

DOI: 10.5846/stxb201808141735

郭建忠, 陈作志, 田永军, 张魁, 许友伟, 徐姗楠, 李纯厚. 胶州湾海域鱼类群落种类组成及多样性. 生态学报, 2019, 39(19): - .

Guo J Z, Chen Z Z, Tian Y J, Zhang K, Xu Y W, Xu S N, Li C H. Species composition and diversity of fish community in Jiaozhou Bay. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

胶州湾海域鱼类群落种类组成及多样性

郭建忠^{1,2}, 陈作志¹, 田永军², 张 魁¹, 许友伟¹, 徐姗楠^{1,*}, 李纯厚¹

1 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300

2 中国海洋大学水产学院渔业海洋学实验室, 青岛 266003

摘要: 为了解胶州湾海域鱼类群落结构特征, 根据 2016—2017 年间对胶州湾海域进行的 4 个航次底拖网调查数据, 采用相对重要性指数、生态多样性指数和典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)、非线性多维标度排序 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 等方法分析了胶州湾海域鱼类群落的种类组成和多样性特征。结果表明: 调查共采集到鱼类 46 种, 隶属 2 纲 10 目 30 科 41 属, 以硬骨鱼纲鱼类为主 (45 种, 97.83%)。其中, 鲈形目 (Perciformes) 最多 (22 种, 47.83%), 其次是鲉形目 (Scorpaeniformes), 占 15.22%。种类数季节变化明显, 以夏季最高, 23 种; 秋季最低, 16 种。优势种组成以赤鼻棱鯮 (*Thryssa kammalensis*)、褐菖鲉 (*Sebastes marmoratus*)、褐牙鲂 (*Paralichthys olivaceus*)、大泷六线鱼 (*Hexagrammos otakii*)、许氏平鲉 (*Sebastes schlegeli*) 和矛尾鰕虎鱼 (*Chaeturichthys stigmatias*) 等鱼类为主。多样性分析显示, 鱼类物种多样性存在明显的季节差异。多样性指数 (H') 季节变化范围为 1.668—2.453, 以夏季最高, 春季最低; 均匀度指数 (J') 季节变化范围为 0.577—0.808, 以秋季最高, 春季最低; 丰富度指数 (D') 季节变化范围为 2.431—3.123, 以冬季最高, 秋季最低。典范对应分析表明, 水温、盐度、水深和 pH 是影响胶州湾海域鱼类群落物种组成的主要环境因子, 且水温和 pH 是影响鱼类群落结构及多样性时空变化的主要因子。与历史调查资料相比, 由于人类活动对胶州湾生态系统的干扰, 鱼类群落结构发生了较大变化, 优势种组成更替明显, 多样性水平降低, 鱼类群落结构趋向简单化。

关键词: 鱼类; 种类组成; 多样性; 人类活动; 胶州湾

Species composition and diversity of fish community in Jiaozhou Bay

GUO Jianzhong^{1,2}, CHEN Zuozhi¹, TIAN Yongjun², ZHANG Kui¹, XU Youwei¹, XU Shannan^{1,*}, LI Chunhou¹

1 Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

2 Laboratory of Fishery and Oceanography, College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: Jiaozhou Bay is a temperate semi-closed bay in the Yellow Sea, located in the Shandong Province, along the northern coast of China. In order to understand the characteristics of fish community structure in Jiaozhou Bay, data from four bottom trawl surveys (2016—2017) were used to analyze the variations in fish species composition and species diversity of fish communities by using the means of relative importance index, ecological diversity indices, canonical correspondence analysis, and non-metric multidimensional scaling. The results showed that a total of 46 fish species were captured, which belonged to 2 classes, 14 orders, 53 families, and 84 genera. Among them, Osteichthyes fishes with 45 species were the dominant one, accounting for 97.83% of the total fishes. Of these, the Perciformes fishes were the most dominant group, in which 22 species in 19 genera and 13 families were observed, which accounted for 47.83%, and

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0900902); 国家重点基础研究发展计划 (2015CB452904)

收稿日期: 2018-08-14; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn

followed by the Scorpaeniformes fishes with 7 species in 7 genera and 6 families, accounting for 15.22%. The seasonal variations in the number of fish species were obvious, with the highest being in summer with 23 species and the lowest in autumn with 16 species. The fishes in Jiaozhou Bay belonged to temperate fauna, which was dominated by the warm temperate fishes (47.83%), and followed by warm water fishes (30.43%). Cold temperate fishes, which were the least abundant one (21.74%). The predominant species of fish communities included *Thryssa kammalensis*, *Sebastes marmoratus*, *Paralichthys olivaceus*, *Hexagrammos otakii*, *Sebastes schlegelii*, and *Chaeturichthys stigmatias*. The diversity analysis showed that there were significant seasonal variations in fish species diversity. The values of Shannon-Wiener diversity index (H') ranged from 1.668 to 2.453 with an average of 2.031, the highest was in summer and the lowest in spring. The values of Pielou evenness index (J') ranged from 0.577 to 0.808 with an average of 0.687, with the highest value recorded in autumn and the lowest in spring. The values of Margalef richness index (D') ranged from 2.431 to 3.123 with an average of 2.824, the highest was in winter and the lowest in autumn. The Canonical Correspondence Analysis (CCA) revealed that pH, dissolved oxygen (DO), water temperature, and water depth were the most important environmental factors affecting the species composition of fish communities in Jiaozhou Bay. Water temperature and pH were the main factors affecting both spatial and temporal changes in fish community structure and diversity. Compared with the historical survey data, the community structure of fish had changed greatly due to disturbances from anthropogenic activities in Jiaozhou Bay ecosystem. These changes included changes in the species diversity level with a reduction in the number of species, and a significant change in the composition of the dominant species, suggesting that a simplification of fish community structure has resulted in this bay.

Key Words: fish; species composition; diversity; anthropogenic activities; Jiaozhou Bay

胶州湾是青岛的“母亲河”,位于山东半岛南部,黄海之滨,是我国北方典型的半封闭海湾。湾内形状略呈扇形,生物资源丰富,是多种经济鱼类繁衍生息的重要场所^[1]。20世纪80年代以来,随着沿岸经济的迅速发展,大型桥梁工程、水产养殖、滩涂围垦、海上船舶及过度捕捞等人类活动和自然扰动引起胶州湾生态环境恶化,面积缩小^[2],近岸水域富营养化^[3],鱼类群落生态特征发生变化,资源衰退,种类数降低,优势种以小型低值底层鱼类为主^[4-6]。因此,开展胶州湾鱼类群落组成和多样性研究,对了解海域目前鱼类资源状况、资源合理开发与管理以及生态恢复具有重要意义。

20世纪80年代至今,对胶州湾鱼类资源研究主要集中在群落结构^[6]、多样性^[7]和生物学^[8-10]等方面。由于前人调查年代较早、间隔时间长、调查区域有限、且连续作业航次调查较少,因此,为了了解胶州湾鱼类群落结构现状特征及长期以来在自然扰动和人类活动干扰下鱼类资源的历史演变状况,开展胶州湾海域鱼类资源调查研究是必要的。本文根据2016—2017年4个连续航次调查资料,对胶州湾鱼类群落种类组成及多样性进行了研究;并结合历史资料,对比分析了20世纪80年代以来胶州湾鱼类种类组成、多样性、资源量以及主要经济鱼类生物学的变化特征,旨在为胶州湾海域鱼类物种多样性的保护及渔业资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海域

胶州湾位于35°38'N—36°18'N,120°04'E—120°23'E之间,东岸为青岛市区,北岸为红岛,西南岸为黄岛和薛家岛,受地理位置、陆地气候、水深以及黄海沿岸水流的影响,胶州湾属于暖温带季风型气候,四季分明,1月份最冷,平均温度为-1.2℃,8月份最热,平均温度为25.5℃;其中,5—11月多在15℃以上,年平均气温为12.2℃;盐度较高,约为31.5—32.4,且春末夏初盐度较高,雨季受降雨及地面径流影响,盐度较低;潮汐为典型半日潮,湾内波浪以风浪为主^[1]。海岸线长度为206.8 km,南北长33 km,东西宽28 km,面积约343.1 km²;沿岸入湾河流较多,有大沽河、洋河、海泊河、李村河等,且大沽河水流量最大^[11]。北部浅海区为菲律宾蛤仔

(*Ruditapes philippinarum*)底播养殖区,且菲律宾蛤仔是胶州湾目前的主要捕捞对象,长期过度捕捞使得渔业资源现状处于衰退状态^[12]。如 1981—1982 年以青鳞小沙丁(*Sardinella zunasi*)和斑鲷(*Konosirus punctatus*)和带鱼(*Trichiurus lepturus*)为优势种群^[1],转变为 2011 年以方氏云鳎(*Enedras fangi* Wang et Wang)和六丝钝尾鰕虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)为主^[6],且小型低值鱼类成为胶州湾鱼类优势种群^[7]。

1.2 站位与样品采集

调查航线按照《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)和《海洋监测规范》(GB 17378—2007),渔业资源按照《海洋渔业资源调查规范》(SC/T 9403—2012)进行调查。由于北部浅海区为菲律宾蛤仔底播养殖区,禁止拖网捕捞,因此调查站位设置在胶州湾 5 m 以深水域。采用分层随机取样(stratified random sampling)方法设计调查站位,根据水深和地理位置不同,在湾内、湾外海域共设置 9 个站点进行海洋生态和渔业资源调查。分别于 2016 年 1 月(冬季)、2016 年 4 月(春季)、2016 年 11 月(秋季)和 2017 年 8 月(夏季)利用中国水产科学研究院黄海水产研究所“黄海星”号科学调查船进行 4 个航次调查,其中,选取春季 7 个(无 S3 和 S8)、夏季 8 个(无 S6)、秋季 9 个和冬季 7 个(无 S3 和 S5)拖网作业站位进行渔业资源现状调查(图 1)。所有调查中,每个站位拖曳 1 次,每次拖曳 1 h,平均拖曳速度为 3.0 kn。捕获样品在现场进行鉴定和分类,并对每种物种进行生物学测定。

1.3 渔获物鉴定

依据《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)规范要求,以 Nelson 等^[13]、李明德等^[14]和刘瑞玉等^[1]分类系统对渔获鱼类物种进行鉴定与分类,并依据前人研究来划分鱼类物种的适温类型^[15-16]。

1.4 研究方法

鱼类物种的生态优势度用 Pinkas 等^[17]提出的相对重要性指数(Index of Relative Important, IRI)来评价。等级划分依据 IRI>1000 为优势种;100<IRI<1000 为重要种;10<IRI<100 为常见种,1<IRI<10 为一般种,IRI<1 为少有种^[18]:

$$IRI = (N+W) \times F \quad (1)$$

式中, N 为某一鱼类物种尾数占渔获总尾数的百分比; W 为某一鱼类种类重量占渔获总重量的百分比; F 为某一鱼类种类出现的站位数量占总调查站位数量的百分比。

鱼类群落的生态多样性用 Shannon—Wiener 多样性指数 H' 、Margalef 种类丰富度指数 D' 和 Pielou 均匀度指数 J' 来分析^[19]。由于不同鱼类种间、种内个体差异较大,Willm^[20]提出用生物量取代个体数量来计算鱼类物种多样性更易接近种类间能量分布,因此本研究根据渔获鱼类物种生物量来计算鱼类群落的多样性指数 H' 。

$$H' = -\sum (W_i/W) \ln(W_i/W) \quad (2)$$

$$J' = H'/H_{\max} H_{\max} = \ln S \quad (3)$$

$$D' = (S-1)/\ln N \quad (4)$$

式中, S 为鱼类种类数, W 为某一渔获鱼类物种的总生物量, W_i 为第 i 站某一渔获鱼类物种的生物量, N 为站点渔获鱼类物种的个体数量。

鱼类种类组成的季节更替用种类更替率 A 来分析^[1];各季节鱼类物种相似性指数用 Jaccard 相似性指数

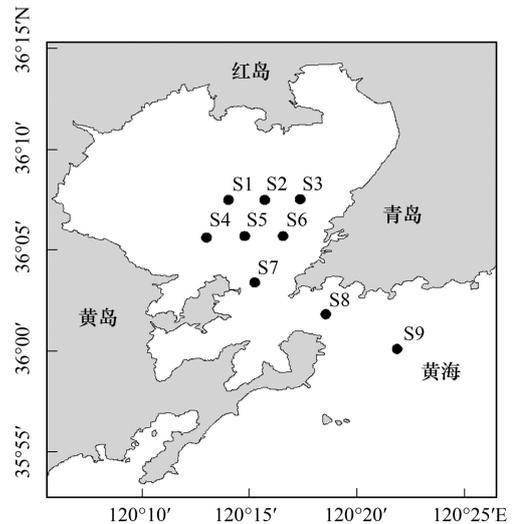


图 1 胶州湾海域站位采样示意图

Fig.1 Map of sampling stations in the Jiaozhou Bay
“S”: 站位 Sampling

J_s 表示^[21]:

$$A = [C / (C + N)] \times 100\% \quad (5)$$

$$J_s = c / (a + b - c) \quad (6)$$

式中, C 为相邻两季节间种类增加及减少数, N 为两季节共有的种类数, a 、 b 分别为相邻季节的物种数, c 为其共有物种数。

1.5 环境数据

海洋环境数据测量按《海洋监测规范》(GB17378.5—2007)进行。由船载探测仪获得各站位水深, 萨氏盘测得海水透明度; 由 YSI Pro Series 型多功能水质仪测得海水盐度、表底层水温、溶解氧和 pH 等物理环境数据; 由荧光分光光度计测得叶绿素 a 值。

1.6 数据处理

由于各年代间调查均采用底拖网, 网目差异不大, 主要是拖网时间有所差异, 为了年代间具有可比性, 在进行数据分析前对原始数据进行标准化处理, 每个航次各站位渔获质量和尾数均标准化成拖网时间 1 h 的渔获值。调查数据经标准化处理校正后, 用 ArcGis10.3 软件和 SPSS19.0 统计分析软件进行数据处理分析。各年代间优势种计算方法均采用相对重要性指数来评价 (IRI > 1000 为优势种), 具有可比性。优势度、多样性指数、物种更替率计算方法均按照季节来计算, 比较季节间差异; 全年多样性指数取各季节的平均值。利用相关检验和生物—环境分析研究影响鱼类群落物种组成及多样性的环境因子。其中, 生物—环境分析采用 CANOCO4.5 软件中的典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 进行分析处理数据, 排序结果用物种—环境因子关系的双序图来表示; 单因子相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM) 用于不同季节群落物种组成及多样性差异的显著性检验。运用非线性多维标度排序 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 对 4 个季节鱼类群落结构进行显著性检验, 其中 NMDS 采用 PRIMER5.0 软件来进行操作; 所得到的二维点图有一定解释意义; 其中 stress < 0.1, 表明排序较好; stress < 0.05, 表明排序有很好代表性^[22]。

2 结果

2.1 种类组成

捕获鱼类 46 种, 隶属 2 纲 10 目 30 科 41 属, 以硬骨鱼纲鱼类占绝对优势, 45 种, 占总渔获种类数的 97.83%; 软骨鱼纲鱼类 1 种, 占总渔获种类数的 2.17%。其中, 鲈形目 (Perciformes) 最多, 其次是鲉形目 (Scorpaeniformes) 和鲽形目 (Pleuronectiformes); 其余目种类数均不超过 5 种, 所占比例均小于 10.00%。全年 4 个季节都出现的鱼类物种有 1 种, 为许氏平鲷 (*Sebastes schlegeli*), 占种类总数的 2.17%。各季节鱼类物种组成存在差异, 种、属和科所占比例均以夏季最高, 秋季最低, 春、冬季次之 (表 1)。

表 1 胶州湾海域各季节间鱼类物种分类单元的组成比例

Table 1 The proportion of fish species classification units in the Jiaozhou Bay by seasons

	目 Order		种 Species		属 Genus		科 Family	
	数量 Number	%						
春季 Spring	4	40.00	18	39.13	17	41.46	14	46.67
夏季 Summer	6	60.00	23	50.00	21	51.22	16	53.33
秋季 Autumn	7	70.00	16	34.78	16	39.02	13	43.33
冬季 Winter	6	60.00	21	45.65	20	48.78	15	50.00
全年 Annual	10		46		41		30	

胶州湾海域鱼类适温性组成以暖温性种占优势, 暖水性种次之, 冷温性种最少, 分别有 22 种、14 种和 10 种, 占渔获总种类数的 47.83%、30.43% 和 21.74%。季节变化上存在明显差异。春季, 暖温性和冷温性种类均最多, 8 种; 暖水性种类最少, 2 种。夏季, 暖水性种类最多, 11 种, 冷温性种类最少, 2 种。秋季, 暖温性种类最

多,11种,冷温性种类最少,1种。冬季,暖温性种类最多,11种,暖水性种类最少,2种(图2)。

2.2 鱼类群落优势种组成

胶州湾海域鱼类群落优势种组成存在明显的季节差异,如表2。

春季,采集到鱼类18种。其中,优势种5种,分别为褐牙鲂(*Paralichthys olivaceus*)、细纹狮子鱼(*Liparis tanakae*)、方氏云鲷、星突江鲈(*Platichthys stellatus*)和矛尾鰕虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*),占春季种类数的27.78%;重要种4种,常见种9种,分别占春季种类数的22.22%和50.00%。

夏季,采集到鱼类23种。其中,优势种2种,分别为赤鼻棱鲷(*Thryssa kammalensis*)和长蛇鲻(*Saurida elongata*),占夏季种类数的8.70%;重要种9种,常见种8种,一般种4种,分别占夏季种类数的39.13%、34.78%和17.39%。

秋季,采集到鱼类16种。其中,优势种4种,分别为长丝鰕虎鱼(*Cryptocentrus filifer*)、矛尾鰕虎鱼、尖海龙(*Syngnathus acus*)和长蛇鲻,占秋季种类数的25.00%;重要种5种,常见种5种,一般种2种,分别占秋季种类数的31.25%、31.25%和12.50%。

冬季,采集到鱼类21种。其中,优势种1种,为褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*),占冬季种类数的4.76%;重要种8种,常见种8种,一般种4种,分别占冬季种类数的38.10%、38.10%和19.04%。

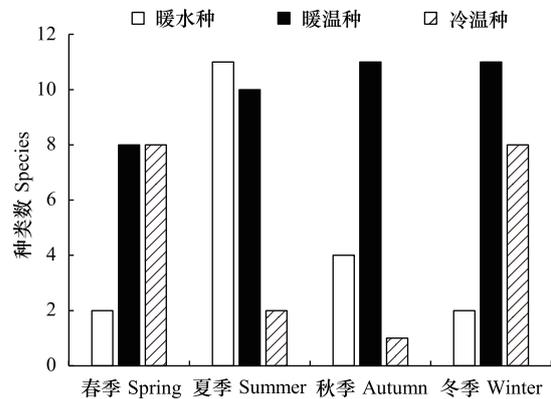


图2 胶州湾海域鱼类适温性组成

Fig. 2 The thermal nature composition of fishes in the Jiaozhou Bay

表2 胶州湾海域各季节主要鱼类物种的相对重要性指数

Table 2 Indices of relative importance (IRI) of fish species in the Jiaozhou Bay by seasons

春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
种名 Specie	IRI	种名 Specie	IRI	种名 Specie	IRI	种名 Specie	IRI
褐牙鲂 <i>Paralichthys olivaceus</i>	3150	赤鼻棱鲷 <i>Thryssa kammalensis</i>	8178	长丝鰕虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>	3490	褐菖鲈 <i>Sebastes marmoratus</i>	5246
细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i>	2488	长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	1057	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	3308	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	934
方氏云鲷 <i>Enedras fangi</i> Wang et Wang	1538	中颌棱鲷 <i>Thryssa mystax</i>	876	尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>	1521	大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	924
星突江鲈 <i>Platichthys stellatus</i>	1041	白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	853	长蛇鲻 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	1202	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys hexanema</i>	316
矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	1007	细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>	698	许氏平鲈 <i>Sebastes schlegeli</i>	314	褐牙鲂 <i>Paralichthys olivaceus</i>	229
许氏平鲈 <i>Sebastes schlegeli</i>	413	银鲷 <i>Pampus argenteus</i>	600	黄鲛鲷 <i>Lophius litulon</i>	209	许氏平鲈 <i>Sebastes schlegeli</i>	181
鲱 <i>Callionymus beniteguri</i>	345	褐菖鲈 <i>Sebastes marmoratus</i>	302	花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	120	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	120
纹缟鰕虎鱼 <i>Tridentiger trigonocephalus</i>	220	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus nipponius</i>	187	褐牙鲂 <i>Paralichthys olivaceus</i>	109	鲛 <i>Liza haematocheila</i>	106
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	141	青鳞小沙丁 <i>Sardinella zunasi</i>	162	赤鼻棱鲷 <i>Thryssa kammalensis</i>	107	孔鲷 <i>Raja porosa</i>	103
		长丝鰕虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>	160				
		大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	119				

2.3 物种多样性

胶州湾海域4个季节的鱼类物种多样性如表3所示:多样性指数(H')变化范围为1.668—2.453,以夏季

最高,春季最低;均匀度指数(J')变化范围为 0.577—0.808,以秋季最高,春季最低;丰富度指数(D')变化范围为 2.431—3.123,以冬季最高,秋季最低。

表 3 胶州湾海域鱼类物种多样性的季节变化

Table 3 Seasonal variation of biodiversity indices of fish species in the Jiaozhou Bay

季节 Season	种类数 Species	H'	J'	D'
春季 Spring	18	1.668	0.577	3.041
夏季 Summer	23	2.453	0.782	2.700
秋季 Autumn	16	2.241	0.808	2.431
冬季 Winter	21	1.763	0.579	3.123

“ H' ”:多样性指数 Diversity index;“ J' ”:均匀度指数 Uniformity index;“ D' ”:丰富度指数 Richness index

从空间分布来看(表 4),各站位鱼类物种年均多样性指数 H' 范围为 0.891—1.314。 H' 值最高的 3 个站是湾外的 S8 站和湾内的 S5、S1 站,分别为 1.238、1.314、1.116; H' 值最低的 3 个站是湾内的 S3、S7 和湾外的 S9 站,分别是 0.891、0.915、0.902。年均均匀度指数 J' 范围为 0.456—0.699;其中, S1、S3、S4 和 S5 站均大于 0.600,其余各站小于 0.600,且各站位间相差不大。年均丰富度指数 D' 范围为 0.717—1.716; D' 值最高的 3 个站是湾内的 S2、S7 站和湾外的 S8 站,分别为 1.523、1.716、1.545; D' 值最低的 3 个站是湾内的 S3、S4 站和湾外的 S9 站,分别为 1.037、1.072 和 0.717。

表 4 胶州湾海域各站位鱼类群落多样性指数、均匀度指数和丰富度指数

Table 4 Diversity index, evenness index and richness index of fish communities of stations in Jiaozhou Bay

指数 Index	时间 Time	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
多样性指数 Diversity index	春季	1.307	0.791	—	1.246	1.155	0.874	0.420	—	1.294
	夏季	1.418	1.010	0.751	1.913	1.518	—	1.547	1.513	1.472
	秋季	0.400	1.716	1.031	0.718	1.269	0.821	1.027	0.806	0.841
	冬季	1.337	0.793	—	0.633	—	1.196	0.666	1.396	0.000
	平均	1.116	1.078	0.891	1.128	1.314	0.964	0.915	1.238	0.902
均匀度指数 Evenness index	春季	0.812	0.406	—	0.695	0.502	0.543	0.191	—	0.933
	夏季	0.682	0.519	0.684	0.871	0.730	—	0.645	0.609	0.670
	秋季	0.289	0.958	0.640	0.654	0.708	0.510	0.573	0.582	0.766
	冬季	0.746	0.408	—	0.576	—	0.743	0.414	0.606	0.000
	平均	0.632	0.573	0.662	0.699	0.647	0.599	0.456	0.599	0.592
丰富度指数 Richness index	春季	1.134	1.519	—	1.253	2.552	1.335	2.269	—	0.813
	夏季	1.898	1.519	0.690	1.510	0.889	—	2.612	1.935	1.531
	秋季	1.038	1.669	1.384	0.410	1.003	1.610	1.185	1.038	0.522
	冬季	1.162	1.385	—	1.116	—	0.935	0.798	1.663	0.000
	平均	1.308	1.523	1.037	1.072	1.482	1.293	1.716	1.545	0.717

“—”表示未调查

2.4 鱼类群落种类组成的季节变化

胶州湾海域鱼类群落种类组成存在明显的季节更替现象。相似性分析(ANOSIM)表明,各季节间鱼类种类组成存在极显著的差异性($P < 0.01$)。季节间鱼类物种相似性指数 J_s 的变化范围为 0.108—0.560,以春—冬季最大,春—夏季最小,即:春—冬季鱼类群落的相似性最高,春夏季鱼类群落的相似性最低(表 5);季节更替率的变化范围为 44.00%—89.19%,尤其是春夏之交和夏秋之交更替率均较高,鱼类物种组成更替比较显著。

2.5 鱼类群落结构 NMDS 图

胶州湾海域各季节鱼类群落存在明显的差异性,如图 3 所示。其中,春、秋、冬三季节可分为两大种群,夏季分为三大种群。各季节胁强系数(stress)分别为 0.08、0.04、0.07 和 0.01,4 个季节排序结果胁强系数均小于

0.1,即:排序结果具有一定解释意义且较好,其中,夏冬两季节排序结果具有很好的代表性。

表 5 各季节间鱼类物种相似性指数

Table 5 Jaccard similarity index (J_s) of fish species among seasons

季节 Season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
春季 Spring		0.108	0.214	0.560
夏季 Summer			0.147	0.128
秋季 Autumn				0.276
冬季 Winter				

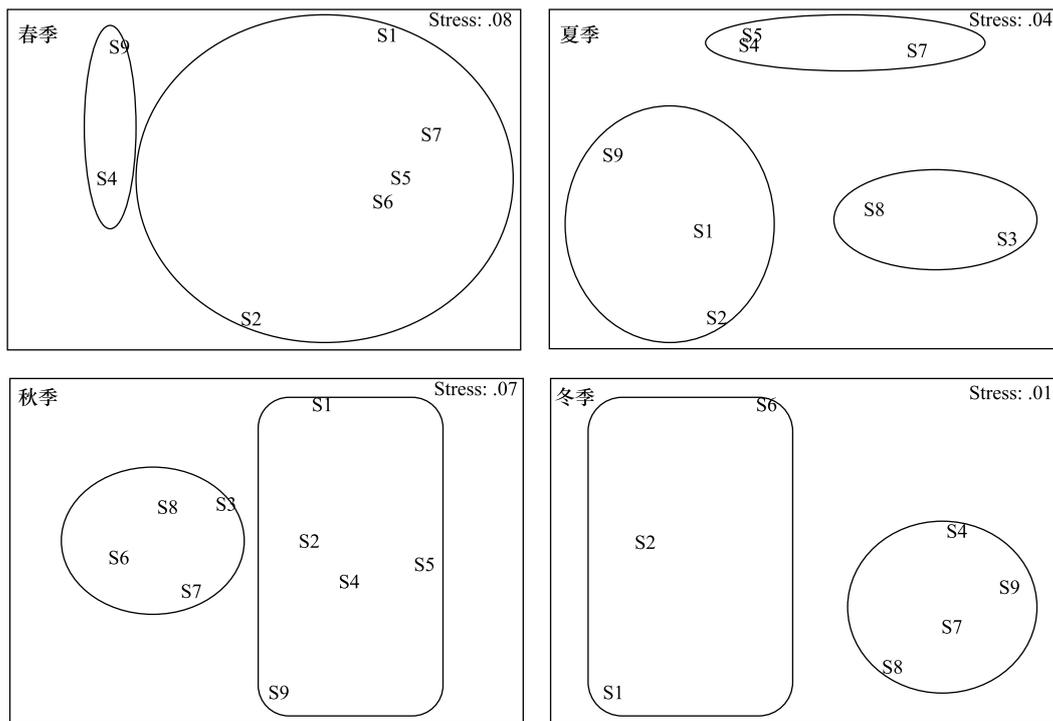


图 3 胶州湾非参数多变量标序 (NMDS) 图

Fig.3 Ordination of non-metric multidimensional scaling (NMDS) in Jiaozhou Bay

2.6 典范对应分析

鱼类群落物种与环境因子的 CCA 排序结果表明(图 4),各季节环境因子对鱼类群落种类组成的影响作用存在显著差异($P < 0.05$),环境因子与第一、二排序轴间的相关系数如表6所示。从整体上看,影响胶州湾

表 6 环境因子与前两个排序轴间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of environmental factors on first two CCA axes

环境因子 Environmental factors	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2
水深 Depth	-0.396	0.334	-0.159	0.534	-0.367	0.329	-0.760	0.190
水温 Temperature	0.038	-0.446	-0.392	-0.449	0.026	0.500	-0.787	0.175
盐度 Salinity	0.183	0.162	0.270	0.427	0.103	0.410	-0.998	0.005
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.063	-0.315	-0.169	-0.548	-0.433	-0.409	0.988	0.102
酸碱度 pH	0.625	-0.313	0.138	0.450	-0.557	-0.001	0.570	0.243
溶解氧 Dissolved oxygen	0.100	0.540	-0.045	0.033	-0.379	-0.043	0.808	0.364

CCA:典范对应分析 canonical correspondence analysis

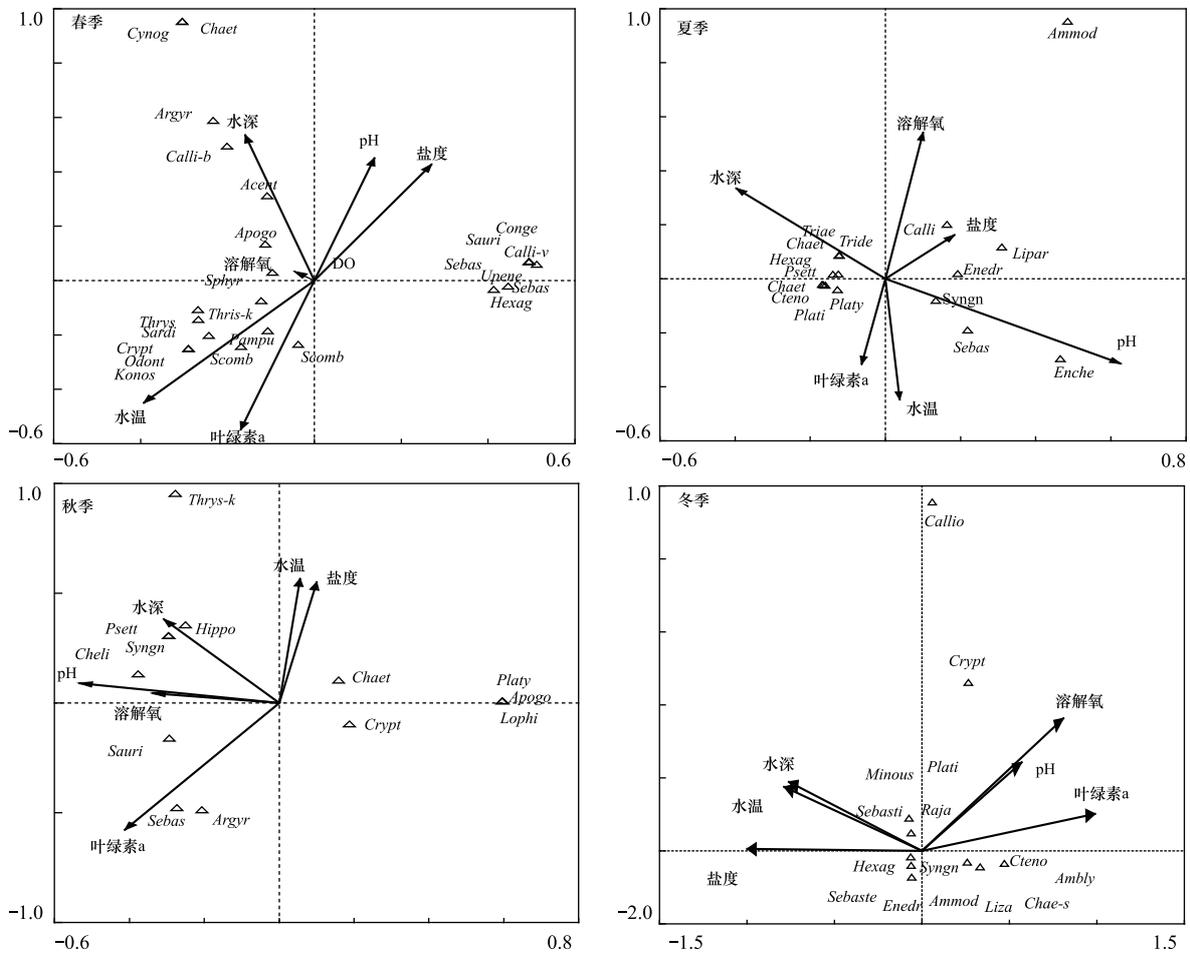


图 4 胶州湾鱼类群落物种-环境因子典范对应分析排序图

Fig.4 Ordination diagram of canonical correspondence analysis(CCA) based on fish community species and environmental factors in the Jiaozhou Bay area

Enedr.: 方氏云鲷 *Enedras fangi* Wang et Wang; *Enche.*: 长绵鲷 *Enchelyopus elongatus*; *Sebas.*: 许氏平鲷 *Sebastes schlegeli*; *Tride.*: 纹缟鰕虎鱼 *Tridentiger trionocephalus*; *Chaet-s.*: 矛尾鰕虎鱼 *Chaeturichthys stigmatias*; *Platy.*: 鲯 *Platycephalus indicus*; *Paral.*: 褐牙鲆 *Paralichthys olivaceus*; *Hexag.*: 大泷六线鱼 *Hexagrammos otakii*; *Triae.*: 钟馗鰕虎鱼 *Triaenopogon barbatus*; *Ambly.*: 六丝钝尾鰕虎鱼 *Amblychaeturichthys hexanema*; *Karei.*: 石鲷 *Kareius bicoloratus*; *Argyr.*: 白姑鱼 *Argyrosomus argentatus*; *Crypt.*: 长丝鰕虎鱼 *Cryptocentrus filifer*; *Pampu.*: 银鲷 *Pampus argenteus*; *Odont.*: 红狼牙鰕虎鱼 *Odontamblyopus rubicundus*; *Cteno.*: 中华栉孔鰕虎鱼 *Ctenotrypauchen chinensis*; *Ammod.*: 玉筋鱼 *Ammodytes personatus*; *Raja.*: 孔鲷 *Raja porosa*; *Scomb.*: 蓝点马鲛 *Scomberomorus niphonius*; *Calli-v.*: 瓦氏鲷 *Callionymus valencienni*; *Upene.*: 条尾鲱鲷 *Upeneus bensasi*; *Konos.*: 斑鲷 *Konosirus punctatus*; *Scomb.*: 日本鲷 *Scomber japonicus*; *Sphyr.*: 油好 *Sphyræna pinguis*; *Liza.*: 鲛 *Liza haematocheila*; *Apogo.*: 细条天竺鲷 *Apogon lineatus*; *Sardi.*: 青鳞小沙丁 *Sardinella zunasi*; *Hippo.*: 日本海马 *Hippocampus japonicus*; *Cynog.*: 长吻红舌鲷 *Cynoglossus lighti*; *Acent.*: 普氏栉鰕虎鱼 *Acentrogobius pflaumii*; *Thrys.*: 中颌棱鲷 *Thryssa mystax*; *Sebas.*: 褐葛鲷 *Sebastiscus marmoratus*; *Lateo.*: 花鲈 *Lateolabrax maculatus*; *Apogo.*: 细条天竺鲷 *Apogonichthys lineatus*; *Conge.*: 星康吉鲷 *Conger myriaster*; *Lophi.*: 黄鰕鲷 *Lophius litulon*; *Callio-b.*: 鲱鲷 *Callionymus beniteguri*; *Thrys-k.*: 赤鼻棱鲷 *Thryssa kammalensis*; *Minou.*: 虎鲷 *Minous monodactylus*; *Lipar.*: 细纹狮子鱼 *Liparis tanakae*; *Plati.*: 星突江鲷 *Platichthys stellatus*; *Syngn.*: 尖海龙 *Syngnathus acus*; *Cheli.*: 绿鳍鱼 *Chelidonichthys kumu*; *Veras.*: 圆斑星鲷 *Verasper variegatus*; *Cynog.*: 短吻红舌鲷 *Cynoglossus joyneri*; *Sauri.*: 长蛇鲷 *Saurida elongata*

鱼类群落种类组成的主要环境因素是温度、盐度、水深和 pH 值。春季,第一、二排序轴物种与环境关系累积百分比为 74.1%, pH、溶解氧(DO)和 水深是影响鱼类群落种类组成的重要因子,其相关系数分别为 0.625, 0.100和-0.396。夏季,第一、二排序轴物种与环境关系累积百分比为 62.6%,温度、盐度和叶绿素 a 是影响鱼类群落种类组成的重要因子,其相关系数分别为-0.392、0.270 和-0.169。秋季,第一、二排序轴物种与环境关系累积百分比为 53.6%, pH 和叶绿素 a 是影响鱼类群落种类组成的重要因子,其相关系数分别为-0.557 和

-0.433。冬季,第一、二排序轴物种与环境关系累积百分比为 81.5%,盐度,叶绿素 a 和 DO 是影响鱼类群落种类组成的重要因子,其相关系数分别为-0.998、0.988 和 0.808。

3 讨论

3.1 物种多样性特征

物种多样性的差异性与鱼类生存环境^[23]、洄游特性^[24]、繁殖和人为捕捞密切相关^[25],且水深对鱼类分布具有限制作用^[26]。胶州湾鱼类多样性与环境因子相关性表明(表 7),水温和 pH 对该海域物种多样性具有极显著相关性($P<0.01$),其他环境因子则无明显的相关性($P>0.05$)。均匀度指数 J' 的季节变化不大,说明鱼类群落的均匀度受生境条件改变的影响较小。夏季,水温和盐度均最高(27.03℃, 29.74),pH 值最低(7.88),营养盐丰富,浮游动植物大量繁殖为鱼类带来丰富营养饵料,促进鱼类繁衍和生长;此外,春、夏季为胶州湾鱼类主要生殖季节^[1],且 6—8 月为黄海休渔期,鱼卵和幼鱼等鱼类资源得到保护;加上本次调查是在禁渔期刚结束后就展开调查,受捕捞影响较小,致使渔获种类最多(23 种),个体数量最多(3460 尾),生物量较大(12.24 kg),物种多样性指数最大。冬季,水温较低(5.50℃),捕捞压力较小,且受季节洄游影响,暖水性和暖温性季节洄游鱼类游向湾外越冬,种类数减少(21 种),鱼类群落组成主要以地域性的暖温性和冷温性鱼类为主(表 2),但由于渔获生物量最大(23.62 kg),渔获个体数量相对较少(604 尾),致使鱼类丰富度最大,物种多样性相对较低。此外,海域底质类型也影响鱼类多样性,且黏土底质对胶州湾鱼类群落的分布具有显著影响^[6]。

表 7 胶州湾海域鱼类物种多样性与环境因子的相关性

Table 7 Correlation between fish species diversity and environmental factors in the Jiaozhou Bay

环境因子 Environmental factors	H'		J'		D'	
	r	P	r	P	r	P
水深 Depth	-0.107	0.626	-0.251	0.248	-0.051	0.817
水温 Temperature	0.540	0.008 **	0.371	0.081	0.211	0.334
盐度 Salinity	0.020	0.926	-0.078	0.723	0.077	0.728
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.134	0.543	0.082	0.711	-0.104	0.637
酸碱度 pH	-0.581	0.004 **	-0.352	0.100	-0.202	0.354
溶解氧 Dissolved oxygen	-0.118	0.591	-0.188	0.389	0.051	0.819

“ r ”表示环境因子与物种多样性的相关系数;“*”: $P<0.05$,表示显著差异;“**”: $P<0.01$,表示极显著差异

3.2 鱼类群落结构和多样性的年代际变化

本次调查与 1981—1982 年、2003—2004 年、2011 年航次相比,种类数呈显著下降趋势,分别下降了 59.29%、20.69% 和 19.30%;优势种由 1981—1982 年以青鳞小沙丁和斑鲚为主^[1],转变为 2011 年以方氏云鳎和六丝钝尾鰕虎鱼为主^[6],演变到本次以赤鼻棱鲷、褐菖鲈和褐牙鲆为主,更替显著,且暖温性种占优势(表 8)。鱼类多样性水平低于 2003—2004 年和 2011 年,呈明显的下降趋势(图 5)。可见,胶州湾海域鱼类群落种类数及优势种组成发生变化。同时,各年代优势种的季节变化也存在明显的更替现象,表 9。1981—1982 年,平均更替率为 41.60%,其中冬春季更替率最大(61.50%),夏秋季更替率最小(35.00%)^[1];2011 年,平均更替率为 54.69%,其中春夏季更替率最大

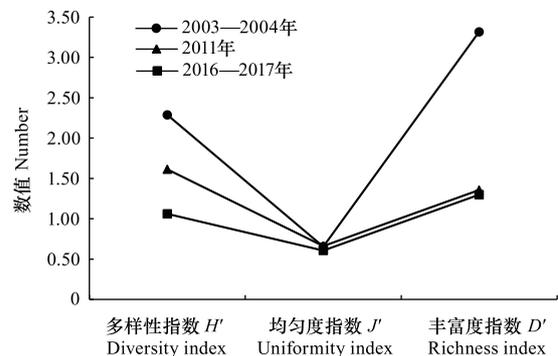


图 5 胶州湾海域鱼类物种多样性指数的年代际变化

Fig. 5 Inter-annual variability of fish species diversity index in the Jiaozhou Bay

“ H' ”:多样性指数 Diversity index; “ J' ”:均匀度指数 Uniformity index; “ D' ”:丰富度指数 Richness index

(64.58%),夏秋季更替率最小(42.86%)^[6];2016—2017,平均更替率为72.72%,其中春夏季更替率最大(89.19%),冬春更替率最小(44.00%);可知,胶州湾鱼类物种更替率呈逐步增加趋势,季节更替率也发生明显变化。此外,主要大型经济鱼类物种减少。如鲈鱼(*Lateolabrax maculatus*)体长范围、质量百分比和尾数百分比分别由1981—1982年的100—600 mm、2.00%、0.83%减少到2016—2017年的180—290 mm、1.57%、0.08%;银鲳(*Pampus argenteus*)体长范围、质量百分比和尾数百分比分别由1981—1982年的100—300 mm、4.00%、0.83%减少到2016—2017年的95—145 mm、2.66%、0.67%;长绵鲷(*Enchelyopus elongatus*)体长范围、质量百分比和尾数百分比分别由1981—1982年的150—400 mm、6.00%、0.83%减少到2016—2017年的295 mm、0.52%、0.04%;带鱼体长范围、质量百分比和尾数百分比分别由1981—1982年的80—300 mm、4.00%、3.00%减少到2016—2017年的未捕捞到一尾。此外,鱼类资源量也发生明显变化。本次调查鱼类平均资源密度(1593.16 kg/km²)低于1981—1982年鱼类平均资源密度(10857 kg/km²),约下降了85.33%。

表8 胶州湾海域不同调查年代的优势种比较

Table 8 Comparison of fish species composition in different years in the Jiaozhou Bay

年份 Year	种类数 Species	优势种 Dominant species	适温性 Moderate temperature
1981—1982	113	青鳞小沙丁鱼(<i>Sardinella zunasi</i>)	暖温种
		斑鲹(<i>Konosirus punctatus</i>)	暖温种
		赤鼻棱鲉(<i>Thryssa kammalensis</i>)	暖温种
		中颌棱鲉(<i>Thryssa mystax</i>)	暖水种
		细条天竺鲷(<i>Apogon lineatus</i>)	暖水种
		带鱼(<i>Trichiurus lepturus</i>)	暖水种
2003—2004	58	小黄鱼(<i>Larimichthys polyactis</i>)	暖温种
		皮氏叫姑鱼(<i>Johnius belangerii</i>)	暖水种
		玉筋鱼(<i>Ammodytes personatus</i>)	冷温种
		方氏云鲷(<i>Enedras fangi Wang et Wang</i>)	冷温种
2011	57	方氏云鲷(<i>Enedras fangi Wang et Wang</i>)	冷温种
		六丝钝尾鰕虎鱼(<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>)	暖温种
2016—2017	46	赤鼻棱鲉(<i>Thryssa kammalensis</i>)	暖温种
		褐菖鲉(<i>Sebastes marmoratus</i>)	暖温种
		褐牙鲷(<i>Paralichthys olivaceus</i>)	暖温种

表9 胶州湾海域不同年代优势种的季节变化

Table 9 Seasonal variation of dominant species in different ages in Jiaozhou Bay

年份 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
1981—1982	牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i>	斑鲹 <i>Konosirus punctatus</i>	梭鱼 <i>Liza so-iuy</i>
	青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>		长绵鲷 <i>Enchelyopus elongatus</i>
2003—2004	方氏云鲷 <i>Enedras fangi Wang et Wang</i>		小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	方氏云鲷 <i>Enedras fangi Wang et Wang</i>
	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>		皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>
				六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>
2011	方氏云鲷 <i>Enedras fangi Wang et Wang</i>	赤鼻棱鲉 <i>Thryssa kammalensis</i>	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	方氏云鲷 <i>Enedras fangi Wang et Wang</i>
	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>	普氏鰕虎鱼 <i>Acentrogobius pflaumii</i>	李氏鲷 <i>Repomucenus richardsonii</i>
	细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i>	斑鲹 <i>Konosirus punctatus</i>	方氏云鲷 <i>Enedras fangi Wang et Wang</i>	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>

续表

年份 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
2016—2017	尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>	细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>		
		长吻红舌鲷 <i>Cynoglossus lighti</i>		
	褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	赤鼻棱鲉 <i>Thryssa kammalensis</i>	长丝鰕虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>	褐菖鲉 <i>Sebastes marmoratus</i>
	细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i>	长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	
	方氏云鲷 <i>Enedras fangi</i> Wang et Wang		尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>	
	星突江鲈 <i>Platichthys stellatus</i>			
	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>			

30 多年来,受人类活动及自然扰动的影响,胶州湾鱼类种类数减少,物种多样性下降,优势种更替显著,鱼类群落结构趋向简单化。主要原因有以下几个方面:第一,受人类捕捞影响,尤其是选择性捕捞,导致个体质量大的经济鱼类减少、多样性降低,鱼类组成以个体质量小、未成熟的低值鱼类为主^[27]。据统计,2000—2016 年胶州湾鱼类资源捕捞量下降了 74.73%^[28],说明受人类捕捞影响,鱼类资源量衰竭,尤其是优质鱼类剧减,鱼类群落结构发生改变。第二,菲律宾蛤仔等贝类的大规模养殖。据统计,贝类养殖面积占胶州湾总养殖面积的 71.6%,其中菲律宾蛤仔养殖面积占贝类养殖面积的 93.2%、全湾养殖面积的 66.7%^[29];1994—2008 年菲律宾蛤仔养殖面积和产量分别增加了约 95%和 99.63%^[30],近年来养殖产量已达 30 多万吨,且菲律宾蛤仔为底栖动物主要优势种^[31],其生物扰动影响营养盐在沉积物—水界面的交换,加剧水体中 Si 限制^[32],大规模养殖造成鱼类栖息地环境和底栖鱼类底质的破坏,影响鱼类产卵繁育、底层鱼类群落结构以及定居种的生长^[7]。第三,鱼类栖息地遭到破坏。围填海和炸山等人类活动破坏了胶州湾海底地形和沿岸地貌,且围填海使胶州湾海域面积不断缩小,与 1863 年相比缩小了 38.60%,导致海湾纳潮量降低,海洋自净能力降低,“赤潮”和“浒苔”频发,致使栖息地受到破坏,渔业资源衰退,多样性水平降低^[33]。第四,海域生态环境破坏严重。沿岸生活污水及工业废水大量排入,加上船舶溢油,湾内中度污染和轻度污染海域约占胶州湾总面积的 3/5,富营养化污染加剧,水质质量下降,生物多样性减少,鱼类群落结构发生改变^[34]。

今后应加大胶州湾海域生态环境的监测与保护,做到生态保护和资源开发的可持续发展。首先,实施生态修复工程。政府应积极开展实施退田还海、滩涂岸线整治等生态修复建设工程,加强滨海湿地养护、入湾河口修复,在滩涂种植碱蓬、怪柳等耐盐碱植物进行生态修复,恢复原始自然风貌,研发新的生态补偿管理技术,为胶州湾生态修复提供技术支撑;其次,实施渔业资源保育工程。如完善休渔管理制度,优化改革捕捞方式及网具类型,实施限额捕捞,开展增殖放流,促进渔业资源的恢复和生态系统的平衡;此外,应该在坚持“生态优先”的理念下,建设海洋牧场,开展海上观光旅游、垂钓、海底潜水采捕等休闲渔业为代表的海洋第三产业,实现三产融合。

致谢:中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室宋金明研究员、袁华茂博士及其团队;中国水产科学研究院黄海水产研究所袁伟、孙坚强老师和“黄海星”号的工作人员在采集样品时提供帮助;中国海洋大学水产学院张弛老师在标本鉴定方面提供帮助,特致谢忱!

参考文献 (References):

- [1] 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1992: 271-295.
[2] 李京梅, 刘铁鹰. 基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估. 生态学报, 2012, 32(22): 7146-7155.

- [3] 杨东方, 高振会, 马媛, 孙培艳, 杨应斌. 胶州湾环境变化对海洋生物资源的影响. 海洋环境科学, 2006, 25(4): 39-42.
- [4] Xue Y, Ren Y, Xu B, Mei C, Chen X, Zan X. Length-weight relationships of fish species caught by bottom trawl in Jiaozhou Bay, China. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(3): 949-954.
- [5] 曾晓起, 朴成华, 姜伟, 刘群. 胶州湾及其邻近水域渔业生物多样性的调查研究. 中国海洋大学学报, 2004, 34(6): 977-982.
- [6] 翟璐, 韩东燕, 傅道军, 张崇良, 薛莹. 胶州湾及其邻近海域鱼类群落结构及与环境因子的关系. 中国水产科学, 2014, 21(4): 810-821.
- [7] 徐宾铎, 曾慧慧, 薛莹, 纪毓鹏, 任一平. 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性. 生态学报, 2013, 33(10): 3074-3082.
- [8] 高权新, 谢明媚, 彭士明, 张晨捷, 施兆鸿. 急性温度胁迫对银鲱幼鱼代谢酶、离子酶活性及血清离子浓度的影响. 南方水产科学, 2016, 12(2): 59-66.
- [9] 韩东燕, 薛莹, 纪毓鹏, 麻秋云. 胶州湾六丝钝尾虾虎鱼的摄食生态特征. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1446-1452.
- [10] 韩真, 肖永双, 高天翔. 中国近海 9 个小黄鱼群体的形态学比较研究. 南方水产科学, 2012, 8(3): 25-33.
- [11] 马立杰, 杨曦光, 祁雅莉, 刘艳霞, 张金枝. 胶州湾海域面积变化及原因探讨. 地理科学, 2014, 34(3): 365-369.
- [12] 马孟磊, 陈作志, 许友伟, 张魁, 袁伟, 徐姗楠. 基于 Ecopath 模型的胶州湾生态系统结构和能量流动分析. 生态学杂志, 2018, 37(2): 462-470.
- [13] Day J J. Fishes of the world, 4th Edition. Fish and Fisheries, 2006, 7(4): 334.
- [14] 李明德. 鱼类分类学. 北京: 海洋出版社, 1998: 28-47.
- [15] 农业部水产局, 农业部黄海区渔业指挥部. 黄、渤海区渔业资源调查和区划. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [16] 张春霖. 黄渤海鱼类调查报告. 北京: 科学出版社, 1955.
- [17] Pinkas L, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in California waters. California Department of Fish and Game: Fish Bulletin, 1971, 152: 1-105.
- [18] 王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 李纯厚, 孙典荣, 贾晓平. 1980-2007 年大亚湾鱼类物种多样性、区系特征和数量变化. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2403-2410.
- [19] Ludwig J A, Reynolds J F. Statistical Ecology: A Primer in Methods and Computing. New York: Wiley-Interscience, 1988.
- [20] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula. Ecology, 1968, 49(1): 153-156.
- [21] Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone 1. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.
- [22] Khalaf M A, Kochzius M. Changes in trophic community structure of shore fishes at an industrial site in the Gulf of Aqaba, Red Sea. Marine Ecology Progress Series, 2002, 239: 287-299.
- [23] 袁梦, 汤勇, 徐姗楠, 陈作志, 杨玉滔, 江艳娥. 珠江口南沙海域秋季渔业资源群落结构特征. 南方水产科学, 2017, 13(2): 18-25.
- [24] 袁华荣, 陈丕茂, 秦传新, 黎小国, 周艳波, 冯雪, 余景, 舒黎明, 唐振朝, 佟飞. 南海柘林湾鱼类群落结构季节变动的研究. 南方水产科学, 2017, 13(2): 26-35.
- [25] 李圣法, 程家骅, 李长松, 李建生. 东海中部鱼类群落多样性的季节变化. 海洋渔业, 2005, 27(2): 113-119.
- [26] 武智, 李新辉, 李捷, 陈方灿, 朱书礼. 红水河岩滩水库鱼类资源声学评估. 南方水产科学, 2017, 13(3): 20-25.
- [27] Fenberg P B, Roy K. Ecological and evolutionary consequences of size-selective harvesting: how much do we know? Molecular Ecology, 2008, 17(1): 209-220.
- [28] 刘岐涛. 2017 青岛统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [29] 张明亮. 胶州湾贝类养殖容量研究与分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
- [30] 郭永禄. 胶州湾底播增殖菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)渔业生物学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [31] 于海燕, 李新正, 李宝泉, 王金宝, 王洪法. 胶州湾大型底栖动物生物多样性现状. 生态学报, 2006, 26(2): 416-422.
- [32] 邓可, 刘素美, 张桂玲, 陆小兰, 张经. 菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响. 环境科学, 2012, 33(3): 782-793.
- [33] 郭臣. 胶州湾围填海造陆生态补偿机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [34] 张学庆, 刘津梁, 王翠. 胶州湾随机动力条件下的船舶溢油污染概率研究. 应用海洋学学报, 2014, 33(3): 379-384.