

山东近海渔业物种多样性与环境因子的关系

徐茂真^{1,2}, 张崇良^{1,2}, 薛莹^{1,2}, 徐宾铎^{1,2}, 纪毓鹏^{1,2}, 任一平^{1,2,3*}

(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: 当前山东近海的渔业资源与生态环境面临较大压力, 对海洋中的生物多样性水平有着较大影响。为探究山东近海生物多样性的空间分布特征及影响多样性水平的环境因子, 实验基于 2017 年冬季在山东近海进行的渔业资源和环境调查数据, 分析了整体与山东近海 3 个不同海域的物种数、辛普森多样性 (Simpson's index of diversity)、香农多样性指数 (Shannon-Wiener index of diversity)、皮尔洛均匀度 (Pielou evenness index) 等物种多样性指数的空间分布, 利用随机森林算法评估了多样性指数与环境因子所构建模型的拟合优度并且探究两者间的依存关系, 研究将山东近海分成 3 个区域并将分区作为空间因子加入到算法模型中。结果显示, 山东近海的多样性水平空间分布上呈现半岛南部海域高于北方的烟威渔场及其临近海域、莱州湾渔场的趋势。物种数和香农多样性指数模型拟合效果较好, 方差解释率达到 77.46% 和 45.66%, 而对 Pielou 均匀度指数的拟合效果较差。研究表明, 无论整体海域模型还是分区模型, 海底温度、海底盐度及海水深度等 3 种环境因子都是对多样性指数最为显著的影响因子, 其中海水深度与海底温度在一定区间内与各个多样性指数都存在显著正相关性; 物种数随海底盐度的升高而升高, 2 种多样性指数随盐度变化不明显, 离岸距离与 Pielou 均匀度指数呈负相关关系。

关键词: 物种多样性; 空间分布; 随机森林; 山东近海

中图分类号: S 931

文献标志码: A

随着山东近海沿海建设和过度捕捞等生产活动的影响, 该海域渔业资源呈现衰退趋势, 优质经济鱼类数量显著减少^[1]。主要表现为底层经济鱼类资源种群数量下降, 小型化、低龄化, 生命周期短、低营养级种类逐渐增加, 导致渔业资源向低值、劣质转化, 渔业资源与渔业生物群落总体状况的改变引起了广泛的关注。其中, 生物多样性是群落生态学研究的主要内容, 是反映生态系统状态的重要指标。一些研究对山东近海的渔业生物资源丰度、生物量、群落结构^[2-4]以及分类

多样性^[5-6]等进行了深入探讨。一些研究分析了海洋中温度、盐度、深度等环境数据与底层鱼类群落多样性水平间的关系, 结果表明海水温度、盐度等环境因子与海洋中物种多样性水平有显著的相关性^[7]。

需要注意的是, 渔业生态系统中可能存在大量非线性、非可加性过程^[8-9], 而常规研究中广泛采用广义加性模型 (generalized additive model, GAM) 等不能很好地处理大量的解释变量, 也不能很好地处理渔业调查数据中心经常存在的零值问题。

收稿日期: 2020-10-31 修回日期: 2021-01-31

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901204)

第一作者: 徐茂真 (照片), 从事渔业资源生态学研究, E-mail: xumaozhen@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 任一平, 从事渔业资源生态学研究, E-mail: renyip@ouc.edu.cn



因此, 本研究选取了随机森林算法来处理生物多样性指标与环境因子之间可能的非线性和非可加性关系。随机森林是一种机器学习算法, 其优势在于可以处理高维度(解释变量很多)的特征, 不容易陷入过度拟合^[10], 并且对解释变量间的线性相关性以及缺失数值不敏感, 在数据较为有限的情况下可以进行无偏估计^[11]。

实验旨在解析山东近海物种多样性空间分布特征, 利用随机森林算法构建的回归模型分析多种多样性指数与环境变量之间的关系, 评估不同环境变量对多样性指数的影响大小。对于物种多样性分布及其影响因素的解析, 有助于深入理解海洋生物群落结构特征, 为海洋生态系统管理提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 调查区域

实验样品来自 2017 年 1 月在山东近海进行的渔业资源底拖网调查, 调查海域范围为 118°20′~123°50′E, 35°00′~38°30′N, 根据前期对山东近海的海洋地理环境空间特征的分析, 本研究将山东近海划分为 A、B、C 3 区, 其中 A 区(49 站)为位于渤海的莱州湾渔场, 属于半封闭的海洋生态系统; B 区(51 站)为位于黄海北部的烟威渔场及其临近海域; C 区(63 站)为位于山东半岛南部海域, 总计 163 个站位(图 1), 烟威渔场及其临近海域以及山东半岛南部近海属典型陆缘浅海, 因其独特的地理环境和水文特征形成了许多优良的渔场, 是黄海多种生物种类的产卵场、索饵场和传统渔场^[12]。3 个分区将被作为因子型解释变量加入模型中进行研究, 探究分区因素是否对多样性

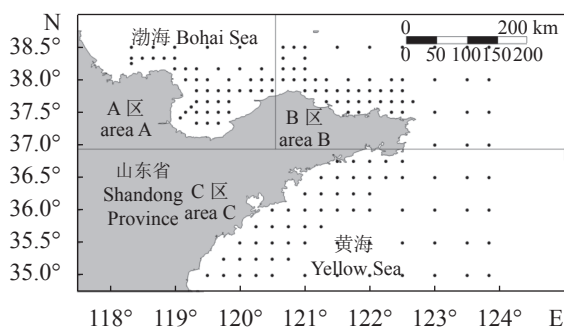


图 1 山东近海渔业资源调查站位

Fig. 1 Survey stations of fishery resources in Shandong offshore

指数有影响。

调查船为单拖渔船, 马力为 220 kW, 拖曳时网口宽度约 15 m, 高度 7.53 m, 囊网网目 7 mm。每个调查站位拖网时间约为 1 h, 拖速 3 kn。拖网渔获物冷冻保存, 带回实验室分析。本次研究涉及的物种主要包括多种底层鱼类、中上层鱼类、虾、蟹等甲壳动物以及头足类软体动物总计 206 种。环境数据由海上随站位使用 CTD 温盐深仪测量获得, 包括海底温度(sea bottom temperature, SBT)、海底盐度(sea bottom salinity, SBS)、水深(depth) 3 种数据。各站位底质数据参考李广雪等^[13]研究结果, 山东近海底质类型主要有砂(S)、粉砂(T)、砂-粉砂-黏土(STY)、粉砂质黏土(TY) 4 种^[14]。对渔获物进行物种鉴别, 汇总整理得到物种数量以及生物量数据。样品的采集与分析参考《海洋渔业资源调查规范》(SC/T 9403—2012)。

1.2 多样性指数

实验选用 4 种生物多样性指数: 物种数量 S 、香农多样性指数 H' (Shannon-Wiener index of diversity)、辛普森多样性指数 D (Simpson's index of diversity)、皮尔洛均匀度指数 J' (Pielou evenness-index)^[15-16]。本研究计算了每个站位的生物多样性指数, 即 α 多样性指数。由于不同种类及同种类间个体差异很大, Wilhm^[17] 提出用生物量表示的多样性更接近种类间能量的分布, 因此本实验根据生物量计算鱼类群落的物种多样性水平。

物种数 S 之外的 3 种多样性指数计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (3)$$

式中, S 为站位的物种数, P_i 为物种 i 在各个站位生物量中所占比例。

根据 163 站位的多样性指数, 利用 Surfer 软件用 Kriging 算法绘制多样性等值线图, 得到山东近海生物多样性空间分布。

1.3 随机森林

随机森林算法在 20 世纪 80 年代由 Breiman^[18] 提出, 是分类回归树 (CART) 算法与集成学习算法的结合, 其基本思想是构造很多棵决策树, 形

成一个森林,通过 Bagging 算法将多个模型结合,提高其准确率、稳定性,避免过度拟合。作为一种机器学习算法在渔业中指数与环境因子关系的研究中,广义加性模型是最常见的回归模型,在广义加性模型中,如果某 2 个或者多个解释变量之间出现了相关性,称之为多重共线性 (multicollinearity),与传统的广义可加模型 (GAM) 等常用的非线性模型相比,机器学习算法尤其是随机森林算法在渔业资源评估中能更好地处理解释变量多重共线性强、零值多、模型过度拟合导致的模型预测性能低等问题^[18]。

实验考虑了 6 种环境因子数据构建回归模型,分别是底层海水温度、底层海水盐度、底质类型 (bottom sediment types)、调查分区 (survey area)、水深以及由站位经、纬度与海岸线空间位置计算获得的站位离岸最短距离 Distance (offshore distance)。采用方差解释率 (the percentage of explained variance, %VAR) 衡量模型的拟合优度,进行模型优化。方差解释率越高,模型拟合效果越好。

因随机森林算法能处理解释变量多重共线性强的特点,实验构建模型时没有使用构建传统回归算法时经常使用的逐步回归算法。实验使用 randomForest 包中的 importance 函数结果:MDA (mean decrease accuracy) 指标衡量解释变量的重要性^[19],即通过 MDA 的数值大小来衡量模型中环境因子作为解释变量对物种多样性指数模型的影响。MDA 是计算了将一个变量变为随机数时模型预测准确性的降低程度,该值越大表示该解释变量的重要性越大,用来研究解释变量与响应变量。

本实验首先利用随机森林算法构建了山东近海整体多样性指数与环境因子的回归模型,用其研究多样性指数与环境因子之间的相关性关系,并进一步比较了该相关性在 A、B、C 分区以及整

体之间的差异。即先用全部海区站位的采样数据建立模型,然后再按照 ABC 分区各自建模比较在整体与各局部海域中关键环境因子对多样性指数影响的差异。使用每个解释变量的有序数列与 randomForest 包中的 predict 函数对每个指数模型单独进行指数预测,获得响应变量与解释变量的偏效应关系散点图,并添加平滑曲线,最终用来表示环境因子与各个多样性指数之间的非线性关系。实验使用 R 语言中的 randomForest 包与 ggplot2 包进行模型构建与结果可视化。

2 结果

2.1 物种多样性指数的空间分布

实验用 4 个有代表性的生物多样性指数: S 、 H' 、 D 、 J' 来分析研究山东近海底层鱼类群落多样性特点,多样性指数的平均值、变异系数 CV、变化范围 (表 1)。物种数 S 的空间分布在 3 区间差异显著, A 区总计 43 个物种,平均每站有 8.18 种物种; B 区总计 122 个物种,平均每站有 17.53 种; C 区总计 174 个物种,平均每站有 24.02 种,根据单因子方差分析结果, A、B、C 3 区间多样性水平存在显著性差异 ($F=237.1$, $P<2e-16$),同时各分区内极差也比较大且存在显著性差异。C 区全部站位物种数量多处于 15~25 种,然而 A 区与 B 区的站位平均物种数量多处于 9~15 种, C 区站位平均物种比 A、B 区少。A 区香农多样性指数均值为 1.27, B 区为 1.67, C 区为 2.03, 辛普森多样性指数均值在 A 区为 0.60、B 区 0.69、C 区为 0.77。2 种多样性指数都是在 A 区最小, B 区高于 A 区, C 区最高,区域间有显著性差异 (H' : $F=18.15$, $P<7.87e-08$; D : $F=47.23$, $P<2e-16$)。均匀度指数均值在 A 区为 0.61、B 区 0.59、C 区为

表 1 山东近海物种多样性指数

Tab. 1 Species diversity indices in Shandong offshore

多样性指数 diversity indices	物种数(S) number of species			香农多样性指数(H') Shannon-Wiener index of diversity			辛普森多样性指数(D) Simpson index of diversity			皮尔洛均匀度指数(J') Pielou Evenness index			
	分区 region	站位平均 mean	变异系数 CV	变化范围 range	站位平均 mean	变异系数 CV	变化范围 range	站位平均 mean	变异系数 CV	变化范围 range	站位平均 mean	变异系数 CV	变化范围 range
A		8.18	0.27	4~13	1.27	0.25	0.36~1.95	0.60	0.23	0.13~0.84	0.61	0.22	0.17~0.85
B		17.53	0.21	11~28	1.67	0.28	0.56~2.58	0.69	0.25	0.22~0.90	0.59	0.26	0.19~0.84
C		24.02	0.20	13~39	2.03	0.21	0.71~2.86	0.77	0.17	0.28~0.92	0.64	0.19	0.24~0.83
总计 total		17.23	0.44	4~39	1.69	0.31	0.36~2.86	0.69	0.23	0.13~0.92	0.62	0.22	0.17~0.85

注: 图中站位平均值为改区域内或者整个山东近海全部站位的指数的均值

Notes: The mean value of stations in the table is the mean value of the index of all stations in this region or in the whole shandong offshore area

0.64, C区最高, 但3区均匀度指数间无显著性差异 (J' : $F=2.19$, $P=0.115$)。

山东近海生物多样性指数的空间分布表明, 不同纬度间比较, 山东半岛南部海域(C区)的物种数与2种物种多样性指数均高于山东北部海域(A区与B区), 呈现由南向北逐渐减少的趋势;

在同纬度海域间比较, 莱州湾渔场(A区)站位的指数比烟威渔场及其临近海域(B区)少(图2)。物种数与2种多样性指数的变化趋势均为由南向北逐渐递减, 在山东北部近海呈现由东向西逐渐递减。均匀度指数未出现类似的趋势。

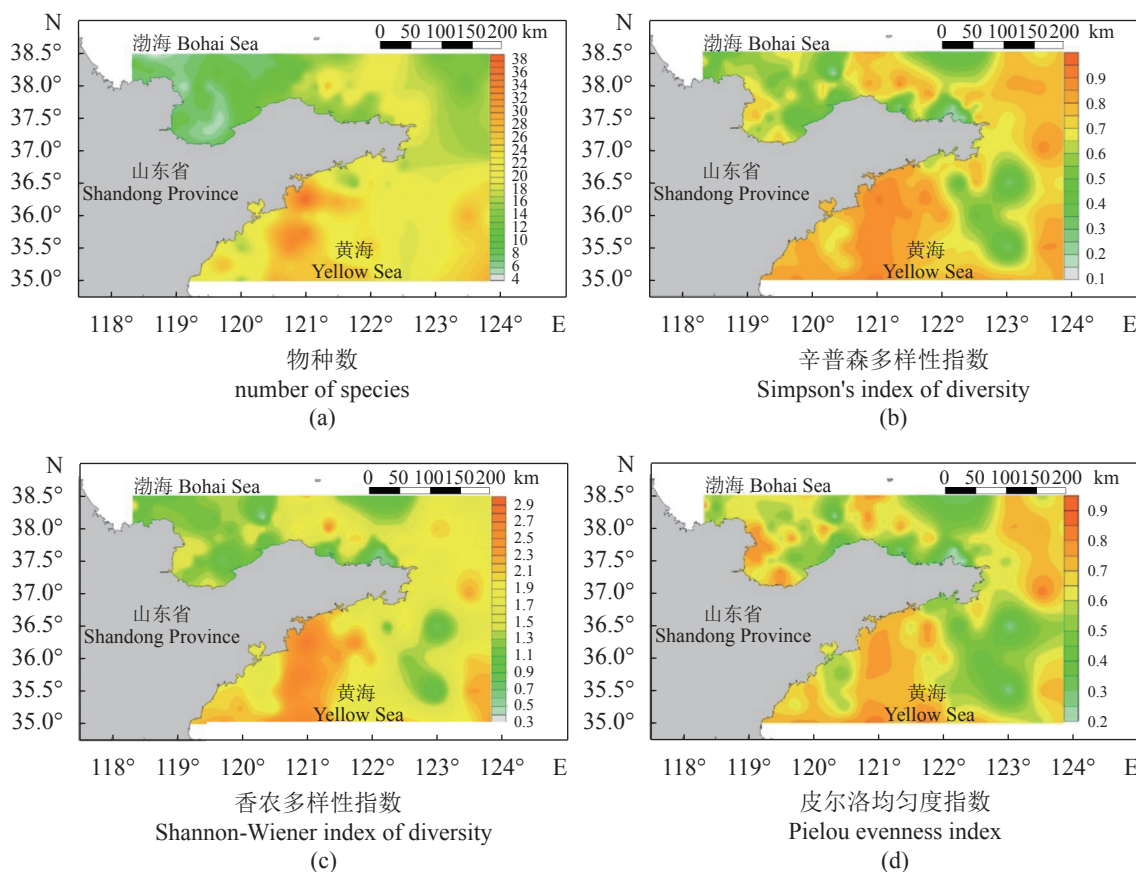


图2 山东近海生物多样性指数的空间分布

(a) 物种数空间分布, (b) 辛普森多样性指数空间分布, (c) 香农多样性指数空间分布, (d) 皮尔洛均匀度指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of biodiversity indices in Shandong offshore

(a) spatial distribution of species number; (b) spatial distribution of Simpson diversity index; (c) spatial distribution of Shannon diversity index; (d) spatial distribution of Pielou evenness index

2.2 关键环境因子

全海域多样性模型表明, 物种数与 Shannon 多样性指数的模型结果方差解释率要高于辛普森多样性指数与皮尔洛均匀度指数, 二者方差解释率分别为 77.46%、45.66% (表 2)。从模型结果可知, 山东近海整体海域的物种数量受到调查分区的影响最为显著, 其 MDA 为 35.5%, 底层海水盐度次之 (MDA 值为 29.36%); 香农多样性指数受水深影响最为显著, 盐度重要性排名次之; 辛普森多样性指数与皮尔洛均匀度指数则是受底层海水温度的影响最为显著, 海水深度是第二位的影

响因子。

不同海域 (ABC 分区) 生物多样性模型结果表明, A 区 4 种模型的解释率较低, 物种数、辛普森多样性指数、香农多样性指数、皮尔洛均匀度指数解释率分别为 18.32%、-25.71%、-32.43%、-36.51%; B 区的模型解释率较高, 分别为 20.58%、27.95%、16.00%、22.91%, C 区解释率较 A 区高但不如 B 区, 各指数分别为 13.64%、13.01%、-0.83%、-0.75% (表 3)。

另一方面, 不同海域渔业生物多样性的关键影响因子也存在差异。在 A 区, 对物种数、香农

表 2 山东近海物种多样性指数随机森林模型构建结果

Tab. 2 Random forest model of species diversity indices in Shandong offshore

多样性指数 diversity indices	加入的解释变量及其重要性指数/% added factors& mean decrease accuracy						方差解释率/% %VAR
	水深/m depth	海底温度/℃ sea bottom temperature	海底盐度 sea bottom salinity	离岸距离/km offshore distance	底质类型 bottom sediment types	调查分区 survey area	
物种数(S) number of species	12.88	23.88	29.36	18.49	16.36	35.50	77.46
香农多样性指数(H') Shannon-Wiener index	32.55	12.19	24.23	10.88	25.22	12.26	45.66
辛普森多样性指数(D) Simpson index	20.80	26.82	14.26	5.00	1.23	6.08	16.09
皮尔洛均匀度指数(J') Pielou evenness index	16.91	23.75	15.03	7.48	6.91	9.04	-0.28

表 3 山东近海 A、B、C 区多样性指数随机森林模型结果

Tab. 3 Random Forest Model results of biodiversity indices in A, B and C Areas of Shandong offshore

海区 sea area	多样性指数 diversity indices	加入的解释变量及其重要性指数/% added factors& mean decrease accuracy					方差解释率/% %VAR
		水深/m depth	海底温度/℃ sea bottom temperature	海底盐度 sea bottom salinity	离岸距离/km offshore distance	底质类型 bottom sediment types	
A	物种数(S) number of species	10.76	11.11	8.93	2.84	6.17	18.32
	香农多样性指数(H') Shannon-Wiener index	-1.42	3.83	2.58	-2.24	8.71	-25.71
	辛普森多样性指数(D) Simpson index	-3.08	1.05	0.68	-4.78	-8.90	-32.43
	皮尔洛均匀度指数(J') Pielou evenness index	-5.77	-1.92	4.02	-5.76	-5.26	-36.51
B	物种数(S) number of species	11.13	4.46	18.14	13.40	2.50	20.58
	香农多样性指数(H') Shannon-Wiener index	15.18	15.75	13.16	5.26	2.17	27.95
	辛普森多样性指数(D) Simpson index	7.68	16.36	6.58	4.25	-1.13	16.00
	皮尔洛均匀度指数(J') Pielou evenness index	9.08	18.64	9.23	6.71	1.81	22.91
C	物种数(S) number of species	3.01	16.71	12.26	3.67	18.06	13.64
	香农多样性指数(H') Shannon-Wiener index	10.71	13.29	17.32	14.20	13.88	13.01
	辛普森多样性指数(D) Simpson index	12.84	9.60	13.22	12.93	11.21	-0.83
	皮尔洛均匀度指数(J') Pielou evenness index	10.63	9.02	15.45	13.58	11.49	-0.75

多样性指数和辛普森多样性指数影响最显著的因子为海底温度，盐度次之；而对 J' 影响最大的因子为海底盐度，其他因子的解释贡献率均为负值。在 B 区，对香农多样性指数、辛普森多样性指数和皮尔洛均匀度指数影响最显著的因子为海底温度；对物种数影响最显著的因子是海底盐度，B 区模型构建结果中各个因子解释率未出现负值。

在 C 区，底质类型是对物种数最重要的影响因子，而盐度是对 C 区香农多样性指数、辛普森多样性指数和皮尔洛均匀度指数 3 个指标最重要的影响因子。

2.3 多样性指数与环境因子的关系

结果显示，水深与 4 种多样性指数的关系变化趋势较为一致，随着水深的增加都呈现出先上升之后到达 35 m 水深左右趋于平缓的趋势，其中辛普森多样性指数的变化最为典型 (图 3)。海底温度与指数间的关系呈现出略微下降后上升的趋势，这种变化趋势在香农多样性指数、辛普森多样性指数和皮尔洛均匀度指数 3 种与海底温度的关系中非常显著且趋势相似，物种数与海底温度的关系也出现类似的趋势，但趋势不显著 (图 3)。皮尔

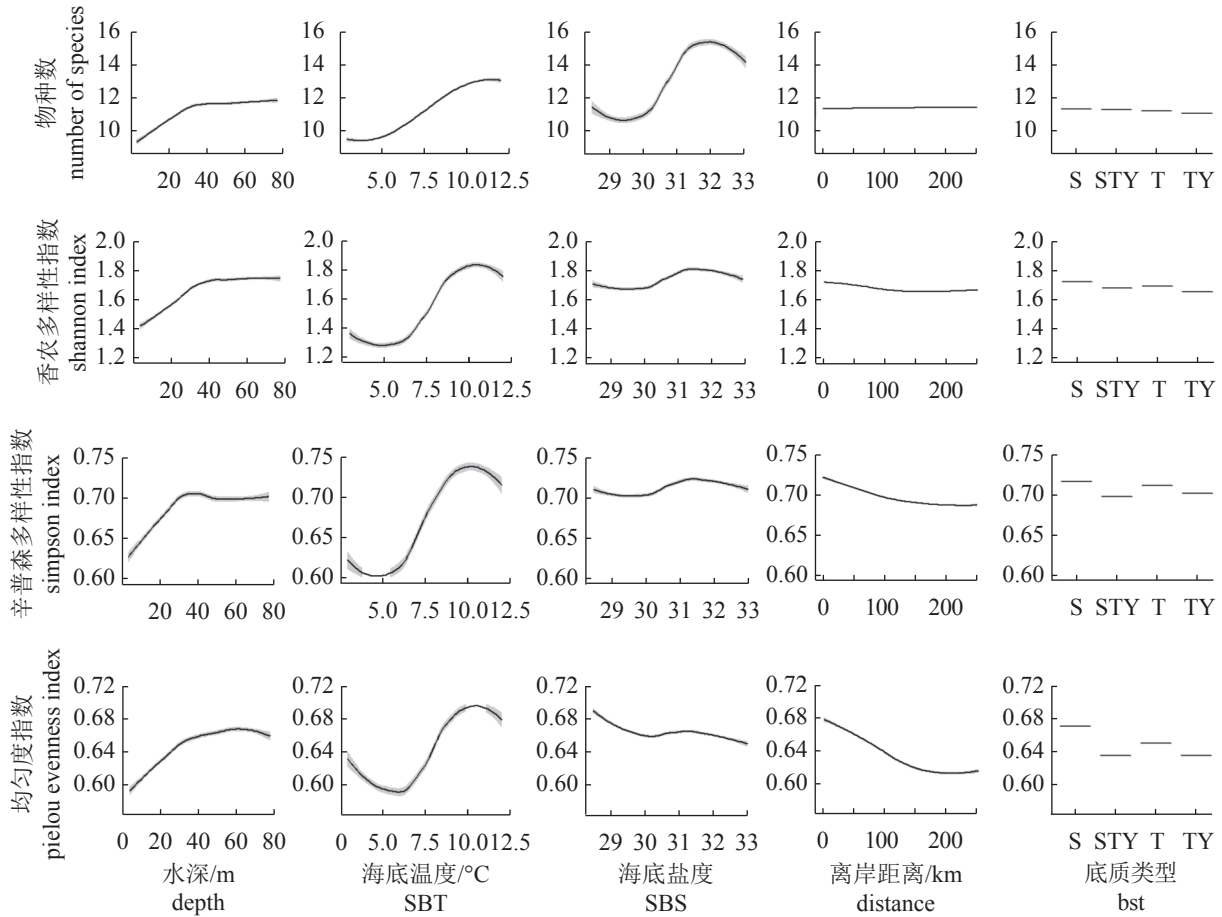


图3 多样性指数与环境因子的关系

图中底质类型分别为: S. 砂, T. 粉砂, STY. 砂-粉砂-黏土, TY. 粉砂质黏土

Fig. 3 Relationship between diversity indices and environmental factors

The substrate types in the figure: S. sand, T. silt, STY. sand-silty clay, TY. silt clay

洛均匀度指数随盐度的上升而下降; 物种数随盐度的升高而升高, 2种多样性指数随盐度变化不明显。

离岸距离和底质类型与多样性指数的关系相对于水文环境变量较弱, 但仍表现出一定影响。皮尔洛均匀度指数表现出随离岸距离的上升而下降的趋势, 其他指数随离岸距离变化而变化的趋势不明显, 对于皮尔洛均匀度指数, 砂质底质高于粉砂、砂-粉砂-黏土、粉砂质黏土等其他3种底质类型, 而其他3种指标的数值在不同底质类型的海域中相差不大。

3 讨论

3.1 物种多样性的空间分布

基于2017年冬季山东近海渔业资源调查的数据, 利用随机森林算法研究了多样性指数的水

平及其与环境因子的关系。地理环境因素作为解释变量被用于构建模型, 山东近海物种多样性指数的空间分布结果表明, 多样性水平在不同海域分区之间存在显著差异, 均匀度指数在区域间没有显著差异。总体上看C区的物种数量与多样性指数更高, B区次之, A区最低; 3个分区多样性指数确实存在差异, 故将区域作为因子型解释变量加入多样性指数的回归模型中。在空间上, 不同纬度的多样性水平呈现由南向北逐渐降低, 分析其原因可能是温度主导, 该结果与生物多样性的一般分布规律相一致。如陈国宝等^[20]应用Shannon-Wiener多样性指数研究鱼类群落时发现, 南海珊瑚礁海域鱼类群落的Shannon-Wiener多样性指数要明显高于高纬度海域。程济生等^[21]及苏巍^[22]关于海州湾多样性水平研究结果也可以看出这种多样性指数随纬度的变化趋势。按经度对比, 烟威渔场及其临近海域(B区)比莱州湾渔场

(C区)的物种多样性水平高,这与相关研究中黄海海域的物种多样性水平明显高于莱州湾渔场相一致^[23]。其原因一方面可能由于渤海作为半封闭生态系统的特殊性,另一方面可能与渤海生境退化有关。生境退化和过度捕捞使得大多对不利环境因素耐受性较差的种群资源量下降,进而导致的生态系统结构单一化。金显仕等^[24]经过对比研究认为,莱州湾渔场渔业资源多样性水平可能存在下降的趋势。

3.2 多样性水平与环境因子的关系

随机森林算法处理高维变量的优势也在研究中得以体现,节省了传统非线性回归方法的多重共线性检验与解释变量筛选等步骤。使用重要性指数MDA来代替传统多元回归分析比采用逐步回归法筛选对响应变量影响较大的解释变量的方法更加有效。

本研究利用随机森林算法构建模型研究环境因子与多样性指数间的关系,从整个山东近海的模型结果来看,物种数与Shannon-Wiener多样性指数的模型解释率较高拟合效果好,物种多样性指数与水深、温度等环境因子间存在明显的相关性,与相关研究的结论一致^[7,25]。

分区模型的结果与整体海域模型的结果间存在着差异:分区模型较全海域模型结果相比,累计方差解释率更差,尤其是A区。可能是由于A区海区独有的异质性导致的, α 多样性指数受群落自身环境特征影响较大。莱州湾渔场位于渤海由于常年过度捕捞与环境污染其生境退化较为严重,生境退化导致A区整体多样性较低,各站位多样性指数数值差异较小,会导致回归模型结果拟合优度较差,不能很好地反映环境因子对群落多样性指数之间的影响。这种因为不同海区生态系统本身特点不同产生的异质性问题应当更多地被关注并在未来对渔业生态系统研究时被考虑。均匀度指数模型结果普遍较差,有可能是因为当前解释变量组合不理想或者是当前使用的回归分析解释变量不能很好地解释均匀度指数,需要在未来进一步探索更加合理、有效的新解释变量以深化研究。

本研究进一步探索了非生物因子与多样性指数间的相关性关系,结果表明在山东近海海域,随水深的增加,物种的数量、物种多样性和物种均匀度都会增加,但达到一定水深后就几乎不再变化,这种结果的产生可能与生物在海洋中的垂

直分层现象相关。另一方面,多样性水平随环境因子不同而产生差异,多样性指数会随温度与盐度的改变发生波动,其中多样性随温度的变化趋势与生态学中单物种对环境因子耐受范围的变化相似,即物种多样性水平随温度的升高呈现出先上升后下降的趋势。在较高或较低的极端温度条件下会不利于物种的生存,对极端温度条件耐受性差的狭温性种类,即生态幅窄的物种在相应的极端温度环境中不出现,这可能是在该温度下海域物种多样性水平偏低的原因^[26]。作为群落水平的宏观特性,群落中的生物种类及其数量或生物量是影响多样性水平的直接因素。山东近海渔业生物群落中不同渔业物种有着各自不同的生态位,表明该海域渔业物种对温度环境因子耐受的生态幅可能存在较宽的重叠,即在该海域中存在一个使多数物种都能适应的相对适宜的水温范围,多样性水平才会呈现出与物种对非生物环境因子适应性耐受范围相似的变化趋势。

海洋底质类型是影响生物栖息地的主要因素,对底栖鱼类的空间分布产生重要影响^[27-28],但目前缺乏海洋底质类型与近海渔业生态系统生物多样性水平间关系的研究。本研究探索了底质类型与渔业生态系统多样性的关系,发现底质类型对于渔业生态系统的影响虽然有限,但不同的底质类型确实会对物种多样性水平产生一定的影响,尤其是砂质底质中均匀度会偏高,但其作用机理尚不明确。随着研究继续深入,还应探索不同的生态环境因子,优化生态监测调查方案,建立更优模型、准确预测多样性水平,为深入探究环境因子的生态作用提供可靠资料。

3.3 对于保护与管理的意义

本研究结果对于多样性保护与管理具有一定参考意义。从渔业资源的养护与管理角度来说,物种多样性水平是渔业生态系统监测的重要衡量指标,在对渔业增殖放流、海洋牧场修复效果进行监测与评估时多样性指标必不可少^[29]。本研究通过对山东近海渔业资源的全面调查,科学评价山东近海生物多样性现状和分布趋势,可以为探索近海生态保护、开发策略以及近海资源养护提供科学依据。例如,可根据生物多样性高值区的分布,规划海洋保护区,提升生物多样性保护效果^[30];山东近海南部海域多样性较高适合作为海洋保护区规划的重点海区。另一方面,探讨生物

多样性较低海域的群落结构和生境特征,解析多样性的关键限制因素,有益于提出适应性的海洋渔业资源修复策略^[31];由于莱州湾渔场位于渤海,生境破坏、污染、过度捕捞等因素使渔场中渔业资源已经产生了严重的衰退,多样性水平低。在这种外界扰动剧烈,高压长期作用的情况下,不同站位的群落多样性指数较为相近,从模型结果中无法看出环境因子对其多样性指数的影响,所以莱州湾渔场(A区)的资源修复虽然重要,但工作的展开也更为艰难。

生物多样性是反映海洋中生态系统状况的重要指标,研究生物多样性水平的空间分布,多样性指数与环境因子之间的关系,能加深对海洋生态系统的认识,建立更准确的生态模型预测多样性水平的时空分布变化,为海洋生态管理奠定基础。另一方面,当前的模型还存在一定局限性,对于生物多样性的模拟和预测存在很大的不确定性,在未来气候变化、全球变暖等影响下,回归模型的预测能力还有待进一步验证^[32]。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 傅秀梅. 中国近海生物资源保护性开发与可持续利用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Fu X M. Studies on protective exploitation and sustainable development of Chinese offshore bioresources[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008 (in Chinese).
- [2] 张玉钦, 邱盛尧. 山东近海渔业资源现状初步研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2019, 32(1): 61-67,102.
Zhang Y Q, Qiu S Y. A preliminary study on current situation of fishery resources in Shandong offshore[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2019, 32(1): 61-67,102 (in Chinese).
- [3] 张蒙生, 曲方圆, 隋吉星, 等. 山东半岛南部近海冬季大型底栖动物多样性及群落结构特征[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(S1): 58-66.
Zhang M S, Qu F Y, Sui J X, et al. Diversity and community structure of macrobenthos in southern coast of Shandong peninsula in winter[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(S1): 58-66 (in Chinese).
- [4] 钟海霞, 曲方圆, 隋吉星, 等. 山东南部近海春季大型底栖动物丰度、生物量及群落结构研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(1): 88-98.
Zhong H X, Qu F Y, Sui J X, et al. Abundance, biomass and community structure of macrobenthos in southern coast of Shandong Province in spring[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(1): 88-98 (in Chinese).
- [5] 李凡, 周兴, 张岚, 等. 山东近海鱼类群落分类多样性[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2322-2330.
Li F, Zhou X, Zhang L, et al. Taxonomic diversity of fish assemblages in coastal waters off Shandong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2322-2330 (in Chinese).
- [6] 徐宾铎, 金显仕, 梁振林. 黄海鱼类群落分类学多样性的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(4): 629-634.
Xu B D, Jin X S, Liang Z L. The taxonomic diversity of fish communities in the Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(4): 629-634 (in Chinese).
- [7] 刘勇, 李圣法, 陈学刚, 等. 东、黄海2000年冬季底层鱼类群落结构及其多样性[J]. 海洋科学, 2007, 31(10): 19-24.
Liu Y, Li S F, Chen X G, et al. The structure and diversity of demersal fish communities in winter 2000 in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2007, 31(10): 19-24 (in Chinese).
- [8] 栾静, 张崇良, 徐宾铎, 等. 海州湾双斑螯栖息分布特征与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 889-901.
Luan J, Zhang C L, Xu B D, et al. Relationship between catch distribution of Portunid crab (*Charybdis bimaculata*) and environmental factors based on three species distribution models in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 889-901 (in Chinese).
- [9] 官文江, 陈新军, 高峰, 等. 海洋环境对东、黄海鲈鱼灯光围网捕捞效率的影响[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 949-958.
Guan W J, Chen X J, Gao F, et al. Environmental effects on fishing efficiency of *Scomber japonicus* for Chinese large lighting purse seine fishery in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 949-958 (in Chinese).
- [10] 李欣海. 随机森林是特点鲜明的模型, 不是万能的模型[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(1): 170-179.
Li X H. Random forest is a specific algorithm, not omnipotent for all datasets[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2019, 56(1): 170-179 (in Chinese).
- [11] 王丽爱, 马昌, 周旭东, 等. 基于随机森林回归算法的小麦叶片SPAD值遥感估算[J]. 农业机械学报, 2015,

- 46(1): 259-265.
- Wang A L, Ma C, Zhou X D, *et al.* Estimation of wheat leaf SPAD value using RF algorithmic model and remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 259-265 (in Chinese).
- [12] 陈大刚. 黄渤海渔业生态学 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- Chen D G. Fisheries ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991 (in Chinese).
- [13] Li G X, Li P, Liu Y, *et al.* Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 390-405.
- [14] 石学法. 中国近海海洋: 海洋底质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 23-151.
- Shi X F. Offshore China Seas: marine sediments[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 23-151 (in Chinese).
- [15] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [16] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法(下)[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- Ma K P, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity I α diversity (Part 2)[J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(4): 231-239 (in Chinese).
- [17] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula[J]. *Ecology*, 1968, 49(1): 153-156.
- [18] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [19] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. *应用昆虫学报*, 2013, 50(4): 1190-1197.
- Li X H. Using "random forest" for classification and regression[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50(4): 1190-1197 (in Chinese).
- [20] 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.
- Chen B G, Li Y Z, Chen X J. Species diversity of fishes in the coral reefs of South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 373-381 (in Chinese).
- [21] 程济生. 东、黄海冬季底层鱼类群落结构及其多样性[J]. *海洋水产研究*, 2000, 21(3): 1-8.
- Cheng J S. The structure and diversity of demersal fish communities in winter in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 2000, 21(3): 1-8 (in Chinese).
- [22] 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.
- Su W. Fish community diversity in Haizhou Bay and its relationship with environmental factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [23] 赵国庆, 邱盛尧, 曲慧敏, 等. 山东近海海洋渔业资源结构现状浅析[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2018, 31(3): 239-247.
- Zhao G Q, Qiu S Y, Qu H M, *et al.* Analysis on present structure situation of marine fishery resources in Shandong offshore[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2018, 31(3): 239-247 (in Chinese).
- [24] 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.
- 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 (in Chinese).
- [25] 张翠翠, 魏皓, 宋贵生, 等. 基于IPCC-CMIP5的中国东部近海表层水温未来预估分析[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 51(6): 1288-1300.
- Zhang C C, Wei H, Song G S, *et al.* IPCC-CMIP5 based projection and analysis of future sea surface temperature changes in coastal seas east of China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 51(6): 1288-1300 (in Chinese).
- [26] 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等. 海洋生态学 [M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2010: 49-52.
- Shen G Y, Huang L F, Guo F, *et al.* Marine Ecology[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2010: 49-52 (in Chinese).
- [27] Boesch D F. Species diversity of marine macrobenthos in the Virginia area[J]. *Chesapeake Science*, 1972, 13(3): 206-211.
- [28] Hewitt J E, Thrush S F, Dayton P D. Habitat variation, species diversity and ecological functioning in a marine system[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 366(1-2): 116-122.
- [29] 李陆斌, 黄硕琳. 我国渔业资源增殖放流管理的分析研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(5): 765-772.
- Li L P, Huang S L. A study on management of stock enhancement in China[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(5): 765-772 (in Chinese).
- [30] 李静, 杨晓飞. 美国海洋保护区国家管理体系及其对我国的启示[J]. *海洋科学*, 2019, 43(7): 139-147.

- Li J, Yang X F. The national system of Marine Protected Areas of the United States of America and its implications for China[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(7): 139-147 (in Chinese).
- [31] 杨红生, 许帅, 林承刚, 等. 典型海域生境修复与生物资源养护研究进展与展望[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 809-820.
- Yang H S, Xu S, Lin C G, *et al.* Research progress and prospects of restoration and resource conservation in typical sea areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 809-820 (in Chinese).
- [32] Zhang C L, Chen Y, Xu B D, *et al.* How to predict biodiversity in space? An evaluation of modelling approaches in marine ecosystems[J]. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(11): 1697-1708.

Relationship between species diversity and environmental factors in the fishery community of Shandong coastal waters

XU Maozhen^{1,2}, ZHANG Chongliang^{1,2}, XUE Ying^{1,2}, XU Binduo^{1,2}, JI Yupeng^{1,2}, REN Yiping^{1,2,3*}

(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 266237, China)

Abstract: The fishery resources and ecological environment in Shandong offshore are under great pressure. With the impact of exploitation activities such as coastal engineering and overfishing in Shandong, the fishery resources in this area are in decline, and the number of fish of high economic value is significantly reduced. To effectively monitor and manage the fishery resources, it is necessary to understand fishery ecosystem, for which biodiversity is a crucial index in community ecology research to indicate ecosystem status. To understand the spatial distribution of coastal biodiversity, and the relationships between biodiversity indices and environmental factors, this study used several diversity indices, including number of species, Simpson index, Shannon index, and Pielou index, to analyze the spatial distribution of biodiversity based on investigation data of fishery resources in 2017 winter in Shandong offshore. Owing to a lot of non-linear and non-additive processes in fishery ecosystem, random forest model is used to assess the relationship between diversity indices and environmental factors. The results showed that the spatial distribution of diversity indices varied substantially in the Shandong offshore area, with a trend of higher diversity in the southern area of the Peninsula than that in the north, which included Yanwei fishery ground, Laizhou Bay, and the southern Bohai Sea. The southern Bohai Sea had the lowest level of species diversity. Random forest model could be properly fitted to the diversity data, and the rate of explained deviation reaches 77.46% and 45.66% for species number and the Shannon diversity index, respectively. However, the regression model of Pielou index had a low proportion of explained deviation. The bottom temperature, salinity, and water Depth had significant influences on the diversity indices, significantly correlated with species number, diversity index, and evenness index. The effect of bottom sediment type was not significant on species number and two diversity indices, but was high for the Pielou evenness index. The results were also compared for fishery resource surveys at different scales. The conclusion is that surveys of similar scale are necessary for long-term monitoring of biodiversity. This study systematically analyzes the diversity pattern of Shandong offshore ecosystem and provides scientific support for long-term marine ecosystem monitoring and specific marine management. We highlight the necessity of protecting biodiversity in order to restore fishery resources. Decisions could be made based on the level of biodiversity in terms of habitat restoration and the establishment of protected areas.

Key words: species diversity; spatial distribution; random forest; Shandong offshore

Corresponding author: REN Yiping. E-mail: renyip@ouc.edu.cn

Funding projects: National Key R&D Program of China (2019YFD0901204)