海绵动物潜在适宜分布区预测与保护现状分析

王金睿，杨娟

［中国地质大学（北京）海洋学院　北京　100083］

摘要：海绵动物在海洋中分布广泛，是海底生境的重要建造者之一，并在生态系统元素循环与能流过程中发挥着重要作用。为探明全球四大纲海绵潜在适宜分布区及其关键环境驱动因子，文章整合海洋生物多样性信息系统数据库（OBIS）物种点位与 10 项底层海洋环境数据，利用最大熵（MaxEnt）模型预测全球海绵的适宜分布区。结果表明，水深主导海绵的空间分布，各纲适宜分布区的环境驱动因素差异明显。海绵适宜生境高度集聚于全球近岸陆缘海域，各纲的潜在适宜分布区面积分别为：钙质海绵纲 39.7×10^6 km^2，寻常海绵纲 14.8×10^6 km^2，六放海绵纲 72.8×10^6 km^2，同骨海绵纲 7.28×10^6 km^2。当前，海绵动物整体潜在适宜分布区在具有重要生态或生物学意义的海洋区域占比仅为 16.72%，反映出对海绵动物高适宜分布区的潜在保护覆盖范围不足。研究结果可为指导全球海绵动物保护区划和海洋资源合理开采提供数据参考。

关键词：海绵动物；MaxEnt 模型；潜在适宜分布区；环境因子

中图分类号：Q958；P7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2026）07-0097-11

Prediction of Potentially Suitable Distribution Areas and Conservation Status of Sponges

WANG Jinrui，YANG Juan

（School of Ocean Sciences，China University of Geosciences，Beijing 100083，China）

Abstract：Sponges are widely distributed across marine environments，serving as key architects of critical benthic habitats and playing vital roles in elemental cycling and energy flow within marine ecosystems. To identify the potentially suitable habitats of the four global sponge classes and their dominant environmental drivers，this study integrated occurrence records from the Ocean Biogeographic Information System（OBIS）and ten sets of benthic marine environmental datasets，and employed the Maximum Entropy（MaxEnt）model to predict the global spatial distribution of suitable sponge habitats. The results revealed that water depth acted as the primary factor governing sponge spatial distribution；furthermore，distinct differentiation in the environmental drivers was observed shaping suitable habitats across different sponge classes. Suitable habitats for sponges were highly concentrated in coastal and marginal seas worldwide. The areas of potentially suitable habitats for each class are

收稿日期：2026-06-07；**修订日期：**2026-06-30

基金项目：国家重点研发计划项目课题“深海多金属结核矿区生态系统修复验证和成效评估”（2023YFC2811405）.

作者简介：王金睿，研究方向为海洋生态学

通信作者：杨娟，副教授，博士，研究方向为海洋生态学、环境海洋学

as follows: *Calcarea* (39.7×10^6 km^2), *Demospongiae* (14.8×10^6 km^2), *Hexactinellida* (72.8×10^6 km^2), and *Homoscleromorpha* (7.28×10^6 km^2). Collectively, only 16.72% of the global potentially suitable sponge habitats overlapped with the Ecologically or Biologically Significant Marine Areas (EBSAs), indicating insufficient conservation coverage for prime sponge habitats. The findings of this research can provide quantitative baseline data to support the delineation of global sponge conservation zones and the sustainable exploitation of marine resources.

Keywords: Sponges; MaxEnt model; Potentially suitable distribution areas; Environmental factors

0 引言

海绵动物（porifera）是现存最古老的后生动物类群之一，具有固着生活、生长缓慢和寿命极长等特点，是温带、热带和极地生境中底栖群落的重要组成部分和生物礁的构建者[1-3]。作为高效滤食者，海绵动物通过滤食作用不仅将底层与水体的能流联系在一起，同时，可清除水体中细菌、浮游生物与溶解有机物，从而显著改善水质。其体内的微生物共生体还参与碳和氮的固定，推动贫营养的热带水域中碳、氮等元素的生物地球化学循环[4-6]。

海绵动物分布范围广泛，其正面临自然环境波动、人类活动和气候变化等多重威胁，全球保护形势十分严峻[7]。陆源排污所携带的氮、磷等污染物在水中富集，导致水体与沉积物中的氮、磷含量升高，从而抑制底栖动物生长[8]。移动拖网、耙式捕捞等移动式渔具在作业过程中会翻动海底表层沉积物，直接破坏海绵、水螅、苔藓虫等固着型底栖生物构筑的生物底栖结构，以及沙波和生物凹坑等沉积型海底地貌[9]。此外，未来深海采矿活动可能会将矿床上包括生物在内的所有覆盖物全部剥离，破坏底栖生物栖息地，甚至杀死某些运动能力较弱的底栖生物[10]。

当前，人类对底栖生物空间分布格局及其环境驱动机制的认知仍存在明显不足。现有样本多集中在浅海海域，深层海域中极端生境的实测数据极度匮乏，导致多数底栖生物物种分布范围、种群丰度等关键信息无法被完整刻画，极大地限制了对底栖生物分布格局的精准认知[11]。然而，生物分布模型（Species Distribution Model，SDM，又称生态位模型）是预测气候变化影响下物种分布范围动态的重要工具[12]。该模型能够有效适配深海数据稀缺的研究场景，依托有限的实测样本，结合深海地球物理、环境遥感数据集，模拟未知海域底栖生物的适宜分布区与群落结构特征，弥补深海大范围实测采样的短板[13]。其中，最大熵（MaxEnt）模型可将研究区域内物种分布点的环境因子与其他地区的环境因子进行比较，预测物种可能的分布范围及其适宜度[14]，其结果通常优于同类其他生物分布模型[15]。目前，该模型已被广泛用于预测物种的地理分布，包括底栖生物、鸟类和濒危植物等，并在对物种迁移路线的应用研究中发挥着重要作用[15-18]。

据此，本研究利用海洋生物多样性信息系统数据库（Ocean Biodiversity Information System，OBIS）中的海绵动物记录数据，结合全球海底环境监测数据，利用 MaxEnt 模型开展海绵适宜分布区预测研究，以期为未来海洋底栖生态系统保护提供重要的数据支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

海绵动物分布数据（六放海绵纲、寻常海绵纲、同骨海绵纲、钙质海绵纲）均来源于 OBIS 数据库中的记录数据。

本研究所使用的环境数据来源于全球海洋环境数据库和 Bio-ORACLE 网站[19]。选取溶解氧（DO）、盐度、硅酸盐含量等 10 个影响海绵动物潜在适宜分布区的环境因子，并将其代码标为 bio1 ～ bio10，如表 1 所示。数据的空间分辨率为 5′ × 5′

（在赤道处约为 9.2 km × 9.2 km）。虽然底层海流、底质类型和生物相互作用等影响生物散布和定殖等的环境因子对海绵群落构建具有关键作用，但由于相关数据的缺失，本研究并未将其纳入考量，这可能导致预测结果存在一定的偏差。在其他海洋生物分布的 MaxEnt 模型研究中，生物因子也很少被选取[16]。

表 1　所选取的环境因子汇总

Table 1　Summary table of environmental factors

代码	环境因子（单位）	代码	环境因子（单位）
bio1	溶解氧 /（mg · L^{-1}）	bio6	深度 /m
bio2	盐度	bio7	离岸距离 /km
bio3	硅酸盐含量 /（mg · L^{-1}）	bio8	颗粒有机碳 /（μg · L^{-1}）
bio4	温度 /℃	bio9	坡度 /（°）
bio5	叶绿素 a 含量 /（mg · m^{-3}）	bio10	总悬浮颗粒物含量 /（mg · L^{-1}）

注：所有环境因子均为底层环境数据。

1.2　数据处理

OBIS 数据库记录的物种分布点受调查航次和航迹空间覆盖等因素影响，其所反映的物种分布信息可能与物种实际分布存在偏差。同一栅格内的环境因子数据相同，处于同一栅格内的冗余分布数据或重复分布数据会导致模型的过度拟合，从而影响研究结果的可靠性。因此，本研究在预测分析前对海绵动物分布点进行了预处理。为与环境因子的空间分辨率相匹配，在全球尺度下以 5' × 5'（约 9.2 km × 9.2 km）为单元划分栅格，并进行采样点抽稀，即在划分的每个区域中，随机选择一个站点作为该区域的代表点输入模型，以降低采样不均对模型预测的影响[20]。

整体来看，4 类海绵纲均呈全球近海带状分布特征，主要集中于大陆沿岸、海岛周边海域，高纬度的北冰洋、南大洋均有不同程度的分布，但各纲的核心富集大洋与重点分布岸段差异显著，其中，六放海绵纲全球分布范围最广、点位密度最高，是四大类中全球性最强的类群。

鉴于环境因子间的多重共线性可能导致模型过度拟合的问题[21]，本研究首先利用 ArcMap 10.8 软件提取了物种分布点对应的环境因子数值；随后采用 ENMTools 工具进行环境因子相关性分析，该工具具有不依赖于分布数据、分析结果稳定和操作简便等优点[22]。皮尔逊（Pearson）相关系数 r 取值范围为 –1 ～ 1，能够直观地反映两个变量的线性相关程度[23]。在本研究中，依据“$|r| < 0.8$”这一标准对变量进行筛选[22]。将这些分布点数据通过 ENMTools 工具处理，得到海绵动物 4 个纲的环境因子相关性分析图（图 1）。

1.3　MaxEnt 模型优化

ENMeval 软件包常被用来优化模型参数[24]。在 R 4.2.3 环境下用 ENMeval 软件包对正则化乘数（Regularization Multiplier，RM）和特征组合（Feature Combination，FC）参数进行了优化，RM 具有约束作用，旨在防止过拟合及模型过于复杂[25]。FC 旨在应用于模型协变量的数学变换，有助于捕捉复杂的关系[25]。MaxEnt 模型提供了 5 种特征类型：线性特征（Linear Features，L）、二次型特征（Quadratic Features，Q）、折页型特征（Hinge Features，H）、乘积型特征（Product Features，P）和阈值型特征（Threshold Features，T）[26]。选择合适的正则化乘数和特征类型对提高 MaxEnt 模型的性能和避免模型过度拟合至关重要[25]。Akaike 信息量准则（Akaike Information Criterion Correction，AICc）是一种广泛用于评估模型拟合度的指标，AICc 值越低越好[27]。因此，对正则化乘数的值（1.0、2.0、3.0 和 4.0）与 6 种特征组合类别（L、

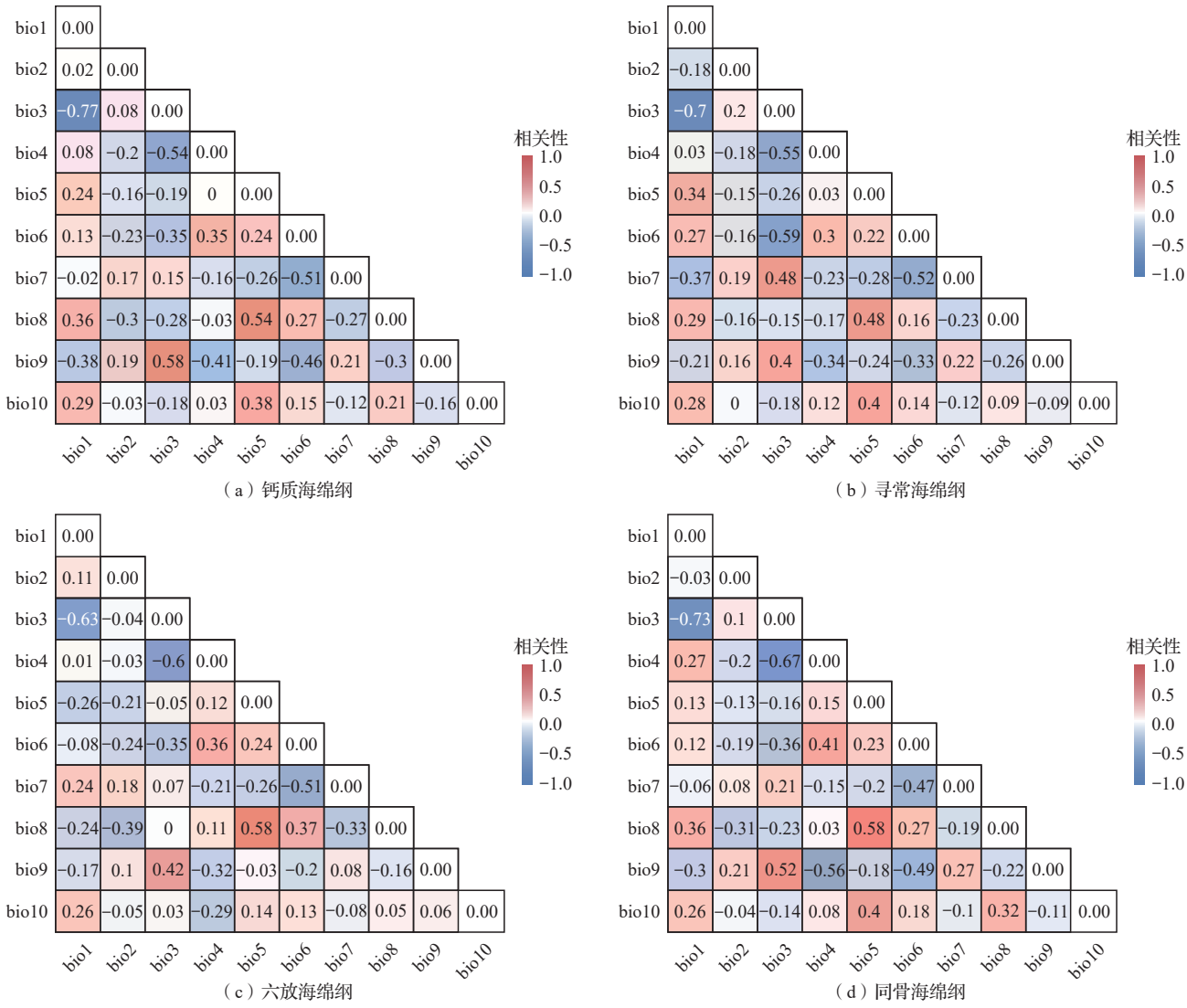


图 1 海绵动物 10 个环境因子的相关性

Fig.1 Correlation of 10 environmental factors for sponges

注：环境因子代码参照表 1。

LQ、H、LQH、LQHP 和 LQHPT）的组合进行了测试。

在本研究中，海绵动物不同纲之间的最优参数组合：对于钙质海绵纲，RM=1，FC=L；对于六放海绵纲，RM=1，FC=L；对于同骨海绵纲，RM=1，FC=LQH；对于寻常海绵纲，RM=1，FC=L。

1.4 MaxEnt 模型的运行和检验

建模过程中，将参与建模的点位数据按照 3∶1 的比例，75% 的数据用作训练集，25% 的数据作为测试集[28]。同时，将最大迭代次数设定为 1 000 次[28]。此外，设置正则化乘数为 1，收敛阈值为 0.000 01[29]。为增强模型的随机性，设置随机背景点数量为 100 000，并选择“Random seed”选项，进行 10 次交叉验证[28]。在 MaxEnt 模型中，采用工作特征曲线下面积（Area Under Curve，AUC）和真实技能统计（True Skill Statistics，TSS）进行模型的准确程度评估[30]。本研究设定评估合格条件为 AUC ≥ 0.7，并且 TSS ≥ 0.8。

在模型结果分析中，通过变量的百分比贡献和删除每个变量时的排列重要性统计来评估环境变量的相对贡献[31]。在结果可视化和统计中，通常利用 MaxEnt 模型生成的分布概率作为适宜性指数

（SI），范围为 0 ～ 1，进行分级[32]。本研究将模型输出的 ASC 格式文件导入 ArcMap 10.8 软件，使用重分类工具和人工分级法将 SI［0.6，1）的区域作为海绵动物的高适宜分布区，［0.3，0.6）为中适宜分布区，［0.1，0.3）为低适宜分布区，［0，0.1）为非适宜分布区[33]，使用栅格转面工具计算海绵动物各区域面积。潜在适宜分布区面积的计算如式（1）所示。

潜在适宜分布区面积 = 高适宜分布区面积 + 中适宜分布区面积　　（1）

该阈值设定参考了多项 MaxEnt 模型研究中对物种适宜生境的分类标准[32]。

1.5　海绵动物生境的潜在受保护状态分析

具有重要生态或生物意义的海洋区域（Ecologically or Biologically Significant Marine Areas，EBSAs）概念于 2008 年由《生物多样性公约》（CBD）缔约方大会第九次会议（COP 9）正式提出，其核心目的是通过科学方法识别对海洋生态系统健康至关重要的区域，是实现全球“3030 目标”（到 2030 年保护全球 30％的海洋），指导海洋保护区（MPA）选址的科学依据，也是未来海洋生态保护网络空间规划的关键文件。

据此，为了评估海绵动物目前的保护现状，本研究以 EBSAs 作为海绵动物潜在受保护范围，利用 EBSAs 数据库，将 MaxEnt 模型运行后的结果通过 ArcMap 10.8 软件的加权叠加功能，得到海绵动物总体潜在适宜分布区，并利用掩膜提取功能，将海绵动物潜在高适宜分布区和潜在适宜分布区在 EBSAs 范围内的面积提取出来，并计算其占比。

2　结果分析

2.1　MaxEnt 模型结果精度检验与环境因子分析

MaxEnt 模型运行结果显示，钙质海绵纲 AUC 值为 0.963，TSS 值为 0.879；寻常海绵纲 AUC 值为 0.977，TSS 值为 0.965；六放海绵纲 AUC 值为 0.914，TSS 值为 0.809；同骨海绵纲 AUC 值为 0.979，TSS 值为 0.959。海绵动物各项数值均满足精度要求，表明海绵动物的分布数据与环境因子的相关性很高，可以支持后续开展深入的研究。

深度（bio6）是贡献度最高的环境因子，在各类海绵动物中均占据主导地位，其对海绵动物的贡献度均超过 50％，表现出明显的共性；离岸距离（bio7）、温度（bio4）、溶解氧（bio1）和坡度（bio9）等为次要环境因子，各类海绵对次要环境因子的响应不同（表 2）。

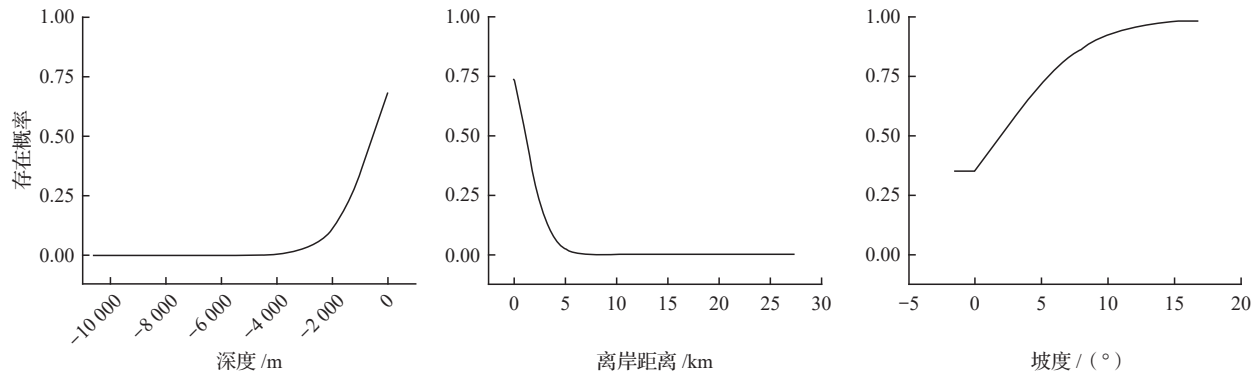
表 2　环境因子贡献度

Table 2　Contribution of environmental factors

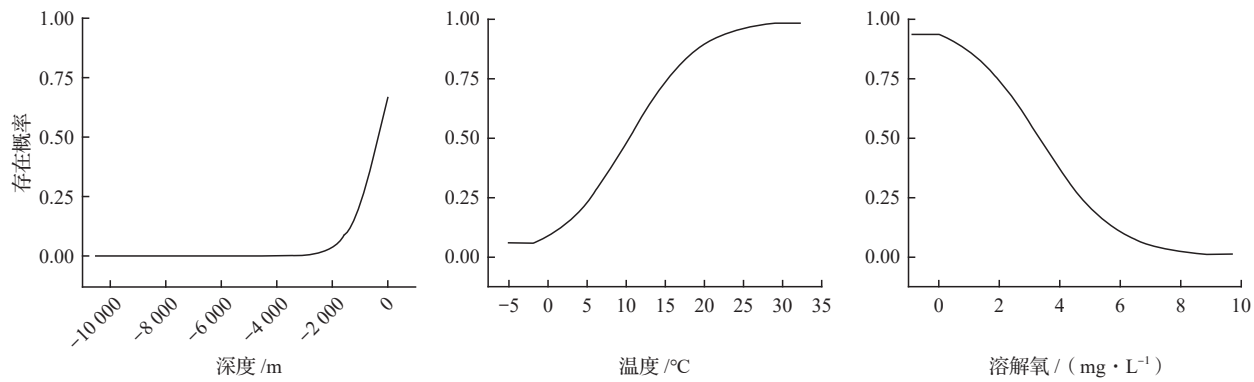
种类	环境因子贡献度 /%				
钙质海绵纲	bio6	bio7	bio9	bio1	bio10
	77.8	7.0	5.6	5.0	3.8
寻常海绵纲	bio6	bio4	bio1	bio7	bio10
	71.5	14.9	8.9	2.2	1.2
六放海绵纲	bio6	bio1	bio7	bio10	bio9
	75.6	12.6	5.4	3.3	2.3
同骨海绵纲	bio6	bio7	bio4	bio9	bio1
	55.6	12.3	12.0	10.4	2.9

注：环境因子代码参照表 1。

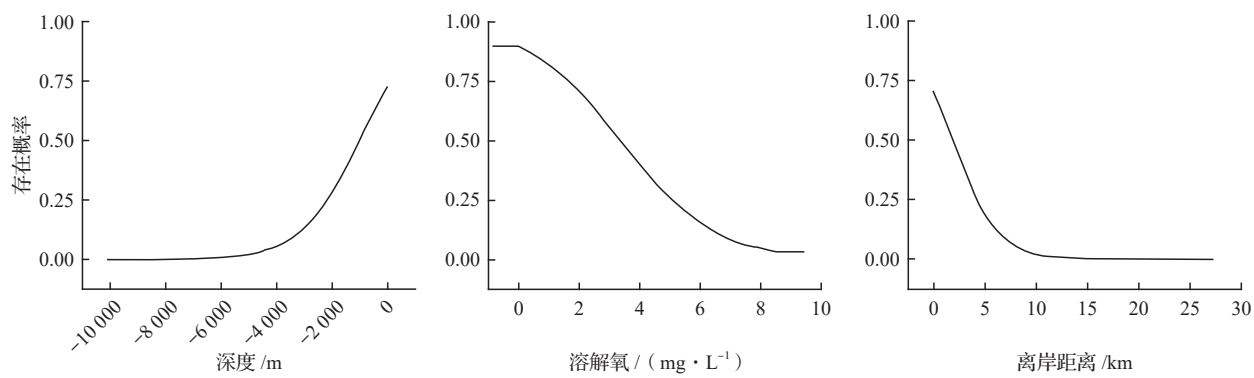
本次研究将物种存在概率≥ 0.5 的环境变量范围作为海绵动物分布的最适宜环境变量区间，模型结果（图 2）表明，钙质海绵纲的适宜生存条件为：深度小于 543.45 m，离岸距离不超过 1.13 km，坡度不低于 1.95°；寻常海绵纲的适宜生存条件为：深度不超过 351.68 m，温度高于 10.36 ℃，溶解氧含量不低



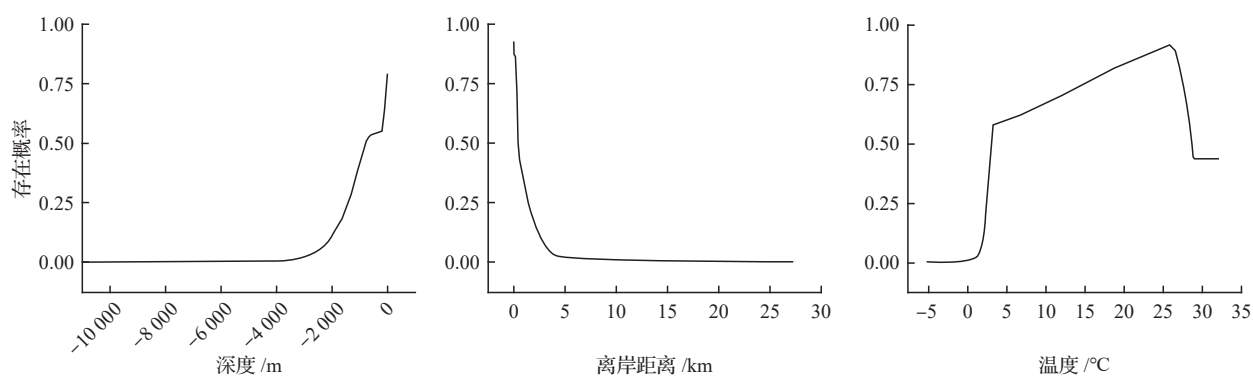
（a）钙质海绵纲



（b）寻常海绵纲



（c）六放海绵纲



（d）同骨海绵纲

图 2　海绵动物主要环境因子的响应曲线

Fig.2　Response curve of sponges to major environmental factors

于 3.33 mg/L；六放海绵纲的适宜生存条件为：深度不大于 1 011.95 m，溶解氧含量不高于 3.37 mg/L，离岸距离小于 1.86 km；同骨海绵纲的适宜生存条件为：深度小于 783.33 m，离岸距离不超过 0.46 km，温度为 3.22 ～ 28.77 ℃。

2.2　海绵动物潜在适宜生境预测

模型运行结果显示，4 类海绵的高适宜分布区全部分布于全球大陆近岸、海岛边缘海域。钙质海绵纲高适宜分布区范围狭小，集中于热带 – 亚热带近海，核心高适宜区主要分布在印度洋北部、澳大利亚西海岸、印度尼西亚群岛海域；太平洋高适宜分布区局限在 45 °N—60 °N 北美沿岸。

六放海绵纲高适宜分布区覆盖范围最广，太平洋区域集中在美国西海岸、中国和日本近海、澳大利亚东南及南美南端沿岸；大西洋则包含欧洲北海 – 地中海、墨西哥湾、北美东岸；印度洋高适宜分布区位于红海、印度大陆北部与澳大利亚西北海岸。

寻常海绵纲高适宜分布区呈沿岸条带密集排布，太平洋高适宜分布区在美洲西岸海域、东亚 – 东南亚近海、澳大利亚北部与东岸；印度洋高适宜分布区沿非洲东岸、红海、西亚陆缘、澳大利亚西北岸展布。整体集中在亚热带、温带浅海。

同骨海绵纲高适宜分布区呈零散斑块紧贴全球近岸，太平洋高适宜分布区在阿拉斯加、东亚 – 东南亚近海、澳大利亚 – 新西兰沿岸；大西洋则集中在加勒比 – 墨西哥湾、西欧近海；印度洋高适宜分布点位碎片化散布在沿岸岛屿周边。

各类海绵的低适宜分布区面积占比均超过 50%，说明其整体仅在小范围区域具备高度适宜的生存环境，高适宜分布区面积占比整体处于 5.34%～8.10%。六放海绵纲的适宜分布面积均远高于其他类群，其高适宜分布区面积和潜在适宜分布区面积在 4 类中均为最大，其中潜在适宜分布区面积达到 72.8×10^6 km^2，分布范围最广；钙质海绵纲次之。同骨海绵纲潜在适宜分布区面积为 4 类中最小，生存分布范围最为有限。此外，寻常海绵纲的高适宜分布区面积占比在 4 类海绵中位居首位（表 3）。

表 3　海绵动物潜在适宜分布区面积及占比

Table 3　Areas and proportions of potentially suitable habitats for sponges

分类	低适宜分布区		中适宜分布区		高适宜分布区		潜在适宜分布区
	面积 /（$\times10^6$ km^2）	占比 /%	面积 /（$\times10^6$ km^2）	占比 /%	面积 /（$\times10^6$ km^2）	占比 /%	面积 /（$\times10^6$ km^2）
钙质海绵纲	50.2	55.84	34.9	38.82	4.81	5.34	39.71
寻常海绵纲	33.3	69.23	10.9	22.67	3.90	8.10	14.80
六放海绵纲	76.6	51.28	63.6	42.55	9.22	6.17	72.82
同骨海绵纲	16.2	69.01	5.48	23.33	1.80	7.66	7.28

2.3　海绵动物门潜在适宜分布区在 EBSAs 范围内的分布

全球海绵动物潜在适宜分布区整体受 EBSAs 覆盖的占比较低，为 16.72%。除六放海绵纲外，各类海绵受保护的比例均在 15%以上，其中同骨海绵纲占比最大，为 20.70%，六放海绵纲相较于其余海绵纲占比偏低。由此可以看出，六放海绵纲受保护区保护的力度较弱（表 4）。

表 4　海绵动物分布区与 EBSAs 的重叠面积占比

Table 4　The proportion of sponges habitats overlapping with EBSAs

分类	高适宜分布区占比 /%	潜在适宜分布区占比 /%
海绵动物门	21.11	16.72
钙质海绵纲	20.47	15.59
寻常海绵纲	21.74	19.22
六放海绵纲	21.63	13.76
同骨海绵纲	25.33	20.70

通过 ArcMap10.8 软件图层叠加分析发现，海绵动物的高适宜分布区多沿海岸带断续带状分布，并且在北半球分布更广。海绵动物门潜在高适宜分布区在 EBSAs 范围内较少，仅在非洲东南部近岸、阿拉伯海等少数海域呈现零星的点状分布，并未出现大范围连续分布的情况；澳大利亚沿岸、北美西海岸等区域并未在 EBSAs 覆盖范围内，由此反映出海绵核心适宜生境覆盖明显不足，保护空缺显著。

3 讨论

3.1 影响海绵动物潜在适宜分布区的环境因子分析

MaxEnt 模拟结果显示，对海绵动物影响较大的环境因子为深度、温度和离岸距离，其中，深度对海绵动物影响最大，其贡献度超过 50%，远超其他环境因子。与此类似，Gregório 等[34]对比了多个模型［Maxent 模型、广义加性模型（GAM）、随机森林］在卡氏围线海绵（*Pheronema carpenteri*）的分布预测研究中的应用。结果表明，深度在所有环境因子中重要性最高（重要性值 0.68），远高于温度、溶解氧等其他因子。

深度通过调控光照条件、底层地貌、微型浮游生物丰度与底栖生物种间竞争关系，影响海绵动物潜在适宜分布区的垂直分异与群落构建。热带浅海珊瑚礁是光合共生型海绵的核心适宜分布区。光照环境差异改变海绵动物光合共生蓝细菌生物量[35]。浅水区（＜ 30 m）光照充足，造礁珊瑚占据优势生境，空间竞争压力大，仅少量携带光合共生微生物的海绵得以存续；在中光层，光照大幅度衰减，珊瑚覆盖率显著下降，大型藻类占比增加，生境空间释放，所以中光层成为海绵物种丰富度、个体丰度与底栖覆盖度的峰值分布区[36]。

温度则通过调控深水环境稳定性、影响水团分布与溶解氧水平，从多维度制约深海海绵动物的适宜分布区范围。研究区域的深海海绵集中栖息于北大西洋与北极高纬度海域 250 m 以深的稳定深水环境，该类环境水体性质长期稳定，温度年变幅普遍小于 1 ℃，深层（＞ 700 m）环境温度波动更小[37]。对于温带海绵，其适宜生存温度区间为 19 ～ 26 ℃；当温度降低至 15 ℃ 时，其滤食生理活性显著降低；28 ℃ 则为关键热应激临界阈值，超过此阈值后，海绵会出现呼吸代谢紊乱、共生微生物群落失衡现象；夏季极端高温频发的近岸海域将逐步丧失其适宜栖息条件[38]。对南极及深海海绵动物，其栖息于稳定低温环境，长期低温特化导致其对小幅度升温极为敏感。研究表明，南极海绵的适宜分布区为南极半岛西部低温近岸岩礁浅海。短时间内升温至 3 ℃ 便会引发大量的基因表达紊乱、机体进入极限应激状态；继续升温至 5 ℃ 难以调动额外的应激响应机制[39]。

3.2 人类活动对海绵动物潜在适宜分布区的影响及保护建议

本研究结果表明，地中海沿岸、中国黄海和东海沿岸、日本周边、澳大利亚东部和北美洲沿岸等区域未被 EBSAs 覆盖，但这些海域人类活动频繁，海绵动物面临严重威胁，亟须加强保护。例如，近海人类活动产生的海洋垃圾已对深海海绵动物的生存产生负面影响。东地中海深水区的岩石海绵已出现明显的海洋塑料垃圾和渔具类结构缠绕现象，研究者在实地考察中发现，多处岩石海绵聚集体表面缠绕着塑料垃圾[40]。海洋垃圾缠绕不仅对深海海绵动物造成物理伤害，还可能阻碍其正常滤食活动，甚至导致种群衰退。此外，在广袤的深海底层环境中，海绵动物依赖多金属结核、岩石、结壳等硬质基底附着生长，深海平原软沉积物区域的结核是其唯一的固着基质。大面积开采多金属结核将对底表巨型底栖动物产生严重的影响，结核开采不仅直接破坏表层沉积物，移除硬质基底，造成底表动物死亡或消失，而且开采引起的羽状流扩散和再沉积的覆盖作用将进一步改变海底沉积物和动物群落[41]。研究表明，寻常海绵纲偏好海山山顶与缓坡平台，六放海绵纲更趋向海山陡峻侧翼，坡度对六放海绵纲生境适宜度的贡献率（9.4%）显著高于寻常海绵纲（2%）[13]。

本研究表明，海绵动物的保护现状不容乐观，其整体潜在适宜分布区在 EBSAs 内的占比仅为 16.72%。Patova 等[42]研究指出，在加拿大斯科舍陆架设立的翡翠盆地、桑布罗岸两处海绵保护区

（SCAs）仅覆盖海绵预测分布区域的 1%，保护范围严重不足。据此，未来海绵动物保护工作应基于种群栖息地分布数据，科学划定并优化海绵保护区网络，优先覆盖关键栖息地及种群连通性节点，避免现有保护区碎片化且覆盖不足。同时，应确保保护区间的生态连通性，使其远离高强度的渔业活动区；严格管控破坏性人为活动，全面禁止在海绵栖息地及周边海域开展底拖网、锚泊、疏浚及深海采矿作业，并推行捕捞配额与兼捕限制制度，以减少渔业活动对海绵的直接物理损伤与沉积物淤积的影响。

4　结论

本研究使用 MaxEnt 模型，结合海绵动物 4 个纲的分布记录和 10 个底层环境因子，模拟了当前气候条件下全球海绵动物潜在适宜分布区的空间分布格局。结果表明，深度是制约海绵动物地理分布的首要环境要素，离岸距离、温度、溶解氧、坡度次之；海绵动物潜在适宜分布区集中在大洋沿岸等浅海区域，六放海绵纲适生范围最广，同骨海绵纲分布面积最小；现有 EBSAs 对海绵动物的覆盖率偏低，海绵动物的生境保护布局仍需要进一步优化。

由于本研究在环境变量的选择上未充分考虑海绵动物共生微生物、底质类型等与海绵动物息息相关的生物和非生物因子，因此预测结果可能存在一定偏差。同时，考虑到未来海洋酸化、升温等气候变化情景，还需加强对未来气候条件变化下海绵动物潜在适宜分布区的预测。后续研究建议进一步整合生物相互作用因子，并开展多情景气候模拟，以提升海绵动物潜在适宜分布区的预测精确度。

参考文献（References）：

[1] Bell J J. The functional roles of marine sponges[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 79(3): 341-353.

[2] Van Soest R W M, Boury-Esnault N, Vacelet J, et al. Global diversity of sponges (Porifera)[J]. PLoS One, 2012, 7(4): e35105.

[3] 初雁凌. 中国海钙质海绵纲（多孔动物门）的系统分类学研究[D]. 青岛：中国科学院大学（中国科学院海洋研究所），2020.
Chu Yanling. The taxonomy and zoogeography of the Calcarea (Porifera) from China Seas[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[4] Pawlik J R. The chemical ecology of sponges on Caribbean reefs: natural products shape natural systems[J]. BioScience, 2011, 61(11): 888-898.

[5] Rix L, de Goeij J M, van Oevelen D, et al. Reef sponges facilitate the transfer of coral-derived organic matter to their associated fauna via the sponge loop[J]. Marine Ecology Progress Series, 2018, 589: 85-96.

[6] Pawlik J R. Ecosystem engineers on tropical reefs in transition: giant barrel sponges in the Anthropocene[J]. Journal of Experimental Biology, 2025, 228(10): jeb250082.

[7] Xavier J R, Pomponi S A, Kenchington E L. Editorial: deep-sea sponge ecosystems: knowledge-based approach towards sustainable management and conservation[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1132451.

[8] 秦珊，崔建升，剧泽佳，等. 人为干扰条件下白洋淀底栖动物群落变化及其主要环境影响因子分析[J]. 环境科学学报，2021，41(3)：1123-1133.
Qin Shan, Cui Jiansheng, Ju Zejia, et al. Changes of benthic invertebrate community in the Baiyangdian Lake and analysis of main environmental factors under the condition of human disturbance[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(3): 1123-1133.

[9] Auster P J, Malatesta R J, Langton R W, et al. The impacts of mobile fishing gear on seafloor habitats in the gulf of Maine (Northwest Atlantic): implications for conservation of fish populations[J]. Reviews in Fisheries Science, 1996, 4(2): 185-202.

[10] 付全有，武光海，韩沉花，等. 浅谈深海多金属硫化物采矿的环境影响和保护措施[J]. 海洋地质前沿，2023，39(12)：1-11.
Fu Quanyou, Wu Guanghai, Han Chenhua, et al. An overview on the environmental impact and protection measures of deep-sea polymetallic sulphide mining[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 1-11.

[11] McClain C R, Hardy S M. The dynamics of biogeographic ranges in the deep sea[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 277(1700): 3533-3546.

[12] 董云伟，鲍梦幻，程娇，等. 中国海洋生物地理学研究进展和热点：物种分布模型及其应用[J]. 生物多样性，2024，32(5)：138-168.

Dong Yunwei，Bao Menghuan，Cheng Jiao，et al．Advances of marine biogeography in China：species distribution model and its applications[J]．Biodiversity Science，2024，32(5)：138-168.

[13] Georgian S，Morgan L，Wagner D．The modeled distribution of corals and sponges surrounding the Salas y Gómez and Nazca ridges with implications for high seas conservation[J]．PeerJ，2021，9：e11972.

[14] 欧阳泽怡，欧阳硕龙，吴际友，等．最大熵模型在植物适生区预测应用中的研究进展[J]．湖南林业科技，2022，49(1)：83-88.
Ouyang Zeyi，Ouyang Shuolong，Wu Jiyou，et al．Progress of the application of prediction of potential suitable distribution of plants based on Maxent[J]．Hunan Forestry Science & Technology，2022，49(1)：83-88.

[15] 何彦龙，刘守海，袁一鸣，等．基于 Maxent 模型的海地瓜（*Acaudina molpadioides*）区域适宜生境分布预测研究[J]．海洋学报，2021，43(4)：65-74.
He Yanlong，Liu Shouhai，Yuan Yiming，et al．The potential suitability habitat prediction of *Acaudina molpadioides* based on Maxent model[J]．Haiyang Xuebao，2021，43(4)：65-74.

[16] 王金睿，胡爱莲，杨娟．气候变化对南极阿德利属企鹅潜在适宜生境分布的影响[J]．应用生态学报，2026，37(3)：926-932.
Wang Jinrui，Hu Ailian，Yang Juan．Impact of climate change on the potentially suitable habitat distribution of Pygoscelis penguins in Antarctica[J]．Chinese Journal of Applied Ecology，2026，37(3)：926-932.

[17] 徐军，曹博，白成科．基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J]．生态学杂志，2015，34(12)：3354-3359.
Xu Jun，Cao Bo，Bai Chengke．Prediction of potential suitable distribution of endangered plant Kingdonia uniflora in China with MaxEnt[J]．Chinese Journal of Ecology，2015，34(12)：3354-3359.

[18] 高文强，王小菲，江泽平，等．气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子[J]．生态学报，2016，36(14)：4475-4484.
Gao Wenqiang，Wang Xiaofei，Jiang Zeping，et al．Impact of climate change on the potential geographical distribution pattern and dominant climatic factors of Quercus variabilis[J]．Acta Ecologica Sinica，2016，36(14)：4475-4484.

[19] Tyberghein L，Verbruggen H，Pauly K，et al．Bio-ORACLE：a global environmental dataset for marine species distribution modelling[J]．Global Ecology and Biogeography，2012，21(2)：272-281.

[20] 邢衍阔，王林龙，刘敏，等．基于物种分布模型的全球绿海龟空间分布及洄游廊道预测[J]．中国水产科学，2021，28(10)：1337-1345.
Xing Yankuo，Wang Linlong，Liu Min，et al．Global prediction of spatial distribution and migratory corridors of green turtles based on species distribution modeling[J]．Journal of Fishery Sciences of China，2021，28(10)：1337-1345.

[21] 方铧，陈星彤，刘明月，等．基于 Maxent 模型的互花米草潜在生境适宜性分析[J]．草地学报，2023，31(11)：3514-3524.
Fang Hua，Chen Xingtong，Liu Mingyue，et al．Analysis on the potential habitat suitability of spartina alterniflora based on maxent model[J]．Acta Agrestia Sinica，2023，31(11)：3514-3524.

[22] 张钤．基于 MaxEnt 模型未来我国水稻种植适宜性预测[D]．南京：南京信息工程大学，2023.
Zhang Qian．Prediction of future rice planting suitability in China based on MaxEnt model[D]．Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology，2023.

[23] 应佳莉．基于 MaxEnt 模型预测气候变化对中国特有荚蒾潜在分布的影响[D]．武汉：中国科学院大学（中国科学院武汉植物园），2021.
Ying Jiali．Predicting the impacts of climate change on the potential distribution of endemic viburnum in China by MaxEnt model[D]．Wuhan：Wuhan Botanical Garden，Chinese Academy of Sciences，2021.

[24] Muscarella R，Galante P J，Soley-Guardia M，et al．ENMeval：an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models[J]．Methods in Ecology and Evolution，2014，5(11)：1198-1205.

[25] Morales N S，Fernández I C，Baca-González V．MaxEnt's parameter configuration and small samples：are we paying attention to recommendations? A systematic review[J]．PeerJ，2017，5：e3093.

[26] 胡爱莲．环境变化对我国典型滨海湿地植被格局的影响预测研究[D]．北京：中国地质大学（北京），2025.
Hu Ailian．Predicting the impact of environmental changes on the vegetation patterns of typical coastal wetlands in China[D]．Beijing：China University of Geosciences（Beijing），2025.

[27] Sharifian S，Mortazavi M S，Mohebbi Nozar S L．The ecological response of commercial fishes and shrimps to climate change：predicting global distributional shifts under future scenarios[J]．Regional Environmental Change，2023，23(2)：64.

[28] Basher Z，Costello M J. The past，present and future distribution of a deep-sea shrimp in the Southern Ocean[J]. PeerJ，2016，4：e1713.

[29] Nori J，Rojas-Soto O. On the environmental background of aquatic organisms for ecological niche modeling：a call for caution[J]. Aquatic Ecology，2019，53(4)：595-605.

[30] 胡爱莲，杨娟，刘宝林，等. 广西沿海红树林潜在适宜区变化及互花米草入侵威胁的预测[J]. 应用生态学报，2024，35(3)：669-677.
Hu Ailian，Yang Juan，Liu Baolin，et al. Prediction on the changes in potential suitable areas for mangroves along the coast of Guangxi and the threat from *Spartina alterniflora* invasion[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2024，35(3)：669-677.

[31] Liu Huiyu，Gong Haibo，Qi Xiangzhen，et al. Relative importance of environmental variables for the distribution of the invasive marsh species *Spartina alterniflora* across different spatial scales[J]. Marine and Freshwater Research，2018，69(5)：790-801.

[32] Hu Ailian，Yang Juan，Xia Jianxin，et al. Prediction on the potentially suitable habitat change of sea turtles under different climate scenarios[J]. Acta Oceanologica Sinica，2025，44(5)：68-80.

[33] 罗才红，汪皖渝，黄金夏，等. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化对黑颈鹤栖息地分布的影响[J]. 应用生态学报，2025，36(4)：1251-1260.
Luo Caihong，Wang Wanyu，Huang Jinxia，et al. Predicting the impact of climate change on the habitat distribution of Grus nigricollis based on the MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2025，36(4)：1251-1260.

[34] Gregório I，Xavier J R，Davies A J. Present and future distribution of the deep-sea habitat-forming sponge-Pheronema carpenteri (Thomson，1869) in a changing ocean[J]. Deep Sea Research Part I：Oceanographic Research Papers，2024，213：104390.

[35] Freeman C J，Easson C G. Sponge distribution and the presence of photosymbionts in Moorea，French Polynesia[J]. PeerJ，2016，4：e1816.

[36] Raijman-Nagar L，Goren L，Shefer S，et al. Sponge abundance and diversity patterns in the shallow and mesophotic reefs of the northern Red Sea[J]. Frontiers in Marine Science，2024，11：1370089.

[37] Samuelsen A，Schrum C，Yumruktepe V Ç，et al. Environmental change at deep-sea sponge habitats over the last half century：a model hindcast study for the age of anthropogenic climate change[J]. Frontiers in Marine Science，2022，9：737164.

[38] Bosch-Belmar M，Milanese M，Sarà A，et al. Effect of acute thermal stress exposure on ecophysiological traits of the Mediterranean sponge chondrilla nucula：implications for climate change[J]. Biology，2024，13(1)：9.

[39] González-Aravena M，Kenny N J，Osorio M，et al. Warm temperatures，cool sponges：the effect of increased temperatures on the Antarctic sponge *Isodictya* sp.[J]. PeerJ，2019，7：e8088.

[40] Gerovasileiou V，Smith C J，Mytilineou C. Vulnerable rock sponges in the under-studied deep Eastern Mediterranean[J]. Marine Biodiversity，2025，55(3)：43.

[41] 王春生，周怀阳. 深海采矿对海洋生态系统影响的评价Ⅱ. 底层生态系统[J]. 海洋环境科学，2001，20(2)：32-37.
Wang Chunsheng，Zhou Huaiyang. Assessment of potential impacts of deep-sea mining on marine ecosystem Ⅱ. Benthic ecosystem[J]. Marine Environmental Science，2001，20(2)：32-37.

[42] Patova A，Ribeiro P A，Murillo F J，et al. Population genomics and connectivity of *Vazella pourtalesii* sponge grounds of the Northwest Atlantic with conservation implications of deep sea vulnerable marine ecosystems[J]. Scientific Reports，2025，15：1540.