

DOI: 10.12264/JFSC2021-0147

2010—2019年莱州湾夏季蟹类群落年际变化及其影响因子

张孝民¹, 申瑞婷², 李少文¹, 杨艳艳¹, 王秀霞¹, 李凡¹

1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007

摘要: 根据2010—2019年夏季底拖网调查资料, 对莱州湾蟹类群落结构特征年际变化及其影响因子进行相关研究, 包括群落的种类组成、优势种、物种多样性和群落聚类分析等, 运用冗余分析分析影响蟹类群落年际变化的环境因子。结果表明: 2010—2019年夏季共捕获蟹类16种, 蟹类种数年间波动较大, 减少趋势明显, 2011年种类数最多, 为14种, 2017年最少, 为7种, 优势种每年2~4种。生物量和尾数呈先减少后增加的变化趋势, 多样性指数在2014—2015年明显下降。10年间蟹类群落共分为4组, 组A为2010年, 组B为2011年、2014年和2015年, 组C为2012年、2013年、2018年和2019年, 组D为2016年和2017年。PERMANOVA分析结果显示, 各组间差异显著($P < 0.01$)。SIMPER分析表明, 各组特征种为日本蟳(*Charybdis japonica*)、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)和隆线强蟹(*Eucrate crenata*)等, 分歧种主要为日本关公蟹(*Dorippe japonica*)、日本蟳、绒毛近方蟹(*Hemigrapsus penicillatus*)和隆线强蟹等。冗余分析表明, 对蟹类群落年际变化影响较大的因子是底层叶绿素、底栖生物生物量和厄尔尼诺指数。本研究通过对蟹类群落年间动态变化的调查, 旨在为三疣梭子蟹增殖放流工作提供科学依据。

关键词: 蟹类; 群落结构; 年际变化; 环境因子; 莱州湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)04-0596-12

莱州湾位于渤海南部, 是渤海三大海湾之一, 是众多经济性海洋生物的产卵和栖息场所^[1-2]。莱州湾蟹类种类较多, 与经济鱼类资源的严重衰退相比, 蟹类资源衰退趋势较缓, 在生态系统中的重要性逐渐增加^[3-4]。三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)等经济蟹类由于捕捞强度过大, 资源衰退明显^[5], 对蟹类群落结构产生重要的影响。许多学者对蟹类群落的生态作用及影响因素做了相关研究, Spadaro^[6]测试了食草蟹类对珊瑚礁生态系统的影响, 结果表明, 食草蟹类的存在, 使珊瑚礁减少了50%~80%的海藻覆盖, 鱼类群落丰富度和多样性相应增加了3~5倍。Sharifian^[7]绘制了

不同纬度带上红树林蟹类群落物种丰富度与环境因子的关系图, 研究表明温度可能是影响蟹类群落物种丰富度的关键因素。国内方面, 俞存根等^[8]、郑献之等^[9]、郑基等^[10]和卢衍尔等^[11]对东海蟹类群落结构进行研究, 发现了蟹类群落的季节变动规律及其与环境因子的关系。申世常^[12]对厦门海域四季的蟹类群落进行研究, 表明群落结构有明显的时空差异, 并与水深、水温等环境因子密切相关。杨刚等^[13-14]研究了山东近岸不同海域蟹类群落结构优势种和生物多样性的季节更替, 逢志伟^[15]对胶州湾中部海域蟹类群落的月间变化进行研究, 发现底层水温是影响其月间变化最主要

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-05-26.

基金项目: 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-1); 山东省重点研发计划项目(2018GHY115014); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE050); 山东省主要增殖资源调查项目(SD-XGPJ-2012-02); 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室开放基金课题(2013K10); 烟台市科技创新发展计划项目(2020MSGY056); 烟台市科技创新发展计划项目(2020MSGY061).

作者简介: 张孝民(1991-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事渔业资源研究. E-mail: 1119673677@qq.com

通信作者: 李凡, 副研究员, 从事渔业资源和生态修复研究. E-mail: lifan811230@126.com

的环境因素。

相关文献^[16-18]的数据分析表明,蟹类群落不仅有季节变化,而且具有明显的年际变化。了解莱州湾蟹类群落的年际变化,对研究蟹类种群资源动态变化具有重要的意义,可为维持资源稳定和可持续利用提供依据。当前对蟹类群落结构的研究主要集中在月份变化和季节变化方面,对蟹类群落年际变化的研究,尚未见报道。本研究利用2010—2019年莱州湾海域10年的底拖网调查数据,选取蟹类生物量最高的夏季^[5],研究蟹类群落结构的年际变化,主要包括蟹类群落的种类组成、优势种变化、物种多样性、群落聚类以及群落与环境因子的关系等内容,以期掌握近10年莱州湾蟹类群落结构的年际变化规律,为更好的开展三疣梭子蟹增殖放流工作提供依据。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

渔业资源数据来源于2010—2019年夏季底拖网调查,调查区域为莱州湾海域(119°00′~

120°15′E, 37°12′~37°40′N),调查站位每年设置20个(图1)。调查船只功率260 kW,调查网具为单船底拖网,网口周长30.6 m,囊网网目20 mm,拖曳时网口宽度约8 m。每站拖曳1 h,拖速约3 kn。采样及分析均按《海洋调查规范》^[19]进行,蟹类种类名称及分类以《中国海洋生物名录》^[20]为依据,并参考SeaLifeBase数据库(<http://www.sealifebase.org>)。

底栖生物(benthos, BEN)取样使用开口面积为0.05 m²箱式采泥器采集,每个站位取2个平行样,使用0.05 mm的网筛分选大型底栖动物。样品的保存、处理、计数和称量等均按《海洋调查规范》^[19]进行。环境数据利用美国ORION520M-01A便携式YSI水质分析仪现场测定,内容为底层水温(bottom sea temperature, BST)、底层叶绿素(bottom sea chlorophyll, BSC)、底层盐度(bottom sea salinity, BSS)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)。石油类(petroleum)按照《海洋监测规范》^[21]在采样站位同步调查,测定方法为紫外分光光度法。

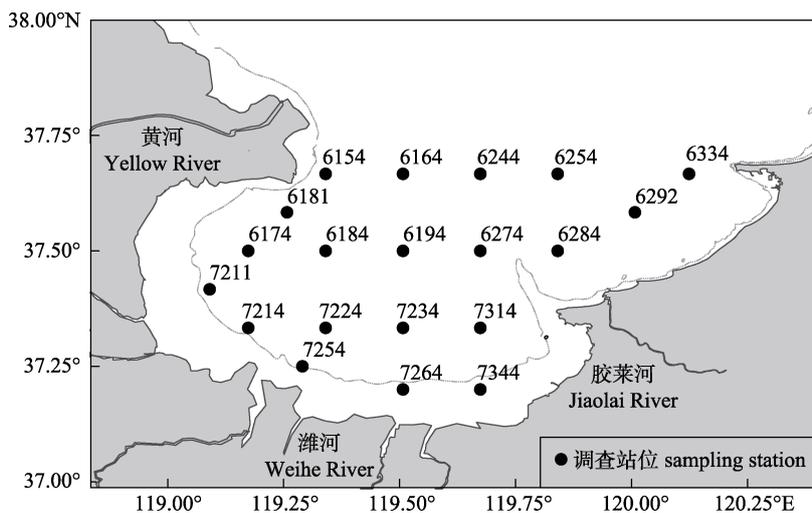


图1 莱州湾夏季蟹类调查站位

Fig. 1 Crab sampling stations in the Laizhou Bay in summer

厄尔尼诺指数(Oceanic Niño Index, ONI)数据来自美国国家海洋与大气管理局的气候预测中心https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php。

1.2 数据预处理

以调查网具拖速3 kn、拖网时间1 h为基准,

根据各站位实际拖网时间对调查数据进行标准化处理,将其换算为单位时间的生物量(kg/h)和个数(ind/h)。

1.3 群落结构分析方法

1.3.1 相对重要性指数 利用相对重要性指数^[22](index of relative importance, IRI)评价不同种类在

群落中的重要程度,当 $IRI > 1000$ 时定为优势种, $100 < IRI < 1000$ 时定为重要种, $IRI < 100$ 时定为普通种^[23-24]。计算公式为:

$$IRI = (N + W) \times F \times 10^4$$

式中, N 为某一类尾数占总尾数的百分比; W 为某一类生物量占总生物量的百分比; F 为某一类出现站位数占调查总站位数的百分比。

1.3.2 物种多样性 蟹类群落结构多样性的分析采用 Margalef 丰富度指数^[25]、Pielou 均匀度指数^[26]和 Shannon-Wiener 多样性指数^[27]。计算公式如下:

$$\text{Margalef 种类丰富度指数: } D = (S - 1) \ln N$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J' = H' / \ln S$$

式中, S 为种类数; N 为总尾数; P_i 为第 i 种生物量占总生物量的比例。

多样性指数年际变化情况采用局部加权回归(loess)统计函数拟合年份与多样性指数的关系,利用 R 语言中 ggplot2 函数进行可视化绘图。

1.3.3 群落聚类分析 采用 R 语言中 hclust() 函数对蟹类群落进行平均聚合聚类,使用中值的非权重成对组法(UPGMA)计算 Bray-Curtis 相似性距离^[26],对各年份蟹类群落进行聚类分析。使用 R 语言中 vegan 包 adonis() 函数中置换多元方差分析(PERMANOVA)对组间差异进行显著性检验。利用非度量多维标度分析(NMDS)制作二维点图,当胁迫系数(stress) < 0.2 时,说明二维排序图对群落结构具有较好的代表性^[28]。用 SIMPER 方法计算各种类对样本组内相似性的贡献率,以此研究各组的特征种和组间分歧种。

1.3.4 冗余分析 用冗余分析方法(redundancy analysis, RDA)分析蟹类群落年间各站位物种生物量与环境因子的关系,物种数据 Hellinger 预转化^[29],解决群落物种数据包含很多 0 值的问题,RDA 采用 R 语言中 vegan 包分析。

2 结果与分析

2.1 种类组成及其年际变化

2010—2019 年莱州湾夏季共捕获蟹类 16 种,隶属于 9 科 13 属,大型经济蟹类有日本蟳(*Chary-*

bdis japonica)和三疣梭子蟹 2 种,其余 14 种均为小型饵料型蟹类。2011 年蟹类的种类最多(14 种),2017 年最少(7 种),线性回归模型分析表明 2010—2019 年蟹类种数年间波动较大,减少趋势明显($P = 0.05$),趋势线的斜率表明,年均减少种类数为 0.31 种。

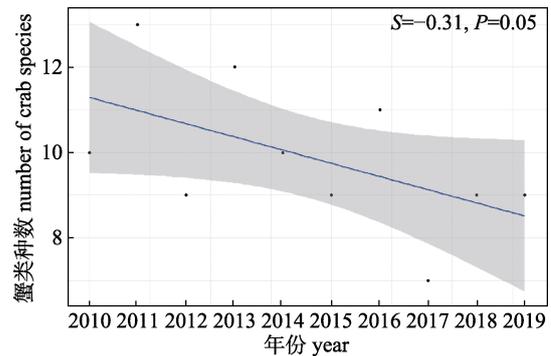


图 2 莱州湾蟹类种类数的年际变化

S 为趋势线的斜率, P 为显著水平。

Fig. 2 Interannual variation number of crab species in Laizhou Bay

S is the slope of the trendline and P is the significant level.

日本蟳和三疣梭子蟹是莱州湾的主要优势种,日本蟳在 10 年中均为第一优势种,三疣梭子蟹在 8 年中为优势种,2010 年和 2013 年为重要种。小型蟹类中隆线强蟹(*Eucrate crenata*)6 年中为优势种,2016—2019 年均为优势种。日本关公蟹(*Dorippe japonica*)的相对重要性指数从 2010 年到 2019 年呈现先减小后增大的趋势,在 2010—2012 年为优势种,2018—2019 年又成为优势种。豆形拳蟹(*Philyra pisum*)通常年份是重要种,仅 2011 年和 2013 年为优势种,颗粒关公蟹(*Dorippe granulata*)在 2013 年为优势种。其他蟹类常年为普通种(表 1)。

2.2 生物量和尾数年际变化

2010—2019 年莱州湾蟹类平均生物量 6.4 kg/h,其中 2011 年最高为 12.2 kg/h,2016 年最低为 1.5 kg/h。全部蟹类的年际变化趋势和日本蟳相同,呈波动变化,2010—2014 年和 2014—2019 年分别出现先减少后增加的变化趋势。三疣梭子蟹除 2011 年和 2019 年较高之外,其他年份相对平稳,单位时间生物量在 1~2 kg/h,其他小型蟹类生物量呈先减少后增加的年际变化(图 3)。

表 1 莱州湾夏季主要蟹类的相对重要性指数 IRI
Tab. 1 IRI of crab species in the Laizhou Bay

种 species	年份 year									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	7086	9008	4041	10712	16278	15899	10781	10982	8962	13478
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	263	4307	1392	707	2556	1454	1402	2488	1504	1827
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	1432	312	2692	550	71	284	3385	2225	1338	2091
日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	5991	1315	1415	846	193	92	665	491	2698	1442
豆形拳蟹 <i>Philyra pismus</i>	174	2839	40	2096	15	0	0.5	0	286	24
颗粒关公蟹 <i>Dorippe granulata</i>	2	43	860	861	15	1	305	34	966	0
红线黎明蟹 <i>Matuta planipes</i>	62	26	69	147	57	110	237	109	907	275

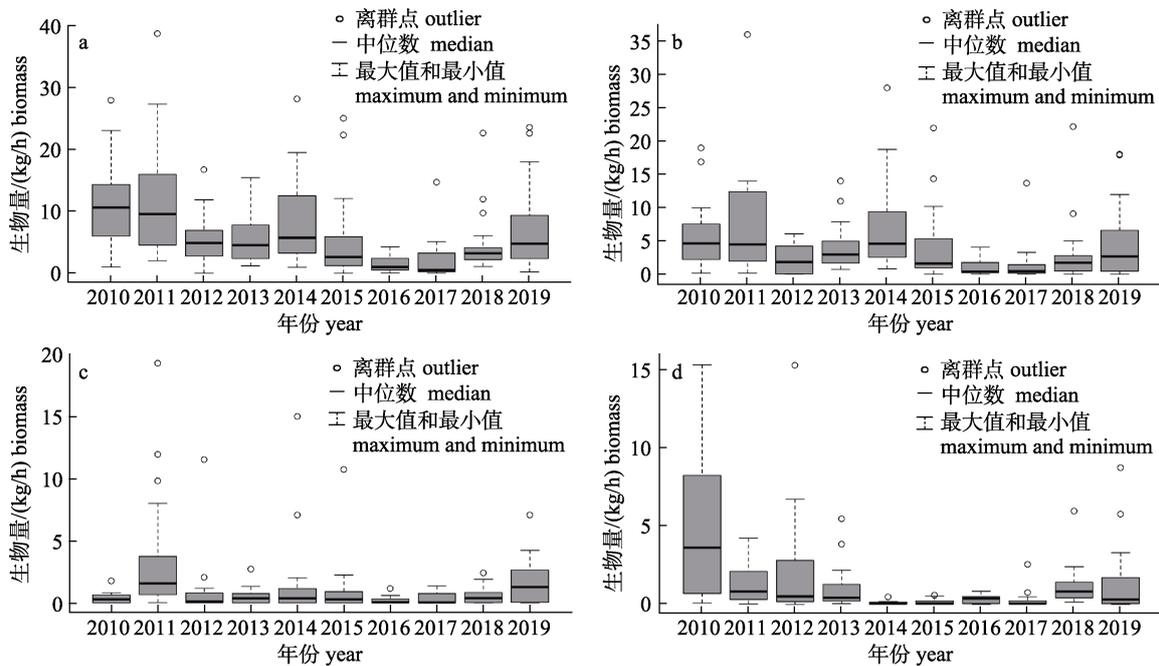


图 3 2010—2019 年夏季莱州湾蟹类生物量年际变化
a: 全部蟹类; b: 日本蟳; c: 三疣梭子蟹; d: 其他小型蟹类。

Fig. 3 Inter-annual variation of crabs individual in the Laizhou Bay during summer from 2010 to 2019
a: all crabs; b: *Charybdis japonica*; c: *Portunus trituberculatus*; d: small crabs.

2010—2019 年莱州湾蟹类平均尾数 68 ind/h, 其中 2010 年最高为 824 ind/h, 2016 年最低为 56 ind/h。全部蟹类的年际变化趋势和其他小型蟹类相同, 呈显著先减少后增加的变化趋势。日本蟳尾数呈波动变化, 三疣梭子蟹尾数 2011 年较高, 其他年份稳定在 5~10 ind/h (图 4)。

2.3 群落的多样性分析

多样性分析显示, 2010—2019 年莱州湾蟹类群落的丰富度指数 D 、均匀度指数 J 和 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 年际波动变化明显, 3 种多样性指数在 2014—2015 年均出现明显下降。丰富度指数 D 在 2010—2015 年和 2016—2019 年先升

高后下降; 均匀度指数 J 在 2010—2014 年持续下降, 2015—2016 年逐渐升高, 2017—2019 年保持平稳; Shannon-Wiener 多样性指数 H' 在 2010—2014 年持续下降, 2015—2019 年逐渐升高 (图 5)。

2.4 群落聚类和排序分析

根据 UPGMA 法聚类结果, 莱州湾 10 年蟹类群落共分为 4 组 (图 6), 组 A 为 2010 年, 组 B 为 2011 年、2014 年和 2015 年, 组 C 为 2012 年、2013 年、2018 年和 2019 年, 组 D 为 2016 年和 2017 年, 置换多元方差分析 (PERMANOVA) 结果显示, 各组间差异显著 ($P < 0.01$)。NMDS 胁迫系数 (stress) 为 0.07, 说明二维点图对群落结构排序具有较好的代表性。

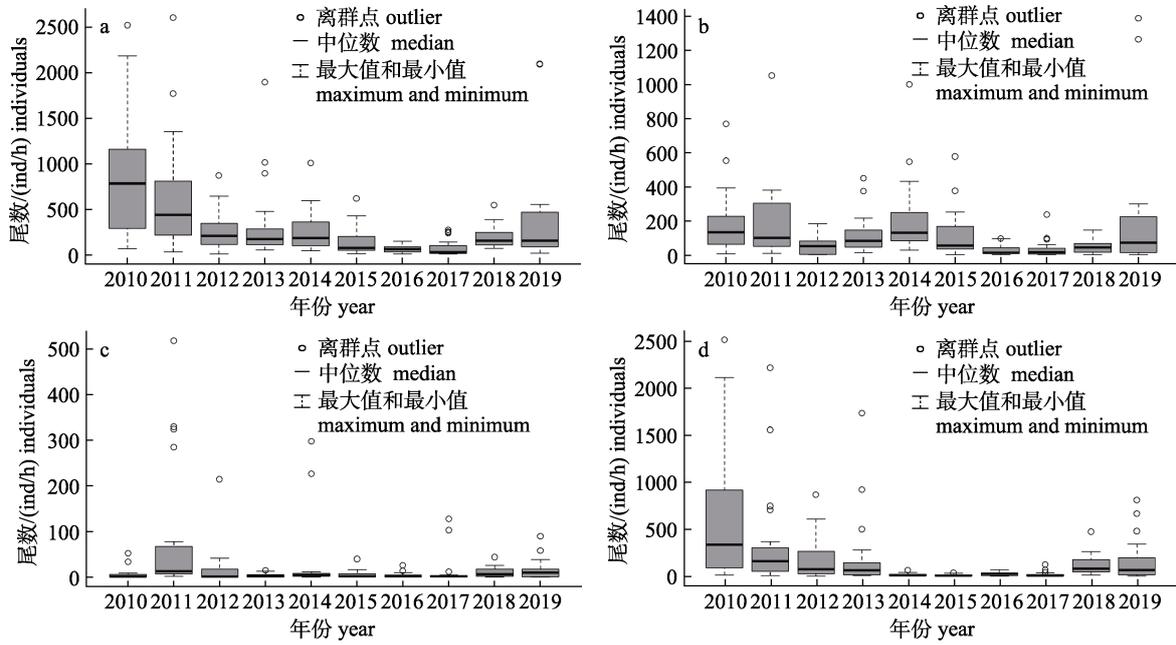


图 4 2010—2019 年夏季莱州湾蟹类尾数年际变化

a: 全部蟹类; b: 日本蟳; c: 三疣梭子蟹; d: 其他小型蟹类.

Fig. 4 Inter-annual variation of crabs individual in the Laizhou Bay during summer from 2010 to 2019

a: all crabs; b: *Charybdis japonica*; c: *Portunus trituberculatus*; d: small crabs.

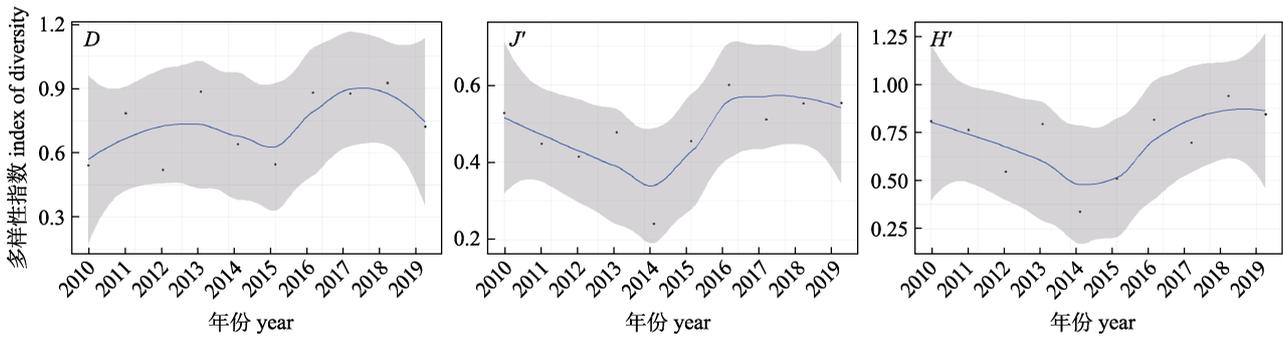


图 5 莱州湾蟹类群落多样性指数年际变化

Fig. 5 Interannual variations of the diversity index of crab community in Laizhou Bay

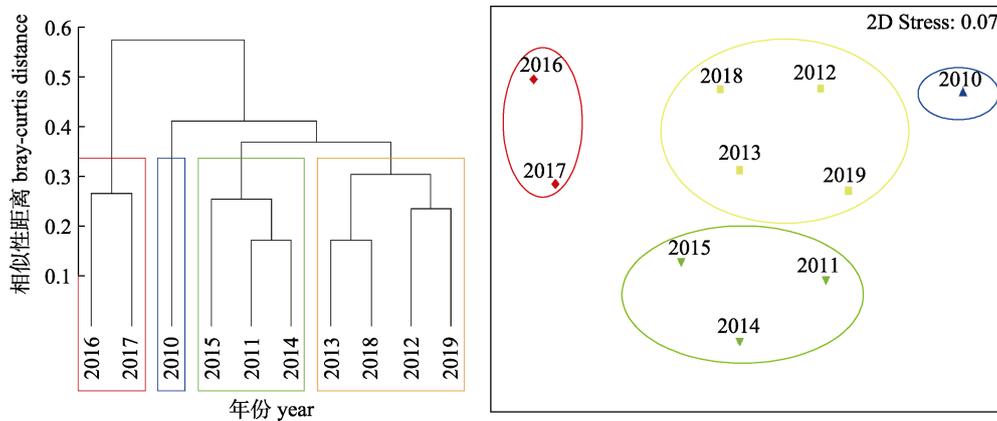


图 6 蟹类群落的 CLUSTER 聚类及 NMDS 分析

Fig. 6 CLUSTER and NMDS analysis on the individual density of crab community

2.5 群落相似性分析

群落相似性分析结果显示, 组 B、组 C 和组 D 的组内相似性分别为 79.21%、78.91%和 80.39%, 组 A 仅 2010 年一个样本, 无法分析其组内相似性和特征种。组 B、组 C 和组 D 特征种前三位均为日本蛄、三疣梭子蟹和隆线强蟹, 组 B 剩余特征种为红线黎明蟹(*Matuta planipes*)和日本关公蟹, 组 C 剩余特征种为日本关公蟹、颗粒关公蟹和红

线黎明蟹, 组 D 剩余特征种为日本关公蟹和颗粒关公蟹(表 2)。

群落差异性分析结果显示, 组 A 和组 D 的平均差异性最大, 为 48.45%, 主要分歧种为日本关公蟹、日本蛄和隆线强蟹等; 组 A 和组 B 的平均差异性次之, 为 38.1%, 主要分歧种为日本关公蟹、隆线强蟹和绒毛近方蟹等; 其余各组组间差异性及其主要分歧种如表 3 所示。

表 2 莱州湾蟹类群落主要特征种
Tab. 2 Characteristic species for different community group in Laizhou Bay

种类 species	组 B Group B		组 C Group C		组 D Group D	
	As=79.21%		As=78.91%		As=80.39%	
	As	C	As	C	As	C
日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	38.6	48.73	27.67	35.06	30.17	37.53
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	21.39	27	13.82	17.51	15.17	18.87
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	5.37	6.77	10.54	13.36	14.49	18.03
红线黎明蟹 <i>Matuta planipes</i>	4.33	5.47	4.59	5.81		
日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	3.37	4.25	8.1	10.27	6.36	7.91
颗粒关公蟹 <i>Dorippe granulata</i>			6.61	8.38	7.08	8.8

注: As—平均相似性; C—贡献率。

Note: As—average similarity; C—contribution ratio.

表 3 莱州湾蟹类群落差异性贡献率前三位的分歧种

Tab. 3 Discriminating species for different community group top 3 in dissimilarity contribution rate in Laizhou Bay

种类 species	组 A—组 B Group A—Group B		种类 species	组 A—组 C Group A—Group C	
	Ad=38.1%			Ad=29.94%	
	Ad	C		Ad	C
日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	8.18	21.46	日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	6.63	22.15
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	7.42	19.48	绒毛近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>	4.65	15.53
绒毛近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>	4.78	12.53	隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	3.88	12.98
种类 species	组 A—组 D Group A—Group D		种类 species	组 B—组 C Group B—Group C	
	Ad=48.45%			Ad=27.47%	
	Ad	C		Ad	C
日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	10.67	22.03	日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	5.09	18.54
日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	9.52	19.64	颗粒关公蟹 <i>Dorippe granulata</i>	4.53	16.5
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	8.24	17.01	隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	4.43	16.14
种类 species	组 B—组 D Group B—Group D		种类 species	组 C—组 D Group C—Group D	
	Ad=34.58%			Ad=34.11%	
	Ad	C		Ad	C
日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	13.88	40.14	日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	6.79	19.92
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	8.5	24.58	颗粒关公蟹 <i>Dorippe granulata</i>	5.4	15.83
端正关公蟹 <i>Paradorippe cathayana</i>	2.52	7.28	隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	4.66	13.66

注: Ad—平均差异性; C—贡献率。

Note: Ad—average dissimilarity; C—contribution ratio.

2.6 群落的影响因子分析

2010—2019 年夏季莱州湾调查站位底层水温介于 18.9~31.5 °C，年平均水温 27~30 °C，2010—2014 年平均水温变化较小，2015—2018 年平均水温有升高趋势，2019 年下降；底层叶绿素浓度变化范围为 0.46~54 μg/L，年均叶绿素浓度为 2~4 μg/L，2019 年有升高趋势；底层盐度介于 12~32.75，年平均盐度为 25~31，2010—2013 年降低，

2014—2018 年逐渐升高，2019 年降低；底栖生物生物量的范围为 0.065~293.19 g/m²，年均生物量为 0.1~45 g/m²，其中 2015 年和 2019 年底栖生物生物量较高；石油类介于 0~0.14 mg/L 之间，年均石油类为 0.02~0.06 mg/L，2011 年石油类较高，2012—2019 年呈下降趋势；溶解氧变化范围为 4.8~11.34 mg/L，年均溶解氧 5.7~9.3 mg/L。图 7 显示，厄尔尼诺指数连续 5 个月滑动平均值超过

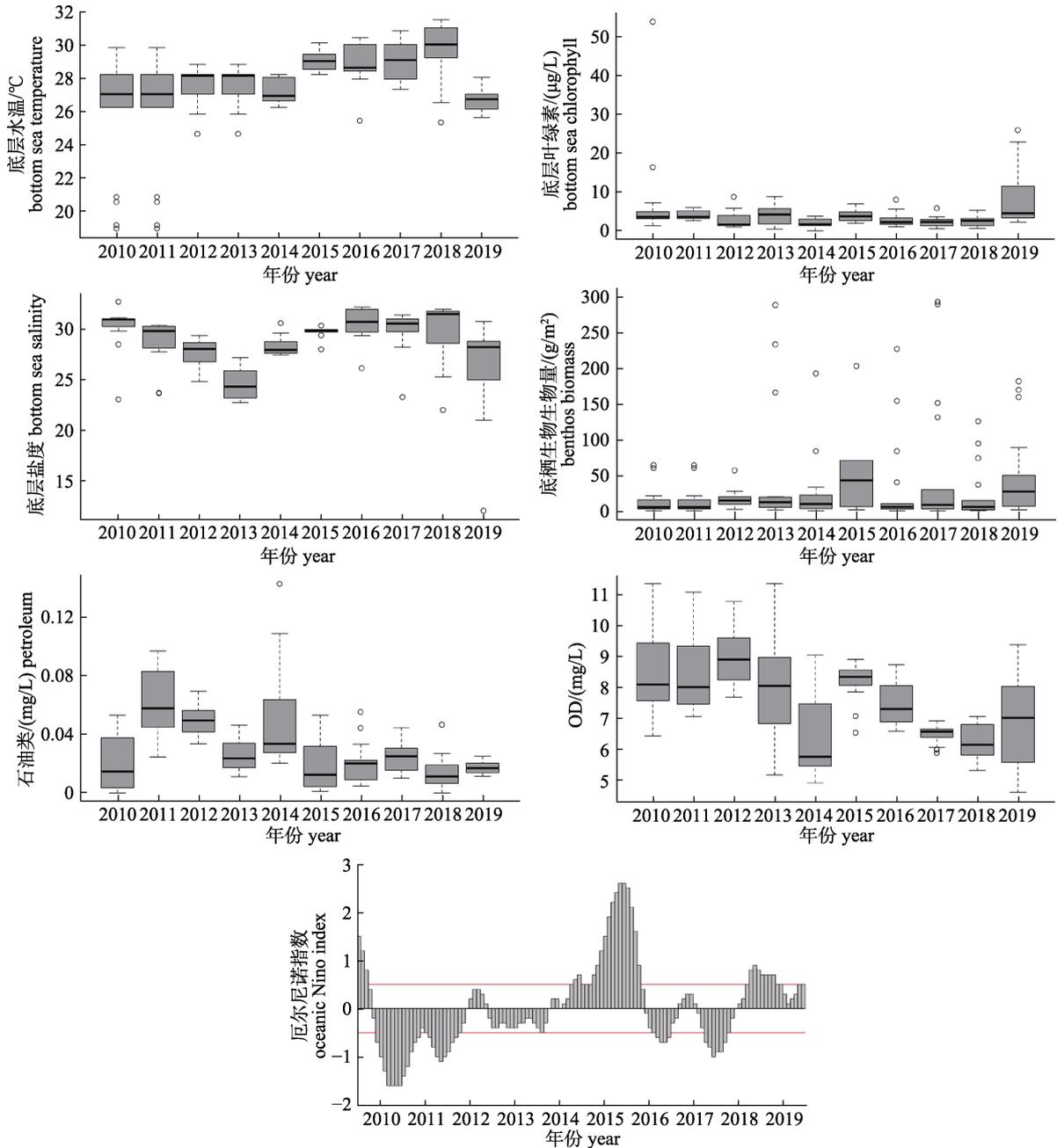


图 7 莱州湾夏季环境因子年际变化
Fig. 7 Interannual variation of environmental factors in Laizhou Bay in summer

+0.5 °C, 则认为发生一次厄尔尼诺事件, 若连续 5 个月低于-0.5 °C, 则认为发生一次拉尼娜事件, 由此可以判断 2010—2012 年期间发生了拉尼娜事件, 2014—2016 年发生了厄尔尼诺事件。

根据冗余分析结果(表 4, 图 8), 第一轴 RDA1 的解释比例是 50.4%, 第二轴 RDA2 的解释比例是 24.9%, 根据环境因子和排序轴的相关系数, 对蟹类群落年际变化影响较大的环境因子是底层叶绿素、底栖生物生物量和厄尔尼诺指数, 第一轴 RDA1 相关系数分别为 0.312、-0.282 和-0.266,

表 4 环境因子与排序轴之间的相关系数
Tab. 4 Correlation coefficients between ordination axes and environmental factors

约束变量 constraint variable	RDA1	RDA2
特征值 eigenvalue	0.024	0.012
底层水温 bottom sea temperature	-0.146	-0.164
底层盐度 bottom sea salinity	0.027	0.107
底层叶绿素 bottom sea chlorophyll	0.312	0.223
溶解氧 dissolved oxygen	0.136	-0.101
底栖生物生物量 benthos biomass	-0.282	0.001
厄尔尼诺指数 oceanic Nino Index	-0.266	0.039
石油类 petroleum	-0.108	-0.004

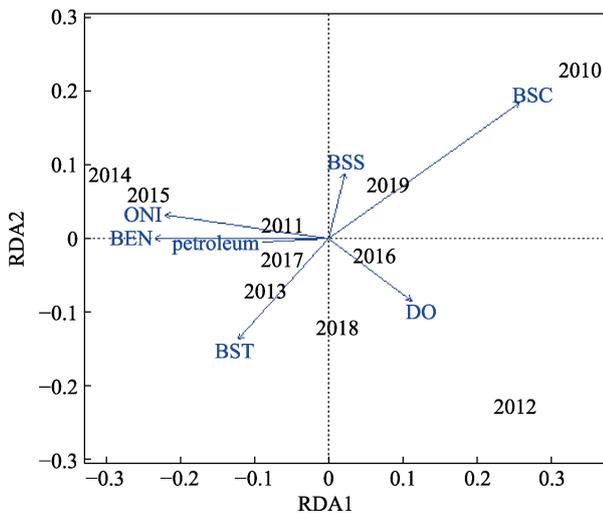


图 8 蟹类群落的影响因子分析

BST: 底层水温; BSS: 底层盐度; BSC: 底层叶绿素;
DO: 溶解氧; BEN: 底栖生物生物量;
ONI: 厄尔尼诺指数; petroleum: 石油类。

Fig. 8 Analysis of influencing factors of crab community
BST: bottom sea temperature; BSS: bottom sea salinity; BSC: bottom sea chlorophyll; DO: dissolved oxygen; BEN: benthos biomass; ONI: oceanic Nino index.

第二轴 RDA2 相关系数为 0.223、0.001 和 0.039。底层叶绿素对 2010 年影响明显, 底栖生物生物量和厄尔尼诺指数对 2011、2014 和 2015 年影响较大。底层水温、溶解氧和石油类对蟹类群落年际变化也有一定的影响, 底层水温对 2013 年影响较大, 溶解氧对 2012 年影响较大, 石油类主要对 2011 年产生影响, 底层盐度的影响较小。

3 讨论

3.1 蟹类种类数和优势种年际变化

2010—2019 年莱州湾蟹类的种类数呈减少趋势, 本研究分析表明, 蟹类年均减少种类数为 0.31 种, 与鱼类相比^[30]减少数量较小。蟹类种类数调查受采样强度影响较大^[31], 不同站位设置和作业方式调查结果有所不同, 本研究中 10 年的调查站位和采样强度均未发生变化, 表明莱州湾蟹类种类数减少的可能性较大。资源密度越高在调查中被发现的可能性越大, 大型蟹类日本蟳和三疣梭子蟹以及小型蟹类中隆线强蟹和日本关公蟹等在所有调查年份均出现, 种类数减少的原因在于部分小型蟹类资源密度降低。

2010—2019 年莱州湾蟹类最主要的优势种是日本蟳, 生物量占整个蟹类群落生物量的 63.5%, 结合其他学者的研究^[1,3,32], 日本蟳已经成为夏季莱州湾和整个渤海海域的绝对优势种。研究表明, 莱州湾海域持续的增殖放流活动, 扩大了三疣梭子蟹的种群规模, 但尚未较大程度改变蟹类群落结构^[33], 三疣梭子蟹仍是仅次于日本蟳的重要优势种。小型蟹类主要为隆线强蟹和日本关公蟹, 占全部小型蟹类生物量的 80%以上, 在部分年份相对重要性指数会高于三疣梭子蟹。20 世纪 80 年代开始, 莱州湾鱼类主要优势种带鱼(*Trichurus lepturus*)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)等个体大、经济价值高的种类逐渐被鳀(*Engraulis japonicus*)、黄鲫(*Setipinna taty*)等个体小、营养级低的鱼类所替代^[34], 并且有进一步小型化低龄化的趋势^[32], 相比较鱼类优势种年际变化剧烈, 莱州湾夏季蟹类优势种比较稳定, 以日本蟳和三疣梭子蟹两种大型蟹类为主。

3.2 群落结构的年际变化

1959—1999 年之间 4 次调查莱州湾渔业资源状况, 并对其渔业资源群落结构进行研究, 发现在较大的时间尺度范围内, 群落结构变化显著, 生物多样性在 1959—1982 年逐渐增加然后下降^[1,35]。本研究在 2010—2019 年较小的时间尺度范围, 采取逐年调查的方式分析莱州湾蟹类群落结构 10 年间的渐变情况。2010—2019 年多样性出现波动变化, 引起变化的主要原因是 2014 年和 2015 年丰富度指数 D 、均匀度指数 J 和 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 均较大幅度下降。丰富度指数 D 变化范围在 0.3~0.9, 均匀度指数 J 变化范围在 0.3~0.7, Shannon-Wiener 多样性指数 H' 变化范围在 0.25~1.25, 多样性水平整体低于 20 世纪调查水平^[2], 与同时期厦门海域^[12]和浙江近海^[11]蟹类多样性相比同样处于较低水平, 但高于山东半岛南部海域^[13]。

蟹类群落年际聚类各分组的主要特征种相似性较高, 主要为日本蟳、三疣梭子蟹和隆线强蟹, 同时也是蟹类种群中的主要优势种^[5,36], 显著性检验同时表明分组间有显著性差异($P < 0.05$), 说明群落结构的差异性除了受主要优势种分布变化影响外, 非优势种的小型蟹类的相对资源量的变化也产生了重要影响, 这与鱼类群落结构的研究结果不同^[30]。组间相异性的分析同样表明, 日本关公蟹、绒毛近方蟹、颗粒关公蟹和端正关公蟹 (*Paradorippe cathayana*) 等小型蟹类对群落分组产生了较大的影响, 是造成组间差异的重要影响因素。

3.3 蟹类群落的影响因子

蟹类群落受海洋环境因子、生物因子、海底底质、人为捕捞和环境污染等的综合影响, 本研究重点探讨了底层水温、底层盐度、底层叶绿素、溶解氧、底栖生物生物量、厄尔尼诺指数和石油类对蟹类群落的影响。夏季是蟹类索饵育肥季节, 摄食量大, 是蟹类生长发育最快的季节, 底层叶绿素浓度的升高使浮游动植物的密度增加, 进而吸引蟹类饵料生物聚集, 使得底层叶绿素浓度对蟹类饵料资源丰度产生重要影响^[5], 成为影响蟹类群落的主要环境因子, 与杨刚^[14]在黄海海域和

卢衍尔等^[11]在东海海域的研究结果相似。底栖生物生物量对蟹类群落生物量产生了负相关影响, 可能原因是日本蟳和三疣梭子蟹的主要摄食来源为双壳类等底栖生物^[33]。本研究用底栖生物生物量为全部底栖生物生物量, 未能将底栖生物分类测量, 无法有针对性的分析底栖双壳类生物量对蟹类群落的影响, 在今后的研究中应根据不同蟹类的食性特征, 深入探讨不同底栖生物种类对蟹类之间营养生态位和捕食竞争的影响。水温对蟹类群落的季节变化有重要影响, 冬春季对蟹类群落的影响远高于夏季^[10], 多数蟹类有越冬洄游的习性, 越冬期一般为 12 月至次年 3 月, 底层水温是影响其越冬洄游最关键的因子^[14]。本研究重点探讨了蟹类群落年际变化的影响因子, 调查数据均来源于夏季航次, 由于尚未进入越冬期, 可能会导致研究结果中底层水温的影响偏小。莱州湾沿岸有黄河、小清河、潍河等 10 余条河流入海, 夏季丰水期淡水入海量增加, 对近岸海水盐度产生重要的影响。本研究采用拖网作业方式进行资源调查, 无法在近岸小于 5 m 水深海域开展, 因而会使得近岸海域蟹类数据统计缺失, 导致冗余分析中盐度对蟹类群落的影响降低。此外, 本研究冗余分析显示, 石油类对 2011 年蟹类群落产生了一定的负相关影响。蟹类营养级较高, 石油类对其造成的危害, 主要通过石油污染物的富集, 导致体内石油烃等有毒物质的含量增加, 破坏细胞的正常结构, 干扰酶的作用发挥, 进而影响蟹类生物的正常生理、生化过程。2011 年蓬莱 19-3 油井溢油导致渤海甲壳类生物量在 2011—2013 年出现明显下降^[16], 莱州湾蟹类群落受到溢油的影响, 出现一致的变化趋势。

蟹类群落除受水温、盐度、叶绿素等局部环境因子影响外, 也会对大尺度气候因子(厄尔尼诺、拉尼娜等)产生响应^[37], 本研究 RDA 分析表明厄尔尼诺对 2014 和 2015 年蟹类群落生物量产生了较大负相关影响。2014—2016 年出现史上最强的厄尔尼诺事件^[38], 导致全球从 2014 年开始出现海温异常现象^[39], 干扰蟹类的洄游、越冬和产卵^[40], 此外, 厄尔尼诺事件对其他海洋生物资源和生态系统产生了重要影响^[41], 进而影响蟹类

群落, 导致2014—2015年蟹类生物多样性显著降低(图5)。在气候变化和极端异常环境频繁的大背景下, 探究气候因子对蟹类群落的影响机制, 有利于制定更加科学有效的三疣梭子蟹放流政策, 实现蟹类资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] Jin X S, Deng J Y. Variations in community structure of fishery resources and biodiversity in the Laizhou Bay, Shandong[J]. Biodiversity Science, 2000, 8(1): 65-72. [金显仕, 邓景耀. 莱州湾渔业资源群落结构和生物多样性的变化[J]. 生物多样性, 2000, 8(1): 65-72.]
- [2] Deng J Y, Jin X S. Study on fishery biodiversity and its conservation in Laizhou Bay and Yellow River Estuary[J]. Zoological Research, 2000, 21(1): 76-82. [邓景耀, 金显仕. 莱州湾及黄河口水域渔业生物多样性及其保护研究[J]. 动物学研究, 2000, 21(1): 76-82.]
- [3] Wu Q, Li Z Y, Dai F Q, et al. Taxonomic diversity of crustaceans in Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(11): 1306-1314. [吴强, 李忠义, 戴芳群, 等. 黄渤海甲壳类的分类多样性[J]. 生物多样性, 2016, 24(11): 1306-1314.]
- [4] Li F, Lu Z B, Wei Z H, et al. Seasonal changes in the community structure of the demersal fishery in Laizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(1): 137-147. [李凡, 吕振波, 魏振华, 等. 2010年莱州湾底层渔业生物群落结构及季节变化[J]. 中国水产科学, 2013, 20(1): 137-147.]
- [5] Cong X R, Li F, Lv Z B, et al. Community structure of crab in Laizhou Bay[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(5): 419-426. [丛旭日, 李凡, 吕振波, 等. 莱州湾蟹类的群落结构特征[J]. 海洋渔业, 2015, 37(5): 419-426.]
- [6] Spadaro A J, Butler M J IV. Herbivorous crabs reverse the seaweed dilemma on coral reefs[J]. Current Biology, 2021, 31(4): 853-859.
- [7] Sharifian S, Kamrani E, Saeedi H. Global biodiversity and biogeography of mangrove crabs: Temperature, the key driver of latitudinal gradients of species richness[J]. Journal of Thermal Biology, 2020, 92: 102692.
- [8] Yu C G, Song H T, Yao G Z, et al. Composition and distribution of economic crab species in the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(1): 53-60. [俞存根, 宋海棠, 姚光展, 等. 东海大陆架海域经济蟹类种类组成和数量分布[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(1): 53-60.]
- [9] Zheng X Z, Yu C G, Chen X Q, et al. Species composition and spatio-temporal distribution of crabs in Zhoushan fishing ground and its adjacent areas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 147-153. [郑献之, 俞存根, 陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域蟹类种类组成和时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 147-153.]
- [10] Zheng J, Xie X, Yu C G, et al. Crab community structure and its relationship with environment factors in Pishan waters of the middle of Zhejiang Province[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(8): 1241-1253. [郑基, 谢旭, 俞存根, 等. 浙江中部披山海域蟹类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(8): 1241-1253.]
- [11] Lu K E, Zhang H L, Zhu W B, et al. Community structure of crabs and its relationship with environmental factors in Zhejiang coast area in spring and summer[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(3): 612-622. [卢衍尔, 张洪亮, 朱文斌, 等. 浙江近海春、夏季蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2019, 43(3): 612-622.]
- [12] Shen S C, Chen R B, Huang L M, et al. The structure characteristics of crab community in Xiamen coastal waters[J]. Chinese Journal of Zoology, 2018, 53(6): 868-877. [申世常, 陈融斌, 黄良敏, 等. 厦门海域蟹类的群落结构特征[J]. 动物学杂志, 2018, 53(6): 868-877.]
- [13] Yang G, Li F, Wang X X, et al. Community structure of crabs in the coastal waters along the southern Shandong Peninsula[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(4): 862-874. [杨刚, 李凡, 王秀霞, 等. 山东半岛南部近岸海域蟹类群落结构特征[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 862-874.]
- [14] Yang G, Li F, Lv Z B, et al. Study on the community structure of crabs in the coastal waters along Shandong Peninsula[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(8): 48-61. [杨刚, 李凡, 吕振波, 等. 山东半岛近岸海域蟹类群落结构特征的研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(8): 48-61.]
- [15] Pang Z W, Xu B D, Ji Y P, et al. Monthly changes and related affecting factors in community structure and diversity of the crab assemblages in central Jiaozhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 591-598. [逢志伟, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 胶州湾中部海域蟹类群落结构及多样性的月变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 591-598.]
- [16] Wu Q, Li Z Y, Wang J, et al. Inter-annual variation in the community structure of crustaceans in the Bohai Sea during summer[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(2): 16-23. [吴强, 李忠义, 王俊, 等. 渤海夏季甲壳类群落结构的年际变化[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 16-23.]
- [17] Lyu T J. Assessment of important fishery resources in the south offshore of Shandong from 2010 to 2017[D]. Yantai: Yantai University, 2018: 20-21. [吕廷晋. 2010~2017年山东南部近海重要渔业资源评估[D]. 烟台: 烟台大学, 2018: 20-21.]
- [18] Wang J G. The community structure and species diversity of shrimp and crab in the set-net fishing area off the coast of Zhoushan[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2012: 25-26. [王甲刚. 舟山沿岸张网作业区虾蟹类群落结构和多样性的研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2012: 25-26.]

- [19] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. [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. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [20] Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008: 659. [刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 659.]
- [21] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard of the People's Republic of China: The specification for marine monitoring, GB 17378-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [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. 中华人民共和国国家标准: 海洋监测规范 GB 17378-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [22] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[R]. State of California, the Resources Agency, Department of Fish and Game, Fish Bulletin 152, 1971: 1-105.
- [23] Cheng J S. Structure and diversity of invertebrate resources in the Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(1): 68-75. [程济生. 黄海无脊椎动物资源结构及多样性[J]. 中国水产科学, 2005, 12(1): 68-75.]
- [24] Wu Q, Wang J, Jin X S, et al. Community structure and diversity of invertebrates in northern region of China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1152-1160. [吴强, 王俊, 金显仕, 等. 中国北部海域主要无脊椎动物群落结构及多样性[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1152-1160.]
- [25] Ulanowicz R E. Information theory in ecology[J]. Computers & Chemistry, 2001, 25(4): 393-399.
- [26] Pielou E C, Levandowsky M. Ecological diversity[J]. Quarterly Review of Biology, 1976, 18(3): 43.
- [27] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula[J]. Ecology, 1968, 49(1): 153-156.
- [28] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. Australian Journal of Ecology, 1993, 18(1): 117-143.
- [29] Legendre P, Gallagher E D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data[J]. Oecologia, 2001, 129(2): 271-280.
- [30] Li Z Y, Wu Q, Shan X J, et al. Interannual variations in fish community structure in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(2): 403-413. [李忠义, 吴强, 单秀娟, 等. 渤海鱼类群落结构的年际变化[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 403-413.]
- [31] Mou X X, Xu B D, Xue Y, et al. Non-parametric method for estimating the species richness of a nekton community during fall in the southern waters of Shandong Peninsula[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 436-443. [牟秀霞, 徐宾铎, 薛莹, 等. 利用非参数方法估计山东半岛南部海域秋季游泳生物群落物种丰富度[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 436-443.]
- [32] Zhang B, Wu Q, Jin X S. Interannual variation in the food web of commercially harvested species in Laizhou Bay from 1959 to 2011[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(2): 278-287. [张波, 吴强, 金显仕. 1959-2011 年莱州湾渔业资源群落食物网结构的变化[J]. 中国水产科学, 2015, 22(2): 278-287.]
- [33] Jiang W M, Meng T X, Chen R S, et al. Diet of *Charybdis japonica* (A. Miline-dewards) and *Portunus trituberculatus* (Miers) in the Bohai Sea[J]. Marine Fisheries Research, 1998, 19(1): 53-59. [姜卫民, 孟田湘, 陈瑞盛, 等. 渤海日本鲟和三疣梭子蟹食性的研究[J]. 海洋水产研究, 1998, 19(1): 53-59.]
- [34] Jin X S, Shan X J, Li X S, et al. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(3): 366-374.
- [35] Washington H G. Diversity, biotic and similarity indices: A review with special relevance to aquatic ecosystems[J]. Water Research, 1984, 18(6): 653-694.
- [36] Ding P P, Gao C X, Tian S Q, et al. Crab community structure and its relationship with environment factors in the offshore waters of southern Zhejiang Province[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(6): 652-662. [丁朋朋, 高春霞, 田思泉, 等. 浙江南部近海蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 652-662.]
- [37] Yuan X W, Liu Z L, Cheng J H, et al. Impact of climate change on nekton community structure and some commercial species in the Offshore Area of the northern East China Sea in winter[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2796-2808. [袁兴伟, 刘尊雷, 程家骅, 等. 气候变化对冬季东海外海中下层游泳动物群落结构及重要经济种类的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2796-2808.]
- [38] Jacox M G, Hazen E L, Zaba K D, et al. Impacts of the 2015-2016 El Niño on the California Current System: Early assessment and comparison to past events[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(13): 7072-7080.
- [39] Santoso A, Mcphaden M J, Cai W J. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño[J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(4): 1079-1129.
- [40] Fischer S, Thatje S. Temperature effects on life-history traits

cause challenges to the management of brachyuran crab fisheries in the Humboldt Current: A review[J]. Fisheries Research, 2016, 183: 461-468.

[41] Kogan F, Guo W. Strong 2015–2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(1): 161-178.

Interannual variation and influencing factors of summertime crab community structure in the Laizhou Bay, 2010–2019

ZHANG Xiaomin¹, SHEN Ruiting², LI Shaowen¹, YANG Yanyan¹, WANG Xiuxia¹, LI Fan¹

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;
2. China Communications Construction Water Transportation Consultants Co. Ltd., Beijing 100007, China

Abstract: Laizhou Bay is located in the southern part of the Bohai Sea, and is one of three major bays in the Bohai Sea. Laizhou Bay contains many species of crabs and is an important spawning and feeding ground for commercial crab species such as *Portunus trituberculatus* and *Charybdis japonica*. In recent years, the ecosystems and marine living resources in Laizhou Bay have been greatly affected due to the overexploitation of fisheries. Compared to the severe decline of economic fish resources, the decline in crab resources has been relatively slow, and the importance of these crabs in the ecosystem has been gradually increasing. Investigating the interannual variation of crab community structure and its influencing factors in Laizhou Bay provides a scientific basis for the rational utilization of crab resources. This study reports on the interannual variation and influencing factors of the summertime crab community structure in Laizhou Bay, based on bottom-trawl survey data from 2010 to 2019. This includes a description of the species composition, dominant species, biodiversity indices, community structure, and environmental factors affecting crab communities. Of the 16 crab species reported from this area during summer from 2010–2019, 14 occurred in 2011, although this reduced to seven in 2017; there were two to four dominant species per year. The average number of crab species decreased by 0.31 each year; the biomass and mantissa of crabs had initially decreased, then increased. *Charybdis japonica* and *Portunus trituberculatus* are the important dominant species in Laizhou Bay, the former being the first dominant species in 10 y and the latter being the dominant species in 8 y. The crab diversity index decreased significantly from 2014 to 2015. Crab assemblages in different years were divided into four groups: A (2010), B (2011, 2014, 2015), C (2012, 2013, 2018, 2019), and D (2016, 2017). The permutational multivariate analysis of variance test demonstrated that the crab community structure significantly differed between the four groups. The similarity percentages breakdown (SIMPER) analysis showed that characteristic species for different community groups were *Charybdis japonica*, *Portunus trituberculatus*, and *Philyra carinata*. The average dissimilarity between groups A and D was the largest (48.45%), and the main discriminating species were *Dorippe japonica*, *Charybdis japonica*, and *Eucrate crenata*. The average dissimilarity between groups A and B was 38.1%, and the main discriminating species were *Dorippe japonica*, *Eucrate crenata*, and *Hemigrapsus penicillatus*. Other discriminating species for different community groups were *Heikeopsis japonicus*, *Raphidopus ciliatus*, and *Philyra carinata*. Redundancy analysis showed that bottom sea chlorophyll, benthos biomass, and the Oceanic Niño Index were the key environmental factors affecting the interannual variation of crab community structure. The crab community structure was greatly affected by petroleum in 2011, as a result of the Penglai 19-3 oil spill accident. The strong El Niño event had a significant impact on crab community structure in 2014 and 2015, leading to a significant decrease in crab biomass and biodiversity in Laizhou Bay.

Key words: crab; community structure; interannual variation; environmental factors; Laizhou Bay

Corresponding author: LI Fan. E-mail: lifan811230@126.com