

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.16038

## 夏季台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落结构及环境解释

刘尊雷, 杨林林, 严利平, 袁兴伟, 程家骅

农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090

**摘要:** 根据2014年7月台湾海峡中部、北部及邻近水域渔业资源底拖网调查资料, 分析了该水域的鱼类群落结构, 包括种类组成、区系特点、优势种、多样性及空间分布等, 探讨了鱼类群落结构与环境因子的关系, 并阐述了鱼类群落的群聚结构。结果表明, 调查海域共捕获鱼类84种, 隶属于16目、48科、69属。从种类数上看, 适温类型以暖水种为主, 区系类型以大陆架浅水底层鱼类以及大陆架岩礁性鱼类为主; 从生物量组成上看, 区系类型则以大陆架浅水中低层鱼类为主。优势种为带鱼(*Trichiurus japonicus*)和七星底灯鱼(*Benthosema pterotum*), 合计渔获质量占总渔获质量的46.92%, 对总渔获质量的回归贡献值分别为0.30和0.62; 高生物量区集中分布在台湾海峡北口海域, 在空间上表现为明显的生态位重叠。层次聚类分析将群落优势物种划分为2个主要的生态类型: 沿海类型和广布类型, 沿海类型的代表性物种包括龙头鱼、黄鲫、鳙; 广布类型物种有带鱼、窄颅带鱼、七星底灯鱼、竹荚鱼、刺鲳、麦氏犀鲑。Shannon-Wiener多样性、Pielou均匀度和Margalef丰富度的变化范围分别为0.22~2.31、0.11~0.72、0.36~4.04, 平均值分别为1.44、0.51、1.59, 丰富度与总渔获质量表现为显著负相关( $r=-0.65$ ), 与深度显著正相关( $r=0.48$ )。物种-环境典范对应分析表明, 与物种空间结构关系密切的影响因子为底盐、底层无机氮、底温、表底温差和水深; 而影响群落优势群体分布的因子为底温、底盐和底层无机氮。

**关键词:** 台湾海峡; 底拖网; 鱼类群落; 生物量分布; 典范对应分析

中图分类号: S92

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)06-1399-18

台湾海峡是东海和南海之间的通道, 属亚热带陆架浅海<sup>[1]</sup>。海区形状呈南宽北窄, 南北长约380 km, 东西平均宽度约为190 km, 总面积约8.5万km<sup>2</sup>, 水深较浅, 绝大部分低于100 m<sup>[2]</sup>。海域理化环境复杂, 既受到黑潮支流、南海季风漂流等高温高盐性质的东边界流控制, 同时也有以闽浙沿岸流为主的西边界流的影响, 多处也存在季节性上升流, 饵料生物基础丰厚, 形成了自然环境独特和物种多样性丰富的生态系, 鱼类群落的种类组成和区系性质具有东海和南海过渡海区的特色<sup>[1]</sup>, 多种经济鱼类汇集索饵和繁殖使台湾海峡成为我国近海的重要渔场之一<sup>[3-4]</sup>。

随着沿岸经济的迅速发展, 水产养殖、滨海资源过度利用等导致渔业水域的生态环境严重退

化, 包括台湾海峡在内的东海南部生态系统的结构和功能正经历着向“幼态”生态系统的转变<sup>[5]</sup>。台湾海峡由于其独特的地理位置和海洋环境特征而一直备受关注, 其生态系统的研究也受到越来越多的重视。国内学者从生态系统结构、功能及其与海洋环境变化响应等多方面进行了相关探讨<sup>[2, 6-9]</sup>, 对鱼类群落结构也开展了种类区系组成、生物多样性等方面的研究<sup>[1, 10-11]</sup>。但这些研究大多是集中在有限的特定水域, 未能对台湾海峡北部水域进行系统的整合和分析, 也较少综合考虑海洋生态环境对物种组成格局的影响。在研究方法上, 鱼类群落格局的研究主要采用分类和梯度分析的方法, 如聚类分析、主成分分析、非度量多维梯度排序等, 但当用环境数据解释或预测物种的多度

收稿日期: 2016-02-03; 修订日期: 2016-04-15.

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项 (201303047); 农业部财政专项.

作者简介: 刘尊雷(1982-), 男, 助理研究员, 方向为渔业资源评估与管理. E-mail: liuzl@ecsf.ac.cn

通信作者: 程家骅, 研究员. E-mail: ziyuan@sh163.net

时,上述方法受到了较大的限制;冗余分析虽然能揭示群落-环境之间的关系,但存在着变量沿环境梯度为直线关系的潜在假设。典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)是一种基于单峰模型的排序方法,位置排序与物种排序对应分析,允许环境变量非直线分布,而且在排序过程中结合多个环境因子,可以将位置、物种与环境的排序结果展示在同一排序图上,是揭示物种组成沿环境梯度变化的常用方法,在陆地生态和海洋生态方面均有广泛应用<sup>[12-14]</sup>。

开展物种组成与海洋环境的生态关联分析对了解鱼类群落格局形成过程及其机制的研究有着重要意义,尤其是在沿岸海域生境退化、捕捞压力居高不下的背景下,能够有效地指导渔业资源合理化利用和自然水域生态的恢复重建。本文依据 2014 年夏季渔业资源拖网调查数据,结合温度、盐度、营养盐等实测环境资料,探讨了台湾海峡北部海域鱼类群落的种类组成、区系划分、优势种、鱼类群聚格局及其与环境的响应关系,以为渔业资源可持续利用及保护提供基础资料和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域

在台湾海峡北部及邻近水域设置调查站位 19 个,其中台湾海峡北部 11 个,台湾海峡 8 个,于夏季(2014 年 7 月)开展渔业资源和生态、理化环境调查,调查范围为 24°~26°30'N, 119°~123°30'E, 站位间隔 30'。T10 站因破网无渔获物,因此实际完成 18 个站位,具体调查站位设置如图 1 所示。

### 1.2 数据采集

调查渔船为“闽连渔 61953-61854”,主机功率为 380 kW,采用底拖网取样,网具网口网目 72 目×10 m,网口周长 167.2 m,网身长度 130 m,囊网网目 20 mm。调查时间为昼、夜连续进行,拖速为 3 kn/h,每站拖网 1 h。每个调查站位取样时,先取出大型和稀有种类标记保存,再从渔获物中随机取分析样品 1 箱(不足 1 箱则全部取回),做好渔捞记录和编号后置于鱼舱冰鲜保存。其余渔获

物按品种装箱,分别记录大宗种类和总渔获物质量。取样样品带回实验室鉴定分析,记录每一种类的数量(尾/h)和质量(kg/h,单位小时渔获质量,以下简称单位渔获质量),对主要鱼种进行生物学测定。同时现场用 SEB-37SM 型 CTD 测定水深、温度和盐度,并利用卡盖式采水器同步采集表层和底层水样,水样经 0.45 μm 混合纤维素酯微孔滤膜过滤后冷藏保存,在实验室用分光光度计测定 5 项营养盐指标(NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P 和 SiO<sub>3</sub>-Si)、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 之和定义为无机氮。游泳生物样品采集和分析参照《海洋调查规范第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)进行。理化指标的测定参照《海洋监测规范(GB 17378.5-2007)》的方法。

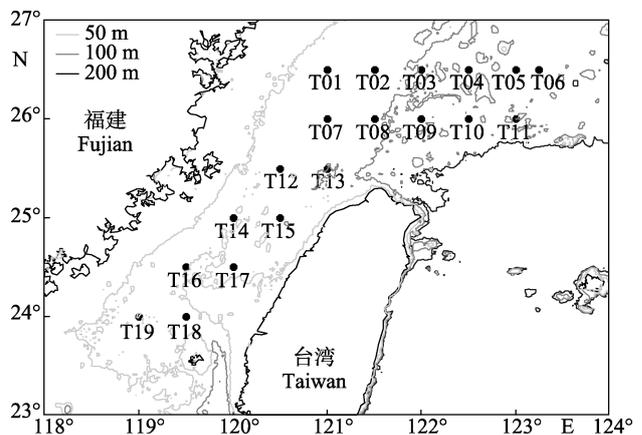


图 1 调查海域站位(●)及水深示意图

Fig. 1 Distributions of sampling stations (●) and water depth

### 1.3 鱼类区系特征划分

依据《东海大陆架生物资源与环境》对调查渔获种类名录的适温类型划分为暖水种、暖温种、冷温种和冷水种<sup>[15]</sup>。栖息地生态类型划分则同时参考了不同的信息来源,少数种类依据刘静等<sup>[16]</sup>对黄海鱼类栖息地生态类型的划分标准和陈永俊等<sup>[17]</sup>对台湾海峡鱼类栖息地生态类型的划分标准,其他种类则参考 FishBase<sup>[18]</sup>、Taiwan Fish Database<sup>[19]</sup>和数据库资料,最终将调查种类的栖息地类型划分为大陆架浅水底层鱼类、大陆架岩礁性鱼类、大陆架浅水中上层鱼类、大陆架浅水中底层鱼类、大陆架洄游性中上层鱼类和大陆架大洋洄游性中上层鱼类。

## 1.4 数据分析

**1.4.1 数据标准化** 进行数据分析之前, 为将统计结果在同一尺度下比较, 对物种和环境的原始数据进行归一化处理, 环境因子包括深度、表层和底层的温度、盐度、叶绿素 a、无机氮以及表层和底层的温度差、盐度差、叶绿素 a 浓度差。处理方式如下:

$$X'_{is} = \frac{X_{is} - X_{s \min}}{X_{s \max} - X_{s \min}}$$

式中,  $X'_{is}$  为第  $i$  个站位的第  $s$  个物种或环境的归一化处理数据;  $X_{is}$  为第  $i$  个站位的第  $s$  个物种或环境的原始数据;  $X_{s \max}$  和  $X_{s \min}$  分别为第  $s$  个物种或环境因子在所有站位的最大值和最小值。

**1.4.2 物种优势度** 采用相对重要性指数(index of relative importance, IRI)作为鱼种优势度的判断指标:

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

式中,  $N\%$  和  $W\%$  是每种鱼占鱼类总量的个体数量百分比和质量百分比,  $F$  是出现频率, 即某一鱼种出现的站数占所有采样站中比例。将相对重要性指数大于 1000 者定为优势种, 在 100~1000 之间者定为常见种。

为探讨优势种和常见种对总渔获质量的影响程度, 以总渔获质量为因变量, 优势种和常见种渔获质量为自变量, 进行标准化回归, 以标准化回归系数( $\beta$ )作为总渔获质量贡献指数。

**1.4.3 物种多样性** 采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 物种丰富度指数( $S$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )计算鱼类群落多样性:

$$S = (S - 1) / \ln B$$

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$J = H' / \ln S$$

式中,  $S$  为种类数,  $B$  为总渔获质量,  $P_i$  为第  $i$  物种渔获质量占总渔获质量的比例。

**1.4.4 生态位测度** 采用生态位宽度和生态位重叠表示优势种和常见种的生态位测度指标。生态位宽度反映了物种对资源利用程度的尺度, 生态位重叠反映了物种对同一空间资源利用的相似和竞争程度。生态位宽度采用 Shannon-Wiener 多样

性指数计算: 
$$B_i = \sum_{j=1}^S (P_{ij} \ln p_{ij})$$

生态位重叠指数采用 Pianka 指数:

$$O_i = \sum_{j=1}^S (P_{ij} P_{kj}) / \sqrt{\sum_{j=1}^S (P_{ij}^2 \times \sum_{j=1}^S (P_{kj}^2))}$$

式中,  $B_i$  和  $O_i$  分别为生态位宽度和生态位重叠指数,  $S$  为调查站位数,  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  为第  $i$  物种和第  $k$  物种质量占  $j$  站位总质量的比例。生态位宽度划分为 3 类<sup>[20]</sup>,  $B_i \geq 1.5$  为广生态位种,  $1.5 > B_i \geq 0.5$  为中生态位种,  $B_i < 0.5$  为狭生态位种。

**1.4.5 物种与环境多元分析** 首先使用降趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)判断适合的分析方法<sup>[21-22]</sup>, 如果排序轴最大值超过 4, 单峰模型比较合适; 如果小于 3, 线性模型比较合适; 介于 3~4, 单峰模型和线性模型均可。本次研究 DCA 第 1 排序轴为 6.7, 因此采用典范对应分析解析物种与环境因子之间的关系, 然后利用方差分析置换检验方法(ANOVA permutation test)检验环境因子与物种分布间的相关性。但这种方法并不能查看每个环境因子对物种分布的解释量, 因此利用环境因子与排序结果拟合方法, 找到影响物种群聚的环境变量, 将与物种生物量分布不相关的环境变量剔除。由于变量之间存在共线性关系, 环境因子与排序结果拟合方法采用逐步增加变量的方式进行。

消除冗余变量之后, 剔除仅出现一次且渔获质量比例低于 0.5% 的种类, 利用 18 个站位的鱼类渔获质量建立物种多度矩阵信息, 以显著性环境变量建立环境矩阵信息, 运用典范对应分析方法(canonical correspondence analysis, CCA)分析物种-环境因子的关系。CCA 可同时显示物种和环境因子排序关系, 环境因子用箭头表示, 箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性, 箭头连线的长度代表着某个环境因子与物种分布相关程度的大小, 连线越长, 代表这个环境因子对物种的分布影响越大; 箭头之间的夹角大小代表着环境因子之间相关性的大小, 夹角越小, 相关性越大; 箭头和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小<sup>[12]</sup>。

应用层次聚类分析方法确定物种的生态分布类型。在每一层次分析中,通过多尺度自助重抽样和正态自助重抽样技术进行统计分析,计算聚类显著性  $P$ ,以评估聚类结果的不确定性,重抽样次数为 1000。绘制聚类分析图时,多尺度自助重抽样计算的  $P$  值以 AU 表示,正态自助重抽样计算的  $P$  值以 BP 表示,多尺度自助重抽样  $P$  更接近于无偏估计<sup>[23]</sup>。

数据分析采用 R3.2.2 软件完成,其中生态位重叠通过 spaa 包执行;生态位宽度、DCA、CCA 分析通过 vegan 包执行;层次聚类分析通过 pvclust 包执行。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子特征

表 1 为调查海域环境因子的描述性统计分析。表层和底层叶绿素 a 平均浓度为 0.34~0.33 mg/m<sup>3</sup>,最大可达到 0.65~0.68 mg/m<sup>3</sup>。表现为中等程度的变异;无机氮平均浓度为 0.2~0.14 mg/L,表层浓度高于底层,均表现为中等程度的变异。表层温度较高,各站位波动幅度较小,其中 T19 站为最高站位,T12 为最低站位;盐度较低,各站位变异较小,T09 为盐度最高,T01 最低。底层与表层情况相反,温度较低而盐度较高,其中温度以 T04 最高,T11 最低,各站位变异较大,说明水体可能受到不同性质水团的影响;盐度则以 T11 最高,T19 最低,各站位变异较小。

### 2.2 种类组成和区系特征

夏季台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落的物

种有 84 种,隶属 16 目、48 科、69 属。其中,软骨鱼类有 3 种,分属真鲨目和鲛目,隶属 3 科、3 属,种类分别为尖头斜齿鲨(*Scoliodon sorrahkawah*)、路氏双髻鲨(*Sphyrna lewini*)和无斑鰐鲭(*Aetobatus flagelbum*)。硬骨鱼纲有 14 目、45 科、66 属、81 种。其中以鲈形目种类占绝对优势,有 23 科、37 属、47 种;其次是鲷形目,有 4 科、6 属、8 种;鲀鱼目有 1 科、4 属、6 种。具体的目、科、属、种数列于表 2。

**2.2.1 鱼类的适温类型** 根据鱼类的适温特征,本次调查所获的鱼类可划分为 2 种适温类型。

(1) 暖水种:有 73 种,占鱼类种数的 86.9%,主要有带鱼(*Trichiurus japonicus*)、短尾大眼鲷(*Priacanthus macracanthus*)、黄鲫(*Setipinna taty*)、鳓鱼(*Ilisha elongata*)、龙头鱼(*Harpodon nehereus*)、七星底灯鱼(*Benthosema pterotum*)、圆舵鲹(*Auxis rochei*)、白舌尾甲鲈(*Caranx helvolus*)、珠蝴蝶鱼(*Chaetodon kleini*)等。合计渔获质量占总渔获质量的 96.0%,丰度占总丰度的 99.8%。

(2) 暖温种:有 11 种,占鱼类种数的 13.1%,主要有刺鲷(*Psenopsis anomala*)、鳀鱼(*Engraulis japonicus*)、竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)、长蛇鲻(*Saurida elongata*)、六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)、褐蓝子鱼(*Siganus fuscescens*)等。合计渔获质量占总渔获质量的 4.0%,丰度占总丰度的 0.2%。

**2.2.2 鱼类的区系类型** 根据鱼类的区系特征,本次调查所获的鱼类可划分为 6 种区系类型。

表 1 调查海域环境因子描述性统计分析

Tab. 1 Descriptive statistical analysis of environment factors in investigation waters in summer

统计值 statistics	深度/m depth	表层 surface layer				底层 bottom layer			
		温度/°C temperature	盐度 salinity	叶绿素 a/ (mg·m <sup>-3</sup> ) Chl-a	无机氮/ (mg·L <sup>-1</sup> ) inorganic nitrogen	温度/°C temperature	盐度 salinity	叶绿素/ (mg·m <sup>-3</sup> ) Chl-a	无机氮/ (mg·L <sup>-1</sup> ) inorganic nitrogen
最小 min	52	27.73	31.19	0.20	0.10	15.93	33.88	0.20	0.06
最大 max	132	30.45	33.79	0.65	0.37	26.88	35.40	0.68	0.23
平均 mean	82	29.51	32.95	0.34	0.20	23.28	34.44	0.33	0.14
标准差 SD	23	0.58	0.62	0.13	0.07	3.33	0.40	0.15	0.04
变异系数/% CV	27.54	1.96	1.89	39.05	34.87	14.29	1.16	46.01	30.48

表 2 调查海域鱼类纲、目、属、科、种组成  
Tab. 2 Compositions of order, family, genus and species of fishes in investigation waters

纲 class	目 order	科 family	属 genus	种 species
硬骨鱼纲 Chondrich- thyes	鲈形目 Perciformes	23	37	47
	鲉形目 Tetraodontiformes	4	6	8
	仙鱼目 Aulopiformes	1	4	6
	鲱形目 Clupeiformes	2	4	4
	海龙目 Syngnathiformes	2	2	3
	鳗鲡目 Anguilliformes	3	3	3
	颌针鱼目 Beloniformes	2	2	2
	鲉形目 Scorpaeniformes	2	2	2
	鮫鱈目 Lophiiformes	1	1	1
	灯笼鱼目 Myctophiformes	1	1	1
	鲽形目 Pleuronectiformes	1	1	1
	海鲂目 Zeiformes	1	1	1
	鳕形目 Gadiformes	1	1	1
	月鱼目 Lampriformes	1	1	1
软骨鱼纲 Actinop- terygii	真鲨目 Carcharhiniformes	2	2	2
	鳐目 Myliobatiformes	1	1	1

(1) 大陆架浅水底层鱼类: 有 21 种, 占鱼类种数的 25.0%, 主要有发光鲷(*Acropoma japonicum*)、海鳗(*Muraenesox cinereus*)、黑姑鱼(*Atrobucca nibe*)、绿鳍鱼(*Chelidonichthys kumu*)、细条天竺鲷(*Apogon lineatus*)、棕斑腹刺鲀(*Gastrophysus spadiceus*)、长蛇鲻等。合计渔获质量占总渔获质量的 5.6%, 丰度占总丰度的 0.8%。

(2) 大陆架浅水中底层鱼类: 有 12 种, 占鱼类种数的 14.3%, 主要有白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*)、带鱼、刺鲳、叫姑鱼(*Johnius belengerii*)、龙头鱼、七星底灯鱼、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)等。合计渔获质量占总渔获质量的 77.2%, 丰度占总丰度的 94.4%。

(3) 大陆架浅水中上层鱼类: 有 16 种, 占鱼类种数的 19%, 主要有扁舵鲣(*Auxis thazard*)、日本鲭(*Scomber japonicus*)、鳀鱼、竹荚鱼、黄鲫、沟鲈(*Atropus atropus*)、杜氏梭鲈(*Thryssa dussumieri*)等。合计渔获质量占总渔获质量的 12.2%, 丰度占总丰度的 1.6%。

(4) 大陆架岩礁性鱼类: 有 29 种, 占鱼类种数的 34.5%, 主要有粗吻海龙(*Trachyrhamphus ser-*

*atus*)、大甲鲈(*Megalaspis cordyla*)、短尾大眼鲷、高体若鲈(*Caranx equula*)、蓝圆鲈(*Decapterus maruadsi*)、朴蝴蝶鱼(*Chaetodon modestus*)、六带鲈(*Caranx sexfasciatus*)等。合计渔获质量占总渔获质量的 1.7%, 丰度占总丰度的 0.4%

(5) 大陆架大洋洄游中上层鱼类: 有 3 种, 占鱼类种数的 3.6%, 有横带扁颌针鱼(*Ablennes hians*)、路氏双髻鲨(*Sphyrna lewini*)、麦氏犀鲨(*Bregmaceros mccllellandi*)。合计渔获质量占总渔获质量的 2.0%, 丰度占总丰度的 2.8%。

(6) 大洋深水底层鱼类: 有 3 种, 占鱼类种数的 3.6%, 有黑鮫鱈(*Lophiomus setigerus*)、青鳉(*Gnathagnus elongatus*)、无斑鰯。合计渔获质量占总渔获质量的 1.3%, 丰度占总丰度的比例低于 0.001%。

### 2.3 群落的优势种和常见种

不同种类的相对重要性指数和单位渔获量指标如表 3 所示。优势种有 2 种, 分别为七星底灯鱼和带鱼, 其中以七星底灯鱼的单位渔获质量最高, 平均渔获量达到 33.84 kg/h, 占单位总渔获质量的 36.92%, 对游泳生物总渔获质量的回归贡献起主导作用,  $\beta$  为 0.62。带鱼是东海区传统经济鱼种, 平均渔获质量为 31.56 kg/h, 仅略低于七星底灯鱼, 但对总渔获质量的回归贡献值仅为七星底灯鱼的 1/2 左右,  $\beta$  为 0.30。常见种有麦氏犀鲨、黄鲫、刺鲳和圆舵鲣 4 种, 平均渔获质量不到 5 kg/h, 占总渔获质量的比例均低于 10%。

### 2.4 优势种和常见种的生态位测度

从表 3 可知, 优势种和常见种的生态位宽度变化范围为 0.64~2.32, 广生态位种类为带鱼、麦氏犀鲨、刺鲳, 生态位宽度分别为 2.32、1.63、1.51, 表明这些种类的分布范围较广或渔获比例较高; 中生态位种类有七星底灯鱼、黄鲫、圆舵鲣, 生态位宽度分别为 1.17、0.99、0.64, 表现为大多数站位渔获量不高或分布不均匀的特点; 优势种和常见种中不包含狭生态位种类。生态位宽度最高的带鱼也是优势种之一, 属于广分布种, 在调查的 18 个站位中出现 17 站; 虽然第一优势种七星底灯鱼渔获比例较高, 但由于存在着空间聚集特征, 生态位宽度反而低于空间分布较为广泛的麦氏犀鲨和刺鲳。

表 3 鱼类优势种和常见种种类组成  
Tab. 3 Fish composition of dominant species and common species

鱼类 species	$W/(kg \cdot h^{-1})$	$W\%$	$N/(ind \cdot h^{-1})$	$N\%$	$F\%$	IRI	$\beta$	$B_i$
七星底灯鱼 <i>Bentosema pterotum</i>	33.84	36.92	65829	92.60	38.89	5036.85	0.62	1.17
带鱼 <i>Trichiurus japonicus</i>	31.56	34.43	666	0.94	94.44	3340.61	0.30	2.32
麦氏犀鲂 <i>Bregmaceros mccllellandi</i>	1.79	1.95	1990	2.80	61.11	290.29	0.01	1.63
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	4.92	5.37	261	0.37	44.44	255.01	0.17	0.99
刺鲳 <i>Psenopsis anomala</i>	2.43	2.65	26	0.04	61.11	164.26	0.03	1.51
圆舵鲳 <i>Auxis rochei</i>	2.80	3.05	9	0.01	33.33	102.22	0.09	0.64

注:  $W$  为单位渔获质量,  $W\%$  为质量百分比,  $N$  为单位渔获尾数,  $N\%$  为尾数百分比,  $F\%$  为出现频率, IRI 为相对重要性指数,  $B_i$  为生态位宽度。

Note:  $W$ : weight per hour;  $W\%$ : percentage of weight;  $N$ : numbers per hour;  $N\%$ : percentage of numbers;  $F$ : occurrence frequency; IRI: index of relative importance;  $B_i$ : niche breadth.

生态位重叠指数列于表 4。当生态位重叠指数大于 0.6 时, 认为物种生态位重叠较显著<sup>[24]</sup>。结果显示, 刺鲳和麦氏犀鲂生态位重叠指数最大, 为 0.84; 其次为生态位宽度最大的带鱼和刺鲳, 重叠指数为 0.82; 带鱼和七星底灯鱼的重叠指数也较高, 为 0.75; 带鱼和麦氏犀鲂、黄鲫的重叠指数分别为 0.68、0.69, 七星底灯鱼和黄鲫重叠指数为 0.65。其他种类之间的重叠指数均较低。带鱼既为优势种, 也是生态位宽度最大种, 与其他多数种类表现为较高的重叠, 这种种间格局的维系可能存在着资源位点的竞争或共栖关系。

## 2.5 优势种空间分布

调查海域不同站位的带鱼单位渔获质量分布在 0~128.8 kg/h, 除 T09 站位没有渔获, 其他各站均有带鱼出现(图 2), 说明带鱼在台湾海峡北部海域是广泛分布的物种。带鱼生物量分布并不均匀, 最高生物量出现在台湾海峡北口中央水域的 T12 站, 并在该站周围形成较高的生物量分布带。次高峰生物量分布重心出现在台湾北部的闽东渔场向岸海域, 单位渔获质量最高可到 97.6 kg/h。台

湾海峡北部深水区和南站点生物量较低, 大多低于 20 kg/h。

七星底灯鱼在各站点单位渔获质量分布范围为 0~315.7 kg/h, 该物种是高度群聚种类, 台湾海峡北口至福建北部水域最为集中(图 3), 在 T01、T12 和 T13 站位的渔获质量均超过 100 kg/h, 这 3 个站位也正是带鱼高生物量中心聚集带, 可见带鱼与七星底灯鱼在局部海域具有较高的空间重叠。七星底灯鱼在地理分布上表现出强烈的空间异质性特征, 除集中分布区域外, 在多数站位的生物量水平极低, 台湾海峡中部和南部调查站位仅在澎湖列岛附近水域的个别站位出现, 台湾北部的深水区分布也极为稀疏。

## 2.6 物种多样性

物种多样性指数列于表 5, 空间分布见图 4。各站位香农-威纳多样性指数( $H'$ )的变化范围为 0.22~2.31, 平均为  $1.44 \pm 0.58$ , 台湾岛北部宁德断面以及调查海域南部站位的多样性指数较高, 北部邻近台湾岛的站位以及莆田、泉州断面站位较低。均匀度指数的变化范围为 0.11~0.72, 平均为

表 4 优势种和常见种生态位重叠指数  
Tab. 4 Niche overlaps among dominant species and common species

	七星底灯鱼 <i>Bentosema pterotum</i>	带鱼 <i>Trichiurus japonicus</i>	麦氏犀鲂 <i>Bregmaceros mccllellandi</i>	黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	刺鲳 <i>Psenopsis anomala</i>
带鱼 <i>T. japonicus</i>	0.75				
麦氏犀鲂 <i>B. mccllellandi</i>	0.50	0.68			
黄鲫 <i>S. taty</i>	0.65	0.69	0.21		
刺鲳 <i>P. anomala</i>	0.54	0.82	0.84	0.52	
圆舵鲳 <i>A. rochei</i>	<0.01	0.08	0.15	<0.01	0.17

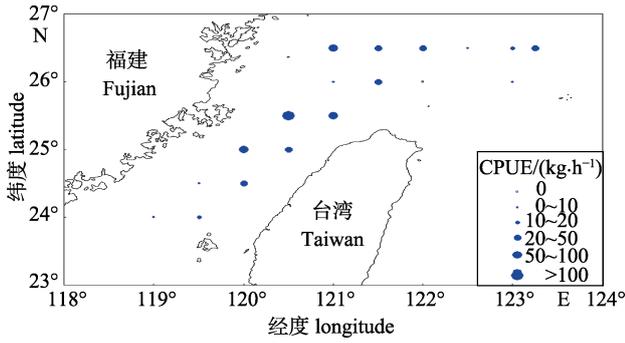


图 2 带鱼生物量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of *Trichiurus japonicus* in biomass

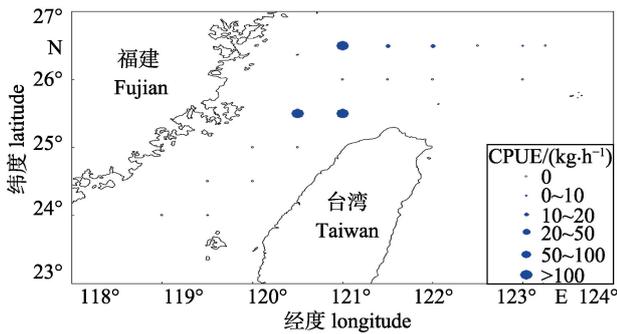


图 3 七星底灯鱼生物量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of *Benthosema pterotum* in biomass

0.51±0.17, 空间分布差异不大。种类丰富度变化范围为 0.36~4.04, 平均为 1.59±0.87, 变化趋势与多样性指数相似, 在台湾岛东北水域和调查海域

南部近海站位较高, 其他水域相对较低。

相关分析结果表明(表 6): 种类丰富度与总渔获质量显著负相关, 而与深度显著正相关, 这种变化与其空间分布趋势基本一致, T4、T5、T6、T9、T11 站水深均超过 100 m, 平均渔获量仅 13.6 kg/h, 丰富度平均值达到 2.36, 高于其他站位。多样性指数、均匀度指数与总渔获质量相关性并不显著, 但均表现为负相关, 表明物种多样性特征在一定程度上受到总渔获质量的影响。物种多样性与理化环境均未检出显著相关性, 且相关性偏弱。带鱼和七星底灯鱼与总渔获质量相关性较高, 这也是优势种对总渔获质量有较高贡献值的印证。

### 2.7 环境因子与鱼类群落结构之间的关联分析

通过初始环境因子与 CCA 排序结果拟合, 筛选出 6 个关键环境因子进入 CCA 模型分析(表 7)。前两个 CCA 轴共解释了 38.7% 的物种变异, 排序结果较好地解释了环境因子对鱼类空间聚群结构的影响。CCA 第一轴的特征值为 0.75, 能够解释物种生物量分布变化的 20.1%, 它与底盐、底温、底层无机氮、温差存在显著的相关关系, 表明第一轴主要反映了底层环境变化。第二轴特征值为 0.72, 能够解释物种生物量分布变化的 19.1%, 它与表层无机氮存在较为显著的关系, 反映了表层

表 5 台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落多样性

Tab. 5 Diversity indices of fish assemblage

统计 statistics	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index, $H'$	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index, $J$	种类丰富度 Margalef richness index, $S$
范围 range	0.22~2.31	0.11~0.72	0.36~4.04
均值 average	1.44	0.51	1.59
标准差 SD	0.58	0.17	0.87

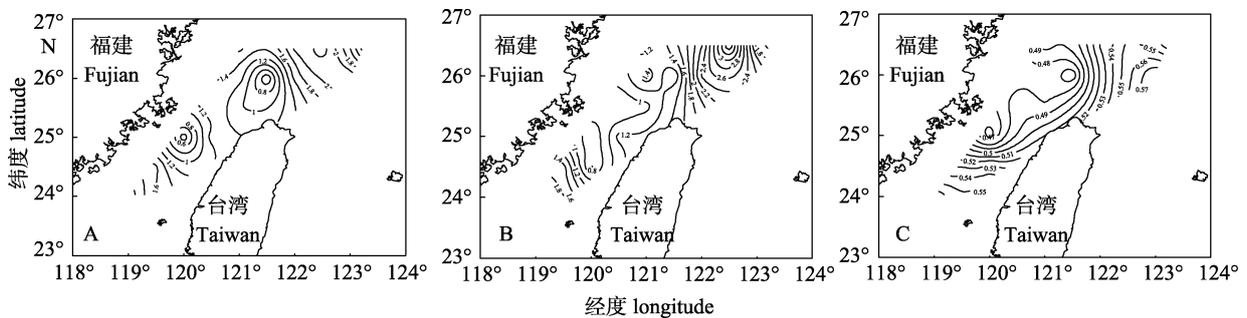


图 4 鱼类群落多样性指数空间变化

A: Shannon-Wiener 多样性指数; B: Margalef 丰富度指数; C: Pielou 均匀度指数。

Fig. 4 Spatial variation of diversity indices of fish assemblage

A: Shannon-Wiener diversity index; B: Margalef richness index; C: Pielou evenness index.

表 6 主要种类渔获质量、多样性指数与环境因子的 Spearman 相关系数  
Tab. 6 Spearman correlation between main species biomass and environmental factors

因素 factor	总渔获量 total biomass	带鱼 Tj-1	七星底灯鱼 Bp	$H'$	$J$	$S$
总渔获量 biomass	1	0.86*	0.76*	-0.44	-0.16	-0.65*
深度 depth	-0.35	-0.39	-0.04	0.26	0.01	0.48*
表温 surface temperature	0.09	0.09	-0.06	0.04	0.21	-0.03
表盐 surface salinity	-0.08	-0.11	0.13	0	-0.25	0.11
表底层温差 temperature difference	-0.17	-0.25	-0.05	0	-0.21	0.15
底层无机氮 bottom IN	-0.51*	-0.29	-0.36	-0.13	-0.35	0.12
表层无机氮 surface IN	-0.26	-0.29	-0.29	0.35	0.45	0.24

注：“\*”表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: “\*” means significant difference ( $P < 0.05$ ).

表 7 调查鱼类群落结构与关键环境因子检验结果

Tab. 7 Statistical information of fish assemblages and key-environment factors

关键环境因子 key-environmental variable	与排序轴的相关系数 intersect correlation with		$r^2$	$P$
	Axis1	Axis2		
底盐 bottom salinity	0.99	0.06	0.85	0.001***
表层无机氮 surface IN	-0.5	-0.87	0.86	0.002**
底层无机氮 bottom IN	0.95	0.31	0.75	0.001***
底温 bottom temperature	-0.96	-0.28	0.74	0.002**
温差 temperature difference	0.94	0.34	0.69	0.003**
水深 water depth	0.79	-0.61	0.56	0.024*

注：“\*”表示在 0.05 水平差异显著; “\*\*”表示在 0.01 水平差异显著; “\*\*\*”表示在 0.001 水平差异显著。

Note: “\*” means significant difference at 0.05; “\*\*” means significant at 0.01; “\*\*\*” means significant at 0.001.

环境的变化。总体来说，底盐、底层无机氮是影响群落生物量空间结构最主要环境因子，表层无机氮、底温、温差和水深等因素也非常重要。

图 5 为鱼类群落生物量空间结构与环境因子的 CCA 二维排序图，根据不同环境因子之间的夹角大小可知，底层无机氮与温差、底盐有很强的关联性，盐度高、温差大的海域，底层无机氮也越高；底温和温差、底层无机氮有明显的负相关，底温增加，温差、底层无机氮减小；底温与深度呈负相关，底盐则与温度正相关，表明随着深度增加，底温相应下降，底盐则逐渐增加。

为进一步分析群落优势群体生物量空间结构与关键环境因子的关系，降低稀有种影响，剔除仅出现一次且生物量比例低于 0.5% 的物种，重新

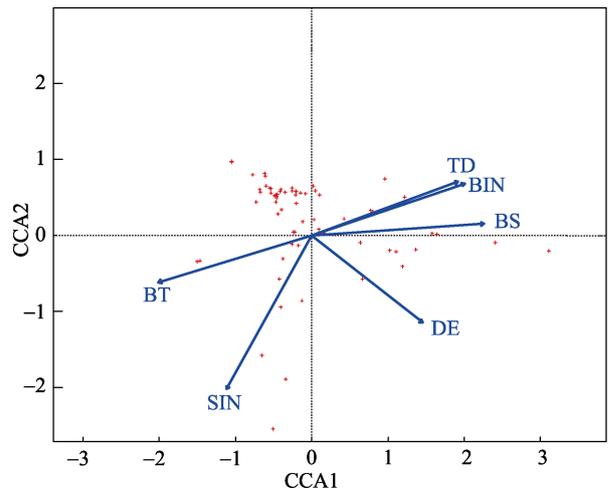


图 5 调查海域鱼类群落与环境因子的 CCA 排序  
BIN: 底层无机氮; BS: 底盐; BT: 底温; DE: 水深;  
SIN: 表层无机氮; TD: 温差。

Fig. 5 CCA biplot of fish assemblage and environment factors in investigation waters

BIN: bottom inorganic nitrogen; BS: bottom salinity; BT: bottom temperature; DE: water depth; SIN: surface inorganic nitrogen; TD: temperature difference.

构建群落结构与环境因子关系。DCA 结果显示，排序轴最大值为 3.3，仍可选择 CCA 进行分析。从图 6 二维排序图可以看出，群落优势群体共有 15 种鱼类组成，带鱼和七星底灯鱼位于第一轴和第二轴的中心，表明二者在空间分布上有极为紧密的联系，存在较高的同质性。鳓鱼、黄鲫和龙头鱼与表层无机氮的箭头连线之间的距离比较小，彼此之间的关联性也较高，说明这 3 种鱼类主要受表层氮元素的制约，在空间分布上具有较高的一致性，这与其近岸栖息地、中上层水域的生态类型相符合。麦氏犀鲂和窄颌带鱼(*Tentoriceps cristatus*)紧密相关，与底层无机氮箭头连线距离相对较近，说明二者主要受底层环境的影响。竹

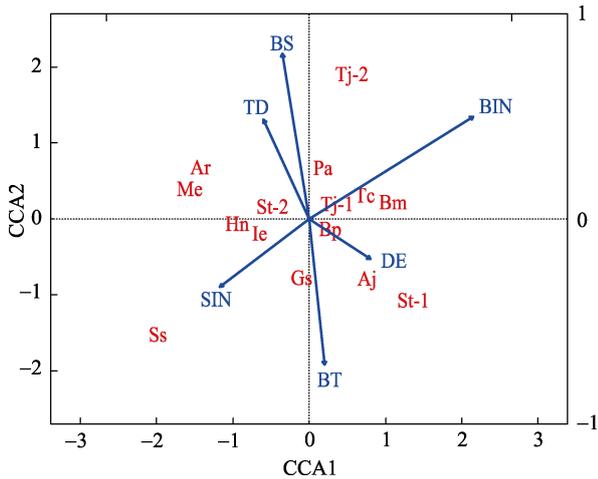


图 6 调查海域优势群落与环境因子的 CCA 排序

Aj: 发光鲷; Ar: 圆舵鲷; Bm: 麦氏犀鲂; Bp: 七星底灯鱼; Gs: 棕斑腹刺鲀; Hn: 龙头鱼; Ie: 鳙鱼; Me: 眼镜鱼; Pa: 刺鲳; Ss: 尖头斜齿鲨; St-1: 多齿蛇鲻; St-2: 黄鲫; Tc: 窄颅带鱼; Tj-1: 带鱼; Tj-2: 竹荚鱼。

Fig. 6 CCA biplot of dominant fish species and environmental factors in investigation waters

Aj: *Acropoma japonicum*; Ar: *Auxis rochei*; Bm: *Bregmaceros maclellandi*; Bp: *Benthosema pterotum*; Gs: *Gastrophysus spadiceus*; Hn: *Harpodon nehereus*; Ie: *Ilisha elongate*; Me: *Mene maculata*; Pa: *Psenopsis anomala*; Ss: *Scoliodon sorrahkawah*; St-1: *Saurida tumbil*; St-2: *Setipinna taty*; Tc: *Tentoriceps cristatus*; Tj-1: *Trichiurus japonicas*; Tj-2: *Trachurus japonicas*.

荚鱼、刺鲳与底盐关系最大, 温差对其也有一定的影响。棕斑腹刺鲀和发光鲷分别对底温和深度有较高的依赖。眼镜鱼(*Mene maculata*)和圆舵鲷均为暖水性种类, 分布区域较为一致, 与环境因子之间的距离都较远, 受环境的影响较小。尖头斜齿鲨栖息水域较为开阔, 与环境因子的关系也不明显。

### 2.8 环境因子对鱼类群落结构影响程度分析

基于完整的鱼类群落结构分析, 不同环境因子展示的箭头长度代表了鱼类空间分布与环境因子的响应程度。其中, 底盐、底温和表层无机氮与鱼类群落的关联性最大, 深度最小。从环境因子与鱼类群落第 1 排序轴的夹角分析, 相关性大小依次为底盐>底层无机氮>温差>水深, 且均与第 1 排序轴正相关; 与第 1 排序轴负相关的环境因子, 排序大小依次为底温和表层无机氮。总体来看, 不考虑相关性方向, 仅考虑相关性大小, 与第 1 排序轴相关性依次为: 底盐>底温>底层无机氮>温差>表层无机氮>水深。第 1 排序轴主要反映了底层环境的重要

性。环境因子与第 2 排序轴的相关系数较第 1 排序轴明显较小, 说明鱼类群落第 1 排序轴更好的反映了群落-环境的相互关系, 环境因子与第 2 排序轴相关性大小依次为: 表层无机氮>水深>温差>底层无机氮>底温>底盐, 主要反映了表层环境的重要性。

基于鱼类群落优势群体生物量的空间结构分析, 选取的环境因子中, 底温、底盐和底层无机氮是鱼类分布空间变异的最主要环境制约因素。从环境因子与鱼类群落第 1 排序轴的夹角分析, 相关性大小依次为底层无机氮>水深>底温, 环境因子与第 1 排序轴均表现为正相关; 与第 1 排序轴负相关的因子排序为无机氮>温差>底盐。不考虑相关性方向, 仅考虑相关性大小, 与第 1 排序轴的相关性依次为: 底层无机氮>深度>表层无机氮>温差>底盐>底温。第 1 排序轴主要反映了无机氮的重要性, 主要解释物种有龙头鱼、黄鲫、鳙、麦氏犀鲂、窄颅带鱼等。与第 1 排序轴相比, 环境因子与第 2 排序轴的相关性明显提高, 表明第 2 排序轴更好的表征了群落结构变化, 环境因子与第 2 排序轴相关性大小依次为: 底温>底盐>温差>表层无机氮>深度>底层无机氮, 主要反映了底层环境的重要性, 解释了竹荚鱼、刺鲳、棕斑腹刺鲀等物种空间分布和资源密度的变化。

根据聚类分析获得的物种群聚特征结果(图 7), 可以将调查水域的种类分为 2 个主要的生态群组, 分别为沿海种群、广布种群。沿海种群所在站位主要包括 T01、T07、T12 和 T13 站, 平均水深 70 m, T01 表层盐度仅有 31.19。沿海种群代表性种类包括龙头鱼、黄鲫、鳙鱼等种类; 广布种群代表种有带鱼、七星底灯鱼、窄颅带鱼、竹荚鱼、刺鲳、麦氏犀鲂等种类。眼镜鱼和圆舵鲷也被聚为一类, 这两个种类均呈斑块状分布在调查水域的北部和南部, 但在台湾岛北部的近岸站位没有出现, 应为偏好高温、高盐水种类, 这里不做单独分析。绘制沿岸种群和广布种群的生物量空间分布, 如图 8 所示。沿海种群聚集性较强, 多集中在海峡口北部近海海域, 而广布种在整个台湾海峡以及台湾岛北部的近海和外海均有大量出现, 且生物量分布较为均匀。这种趋势与台湾海峡水团势力密切相关。夏季, 西南季风盛行, 沿岸流减弱, 海峡

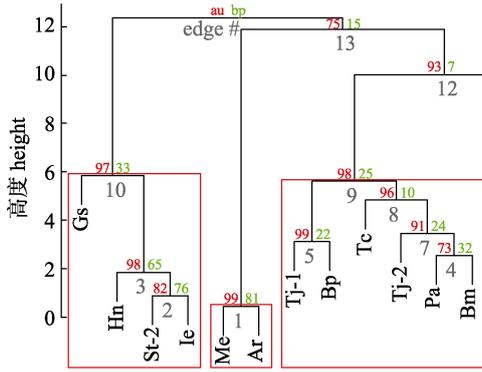


图 7 台湾海峡北部及邻近海域优势物种聚类分析

Aj: 发光鲷; Ar: 圆舵鲷; Bm: 麦氏犀鲂; Bp: 七星底灯鱼; Gs: 棕斑腹刺鲀; Hn: 龙头鱼; Ic: 鳓; Me: 眼镜鱼; Pa: 刺鲳; Ss: 尖头斜齿鲨; St-1: 多齿蛇鲻; St-2: 黄鲫; Tc: 窄颅带鱼; Tj-1: 带鱼; Tj-2: 竹荚鱼。各层次数字值: 显著性  $P$ , 红色: AU, 绿色: BP, 矩形: AU 计算的  $P$  在 95% 水平显著。

Fig. 7 Cluster analysis for dominant species of fish assemblage in the Taiwan strait and its northern adjacent waters. Aj: *Acropoma japonicum*; Ar: *Auxis rochei*; Bm: *Bregmaceros maclellandi*; Bp: *Benthosema pterotum*; Gs: *Gastrophysus spadicus*; Hn: *Harpodon nehereus*; Ic: *Ilisha elongate*; Me: *Mene maculata*; Pa: *Psenopsis anomala*; Ss: *Scoliodon sorrhakowah*; St-1: *Saurida tumbil*; St-2: *Setipinna taty*; Tc: *Tentoriceps cristatus*; Tj-1: *Trichiurus japonicas*; Tj-2: *Trachurus japonicas*. Values of the clustering are  $P$ -values (%). Red values are AU, and green values are BP values. Clusters with AU larger than 95% are highlighted by rectangles.

水域主要被黑潮支梢流和南海表层水控制, 在中部的大片水域和北部的外海水域, 为温度高于 29℃, 盐度高于 33 的高温高盐水影响。从适盐性上, 带鱼、七星底灯鱼、竹荚鱼、刺鲳等种类在东海大陆架都具有较强的外海分布特性, 对台湾海峡水体具有较高的适应性, 因此外海种类在优势种和常见种也都占优较大的比例。而在台湾海峡北口, 平潭岛东北方向存在的上升流输送了丰富的营养盐和低温水体, 浮游植物丰度也相对较

高, 这对偏好河口、沿海等盐度较低水体环境的龙头鱼、黄鲫等种类提供了优良的栖息场所, 在此大量聚集, 形成了与广布种不同的分布格局。

### 3 讨论

#### 3.1 台湾海峡鱼类种类组成特征

从鱼类区系的特征可以看出, 种类组成数量上, 调查海域鱼类以大陆架浅水底层和大陆架岩礁性鱼类为主; 而从生物量结构上, 则以大陆架浅水中底层鱼类为主。鉴于生物量在生态系统能量传递及物质循环过程的重要作用, 可将调查海域鱼类的生态类型确定为大陆架浅水中底层鱼类。从适温性来看, 台湾海峡属于印度-西太平洋的中日-日本亚区, 鱼类区系具有亚热带性特征<sup>[1]</sup>, 但海峡南部又与南海海域相邻, 因此, 海峡北部和南部鱼类区系既有联系又有区别。从鱼类的适温性上来看, 在南海诸岛中比较典型的暖水性珊瑚礁鱼类也多分布在台湾海峡, 如珠蝴蝶鱼、朴蝴蝶鱼、马夫鱼(*Heniochus acuminatus*)等。而台湾海峡北部鱼类种类偏向于东海特征, 与东海大陆架种类相似, 主要为亚热带暖水水域的暖水性和暖温性鱼类, 以暖水性鱼类为主, 如澳洲鲭(*Scomber australasicus*)、白舌尾甲鲈、长辐(*Leiognathus elongatus*)、大甲鲈等; 暖温性鱼类如小黄鱼、鳀鱼、长蛇鲻等。张其永等<sup>[1]</sup>指出, 海峡北部与东海鱼类的群聚系数(0.523)高于海峡南部(0.425)。海峡南部的东南外缘具有比较明显的热带性, 鱼类种数高于北部海峡, 暖水性种数也有同样趋势, 而暖温性种数减少, 因此海峡南部与南海北部群聚性较高(0.519)<sup>[1]</sup>。夏季调查无冷温性

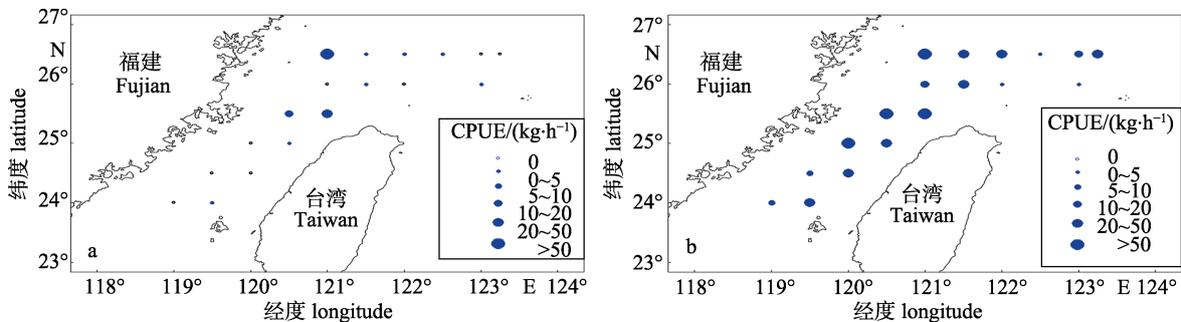


图 8 沿海类群(a)和广布类群(b)空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of coastal species group (a) and dispersed species group (b)

和冷水性种类, 然而, 冬季海峡西部近岸受南下的浙闽沿岸流影响, 以低温、低盐水为主要特征, 起源于东北亚温带区系的冷温性鱼种也偶尔分布于此<sup>[17]</sup>, 如美鲛(*Raja pulchra*)、白斑角鲨(*Squalus acanthias*)。宋普庆等<sup>[11]</sup>在 2007 年秋季台湾海峡调查的连江断面也曾有冷温种虫鲈(*Eopsetta grigorjewi*)记录。

从种类数来看, 台湾海峡鱼类组成与北部东海大陆架和南部南海大陆架鱼类相比, 出现种类有较高的重合。陈永俊等<sup>[17]</sup>通过对台湾海峡鱼类与其他海区鱼类对比, 发现 91.9% 的种类在南海也有分布, 与南海共有种数达到 1560 种; 与东海共有种有 1176 种, 占鱼类种数的 69.3%, 与地处暖温带的黄海共有种也有 329 种。这主要由于台湾海峡是沟通东海与南海的重要通道, 水体环境同时具有浙闽沿岸流和黑潮高温、高盐特性, 形成了与东海和南海鱼类区系较为相似的组成特征。2014 年夏季调查, 台湾海峡及北部海域出现鱼类中, 除白舌尾甲鲈、朴蝴蝶鱼等少数暖水种类外, 90% 以上种类均与东海大陆架海域种类相同, 优势种带鱼和七星底灯鱼也是东海海域的常见优势物种, 可以认为, 调查海域鱼类更接近于东海大陆架鱼类区系特征。这种现象和黑潮分支—台湾暖流向陆架侵袭有关。正常年份, 台湾暖流的锋面可以深入至杭州湾外围, 导致东海中部大面海域被高温、高盐水控制, 形成了适盐性较高的物种组成格局。本次调查的鱼类物种数要高于胶州湾、长江口海域, 但低于西沙群岛和南沙群岛海域。一般认为, 物种数随纬度呈梯度分布<sup>[25]</sup>, 即纬度越低, 物种数越多。然而, 在小尺度分析时, 物种数常与调查水域的空间特征和调查方式密切相关, 胶州湾和长江口海域受到调查范围的局限, 水文环境空间异质性较小, 物种组成种类通常为单一的群落结构类型, 因此实际调查的物种数也相对较少。西沙群岛栖息环境以珊瑚礁为主, 调查方式受到限制, 虽然调查种类数远远高于东海和黄海海域, 但所捕获的物种不足以完全涵盖实际物种数, 与统计物种数量相差较大; 同海域相比, 本次调查的 84 种鱼类中, 软骨鱼类 3 种, 分别为尖头斜齿鲨、路氏双髻鲨和无斑鰨, 硬骨

鱼类 81 种。而 1999 年夏季 126 专项项目在相同水域的调查中, 鱼类有 87 种, 两次调查出现的种类数基本相近。但从种类组成上, 两次调查的共有种只有 36 种, 本次特有种有 48 种, 如白舌尾甲鲈、扁舵鲣、大甲鲈、朴蝴蝶鱼、路氏双髻鲨等种类仅在本次调查中出现, 说明台湾海峡北部及邻近海域的鱼类组成存在较高的年间波动。但两次调查调查结果相比, 在海洋生态系统中占有重要地位的优势种并没有明显变化, 仍以带鱼及其他小型饵料鱼类为主<sup>[10]</sup>, 说明台湾海峡北部的主要生态类型并没有发生明显的格局演替。长期来看, 本次调查物种数较早期统计结果有较大差异, 张其永等<sup>[1]</sup>在 20 世纪 80 年代通过分析台湾海峡北部及其附近海域的水产资源采样记录, 统计出至少 366 种鱼类。戴泉水等<sup>[26]</sup>于 2000–2001 年夏季在台湾海峡海域的调查中记录鱼类有 220 种, 其中六鳃鲨目、须鲨目、真鲨目、鳐目等软骨鱼类就有 28 种, 台湾海峡南部鱼类有 141 种<sup>[27]</sup>。1982–1983 年闽中渔场鱼类资源调查时发现鱼类 312 种<sup>[26]</sup>。与历史调查资料和鱼类记录相比, 本次调查鱼类种数明显减少。这一方面可能和站位设置以及采样偶然性有关; 另一方面, 生态系统内在的多变特征和外在的捕捞胁迫也会影响到调查结果的不同。台湾海峡海洋环境独特, 生态系统复杂, 常常表现为多变的特征<sup>[7]</sup>, 鱼类群落结构的形成又常常受到环境的驱动, 因此, 鱼类的组成也会发生明显变化; 此外, 台湾海峡渔业资源利用已连续多年超过最大可持续产量<sup>[26]</sup>, 鱼类资源也持续处于衰退之中, 可能直接导致一些种类(软骨鱼类尤为明显)的功能性衰退, 甚至消亡。尤其是当关键种类遭到大幅度利用后, 影响到生态系统的能量传递, 也将会导致鱼类群落结构应对捕捞干扰的弹性降低。

### 3.2 优势种特征

优势种是海洋生态系统重要的物种, 对营养传递和能量流动有显著的功能。带鱼和七星底灯鱼作为调查水域的优势种, 渔获量分别占总渔获量的 34.43% 和 36.92%, 两个种类在营养级层中分别代表了大型鱼食性鱼类和饵料型鱼类。图 3 和图 4 显示, 带鱼和七星底灯鱼的高生物量出现位置存在着明显的空间重叠, 生态位重叠指数为

0.75。生态位重叠通常反映的是物种之间对资源利用的相似程度和竞争关系,但由于食性及生活型等生物生态学特征的差异,生态位重叠较大的物种之间不一定存在竞争关系<sup>[20, 33]</sup>,而是通过食性、水层分化共栖、互利,可以在有限的资源环境下实现物种共存。带鱼和七星底灯鱼生态位重叠值较高,但并不存在竞争行为,而是捕食与被捕食关系。七星底灯鱼是在黄海中南部到东海南部广泛分布的中上层小型物种,为大多数中高营养级鱼类的饵料,如带鱼、龙头鱼<sup>[34]</sup>、蓝圆鲹<sup>[35]</sup>等。带鱼是一种凶猛杂食性鱼类,在黄海、东海和南海均有分布,以磷虾等甲壳动物和小型鱼类为主食,兼食头足类、毛额动物等<sup>[36]</sup>,捕食种类较广。张寒野等<sup>[37]</sup>对东海带鱼和小型鱼类空间异质性和空间关系进行过研究,提出六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)、发光鲷和细条天竺鲷的空间异质性尺度接近或超过带鱼,而七星底灯鱼的空间异质性尺度比带鱼小,认为七星底灯鱼的聚集区范围未达到带鱼的聚集范围,两者不存在追随关系。然而,带鱼捕食种类依区域、季节变化而不同,如浙江近海带鱼群体春夏季主要以带鱼幼体、磷虾等为主要食物,夏秋季则主要捕食口足类幼体、七星底灯鱼等种类,在秋季,七星底灯鱼在带鱼食物种类的相对多样性可以达

到 112.3, 冬季甚至更高<sup>[38]</sup>。张寒野等<sup>[37]</sup>也认为食性转换多见于季节性转换,带鱼胃含物中冬季七星底灯鱼明显多于其他季节。长江口海域,带鱼和白姑鱼在夏秋两季与天竺鲷、发光鲷、七星底灯鱼等种类保持着空间追随性,且生态位重叠存在季节变化<sup>[39]</sup>。在台湾海峡北部调查中,带鱼胃饱满度较高,且摄食种类以七星底灯鱼为主,说明夏季带鱼和七星底灯鱼存在着捕食与被捕食关系,这种摄食关系导致七星底灯鱼高生物量分布的台湾海峡北口也成为带鱼较高聚集区。

### 3.3 物种多样性

夏季台湾海峡北部海域优势种仅有带鱼和七星底灯鱼 2 种,渔获质量比例超过总渔获质量的 70%, 丰度比超过 90%, 表明群落结构均匀度较低,优势种突出。物种多样性指标也反映了这一特征,多样性、种类丰富度和均匀度均低于 1999 年夏季同期调查结果,这说明鱼类群落多样性的稳定受到一定程度的干扰。通过比较各海域鱼类多样性的空间特征,调查海域多样性也低于黄海、东海以及南海海域(表 8), 虽然调查时间尺度的不同会引起多样性的波动,但这种差异在深层次上与鱼类群落的内在特征相关。东黄海夏季为渔业资源量在一年周期的最低期,主要经济鱼类在周年内遭到大规模的开发后所剩无几,而各种小型鱼类因捕食压力减

表 8 不同海域物种多样性比较  
Tab. 8 Species diversity comparison among different areas

调查时间 survey time	区域 area	物种数 species number	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index, $H'$	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index, $J$	种类丰富度 Margalef richness index, $S$	文献 reference
2014 夏 sum.	MD	84	1.44	0.51	1.59	本研究 the sfudy project
1999 夏 sum.	MD	87	2.05	0.57	2.45	“126”专项
2011 夏 sum.	JZW	32	1.73	0.76	1.24	[28]
2000 夏 sum.	YSS	-	1.50	0.58	1.88	[29]
2000 夏 sum.	DHN	-	1.45	0.51	2.29	[29]
2000 夏 sum.	DHZ	-	1.53	0.55	2.39	[29]
2004 夏 sum.	CJL	30	0.87	0.26	3.76	[30]
2004 3-7 月 Mar. -Jul.	XS	115	3.24	0.58	2.62	[31]
2004 3-7 月 Mar. -Jul.	NS	101	2.58	0.66	2.46	[31]
2013 春 spr.	NS	374	2.68	0.70	6.40	[32]

注: CJL: 长江口及邻近海域; DHN: 东海北部; DHZ: 东海中部; JZW: 胶州湾; MD: 闽东-闽中渔场; NS: 南沙群岛; XS: 西沙群岛; YSS: 黄海南部。

Note: CJL: the Yangtze River Estuary and adjacent sea areas; DHN: north of the East China Sea; DHZ: east of the East China Sea; JZW: Jiaozhou Bay; MD: the fishing ground of east Fujian to middle Fujian; NS: the Nansha Islands; XS: the Xisha Islands; YSS: south of the Yellow Sea.

小、生存空间扩大等有利因素,资源数量稳定甚至有所恢复,资源结构变化,导致鱼类多样性的增加。台湾海峡海域鱼类繁殖时间早于东黄海,在夏季带鱼等少数种类的补充群体进入渔场,造成鱼类群落优势种突出,多样性下降。南沙群岛岛礁众多,栖息环境异质性高,珊瑚礁鱼类占据主要的营养级层,物种多而单种资源量低,分布较为均匀,通常具有较高的多样性特征,因此珊瑚礁是海洋生物多样性最高的生态系统<sup>[40]</sup>。

### 3.4 物种生物量空间结构和环境因子关系

环境因子通过影响鱼类的栖息地偏好,塑造了物种多样性的地理分布格局。CCA 研究表明,底盐、底温、底层无机氮、表层无机氮、表底层温差和水深对研究海域鱼类的分布格局和群落特点的影响比较显著。从整体群落的角度,黄鲫、龙头鱼和鳓鱼均为中上层鱼类,多分布于近岸浅水水域,与表层无机氮关系最为密切,而与底层无机氮联系疏远,且与深度负相关。这与无机氮近岸高于远岸、北部高于南部的趋势基本一致,表明近岸水域表层营养盐含量对夏季中上层鱼类的群聚起着非常重要的作用,这种关系通过食物链物质循环和能量流动途径得以维系。夏季,台湾海峡主要受寡营养盐的南海暖水控制,但在平潭岛以北海区,西南季风和地形导致的上升流区域营养盐比较丰富,在此形成叶绿素 a 高含量区,浮游植物和浮游动物生长繁殖旺盛<sup>[41-42]</sup>,也吸引了大量的浮游动物食性(黄鲫、鳓鱼)、鱼食性的鱼类(如龙头鱼)索饵聚集。受上升流影响,鱼类群落以低盐、近岸种类为主。与此相反,一些近底层栖息的物种更偏向于底层环境的制约,如窄颅带鱼和麦氏犀鳕虽然在台湾海峡多个站位均有出现,但由于营养物质和饵料基础的适宜性,主要生物量仍集中在底层无机氮含量较高的水域,如台湾海峡北口水域。台湾海峡平均水深 60 m 左右,海峡北部和中部水深 40~80 m,受向北流动的黑潮支梢影响,夏季次表层暖流紧贴海底爬升,底层水团表现高温、高盐、透明度大的特征,流经台湾浅滩渔场、闽南渔场和闽中渔场的东部海区,对渔场有不同程度的影响,暖水性深水鱼类开始聚集,主要表现为大陆架底层鱼类发光鲷和多齿

蛇鲻(*Saurida tumbil*)在海峡中央深水区生物量上升。在台湾海峡深水区,中上层种类刺鲷和竹荚鱼的生存环境和盐度紧密相关,其中竹荚鱼出现在台海海峡北口中央区,刺鲷在北部、中部和南部均有分布,这种偏好盐度的分布趋势与东海海域基本相似<sup>[43]</sup>,主要是和高盐高温水体的台湾暖流流经路径有关,台湾暖流自台湾海峡出北口向东海方向流动,其扩散水域极易形成刺鲷、竹荚鱼等偏好高盐暖水种的聚集。综上所述,夏季台湾海峡鱼类群落受到高营养盐特征的沿岸水体、上升流和高温高盐性质的台湾暖流共同影响,不同物种因生物、生态习性形成生态位分化,占据不同的栖息水层或空间位置;同时,营养级联与食物链关系也将不同的功能种群紧密维系,塑造了台湾海峡丰富而完善的鱼类群落结构。

### 3.5 调查设计对物种组成的影响

调查设计的合理性和准确性在很大程度上会影响到鱼类群落生态学的研究结果<sup>[44]</sup>。目前,国际渔业资源调查常用的传统采样方法包括随机采样、系统采样、分层采样等,这些方法依据调查目的和资源分布的不同也需要选择性应用,如有些方法对评估连续分布的渔业资源的数量具有适用性,还有些适用于稀疏、斑块状或聚集状资源分布。若调查方法与调查目标不协调,各种采样方法也会产生不同层次的偏差<sup>[44]</sup>。在《海洋调查规范》中,一般建议在小于 200 m 的大陆架海区应采用网格状均匀定点法,也可选择通过不同的渔场、不同的资源密度分布区、或不同的等深线分布区设置断面定点站位。赵静等<sup>[44]</sup>采用定点采样、简单随机采样和分层采样评估鱼类群落效果,认为定点采样的效果要弱于简单随机采样和分层随机采样。在底栖动物物种多样性研究中,Cabral 等<sup>[45]</sup>发现基于不同方法得到的丰富度存在着物种之间的差异。在对我国东黄海渔业资源调查方案设计时,刘勇<sup>[46]</sup>认为调查设计优劣受到采样数量水平和优化估算方法的影响。本研究调查方案参照了《中国海洋调查规范》的建议内容,即定点采样设计方法,其缺点是设置站位含有主观因素,但在资源分布稳定的情况下,定点调查方法对资源的动态反映更加敏感,可以更好地进行时

间上资源变动的比较<sup>[44]</sup>,因此在长时间序列渔业资源调查时,定点调查方案也是最常采用的方法。

底拖网是一种主动拖曳型网具,对海洋中底层鱼类有着较好的捕捞效率,也是在大陆架海域调查最常见的调查方式。但底拖网取样代表性与网口的张开高度、调查水域的深度以及物种组成紧密相关,本次调查海域平均深度为 82 m,个别站位最深达到 132 m,因此本次调查渔船在大多数站位获得种类均能够充分代表鱼类组成情况;台湾岛东北部海域,由于水深较深,对上层鱼类捕获率相对较低;尽管如此,许多中上层鱼类也存在着垂直洄游习性,在 T06 站位渔获物种中,不仅有带鱼、棕斑腹刺鲀、短尾大眼鲷等底层鱼类,也有较多的中上层鱼类,如日本鲭、竹荚鱼、圆舵鲣、大甲鲈。由于物种生态习性的差异,在水深超过网口张开高度的海域,调查网具对中上层和底层鱼类的渔获组成存在一定偶然性。为避免鱼类昼夜垂直移动导致调查渔获率低下问题,《海洋调查规范》建议,应根据主要物种的生态习性选择性地开展白天和夜晚调查,如果日、夜均调查,应做昼、夜间渔获率的对照试验。但限于经费的限制,这种调查方式并未普及。从调查网具的结构来看,对不同种类的选择性差异也会影响到鱼类组成,拖网渔具渔获过程主要包括鱼类进入渔具、设法逃逸、最终捕获 3 个主要过程,因此理论上从网具各个结构均有逸出能力,但是相对于网具其他部位,网囊的逃逸率最高<sup>[47]</sup>。本调查网具的网囊网目尺寸仅有 20 mm,逃逸率极低,且当网囊渔获量较高时,网囊呈球状结构而出现堵塞效应,更加降低了鱼类逃逸率。然而,在网身部位以及调查初始阶段,不同体型和游泳行为的差异将不可避免的产生一些逃逸行为,选择性研究是一项复杂的系统工程,需要整合网具结构、鱼类行为、环境等各种因素,目前对各种类的逃逸率仍缺少可量化的评估结果,因此本研究并未对捕捞系数进行校正。物种组成格局的研究必须认识到其所依赖的空间尺度特点<sup>[48]</sup>。早在 19 世纪之前, Watson<sup>[49]</sup>就提出了面积与物种多样性的关系,即“假如选择一个面积更大的样地,就会发现更多的物种”。空间尺度越大,可能存在着更

多的生境异质性,意味着更多的小生境及环境条件,能满足更多具有不同生态位的物种的需要<sup>[50-51]</sup>。台湾海峡调查中,调查海域物种组成与其他研究差别较大的原因也与尺度有关,宋普庆等<sup>[11]</sup>在台湾海峡多样性分析中的调查站点偏向沿岸水域,且断面跨度较大,小生境较多,获得的物种也较丰富;本次调查范围集中在台湾海峡中央水域,除少数站点受到上升流和沿岸流边际的影响,大多数站点的水文条件均受到黑潮支梢和南海水影响,水体性质单一,物种组成也以暖水性鱼类为主。从多样性的角度,物种多样性、均匀度和环境变量均没有显著的相关关系,说明多样性特征是由内在的生态过程决定的,物种呈连续分布或斑块分布,组成不存在环境梯度变化;丰富度指数与深度显著正相关,说明单独以物种多样性指数度量鱼类群落忽略了不同生境生物异质性。CCA 分析的基础是  $\beta$  多样性,能够分析不同地点或群落间物种组成的差异。本研究针对调查海域范围和生境梯度小的特点,采用不同尺度的物种多样性分析方法,即物种多样性和  $\beta$  多样性为基础的多元分析方法,能够较好地认识群落的与环境的相关关系。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Q Y, Zhang Y Z, Liu J F. On the fish fauna of the northern Taiwan Strait and its adjacent seas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1986, 17(2): 144-151. [张其永, 张雅芝, 刘家富. 台湾海峡北部及其附近海区鱼类区系研究[J]. *海洋与湖沼*, 1986, 17(2): 144-151.]
- [2] Wang Y G. Studies on ecology of Meiofauna in the Taiwan Strait and its adjacent waters[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. [王彦国. 台湾海峡及其邻近海域小型底栖动物生态学研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.]
- [3] Lu Z B, Dai Q S, Yan Y M. Productivity and maximum sustainable yield of fishery resources in Taiwan Strait and its adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2002, 9(1): 28-32. [卢振彬, 戴泉水, 颜尤明. 台湾海峡及其邻近海域渔业资源生产力和最大持续产量[J]. *中国水产科学*, 2002, 9(1): 28-32.]
- [4] Lu Z B, Dai Q S, Yan Y M. An estimation of resources of chub mackerel, round scad and other pelagic fish stocks in the Taiwan Strait and adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, 7(1): 41-45. [卢振彬, 戴泉水, 颜尤明. 台湾海峡及其邻近海域鲈鲷鱼类群聚资源的评估

- [J]. 中国水产科学, 2000, 7(1): 41–45.]
- [5] Li Y K, Yu N, Chen L Q, et al. Ecological modeling on structure and functioning of southern East China Sea ecosystem[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(2): 30–39. [李云凯, 禹娜, 陈立侨, 等. 东海南部海区生态系统结构与功能的模型分析[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(2): 30–39.]
- [6] Dai T Y. Sustainable yield of fishery resources in the Taiwan Straits and its adjacent waters[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2005, 26(3): 1–8. [戴天元. 台湾海峡及邻近海域渔业资源可持续开发量研究[J]. *海洋水产研究*, 2005, 26(3): 1–8.]
- [7] Li S J, Huang J Q, Guo D H, et al. Study on ecology of marine plankton in Taiwan Strait, China[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2006, 45(sup. 2): 24–31. [李少菁, 黄加祺, 郭东晖, 等. 台湾海峡浮游生物生态学研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(增刊 2): 24–31.]
- [8] Hong H S, Shang S L, Zhang C Y, et al. Evidence of ecosystem response to the interannual environmental variability in the Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 63–69. [洪华生, 商少凌, 张彩云, 等. 台湾海峡生态系统对海洋环境年际变动的响应分析[J]. *海洋学报*, 2005, 27(2): 63–69.]
- [9] Lin G M, Yang Q L. Species diversity and the distribution of micro-phytoplankton in the Taiwan Strait[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(1): 31–45. [林更铭, 杨清良. 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征[J]. *生物多样性*, 2007, 15(1): 31–45.]
- [10] Lin L S, Zheng Y J, Ma C Y. Distribution of nekton stock density and its community structure in Taiwan Strait in summer and autumn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1948–1951. [林龙山, 郑元甲, 马春艳. 台湾海峡夏秋季游泳动物资源分布及群落结构[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1948–1951.]
- [11] Song P Q, Zhang J, Lin L S, et al. Nekton species composition and biodiversity in Taiwan Strait[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 32–40. [宋普庆, 张静, 林龙山, 等. 台湾海峡游泳动物种类组成及其多样性[J]. *生物多样性*, 2012, 20(1): 32–40.]
- [12] Yue Y M, Wang K L, Zhang W, et al. Relationships between soil and environment in peak-cluster depression areas of karst region based on canonical correspondence analysis[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 243–249. [岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤环境关系研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 243–249.]
- [13] Zhai L, Xu B D, Ji Y P, et al. Spatial pattern of fish assemblages and the relationship with environmental factors in Yellow River Estuary and its adjacent waters in summer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2852–2858. [翟璐, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 黄河口及其邻近水域夏季鱼类群落空间格局及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2852–2858.]
- [14] Li Y C, Zhang D Z, He D H. Species diversity of ground-dwelling beetles and its relationship with environmental factors in the artificial caragana brushland of fixed sandy lands in Ningxia[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 109–117. [李岳诚, 张大治, 贺达汉. 荒漠景观固沙柠条林地地表甲虫多样性及其与环境因子的关系[J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 109–117.]
- [15] Zheng Y J, Chen X Z, Cheng J H, et al. The Biological Resources and Environment in Continental Shelf of the East China Sea[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technic Publishers, 2003. [郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.]
- [16] Liu J, Ning P. Species composition and faunal characteristics of fishes in the Yellow Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 764–769. [刘静, 宁平. 黄海鱼类组成、区系特征及历史变迁[J]. *生物多样性*, 2011, 19(6): 764–769.]
- [17] Chen Y J, Zhang J, Song P Q, et al. Composition of the Taiwan Strait fish fauna[J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(4): 525–531. [陈永俊, 张静, 宋普庆, 等. 台湾海峡鱼类组成及其生态区系[J]. *生物多样性*, 2014, 22(4): 525–531.]
- [18] Froese R, Pauly D. Fishbase. <http://www.fishbase.org>. 2014.
- [19] Shao K T. The fish database of Taiwan. <http://fishdb.sinica.edu.tw>. 2014.
- [20] Hu C Y, Shui Y Y, Tian K, et al. Functional group classification and niche identification of major fish species in the Qixing Islands marine reserve, Zhejiang province[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(2): 175–184. [胡成业, 水玉跃, 田阔, 等. 浙江七星列岛海洋特别保护区主要鱼类功能群划分及生态位分析[J]. *生物多样性*, 2016, 24(2): 175–184.]
- [21] Wu X X, Li Y F, Shen Z W, et al. Relationship between phytoplankton community structure and aquatic environmental factors in the Chishui River, a protected tributary of the Yangtze River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(2): 361–368. [吴湘香, 李云峰, 沈子伟, 等. 赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(2): 361–368.]
- [22] Zhang Y Q, Xu Q, Xu Q Z, et al. Demersal fish community structure around the Qiansan Islets in Haizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(1): 156–168. [张迎秋, 许强, 徐勤增, 等. 海州湾前三岛海域底层鱼类群落结构特征[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(1): 156–168.]
- [23] Suzuki R. Pvcust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering[J]. *Bioinformatics*. 2006, 22(12): 1540–1542.

- [24] Peng S Y, Li X Z, Wang H F, et al. Niche analysis of dominant species of macrozoobenthic community in the southern Yellow Sea in spring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1917–1928. [彭松耀, 李新正, 王洪法, 等. 南黄海春季大型底栖动物优势种生态位[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1917–1928.]
- [25] Zheng L, Lv Z B, Li F, et al. Comparison of ontaxonomic diversity of fish community among the Yellow River estuary, Yangtze River estuary, Pearl River estuary and their adjacent waters[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(5): 530–535. [郑亮, 吕振波, 李凡, 等. 黄河口、长江口和珠江口水域鱼类分类学多样性对比研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(5): 530–535.]
- [26] Dai Q S, Lu Z B, Dai T Y, et al. Species composition of nekton and resources state of Taiwan Strait and its adjacent waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(2): 205–210. [戴泉水, 卢振彬, 戴天元, 等. 台湾海峡及其邻近海域游泳生物种类组成和资源现状[J]. *水产学报*, 2005, 29(2): 205–210.]
- [27] Dai Q S, Lu Z B, Hong M J, et al. Fauna composition of nekton and fishery resources in the southern waters of Taiwan Strait[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(4): 360–366. [戴泉水, 卢振彬, 洪明进, 等. 台湾海峡南部海域游泳生物区系组成和渔业资源现状[J]. *中国水产科学*, 2004, 11(4): 360–366.]
- [28] Zhai L, Han D Y, Fu D J, et al. Fish community structure and the relationship with environmental factors in Jiaozhou Bay and adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(4): 810–821. [翟璐, 韩东燕, 傅道军, 等. 胶州湾及其邻近海域鱼类群落结构及与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(4): 810–821.]
- [29] Liu Y, Li S F, Cheng J H. A study on seasonal changes of the fish communities in the East China Sea and the Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 108–114. [刘勇, 李圣法, 程家骅. 东海、黄海鱼类群落结构的季节变化研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 108–114.]
- [30] Li J S, Li S F, Ding F Y, et al. Analysis on annual change of fish diversity in Yangtze estuary offshore water area[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(4): 637–643. [李建生, 李圣法, 丁峰元, 等. 长江口近海鱼类多样性的年际变化[J]. *中国水产科学*, 2007, 14(4): 637–643.]
- [31] Chen G B, Li Y Z, Chen X T. Species diversity of fishes in the coral reefs of South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 373–381. [陈国宝, 李永振, 陈新军. 南海主要珊瑚礁水域的鱼类物种多样性研究[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 373–381.]
- [32] Li Y, Zhang J, Zhang R, et al. Fish diversity in southwestern seas of Nansha Islands and the mouth of Beibu Bay[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(2): 166–174. [李渊, 张静, 张然, 等. 南沙群岛西南部和北部湾口海域鱼类物种多样性[J]. *生物多样性*, 2016, 24(2): 166–174.]
- [33] Cheng Z Q, Zhang K B, Chang J, et al. Vegetable niche of different enclosure measures in Yanchi county, Ningxia[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1537–1542. [程中秋, 张克斌, 常进, 等. 宁夏盐池不同封育措施下的植物生态位研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1537–1542.]
- [34] Lin X P, Zhu Z J, Li P F. Feeding habits of *Harpadon nehereus* in the East China Sea region[J]. *Marine Fisheries*, 2010, 32(3): 290–296. [林显鹏, 朱增军, 李鹏飞. 东海区龙头鱼摄食习性的研究[J]. *海洋渔业*, 2010, 32(3): 290–296.]
- [35] Jiang R J, Xu H X, Jin H W, et al. Feeding habits of blue mackerel scad *decapterus maruadsi* Temminck et Schlegel in the East China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(2): 216–227. [蒋日进, 徐汉祥, 金海卫, 等. 东海蓝圆鲹的摄食习性[J]. *水产学报*, 2012, 36(2): 216–227.]
- [36] Chen Y Q, Zhu Q Q. A study on the feeding habit of hairtail fish and the relationship between its food bases and fishing grounds in the East China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1984, 8(2): 135–145. [陈亚瞿, 朱启琴. 东海带鱼食性、饵料基础及与渔场的关系[J]. *水产学报*, 1984, 8(2): 135–145.]
- [37] Zhang H Y, Lin L S. Spatial heterogeneity of *Trichiurus japonicus* and small-scale fish in East China Sea and their spatial relationships[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 708–711. [张寒野, 林龙山. 东海带鱼和小型鱼类空间异质性及其空间关系[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 708–711.]
- [38] Lin L S, Yan L P, Ling J Z, et al. Food habits of hairtail in the East China Sea region[J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(3): 187–192. [林龙山, 严利平, 凌建忠, 等. 东海带鱼摄食习性的研究[J]. *海洋渔业*, 2005, 27(3): 187–192.]
- [39] Li X S, Yu Z H, Sun S, et al. Ecological niche breadth and niche overlap of dominant species of fish assemblage in Yangtze River estuary and its adjacent waters[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2353–2359. [李显森, 于振海, 孙珊, 等. 长江口及其毗邻海域鱼类群落优势种的生态位宽度与重叠[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2353–2359.]
- [40] Yin J Q, Huang L M, Li K Z, et al. Species diversity and community structure of zooplankton in the Zhubi Atoll, Nansha Islands, South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 685–695. [尹健强, 黄良民, 李开枝, 等. 南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构[J]. *生物多样性*,

- 2011, 19(6): 685–695.]
- [41] Zhang C Y, Shang S L, Hong H S. Spatial patterns of annual cycles in surface chlorophyll a in the Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 165–170. [张彩云, 商少凌, 洪华生. 台湾海峡表层叶绿素 a 年变化特征的空间差异[J]. *海洋学报*, 2006, 28(2): 165–170.]
- [42] Ji W D, Huang S G. Characteristics of nutrient changes in the west of Taiwan Strait, a statistical analysis of the effects of water system mixed and phytoplankton uptake and transfer on the changes of inorganic nitrogen content[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(3): 324–332. [暨卫东, 黄尚高. 台湾海峡西部营养盐变化特征 II. 水系混合及浮游植物摄取转移对无机氮含量变化影响的统计分析[J]. *海洋学报*, 1990, 12(3): 324–332.]
- [43] Hu F, Yan L P. The resource status and biomass distribution of wart perch *Psenopsis anomala* in the East China Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(2): 99–104. [胡芬, 严利平. 东海刺鲷资源状况及数量分布[J]. *海洋渔业*, 2006, 28(2): 99–104.]
- [44] Zhao J, Zhang S Y, Lin J, et al. A comparative study of different sampling designs in fish community estimation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1181–1187. [赵静, 章守宇, 林军, 等. 不同采样设计评估鱼类群落效果比较[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1181–1187.]
- [45] Cabral H N, Murta A G. Effect of sampling design on abundance estimates of benthic invertebrates in environmental monitoring studies[J]. *Mar Ecol Prog Ser*. 2004, 276: 19–24.
- [46] Liu Y. Theoretical study on the sampling methods of survey for fishery stock estimation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. [刘勇. 渔业资源评估抽样调查方法的理论探讨与研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.]
- [47] Sun M C. Fishing Gear and Fishing Method Selectivity[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. [孙满昌. 渔具渔法选择性[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.]
- [48] Cai B F, Yu R. Comparison on spatial scale analysis methods in landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2279–2287. [蔡博峰, 于嵘. 景观生态学中的尺度分析方法[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2279–2287.]
- [49] Watson H C. *Cybele Britannica, or British Plants and Their Geographical Relations*[M]. London: Longman Company, 1870.
- [50] Zhou H Z, Yu X D, Luo T H, et al. How does species diversity change spatio-temporal patterns and scales?[J]. *Biodiversity Science*, 2000, 8(3): 325–336. [周红章, 于晓东, 罗天宏, 等. 物种多样性变化格局与时空尺度[J]. *生物多样性*, 2000, 8(3): 325–336.]
- [51] Peng S J, Huang Z L, Xu G L, et al. Effects of habitat heterogeneity on forest community diversity in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. *Guihaia*, 2003, 23(5): 391–398. [彭闪江, 黄忠良, 徐国良, 等. 生境异质性对鼎湖山植物群落多样性的影响[J]. *广西植物*, 2003, 23(5): 391–398.]

## Fish assemblages and environmental interpretation in the northern Taiwan Strait and its adjacent waters in summer

LIU Zunlei, YANG Linlin, YAN Liping, YUAN Xingwei, CHENG Jiahua

Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

**Abstract:** The Taiwan Strait, located between the South China Sea and the East China Sea, is an important channel for migratory fishes between the two waters, and therefore has a unique and high diversity of fish species due to its spatial marine environment. However, the rapid development of coastal aquaculture and excessive exploitation of natural resources has resulted in habitat degradation, and the ecosystem has been reverting to a low stage of development. Understanding the relationships between environmental factors and fish assemblages is thus essential for sustainable exploitation of fish resources. In this paper, fish species composition, dominant species, fauna characteristics, species diversity and spatial distribution in the Taiwan Strait and its adjacent waters were studied using data collected from bottom trawl surveys in summer (July) 2014. We also identified the spatial structures of fish assemblages and their relationships with environmental variables. In total, 84 fish species were captured in the survey, belonging to 69 genera, 48 families and 16 orders; these were mainly composed of warm-water, continental shelf demersal fish and continental shelf reef-associated fishes. The primary dominant species were *Trichiurus japonicas* and *Benthoosema pterotum* with an average biomass of 33.84 kg/h and 31.56 kg/h, respectively. Cumulative biomass accounted for 46.92% of total fish biomass, and the regression contribution of the biomass to total biomass was 0.30 and 0.62, respectively. High biomass of the dominant species was mainly distributed in the offshore waters of the northern Taiwan Strait, an obvious overlapping of ecological spatial niche. According to hierarchical cluster analysis, fish assemblages were classified into two groups: a coastal community dominated by coastal species such as *Harpodon nehereus*, *Setipinna taty* and *Ilisha elongata*; and a widespread community dominated by species such as *Trichiurus japonicas*, *Tentoriceps cristatus*, *Benthoosema pterotum*, *Trachurus japonicas*, *Psenopsis anomala* and *Bregmaceros maclellandi*. Diversity analysis showed that the Shannon–Wiener diversity index  $H'$  ranged between 0.22 and 2.31 with a mean of 1.44; the Pielou evenness index  $J$  ranged from 0.11 to 0.72 with a mean of 0.51; and the Margalef species richness index  $S$  ranged from 0.36 to 4.04 with a mean of 1.59. Significant linear negative correlation existed between the Margalef species richness index and total biomass. A positive correlation with water depth was also found, which indicated that the Margalef species richness index rose with depth, but decreased as biomass increased. Canonical correspondence analysis suggested that the main environmental factors affecting the spatial patterns of the fish assemblage in summer were bottom water salinity, inorganic nitrogen, temperature and temperature difference between surface layer and bottom layer. However, the main environmental factors affecting the spatial patterns of the dominant fish assemblage were bottom water salinity, temperature and inorganic nitrogen.

**Key words:** Taiwan Strait; bottom trawl; fish assemblages; biomass distribution; canonical correspondence analysis

**Corresponding author:** CHENG Jiahua. E-mail: ziyuan@sh163.net