020.鄱阳湖湖区及支流修水夏季鱼类系统发育群落结构分析[J].水生生物学报,44(6):1297-1312.
- 张燕,2019.城市水体鱼类功能群与水环境影响因素之间相关性分析[J].水利规划与设计,(6):42-46.
- 郑家亨,1995.统计大辞典[M].北京:中国统计出版社.
- 朱海虹,1997.鄱阳湖[M].合肥:中国科学技术大学出版社.
- 朱鹤,黄诗峰,杨昆,等,2019.鄱阳湖近五十年变迁遥感监测与分析[J].卫星应用,(11):29-35.
- Fernandes C C,1997. Lateral migration of fishes in Amazon floodplains[J]. Ecology of Freshwater Fish, 6(1):36-44.
- Grassberger P, Procaccia I,1983. Characterization of strange Attractors[J]. Phys Rev Lett,50:346-349.
- Lance P G,2000. Spatial and dietary overlap in the Georges Bank ground fish community[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,57(8):1679-1691.
- LeRoy Poff N,David Allan J,1995. Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability[J]. Ecology,76(2):606-672.
- Oksanen J, Kindt R, Legendre P, et al,2009. The vegan Package[CP]:272-276.
- Ru H J,Liu X Q,2013. River-lake migration of fishes in the Dongting Lake area of the Yangtze floodplain[J]. Journal of Applied Ichthyology,29(3):594-601.
- Singh K P,Malik A,Sinha S,2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques-a case study[J]. Analytica Chimica Acta,538(1/2):355-374.

(责任编辑 万月华)

Physical Habitat Characteristics of Poyang Lake and Their Influence on Fish Community Structure

LI Jing-hong^{1,2}, LIN Peng-cheng², LI Ming-zheng², LIU Huan-zhang², YUAN Chun-ying¹

(1.College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457,P.R.China;

2.The Key Laboratory of Aquatic Biodiversity and Conservation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072,P.R.China)

Abstract: Poyang Lake is the largest freshwater lake in China, and one of the three lakes that still have a natural connection to the main stem of Yangtze River. The fish community structure of lakes is closely related to its physical habitat. In this study, based on fish survey data and ArcGIS analysis, we explored the relationship between fish community structure and physical habitat characteristics in Poyang Lake. We then explored differences in composition and functional groups of fish community within the different habitats. The fish survey was carried out at 17 representative sampling sites in January (dry season) and July–August (rainy season) 2018. The fish community structure was analyzed by cluster analysis and remote sensing technology was used to analyze the habitat characteristics of each sampling site, including fractal dimension, distance index, elevation value and the spatial difference of the regions. Based on physical habitat characteristics at the 17 sampling sites, the physical habitat of Poyang Lake in rainy season clustered into three zones: northern, southern and main lake. However, the sampling sites clustered irregularly in dry season. In the rainy season, the fish community fell into three groups that correlated significantly with the three habitat zones, but in the dry season no regularity in fish community composition was detected. Fish functional groups were described as follows: the community is dominated by omnivorous fish (>50% of total fish species); bottom and middle layer fish were the main groups (>70% of the total species); limnophilic species was the primary ecological group and small and medium-sized fish dominated. The composition of fish functional groups presented obvious spatial and temporal differences. The fish functional groups of the northern and southern zones were similar and differed from the functional group composition of the main lake. Our study revealed the extent to which fish community structure is shaped by physical habitat in Poyang Lake. This will allow physical habitat characteristics to be more effectively used to guide future fish conservation efforts.

Key words: Poyang Lake; fish community; physical habitat characteristics; functional groups