

DOI: 10.12264/JFSC2020-0291

海州湾鱼类 β 多样性变化

李雪童^{1,2}, 徐宾铎^{1,3}, 薛莹^{1,2}, 任一平^{1,2,3}, 张崇良^{1,2}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237

摘要: 海州湾海域渔业资源丰富, 但近年来由于过度捕捞、环境污染的影响, 渔业资源严重衰退。为了解海州湾鱼类 β 多样性的时空变化规律, 本研究根据 2011 年、2013—2019 年在海州湾海域进行的 8 个航次秋季渔业资源底拖网调查数据, 采用 Chao 和自助法两种非参数统计方法, 估算调查海域的鱼类物种丰富度, 并采用 Sorensen 和 Cody 指数等多种 β 多样性的度量方法, 计算了鱼类物种 β 多样性。海州湾海域调查共捕获鱼类 94 种, 鱼类物种数和 β 多样性均在近年间呈现波动下降趋势。利用 K 均值聚类将调查站位按 20 m 等深线划分为组 I (<20 m) 和组 II (>20 m), 进一步的 β 多样性空间差异分析表明, 组 II 的 β 多样性呈现相对明显的下降趋势, 而组 I 无明显变化; 两组间 Cody 替代性指数随时间降低, 而 Sorensen 相似性指数略有升高, 表征了深水区与浅水区 β 多样性的变化趋势有着显著差别。研究结果表明海州湾海域的鱼类群落呈现生物同质化趋势, 该趋势的出现可能与过度捕捞、环境变化等原因有关。本研究旨在为渔业资源的养护、海洋保护区的建设提供科学依据。

关键词: 鱼类; β 多样性; 同质化; Chao 法; 自助法; 海州湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)04-0451-09

物种多样性是生物群落最基本的特征之一^[1], 也是影响生态系统功能和稳定性的重要因素^[2], 不仅能反映群落的组成、结构和演替过程, 还可以描述环境因子、人为干扰等与生物群落的关系。近年来物种多样性研究受到越来越多的关注, 是生态学研究热点之一^[3-4]。关于生物多样性的定义, Whittaker^[5]首次提出三个不同层次的物种多样性, 即 α 多样性、 β 多样性和 γ 多样性。其中, α 多样性和 γ 多样性具有相同的量化特征, 又合称为编目多样性^[6], 是学者们的研究重点。 β 多样性的定义和度量存在较多争议, 其研究近年来才受到关注^[7]。

目前 β 多样性研究多集中在陆生生态系统和淡水生态系统, 如白永飞等^[8]对内蒙古高原针茅

草原群落进行了 β 多样性研究, 发现不同群落的植物种类组成表现出明显生态替代现象; 杨婧等^[9]研究了放牧对内蒙古典型草原 β 多样性的影响机制, 发现 β 多样性随放牧强度的增加而逐渐减小; 张东等^[10]分析了青弋江鱼类分类群和功能群的 α 和 β 多样性纵向梯度格局等。目前少有研究针对海洋生态系统的鱼类群落, 也未深入探讨鱼类物种 β 多样性的时空变化。

本研究以海州湾为例探讨了海洋生态系统的 β 多样性特征。海州湾位于黄海中南部, 是开放型浅海性海湾^[11]。历史上, 该海域地形平坦、水质肥沃、生产力高, 是多种重要经济生物的产卵场、育幼场和索饵场。然而, 受到过度捕捞、环境污染以及人类活动等因素的影响, 海州湾及其邻近

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2020-10-13。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900904); 国家自然科学基金项目(31772852); 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(2018SDKJ0501-2)。

作者简介: 李雪童(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源研究。E-mail: 13294097704@163.com

通信作者: 张崇良, 副教授, 主要从事渔业生态动力学和渔业资源评估与管理研究。E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn

海域的渔业资源严重衰退^[12-13]。本研究根据 2011 年、2013—2019 年海州湾渔业资源调查数据,统计了海州湾海域实际的鱼类物种数,并应用多种 β 多样性的度量方法,分析该海域鱼类物种 β 多样性的时空变动规律,以期渔业资源管理和养护、海洋保护区选址以及布局规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于 2011 年、2013—2019 年秋季在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源底拖网

调查,采用分层随机取样(stratified random sampling)的方法设计调查站位^[13]。根据水深等环境特征将调查海域划分为 A~E 5 个采样区,并在每区按经纬度划分为 $10' \times 10'$ 的采样小区,共 76 个采样小区(图 1)。2011 年随机选取 24 个小区进行调查(A 区 3 个, B 区 5 个, C 区 3 个, D 区 9 个, E 区 4 个);经调查站位优化后,2013—2019 年间每年随机选取 18 个小区进行调查(A 区 2 个, B 区 4 个, C 区 2 个, D 区 7 个, E 区 3 个)。由于天气、地形等原因,2014—2016 年仅完成 17 站,2017 年仅完成 14 站。

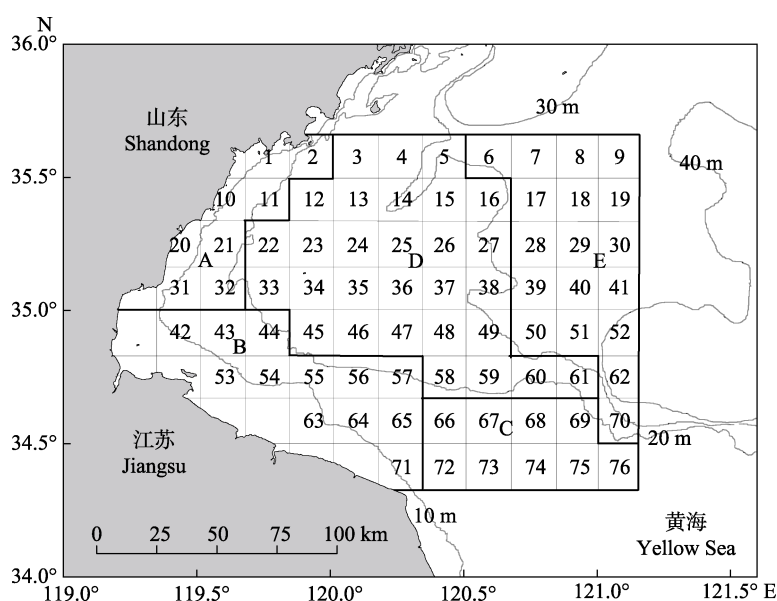


图 1 海州湾渔业资源调查站位示意图

Fig. 1 Sampling stations in the fishery resource surveys of Haizhou Bay

调查所用的渔船为单拖渔船,功率为 220 kW,网具网口宽度约 25 m,网囊网目为 17 mm。拖网作业于白天进行,并利用 CTD 同步测量水深、水温、盐度等环境数据。渔获物样品的采集及分析等根据《海洋调查规范》^[14]进行。样品分析鉴定到种,并测定各物种的质量和尾数。由于在实际调查中各站位存在一定差异,在数据分析前对原始调查数据进行标准化处理,将所有渔获物的质量和尾数均标准化成拖网时间 1 h、拖速 2.0 kn 的相对渔获量。

1.2 分析方法

1.2.1 非参数估算方法 生物多样性调查往往受

采样努力量的潜在影响,即物种丰富度随采样努力量(如调查站位、采样面积)的提高而不断增加,导致不同研究的结果难以直接比较^[15]。为排除采样努力量的影响,本研究根据渔业资源调查数据,采用非参数统计方法 Chao^[16]和自助法(Bootstrap)^[17]估算该海域的总物种数,即总物种丰富度,并应用 Chao 估计法估算每个站位存在的物种数。其中,Chao 估计法的计算公式:

$$C_{\text{Chao}} = C + C_1^2 / 2C_2 \quad (1)$$

式中, C 为调查采集的物种数, C_1 为仅由 1 个个体代表的物种数, C_2 为仅由 2 个个体代表的物种数, C_{Chao} 为 Chao 估计法得出的物种数。

Bootstrap 估计法的计算公式:

$$B_j = S + \sum_{j=1}^{S_0} \left(1 - \frac{Y_j}{n} \right)^n$$

(2)

式中, S 为调查采集的物种数, S_0 为 Bootstrap 样本中观测到的物种数, n 为调查的站位数, Y_j 为样本数量, B_j 为 Bootstrap 估计法得出的物种数。

1.2.2 β 多样性的时间变化 根据 Whittaker 对物种多样性的定义, 结合加性分配原则^[18], 计算各年调查海域的总 β 多样性, 计算公式为:

$$\beta = \gamma - \bar{\alpha}$$

(3)

式中, β 为调查海域鱼类物种的 β 多样性, γ 为经由 Bootstrap 估计的该海域鱼类物种总数, $\bar{\alpha}$ 为经 Chao 估计得到的各站位物种数的平均值。根据每年 β 多样性的估算结果, 利用回归模型分析 β 多样性的年际变化趋势。

1.2.3 β 多样性的空间差异 为探索 β 多样性变化的原因, 本研究进一步分析了海州湾不同区域 β 多样性时空特征。根据渔业资源调查数据, 采用 K 均值聚类分析(K -Means Cluster)^[19], 将调查站位分为两组, 分别进行 β 多样性计算, 分析不同分组 β 多样性的时间变化。此外, 采用 Sorenson 指数^[20]和 Cody 指数^[21]对 β 多样性的空间变异进行分析。其中 Sorenson 指数反映组间物种组成的相似性, 该指数上升表示物种组成的相似程度增大, β 多样性降低; Cody 指数反映组间物种组成的替代性, 该指数上升表示物种组成的相异性升高, β 多样性增加。Sorenson 相似性指数的计算公式:

$$\beta_s = 2c / (a + b)$$

(4)

式中, a 和 b 分别为两组站位各自的物种数, c 为两组共有的物种数。

Cody 替代性指数的计算公式:

$$\beta_c = (g + l) / 2$$

(5)

式中, g 和 l 分别为在一组站位中出现而在另一组中没有出现的物种数。

研究采用 R 4.0.2 软件对数据进行分析并作图。

2 结果与分析

2.1 物种组成及年际变化

海州湾渔业资源调查 2011 年及 2013—2019 年中共捕获鱼类 94 种, 隶属于 2 纲 12 目 48 科 73

属。其中辐鳍鱼纲(Actinopterygii)鱼类达 93 种, 以鲈形目(Perciformes)种类占绝对优势, 共采集到 49 种, 占有鱼类物种总数的 52.13%; 其次为鲉形目(Scorpaeniformes)和鲱形目(Clupeiformes), 分别采集到 12 种和 11 种, 占比为 12.77%和 11.70%。

调查数据显示, 2011 年采集到的鱼类物种最多, 为 65 种; 其次为 2016 年和 2014 年, 分别为 54 种和 52 种; 2017 年最少, 仅采集到鱼类 43 种。非参数方法的估算结果中, Chao 估算的鱼类物种数在 2016 年和 2011 年最大, 分别为 72 和 71 种; 2017 年最小, 仅为 45 种; Bootstrap 估算的物种数在 2011 年最大, 为 70 种; 其次为 2016 年和 2018 年, 均为 60 种; 2017 年和 2019 年达到最小值, 为 47 种(表 1)。

表 1 海州湾鱼类物种组成

Tab. 1 Species composition of fish in Haizhou Bay

调查年份 year	调查数据 survey data				估算结果 estimate	
	目 order	科 family	属 genus	种 species	Chao 估计 Chao	自助估计 Bootstrap
2011	10	38	55	65	71	70
2013	9	29	44	48	59	53
2014	11	31	46	52	65	58
2015	11	31	42	50	56	54
2016	10	33	46	54	72	60
2017	9	26	38	43	45	47
2018	9	33	44	51	66	60
2019	9	28	40	44	48	47

调查采集到的鱼类物种数在年际间呈现波动下降的趋势, 与采用非参数方法 Chao 和 Bootstrap 的估算结果一致(图 2)。不同的是, 海州湾鱼类物种数的观测值下降趋势显著($P<0.05$), 而采用两种不同方法进行估算的结果则反映出鱼类丰富度虽有一定的下降趋势且年际波动较大, 但下降趋势并不显著($P>0.05$)。回归模型的斜率表明, 在 2011—2019 年间, 海州湾鱼类平均每年减少 1.8~1.9 个物种。

2.2 海域 β 多样性的变化趋势

经非参数方法估算海州湾海域以及各调查站位可能存在的鱼类物种数, 并由此计算该海域鱼

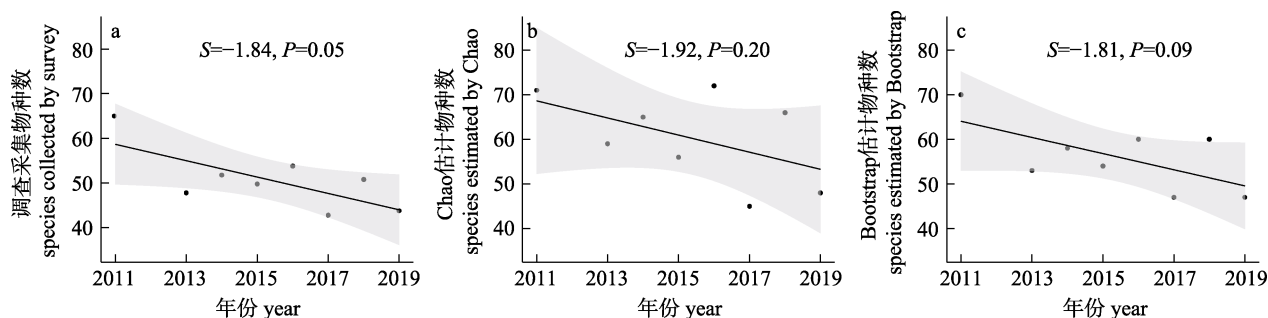


图 2 海州湾鱼类物种丰富度的年际变化

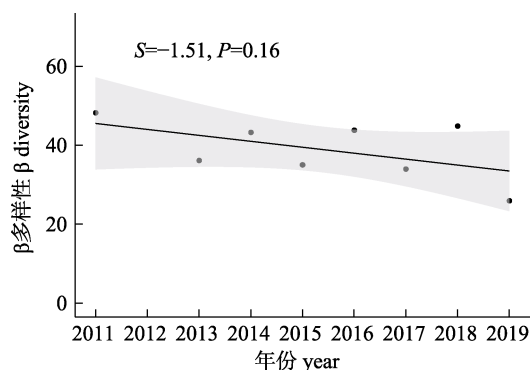
S 为趋势线的斜率, P 为显著水平。

Fig. 2 Interannual variation of fish species richness in Haizhou Bay

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

类物种 β 多样性, 结果表明: 在近十年的时间中, 海州湾海域鱼类物种 β 多样性呈现波动下降趋势, 总体趋势并不显著($P>0.05$)。其中, 2011 年海州湾鱼类的 β 多样性最高, 为 48.25; 2014 年、2016 年和 2018 年的 β 多样性较为接近; 2019 年 β 多样性最低, 仅为 25.94, 其次为 2017 年, 为 34.00 (图 3)。2011—2019 年间, 海州湾鱼类总体 β 多样性的平均下降率为 1.51/年。

偏离趋势线; 此外均在 20.29~25.20 的范围内波动, 其均值为 22.90, 标准偏差为 1.92。深水组的 β 多样性随时间变化, 其变化范围为 22.61~41.72, 呈相对明显的下降趋势, 其均值为 29.98, 标准偏差为 6.88。其中 β 多样性在 2011 年取得最大值 41.72; 2015 年和 2019 年较小, 分别为 22.61 和 23.15 (图 4)。两组的 β 多样性的变化速率分别为 -0.45/年和 -1.46/年, 但该变化并不显著($P>0.05$)。

图 3 海州湾鱼类物种 β 多样性的年际变化

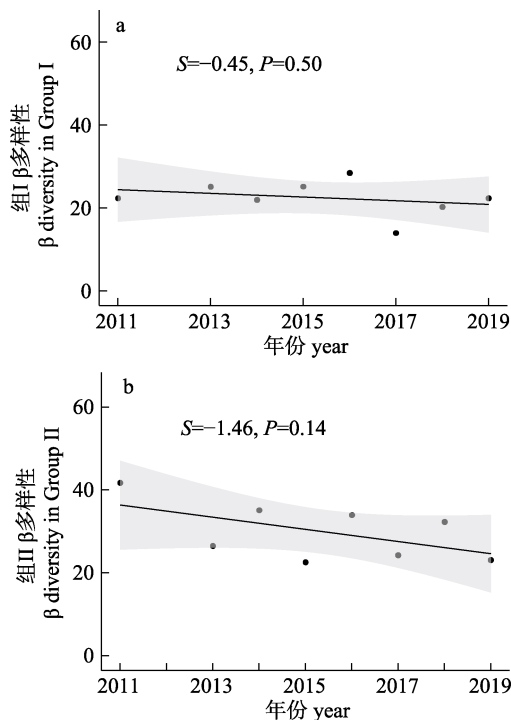
S 为趋势线的斜率, P 为显著水平。

Fig. 3 Interannual variation of β diversity of fish species in Haizhou Bay

S is the slope of the trendlines; P is the significant level.

2.3 β 多样性的空间差异

K -Means 聚类分析将海州湾渔业资源调查站位大致按照海域 20 m 等深线分为两组, 即浅水组 (<20 m, 组 I) 和深水组 (>20 m, 组 II)。 β 多样性分析结果表明, 调查海域浅水组的鱼类物种 β 多样性整体维持在相对稳定的状态, 其中 2016 年的 β 多样性最高, 为 28.50, 2017 年最低, 仅为 14.00,

图 4 海州湾组 I 和组 II 鱼类物种 β 多样性的年际变化

S 为趋势线的斜率, P 为显著水平。

Fig. 4 Interannual variation of β diversity of fish species of Group I & II in Haizhou Bay

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

Cody 替代性分析结果表明, 组 I 和组 II 所代表的海州湾海域不同离岸距离和水深的两组之间, 其鱼类物种的替代性指数在 2011—2019 年间呈降低趋势, 其中 2018 年的 Cody 替代性指数最高, 为 17.5, 与趋势线偏离程度较大。而同期 Sorenson 相似性分析结果显示, 两组鱼类物种的相似性稍有增加, 但变化趋势并不显著($P>0.05$)(图 5)。

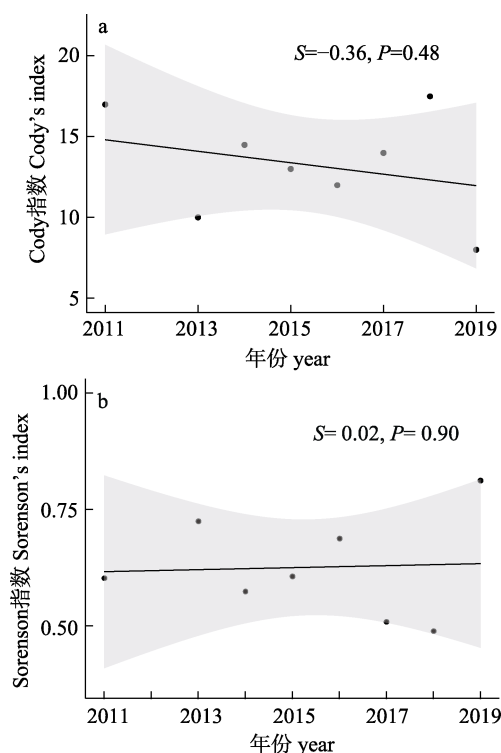


图 5 海州湾鱼类物种的 Cody 指数与 Sorenson 指数
S 为趋势线的斜率, P 为显著水平。

Fig. 5 Cody's index and Sorenson's index of fish species in Haizhou Bay

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

3 讨论

3.1 物种丰富度

海州湾地处暖温带南部和北温带的过渡带, 属季风特点的海洋性气候^[22], 是黄海海域最重要的渔场之一, 也是多种经济鱼类的产卵场和索饵场^[23], 其渔业资源保护具有重要意义。本研究表明, 在 2011—2019 年间, 海州湾鱼类物种数呈现下降趋势, 调查采集的鱼类物种数 2011 年为 60 余种, 2019 年已经下降到 40 余种, 期间虽有小幅上升, 但整体下降趋势较为显著, 与利用非参数

方法估算出的鱼类物种数呈现的变化趋势一致。从更大时间尺度上来看, 对比相关文献, 历史上海州湾海域共有鱼类 219 种, 隶属于 3 纲 26 目 84 科 168 属^[24]; 20 世纪 80 年代, 海州湾海域仅存在鱼类 150 种, 隶属于 17 目 73 科 119 属^[11]。虽然相关研究的采样方法、时间和覆盖海域存在一定差异, 但物种数的巨大差异也在一定程度上说明了生物多样性的下降趋势。

海州湾鱼类物种数的变化与黄海海域生物多样性变化趋势相一致。历史资料记载, 1985 年秋季在黄海海域进行的渔业资源底拖网调查共捕获鱼类 99 种^[25-26], 2000 年秋季在该海域进行的调查仅采集到鱼类 73 种^[27]; 而到 2006 年秋季, 黄海海域渔业资源调查采集的鱼类下降到 50 种^[28]。重要渔场鱼类物种数普遍下降、物种多样性持续降低的现象反映出渔业资源的衰退^[28-30], 这可能与环境和人为因素的干扰有关^[31-32], 而长期过度捕捞可能是造成该现象最重要的原因。因此, 海州湾及其临近海域多年来的过度捕捞, 以及环境污染、栖息地破坏等人为因素的干扰, 可能是该海域鱼类物种数呈下降趋势的主要原因^[13,33]。

3.2 β 多样性的时空变化

作为描述一定地理区域内不同生境群落组成和结构变化的指标^[1,7], β 多样性在一定时间尺度上持续降低反映出生物同质化(biotic homogenization)的现象^[34]。目前, 针对人类活动造成生物同质化现象的研究, 集中在淡水和陆地领域^[35], 而海洋生态系统由于其自身的广阔性与连通性, 研究上存在一定困难, 其 β 多样性的时空变化以及人类活动对其产生的影响未被深入了解。本研究聚焦受长期过度捕捞影响的海州湾及其邻近海域, 研究了 β 多样性的时空变化特征。 β 多样性在时长近十年的调查中明显下降, 以及不同调查区域间 Cody 替代性指数下降、Sorenson 相似性指数上升的研究结果, 证明了海州湾及其邻近海域生物同质化的现象的存在。相关研究表明, 海洋中生物群落的变化速度甚至超过陆地^[36], 这可能意味着人类活动对海洋生态系统的影响也许远高于预期, 这是对海洋生态系统的保护的巨大挑战。

另外, 本研究表明水深不同的调查海域中, β

多样性的变化特征存在差异。在近岸浅水海域, β 多样性在接近十年的跨度中维持在较为稳定的状态; 而在远岸深水海域, β 多样性则呈现波动下降的趋势。这一差异可能是由几方面的原因造成的。一方面, 聚类分析将海州湾及其邻近海域的调查站位大致以 20 m 等深线为界分为两组, 其中分布于 20 m 以浅的站位较少, 且彼此之间本身环境特征和群落结构差异不大, 导致了群落相似性分析中结果较为相似, 在年际间无较大差异。另一方面, 离岸距离较小的海域可能不易受到同质化的影响^[34,37], 也就是说环境变化、捕捞等效应主要体现在了本身异质性较大的 20 m 以深海域, 导致了该区域 β 多样性的下降趋势。

需要注意的是, 多样性的变化可能是由于多种环境因子和人为因素的共同作用。除水深外, 温度和盐度作为影响鱼类分布的重要因素, 其变化情况也与 β 多样性存在紧密联系^[38]。海州湾及其临近海域渔业资源调查同步采集的 CTD 数据表明, 调查海域在 2011—2019 年间的秋季水温发生了显著升高($P < 0.05$), 这表明水温可能是造成调查海域生物同质化现象的重要因素之一。有研究表明, 气候变化导致的海水温度升高与生物同质化有关, 并且可以在较短的时间或较小的区域内显现出来^[34], 与本研究结果相吻合。此外, 相关研究表明了长期高强度的捕捞活动、环境污染等因素导致海州湾鱼类组成变化和个体小型化等^[33], 部分生物对环境的变化更为敏感^[39], 可能导致生物同质化现象的发生。

4 结论

总体而言, 本研究表明 2011—2019 年间, 海州湾及其邻近海域的鱼类物种 β 多样性降低, 鱼类群落呈现生物同质化趋势。此现象的产生是鱼类物种自身的生活史特征及其对环境的适应能力所决定的, 同时也与人类活动密切相关, 如长期的过度捕捞、环境污染、栖息地破坏, 以及由于气候变化等原因造成的海水温度升高等, 而其驱动机制还有待进一步探究。深入开展 β 多样性研究, 有助于了解海域鱼类群落的变动趋势, 为渔业资源的管理与养护提供科学依据, 为海洋保护

区的选址与规划提供参考, 对于渔业资源的可持续利用和生物多样性的保护具有重要意义。

参考文献:

- [1] Zhang L M, Gao X, Dong K, et al. Study on community β diversity quantification structures and its measurements[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2014, 29(4): 578-585. [张立敏, 高鑫, 董坤, 等. 生物群落 β 多样性量化水平及其评价方法[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2014, 29(4): 578-585.]
- [2] Zhao Q H, Ji X Y, Ding S Y, et al. Effect of longitudinal gradient on riparian plant species diversity along the mainstream of Beijiang River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3654-3660. [赵清贺, 冀晓玉, 丁圣彦, 等. 北江干流河岸带植物物种多样性的纵向梯度效应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3654-3660.]
- [3] Isbell F, Calcagno V, Hector A, et al. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services[J]. Nature, 2011, 477(7363): 199-202.
- [4] Zhao M F, Kang M Y, Liu Q R, et al. Riparian plant species diversity and environmental factors along Dongjiang River[J]. Resources Science, 2013, 35(3): 488-495. [赵鸣飞, 康慕谊, 刘全儒, 等. 东江干流河岸带植物多样性分布规律及影响因素[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 488-495.]
- [5] Whittaker R H. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California[J]. Ecological Monographs, 1960, 30(3): 279-338.
- [6] Jurasinski G, Retzer V, Beierkuhnlein C. Inventory, differentiation, and proportional diversity: A consistent terminology for quantifying species diversity[J]. Oecologia, 2009, 159(1): 15-26.
- [7] Chen S B, Ouyang Z Y, Xu W H, et al. A review of beta diversity studies[J]. Biodiversity Science, 2010, 18(4): 323-335. [陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 等. Beta 多样性研究进展[J]. 生物多样性, 2010, 18(4): 323-335.]
- [8] Bai Y F, Xing X R, Xu Z X, et al. β -diversity of *Stipa* communities in Inner Mongolia Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 408-412. [白永飞, 邢雪荣, 许志信, 等. 内蒙古高原针茅草原群落 β 多样性研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 408-412.]
- [9] Yang J, Chu P F, Chen D M, et al. Mechanisms underlying the impacts of grazing on plant α , β and γ diversity in a typical steppe of the Inner Mongolia grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 188-200. [杨婧, 褚鹏飞, 陈迪马, 等. 放牧对内蒙古典型草原 α 、 β 和 γ 多样性的影响机制[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 188-200.]
- [10] Zhang D, Wan F Y, Chu L, et al. Longitudinal patterns in α

- and β diversity of the taxonomic and functional organizations of stream fish assemblages in the Qingyi River[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(1): 1-13. [张东, 宛凤英, 储玲, 等. 青弋江鱼类分类群和功能群的 α 和 β 多样性纵向梯度格局[J]. *生物多样性*, 2018, 26(1): 1-13.]
- [11] Wang W H, Xia D X, Gao X C, et al. *Gulfs of China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 354-420. [王文海, 夏东兴, 高星辰, 等. 中国海湾志(第四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 354-420.]
- [12] Sun X W, Zhang S, Zhao Y Q, et al. Community structure of fish and macroinvertebrates in the artificial reef sea area of Haizhou Bay[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(4): 505-513. [孙习武, 张硕, 赵裕青, 等. 海州湾人工鱼礁海域鱼类和大型无脊椎动物群落组成及结构特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(4): 505-513.]
- [13] Su W, Xue Y, Ren Y P. Temporal and spatial variation in taxonomic diversity of fish in Haizhou Bay: The effect of environmental factors[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(3): 624-634. [苏巍, 薛莹, 任一平. 海州湾海域鱼类分类多样性的时空变化及其与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(3): 624-634.]
- [14] 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.]
- [15] 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.]
- [16] Chao A, Lee S M. Estimating the number of classes via sample coverage[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1992, 87(417): 210-217.
- [17] Smith E P, Belle G V. Nonparametric estimation of species richness[J]. *Biometrics*, 1984, 40(1): 119-129.
- [18] Lande R. Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities[J]. *Oikos*, 1996, 76(1): 5-13.
- [19] Xu R, Wunsch D. Survey of clustering algorithms[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(3): 645-678.
- [20] Zapfack L, Engwald S, Sonke B, et al. The impact of land conversion on plant biodiversity in the forest zone of Cameroon[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2002, 11(11): 2047-2061.
- [21] Cody M L. Towards a theory of continental species diversities: Bird distributions over Mediterranean habitat gradients[C]/*Ecology and Evolution of Communities*. Cambridge: Harvard University Press, 1975: 214-257.
- [22] Li M. Comprehensive assessment of resources in Haizhou Bay[J]. *Ocean Development and Management*, 1989, 6(1): 62-63. [黎明. 海州湾资源综合评估[J]. *海洋与海岸带开发*, 1989, 6(1): 62-63.]
- [23] Tang F H, Shen X Q, Wang Y L. Dynamics of fisheries resources near Haizhou Bay waters[J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(6): 335-341. [唐峰华, 沈新强, 王云龙. 海州湾附近海域渔业资源的动态分析[J]. *水产科学*, 2011, 30(6): 335-341.]
- [24] Su W. Fish community diversity in Haizhou Bay and its relationship with environmental factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 38-39. [苏巍. 海州湾海域鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 38-39.]
- [25] Jin X S, Tang Q S. Changes in fish species diversity and dominant species composition in the Yellow Sea[J]. *Fisheries Research*, 1996, 26(3-4): 337-352.
- [26] Lü Z B, Li F, Xu B Q, et al. Fish community diversity during spring and autumn in the Yellow Sea off the coast of Shandong[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(2): 207-214. [吕振波, 李凡, 徐炳庆, 等. 黄海山东海域春、秋季鱼类群落多样性[J]. *生物多样性*, 2012, 20(2): 207-214.]
- [27] Xu B D, Jin X S, Liang Z L. Changes of demersal fish community structure in the Yellow Sea during the autumn[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(2): 148-154. [徐宾铎, 金显仕, 梁振林. 秋季黄海底层鱼类群落结构的变化[J]. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 148-154.]
- [28] Lü Z B, Xu B Q, Li F, et al. Structure and distribution of fish resources in the Yellow Sea off Shandong during spring and autumn 2006[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(6): 1335-1342. [吕振波, 徐炳庆, 李凡, 等. 2006年春、秋季黄海山东海域鱼类资源结构与数量分布[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(6): 1335-1342.]
- [29] Li T, Zhang X M, Zhang P D, et al. Seasonal variation on community structure of fishery resources in the coastal waters of Southern Shandong Peninsular[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(Z1): 41-50. [李涛, 张秀梅,

- 张沛东, 等. 山东半岛南部近岸海域渔业资源群落结构的季节变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(Z1): 41-50.]
- [30] Lü Z B. The Research and Evaluation of Shandong Offshore Biological Resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010. [吕振波. 山东近海经济生物资源调查与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.]
- [31] Qu F Y, Yu Z S. The application of taxonomic diversity in macrobenthic ecology: Taking Yellow Sea for example[J]. Biodiversity Science, 2010, 18(2): 150-155. [曲方圆, 于子山. 分类多样性在大型底栖动物生态学方面的应用: 以黄海底栖动物为例[J]. 生物多样性, 2010, 18(2): 150-155.]
- [32] Xu B D, Ren Y P, Ye Z J, et al. The taxonomic diversity of fish community in the coastal waters of Qingdao[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 907-910,878. [徐宾铎, 任一平, 叶振江, 等. 青岛近岸水域鱼类群落分类学多样性的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 907-910,878.]
- [33] Sui H Z, Xue Y, Ren Y P, et al. Studies on the ecological groups of fish communities in Haizhou Bay, China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(12): 59-71. [隋昊志, 薛莹, 任一平, 等. 海州湾鱼类生态类群的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(12): 59-71.]
- [34] Magurran A E, Dornelas M, Moyes F, et al. Rapid biotic homogenization of marine fish assemblages[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8405.
- [35] Olden J D. Biotic homogenization: A new research agenda for conservation biogeography[J]. Journal of Biogeography, 2006, 33(12): 2027-2039.
- [36] Gregory B, Christophe L, Martin E. Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean[J]. Global Change Biology, 2009, 15(7): 1790-1803.
- [37] Clarke A, Lidgard S. Spatial patterns of diversity in the sea: Bryozoan species richness in the North Atlantic[J]. Journal of Animal Ecology, 2000, 69(5): 799-814.
- [38] Zhu Y F, Dai M X, Zhou X H, et al. Effects of environmental factors on β diversity of zooplankton community in thermal discharge seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay, Zhejiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2543-2552. [朱艺峰, 戴美霞, 周晓红, 等. 环境因子对国华电厂温排水海域浮游动物群落 β 多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2543-2552.]
- [39] Gillooly J F, Charnov E L, West G B, et al. Effects of size and temperature on developmental time[J]. Nature, 2002, 417(6884): 70-73.

Variation in the β diversity of fish species in Haizhou Bay

LI Xuotong^{1,2}, XU Binduo^{1,2}, XUE Ying^{1,2}, REN Yiping^{1,2,3}, ZHANG Chongliang^{1,2}

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

Abstract: Species diversity is one of the most important characteristics of biological communities and an important factor affecting the function and stability of ecosystems. The variation in diversity has been a topic of great interest in ecological research for many years, whereas β diversity, an important aspect of species diversity, has been studied in terrestrial ecosystems and freshwater ecosystems more than in marine ecosystems. Haizhou Bay is a traditional fishing ground in the Yellow Sea and historically has had rich fishery resources. However, the fishery resources in Haizhou Bay have seriously declined in recent years due to overfishing, environmental pollution, and human activities. The purpose of this study was to understand the temporal and spatial variation in β diversity of the fish species in Haizhou Bay to provide a scientific basis for the conservation of fishery resources and the construction of protected marine areas. The data in this study were collected from fishery resource surveys conducted in Haizhou Bay in the autumn of 2011 and 2013–2019 using bottom trawl. Non-parametric methods, including the Chao's and Bootstrap approaches, were used to estimate the number of fish species, namely species richness, in the entire area of Haizhou Bay and in each sampling station. On this basis, β diversity was calculated according to the additive principle with a variety of measurement methods, including Sorenson's index and Cody's index, which reflects the similarity of species composition between the two groups and the substitutability between groups, respectively. To evaluate the spatial variation in β diversity, survey stations were divided into two groups along the 20 m isobath roughly by *K*-Means Cluster. The results of this study showed that the richness and β diversity of the fish species in Haizhou Bay decreased significantly in recent years, the Cody's index decreased, and the Sorenson's index increased slightly. The result reflected biotic homogenization in the marine ecosystem and it also indicated a remarkable difference in the trend of β diversity between deep water and shallow water. The decline in biodiversity has become a common phenomenon, which is closely related to human activities, especially long-term overfishing. In addition, environmental factors, especially the rise of sea water temperature, also contribute significantly to biotic homogenization. In summary, our research indicated that the abundance and β diversity of the fish species in Haizhou Bay decreased substantially from 2011 to 2019, and these changes were associated with the life history of fish species and their adaptability to the environment. These changes were also closely related to human activities, such as overfishing, environmental pollution, habitat destruction, and the water temperature increase caused by climate change. The driving mechanism remains to be further explored. In-depth studies on β diversity are helpful for understanding the fluctuation of marine fish communities, managing and protecting fishery resources, and providing a reference for constructing marine protected areas, which have great significance to the sustainable use of fishery resources and the protection of biodiversity.

Key words: fish; β diversity; biotic homogenization; Chao's approach; bootstrap approach; Haizhou Bay

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn