

江曲图, 丁洁琼, 叶观琼, 等. 中国海洋生态系统累积影响的空间量化评估[J]. 海洋学报, 2021, 43(9): 146–156, doi:10.12284/hyxb2021058
Jiang Qutu, Ding Jieqiong, Ye Guanqiong, et al. Spatial assessment of cumulative impact on China's marine ecosystems[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(9): 146–156, doi:10.12284/hyxb2021058

中国海洋生态系统累积影响的空间量化评估

江曲图¹, 丁洁琼¹, 叶观琼^{1*}, 曾江宁²

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 自然资源部第二海洋研究所 海洋生态系统动力学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 海洋生态系统累积影响评估是科学认知该系统对外界扰动响应与反馈规律的生态学方法。为了探索和揭示其中的内在规律, 本文以我国部分近陆海域为研究范围, 选取海洋渔业、海洋航运、陆源及近海、气候变化 4 种类型下的 16 个生态压力因子, 通过空间量化和标准化, 在 1 km×1 km 空间格栅尺度下, 针对研究范围内 9 种海洋生境类型, 进行了累积暴露度和累积影响度评估。结果显示: 研究海域累积暴露度总体呈现近岸高于远海, 并向外海一侧逐步递减; 陆源污染、渔业捕捞对近岸海域生态系统影响度较大, 总体来看气候变化影响度最大; 我国近海分别有 22.8% 和 7.6% 的海域受影响程度较高和极高, 其中长三角海域受人类活动影响度最高。

关键词: 中国近海; 人类活动; 海洋生态系统; 空间累积效应

中图分类号: Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)09-0146-11

1 引言

党的十九大以来, 我国海洋生态环境状况整体改善, 但近岸海域环境状况空间差异较大, 海域污染问题不容忽视。作为世界上人口最多且处于建设期的发展中国家, 我国的生产活动强度较高, 资源消耗较大, 陆域及海上的人类生产活动不可避免的对海洋生态环境造成直接或间接影响, 例如人类陆地生活产生的废水、垃圾随河流入海, 海洋成为了人类活动产生的废液、废渣的“汇”; 渔业捕捞活动及海上开采工程不断地利用海洋资源为人类生产食物及制造能源和物品, 也同时威胁着海洋资源的储量及生境的安全; 海上航运给人们制造便利物流客运的同时也产生了噪音、污染^[1]; 高强度的工业生产排放大量温室气体加剧全球气候变暖, 导致海表温度异常、海洋热容量增加等。近几十年来, 我国海洋生态系统在人类活动

和气候变化的影响下发生了重大变化, 例如 1978–2016 年, 我国近海渔业捕捞资源呈衰退甚至枯竭之势, 典型海洋生态系统珊瑚礁、海草床等生境丧失比例达 70% 以上^[2-4], 海岸带湿地总丧失率高达 58% 左右^[5]。如何识别海域人类活动密集度, 量化全球气候变化背景下各种人为活动对海域生境的累积影响, 是减少海洋环境污染、缓解用海强度以及确定保护区优先区和进行有效生态修复的前提。2008 年, Halpern 等^[6-7]首次绘制了全球范围内人类活动对海洋生态系统的累积影响空间化分布图, 结果表明, 全球没有不受到人类活动影响的海域, 且 41% 的海域受到强烈程度干扰。该项研究开创了海洋生态系统累积影响评估的先河, 引起了科学家对于累积影响空间量化评估研究的热潮, 其构建的生态系统多尺度空间模型在全球各局部地区如地中海^[8]、波罗的海^[9]、加拿大^[10]、英国^[11]等得到广泛应用。此外 Parravicini 等^[12]开发的地理空

收稿日期: 2020-10-20; 修订日期: 2021-01-04。

基金项目: 国家自然科学基金(41606124); 浙江省科技厅资助项目(2017F30012)。

作者简介: 江曲图(1991—), 男, 湖北省崇阳市人, 研究方向为海洋生态健康、时空分析。E-mail: jiangqutu@zju.edu.cn

* 通信作者: 叶观琼(1984—), 女, 浙江省绍兴市人, 副教授, 研究方向为海岸带综合管理、海洋生态文明。E-mail: gqy@zju.edu.cn

间模型和 Knights 等^[13] 构建的暴露-效应模型也从距离远近及人类活动压力的强度、频率等方面进行影响的量化评估,但目前上述模型的应用都不如 Halpern 等^[6-7] 的生态系统多尺度空间模型广泛。而目前尚未有关于人类活动对我国近海全局海域影响强度定量化的全面研究,因此本文基于生态系统多尺度空间模型,利用海洋高分辨率时空数据分析各类人为活动及气候因子对我国近岸海域海洋生态系统的累积影响状况及程度,最终得到 1 km×1 km 空间分辨率的累积暴露度及影响度,可直观了解我国近海人海矛盾现状,促进基于生态系统的管理政策制定、海洋空间的有效开发利用以及资源合理配置等。

2 材料与方 法

2.1 研究区域概况

本文研究区域为我国部分近陆海域。具体范围如图 1 所示,该区域自北向南跨越温带、亚热带以及热带,海洋生态系统多样,靠近我国 11 个沿海省市及自治区陆地,人类活动最为频繁且强烈。考虑人类活动主要处于近陆海域和各类数据的可获取性,南海海域及台湾省海域未纳入本研究区域。

2.2 研究方法

根据 Halpern 等^[6-7] 和 Beauchesne 等^[10] 提出的空间量化模型,本研究通过以下两个指标来进行人类活

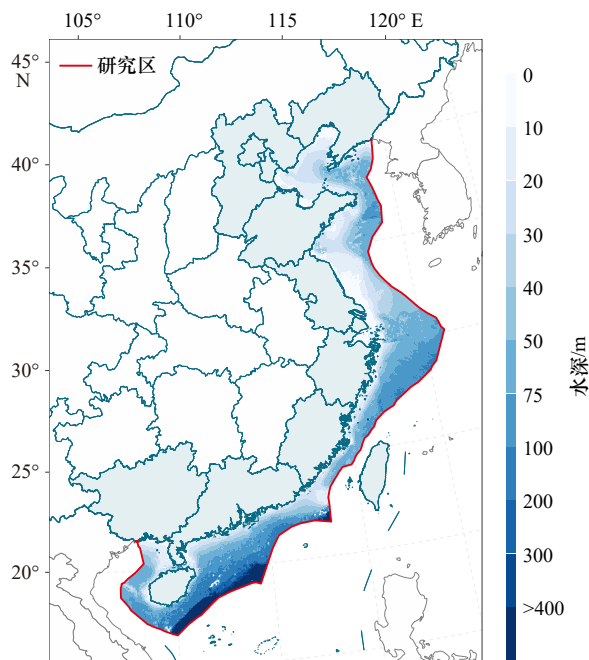


图 1 中国部分近陆海域人类活动累积影响研究区域
Fig. 1 Study on the cumulative impact of human activities in some coastal seas of China

动和气候变化对于海洋生态系统累积影响的空间评估,即累积暴露度(Cumulative Exposure, CE)和累积影响度(Cumulative Impact, CI)。累积暴露度定义为多种压力因子标准化(0~1)后的协同作用,即将研究海域划分成 1 km×1 km 网格,暴露度即为各网格承载的压力因子总和。累积影响度定义为各网格承载的压力因子对其不同生境的影响力总和。前者衡量的是多种压力的累加总和,后者考虑生境脆弱度下的多重压力影响度,CE 和 CI 计算式分别为

$$CE = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

$$CI = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_i \times H_j \times \mu_{i,j}, \quad (2)$$

式中, S_i 表示人类活动直接或间接的影响因子,即压力因子(Stressors); H_j 为不同类型海洋生态系统,即不同海洋生境类型(Habitats); i 和 j 表示特定类别的压力因子和海洋生境; m 和 n 分别为海洋生境和压力因子的总数目; $\mu_{i,j}$ 为脆弱性矩阵,表示不同压力因子对不同生境的影响权重。

基于上述空间化模型,本文搜集了我国近海人类活动及气候变化影响因子的各类高分辨率时空数据及各类生境的分布数据,时间尺度方面尽量选取以 2015 年为基准或最新的数据集,空间尺度及量级方面首先以 1 km×1 km 的研究区栅格对不同分辨率压力数据进行重采样和掩膜,其次对所有压力因子进行对数转换,最后基于标准化后的 1 km×1 km 栅格数据进行空间量化分析(图 2)。

2.3 生态系统累积影响评价指标

2.3.1 生态压力因子

为量化人类活动和气候变化对海洋生态系统直接或间接的影响,本文从海洋渔业、海洋航运、陆源及近海、气候变化 4 个方面,选取 16 个生态压力因子,其空间及时间分辨率,量化过程和数据来源如表 1 所示。标准化转换前绝大部分各压力因子数值分布均呈现右偏分布(图 3),极端高值部分较少,为避免极端值的影响和对中值部分的低估,更好地进行比较以及计算,首先对所有压力因子均进行对数转换,然后以数据分布的 99 分位数作为上限值进行 0~1 标准化^[14]。

2.3.2 典型海洋生境及脆弱性

我国大陆及海岛海岸线绵延 3.2×10⁴ km,海域辽阔,分布有各类海洋生态系统(图 4),具有食物供给、气候调节、文化娱乐等多种服务功能,潜在价值巨大。

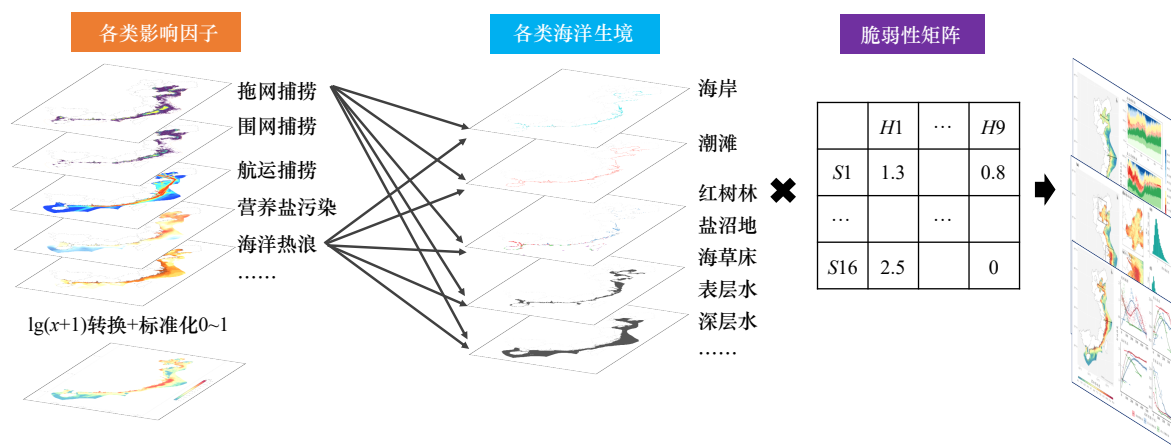


图 2 累积影响空间化评估示意图

Fig. 2 The schematic diagram of spatial assessment of cumulative impact

表 1 生态压力因子 ($N=16$) 描述及数据来源Table 1 Description of each stress factor ($N=16$) and data source

类别	压力因子	空间	时间	压力量化	来源
海洋渔业	S1拖网	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
	S2围网	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
	S3鱿钓	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
	S4漂流延绳钓	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
	S5固定式渔具	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
	S6其他渔具	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	2015年	基于每日各栅格点捕捞努力量计算不同类型捕捞方式的年均值(单位: h/km^2)	文献[15]
海洋航运	S7航运	$0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$	2013年	由航运轨迹密度确定(单位: 轨迹/网格)	文献[5]
	S8港口	$0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$	-	基于距港口远近, 取倒数(单位: km)	文献[16]
陆源及近海	S9人口密度	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	2015年	以离岸 1 km 海域网格点为中心, 计算其 10 km 半径缓冲区内人口数量(单位: $\text{人}/\text{km}^2$)	文献[17]
	S10营养盐污染	站点监测	2015年	监测点数据来源于生态环境部(单位: mg/L)	文献[18]
	S11赤潮	位置点	2005–2015年	基于近10年间赤潮累积发生位置点, 做核密度估计(无量纲)	文献[19]
	S12石油类污染	站点监测	2015年	监测点数据来源于生态环境部(单位: mg/L)	文献[20]
	S13有机污染	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	2013年	主要基于农药、杀虫剂用量模拟得到(单位: t)	文献[5]
气候变化	S14海表热浪	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	2015年	基于最优插值海表温度产品OISST获得(单位: $^{\circ}\text{C}$)	文献[21]
	S15海洋酸化	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$	2013年	基于月均文石饱和度状况获得(无量纲)	文献[5]
	S16海平面上升	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	1992–2012年	基于AVISO卫星高度计产品获得(单位: mm)	文献[22]

注: -代表无年份区别。

本研究基于数据的完整性、及时性、公开性和可获取性, 将承载压力的主要海洋生态系统分成 9 类(表 2), 分别是: 海岸($H1$)、潮滩湿地($H2$)、红树林($H3$)、盐沼地($H4$)、海草床($H5$)、珊瑚礁($H6$)、近岸浅水及底栖生境($H7$)、近海表层生境($H8$)和近海深层生境($H9$)。

生境空间分布的量化过程以 1 和 0 表示 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格有和无该类生境, 并覆盖整个研究区域。海岸是根据矢量边界数据向外延得到的; 潮滩数据来源于 <https://www.intertidal.app> 网站; 红树林、盐沼地、海草

床和珊瑚礁为矢量数据进行栅格化处理并以研究区域边界进行掩膜后的数据; 近岸浅水及底栖生境、近海表层生境和深层生境根据 ETOPO1 数据按水深进行划分, 各生态系统具体空间分布如图 4 所示, 其脆弱性基于前人相关研究确定权重矩阵^[6-7](表 3)。

3 结果

3.1 空间累积暴露度

标准化处理后, 根据公式(1)和公式(2)进行暴露度及影响度计算, 得到我国近岸海域总体暴露度空间

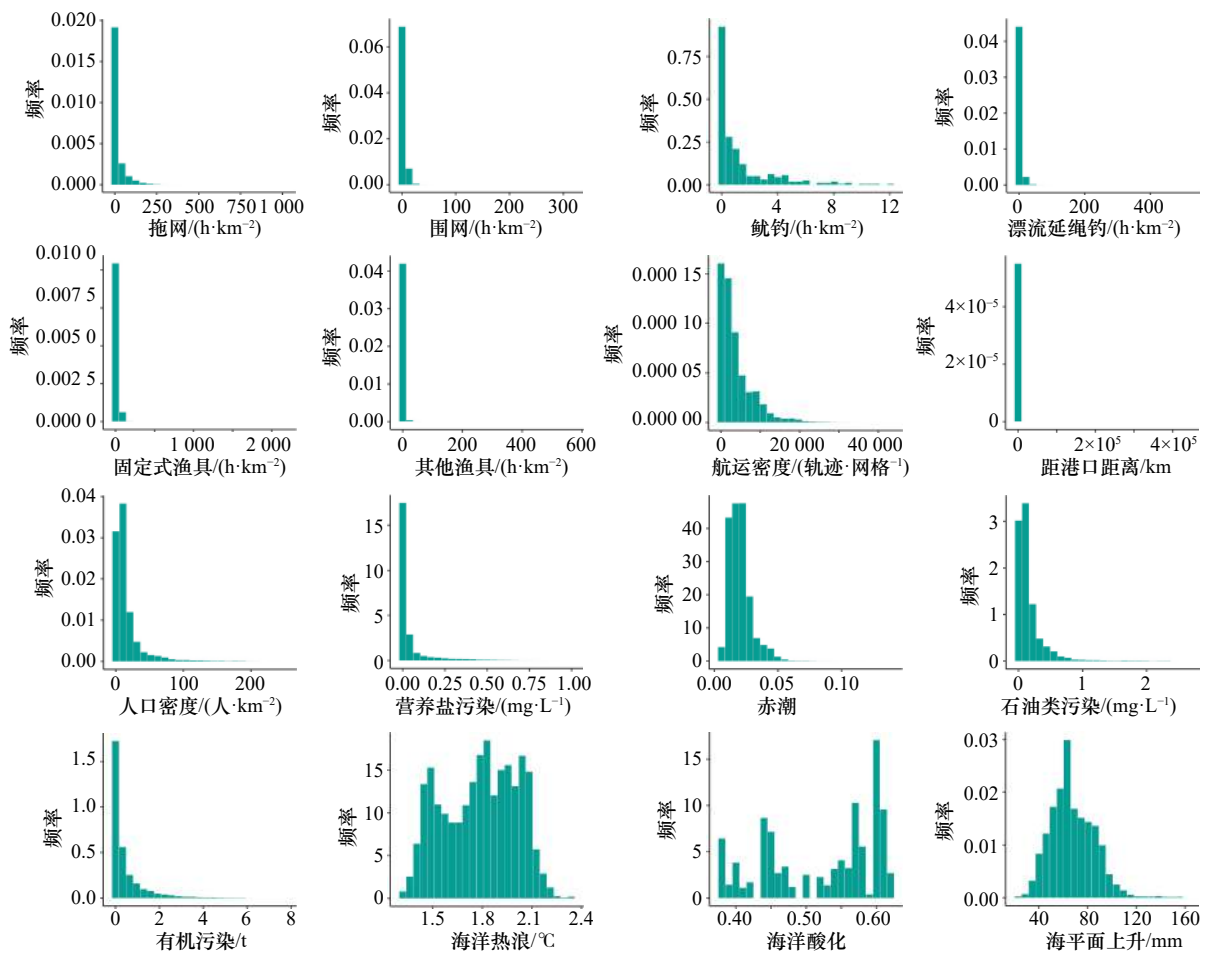


图3 16个生态压力因子未转换前数值分布频率直方图

Fig. 3 Frequency histogram of the numerical distribution of 16 pressure factors before conversion

分布情况(图5)。如图所示,累积暴露度总体呈现近岸高于远海,并向外海一侧逐步递减,这与其他地区的研究结果也一致^[6,10,28],即近岸海域更加暴露于人类活动所带来的各类压力,因为近岸海域的人类活动最为频繁剧烈,而且大部分污染排放口、航运捕捞活动也多集中于该区域,但总体来看,平均贡献度较高的压力因子为气候变化(海洋热浪 19.56%、海平面上升 19.44%、海洋酸化 19.22%)和海洋航运(16.79%)。但这并不表明远离陆地的海域所受压力就不大,由图5a可知,累积暴露度值域为 3.3~12.3,即所有区域均遭受人类活动压力因子的影响,只是离岸远海区域暴露度相对较小,以自然断点法将其值域划分为低暴露(3.3~4.3)、中等暴露(4.3~5.3)、高暴露(5.3~6.6)和极端暴露(6.6~12.3),结果表明,我国近海分别有 6.72%和 12.3%的海域处于高暴露和极端暴露水平。从局部区域看,我国沿海发达地区所在海域如渤海海域、长三角海域、珠三角海域等累积暴露度较高(图5b至图5d),其平均暴露度分别为 5.06、5.52和

4.51(图5e至图5g)。长三角海域暴露度水平最高,高值区域集中于长江出海口海域、浙江省舟山海域以及南部河口和海湾区域;而对于渤海海域,高值区域多集中于天津近岸海域、莱州湾、辽东湾等地;珠三角海域相对来说累积暴露度较小,主要是珠江口及近海河口区域。

从承受压力因子数目来看,所有区域遭受的压力因子均大于 6 种(图6),且各压力因子在不同地区的贡献度存在空间差异。以渤海、长三角和珠三角海域横断面为例,气候变化因子如海洋热浪、海洋酸化、海平面上升整体贡献度最高,约占 50%,且对于离岸海域影响度大于近岸海域,随离岸距离的增大而呈现一定上升趋势。基于渤海近封闭的空间形状,整个区域各压力因子贡献度变化相对不大;而长三角海域在离岸 200 km 范围左右所受压力影响最为频繁,其中 100~200 km 时,赤潮灾害贡献度达到最高,而在 150~250 km 时,渔业捕捞活动贡献度达到最高,同时人口密度及营养盐污染的贡献度相比于其他地

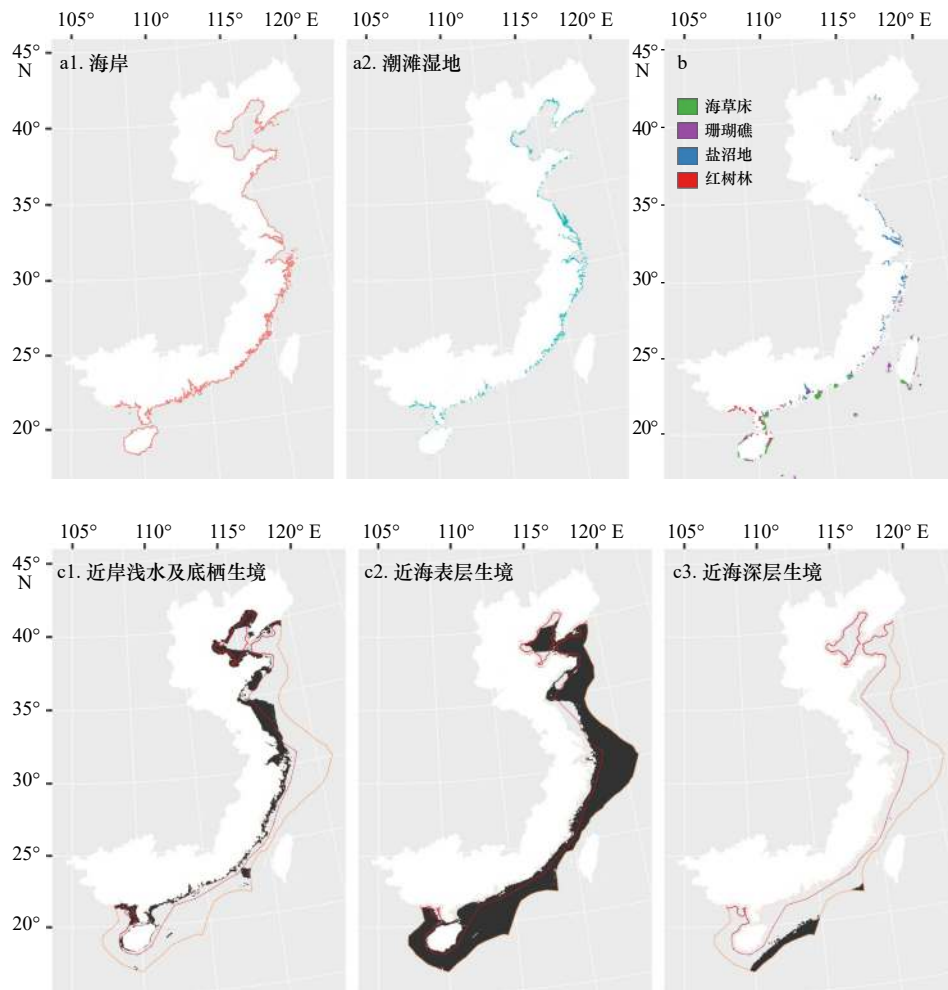


图 4 典型海洋生态系统空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of typical marine ecosystems

表 2 海洋生境 (N=9) 分类及数据来源

Table 2 Classification and source of various marine habitats (N=9)

序号	生境类型	描述	来源
H1	海岸	根据大陆地边界向外延伸1 km的区域	文献[23]
H2	潮滩湿地	根据卫星遥感影像反演的2014–2016年的均值分布区域	文献[24]
H3	红树林	2015年我国沿海红树林分布	文献[25]
H4	盐沼地	根据全球盐沼地分布数据截取我国近岸盐沼地分布区域	文献[26]
H5	海草床	根据全球盐沼地分布数据截取我国近岸海草床分布区域	文献[26]
H6	珊瑚礁	根据全球盐沼地分布数据截取我国近岸珊瑚礁分布区域	文献[26]
H7	近岸浅水及底栖生境	水深小于20 m的区域,以浅水和底栖环境为主	文献[26]
H8	近海表层生境	水深大于20 m的表层水环境	文献[27]
H9	近海深层生境	水深大于200 m的深层水环境	文献[27]

区非常高;珠三角横断面各压力因子多集中于0~100 km近岸区域,渔业捕捞、航运、陆源及气候等压力因子贡献相当,而大于100 km后则由气候变化及航运压

力因子主导。总体而言,近岸海域受各类压力因子的协同作用,因此其生态系统受到的影响状况更为复杂,而离岸海域多暴露于航运及气候变化压力因子的影响。

表3 不同生境对应不同压力因子的脆弱性矩阵

Table 3 Vulnerability matrix corresponding to different stress factors in different habitats

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
S1	0.2	1.3	0	1	0.2	1.2	2.1	2.1	0.8
S2	0	0	0	0.4	0	0.7	0.6	2.2	0.6
S3	0	0	0	0.4	0	0.7	0.6	2.2	0.6
S4	0.1	0	0	0.5	0	0.5	0	3	2.2
S5	0.9	1.9	0.9	1	1.1	1.6	2.1	1.6	0
S6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	1.2	1.6	1.2	0
S7	1.9	0.3	2	1.4	1.9	1.5	0.3	1.9	0
S8	1	2	2	1.4	1.9	1.5	2	1.9	0
S9	2.7	2.8	3.3	1.6	2.5	2.3	2	0.9	0
S10	0.4	1.6	1.8	1.9	2.1	1.8	2	1.2	0
S11	0.4	1.6	1.8	1.9	2.1	1.8	2	1.2	0
S12	0.1	2.1	1.4	1.7	1	1.2	1.2	1.9	1.6
S13	0.1	2.1	1.4	1.7	1	1.2	1.2	1.9	1.6
S14	1.4	2.8	2.4	1.4	2.1	2.8	0.5	3.3	2.3
S15	0	0.9	1.2	1.3	1.4	1.1	0.1	1.8	0
S16	1.9	2.5	3	3.1	2.6	2.4	2.2	0	0

3.2 空间累积影响度

如图7所示, 累计影响度得分为4.1~19.4, 以自然断点法将其值域划分为影响较低(4.1~5.7)、影响中等(5.7~7.7)、影响较高(7.7~10.5)和影响极高(10.5~19.4), 结果表明, 我国近海分别有22.8%和7.6%的海域受影响程度较高和极高, 约占整个研究海域的1/3。整体上, 我国近岸海域如渤海、山东东部海域、江苏北部海域、长江口东部海域及珠江口区域累积影响度较高, 海南南部附近海域以及远洋区域累积影响度较低, 其中浙江及上海近海区域影响最为严重, 此区域人口密度非常大, 是我国重要的港口水域以及渔业养殖捕捞区域, 生产活动强烈, 海洋生态系统受到严重的影响。对4个典型压力因子累积影响强度与离岸距离进行分析, 从典型区域横断面来看, 拖网捕捞压力因子在3个区域影响度表现各异, 在长三角海域呈现先增大后减小趋势, 而在珠三角海域呈现线性减小趋势, 在渤海区域则表现为波动性变化趋势; 航运压力因子则均具有倒U型特征, 即先增大后减小, 其中渤海区域航运影响度最

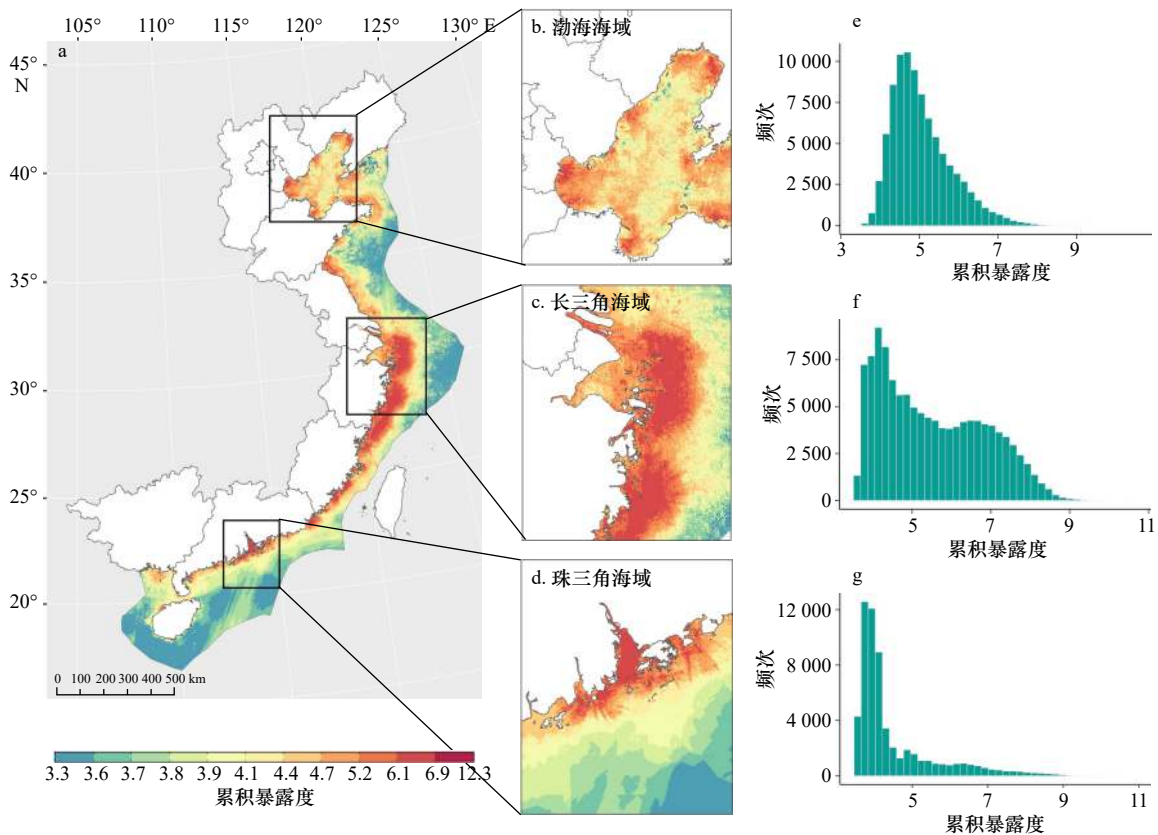


图5 我国近海人类活动压力累积暴露度(a)、渤海海域(b)、长三角海域(c)、珠三角海域(d)的局部放大图以及其压力值频次分布(e-g)

Fig. 5 Accumulated exposure to pressure from human activities in the coastal seas of China (a), and the Bohai Sea (b), the Changjiang River Delta (c), a partial enlarged view of the Zhujiang River Delta (d), and represent the frequency distribution of pressure values(e-g), respectively

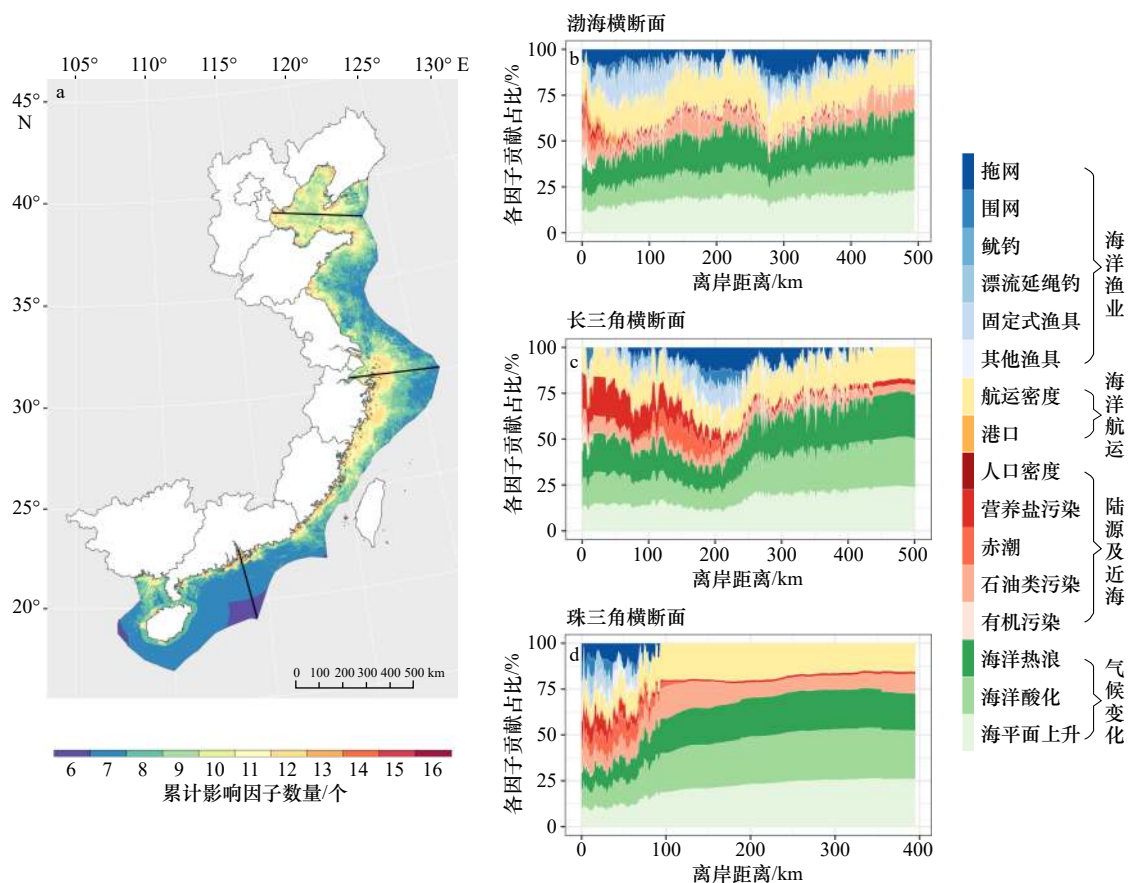


图6 我国近海人类活动压力累积影响因子数量(a)及其对总累积暴露度的贡献百分比(b-d)

Fig. 6 The cumulative number of factors affecting the pressure of human activities in the coastal seas of China (a) and their contribution to the total cumulative exposure (b-d)

大, 珠三角区域航运压力因子影响度减小幅度相比于其他两个区域较大; 而海洋热浪与营养盐污染压力因子变化趋势正好相反, 前者随离岸距离增加而增大, 后者随离岸距离增加而减小并趋近于零, 渤海区域海洋热浪影响度较其他区域高, 而长三角海域营养盐影响度最大。从4类生态压力因子影响度分布看, 海洋渔业和陆源近海压力因子影响度整体集中于近岸海域, 尤其是浙江近海和江苏近岸海域, 而海洋航运与气候变化压力因子则表现为远海大于近岸海域, 气候变化因子影响度在我国东南部海域较为强烈(图8)。

4 讨论

4.1 人类活动和气候变化多重压力

本研究首次量化了多重压力对我国整个近海海域的影响, 并得到了高分辨率的空间分布, 其中累积暴露度对多种生态压力因子的数量及强度进行空间估计, 而累积影响度以海洋生态系统的反馈, 即以其与生态压力因子的作用关系为视角, 综合分析了不同

海洋生态系统的累积影响。对于海洋生态系统面临的多重压力, 我们考虑了渔业、航运、污染排放等直接的人类活动, 同时也综合考虑了气候变化如海表温度升高、海洋酸化等的影响, 由于在某种程度上, 当今全球变暖、海平面升高等都是由于人类活动(生产生活所产生的温室气体排放)所造成的, 相当于气候变化也是人类活动的一种间接体现形式, 同时气候变化也会加剧某些人类活动对于生态系统的影响, 多重压力相互作用并具有复杂的影响机制^[29]。例如 Smale 等^[30]研究海洋热浪对于全球生物多样性和生态系统服务价值的影响时, 利用不包含气候变化因子的人类活动累积影响分布与海洋热浪进行空间叠置分析发现, 过度捕捞及海洋污染等会加剧海洋热浪的影响, 反之亦然。本文参考各类经典区域案例^[10-11], 在累积影响评估中综合考虑人类活动直接或间接因子(包括典型的气候变化因子), 以获得更为全面的评估结果, 但在实际应用中, 仍可将两者区分使用。

4.2 重点海域的管理和保护

我国渤海、长三角和珠三角等重点海域受人类活

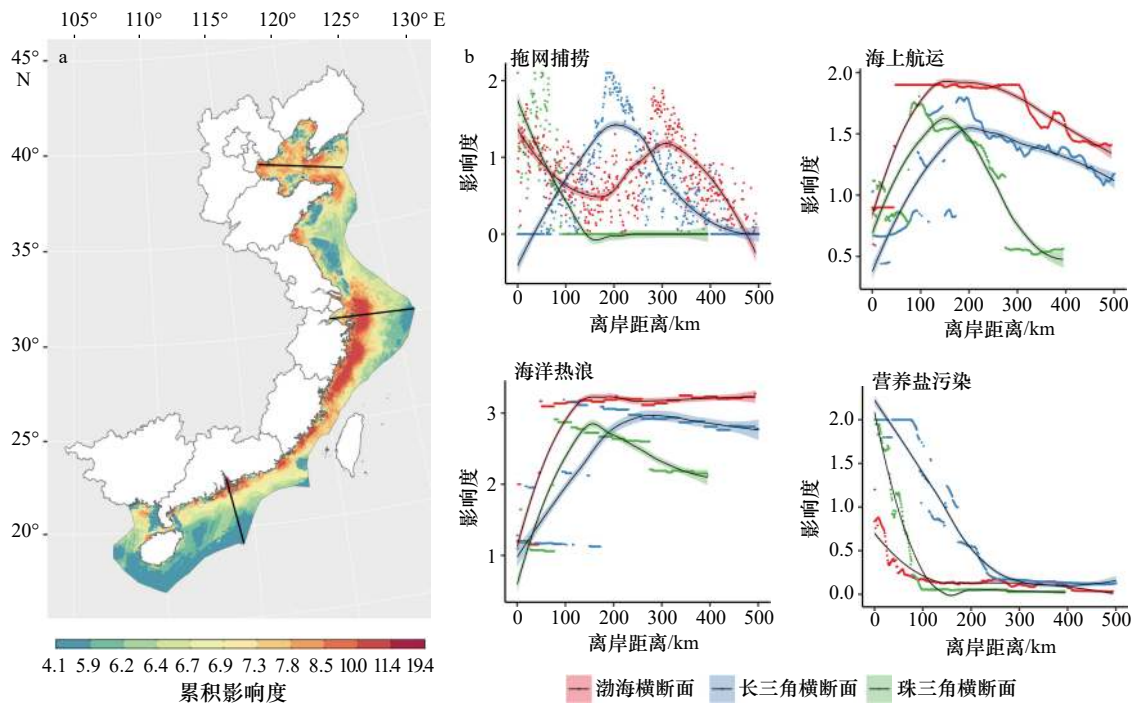


图7 人类活动压力对我国近海海洋生态系统的累积影响度(a)和4种特定人类活动压力因子(拖网捕捞、海上航运、海洋热浪及营养盐污染)的横断面图(b)

Fig. 7 The cumulative impact of human activity pressure on China's coastal marine ecosystems (a), and a cross-sectional view of four specific human activity pressure factors (trawling fishing, maritime navigation, ocean heat waves, and nutrient pollution) (b)

散点为各网格点得分,各趋势线为局部加权回归拟合线

The point is the score of each grid point, and each trend line is the locally weighted regression fitting line

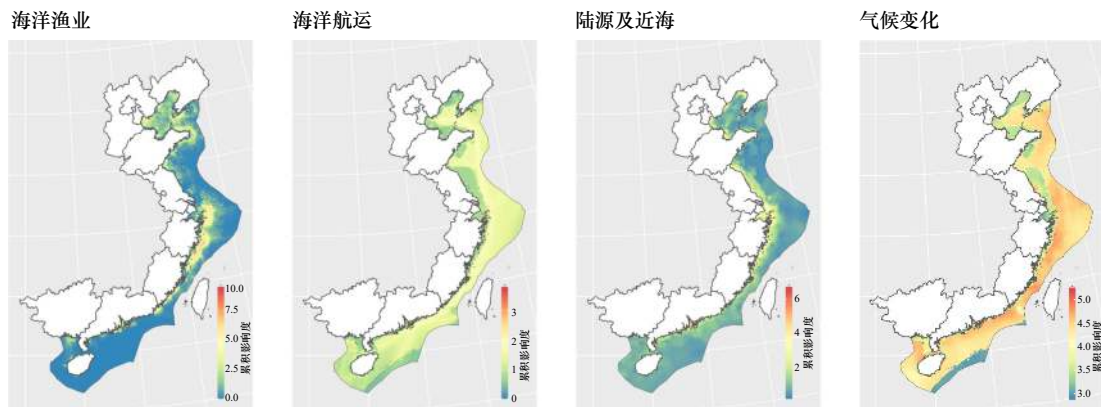


图8 海洋渔业(压力因子数目为6)、海洋航运(压力因子数目为2)、陆源及近海(压力因子数目为5)及气候变化(压力因子数目为3)累积影响度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of cumulative influence of marine fisheries (number of pressure factors is 6), ocean shipping (number of pressure factors is 2), land-source and offshore (number of pressure factors is 5), and climate change (number of pressure factors is 3)

动多重压力影响最大、压力因子数量最多,如何规范化人类活动,达到合理的制约和保护,对于我国生态文明建设非常重要,也是平衡人类社会经济发展与海洋生态健康的关键,因此累积影响空间量化评估在国土空间规划和生态保护领域具有较大应用潜力。例如, Fernandes 等^[31]利用 Marxan 软件与累积影响决策

工具相结合的方法,对葡萄牙海域的优先保护区进行选划,实现了科学化的高效益海域保护规划。我国海域辽阔,累积影响度分布图提供了综合性的人海矛盾空间量化结果,便于直观了解整个海域人类活动影响状况,为精细化管理的政策制定提供科学支撑。此外,累积暴露度分布图可用于探测人类活动足迹的热

点区域,例如我国长三角海域渔业捕捞、航运等影响较大,而气候变化因子在南部珠三角附近海域影响程度较为强烈,且从离岸距离的多重压力横截面贡献度来看,各海域多重压力影响范围及数量均不一致。实际应用中,可根据不同区域人类活动多重压力的类型、强度及数量等,制定综合高效的生态系统管理策略和保护措施^[32-33],另外基于各重点海域的地理特征、生态状况、地区社会经济状况等,可进行高精度时空数据更新,实现区域海域的累积影响评估,或根据特定管理目标进行模型重构,建立针对特定海洋物种或生境的生态管理体系。

4.3 空间量化模型的适用性和改进

本研究所采用的空间量化模型操作简单、易于理解,但其作为探索性应用研究,在生态压力数据完整性和匹配度、权重设定以及多重压力叠加关系等方面仍具有较大的改进空间:(1)生态压力因子指标的完善,本文仅选取了16种代表性生态压力因子,而更多的因子未纳入考虑,例如,海洋渔业包括海洋捕捞、海水养殖、远洋渔业,其中我国海水养殖产业发展迅速,海水养殖在海洋渔业的比重近些年来越来越大,是近海非常重要的一种人类活动。有研究表明,我国海水养殖是近海海域营养盐的集中来源,可造成严重的水富营养化,其营养物输出量相当于河流向海洋的排放量^[34]。此外,海上构筑物(如钻井平台、风电设施、海底管道及跨海桥梁等)^[35]、微塑料、放射性污染等均会对地方海域造成较大影响,进一步完善生态压力因子的类别和选取,获取或生产更多的空间数据集可使评估结果更为完整和符合实际状况;(2)时空数据的匹配度,由于可获取数据的有限性,本研究计算所用的生态压力因子数据年份不尽相同,但年际间的压力因子往往随时间存在动态变化,例如由于新冠疫情等不确定性因素,会导致相邻年份渔业捕捞、海上航运等存在巨大差异,由此造成结果误差较大,未来在数据充足的情况下可开展时间尺度上的累积影响动态评估。此外,生态压力因子的空间分辨率不一致、来源不一,多为遥感或模型预测结果,也存在一定误差,例如渔业捕捞、海洋热浪等均是基于遥感数据获取,而海洋污染、赤潮等数据是基于点位数据模型化预测得到,海洋酸化及海平面上升压力因子栅格数据的空间分辨率远低于其他因子;(3)累加关系

及权重的优化,不同生态压力因子之间可能存在协同、拮抗以及非线性累积效应,然而当前研究采用的仍是基于不同权重的线性累加计算形式。此外,本研究采用的权重矩阵参考了前人的研究,但实际上我国现实情况与其他区域存在一定差异,不同海域生态系统的脆弱性也有所不同。近岸海域生态系统处于陆海交会处,受到陆地和海洋的双重影响,是累积影响度最大的区域,其生态系统种类繁多,脆弱性也具有较大空间化差异。因此未来对于多重压力的非线性累积作用关系仍需深入研究,同时进一步研究总结我国不同生态系统对于不同压力的反馈机制、构建非线性空间量化模型以及将专家判断与实际相结合,实现主客观相结合的科学赋权,使评估结果更为准确。

5 结论

本文基于空间量化模型,探究了人类活动对我国近海海洋生态系统的影响,论证了方法的可行性,揭示了我国海域受人类活动影响的主要特征是高暴露度区域集中于近岸的河口海湾区域,约有6.72%和12.3%的海域处于高暴露和极端暴露水平,长三角地区累积暴露度得分最高;累积影响度高的地区集中于浙江、福建沿海以及天津近海、渤海口和珠江口等海域,约有22.8%和7.6%的海域受影响程度较高和极高,约占整个研究海域的1/3。近岸海域生态系统主要受陆源污染、渔业捕捞等压力因子影响,而离岸海域则主要受气候变化及海上航运等影响,其中气候变化因子是对海洋生态系统影响度最为强烈的压力因子。高分辨率空间分布结果图可为海域管理及生态修复提供科学参考,但现阶段我国海域高分辨率数据的缺失以及各类影响评估研究的缺乏均会影响结果的准确性。因此,未来我国近海高分辨率、高精度海洋生态环境数据产品的研发对于量化人类活动对海洋生态系统的影响非常关键,对于提高空间制图精度,改善海域空间管理具有重要意义,其中时间及空间尺度的连续性数据合成或模拟对实现动态化评估与加深时空关联性研究起到关键性作用。此外,可加强对不同生态系统的自然禀赋、脆弱性等研究,提供科学化确权支撑,人海相互作用的内在关系、耦合度等也有待进一步深入研究,以实现空间量化模型的更新和改进,实际应用于海域科学管理中。

参考文献:

- [1] Chen Dongsheng, Wang Xiaotong, Li Yue, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 776-787.

- [2] 刘子飞. 我国近海捕捞渔业管理政策困境、逻辑与取向[J]. 生态经济, 2018, 34(11): 47–53.
Liu Zifei. Research on management policies of marine capture fishery resources: issues, logic and choice[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(11): 47–53.
- [3] 陈石泉, 王道儒, 吴钟解, 等. 海南岛东海岸海草床近10 a变化趋势探讨[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(1): 48–53.
Chen Shiquan, Wang Daoru, Wu Zhongjie, et al. Discussion of the change trend of the seagrass beds in the east coast of Hainan Island in nearly a decade[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(1): 48–53.
- [4] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 55(8): 1217–1229.
Yu Kefu. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Science*, 2012, 55(8): 1217–1229.
- [5] Sun Zhigao, Sun Wenguang, Tong Chuan, et al. China's coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement[J]. *Environment International*, 2015, 79: 25–41.
- [6] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 319(5865): 948–952.
- [7] Halpern B S, Frazier M, Potapenko J, et al. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7615.
- [8] Micheli F, Halpern B S, Walbridge S, et al. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e79889.
- [9] Andersen J H, Al-Hamdani Z, Harvey E T, et al. Relative impacts of multiple human stressors in estuaries and coastal waters in the North Sea–Baltic Sea transition zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135316.
- [10] Beauchesne D, Daigle R M, Vissault S, et al. Characterizing exposure to and sharing knowledge of drivers of environmental change in the St. Lawrence system in Canada[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 383.
- [11] Foden J, Rogers S I, Jones A P. Human pressures on UK seabed habitats: a cumulative impact assessment[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 428: 33–47.
- [12] Parravicini V, Rovere A, Vassallo P, et al. Understanding relationships between conflicting human uses and coastal ecosystems status: a geospatial modeling approach[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 19: 253–263.
- [13] Knights A M, Piet G J, Jongbloed R H, et al. An exposure-effect approach for evaluating ecosystem-wide risks from human activities[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 72(3): 1105–1115.
- [14] Halpern B S, Frazier M, Afflerbach J, et al. Recent pace of change in human impact on the world's ocean[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11609.
- [15] Kroodsma D A, Mayorga J, Hochberg T, et al. Tracking the global footprint of fisheries[J]. *Science*, 2018, 359(6378): 904–908.
- [16] Global Fishing Watch[EB/OL]. [2020–10–13]. <https://globalfishingwatch.org/map-and-data/>.
- [17] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. [2020–10–13]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>).<https://doi.org/10.12078/2017121101>.
Xu Xinliang. China's population spatial distribution kilometer grid dataset[EB/OL]. [2020–10–13]. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences (<http://www.resdc.cn/DOI>). <https://doi.org/10.12078/2017121101>.
- [18] Jiang Qutu, He Junyu, Wu Jiaping, et al. Space-time characterization and risk assessment of nutrient pollutant concentrations in China's near seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(7): 4449–4463.
- [19] Xiao Xi, Agustí S, Pan Yaoru, et al. Warming amplifies the frequency of harmful algal blooms with eutrophication in Chinese coastal waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(22): 13031–13041.
- [20] 中华人民共和国自然资源部. 2015年海水水质监测信息 [EB/OL]. [2020–10–13]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180614_1794781.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Sea water quality monitoring information 2015 [EB/OL]. [2020–10–13]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180614_1794781.html.
- [21] Schlegel R W, Oliver E C J, Wernberg T, et al. Nearshore and offshore co-occurrence of marine heatwaves and cold-spells[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 189–205.
- [22] AVISO Satellite Altimetry Data [EB/OL]. [2020–10–13]. <https://www.avisio.altimetry.fr/en/data/products.html>.
- [23] Marineregions. org [EB/OL]. [2020–10–13]. <https://www.marineregions.org/downloads.php>.
- [24] Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222–225.
- [25] Chen Bangqian, Xiao Xiangming, Li Xiangping, et al. A mangrove forest map of China in 2015: analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 131: 104–120.
- [26] UNEP-WCMC [EB/OL]. [2020–10–13]. <https://www.unep-wcmc.org/resources-and-data>.
- [27] NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). ETOPO1 data sources [EB/OL]. [2020–10–13]. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1sources.html>.
- [28] Feist B E, Levin P S. Novel indicators of anthropogenic influence on marine and coastal ecosystems[J]. *Frontiers in Marine Science*,

- 2016, 3: 113.
- [29] Halpern B S, Fujita R. Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis[J]. *Ecosphere*, 2013, 4(10): 1–11.
- [30] Smale D A, Wernberg T, Oliver E C J, et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 306–312.
- [31] Fernandes M D L, Quintela A, Alves F L. Identifying conservation priority areas to inform maritime spatial planning: a new approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1088–1098.
- [32] Batista M I, Henriques S, Pais M P, et al. Assessment of cumulative human pressures on a coastal area: integrating information for MPA planning and management[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 248–257.
- [33] Kelly C, Gray L, Shucksmith R J, et al. Investigating options on how to address cumulative impacts in marine spatial planning[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 139–148.
- [34] Wang Junjie, Beusen A H W, Liu Xiaochen, et al. Aquaculture production is a large, spatially concentrated source of nutrients in Chinese freshwater and coastal seas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(3): 1464–1474.
- [35] Bugnot A B, Mayer-Pinto M, Airolidi L, et al. Current and projected global extent of marine built structures[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 33–41.

Spatial assessment of cumulative impact on China's marine ecosystems

Jiang Qutu¹, Ding Jieqiong¹, Ye Guanqiong¹, Zeng Jiangning²

(1. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*)

Abstract: The cumulative human impact assessment of marine ecosystems is an ecological method to scientifically recognize the response and feedback laws of the system to external disturbances. In order to explore and reveal the inherent mechanisms, the region of coastal seas of China as the research scope in this article, selecting 16 ecological factors in four aspects, marine fishery, marine shipping, land-based and offshore pressures, and climate change. And by spatial quantization and standardization, the cumulative exposure and impact assessment of the 9 marine habitat types in the study area are carried out under the 1 km×1 km spatial grid scale. The results show that the cumulative exposure in the study area is generally higher in the coastal seas than in the pelagic, and gradually decreases to the far ocean; the coastal seas ecosystem is mainly affected by land-based pollution and fishing, and overall climate change contributes the most; 22.8% and 7.6% of China's coastal seas are respectively highly and extremely highly affected, among which the Changjiang River Delta is the most affected by human activities.

Key words: China coastal seas; human activities; marine ecosystems; spatial cumulative effects