

DOI: 10.12264/JFSC2023-0042

长江口潮滩湿地生境修复对鱼类群落结构的影响

谢雯^{1,2}, 王思凯^{2,3}, 秦泽^{1,2}, 夏瑛², 杨刚^{2,3}, 孙金辉¹, 赵峰^{1,2,3}

1. 天津农学院水产学院, 天津 300384;

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

摘要: 为查明长江口潮滩湿地生境修复对鱼类群落结构的影响, 在 2021 年 6 月(春季)、2021 年 11 月(秋季)、2022 年 1 月(冬季)、2022 年 7 月(夏季)于长江口南支采用定置插网对潮滩湿地生境修复区与对照区进行鱼类样品采集, 比较分析修复区和对照区的鱼类物种数、个体数、生物量和多样性指数。结果表明, 研究期间共采集到鱼类 27 种, 隶属于 8 目 9 科 21 属, 其中, 修复区采集到鱼类 22 种, 对照区采集到 21 种。修复区和对照区鱼类的个体数、生物量差异明显, 均表现为修复区明显高于对照区。4 季修复区鱼类群落总 Margalef 丰富度指数(D)为 6.8, 总 Shannon-Wiener 多样性指数(H')为 4.92, 总 Simpson 单纯度指数(C)为 2.47, 总 Pielou 均匀度指数(J')为 2.99, 生物多样性指数总体为 17.18, 高于对照区(15.82)。春季修复区鱼类幼体出现频率(67%)明显多于对照区(44%), 表明幼鱼对修复区存在较强的偏好性。本研究结果表明在长江口潮滩湿地进行生境修复能够缓解长江口鱼类生物多样性所面临的生态危机, 在一定程度上为幼鱼提供育幼场所, 为进一步深入了解长江口潮滩湿地生境修复对鱼类育幼场的影响机制提供参考。

关键词: 长江口; 生境修复; 优势种; 鱼类多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)05-0573-11

长江口生境独特而复杂, 具有广袤的潮滩湿地^[1]。潮滩湿地具有初级生产力高、生境异质性强、食物资源和生物群落丰富等特点, 是鱼类等水生动物重要的栖息地, 发挥着产卵场、育幼场、索饵场、洄游通道等渔业生态支持功能, 在生物多样性维持以及渔业资源持续产出等方面具有十分重要的地位。然而, 近几十年来, 随着涉水工程建设、滩涂围垦等人类活动的影响^[2-3], 长江口滩涂湿地面积大幅锐减^[4]。鱼类栖息地受到严重威胁, 导致长江口潮滩繁殖、育幼的鱼类种群数量呈下降趋势^[5-6]。修复和保护长江口潮滩湿地生境显得尤为重要。

目前, 在潮滩湿地生态修复方面, 许多学者曾做出积极的探索和实践^[7-8]。如吴忠鑫等^[9]在荣成俚岛构建人工鱼礁后, 发现礁区内游泳动物的种类数和渔获量均高于对照区, 人工鱼礁的复杂结构为鱼类提供了庇护场和饵料场, 增加了游泳动物在礁区的聚集。陈雅慧^[10]通过种植海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)恢复崇明东滩因为互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵而受损的土著植物生境, 并且研发了河口潮滩湿地海三棱藨草植物种植技术。姚东方^[11]在河口开展了基于芦苇生态浮床的生态修复措施研究, 结果表明浮床水域鱼类多样性比对照区更丰富。赵峰等^[12]在长江口通过

收稿日期: 2023-03-14; 修订日期: 2023-04-19.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901202); 上海市优秀学术带头人计划项目(21XD1405000); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金项目(2020TD13).

作者简介: 谢雯(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为河口渔业生境修复. E-mail: 965147977@qq.com

通信作者: 赵峰, 研究员, 研究方向为渔业生态和保护生物学, E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; 孙金辉, 教授, 研究方向为水生动物行为生态学, E-mail: jhsun1008@163.com

构建人工飘浮湿地,为中华绒螯蟹幼蟹提供早期生长发育所需的隐匿、摄食生境。

针对长江口潮滩湿地受损后,自然恢复较慢的特点,本团队前期利用高滩种植蘆草、低滩设置立体芦葦浮床的方式,在长江口崇明南支建立了约 5000 m² 的修复示范区。本研究调查分析了修复区与对照区鱼类群落结构及多样性的变化,旨在评估生境修复效果,为研发和完善长江口潮滩生境修复技术提供支撑和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于长江口南支崇明岛堡镇近岸水域(121.64°E, 31.52°N),如图 1 所示。该区域由于岸线硬化等原因导致潮滩湿地退化,湿地植被丧失,生态功能严重退化。2021 年 5 月,本研究团队参照姚东方^[11]和赵峰等^[12]的方法,选取蘆草为主要材料,在高程超过 2.2 m 的边滩进行蘆草种植,在低程潮滩设置立体芦葦浮床,芦葦浮床由 8 组拼接而成,每组由 4 个 1 m×1 m 的芦葦根系组成,截止到 2021 年 8 月在这一区域构建了约 5000 m² 的生境修复示范区。同时,选取邻近水域作为对照区,不做任何处理(图 2),在修复区和对照区开展持续调查监测,评估潮滩生境修复措施对鱼类群落的影响。

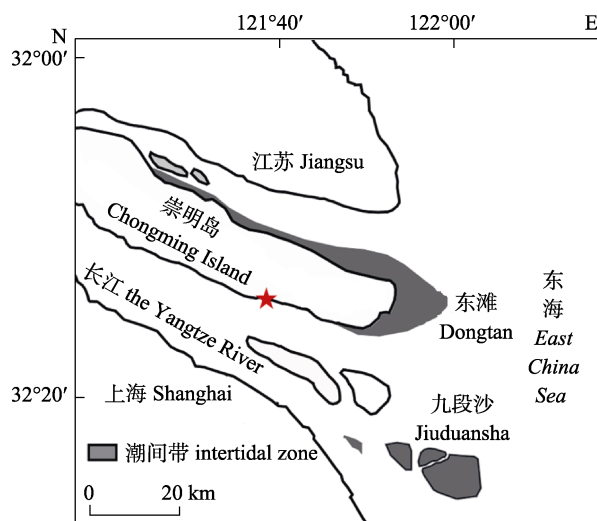


图 1 长江口潮滩湿地修复区和对照区位置示意图

Fig. 1 Sampling stations for the fish investigation in the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary

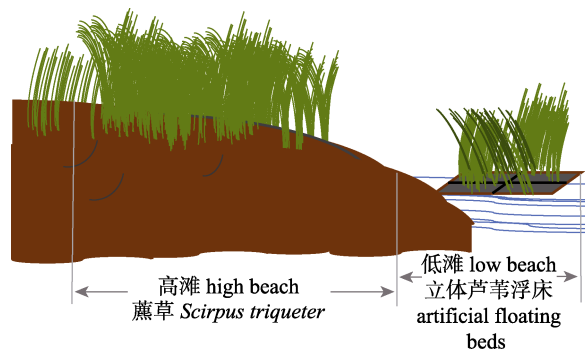


图 2 生态修复技术原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of ecological restoration technology

1.2 样品采集与分析

分别于 2021 年 6 月(春季)、2021 年 11 月(秋季)、2022 年 1 月(冬季)、2022 年 7 月(夏季),每月大潮期间进行调查采样。在修复区和对照区设置插网,网翼长 30 m,高 1.5 m,中间 4 个网袋,拦网网眼 2a=0.8 cm (图 3),收集日、夜潮退潮时的渔获物。利用多参数水质检测仪监测修复区和对照区的水温、盐度、溶解氧和 pH 等环境因子。渔获物样品带回实验室鉴定、分类并计数。测量鱼体的体长(mm)、全长(mm)并称重(g)。样品采集、保存及分析均按《海洋调查规范》(GB/T12763-2007)和《海洋监测规范》(GB17378-1998)进行。

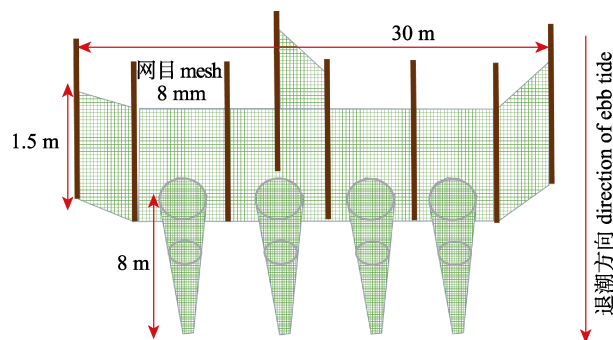


图 3 长江口调查区域定置插网示意图

Fig. 3 The sketch map of fyke net set in the survey areas in the Yangtze River Estuary

1.3 数据处理与分析

鱼类群落多样性度量采用 Margalef 丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 单纯度指数(C)、Pielou 均匀度指数(J'),计算公式如下。

Margalef 丰富度指数: $D=(S-1)/\ln N$
Shannon-Wiener 多样性指数: $H'=-\sum P_i \ln P_i$
Simpson 单纯度指数: $C=1-\sum P_i^2$
Pielou 均匀度指数: $J'=H'/H'_{Max}$

式中, $P_i=n_i/N$, S 、 N 和 n_i 分别为调查各区域的总物种数、所有物种的总个体数和第 i 种物种的个体数。

鱼类优势种利用 Pianka 相对重要性指数(index of relative importance, IRI)^[13]计算, 公式如下:

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

式中, $N\%$ 为某一物种鱼类个体数占物种总个体数的百分比, $W\%$ 为某一物种生物量占物种总生物量的百分比, $F\%$ 为某一物种在调查中出现的站位次数占总调查站位次数的百分比。将 $IRI>500$ 定义为优势种^[14]。

数据统计和计算采用软件 Microsoft Excel, 生物多样性数据分析采用软件 Past 3.0, 图件绘制

采用软件 Origin 2021, 使用软件 SPSS 25.0 对修复区和对照区的鱼类个体数和生物量进行 t 检验分析(t -tests), 以检验潮滩生境修复对鱼类群落的影响。数据均以平均值 $\pm$ 标准误($\bar{x} \pm SE$)表示。

2 结果与分析

2.1 水体环境特征

不同季节修复区和对照区的底层水体环境因子变化显著(表 1)。冬季水温较低, 但溶解氧含量较高, 夏季水温最高, 而溶解氧含量最低; 盐度最大值出现在秋季, 春季、冬季、夏季之间的盐度变化较小, pH 在秋季最高, 春季最低。

不同季节水温、溶解氧、盐度、pH 具有明显的差异。修复区和对照区的水温在夏季具有显著差异($P<0.05$), 溶解氧和 pH 在春季存在显著差异($P<0.05$), 盐度在秋季和冬季具有显著差异($P<0.05$) (表 1)。

表 1 长江口潮滩湿地修复区和对照区底层水域环境特征
Tab. 1 Environmental conditions of bottom water of the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary

环境变量 environment variable	春季 spring		秋季 autumn		冬季 winter		夏季 summer	
	修复区 restoration areas	对照区 control areas	修复区 restoration areas	对照区 control areas	修复区 restoration areas	对照区 control areas	修复区 restoration areas	对照区 control areas
水温/ $^{\circ}C$ temperature	21.76 $\pm$ 0.52 ^{Aa}	22.16 $\pm$ 0.12 ^{Aa}	17.94 $\pm$ 0.12 ^{Ba}	18.00 $\pm$ 0.09 ^{Ba}	12.89 $\pm$ 0.02 ^{Ca}	12.90 $\pm$ 0.04 ^{Ca}	31.30 $\pm$ 0.39 ^{Da}	32.20 $\pm$ 0.10 ^{Db}
溶解氧含量/ (mg/L) dissolved oxygen, DO	10.02 $\pm$ 0.76 ^{Aa}	8.78 $\pm$ 0.01 ^{Ab}	8.70 $\pm$ 0.01 ^{Aa}	8.69 $\pm$ 0.01 ^{Aa}	10.03 $\pm$ 0.00 ^{Ba}	10.02 $\pm$ 0.04 ^{Ba}	6.77 $\pm$ 0.05 ^{Ca}	6.83 $\pm$ 0.21 ^{Ca}
盐度 salinity	0.15 $\pm$ 0.00 ^{Aa}	0.15 $\pm$ 0.00 ^{Aa}	0.56 $\pm$ 0.02 ^{Ba}	0.41 $\pm$ 0.00 ^{Bb}	0.19 $\pm$ 0.00 ^{Ca}	0.19 $\pm$ 0.00 ^{Ca}	0.21 $\pm$ 0.00 ^{Da}	0.21 $\pm$ 0.00 ^{Da}
pH	7.65 $\pm$ 0.22 ^{Aa}	7.27 $\pm$ 0.15 ^{Ab}	8.37 $\pm$ 0.08 ^{Ba}	8.36 $\pm$ 0.03 ^{Ba}	8.10 $\pm$ 0.02 ^{Ca}	8.08 $\pm$ 0.00 ^{Ca}	8.10 $\pm$ 0.01 ^{Ba}	8.19 $\pm$ 0.05 ^{Ba}

注: 上标不同大写字母表示不同季节之间差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示修复区与对照区差异显著($P<0.05$).
Note: Different capital letters in the superscript indicate significant differences between seasons ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences between the restored and control areas ($P<0.05$).

2.2 物种组成与优势种

如表 2 所示, 4 季调查共采集到鱼类 27 种, 隶属于 8 目 9 科 21 属, 其中鲤形目(Cypriniformes) 14 种, 占总物种数的 51.85%, 其次为鲈形目(Perciformes)、鲱形目(Clupeiformes)、鲇形目(Siluriformes)和鰕形目(Pleuronectiformes), 分别为 4 种、2 种、2 种和 2 种。个体数占优势的科分别是鲤科(Cyprinidae)、鰕科(Bagridae)、花鲈科

(Lateolabracidae)和虾虎鱼科(Gobiidae), 分别占采集到鱼类总个体数的 26.32%、21.59%、20.96% 和 16.07% (图 4)。花鲈科在春季(38.81%~61.36%)和夏季(22.92%~37.92%)所占比例较多, 而在秋季和冬季几乎消失, 只在冬季对照区(6.67%)少量出现。鰕科鱼类则表现出相反的变化, 在秋季(28.57%~33.33%)和冬季(13.33%~56.25%)占比较高, 而在春季和夏季占比较低, 均小于 13%。

表 2 长江口潮滩湿地修复区 and 对照区鱼类物种名录和相对重要性指数
Tab. 2 List and relative importance index of fish species in the restoration and control areas
of the Yangtze River Estuary tidal flats wetlands

目 order	科 family	属 genus	种 species	个体数占 比/% N%		生物量占 比/% W%		相对重要性 指数 IRI	
				修复区	对照区	修复区	对照区	修复区	对照区
				restoration	control	restoration	control	restoration	control
鳗鲡目 Anguilliformes	鳗鲡科 Anguillidae	鳗鲡属 <i>Anguilla</i>	日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	0.6	0	2.8	0	170	0
鲱形目 Clupeiformes	鲱科 Engraulidae	鲚属 <i>Coilia</i>	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	0.9	6.8	0.1	5.0	55	590
			刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	1.3	7.5	0.6	14.6	93	1108
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	青鱼属 <i>Mylopharyngodon</i>	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	0.3	0	0.1	0	19	0
		鮠属 <i>Culter</i>	翘嘴鮠 <i>Culter alburnus</i>	0.3	0	3.1	0	169	0
		鲮属 <i>Hemiculter</i>	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	1.6	2.1	1.0	1.5	128	177
			贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	10.4	8.9	5.2	5.6	781	726
		鳊属 <i>Parabramis</i>	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	0.9	4.1	0.1	0.7	54	241
		似鳊属 <i>Pseudobrama</i>	似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	6.3	4.8	6.0	7.3	616	605
		鲴属 <i>Xenocypris</i>	银鲴 <i>Xenocypris argentea</i>	0.3	0.7	1.5	4.4	92	253
			大鳞鲴 <i>Xenocypris macrolepis</i>	2.5	2.1	0.7	1.0	163	150
		鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	0	1.4	0	0.4	0	94
鲮形目 Siluriformes	鲮科 Bagridae	鲮属 <i>Hemibarbus</i>	花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	0.6	0	6.3	0	349	0
		蛇鲮属 <i>Saurogobio</i>	长蛇鲮 <i>Saurogobio dumerili</i>	0	2.1	0	1.2	0	162
		银鲮属 <i>Squalidus</i>	银鲮 <i>Squalidus argentatus</i>	0.6	0.7	0.4	0.3	51	47
			亮银鲮 <i>Squalidus nitens</i>	0	0.7	0	0.6	0	63
		鲫属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>	0	0.7	0	8.1	0	439
				黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	6.3	0.7	14.1	2.8
胡瓜鱼目 Osmeriformes	银鱼科 Salangidae	大银鱼属 <i>Protosalanx</i>	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobaggrus nitidus</i>	9.8	10.3	8.9	12.3	912	1127
鲱形目 Mugiliformes	鲱科 Mugilidae	鲮属 <i>Liza</i>	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	0.3	0	0.2	0	25	0
			鲮 <i>Liza haematocheila</i>	1.3	0	0.3	0	79	0

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)									
目 order	科 family	属 genus	种 species	个体数占 比/% N%		生物量占 比/% W%		相对重要性 指数 IRI	
				修复区 restoration	对照区 control	修复区 restoration	对照区 control	修复区 restoration	对照区 control
鲈形目 Perciformes	花鲈科	花鲈属	中国花鲈	41.0	33.6	14.9	16.4	2794	2500
	Lateolabracidae	Lateolabrax	Lateolabrax maculatus						
	虾虎鱼科	刺虾虎鱼属	斑尾刺虾虎鱼	1.6	0.7	1.5	0.8	155	77
	Gobiidae	Acanthogobius	Acanthogobius ommaturus						
		吻虾虎鱼属	子陵吻虾虎鱼	0	0.7	0	0.1	0	39
		Rhinogobius	Rhinogobius giurinus						
		狼牙虾虎鱼属	拉氏狼牙虾虎鱼	7.6	8.9	3.3	5.5	546	722
		Odontamblyopus	Odontamblyopus lacepedii						
鲮形目 Pleuronectiformes	舌鲮科	舌鲮属	窄体舌鲮	4.1	2.1	26.3	10.4	1519	621
	Cynoglossidae	Cynoglossus	Cynoglossus gracilis						
			紫斑舌鲮	1.3	0.7	2.6	1.0	192	82
			Cynoglossus purpureomaculatus						

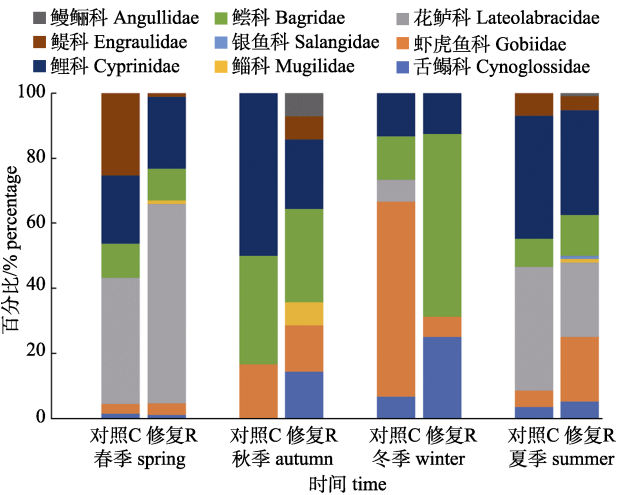


图 4 长江口潮滩湿地修复区和对照区鱼类各科个体数百分比

R 为修复区, C 为对照区.

Fig. 4 Percentage of species in each family to the total fish species in the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary

R means restoration areas, C means control areas.

调查期间在修复区共调查到鱼类 22 种(表 2), 优势种分别为贝氏鲮(*Hemiculter bleekeri*)、似鳊(*Pseudobrama simoni*)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobaggrus nitidus*)、中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、拉氏狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)和窄体舌鲮(*Cynoglossus gracilis*)。对照区共调查到鱼类 21

种, 优势种分别为凤鲚(*Coilia mystus*)、刀鲚(*Coilia nasus*)、贝氏鲮、似鳊、光泽黄颡鱼、中国花鲈、拉氏狼牙虾虎鱼和窄体舌鲮。中国花鲈在修复区(2794)和对照区(2500)均具有最高的相对重要性指数。

鱼类物种数表现为修复区高于对照区, 其中修复区和对照区春季捕获鱼类物种数分别为 12 种和 9 种, 夏季捕获鱼类物种数分别为 19 种和 14 种, 秋季捕获鱼类物种数分别为 9 种和 5 种, 冬季捕获鱼类物种数分别为 7 种和 9 种(图 5a)。

本研究共采集到鱼类 465 尾, 修复区(319 尾)和对照区(146 尾)个体数差异明显, 其中春季修复区(176 尾)显著高于对照区(67 尾, $P<0.05$)(图 5b); 夏季、秋季和冬季虽然没有显著性差异, 但是鱼类个体数也表现为修复区高于对照区, 其中夏季修复区和对照区分别为 97 尾、58 尾; 秋季分别为 14 尾、6 尾; 冬季分别为 32 尾、15 尾。

鱼类生物量在所有季节均表现为修复区高于对照区(图 5c)。春季修复区鱼类生物量平均为 (423 ± 21) g/d, 显著高于对照区 $[(190\pm39)$ g/d, $P<0.05$]; 夏季修复区鱼类生物量平均为 (186 ± 84) g/d, 对照区为 (91 ± 30) g/d; 秋季修复区和对照区鱼类平均生物量分别为 (157 ± 71) g/d 和 (49 ± 32) g/d; 冬季修复区采集到鱼类 (343 ± 163) g/d,

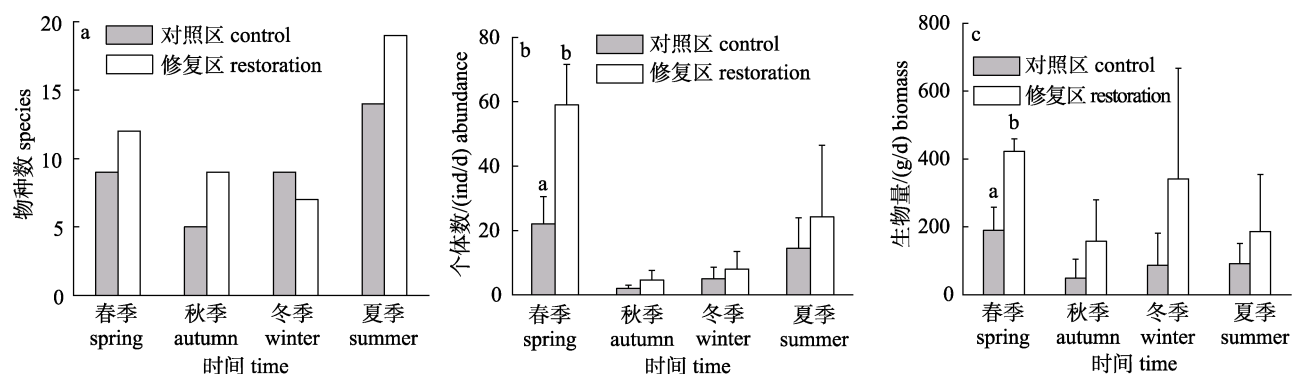


图 5 长江口潮滩湿地修复区和对照区不同季节鱼类物种数、个体数和生物量差异

Fig. 5 Differences in species number, abundance and biomass of fishes in different seasons in the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary

而对照区仅采集到鱼类(87±55) g/d。

2.3 个体大小

总体来说,长江口潮滩湿地鱼类主要为幼体,有超过 50%的个体体长小于 10 cm。春季和夏季体长小于 10 cm 的个体出现频率最高,而大个体较少,春季对照区和修复区超过 20 cm 的个体出现频率为 7.58%和 1.71%,夏季为 3.38%和 4.12%,在秋季和冬季大个体出现频率增加,其中修复区超过 20 cm 的个体分别为 14.28%和

31.26% (图 6)。

在修复区和对照区鱼类体长频率表现出明显的差异,小于 10 cm 的鱼类幼体比例在春季修复区(67%)明显高于对照区(44%),而在秋季(50% vs 67%)、夏季(57% vs 73%)和冬季(3% vs 7%)均表现出相反的结果;体长大于 20 cm 的大个体鱼类在春季出现频率表现出对照区高于修复区,而秋季、夏季和冬季表现出修复区明显高于对照区(图 6)。

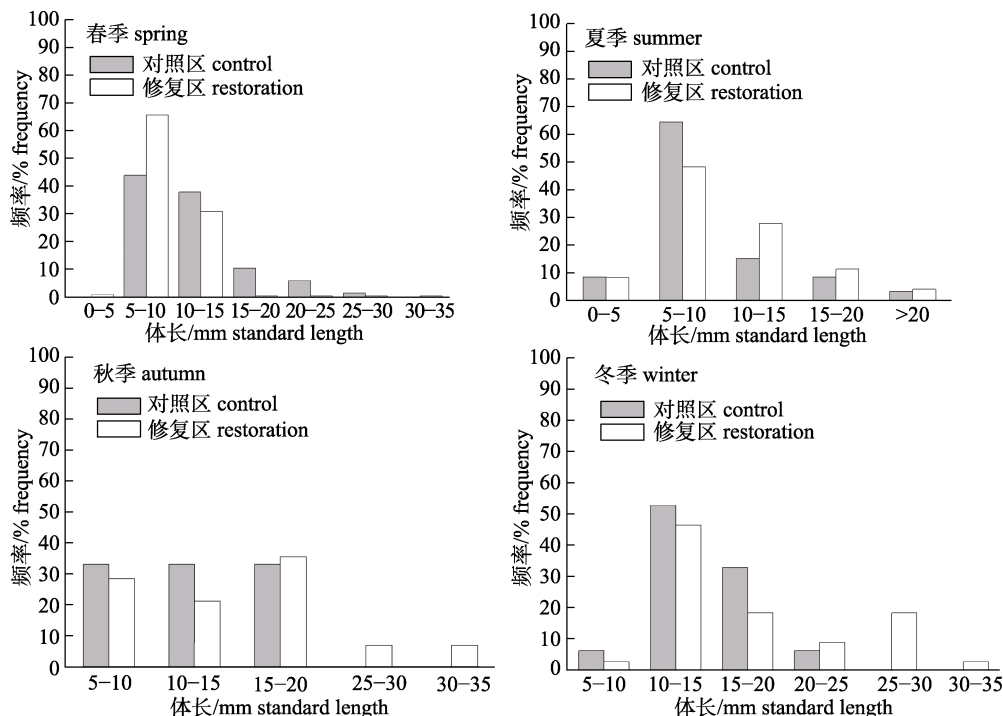


图 6 长江口潮滩湿地修复区和对照区不同季节鱼类体长频率分布

Fig. 6 Size-frequency distribution of fishes in different seasons in the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary

2.4 生物多样性分析

4 季鱼类总 Margalef 丰富度指数(D)、总 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和总 Simpson 单纯度指数(C)均为修复区明显高于对照区,总 Pielou 均匀度指数(J')则稍低于对照区(表 3)。其中修复区鱼类群落总 Margalef 丰富度指数(D)为 6.8,总 Shannon-Wiener 多样性指数(H')为 4.92,总 Simpson 单纯度指数(C)为 2.47,总 Pielou 均匀度指数(J')为 2.99,生物多样性指数总体为 17.18,高于对照区(15.82)。

春季 Margalef 丰富度指数(D)修复区(1.66 ± 0.60)显著低于对照区(1.75 ± 0.10 , $P<0.05$),夏季 Margalef 丰富度指数(D)修复区低于对照区,秋

季、冬季 Margalef 丰富度指数(D)均为修复区高于对照区;春季 Shannon-Wiener 多样性指数(H')表现为修复区低于对照区,夏季修复区和对照区 Shannon-Wiener 多样性指数(H')相近,而秋季、冬季则表现为修复区高于对照区;春季 Simpson 单纯度指数(C)修复区低于对照区,夏季修复区和对照区 Simpson 单纯度指数(C)相近,而秋季 Simpson 单纯度指数(C)修复区(0.63 ± 0.17)显著高于对照区(0.29 ± 0.34 , $P<0.05$),冬季 Simpson 单纯度指数(C)表现为修复区较高于对照区;春季、秋季、冬季 Pielou 均匀度指数(J')均为修复区较低于对照区,夏季修复区和对照区 Pielou 均匀度指数(J')相近(表 3)。

表 3 长江口潮滩湿地修复区和对照区不同季节鱼类丰富度指数(D)、香农-威纳多样性指数(H')、单纯度指数(C)和均匀度指数(J')

Tab. 3 The Margalef richness index (D), Shannon-Wiener diversity (H'), Simpson simplicity index (C) and Pielou evenness index (J') of fishes in the restoration and control areas in the Yangtze River Estuary in different seasons

季节 season	区域 area	丰富度 D	多样性 H'	单纯度 C	均匀度 J'
春季 spring	修复 restoration	$1.66\pm 0.60^*$	1.27 ± 0.23	0.58 ± 0.11	0.48 ± 0.10
	对照 control	1.75 ± 0.10	1.51 ± 0.10	0.71 ± 0.07	0.73 ± 0.13
夏季 summer	修复 restoration	2.17 ± 0.82	1.64 ± 0.51	0.75 ± 0.13	0.77 ± 0.11
	对照 control	2.33 ± 0.32	1.64 ± 0.23	0.75 ± 0.06	0.77 ± 0.09
秋季 autumn	修复 restoration	1.71 ± 0.75	1.13 ± 0.52	$0.63\pm 0.17^*$	0.94 ± 0.06
	对照 control	0.82 ± 0.95	0.45 ± 0.54	0.29 ± 0.34	1.00 ± 0.00
冬季 winter	修复 restoration	1.26 ± 0.31	0.88 ± 0.31	0.51 ± 0.15	0.80 ± 0.17
	对照 control	1.09 ± 1.49	0.72 ± 0.94	0.35 ± 0.43	0.91 ± 0.16

注: *表示修复区和对照区具有显著性差异($P<0.05$).
Note: * indicates significant differences between the restoration and control areas ($P<0.05$).

3 讨论

河口近岸潮滩是水生动物重要的栖息地,也是多种重要鱼类和虾蟹类产卵、索饵、育肥的关键场所。本研究通过对长江口生境修复示范区与邻近对照区鱼类的调查监测,发现鱼类物种数量、个体数量、生物量等均具有明显的增加,而且在修复区出现了较多对照区没有的大个体,说明在长江口开展的基于“种植蘆草+立体芦苇浮床”的生境修复工作对鱼类的栖息地的保护具有明显的积极作用。

3.1 鱼类物种组成差异

本研究在春、夏、秋、冬四季调查中修复区

鱼类的物种数分别为 12 种、19 种、9 种和 7 种,而对照区的物种数分别为 9 种、14 种、5 种和 9 种。春、夏、秋三季在修复区的物种数均多于对照区,笔者推测可能是因为构建生境修复示范区后,蘆草种植区域能够为鱼类提供藏匿和躲避捕食者的场所,立体芦苇浮床能够为一些植物提供附着生长的空间,相较于对照区更能为鱼类提供良好的栖息场所,此外,鱼类也可能会因为立体芦苇浮床投放后产生的阴影、水流等而聚集。有研究表明在实施水域生态修复工程后,修复区内的渔获物种类数、丰度、生物量以及鱼类平均全长、体长、体重均较高于对照区^[15]。崔伟等^[16]对太湖鲤鱼山湾实施修复工程后发现,鱼类群落结构趋近于

稳定,并且整体的渔业资源量呈现出上升趋势,尤其是对水草区域生活具有偏好性的鱼类资源量获得提高。姚东方^[11]在长江口青草沙水库附近水域构建了芦苇生态浮床系统,并发现芦苇生态浮床实验区多样性指数总体高于对照区,物种组成多样性较好。

3.2 鱼类个体数、个体大小和生物量差异

本研究采集鱼类个体数在所有季节均表现为修复区多于对照区。全为民等^[17]通过构建牡蛎礁来恢复大型底栖动物群落,恢复牡蛎礁区域的总个体数和总生物量显著高于未恢复区。杨心愿^[18]在祥云湾海洋牧场开展人工牡蛎礁生态修复措施后,发现礁区内鱼类物种数和单位捕捞努力量均高于对照区,人工牡蛎礁的复杂结构为鱼类提供了避敌和生长的场所,增加了祥云湾海洋牧场的渔业产量。赵峰等^[12]通过在长江口构建人工飘浮湿地,利用人工飘浮湿地的立体结构和芦苇群落为中华绒螯蟹幼蟹提供了隐匿空间和饵料生物,发现其幼蟹在人工飘浮湿地生境中的栖息密度达466.6 ind/m²,达到了诱集中华绒螯蟹幼蟹在此生境进行早期生长发育的目的。本研究鱼类生物量在所有季节均表现出修复区高于对照区,说明修复区相较于对照区具有较好的聚集鱼类效果,推测修复区可能具有较多的浮游动物,可以为鱼类提供充足的饵料生物,鱼类更偏好于选择修复区作为庇护场所。主要原因可能是因为修复区的蘆草和立体芦苇浮床的立体结构为鱼类幼体提供更好的藏身场所来躲避捕食者,并吸引一些饵料生物附着以供幼鱼食用,为鱼类提供良好的生存环境。

鱼类个体数在不同季节变化显著,春季鱼类数量最多、秋季最少,并且春季鱼类个体大小以小于10 cm为主,说明春季作为鱼类幼鱼的高发期,长江口潮滩湿地能够为其提供合适的栖息生境。鱼类体长分布频率大小结果表明,春季修复区采集到的鱼类主要为幼体,小于10 cm的鱼类幼体在修复区(67%)明显高于对照区(44%),而大于10 cm的鱼类频率均低于对照区。相反,在夏季、秋季和冬季则表现出相反的趋势。随着季节变化,温度降低,修复区鱼类幼体数量逐渐减少,

较大个体的鱼类数量增加,修复区和对照区的鱼类幼体数量占鱼类总量的比值降低。鱼类生物量在春季、夏季、秋季、冬季均表现出修复区高于对照区,推测修复区的蘆草和立体芦苇浮床使水体流速降低,有利于浮游生物的聚集,从而为鱼类提供充足的饵料,吸引鱼类在此捕食,起到了诱集鱼类的作用,进一步证实长江口潮滩生境修复能够为鱼类提供良好的育幼与栖息场所。

拉氏狼牙虾虎鱼每年产卵2次,产卵时间分别在2—4月和7月下旬至9月^[19],本研究发现在修复区出现大量拉氏狼牙虾虎鱼幼体,其幼鱼主要出现在11月,幼体平均体长为44 mm;刀鲚幼鱼主要出现在夏季修复区(6—7月),这一时段的刀鲚幼鱼的食物主要包含枝角类、桡足类、端足类等浮游动物^[20]。夏季长江口潮滩湿地中存在大量的桡足类^[21],可以作为其幼鱼的食物。因此,刀鲚在修复区水域出现可能与其摄食行为相关,推测修复区可能会为刀鲚幼鱼提供充足的养料,具体原因有待于进一步挖掘。本研究结果显示长江口潮滩湿地修复区可能是鱼类的育幼场所和饵料场,为鱼类幼体提供良好的育幼生长环境。

3.3 鱼类物种多样性分析

多样性指数作为反映生态系统中物种多样性程度的指标,能够显示出群落结构的基本特征及稳定性,生态系统的稳定性受鱼类物种的多样性直接影响,而鱼类物种多样性受到干扰时,生态系统中的食物链可能会因此弱化或断裂,从而对生态系统的发展产生巨大的影响。近年来由于各种水利工程的增加和过度捕捞,鱼类生境遭受了严重的破坏,长江口鱼类多样性和均匀度均呈显著下降趋势^[22]。潘辉等^[23]在贡湖湾生态修复区对鱼类群落结构进行研究发现生态修复后鱼类生物多样性具有显著提高。王召根等^[24]在镇江长江豚类省级自然保护区水域设置生态浮床和人工鱼巢等修复设施后发现,放置生态浮床区域内浮游动、植物生物多样性和群落结构复杂程度得到明显的提升,说明生态浮岛和人工鱼巢的建设对鱼类均有较好的聚集效果。Fenner^[25]研究表明珊瑚礁生态修复有助于鱼类多样性的恢复。

从本研究调查长江口修复区和对照区多样性指数来看, 春季、夏季、秋季、冬季鱼类总 Margalef 丰富度指数(D)、总 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和总 Simpson 单纯度指数(C)均表现为修复区明显高于对照区, 而总 Pielou 均匀度指数(J')则为修复区稍低于对照区。说明本研究调查期间修复区的多样性指数总体高于对照区, 修复区的鱼类种群状况和物种多样性较为良好, 且群落结构呈现较为稳定的状态, 生境修复具有一定成效, 而鱼类物种个体数在修复区中分布的均匀程度没有对照区的好, 可能是修复区中国花鲈的数量占比较高($39\pm 0.07\%$)造成的。结果显示, “种植蘆草+立体芦苇浮床”修复技术可以增加鱼类生物多样性, 有助于长江口潮滩湿地鱼类多样性的恢复。推测可能是蘆草和立体芦苇浮床为鱼类提供饵料, 诱集鱼类在此生境中生长发育, 并为鱼类提供躲避捕食者的环境, 鱼类选择在修复区的生境中栖息。

对比修复区和对照区的结果来看, 在长江口潮滩湿地开展的基于“种植蘆草+立体芦苇浮床”修复技术对鱼类有较好的增殖机制, 其增殖机制为“种植蘆草+立体芦苇浮床”修复技术可以使浮游动物数量增加, 从而为鱼类提供足够的饵料资源和育幼场所, 同时为鱼类提供隐蔽的庇护环境, 因此, 采用“种植蘆草+立体芦苇浮床”修复技术的修复区可以成为鱼类的良好栖息生境。

参考文献:

- [1] Yang S L. Sedimentation on a growing intertidal island in the Yangtze River mouth[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(3): 401-410.
- [2] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. Science, 2008, 319(5865): 948-952.
- [3] Chen Y, Dong J W, Xiao X M, et al. Land claim and loss of tidal flats in the Yangtze Estuary[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24018.
- [4] Valiela I, Fox S E. Ecology. managing coastal wetlands[J]. Science, 2008, 319(5861): 290-291.
- [5] 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.]
- [6] Zhang H, Zhu G P, Lu J J. Fish species composition and diversity of Yangtze River estuarine wetlands[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(1): 76-81. [张衡, 朱国平, 陆健健. 长江河口湿地鱼类的种类组成及多样性分析[J]. 生物多样性, 2009, 17(1): 76-81.]
- [7] Dong Z R, Sun D Y, Peng J. Theories and practices of river eco-restoration[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 4-9, 28. [董哲仁, 孙东亚, 彭静. 河流生态修复理论技术及其应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 4-9, 28.]
- [8] Sun D Y, Dong Z R, Xu M H, et al. River ecological restoration: Techniques and practices[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(12): 4-7. [孙东亚, 董哲仁, 许明华, 等. 河流生态修复技术和实践[J]. 水利水电技术, 2006, 37(12): 4-7.]
- [9] Wu Z X, Zhang L, Zhang X M, et al. Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6737-6746. [吴忠鑫, 张磊, 张秀梅, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6737-6746.]
- [10] Chen Y H. Ecological restoration of Scirpus mariqueter salt marshes in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020. [陈雅慧. 长江口海三棱蘆草种群的生态修复研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.]
- [11] Yao D F. The effects of the artificial floating bets on the community structure of plankton and fish in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [姚东方. 长江口芦苇生态浮床对浮游生物及鱼类群落结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [12] Zhao F, Huang X F, Song C, et al. Selection and use of artificial floating wetland habitats for larval Chinese mitten crab in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(9): 1003-1009. [赵峰, 黄孝锋, 宋超, 等. 长江口中华绒螯蟹幼蟹对人工漂浮湿地生境的选择利用[J]. 中国水产科学, 2020, 27(9): 1003-1009.]
- [13] Pianka E R. Ecology of the agamid lizard *Amphibolurus isolepis* in western Australia[J]. Copeia, 1971, 1971(3): 527.
- [14] Cheng J S, Yu L F. The change of structure and diversity of demersal fish communities in the Yellow Sea and East China

- Sea in winter[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(1): 29-34. [程济生, 俞连福, 黄、东海冬季底层鱼类群落结构及多样性变化[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 29-34.]
- [15] Che X, Li X F, Chen X L, et al. Effects of ecological restoration on fishery resources in the Baiyangdian Lake, Hebei Province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 259-267. [车轩, 李新丰, 陈晓龙, 等. 白洋淀生态修复工程的渔业资源调控效果[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 259-267.]
- [16] Cui W, Ren L, Xu D P, et al. Effects on fishery resources recovery under hydrophytes restoration in the Lishan Bay, Taihu Lake[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(3): 474-481. [崔伟, 任洸, 徐东坡, 等. 太湖鲤鱼山湾水生植被修复前后鱼类资源恢复效果[J/OL]. 辽宁: 大连海洋大学学报, 2023, 38(3): 474-481.]
- [17] Quan W M, Feng M, Zhou Z X, et al. Ecological assessment of the oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic communities on restored oyster reefs along Jiangsu Province coast, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1709-1718. [全为民, 冯美, 周振兴, 等. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁恢复工程的生态评估[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1709-1718.]
- [18] Yang X Y. The community characteristics and ecological functions of artificial oyster reef at Xiangyun Bay marine ranching[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2019. [杨心愿. 祥云湾海洋牧场人工牡蛎礁群落特征及其生态效应[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2019.]
- [19] Ni Y, Wu H L. Fishes of Jiangsu Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. [倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [20] Liu Y L, Wu Z Q, Hu M L. Advances on tapertail anchovy *Coilia ectenes* in China[J]. Fisheries Science, 2008, 27(4): 205-209. [刘引兰, 吴志强, 胡茂林. 我国刀鲚研究进展[J]. 水产科学, 2008, 27(4): 205-209.]
- [21] Liu Z S. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [22] Yu N J. The structure and structure of fish communities in the coastal waters of Zhoushan Islands inter-annual changes in biodiversity[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021. [于南京. 舟山群岛近岸海域鱼类群落结构及生物多样性的年际变化[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.]
- [23] Pan H, Zheng Z, Liu J, et al. Characteristics of fish community structure in the ecological restoration area of Gonghu Bay[J]. Pollution Control Technology, 2022, 35(3): 14-19. [潘辉, 郑舟, 刘杰, 等. 贡湖湾生态修复区鱼类群落结构特征研究[J]. 污染防治技术, 2022, 35(3): 14-19.]
- [24] Wang Z G, Pan J, Li H L, et al. Monitoring and evaluation of ecological restoration effects of Zhenjiang Yangtze cetacean provincial nature reserve[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(32): 139-147. [王召根, 潘杰, 李化良, 等. 镇江长江豚类省级自然保护区水域生态修复效果的监测与评价[J]. 中国农学通报, 2021, 37(32): 139-147.]
- [25] Fenner D. Challenges for managing fisheries on diverse coral reefs[J]. Diversity, 2012, 4(1): 105-160.

Effects of wetland habitat restoration on fish community structure in the tidal flats of the Yangtze River Estuary

XIE Wen^{1,2}, WANG Sikai^{2,3}, QIN Ze^{1,2}, XIA Ying², YANG Gang^{2,3}, SUN Jinhui¹, ZHAO Feng^{1,2,3}

1. College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;
2. Key Laboratory of East China Sea Fishery Resources Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China

Abstract: Habitat restoration is a critical measure for conserving fishery resources and maintaining sustainable production. The habitat of juvenile fish in the Yangtze River Estuary has been seriously degraded. In this study, we aimed to identify the effects of tidal flat habitat restoration on fish community structure in the Yangtze River Estuary. Fish samples were collected in the spring, autumn, winter, and summer of 2021–2022 in the south branch of the Yangtze River Estuary. The study was conducted using fixed plug nets in the habitat restoration and control areas. The number of fish species, individuals, biomass, and diversity indices were compared between the restoration and control areas. A total of 27 fish species belonging to 21 genera in 8 orders and 9 families were collected during the study period, of which 22 species were collected in the restoration areas and 21 species in the control areas. The results showed that the total Margalef richness index (D) was 6.8, the total Shannon-Wiener diversity index (H') was 4.92, the total Simpson simplicity index (C) was 2.47, and the total Pielou evenness index (J') was 2.99. The overall biodiversity index was significantly higher in the restoration areas (17.18) than in the control areas (15.82). The frequency of fish larvae collected in the restoration areas (67%) was significantly higher than that in the control areas (44%) in the spring, indicating a preference for habitat restoration areas by juvenile fish in the restoration areas. These findings demonstrate that habitat restoration in the tidal flats could alleviate the ecological crisis of fish biodiversity in the Yangtze River Estuary and those restoration areas can provide nursery sites for juvenile fish. This study provides a reference for elucidating habitat restoration in fish nurseries in the tidal flats of the Yangtze River Estuary. In conclusion, enhancing the protection of fish habitats and restoring damaged wetlands is a crucial measure to protect fish resources in the Yangtze River Estuary.

Key words: the Yangtze River Estuary; habitat restoration; dominant species; fish diversity

Corresponding author: ZHAO Feng, E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; SUN Jinhui, E-mail: jhsun1008@163.com