

邹建宇, 刘淑德, 张崇良, 等. 长山列岛邻近海域鱼类群落功能多样性的季节和空间变化[J]. 海洋学报, 2023, 45(1): 13–24, doi:10.12284/hyxb2023008

Zou Jianyu, Liu Shude, Zhang Chongliang, et al. Seasonal and spatial changes in functional diversity of fish communities in the adjacent waters of the Changshan Islands[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(1): 13–24, doi:10.12284/hyxb2023008

长山列岛邻近海域鱼类群落功能多样性的 季节和空间变化

邹建宇¹, 刘淑德⁴, 张崇良^{1,2,3}, 薛莹^{1,2,3}, 纪毓鹏^{1,3}, 徐宾铎^{1,2,3*}

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003; 4. 山东省渔业发展和资源养护总站, 山东 烟台 264003)

摘要: 为查明黄、渤海生态交错带长山列岛邻近海域鱼类功能多样性的时空变化, 根据 2016–2017 年在长山列岛邻近海域开展的鱼类生物资源和环境因子的调查数据, 结合食性、营养级、洄游类型、适温性、恢复力和鱼卵类型等 13 种功能性状, 应用群落特征加权平均数指数、功能多样性指数和 Spearman 秩相关分析等方法, 研究了该海域鱼类功能多样性的季节变化、空间格局及其与环境因子的关系。结果表明, 春、冬季的优势类群为端位或上位口、生长系数较低、脆弱性较高、恢复力较低、定居或短距离洄游的平扁形、暖温性底层鱼类, 夏、秋季表现出更多的功能性状, 例如长距离洄游、栖息位置处于中上层、体型为侧扁形和纺锤形等; 夏、秋季的功能丰富度指数显著高于春、冬季, 功能均匀度指数在春季最高, 功能离散度指数在秋季最低且显著低于其他季节; 春季功能均匀度指数和春、秋季功能离散度指数均表现出西高东低的分布趋势, 夏、冬季的功能丰富度指数和秋季的功能均匀度指数均表现出东高西低的分布趋势; 功能多样性指数与环境因子具有一定的相关性。长山列岛邻近海域作为黄、渤海生态交错带, 鱼类洄游引起优势功能性状和功能多样性呈现出一定的季节变化, 环境因子的变化使得功能多样性的空间格局表现出复杂性、异质性的特点。

关键词: 鱼类群落; 功能多样性; 时空格局; 长山列岛邻近海域

中图分类号: S932.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)01-0013-12

1 引言

功能性状指生物体在长期的环境胁迫、历史进化和自然选择的过程中形成的定量或定性的显著本质特征^[1], 包括生态学性状和生物学性状。生态学性状主要与栖息地、迁移等相关^[2], 生物学性状主要与生理行为、生活史周期等相关^[3]。功能多样性即功能性状多样性^[4], 指影响生态系统功能的物种性状的数

值、范围和分布^[5]。

近些年来, α 多样性^[6-8]、 β 多样性^[9-10] 和分类学多样性^[11-13] 在鱼类群落多样性研究中得到了广泛应用, 但传统的多样性分析仅考虑了物种相对生物量信息, 将拥有不同形态特征和生活习性的物种看作等价的, 未能很好地反映生物对环境的响应^[14], 功能多样性以长期自然选择的性状为基础, 能更好地理解生物与环境之间的关系。鱼类的功能性状主要指其在生理行

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-07-01。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901205)。

作者简介: 邹建宇(1998—), 男, 山东省聊城市人, 主要从事渔业资源生态学研究。E-mail: 88015321@qq.com

* 通信作者: 徐宾铎, 副教授, 主要从事渔业资源、渔业生物多样性和海洋生态学的研究。E-mail: bdxu@ouc.edu.cn

为、生态适应、种群动态等方面的特征,如适温性、食性、洄游类型、繁殖行为、口的位置、眼间距、鳍的形状、体型等^[15]。目前国内外鱼类群落功能多样性的研究主要涉及功能性状的选择^[16-17]、功能多样性的时空变化^[18]和功能多样性与环境因子的相互作用^[19],其研究区域涵盖河流^[20-21]、湖泊^[22]、海洋^[23-25]等。

长山列岛邻近海域地处黄海、渤海生态交错带,位于莱州湾渔场和烟威渔场交界处,地理位置独特,水文条件复杂,捕捞压力较大。由于独特的地理位置,黄海水和渤海南部沿岸水在此处交汇^[26],在不同季节受到季风的影响,两大水团和海洋环流发生剧烈变化^[27],因此该海域环境因子季节变化显著。夏季黄海冷水团^[28]分布范围可达该海域东北部,造成该海域夏季环境因子的空间差异较大;冬季黄海暖流^[29]入侵该海域东部,使得该海域冬季环境因子的空间差异较大。此外,海岛与海水的镶嵌式格局^[30]影响着海流流向,使得该海域展现出了独特的水文特点。在复杂环境因子的作用下,该海域鱼类群落功能性状及功能多样性是否具有显著的时空差异值得研究,该研究对深入理解长山列岛邻近海域群落结构和功能具有重要意义。

本文根据 2016-2017 年在长山列岛邻近海域进行的鱼类资源季度调查数据,应用群落特征加权平均数指数、功能多样性指数和 Spearman 秩相关分析等方法,研究该海域鱼类群落功能多样性的时空格局及其与环境因子的关系,以期为该海域鱼类资源的管理、开发和保护提供参考,同时为未来该海域鱼类群落功能多样性不同年间比较或长期变化研究提供参考。

2 研究区域与研究方法

2.1 调查海区与数据来源

调查海区为长山列岛邻近海域(37°30'~38°30'N, 119°50'~121°50'E),共设置 42 个采样站位(图 1)。由于海况条件等限制性因素,春、夏、秋、冬季实际拖

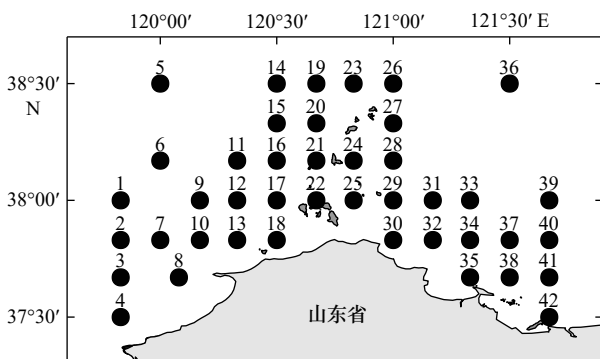


图 1 长山列岛邻近海域渔业资源底拖网调查站位

Fig. 1 Bottom trawl survey stations for fishery resources in the adjacent waters of the Changshan Islands

网站数分别为 36 个、39 个、40 个、38 个^[31]。调查船只为功率 220 kW 的底拖网船,网具网口高度约 7.53 m,宽度约 15 m,囊网网目大小为 17 mm。拖网均在白天进行,预设每站拖网时间 1 h,拖速 3 kn。水温、水深、盐度等环境因子使用 CTD(型号为 CTD75M/1167)调查获得。参考《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)^[32]对渔获物取样并带回实验室进行分析处理,并将原始调查数据进行标准化处理为拖网 1 h、拖速 3 kn 时的单位网次渔获重量(单位:kg/h)。

2.2 功能性状选择

根据以往对鱼类群落功能多样性的研究^[18, 25],本研究选取反映鱼类摄食、游泳、生态适应、群落动态和繁殖 5 种功能类型的性状,其中包括食性、口的大小、口的位置、营养级、体型、洄游类型、最大体长、适温性、栖息位置、生长系数、恢复力、脆弱性和鱼卵类型。各性状指标在分析中所占权重相等,营养级、最大体长、生长系数和脆弱性为连续变量,其余变量为分类变量(表 1)。通过查阅世界鱼类数据库(Fish-Base)^[33]和相关文献^[34-35, 18, 25]等获得各指标的取值或类型,功能性状取值或类型的确定遵循邻近优先原则,即长山列岛邻近海域相关资料缺失时以黄、渤海等相邻海域替代。各鱼种具体功能性状详见附表 A1。

表 1 功能性状分类标准及其所含类型

Table 1 Classification criteria and types of functional traits

功能类型	功能性状	功能性状所含类型
摄食	食性	浮游生物食性、植食性、底栖生物食性、游泳动物食性
	口的大小	小、较小、中等、较大、大
	口的位置	腹面、下位、端位、上位
	营养级	连续变量,范围:2.9~5.0
游泳	体型	纺锤形、侧扁形、平扁形、鳃形、不对称形、亚圆柱形、细长形、带形、前部宽扁形、后部侧扁形
	洄游类型	定居型、近海洄游型、远海洄游型
	最大体长	连续变量,范围:9~250 cm
生态适应性	适温性	冷温性、暖温性、暖水性
	栖息位置	底层、中上层
种群动态	生长系数	连续变量,范围:0.1~0.8
	脆弱性	连续变量,范围:10~78
	恢复力	低、中等、高
繁殖	鱼卵类型	浮性、沉性、附着性、黏着浮性、黏着沉性、卵胎生

2.3 分析方法

应用群落特征加权平均数指数(Community Wei-

ghted Mean, CWM)分析鱼类群落优势功能性状的季节变化,群落特征加权平均数指数为群落内物种功能性状的加权平均值^[36],公式为

$$CWM = \sum_{i=1}^S p_i \times trait_i, \quad (1)$$

式中, S 为物种数; p_i 为物种 i 的相对渔获重量; $trait_i$ 为物种 i 的性状值。

功能丰富度指数(Functional Richness Index, FRic)用功能体积指数表示,由功能性状空间内形成的最小凸多边形体积来计算^[16]。

功能均匀度指数(Functional Evenness Index, FEve)用多维功能均匀度指数表示,推导公式^[16]为

$$dist(i, j) = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2 + \dots + (m_i - m_j)^2}, \quad (2)$$

$$EW_l = dist(i, j) / (w_i + w_j), \quad (3)$$

$$PEW_l = EW_l / \sum_{l=1}^{S-1} EW_l, \quad (4)$$

$$FEve = \frac{\sum_{l=1}^{S-1} \min\left(PEW_l - \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}}, \quad (5)$$

式中, S 为物种数; $a-m$ 表示多维性状空间中物种 i 和 j 的13个功能性状; $dist(i, j)$ 表示物种 i 和 j 之间的欧氏距离; EW_l 为第 l 分支长,即物种 i 与物种 j 构成的分支长; w_i 和 w_j 分别为物种 i 和物种 j 的相对渔获重量; PEW_l 为第 l 分支长权重。

功能离散度指数(Functional Divergence Index, FDiv)用多维功能离散度指数表示,推导公式为^[16]

$$g_i = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^T x_{ik}, \quad (6)$$

$$dG_i = \sqrt{\sum_{k=1}^T (x_{ik} - g_k)^2}, \quad (7)$$

$$\bar{dG} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S dG_i, \quad (8)$$

$$\Delta d = \sum_{i=1}^S w_i \times (dG_i - \bar{dG}), \quad (9)$$

$$\Delta|d| = \sum_{i=1}^S w_i \times |dG_i - \bar{dG}|, \quad (10)$$

$$FDiv = \frac{\Delta d + \bar{dG}}{\Delta|d| + \bar{dG}}, \quad (11)$$

式中, S 为物种数; x_{ik} 为物种 i 性状 k 的值; g_k 为性状 k 的重心; T 为性状数; dG_i 为物种 i 与重心的距离; \bar{dG} 为 dG_i 的平均值; Δd 为以丰度为权重的离散度;

$\Delta|d|$ 为 Δd 的绝对值; w_i 为物种 i 的相对渔获重量。

由于环境变量与功能多样性指数变化复杂,本研究采用Spearman秩相关系数进行相关性分析^[37]。

2.4 数据处理

为减小调查采样对功能多样性指数计算的影响,在调查站位数不变的情况下,对原始调查数据进行有放回的随机再抽样99次,获得各调查航次鱼类相对资源量的99组模拟数据,计算得到各功能多样性指数的99个模拟值。应用R语言的FD程序包计算功能多样性指数,应用单因素方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)进行季节间的差异显著性检验,采用R语言的psych程序包计算功能多样性指数与各环境因子的Spearman相关系数并进行显著性检验。采用R语言的ggplot2程序包和surfer13.0软件进行作图。

3 结果

3.1 优势性状的季节变化

采用群落特征加权平均数指数分析长山列岛邻近海域鱼类群落优势性状的季节变化趋势(图2)。从营养级来看,春、冬季鱼类群落的营养级明显高于夏、秋季。在鱼类的摄食方面,春、夏季优势性状以游泳动物食性为主,冬季以游泳动物食性和底栖生物食性为主,秋季出现了3种食性类型。从口的位置来看,春、冬季优势性状以端位口和上位口为主,夏、秋季以端位口为主。口的大小方面,春季优势性状仅表现为口裂大,夏、秋、冬季均表现为3种口裂大小。从最大体长看,春、冬季优势性状最大体长较大,夏、秋季优势性状最大体长较小。体型方面,春、冬季优势性状表现为平扁形,夏季优势性状表现为侧扁形和纺锤形,秋季优势性状表现为侧扁形、鳗形和平扁形。洄游类型方面,春季优势性状以定居型和近海洄游型两种,夏季优势性状出现外海洄游型,秋季优势性状涵盖了3种洄游类型,冬季优势性状均为近海洄游型。适温性方面,春、冬季优势性状均为暖温性,夏、秋季优势性状为暖温性和暖水性。生长系数方面,夏季生长系数最高,其次为秋季,春、冬季生长系数显著低于夏、秋季。从栖息位置来看,春、秋、冬季优势性状均为底层栖息,夏季优势性状为底层和中上层栖息。恢复力方面,春季优势性状表现出较低的恢复力,夏季表现为中等恢复力,秋季较低、中等、较高均有,冬季表现为较低和中等恢复力。从鱼卵类型来看,春季为黏着浮性卵,夏、秋季均为浮性卵。脆弱性方面,春、冬季明显高于夏、秋季,夏季脆弱性最低。

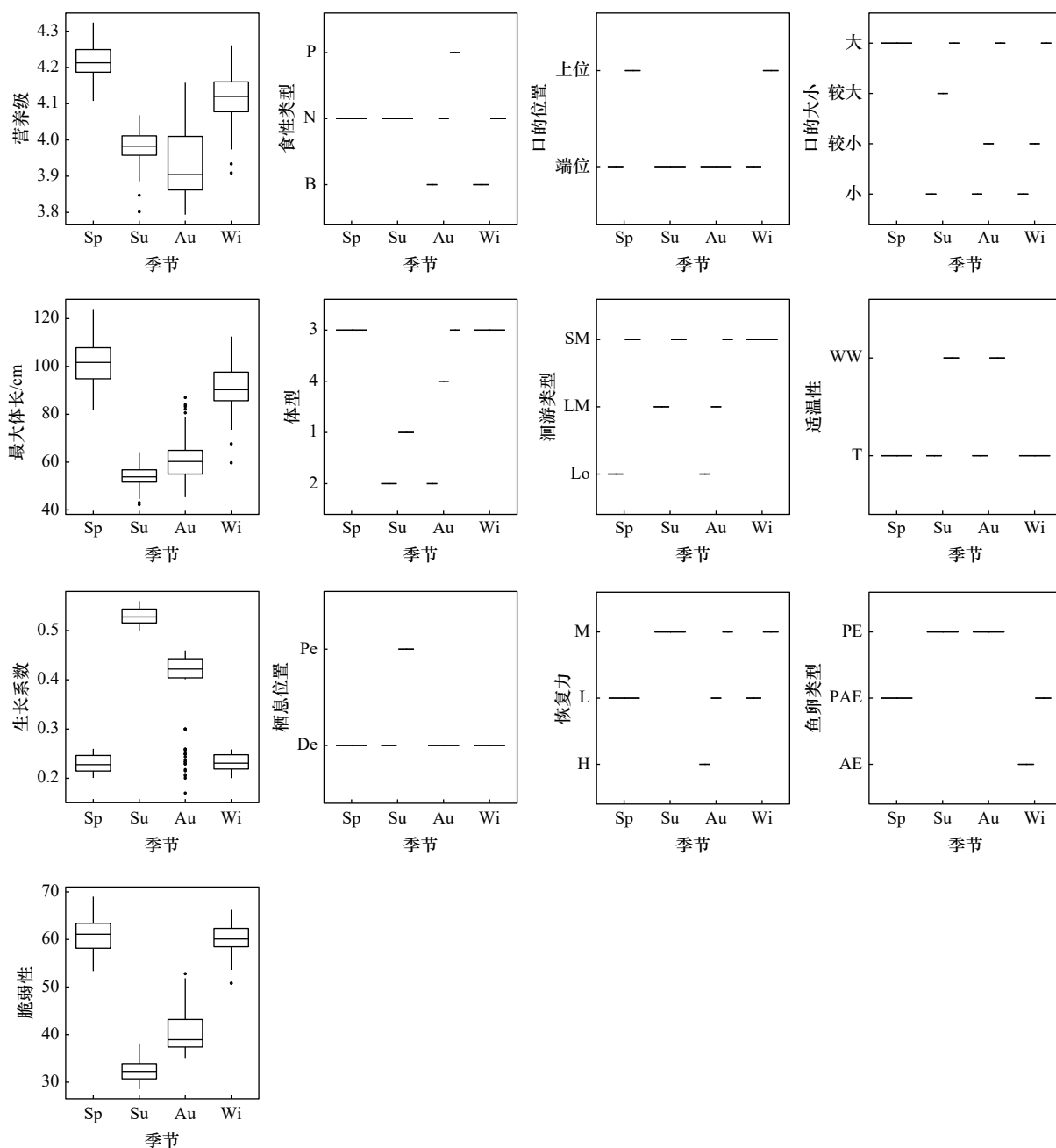


图2 长山列岛邻近海域鱼类群落特征加权平均数指数(CWM)的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of community weighted mean index (CWM) of fish community in the adjacent waters of the Changshan Islands

P. 浮游生物食性; B. 底栖生物食性; N. 游泳动物食性; 1. 纺锤形; 2. 侧扁形; 3. 平扁形; 4. 鳗形; SM. 近海洄游型; LM. 外海洄游型; Lo. 定居型; T. 暖温性; WW. 暖水性; De. 底层; Pe. 中上层; M. 中等恢复力; H. 高恢复力; L. 低恢复力; PE. 浮性卵; AE. 附着性卵; PAE. 黏着浮性卵; Sp. 春季; Su. 夏季; Au. 秋季; Wi. 冬季

P. Planktivorous; B. benthivorous; N. nektonivorous; 1. fusiform; 2. compressiform; 3. depressiform; 4. anguilliform; SM. offshore migration; LM. far-sea migration; Lo. local species; T. warm temperate; WW. warm water; De. demersal; Pe. pelagic; M. medium resilience; H. high resilience; L. low resilience; PE. pelagic eggs; AE. adhesive eggs; PAE. pelagic adhesive eggs; Sp. spring; Su. summer; Au. autumn; Wi. winter

3.2 功能多样性的季节变化

长山列岛邻近海域鱼类群落各功能多样性指数呈现一定季节变化(图3)。单因素方差分析和多重比较表明,功能丰富度指数在两两季节间存在显著差异($p < 0.05$)。秋季最高,为0.76,模拟值的变化范围

为0.69~0.87;其次为夏季,功能丰富度指数为0.62,模拟值的变化范围为0.59~0.73;再次为春季;冬季最低。功能均匀度指数在夏季和冬季间无显著性差异,其余两两季节间差异性显著($p < 0.05$)。功能均匀度指数春季最高,为0.51,模拟值的变化范围为0.29~

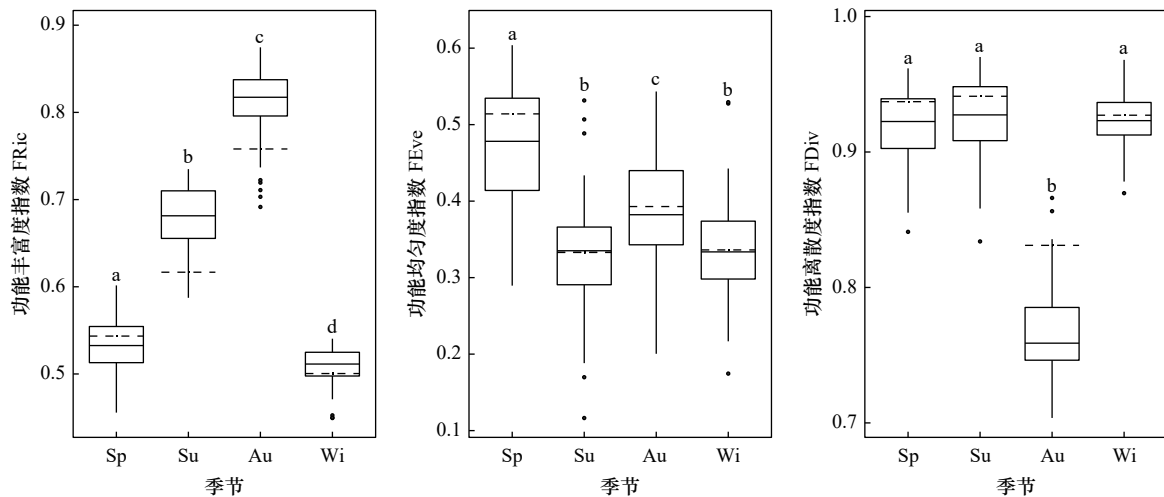


图3 长山列岛邻近海域鱼类群落功能多样性指数的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of functional diversity indices of fish community in the adjacent waters of the Changshan Islands

Sp. 春季; Su. 夏季; Au. 秋季; Wi. 冬季; 不同字母表示差异显著($p < 0.05$); 虚线代表真实值

Sp. Spring; Su. summer; Au. autumn; Wi. winter; different letters mean significant difference at $p < 0.05$ level; dashed lines represent the true values

0.60; 其次为秋季, 为 0.39, 模拟值的变化范围为 0.20~0.54; 夏季与冬季均表现出较低的功能均匀度指数。功能离散度指数在春季、夏季和冬季两两季节间均无显著性差异, 而秋季与春、夏、冬季间存在显著性差异($p < 0.05$)。秋季功能离散度指数最低, 且显著低于其他季节, 为 0.83, 模拟值的变化范围为 0.7~0.87。

3.3 功能多样性的空间变化

长山列岛邻近水域鱼类群落各功能多样性指数存在一定空间差异(图4)。春季各站位功能丰富度指数的变化范围为 0.07~0.89, 长山列岛中部海域及东南部明显高于其他海域, 最低值出现在长山列岛东北部; 功能均匀度指数的变化范围为 0.09~0.80, 总体表现西高东低, 最高值出现在西南部海域; 功能离散度指数的变化范围为 0.59~0.99, 最高值出现在西北部海域。夏季各站位功能丰富度指数的变化范围为 0.08~0.83, 总体表现东高西低; 功能均匀度指数的变化范围为 0.14~0.90, 分布并无显著规律, 最低值出现在中部偏东海域; 功能离散度指数的变化范围为 0.59~0.98, 总体表现东高西低。秋季各站位功能丰富度指数的变化范围为 0.16~0.88, 大部分海域指数较低, 仅在中部偏北海域较高; 功能均匀度指数的变化范围为 0.07~0.88, 大部分海域指数较高, 最低值出现在西南角海域; 功能离散度指数的变化范围为 0.31~0.96, 总体表现西高东低。冬季各站位功能丰富度指数的变化范围为 0.11~0.81, 总体表现东高西低; 功能均匀度指数的变化范围为 0.10~0.78, 总体表现西高东低; 功能离散度指数的变化范围为 0.59~0.99, 大部分海域指数处于较高水平, 仅在中部

偏南海域较低。

3.4 功能多样性与环境因子的相关性

Spearman 秩相关分析表明, 长山列岛邻近海域鱼类群落各功能多样性与水深、温度和盐度之间存在一定的相关性(表2)。春季功能均匀度指数与底层水温存在显著的正相关关系($p < 0.05$)。夏季功能丰富度指数与底层水温存在极显著的负相关关系($p < 0.01$)。秋季各功能多样性指数与环境因子之间无显著相关性。冬季功能丰富度指数与水深、底层水温、表层水温、底层盐度和表层盐度均存在极显著的正相关关系($p < 0.01$); 功能均匀度指数与底层水温存在极显著的负相关关系($p < 0.01$), 与表层水温均存在显著的负相关关系($p < 0.05$)。

4 讨论

群落特征加权平均数指数反映了鱼类对于环境因子的响应和适应机制^[38]。由于环境因子的选择作用, 不同季节的优势性状具有显著差异, 表明不同季节间鱼类生态位分化明显^[39]。从摄食来看, 春、冬季的优势性状表现为口裂较大, 上位口和端位口并存, 游泳动物食性, 这类优势性状的代表物种为黄鲛鳕(*Lophius litulon*)。黄鲛鳕主要摄食小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)等游泳生物, 是凶猛肉食性鱼类^[40], 黄鲛鳕“最大体长”的功能性状值高, 因此春季、冬季在营养级和最大体长方面的优势性状明显高于夏、秋季, 且在体型上优势性状表现为平扁形, 在栖息类型上表现为底栖。春、夏季是鱼类重要的

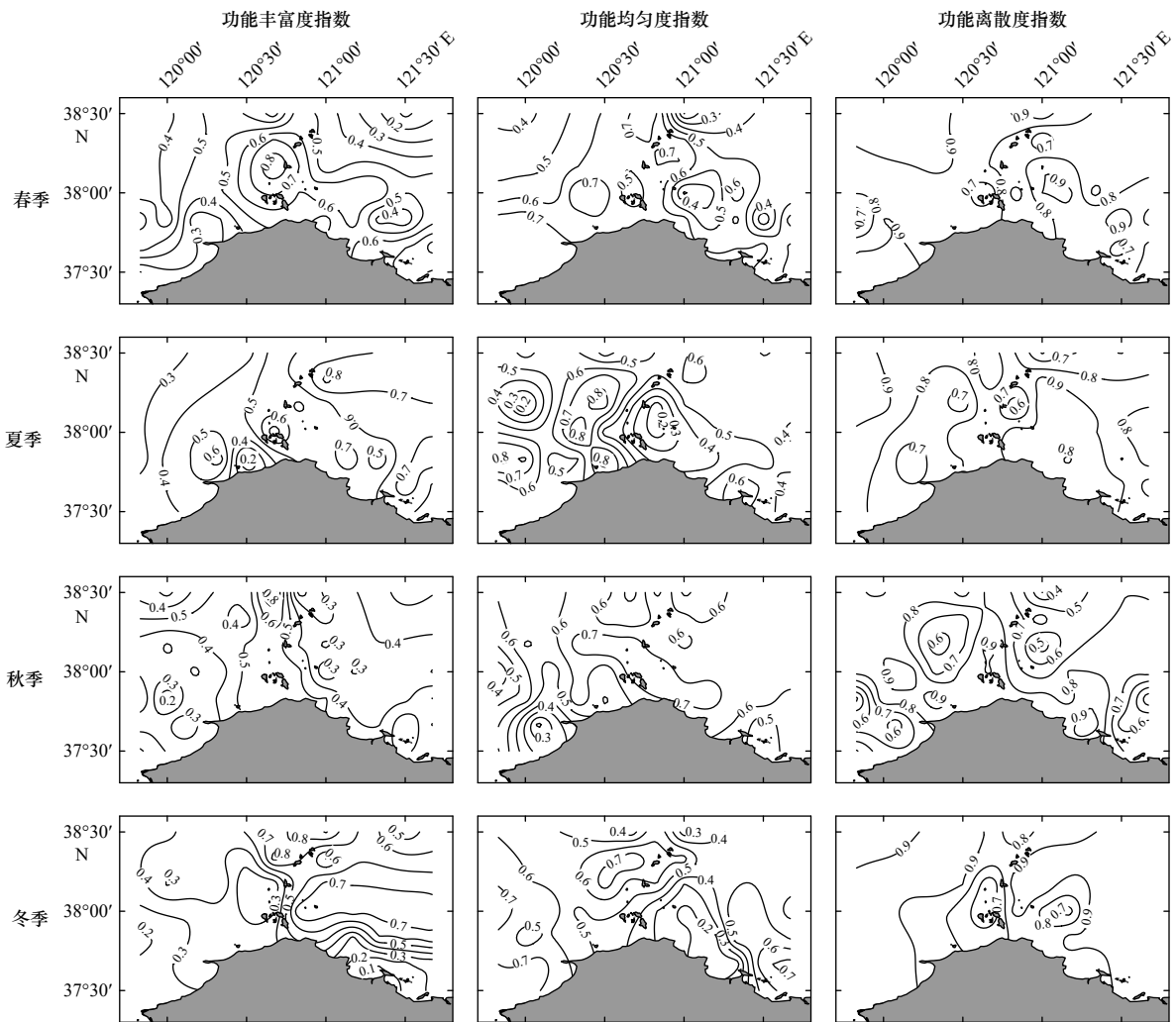


图 4 长山列岛邻近海域鱼类群落功能多样性指数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of functional diversity indices of fish community in the adjacent waters of the Changshan Islands

产卵洄游时期, 黄鲫 (*Setipinna tenuifilis*)、赤鼻棱鲷 (*Thryssa kammalensis*) 等鱼类到长山列岛邻近海域浅水区产卵^[34], 因此优势性状表现为近海洄游型。夏、秋季是鱼类索饵洄游和越冬洄游的重要时期, 夏、秋季的渔获重量占比最高的物种为鲈 (*Scomber japonicus*) 和小眼绿鳍鱼 (*Chelidonichthys spinosus*), 鲈是纺锤形、远海洄游的中上层暖温性鱼类^[41], 因此在夏、秋季出现了远海洄游型、纺锤形体型和中上层栖息的优势性状。长山列岛邻近海域海水温度的季节性变化较大, 优势种从黄鲛鲷、矛尾虾虎鱼、赤鼻棱鲷、鲷 (*Engraulis japonicus*) 等暖温种到鲈、小眼绿鳍鱼等暖水种更迭, 因此在夏、秋季适温性方面优势性状表现为暖水性。夏、秋季种类的生长系数、恢复力均明显高于春、冬季, 而脆弱性明显低于春、冬季, 这表明夏、秋季鱼类群落受到干扰后更容易恢复, 优势鱼类往往是生活史周期较短、小型成体、快速发育的低龄繁殖鱼类^[42], 例如方氏云鲷 (*Enedrias fangi*)、黄

鲫、赤鼻棱鲷、鲷、鲈、矛尾虾虎鱼、小眼绿鳍鱼、斑鰈 (*Konosirus punctatus*) 等, 而春、冬季鱼类群落则受到干扰后的恢复力较差^[42]。因此, 该海域秋季鱼类群落可以承受较高的捕捞压力^[43]; 而在冬季进行捕捞作业时, 应更加注重鱼类群落的保护与恢复, 减少捕捞强度, 保护较大个体亲本, 以维持各鱼种的补充数量处于较高水平^[43]。

鱼类洄游特征是造成长山列岛邻近海域鱼类功能多样性指数季节变化的重要原因。夏、秋季节, 鲈、蓝点马鲛 (*Scomberomorus niphonius*)、黄尾鲷 (*Seriola lalandi*)、细条天竺鲷 (*Jaydia lineata*)、长蛇鲻 (*Saurida elongata*)、黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*)、蓝圆鲷 (*Decapterus maruadsi*) 和油鲟 (*Sphyrna pinguis*) 等多种洄游性鱼类来该海域生殖和索饵, 增加了洄游类型、体型、最大体长、适温性、栖息位置、鱼卵类型等功能性状的范围和取值, 使鱼类占据的生态位空间得以增加。因此, 夏、秋季功能丰富度指数显著高于

表2 长山列岛邻近海域鱼类群落功能多样性指数与环境因子的 Spearman 秩相关系数

Table 2 Spearman rank correlation coefficients between functional diversity indices and environmental factors in the adjacent waters of the Changshan Islands

季节	指数	水深	底层水温	表层水温	底层盐度	表层盐度
春季	FRic	-0.300	0.104	-0.117	-0.232	-0.193
	FEve	-0.276	0.367*	0.212	-0.176	-0.129
	FDiv	-0.013	0.023	0.003	-0.080	-0.088
夏季	FRic	0.250	-0.491**	-0.280	0.342	-0.212
	FEve	0.224	-0.052	0.310	0.113	-0.172
	FDiv	0.220	-0.328	-0.380*	0.010	0.154
秋季	FRic	0.166	-0.269	-0.197	0.060	0.071
	FEve	0.033	0.033	-0.054	0.081	0.076
	FDiv	0.092	-0.041	-0.121	0.156	0.141
冬季	FRic	0.568**	0.617**	0.639**	0.491**	0.487**
	FEve	-0.131	-0.456**	-0.440*	-0.291	-0.288
	FDiv	0.090	-0.040	-0.073	0.068	0.068

注: *代表 $p < 0.05$; **代表 $p < 0.01$ 。

春、冬季,表明夏、秋季鱼类群落对环境的适应能力和对生态入侵的承受能力更强^[44],这也在脆弱性和恢复力指标中得以体现。功能均匀度指数在春季最高,原因是春季黄鲫、赤鼻棱鯧、方氏云鲷等低营养级的浮游生物食性鱼类相对生物量增加,增加了营养级、口的大小等摄食性状的广度。因此,春季鱼类群落生态位更加分化,对于资源的利用更加充分^[44]。功能离散度指数在秋季最低,原因是秋季种类数和相对生物量虽然最高,但是例如黄鲛鲷、长蛇鲻、油鲚、星康吉鳗(*Conger myriaster*)、小带鱼(*Eupleurogrammus muticus*)等较高营养级鱼类等竞争激烈,生态位重叠严重,鱼类群落表现为竞争排斥状态^[45]。

环境因子的差异引起了长山列岛邻近海域功能多样性的空间差异。春季随着水深变浅,底层水温逐

渐增高,赤鼻棱鯧、黄鲫等暖温种逐渐向温度较高的西部海域迁移,增加了西部海域摄食性状的广度。因此,春季功能均匀度指数表现出西高东低的分布趋势,与底层水温显著正相关。夏季功能丰富度指数与底层水温显著负相关,原因可能是夏季表层水温的变化范围(24.85~27.91℃)超过了绝大多数鱼类的最适水温,较低温区域的鱼类种类数和相对生物量均高于高温区域。黄海影响到长山列岛东北部海域的冷水团,主要为低温高盐水^[28],长山列岛东部海域表现出低温高盐的性质,因此夏季功能丰富度指数表现出东高西低的分布趋势。冬季功能丰富度指数与底层水温、表层水温、底层盐度和表层盐度均显著正相关,长山列岛东部海域受到黄海暖流高温高盐水的影 响^[29],水文条件表现出高温高盐的趋势,因此冬季功能丰富度指数呈现出东高西低的分布趋势。冬季功能均匀度指数与底层水温和表层水温显著负相关,同时呈现出西高东低的分布趋势,这可能是在水温的驱动下,多数暖温种在长山列岛东部海域聚集,但鱼类资源利用方式相同,鱼类群落表现为竞争排斥,而西部海域鱼类群落表现为环境过滤作用^[46]。

由于物种本质特征极大地影响了物种在生态系统的功能^[47],基于功能性状的多样性研究有助于深入理解物种与生态系统功能之间的联系以及环境因素和干扰对群落结构的影响。除本研究的13种功能性状外,鳍的形状、位置、眼的位置等重要功能性状,在数据充足的情况下,可根据需要适当选择,从而更全面准确地理解鱼类功能多样性的变化。

5 结论

鱼类作为海洋生态系统的重要次级消费者,研究鱼类群落功能多样性具有重要意义。在环境因子的影响下,长山列岛邻近海域鱼类群落优势功能性状的季节变化明显,功能多样性具有一定的季节变化,其空间格局也展现出复杂性、异质性的特点。

参考文献:

- [1] 程馨雨,陶捐,武瑞东,等.淡水鱼类功能生态学研究进展[J].生态学报,2019,39(3):810-822.
Cheng Xinyu, Tao Juan, Wu Ruidong, et al. Functional ecology of freshwater fish: research progress and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 810-822.
- [2] 江小雷,张卫国.功能多样性及其研究方法[J].生态学报,2010,30(10):2766-2773.
Jiang Xiaolei, Zhang Weiguo. Functional diversity and its research method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2766-2773.
- [3] 陈又清.功能多样性——生物多样性与生态系统功能关系研究的新视角[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(6):1082-1088.
Chen Youqing. Functional diversity—a new view point in the relationship between biodiversity and ecosystem functioning research[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2017, 39(6): 1082-1088.

- [4] Díaz S, Cabido M. Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(11): 646–655.
- [5] Tilman D, Knops J, Wedin D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. *Science*, 1997, 277(5330): 1300–1302.
- [6] 李晓玲, 刘洋, 王丛丛, 等. 基于环境DNA技术的夏季东海鱼类物种多样性研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(4): 74–84.
Li Xiaoling, Liu Yang, Wang Congcong, et al. Study on fish species diversity in the East China Sea in summer based on environmental DNA technology[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(4): 74–84.
- [7] 陈爽, 陈新军. 东北大西洋北海渔场鱼类群落结构年际变化研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(6): 64–75.
Chen Shuang, Chen Xinjun. Study on the interannual variations in community structure in the North Sea of Northeast Atlantic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(6): 64–75.
- [8] Troast B, Paperno R, Cook G S, et al. Multidecadal shifts in fish community diversity across a dynamic biogeographic transition zone[J]. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(1): 93–107.
- [9] 李雪童, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾秋季鱼类 β 多样性组分分析及其与环境因子的关系[J]. *海洋学报*, 2022, 44(2): 46–56.
Li Xuetong, Xu Binduo, Xue Ying, et al. β diversity and its components of the fish community in the Haizhou Bay during autumn and the relationships with environmental factors[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(2): 46–56.
- [10] Ferrier S, Manion G, Elith J, et al. Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment[J]. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(3): 252–264.
- [11] 王娇, 张崇良, 薛莹, 等. 黄河口鱼类群落分类学多样性的研究[J]. *海洋学报*, 2018, 40(4): 86–95.
Wang Jiao, Zhang Chongliang, Xue Ying, et al. Taxonomic diversity of fish community in the Yellow River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 86–95.
- [12] 戴小杰, 杨志金, 田思泉, 等. 浙江南部近海鱼类分类多样性研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(8): 43–51.
Dai Xiaojie, Yang Zhijin, Tian Siqun, et al. Taxonomic diversity of fish species in the off southern Zhejiang, East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(8): 43–51.
- [13] Rogers S I, Clarke K R, Reynolds C. The taxonomic distinctness of coastal bottom-dwelling fish communities of the North-east Atlantic[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1999, 68(4): 769–782.
- [14] Clarke K R, Warwick R M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*[M]. 2nd ed. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 2001.
- [15] Villéger S, Brosse S, Mouchet M, et al. Functional ecology of fish: current approaches and future challenges[J]. *Aquatic Sciences*, 2017, 79(4): 783–801.
- [16] Villéger S, Mason N W H, Mouillot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology[J]. *Ecology*, 2008, 89(8): 2290–2301.
- [17] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward[J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(6): 741–758.
- [18] 张晓妆, 王晶, 徐宾铎, 等. 海州湾鱼类群落功能多样性的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3233–3244.
Zhang Xiaozhuang, Wang Jing, Xu Binduo, et al. Spatio-temporal variations of functional diversity of fish communities in Haizhou Bay[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3233–3244.
- [19] 贺佳云, 张东, 储玲, 等. 人为干扰对溪流鱼类功能多样性及其纵向梯度格局的影响[J]. *生物多样性*, 2021, 29(7): 927–937.
He Jiayun, Zhang Dong, Chu Ling, et al. Anthropogenic disturbances affect the functional diversity of stream fishes and its longitudinal patterns in China[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(7): 927–937.
- [20] 帅方敏, 李新辉, 陈方灿, 等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5228–5237.
Shuai Fangmin, Li Xinhui, Chen Fangcan, et al. Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5228–5237.
- [21] Arantes C C, Winemiller K O, Asher A, et al. Floodplain land cover affects biomass distribution of fish functional diversity in the Amazon River[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16684.
- [22] 郑鹏, 蒋小明, 曹亮, 等. 江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼类功能特征及多样性变化[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 151–161.
Zheng Peng, Jiang Xiaoming, Cao Liang, et al. Long-term changes in the functional trait composition and diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 151–161.
- [23] Fontrodona-Eslava A, Deacon A E, Ramnarine I W, et al. Numerical abundance and biomass reveal different temporal trends of functional diversity change in tropical fish assemblages[J]. *Journal of Fish Biology*, 2021, 99(3): 1079–1086.
- [24] Zhang Xiaozhuang, Xue Ying, Zhang Chongliang, et al. Sampling intensity influences the estimation of functional diversity indices of fish communities[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107169.
- [25] 冯晨, 何雄波, 招春旭, 等. 闽江口鱼类功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3589–3595.
Feng Chen, He Xiongbo, Zhao Chunxu, et al. Functional diversity of fishes in the Minjiang Estuary, Southeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3589–3595.
- [26] 郑东, 张瑞安. 烟威及石岛近海春季水团分析[J]. *海洋通报*, 1983, 2(1): 61–68.
Zheng Dong, Zhang Ruian. Analysis of spring water masses in the sea area off Yantai, Weihai and Shidao[J]. *Marine Science Bulletin*,

- 1983, 2(1): 61–68.
- [27] 石强, 渤、黄海风生流场季节循环时空模态与变异[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 480–495.
Shi Qiang. Spatio-temporal modes and variation on the seasonal cycle of wind-driven current field in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(4): 480–495.
- [28] 李昂, 于非, 刁新源, 等. 北黄海冷水团温度年际变化研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 30–42.
Li Ang, Yu Fei, Diao Xinyuan, et al. Interannual variability of temperature of the northern Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 30–42.
- [29] 曹友华, 朱乾坤. 基于Aqua/MODIS数据研究黄海暖流的强度及其时空变化[J]. *海洋预报*, 2021, 38(6): 93–102.
Cao Youhua, Zhu Qiankun. Study on the intensity and temporal and spatial variation of Yellow Sea Warm Current based on Aqua/MODIS data[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(6): 93–102.
- [30] 《中国海岛志》编纂委员会. 中国海岛志. 山东卷. 第1册, 山东北部沿岸[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 10–26.
Compilation Committee of *China Island Chronicles*. *China Island Chronicles*. Shandong Volume, Volume 1, Northern Coast of Shandong Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 10–26.
- [31] 邹建宇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 长山列岛邻近海域鱼类群落种类组成和多样性时空变化[J]. *应用生态学报*. 2022, 33(8): 2237–2243.
Zou Jianyu, Xue Ying, Ji Yupeng, et al. Spatio-temporal changes in species composition and diversity of fish communities in the adjacent waters of Changshan Islands, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8): 2237–2243.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6–2007, 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6–2007, Specifications for oceanographic survey Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [33] FishBase. World Wide Web electronic publication[EB/OL]. (2022–03–01)[2022–03–15]. <https://www.fishbase.de/search.php>.
- [34] 成庆泰, 周才武. 山东鱼类志[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1997.
Cheng Qingtai, Zhou Caiwu. *The Fishes of Shandong Province*[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1997.
- [35] 李明德, 张洪杰. 渤海鱼类生物学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.
Li Mingde, Zhang Hongjie. *Fish Biology in Bohai Sea*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991.
- [36] Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, et al. Assessing functional diversity in the field—methodology matters[J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(1): 134–147.
- [37] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Zhang Jintun. *Quantitative Ecology*[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [38] Mouillot D, Dumay O, Tomasini J A. Limiting similarity, niche filtering and functional diversity in coastal lagoon fish communities[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3/4): 443–456.
- [39] Mouillot D, Graham N A J, Villéger S, et al. A functional approach reveals community responses to disturbances[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(3): 167–177.
- [40] 薛莹, 徐宾铎, 高天翔, 等. 北黄海秋季黄鮟鱇摄食习性的初步研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(9): 39–44.
Xue Ying, Xu Binduo, Gao Tianxiang, et al. Preliminary study on the feeding habit of *Lophius litulon* during autumn in the North Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences Edition)*, 2010, 40(9): 39–44.
- [41] 陈俅, 王有君, 李培君, 等. 黄渤海区日本鲈的洄游与分布[J]. *水产科学*, 1983(1): 6–13.
Chen Qiu, Wang Youjun, Li Peijun, et al. Migration and distribution of *Scomber japonicus* in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Fisheries Science*, 1983(1): 6–13.
- [42] Musick J A. Criteria to define extinction risk in marine fishes: the American Fisheries Society initiative[J]. *Fisheries*, 1999, 24(12): 6–14.
- [43] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
Zhan Bingyi. *Fisheries Stock Assessment*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [44] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity[J]. *Oikos*, 2005, 111(1): 112–118.
- [45] Webb C O, Ackerly D D, McPeck M A, et al. Phylogenies and community ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 475–505.
- [46] Barrio I C, Hik D S, Bueno C G, et al. Extending the stress-gradient hypothesis—is competition among animals less common in harsh environments[J]. *Oikos*, 2013, 122(4): 516–523.
- [47] Rudolf V H W, Rasmussen N L. Population structure determines functional differences among species and ecosystem processes[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2318.

附录

表 A1 长山列岛邻近海域鱼类名录及功能性状

Table A1 List of fish species and their functional traits in the adjacent waters of the Changshan Islands

种类	洄游类型	适温性	栖息类型	食性	口的位置	鱼卵类型	口的大小	恢复力	体型	生长系数	脆弱力	最大体长	营养级
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	SM	T	De	B	下位	PE	中等	M	2	0.31	25	43.5	3.9
斑鲦 <i>Konosirus punctatus</i>	SM	T	Pe	He	端位	PE	较小	H	2	0.3	36	32	3
斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	较大	L	9	—	50	43	4
斑鲳 <i>Raja kenoei</i>	SM	T	De	B-N	腹面	DAE	小	L	3	—	56	40	4.1
半滑舌鲷 <i>Cynoglossus semilaevis</i>	SM	T	De	B	下位	PE	小	M	5	0.26	51	61.1	3.7
银鲳 <i>Pampus punctatissimus</i>	LM	WW	De	P	端位	PE	较小	H	2	0.43	18	25.8	3.2
赤鼻棱鲛 <i>Thryssa kammalensis</i>	SM	T	Pe	P	下位	PE	大	M	2	0.56	32	15	3.2
大鳞舌鲷 <i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	SM	T	De	B	下位	PE	小	M	5	—	29	39.1	3.5
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	SM	CT	De	P-B	端位	AE	小	M	2	0.35	34	57	3.8
大头鳕 <i>Gadus macrocephalus</i>	SM	CT	De	N	端位	DE	较小	L	2	0.2	50	119	4.5
大银鱼 <i>Protosalanx chinensis</i>	SM	T	De	P-B	下位	PE	中等	H	7	0.56	14	17	3
带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	SM	WW	De	N	端位	PE	较大	L	8	0.11	57	234	3.9
单指虎鲂 <i>Minous monodactylus</i>	Lo	WW	De	B	上位	PE	小	M	2	—	10	12	4.1
刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>	SM	T	Pe	P	下位	PE	大	M	2	0.35	33	41	3.7
短鳍鲷 <i>Callionymus sagitta</i>	Lo	T	De	B	端位	PE	小	H	3	0.52	30	18	2.9
短吻红舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i>	SM	T	De	B	下位	PE	小	M	5	0.2	40	24	4.3
钝吻黄盖鲷 <i>Pseudopleuronectes yokohamae</i>	SM	CT	De	B	端位	DAE	小	M	5	0.25	49	45	3.6
多鳞鲳 <i>Sillago sihama</i>	SM	WW	De	B	端位	PE	小	H	2	0.8	24	31	3.4
方氏云鲷 <i>Enedrias fangi</i>	SM	CT	De	P-B	端位	O	中等	H	8	0.76	30	30	4.6
绯鲷 <i>Callionymus beniteguri</i>	Lo	T	De	B	端位	PE	小	H	3	0.52	27	16	3.3
高眼鲷 <i>Cleisthenes herzensteini</i>	SM	CT	De	B-N	端位	PE	中等	L	5	0.22	50	47	4.2
褐菖鲈 <i>Sebastes marmoratus</i>	SM	T	De	B	端位	PE	中等	M	2	0.3	33	36.2	3.7
褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	SM	T	De	N	端位	PE	中等	M	5	0.24	60	103	4.9
黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>	SM	T	De	B-N-P	端位	PE	较大	M	2	0.28	37	50	3.2
黑光鲷 <i>Liopsetta obscurus</i>	SM	CT	De	B	端位	PE	中等	M	5	0.28	61	50	3.3
黑鳃梅童鱼 <i>Collichthys niveatus</i>	SM	T	De	B	端位	PE	中等	H	2	0.42	15	15	3.7
黄鲛鲷 <i>Lophius litulon</i>	SM	T	De	N	上位	PAE	大	L	3	0.23	78	150	4.5
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	SM	WW	De	B	端位	PE	较小	H	2	0.4	23	40	4
黄鲫 <i>Setipinna tenuifilis</i>	SM	WW	Pe	P	下位	PE	大	H	2	0.32	29	22	3.2
黄尾鲷 <i>Seriola lalandi</i>	LM	T	Pe	N	端位	PE	较大	L	1	0.32	69	250	4.2
吉氏绵鲷 <i>Enchelyopus gilli</i>	SM	CT	De	B	下位	O	中等	L	8	—	64	30	3.5
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	SM	T	De	P-B	端位	PE	较小	H	2	0.42	17	17	3.5
假睛东方鲀 <i>Takifugu pseudommus</i>	SM	T	De	B-N	端位	DAE	小	M	2	0.24	36	35	3.4

续表 A1

种类	洄游类型	适温性	栖息类型	食性	口的位置	鱼卵类型	口的大小	恢复力	体型	生长系数	脆弱力	最大体长	营养级
尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>	Lo	T	De	P	端位	O	小	M	7	—	32	50	3.3
角木叶鲈 <i>Pleuronichthys cornutus</i>	SM	T	De	B	端位	PE	较小	L	5	0.23	50	27.5	3.4
铠平鲈 <i>Sebastes hubbsi</i>	Lo	T	De	B	端位	O	较小	M	2	0.21	38	15.6	3.5
孔鳐 <i>Raja porosa</i>	SM	CT	De	B-N	腹面	DAE	小	L	3	0.26	49	57	4
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	LM	T	Pe	N	端位	PE	较大	M	1	0.53	34	113	4.8
蓝圆鲈 <i>Decapterus maruadsi</i>	SM	T	Pe	P	端位	PE	小	H	1	0.31	17	25	3.4
六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	小	M	4	0.7	29	17.4	3.3
绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i>	SM	WW	De	B	端位	DAE	小	M	2	0.28	36	36	3.4
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	小	M	4	0.45	38	28.2	4
鲩 <i>Miichthys miuy</i>	SM	T	De	N	端位	PE	较大	M	2	0.3	37	70	4.4
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengeri</i>	SM	WW	De	B	下位	PE	较小	H	2	0.53	25	30	3.7
普氏栉虾虎鱼 <i>Amoya pflaumii</i>	Lo	WW	De	B	端位	AE	较小	H	10	—	16	12	3.1
青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	SM	T	Pe	P	端位	PE	较小	H	2	0.5	23	18	3.4
日本笠鲷 <i>Chirolophis japonicus</i>	SM	CT	De	P-B	端位	O	较小	L	8	—	68	55	3.6
绒杜父鱼 <i>Hemitripterus villosus</i>	Lo	CT	De	B-N	端位	PE	大	L	2	0.17	52	35	4.3
石鲈 <i>Kareius bicoloratus</i>	SM	CT	De	B	端位	PE	小	L	5	0.18	46	30	4.1
史氏鳐 <i>Raja pulchra</i>	SM	T	De	B-N	腹面	DAE	小	L	3	0.26	61	23.6	4.3
松江鲈 <i>Trachidermus fasciatus</i>	SM	T	De	B-N	端位	DAE	大	H	2	—	16	14	3
鲈 <i>Scomber japonicus</i>	LM	WW	Pe	N	端位	PE	较大	M	1	0.53	31	64	4.2
汤氏平鲈 <i>Sebastes thompsoni</i>	SM	T	De	B	端位	O	较小	L	2	0.21	55	30	3.7
鳎 <i>Engraulis japonicus</i>	SM	T	Pe	P	下位	PE	大	H	2	0.79	10	18	3.6
瓦氏鲻 <i>Callionymus valenciennesi</i>	Lo	T	De	B	端位	PE	小	H	3	0.52	18	10	3.2
纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trignocephalus</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	较大	H	4	—	23	11	3.3
细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>	SM	WW	De	B	端位	PAE	较大	H	2	0.5	30	9	3.7
细纹狮子鱼 <i>Liparis maculatus</i>	SM	CT	De	B-N	端位	DAE	较小	M	9	0.31	51	47	3.9
小带鱼 <i>Eupleurogrammus muticus</i>	SM	WW	De	B	端位	PE	较大	H	8	—	29	87	4.4
小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	SM	T	De	B-N	端位	PE	中等	M	2	0.45	32	40	3.7
小头栉孔虾虎鱼 <i>Ctenotrypauchen microcephalus</i>	Lo	WW	De	B	端位	AE	小	M	2	—	30	18	3.7
小眼绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>	SM	WW	De	B	下位	PE	中等	M	9	0.4	29	60	3.8
星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>	SM	T	De	B-N	下位	PE	较大	L	4	0.15	58	100	4.8
许氏平鲈 <i>Sebastes schlegelii</i>	Lo	CT	De	B-N	端位	O	较小	M	2	0.21	68	65	4.7
亚洲油鲈 <i>Microstomus achne</i>	SM	CT	De	B	端位	PE	中等	L	5	0.1	67	71.5	3.4
鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	SM	WW	De	B-N	端位	PE	中等	M	3	0.5	37	100	4
油鲟 <i>Sphyræna pinguis</i>	SM	WW	Pe	N	端位	PE	小	H	6	0.4	31	50	5
玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	SM	CT	De	P	端位	DAE	大	H	7	0.6	26	15	3.3
云鲷 <i>Enedrias nebulosus</i>	SM	CT	De	B	端位	O	中等	H	8	0.7	22	30	3.2

续表 A1

种类	洄游类型	适温性	栖息类型	食性	口的位置	鱼卵类型	口的大小	恢复力	体型	生长系数	脆弱力	最大体长	营养级
长蝶 <i>Tanakius kitaharae</i>	SM	CT	De	B	端位	PE	小	M	5	0.3	32	50	3.5
长绵鳎 <i>Enchelyopus elongatus</i>	SM	CT	De	B	下位	O	较小	M	8	—	39	30	3.4
长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	SM	T	De	N	端位	PE	大	H	6	0.17	23	50	4.8
长丝虾虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>	Lo	WW	De	B	端位	AE	较小	H	2	—	25	13.2	3.4
中颌棱鯧 <i>Thryssa mystax</i>	SM	WW	Pe	P	下位	PE	大	H	2	0.56	23	19	3.6
中华栉孔虾虎鱼 <i>Ctenotrypauchen chinensis</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	小	M	2	—	27	19.2	3.8
钟馗虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>	Lo	T	De	B	端位	AE	小	H	4	—	14	10.4	3.4
竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	LM	T	Pe	P	端位	PE	较小	M	1	0.3	57	50	3.4

注: SM. 近海洄游型; LM. 远海洄游型; Lo. 定居型; T. 暖温性; WW. 暖水性; CT. 冷温性; De. 底层; Pe. 中上层; B. 底栖生物食性; He. 植食性; N. 游泳动物食性; P. 浮游生物食性; PE. 浮性卵; AE. 附着性卵; PAE. 黏着浮性卵; DAE. 黏着沉性卵; O. 卵胎生; M. 中等恢复力; H. 高恢复力; L. 低恢复力; 1. 纺锤形; 2. 侧扁形; 3. 平扁形; 4. 鳃形; 5. 不对称形; 6. 亚圆柱形; 7. 细长形; 8. 带形; 9. 前部宽扁形; 10. 后部侧扁形。

Seasonal and spatial changes in functional diversity of fish communities in the adjacent waters of the Changshan Islands

Zou Jianyu¹, Liu Shude⁴, Zhang Chongliang^{1,2,3}, Xue Ying^{1,2,3}, Ji Yupeng^{1,3}, Xu Binduo^{1,2,3}

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China; 4. General Station of Fishery Development and Resources Conservation of Shandong Province, Yantai 264003, China)

Abstract: In order to identify the functional diversity of the adjacent waters of the Changshan Islands in the ecotone between the Yellow Sea and the Bohai Sea, based on the quarterly survey of fish biological resources and environment factors from October 2016 to August 2017, combined with 13 functional traits such as feeding habit, trophic level, migration type, thermophily, resilience and fish eggs type, the spatio-temporal pattern of functional diversity and its relationship with environmental factors were studied by using community weighted mean index (CWM), functional diversity index and Spearman rank correlation analysis. The results showed that the dominant species of fish community in spring and winter were depressiform, warm temperate and demersal species with the characteristics of anterior or upper mouth, low growth coefficient, high vulnerability, low resilience and non-migration or short distance migration. The dominant species in summer and autumn showed more functional traits, such as long distance migration, pelagic, fusiform and compressiform. FRic in summer and autumn was significantly higher than that in spring and winter, FEve was the highest in spring, and FDiv was the lowest in autumn and was significantly lower than other seasons. FEve in spring and season and FDiv in spring and autumn showed a trend of high in the west and low in the east, while FRic in summer and winter and FEve in autumn showed a trend of high in the east and low in the west. There was a certain correlation between environmental factors and functional diversity index. As an ecotone between the Yellow Sea and the Bohai Sea, the functional traits of the dominant species and functional diversity show seasonal variations made by the fish migration, and the spatial pattern of functional diversity shows complexity and heterogeneity made by environment changing in the adjacent waters of the Changshan Islands.

Key words: fish community; functional diversity; spatio-temporal pattern; adjacent waters of the Changshan Islands