

DOI: 10.12264/JFSC2025-0021

长江口崇明东滩潮沟系统水文连通性对鱼类群落分布的影响

费姝洁^{1,2}, 张婷婷^{2,3,4*}, 赵峰^{1,2,3,4*}, 张涛^{1,2,3,4}, 杨刚^{1,2,3,4}, 王思凯^{2,3,4}

1. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090;
3. 上海长江口渔业资源增殖与生态修复工程技术研究中心, 上海 200090;
4. 国家渔业资源环境杨浦观测实验站, 上海 200090

摘要: 水文连通性是指示河口湿地生态系统健康和功能的重要特征之一, 对河口鱼类群落的分布具有重要影响。本研究分析了不同潮汐状态下长江口崇明东滩潮沟的动态水文连通性及其对鱼类群落分布的影响。通过选取水文动态、景观维度上的两类共 12 个水文连通性指标, 探索水文连通动态模式与鱼类分布格局的关系及潜在机制, 旨在为河口湿地的生态修复、生物多样性保护和水资源管理提供科学依据。结果表明, 潮差、水文连接时长、淹水滞留时长、节点数、河链数和节点连接率 β 等是关键水文连通性因子。典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA)显示, 潮沟系统内部样点区域分为大潮高连通区、大潮低连通区、小潮高连通区、小潮低连通区和长期淹没区, 共五类不同水文连通性区域; 其中, 大潮、小潮高连通区, 以及长期淹没区为优势种主要栖息地。鱼类优势种对不同水文连通区域的偏好各异, 大鳞鲂(*Xenocypris macrolepis*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)等鱼类倾向于在大潮高水文连通区域栖息; 中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、鲻科(*Mugilidae*)、虾虎鱼科(*Gobiidae*)偏好于小潮高水文连通区域栖息; 刀鲚(*Coilia ectenes*)、大银鱼(*Protosalanx chinensis*)等幼鱼偏好栖息在潮沟口或近岸的区域。研究结果表明, 河口潮沟鱼类对不同水文连通性的栖息地具有主动选择和偏好性, 其偏好差异与鱼类的游泳能力、个体大小和摄食行为等相关。本研究为科学制定湿地水资源管理的水文连通性调节策略提供了生物学基础和理论依据, 对河口湿地生态修复和鱼类生物多样性保护具有重要意义。

关键词: 河口湿地; 鱼类群落; 水文连通性; 潮汐动态; 栖息地偏好

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)05-0675-14

河口湿地作为地球上生物多样性最丰富的生态系统之一, 在全球碳循环、营养盐循环以及维持区域水文平衡中扮演着至关重要的角色^[1-2]。水文连通性是河口湿地生态系统健康和功能的关键性指标之一, 涉及水体之间的物质交换、能量流动和生物迁移, 研究水文连通性对河口鱼类的影响具有重要意义^[3-5]。全球气候变化、水利工程以及自然水文周期的变化, 共同作用于河口水文连通性, 进而影响鱼类的分布、迁移和繁殖习性。

适度的水文连通性能够支持更丰富的鱼类物种共存, 维持生物多样性^[6-8]; 而水利工程建设可能会阻断鱼类的洄游路线, 影响其繁殖和生存^[9]。有研究探讨了堤坝、降水模式、海平面上升、极端天气等事件如何改变水文连通性, 阻断水流或生态流量调整等对鱼类分布、洄游路线和繁殖习性的影响^[10-12]。此外, 特定的水文连通条件对一些鱼类的繁殖具有触发作用, 并且水文连通性强弱对鱼类早期生活史阶段及其栖息环境具有显著影响,

收稿日期: 2025-02-21; **修订日期:** 2025-03-27.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401905); 国家自然科学基金项目(32071584, 32271658); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2023TD14).

作者简介: 费姝洁(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河口湿地鱼类生态. E-mail: feishujie2022@163.com

通信作者: 赵峰, 研究员, 主要研究方向为渔业资源与生态环境; E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; 张婷婷, 副研究员, 主要研究方向为渔业生态监测与修复; E-mail: zhangtt@ecsf.ac.cn

尤其是在河口和近海区域^[13-15]。同时,水文连通性还与生态系统服务功能紧密相关,如碳储存、营养循环和休闲渔业等,其变化直接影响这些服务的供给^[9, 16-17]。因此,保护和改善水文连通性对于鱼类资源的保护和管理、河口湿地生态系统的健康和稳定的维护具有重要意义。

河口湿地生态系统的水文连通性研究面临着一系列挑战。以往,国内研究者大多通过潮沟长度、曲率和频数等形态结构特征描述连通性及其对鱼类群落的影响^[8, 18-20]。这些研究主要关注静态连通,然而,受到潮汐作用、地形地貌等多种因素的共同影响,水文连通性呈现高度动态变化^[12, 21]。静态连通性研究虽然能够揭示连通空间模式与鱼类分布格局的关系,但不能反映驱动其分布和组成差异性的生态过程机制。近年来,国外研究者们开始转向对“功能-过程耦合”的水文连通动态进行深入研究。例如, Foubert 等^[22]为加拿大圣劳伦斯河流域开发了二维水动力-生物耦合模型,整合了水文条件与幼鱼扩散的响应阈值,量化了鱼类有效产卵栖息地的范围分布。Alp 等^[23]以法国塞纳河口流域为研究区域,将水动力模型与遥感数据相结合,探究了鱼类栖息地可用性和连通性在潮汐水位变化下的动态分布。国内对水文连通性相关研究多集中于水文连通性量化技术,并且多关注其与盐沼植被关系以及对底栖生物影响等方面^[2, 8, 15],鲜少探究水文连通性的动态变化与鱼类之间的关系。这主要是由于以下几个方面的原因^[24-25]:一是鱼类具有自主选择性,这增加了调查的难度;二是潮沟系统水文连通性特征的长期连续监测数据不足;三是潮沟区域的特殊环境需要保障采样可达性与人员安全。这些因素为湿地潮沟水文连通性动态变化研究带来挑战。遥感和地理信息系统(GIS)等相关技术为研究水文连通性的动态变化提供了有效工具,使得研究者能够更精确地监测和模拟水文连通性的变化并探究其对鱼类群落的影响^[26-27]。

本研究结合原位监测、遥感技术、GIS 模拟和景观生态学方法,深入分析了潮汐周期下长江口崇明东滩潮沟的动态水文连通性及其对鱼类群

落分布的影响,以期提供更精准的水文连通性相关的动态数据。具体研究内容包括解析河口潮沟系统在不同潮汐阶段的水文连通性变化特征、水文连通性变化与鱼类群落分布之间的关系,尤其是鱼类物种对不同水文连通性栖息地的偏好。研究结果可为河口湿地的生态修复、生物多样性保护和水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样本来源

选择上海市崇明岛东滩(121°47′~122°05′E, 31°25′~31°38′N, 图 1)为研究区域,位于长江口最东侧,拥有独特的地理环境和复杂的水文条件。崇明岛盐沼湿地面积约 14.8 km²,地势自西南向东北逐渐升高,其中东南部湿地未受人类活动影响,保留有自然潮沟系统。这些潮沟在潮汐冲刷作用下形成高度分叉的形态,部分分支从河口附近的入口一直延伸至堤坝附近的盐沼末端^[28]。崇明东滩的潮汐周期以半日潮为主,局部平均潮差约为 2.5 m,夏季大潮期间最大潮差可达 5 m,小潮期间最大潮差为 2 m^[29]。

为了深入研究不同潮汐条件下整个潮沟系统的水文连通性,本研究基于 2020 年崇明东滩湿地的高分七号高分辨率(1 m)卫星影像,获取了数字高程模型(DEM)数据。利用 ArcGIS 软件中的 ArcScan 工具,采用栅格图像种子蔓延算法,模拟 DEM 在大潮期间潮差最高达 5 m 与小潮期间潮差约 2 m 的潮水淹没区域^[30](图 1),潮水淹没区域根据每日潮汐大小而变化。在此过程中,在确保采样可达性的同时,以淹水下限为标准,即小潮期间能覆盖的潮沟,按照 1、2、3、4 级潮沟级别和高中低程为标准,设置了 28 个采样点,每类标准至少含 3 个样点,旨在全面覆盖崇明东滩湿地的主要潮沟。以佘山潮位站的潮差值为大小潮区分标准,我们在 2023 年 7 月 18—23 日、2024 年 7 月 20—25 日和 11 月 15—20 日的 3 次大潮和 3 次小潮期间,进行分批采样,每次采样至少持续 3 天。每个采样位点各放置 1 套小型插网和地笼网,每 24 h 收集 1 次鱼类样本。

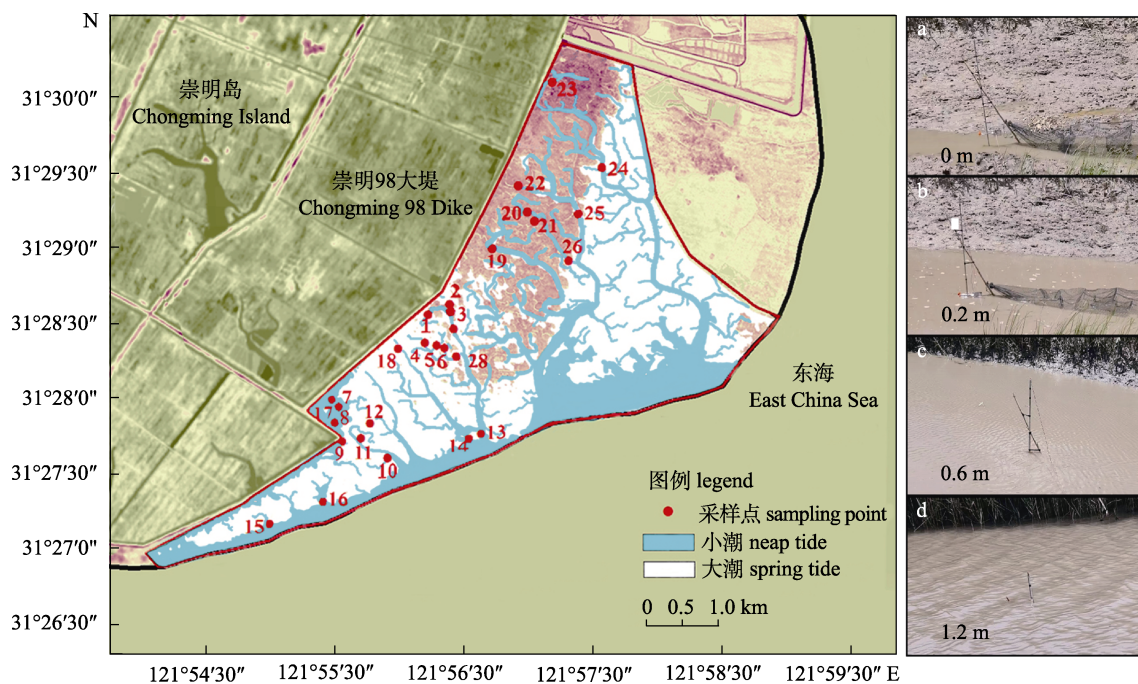


图1 研究区域与采样位点

左图为模拟崇明东滩潮沟区域大潮和小潮时期的淹没范围图, 蓝色为小潮期间淹水情况, 白色为大潮期间延伸淹水情况; 右图 a-d 显示了样点潮沟在涨潮期间淹没过程及淹没水位范围。

Fig. 1 The study area and sampling sites

The left panel illustrates the inundation range of the tidal creeks area in the Chongming Dongtan during spring tides and neap tides. Areas in blue color represents the inundation during neap tides, while those in white color represents the extended inundation during spring tides. The right panels (a-d) depict the inundation process and the range of water levels during the flood tide at the sample sites of the tidal creeks.

1.2 研究方法

1.2.1 样本采集方法 鱼类采集捕捞网具采用小型插网由 15 mm 网目的网翼和网囊构成, 网翼长度为 6 m、高度为 1 m, 网口尺寸为 1 m × 1 m, 网囊长度为 6 m, 网目尺寸为 15 mm; 小型地笼网的尺寸为网长 10 m、网宽 30 cm、网高 25 cm, 网目同样为 15 mm。采样得到的鱼类样本, 参考《长江口鱼类(第二版)》^[31]进行分类鉴定至种。对渔获物进行生物学指标测量, 包括全长、体长(精确到 1 mm)、体重(精确到 0.01 g)等。

1.2.2 水文连通性量化方法 通过原位监测、遥感及 GIS 技术相结合的方法, 综合选取了水文动态、景观维度上的两类共 12 个水文连通性指标(表 1), 以期理解河口湿地潮沟的水文连通性动态, 并分析其对鱼类群落分布的影响。水文动态指标着重关注于随时间变化的水文条件, 如潮差、水文连接时长和淹水滞留时长等, 这些特征在较短的时间尺度上变化显著, 有助于理解潮汐周期下对鱼类

群落迁徙、繁殖、觅食等行为的影响。景观网络指标则在更大的空间尺度上分析水文连通性, 提供了水系网络结构的视角。在大潮期间潮水上涨可能导致更多的潮沟相互连接, 而在小潮期间潮水下降可能减少这种网络连接, 潮沟景观网络指标, 如节点数、河链数和节点连接率 β 等, 在大潮、小潮周期下会有所变化, 需要分别计算。另外, 为评估在极端高水位和低水位下河口湿地的水文连通性变化, 本研究计算了景观指标在大小潮期间的差值, 以表示水文连通性在极端潮汐情况下的变化。

1.3 数据分析

1.3.1 鱼类优势种分析 本研究采用 Pinkas 等^[32]的相对重要性指数(index of relative importance, IRI)来判定鱼类群落中的优势种, 计算公式如下:

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\%$$

式中, $N\%$ 为某一种类的尾数占总尾数的百分比; $W\%$ 为某一种类的重量占总重量的百分比; $F\%$ 为某一种类出现的样点数占调查总样点数的百分比。

表 1 潮沟水文连通性相关指标的意义及获取方法

Tab. 1 Significance and obtaining methods of relevant indicators for the hydrological connectivity of tidal creeks

指标 indicator			意义及获取方法 significance and obtaining methods
水文动态指标 hydrological dynamic indicators	潮差	tidal range	指在一个潮汐周期内，相邻高潮位与低潮位间的差值，也称为潮幅 ^[33] 。本研究通过潮差来反映潮汐大小，相应高潮位和低潮位的差值由采样当日余山潮站位数据计算获得。
	水文连接时长	hydrological connection duration	指在一个潮汐周期内，特定区域或位置被水覆盖或经历水文连接的总时长。利用 ArcGIS 对 DEM 大潮与小潮期间潮水淹没区域和淹没时间进行动态模拟，计算各样点区域的水文连接时长 ^[23] 。
	淹水滞留时长	flooded retention duration	指在一个潮汐周期结束后，特定区域或位置因地势导致水位没有显著下降，水位保持直至上涨平均停留时间 ^[34] 。淹水滞留时长通过实地无人机拍摄测量获得。
景观指标 landscape indicators	节点数 number of nodes	节点数 1 number of nodes 1	指潮沟网络中潮沟相交的地方，是潮沟的起点、终点或者潮沟之间的交汇点 ^[18,35] 。该指标可以衡量潮沟网络复杂度，它影响着水体的连通性和水流的路径选择。节点数通过 ArcGIS 软件对 DEM 进行水流方向、汇流量计算、子流域提取和网络提取后获得。根据潮差，将大潮(5 m)和小潮(2 m)的汇流量设定为 5000 m ³ /s 和 10000 m ³ /s 的汇流量进行分别计算，得到各样点节点数 1 和节点数 2 的值，节点数 3 为前两者差的绝对值 ^[36] 。
		节点数 2 number of nodes 2	
		节点数 3 number of nodes 3	
	河链数 number of river chains	河链数 1 number of river chains 1	指潮沟网络中连接两个节点的潮沟段的数量，反映潮沟的分支程度和网络的连通性 ^[18,35] 。河链数通过 ArcGIS 软件对 DEM 进行水流方向、汇流量计算、子流域提取和网络提取后获得，大潮小潮汇流量计算同上，河链数 1、河链数 2、河链数 3 计算同上 ^[36] 。
		河链数 2 number of river chains 2	
		河链数 3 number of river chains 3	
	节点连接率 β node connection rate β	节点连接率 $\beta 1$ node connection rate $\beta 1$	由网络中河链数和节点数的比值表示，反映每个节点平均连接的河链数。该指数用于衡量潮沟网络的密集程度和识别网络中关键汇合点 ^[18,35] 。
		节点连接率 $\beta 2$ node connection rate $\beta 2$	
		节点连接率 $\beta 3$ node connection rate $\beta 3$	

注：景观指标在大潮周期下用节点数 1、河链数 1 和节点连接率 $\beta 1$ 表示，在小潮周期下用节点数 2、河链数 2 和节点连接率 $\beta 2$ 表示，大潮小潮周期间的差值用节点数 3、河链数 3 和节点连接率 $\beta 3$ 表示。

Note: the landscape indicators are represented by the number of nodes 1, the number of river chains 1, and node connection rate $\beta 1$ during the spring tide cycle, by the number of nodes 2, the number of river chains 2, and node connection rate $\beta 2$ during the neap tide cycle, and the differences between the spring and neap tide cycles are represented by the number of nodes 3, the number of river chains 3, and node connection rate $\beta 3$.

1.3.2 各站点间水文连通性的差异性分析 采用典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA)对水文连通指标进行分析。由于样点按潮沟级别、高程进行设置，为剔除潮沟结构和地形的影响，本研究将潮沟等级、高程、潮沟横截宽度作为协变量，去除其对水文连通性的变异性影响，再进行 CCA 分析，对残差变异性进行约束排序，集中分析潮汐动态下潮沟样点水文连通性动态变化。

1.3.3 不同水文连通性下鱼类群落分布特征分析 先通过鱼类物种数量占比饼状图分析不同站点之间的物种组成分布差异。再采用 CCA 分析鱼类物种对不同水文连通区域的特有偏好。上述统计分

析利用多元变量分析软件 Canoco 5 执行^[37]。

2 结果与分析

2.1 鱼类物种组成

在本次调查中，共采集到 7831 尾鱼类样本，隶属 10 目、17 科、49 种(表 2)。依据 IRI 数值大小，对采集到的鱼类物种进行排序，并主要分析 IRI 排名前 20 的物种：中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、鲃(*Liza haematocheila*)、斑尾刺虾虎鱼(*Acanthogobius ommaturus*)、棱鲃(*Liza carinata*)、大弹涂鱼(*Boleophthalmus pectinirostris*)、长吻鲢(*Leiocassis longirostris*)、大鳞鲷(*Xenocypris*

macrolepis)、刀鲚(*Coilia ectenes*)、大银鱼(*Protosalanx chinensis*)、鲇(*Silurus asotus*)、拉氏狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus Basilewsky*)、鲮(*Mugil cephalus*)、鲫(*Carassius auratus*)、日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)、鲤(*Cyprinus carpio Linnaeus*)、鳊(*Parabramis pekinensis*)、鲮(*Hemiculter leucisculus*)、鳊(*Hypophthalmichthys nobilis*)。从 $N\%$ 、 $W\%$ 、 $F\%$ 占

比分项来看,占渔获物总数量的百分比比较大的物种分别为: 鲮、大银鱼和中国花鲈; 占渔获物总重量的百分比比较大的物种分别为: 中国花鲈、鲮和斑尾刺虾虎鱼; 在整个潮沟系统中出现频率($F\%$) $\geq 50\%$ 的物种依次为: 中国花鲈、鲮、斑尾刺虾虎鱼、棱鲮、大弹涂鱼、长吻鲮、拉氏狼牙虾虎鱼和光泽黄颡鱼。另外,长吻鲮、鲇、鲮和日本鳗鲡在渔获物中属于数量较少、但个体大的成鱼,刀鲚、大银鱼、光泽黄颡鱼主要是数量较多、个体小的幼鱼。

表 2 潮沟鱼类优势种食性和组成特征
Tab. 2 Feeding habits and composition characteristics of dominant fish species in tidal creeks

科 family	物种 species	食性 feeding habit	数量占比/% quantity proportion	重量占比/% weight proportion	出现概率/% presence probability	相对重要性指数(IRI) index of relative importance
花鲈科 Lateolabracidae	中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	A	13.345	37.354	100.000	5069.899
鲮科 Mugilidae	鲮 <i>Liza haematocheila</i>	B	21.444	17.819	100.000	3926.330
虾虎鱼科 Gobiidae	斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	C	12.335	11.633	92.857	2225.555
鲮科 Mugilidae	棱鲮 <i>Liza carinata</i>	B	5.617	7.105	89.286	1135.941
虾虎鱼科 Gobiidae	大弹涂鱼 <i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	B	4.250	2.003	96.429	602.989
鲮科 Bagridae	长吻鲮 <i>Leiocassis longirostris</i>	A	0.832	7.799	60.714	524.055
鲤科 Cyprinidae	大鳞鲮 <i>Xenocypris macrolepis</i>	B	8.530	3.213	35.714	419.391
鳊科 Engraulidae	刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>	C	7.683	0.994	21.429	185.937
银鱼科 Salangidae	大银鱼 <i>Protosalanx chinensis</i>	D	16.793	0.506	10.714	185.345
鲇科 Siluridae	鲇 <i>Silurus asotus</i>	D	0.416	3.700	39.286	161.691
虾虎鱼科 Gobiidae	拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>	D	1.694	0.759	64.286	157.718
鲮科 Bagridae	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	D	2.660	0.225	50.000	144.279
鲤科 Cyprinidae	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus Basilewsky</i>	A	0.713	0.669	39.286	54.310
鲮科 Mugilidae	鲮 <i>Mugil cephalus</i>	B	0.074	2.743	17.857	50.305
鲤科 Cyprinidae	鲫 <i>Carassius auratus</i>	C	0.371	0.543	42.857	39.199
鳗鲡科 Anguillidae	日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	D	0.178	1.052	25.000	30.760
鲤科 Cyprinidae	鲤 <i>Cyprinus carpio Linnaeus</i>	C	0.253	0.649	21.429	19.322
鲤科 Cyprinidae	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	D	0.238	0.043	32.143	9.029
鲤科 Cyprinidae	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	B	0.297	0.096	17.857	7.027
鲤科 Cyprinidae	鳊 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	B	0.059	0.372	14.286	6.172
塘鳢科 Eleotridae	中华乌塘鳢 <i>Bostrychus sinensis</i>	D	0.163	0.075	21.429	5.114
鲤科 Cyprinidae	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	E	0.343	0.016	14.286	5.118
马鲛科 Polynemidae	多鳞四指马鲛 <i>Eleutheronema rhadinum</i>	D	0.089	0.088	17.857	3.161
石首鱼科 Sciaenidae	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	D	0.119	0.204	7.143	2.305
鲤科 Cyprinidae	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	C	0.089	0.016	21.429	2.257
鲈科 Tetraodontidae	暗纹东方鲀 <i>Takifugu obscurus</i>	D	0.089	0.032	14.286	1.734
舌鳎科 Cynoglossidae	窄体舌鳎 <i>Cynoglossus gracilis</i>	D	0.208	0.022	7.143	1.639

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

科 family	物种 species	食性 feeding habit	数量占比/% quantity proportion	重量占比/% weight proportion	出现概率/% presence probability	相对重要性指数(IRI) index of relative importance
鲤科 Cyprinidae	长蛇鮈 <i>Saurogobio dumerili</i>	B	0.193	0.018	7.143	1.509
鲤科 Cyprinidae	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	B	0.104	0.003	10.714	1.146
银鱼科 Salangidae	前颌间银鱼 <i>Hemisalanx prognathus</i>	D	0.149	0.024	3.571	0.618
鲤科 Cyprinidae	花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	C	0.045	0.011	10.714	0.593
鲤科 Cyprinidae	鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	B	0.045	0.005	10.714	0.536
金钱鱼科 Scatophagidae	金钱鱼 <i>Scatophagus argus</i>	C	0.074	0.019	3.571	0.334
虾虎鱼科 Gobiidae	阿部鲯虾虎鱼 <i>Mugilogobius abei</i>	D	0.045	0.001	7.143	0.325
虾虎鱼科 Gobiidae	舌虾虎鱼 <i>Glossogobius giuris</i>	D	0.074	0.011	3.571	0.306
鲤科 Cyprinidae	赤眼鲮 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	D	0.030	0.013	7.143	0.304
鱚科 Hemiramphidae	间下鱚 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	B	0.074	0.009	3.571	0.296
石首鱼科 Sciaenidae	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	D	0.030	0.007	7.143	0.264
鲤科 Cyprinidae	红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	A	0.015	0.058	3.571	0.262
鲤科 Cyprinidae	似鲃 <i>Pseudobrama simoni</i>	B	0.030	0.001	7.142	0.222
鲤科 Cyprinidae	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	A	0.015	0.044	3.571	0.211
虾虎鱼科 Gobiidae	纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trigenocephalus</i>	D	0.045	0.011	3.571	0.197
鲷科 Callionymidae	香斜棘鲷 <i>Repomucenus olidus</i>	C	0.045	0.001	3.571	0.161
虾虎鱼科 Gobiidae	双带缟虾虎鱼 <i>Tridentiger bifasciatus</i>	D	0.030	0.005	3.571	0.124
鲱科 Clupeidae	斑鲹 <i>Konosirus punctatus</i>	A	0.015	0.017	3.571	0.115
鲤科 Cyprinidae	中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	A	0.015	0.004	3.571	0.067
鳊科 Engraulidae	中颌棱鳊 <i>Thrissa mystax</i>	A	0.015	0.002	3.571	0.062
虾虎鱼科 Gobiidae	棕刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius luridus</i>	D	0.015	0.002	3.571	0.061
鲤科 Cyprinidae	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	B	0.015	0.001	3.571	0.057

注: A: 游泳生物食性; B: 浮游生物食性; C: 底栖生物食性; D: 混合食性; E: 草食性。
Note: A: planktivorous; B: planktivory; C: benthic feeding; D: omnivorous; E: herbivorous.

2.2 不同程度水文连通性区域的分组

将水文连通指标和鱼类群落物种数据通过 CCA 分析后, 结果显示, CCA 横轴解释了 49.47% 的物种数据, 而 CCA 纵轴解释了 15.08%, 整体模型的显著性水平为 $P<0.01$, 采样点呈现出明显的四组聚集性分布(图 2)。基于这一分布特征, 本研究将研究区域的水文连通程度划分为 4 组共 5 类水文连通类型, 这 5 类不同水文连通类型已在研究区域进行了详细标注(图 3)。

大潮高连通区: 该区域对应图 2 中靠近“潮差”和“大潮景观指标”(节点数 1、河链数 1、节点连接率 β_1)的样点, 以及图 3 中 8 个黑色标注区域(样点 1、15、16、17、19、21、22、23)。潮

差指标矢量长度越大, 表示进入潮沟的潮水势能越强; 大潮期景观指标矢量长度越大, 代表大潮期间, 潮水能到达潮沟系统网络内部更多的节点、潮沟段。因此这些区域在大潮期间具有高度的水文连通性。

小潮高连通区: 该区域对应图 2 中靠近“水文连接时长”“淹水滞留时长”“小潮景观指标”(节点数 2、河链数 2、节点连接率 β_2)的样点, 以及图 3 中 10 个紫色标注区域(样点 7、8、10、11、12、24、25、26、27、28)。这些指标值越高, 代表这些区域在小潮期间仍能维持较高的水文连通性。由于小潮期间景观指数与水文连接时长、淹水滞留时长这两组指标矢量之间的夹角最小, 表

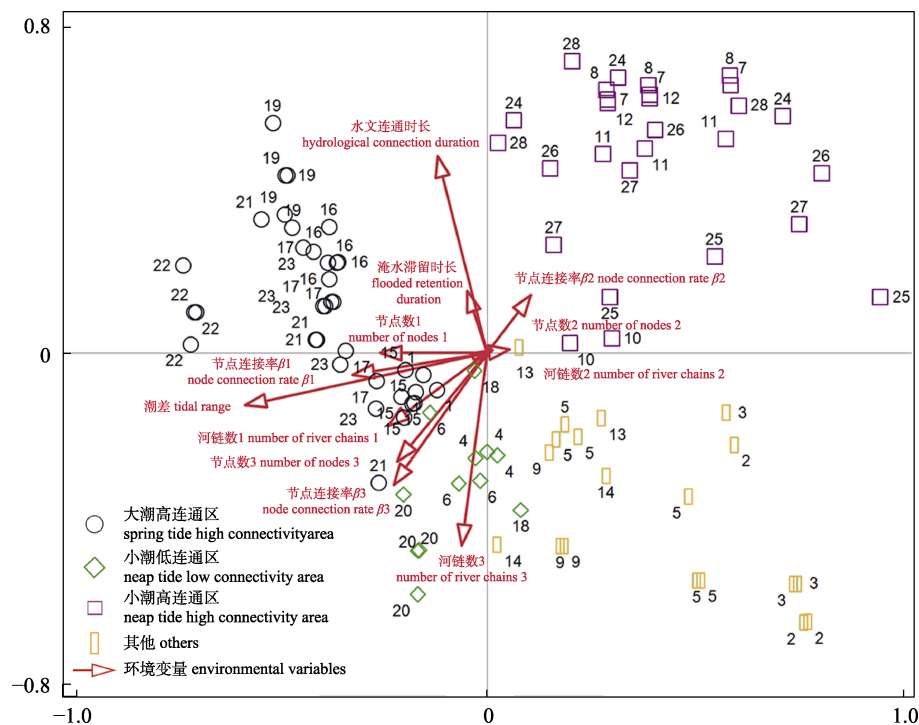


图 2 采样点与环境变量的 CCA 分析图

Fig. 2 The CCA analysis chart of sampling points and environmental variables

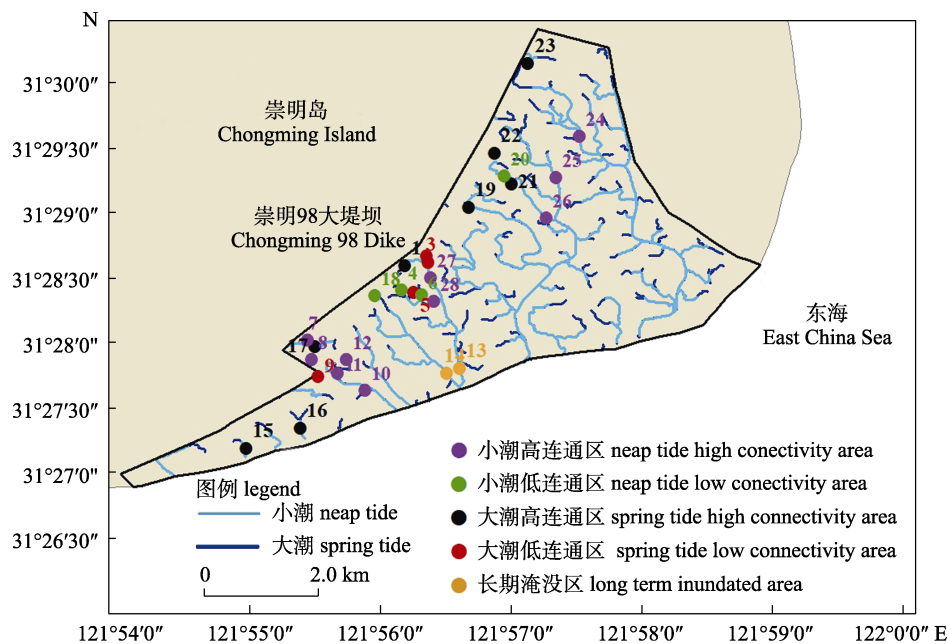


图 3 五类不同水文连通区域在研究区域的分布情况

Fig. 3 The distribution of areas with five different types of hydrological connectivity in the study area

明两者之间具强相关性,这一区域水文连通性的维持主要因为退潮速度较慢或潮水滞留时间长有关。

小潮低连通区:该区域对应图 2 中靠近“大小潮指标差值”(节点数 3、河链数 3、节点连接

率 β_3) 的样点,以及图 3 中 4 个绿色标注区域(样点 4、6、18、20)。该区域的水文连通性主要由大潮与小潮的景观指标差异决定。差异值越大,表明涨潮时潮水能深入潮沟系统的连接点和分支,

但退潮后迅速排出且滞留较少,从而导致小潮期间的水文连通性大幅下降。

其他不受潮水周期变化影响的区域: 根据站点位置可进一步分为两组。一组为长期淹没区, 对应图 2 黄色长方形和图 3 中黄色标注的样点 13、14, 位于潮沟口附近, 无论大、小潮均长期被潮水淹没, 水文连通性不受潮汐周期影响; 另一组为大潮低连通区, 对应图 2 黄色长方形和图 3 中红色标注的样点 2、3、5、9, 位于湿地内部细小潮沟末端, 多为在大潮下潮水也极少覆盖的区域。该区域与主要水文指标关联较弱, 表明水文连通性始终较低。

2.3 5 类不同程度水文连通区域中的鱼类群落分布特征

根据上述所分出的 5 类不同水文连通性区域 (图 3), 分析其不同区域的鱼类群落组成。通过数量占比饼状图可知 (图 4), 鱼类物种数量在长期淹没区占 41.05%, 在小潮高连通区占 21.66%, 在大潮高连通区占 16.78%, 在小潮低连通区占 11.02%, 在大潮低连通区占 9.49%。饼状图内圈代表五类区域内共有的优势种, 包括中国花鲈、鲃和斑尾刺虾虎鱼, 这些种类在大、小潮高连通区和长期淹没区所占比例最高。外圈代表五类区域内特有的优势种, 长期淹没区特有优势种是大

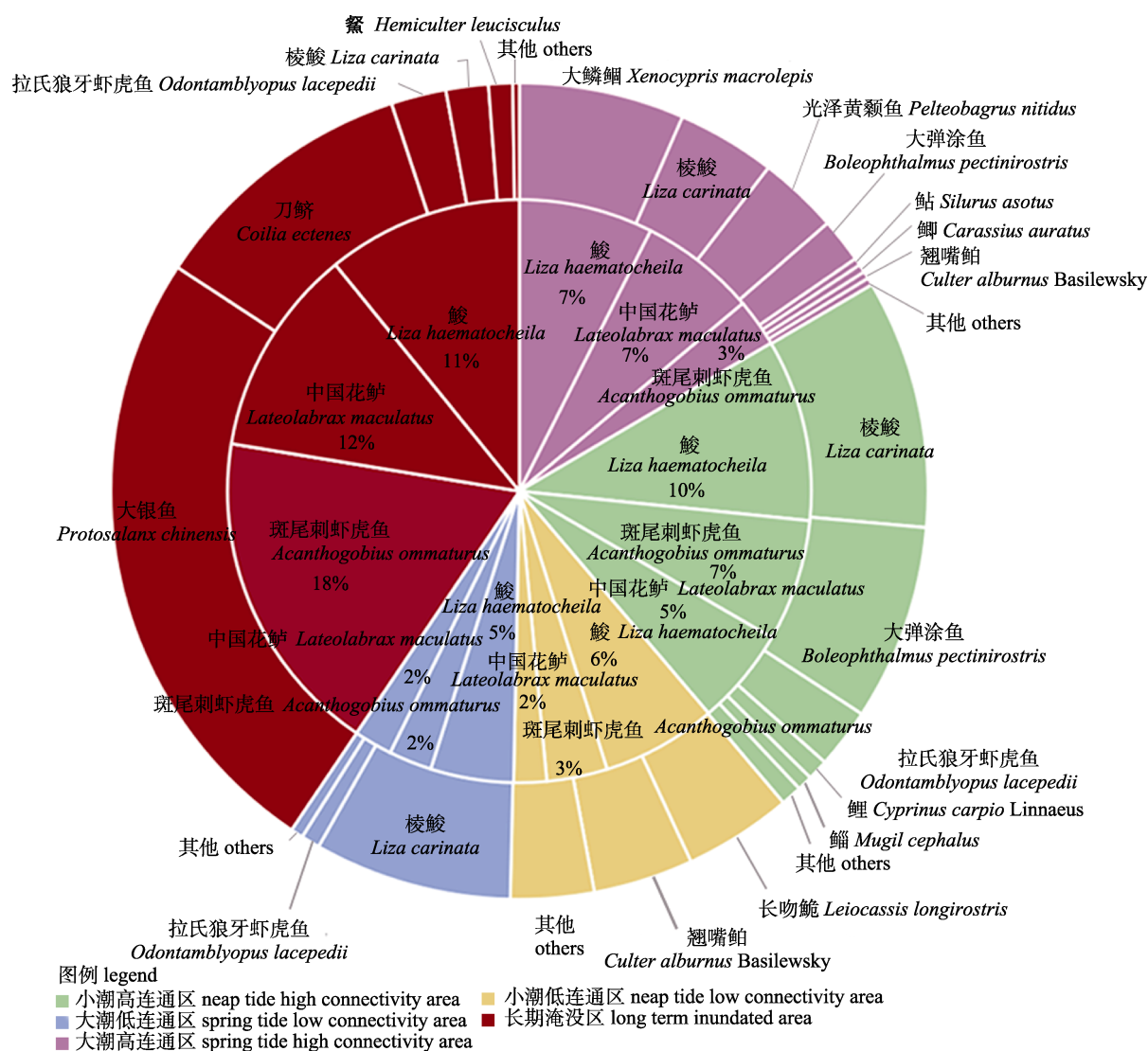


Fig. 4 Pie chart of fish community distribution characteristics across five types of hydrological connectivity areas

银鱼和刀鲚等,大潮高连通区特有优势种是大鳞鲂、棱鲃和光泽黄颡鱼等,小潮高连通区特有优势种是棱鲃、大弹涂鱼和拉氏狼牙虾虎鱼等,小潮低连通区特有优势种是翘嘴鲌和长吻鲢等,大潮低连通区特有优势种是棱鲃和拉氏狼牙虾虎鱼等。

由于不同区域的特有优势种也存在一部分共有种,如小潮高连通区、大潮高连通区、长期淹没区的优势种都包括:拉氏狼牙虾虎鱼、棱鲃等。为了进一步明确这些共有优势物种在不同区域的偏好性,再次对鱼类物种和样点进行 CCA 分析

(图 5)。结果显示,大鳞鲂、光泽黄颡鱼、鲢、鲫、鳊、鳙和日本鳊等偏好分布在大潮高连通区(图 5 黑色圆圈)。中国花鲈、鲻科(鲻和棱鲃)、虾虎鱼科(斑尾刺虾虎鱼、拉氏狼牙虾虎鱼和大弹涂鱼)、鲻和鲤偏好分布在小潮高连通区(图 5 紫色正方形)。大银鱼、刀鲚和鳊偏好分布在长期淹没区(图 5 黄色长方形 13、14 样点)。在大潮低连通区和小潮低连通区(图 5 绿色菱形),鱼类物种偏好性相对较弱,这两个区域鱼类物种较少,如结果仅显示长吻鲢和翘嘴鲌等偏好小潮低连通区。

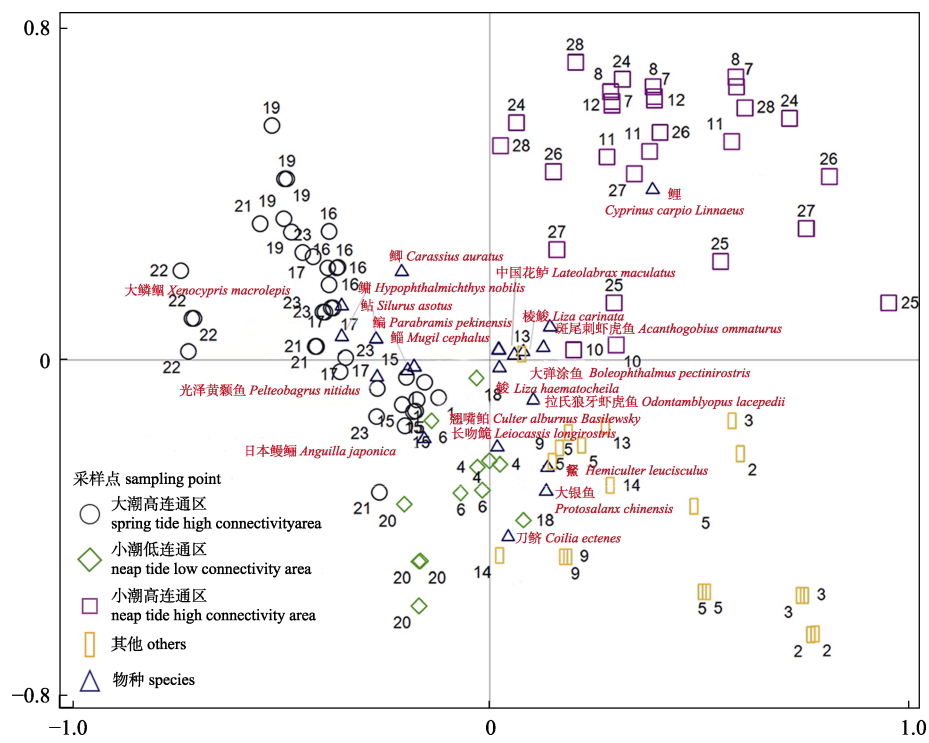


图 5 鱼类群落分布与各站点 CCA 分析图

Fig. 5 CCA analysis result of fish community distribution and sampling sites.

结合表 2 中鱼类物种所属科目、食性、数量、质量等特征,进一步分析不同水文连通区域鱼类分布偏好性与鱼类物种、个体大小、摄食行为等的相关性。在大潮高连通区域,优势种大鳞鲂、鳊主要以枝角类、桡足类等浮游动物为食,光泽黄颡鱼、鲢、鲫和日本鳊等主要以浮游生物和小型鱼虾为食。由于浮游生物和小型鱼虾大多随潮水涨落进出潮沟,这些优势种偏向随着潮水上涨时进入潮沟,在潮水退去时返回河口区域,以充分利用食物资源。小潮高连通区域以鲻科和虾

虎鱼科鱼类为主。鲻科鱼类具有较强的游泳能力且体型较大,偏好有一定水深的生境;而虾虎鱼科鱼类大多以底栖动物和底藻为食,偏好淤积质含量较高的水体生境。小潮高连通区域在小潮期间仍有较多潮水存留,更为符合这些鱼类偏好的水体特征生境。大银鱼、刀鲚和鳊则偏好分布在长期淹没区。这些物种是长江口潮沟口或近岸的优势特有物种,大多为幼鱼,对水流量和溶解氧有一定的要求。它们个体较小(平均 $W\% > 0.53$),数量较多(平均 $N\% > 8.25$),偏好在一二级主潮沟的潮

沟口聚集,而不喜进入潮沟内部。此外,长吻鮠和翘嘴鲌等鱼类偏好在小潮低连通区。这一区域鱼类物种种类较少,这可能表明这些潮沟较适合对小潮期潮水迅速褪去的生境有适应性的鱼类物种生存栖息,或者是游动能力不强的鱼类(如长吻鮠)因来不及随潮水进入或退出而滞留在原地。

3 讨论

3.1 河口湿地潮沟水文连通性的动态识别

在研究和修复河口湿地生态系统(尤其是其中潮沟、潮间带等关键生境)的过程中,识别和利用潮汐效应对栖息地的影响,对恢复和保护生态系统功能具有重要意义。本研究结果表明,河口潮沟在不同潮汐状态下的水文连通性存在显著差异。潮汐导致的高水文连通性区域对于维持河口和沿海湿地的生态功能至关重要,如 Boddy 等^[38]和 Taylor 等^[34]研究表明高水文连通性的区域,潮沟系统内部与潮水交换营养物质交换十分充分,有助于物种的种群扩散、栖息地的互通与交换,是鱼类繁殖和觅食的关键区域,对于维持鱼类群落的多样性和数量至关重要。与此同时,在小潮期间,由于潮沟局部地形偏高和景观结构较复杂,潮水退潮较为缓慢或者滞留在原地,有些区域仍能维持相对较高水文连通性的区域^[13, 39-40]。这些区域由于水流滞留的时间较长,能够促进有机物质的积累和水质的自我修复,对维持低潮期间的生态功能同样重要,可以作为栖息地的保育或修复的重点区域。Clause 等^[13]研究同样强调了潮间带和湿地区域的潮水滞留作用,指出这些区域为鱼类提供了丰富的食物、繁殖场所和躲避捕食的空间。通过增加潮沟的网络结构,从而提高水文连通的交互区域面积和滞留时长,可以显著改善生物的栖息条件,恢复物种的栖息和繁殖能力。研究结果与上述研究结果一致,在去除潮沟宽度、潮沟等级、高程等潮沟结构和地形影响外,大多数优势鱼类物种主要受潮汐周期动态影响,且主要分布在大潮高连通区、小潮高连通区和长期淹没区,这三个高水文连通区域,这些区域是长江口湿地潮沟内部鱼类的重要栖息地。因此,类似上述大潮和小潮期间的高连通区域,是未来需

要更为密切的关注以及进行针对性地优化栖息地的保护和修复策略。Boswell 等^[41]和 Young 等^[42]研究强调了在构建生态廊道中,利用潮汐的水文周期对不同生境进行分级管理,识别和评估不同连通区域,优先保护那些在大潮和小潮期间水文连通性较高的区域,从而实现栖息地的恢复和物种的迁徙通道恢复。在河口近岸湿地进行水利工程和海岸开发项目时,建立相应的生态补偿机制(如人工潮沟)或调整工程设计方案的措施,例如通过有选择地恢复受潮水影响较大的关键潮沟系统通道,并减少人工建设对水流通道的阻挡,高效提高鱼类等水生物种栖息地之间的连通作用^[43-44]。

3.2 水文连通性对鱼类群落分布的影响

水文连通性高低与鱼类及其他水生生物的行为、分布和生态过程密切相关。以往的研究表明,鲮、中国花鲈、斑尾刺虾虎鱼、棱鲮、大弹涂鱼、拉氏狼牙虾虎鱼、鲇、长吻鮠、翘嘴鲌、日本鳗鲡等为河口潮沟常见优势种,在各个级别、各类宽度大小和不同高程的潮沟中均有分布^[45-46]。但本研究的结果显示,在大小潮不同水动力作用下,这些物种的分布和组成会根据潮汐动态和潮沟内部景观网络特征进一步分异,在不同的水文连通性下有明显不同的规律和趋势,显示了鱼类对水文条件的主动利用或适应行为。鱼类物种在选择栖息地时,会根据水深、底质类型、水动力条件、食物供应和捕食风险等做出主动利用或适应调整^[13, 47]。Young 等^[42]研究表明游泳能力较强的鱼类物种更偏好水流速度较高的区域,而低流速区域适合水流滞留时长较长、对水质要求较高的物种。鱼类关键的生活史(如产卵期和幼鱼期)对水流流量或水速有一定的要求。Foubert 等^[22]研究表明,北方梭子鱼(*Esox lucius*)在其育幼期偏好潮沟中水流流速较低、淹水时间较长的稳定水体区域,以提供充足的食物和避敌空间。在本研究中,大潮下潮水势能大,潮水能冲刷入潮沟系统深处内部,覆盖更多的区域,形成水文连通时间长、交互频率高,可以提供丰沛的食源和大面积栖息地,适宜偏好利用涨落潮进出潮沟的优势鱼类,如大鳞鲂、光泽黄颡鱼等对水体水流环境适应力强,倾向于借助潮水势能在潮沟内部高度水文连通的

区域聚集。中国花鲈、鲻科具有较强的游泳能力, 偏好寻找更稳定的栖息环境和丰富的食物资源觅食或栖息^[21]。对于刀鲚、大银鱼等幼鱼, 对水深和溶解氧有一定的要求, 偏好栖息在长江口潮沟口或近岸区域。由此可见, 通过深入了解鱼类群落分布与河口湿地水文连通性之间的关系, 有助于更科学、更有效地管理和保护湿地生态系统。在河口湿地生态系统中, 实施人工或自然潮沟修复与保护工程时, 可根据鱼类对栖息地水文的需求, 利用潮汐变化调节水文连通模式, 如调整水位差、潮沟网络结构、地势高低等措施, 以控制淹水时长、滞留时长、水流量和水速等。这些措施可以促进物种的栖息、繁殖和迁徙, 显著提高水生生物多样性^[16, 48]。Gibson^[49]和 Padilla-Serrato 等^[50]的研究表明, 通过调整潮沟网络结构和水位差等措施, 可以显著提高河口湿地生态系统的水生生物多样性, 尤其是对水质、营养、流速、水深和潮汐波动敏感的物种。

4 结论

本研究深入探讨了长江口崇明东滩潮沟系统水文连通性在潮汐周期下的动态变化特征及其对鱼类群落分布的关键影响。根据潮沟在大小潮周期下的水文连通程度, 可将研究区域划分为大潮高连通区、大潮低连通区、小潮高连通区、小潮低连通区和长期淹没区五类水文连通性区域。大潮、小潮高连通区, 以及长期淹没区为优势种主要栖息地。鱼类优势种对不同水文连通区域的偏好各异。鱼类分布偏好与其游泳能力、个体大小及摄食行为密切相关, 表明水文连通性动态通过调节栖息地可利用性、食物资源和迁移路径, 直接驱动鱼类群落的空间分异。本研究从动态视角阐明了潮汐周期性变化对鱼类群落的生态过程机制, 识别不同水文连通区域的特征, 不仅为河口湿地的生态修复和生物多样性保护提供了科学依据, 还为水资源管理提供了重要的启示。通过调节水文连通性, 特别是在关键繁殖和觅食区域, 可以为湿地保护和修复提供精准策略, 以增强鱼类栖息地功能。此外, 在应对气候变化和人类活动影响(水利工程)时, 通过维持水文连通性动态

平衡提升湿地生态韧性。未来, 通过继续探索水文连通性与鱼类种群动态的长期关系, 能为河口湿地的管理和保护提供更全面的策略和指导。

参考文献:

- [1] Teichert N, Carassou L, Sahraoui Y, et al. Influence of intertidal seascape on the functional structure of fish assemblages: Implications for habitat conservation in estuarine ecosystems[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2018, 28(4): 798-809.
- [2] Zhang Z S, Yu X J, Song X L, et al. Impacts of hydrological connectivity on key ecological processes and functions in wetlands: A general review[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(1): 1-8. [张仲胜, 于小娟, 宋晓林, 等. 水文连通对湿地生态系统关键过程及功能影响研究进展[J]. *湿地科学*, 2019, 17(1): 1-8.]
- [3] Luo M, Wang Q, Qiu D D, et al. Hydrological connectivity characteristics and ecological effects of a typical tidal channel system in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2018, 54(1): 17-24. [骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 17-24.]
- [4] Freeman M C, Pringle C M, Jackson C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 5-14.
- [5] Kathilankal J C. Carbon and energy flow dynamics in a coastal salt marsh[D]. Charlottesville: University of Virginia, 2008.
- [6] Lasne E, Lek S, Laffaille P. Patterns in fish assemblages in the Loire floodplain: The role of hydrological connectivity and implications for conservation[J]. *Biological Conservation*, 2007, 139(3-4): 258-268.
- [7] Ragan A N, Wozniak J R. Linking hydrologic connectivity in salt marsh ponds to fish assemblages across a heterogeneous coastal habitat[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(3): 545-558.
- [8] Dong Z Y, Chen L L, Zhang N P, et al. Response of fish diversity to hydrological connectivity of typical tidal creek system in the Yellow River Delta based on environmental DNA metabarcoding[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(7): 100-114. [董志远, 陈琳琳, 张乃鹏, 等. 基于环境DNA宏条形码技术研究黄河三角洲典型潮沟系统鱼类多样性及其对水文连通性的响应[J]. *生物多样性*, 2023, 31(7): 100-114.]
- [9] Bice C M, Huisman J, Kimball M E, et al. Tidal barriers and

- fish-impacts and remediation in the face of increasing demand for freshwater and climate change[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2023, 289: 108376.
- [10] Jardine T D, Pettit N E, Warfe D M, et al. Consumer-resource coupling in wet-dry tropical rivers[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2012, 81(2): 310-322.
- [11] Christian R R, Allen D M. Linking hydrogeomorphology and food webs in intertidal creeks[J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, 37(1): 74-90.
- [12] He Y, Wang X H, Yang J S, et al. Research progress on influencing factors and ecological effects of wetland hydrological connectivity[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(6): 218-224. [贺怡, 王雪宏, 杨继松, 等. 湿地水文连通影响因素及生态效应研究进展[J]. *生态科学*, 2021, 40(6): 218-224.]
- [13] Clause J K, Farruggia M J, Feyrer F, et al. Wetland geomorphology and tidal hydrodynamics drive fine-scale fish community composition and abundance[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2024, 107(1): 33-46.
- [14] Miao Z B, Wang S K, Peng B B, et al. Characteristics of spatial and temporal ecological niches of the dominant species of fish assemblages in the saltmarsh wetlands of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(10): 1210-1221. [苗中博, 王思凯, 彭彪彪, 等. 长江口盐沼湿地鱼类群落优势种的时空生态位特征[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(10): 1210-1221.]
- [15] Chen L, Chen L L, Dong Z Y, et al. Influence of hydrological connectivity of typical tidal creek system on macrobenthos community structure in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9232-9246. [陈莉, 陈琳琳, 董志远, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通性对大型底栖动物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9232-9246.]
- [16] Jiang Y X, Wang Y Z, Zhou D M, et al. The impact assessment of hydro-biological connectivity changes on the estuary wetland through the ecological restoration project in the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143706.
- [17] Guo Y T, Cui Y, Wang C, et al. Distribution characteristics of carbon and nitrogen stable isotopes in wetland components and their relationship with wetland hydrological connectivity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2554-2568. [郭雨桐, 崔圆, 王晨, 等. 湿地要素中碳氮同位素特征与水文连通的关系[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2554-2568.]
- [18] Zeng B R, Li Y L, Tan Z Q. Assessment on the evolution of river structure characteristics and hydrological connectivity in Lake Poyang Basin based on index of connectivity (IC) during the past 30 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1796-1807. [曾冰茹, 李云良, 谭志强. 基于连通性指数(IC)的近 30 年鄱阳湖流域水系结构与水文连通演变评估[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1796-1807.]
- [19] Jin B S, Xu W, Guo L, et al. The impact of geomorphology of marsh creeks on fish assemblage in Changjiang River estuary[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(2): 469-479.
- [20] Ma Q Z, Zhang T T, Zhao F, et al. Effects of tidal creek connectivity on fish communities in the Yangtze River estuary wetlands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(4): 913-921. [马巧珍, 张婷婷, 赵峰, 等. 长江口湿地潮沟连通程度对鱼类群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(4): 913-921.]
- [21] Glaser C, Frei S, Massmann G, et al. Tidal creeks as hot-spots for hydrological exchange in a coastal landscape[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126158.
- [22] Foubert A, Le Pichon C, Mingelbier M, et al. Modeling the effective spawning and nursery habitats of northern Pike within a large spatiotemporally variable river landscape (St. Lawrence River, Canada)[J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, 64(2): 803-819.
- [23] Alp M, Le Pichon C. Getting from sea to nurseries: Considering tidal dynamics of juvenile habitat distribution and connectivity in a highly modified estuarine riverscape[J]. *Ecosystems*, 2021, 24(3): 583-601.
- [24] Gao C J, Gao X C, Jia P. Summary comments on hydrologic connectivity[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(3): 586-594. [高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 586-594.]
- [25] Chen Y Q, Wu L L, Zhang G X, et al. Quantitative assessment of surface hydrological connectivity in Momoge National Nature Reserve, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3833-3841. [陈月庆, 武黎黎, 章光新, 等. 莫莫格国家级自然保护区地表水文连通性定量评估[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3833-3841.]
- [26] Le Pichon C, Coustillas J, Zahm A, et al. Summer use of the tidal freshwaters of the River Seine by three estuarine fish: Coupling telemetry and GIS spatial analysis[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2017, 196: 83-96.
- [27] Feyrer F, Young M J, Huntsman B M, et al. Disentangling stationary and dynamic estuarine fish habitat to inform conservation: Species-specific responses to physical habitat and water quality in San Francisco Estuary[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2021, 13(5): 548-563.
- [28] Chen Y, He Z F, Li B, et al. Spatial distribution of tidal creeks and quantitative analysis of its driving factors in Chongming Dongtan, Shanghai[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(1): 212-219. [陈勇, 何中发, 黎兵, 等. 崇明东滩潮沟发育特征及其影

- 响因素定量分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(1): 212-219.]
- [29] Xie W M, He Q, Wang X Y, et al. Role of mudflat-creek sediment exchanges in intertidal sedimentary processes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 351-360.
- [30] Feng J G, Li Q W, Liang C, et al. Landscape index analysis of hydrological connectivity dynamics in the Yellow River Delta[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 12-21. [冯久格, 李谦维, 梁晨, 等. 基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 12-21.]
- [31] Zhuang P, Zhang T, Li S F, et al. Fishes of the Yangtze Estuary[M]. The 2nd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2018. [庄平, 张涛, 李圣法, 等. 长江口鱼类[M]. 第二版. 北京: 中国农业出版社, 2018.]
- [32] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. California Department of Fish and Game Fishery Bulletin, 1971, 152: 1-105.
- [33] Gao M S, Ye S Y, Shi G J, et al. Oceanic tide-induced shallow groundwater regime fluctuations in coastal wetland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 24-27, 37. [高茂生, 叶思源, 史贵军, 等. 潮汐作用下的滨海湿地浅层地下水动态变化[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 24-27, 37.]
- [34] Taylor R, Mather M, Smith J, et al. Confluences function as ecological hotspots: Geomorphic and regional drivers can help identify patterns of fish distribution within a seascape[J]. Marine Ecology Progress Series, 2019, 629: 133-148.
- [35] Yu X J, Zhang Z S, Xue Z S, et al. Morphological characteristics and connectivity of tidal channels in the Yellow River Delta for 7 periods since 1989[J]. Wetland Science, 2018, 16(4): 517-523. [于小娟, 张仲胜, 薛振山, 等. 1989年以来7个时期黄河三角洲潮沟的形态特征及连通性研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(4): 517-523.]
- [36] Zhou L H, Zhang B L, Cao R T, et al. Topographic indicators and hydrological information extraction and analysis based on DEM[J]. Electric Power Survey and Design, 2024(2): 66-73. [周林虎, 张秉来, 曹荣泰, 等. ArcGIS 环境下基于 DEM 的地形指标和水文信息提取分析[J]. 电力勘测设计, 2024(2): 66-73.]
- [37] Legendre P, Gallagher E D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data[J]. Oecologia, 2001, 129(2): 271-280.
- [38] Boddy N C, Booker D J, McIntosh A R. Confluence configuration of river networks controls spatial patterns in fish communities[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(1): 187-201.
- [39] McDonough O T, Lang M W, Hosen J D, et al. Surface hydrologic connectivity between Delmarva Bay Wetlands and nearby streams along a gradient of agricultural alteration[J]. Wetlands, 2015, 35(1): 41-53.
- [40] Trotter A A, Ritch J L, Nagid E, et al. Using geomorphology to better define habitat associations of a large-bodied fish, common snook *Centropomus undecimalis*, in Coastal Rivers of Florida[J]. Estuaries and Coasts, 2021, 44(3): 627-642.
- [41] Boswell K M, Kimball M E, Rieucan G, et al. Tidal stage mediates periodic asynchrony between predator and prey nekton in salt marsh creeks[J]. Estuaries and Coasts, 2019, 42(5): 1342-1352.
- [42] Young M J, Feyrer F, Stumpner P R, et al. Hydrodynamics drive pelagic communities and food web structure in a tidal environment[J]. International Review of Hydrobiology, 2021, 106(2): 69-85.
- [43] Deng Y, Cao M X, Ma A X, et al. Mechanism study on the impacts of hydraulic alteration on fish habitat induced by spur dikes in a tidal reach[J]. Ecological Engineering, 2019, 134: 78-92.
- [44] Wang P, Zou W F, Dong X K, et al. Analysis of the influence of tidal creek dredging on tidal flat hydrodynamics [J]. Coastal Engineering, 2023, 42(2): 174-187. [王平, 邹文峰, 董祥科, 等. 潮沟疏通对滩涂水动力的影响分析[J]. 海岸工程, 2023, 42(2): 174-187.]
- [45] Zhang T, Zhuang P, Liu J, et al. Species composition and biodiversity of fish community in Chongming Dongtan of Yangtze River estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 2056-2062. [张涛, 庄平, 刘健, 等. 长江口崇明东滩鱼类群落组成和生物多样性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2056-2062.]
- [46] Jin B S. Temporal and spatial distribution patterns of fish diversity in salt marsh creeks of the Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: Fudan University, 2010. [金斌松. 长江口盐沼潮沟鱼类多样性时空分布格局[D]. 上海: 复旦大学, 2010.]
- [47] Colombano D D, Handley T B, O'Rear T A, et al. Complex tidal marsh dynamics structure fish foraging patterns in the San Francisco Estuary[J]. Estuaries and Coasts, 2021, 44(6): 1604-1618.
- [48] Kruger M, Strydom N A. Spatial and temporal variability in the larval fish assemblage of a warm temperate South African Estuary, with notes on the effects of artificial channelling[J]. African Zoology, 2010, 45(2): 195-212.
- [49] Gibson R N. Go with the flow: Tidal migration in marine animals[C]// Proceedings of the 37th Migrations and Dispersal of Marine Organisms. Cham: Springer, 2003: 153-161.
- [50] Padilla-Serrato J, López-Martínez J, Rodríguez-Romero J, et al. Changes in fish community structures in a coastal lagoon in the Gulf of California, México[J]. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 2017, 52(3): 567-579.

Impact of hydrological connectivity of tidal creek system in the Chongming Dongtan of the Yangtze River Estuary on distribution of fish communities

FEI Shujie^{1,2}, ZHANG Tingting^{2,3,4*}, ZHAO Feng^{1,2,3,4*}, ZHANG Tao^{1,2,3,4}, YANG Gang^{1,2,3,4}, WANG Sikai^{2,3,4}

1. Shanghai Ocean University, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Sciences Education, Shanghai 201306, China;
2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of East China Sea Fisheries Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200090, China;
3. Shanghai Engineering Research Center for Fishery Resources Enhancement and Ecological Restoration in the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China;
4. Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment of Yangpu, Shanghai 200090, China

Abstract: Hydrological connectivity is one of the key characteristics that reflect the health and function of estuarine wetland ecosystems, and it has a significant impact on the distribution of estuarine fish communities. This study analyzed the dynamic hydrological connectivity of tidal creeks in the Chongming Dongtan area of the Yangtze River Estuary under different tidal states and its influence on fish community distribution, aiming to provide a scientific basis for the ecological restoration, biodiversity conservation, and water resource management of estuarine wetlands. Twelve hydrological connectivity indicators related to hydrological dynamics and landscape dimensions were selected to explore the relationships and underlying mechanisms between hydrological connectivity patterns and fish distribution patterns. The results showed that factors such as tidal range, the duration of hydrological connection, the duration of flooded retention, the number of nodes, the number of river chains, and the node connection rate β are key hydrological connectivity factors. Canonical correlation analysis (CCA) indicated that the sampling regions within the tidal creek system could be divided into five distinct hydrological connectivity areas, i.e., the high connectivity area during spring tides, the low connectivity area during spring tides, the high connectivity area during neap tides, the low connectivity area during neap tides, and the long-term inundation area. Among them, the high connectivity areas during spring tides, the high connectivity areas during neap tides, and the long-term inundation area are the main habitats of dominant fish species. Dominant fish species exhibited different preferences for different hydrologically connected areas. For example, *Xenocypris macrolepis* and *Pelteobagrus nitidus* tended to inhabit the high hydrological connectivity areas during spring tides. *Lateolabrax maculatus*, Mugilidae, and Gobiidae exhibited a preference for high hydrological connectivity areas during neap tides. Juvenile fish such as *Coilia ectenes* and *Protosalanx chinensis* preferred to inhabit areas at the mouths of tidal creeks or near the shore. These findings demonstrate that estuarine tidal creek fish actively exercise selection and exhibit preferences for different hydrologically connected habitats under the influence of tides, which are related to their swimming capabilities, body sizes, and feeding behaviors. This study provides a scientific basis for the ecological restoration of estuarine wetlands and the conservation of fish biodiversity. It also helps to formulate strategies for regulating hydrological connectivity in wetland water resource management, thereby promoting the sustainable development of such ecosystems.

Key words: estuarine wetland; fish community; hydrological connectivity; tidal dynamics; habitat preference

Corresponding author: ZHAO Feng. E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; ZHANG Tingting, E-mail: zhangtt@ecsf.ac.cn