

文章编号: 1006-7736(2018)03-0115-07

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2018.03.017

基于 AIS 和多尺度空间模型的船舶活动时空特征及潜在压力

刘柏静^{1,2}, 贾静³, 吴晓青^{*1,4}, 杜培培¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 101400; 3. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026; 4. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 基于 AIS 数据, 应用 GIS 空间分析和地理空间模拟方法, 分析莱州湾海上渔业船舶和商业船舶活动的时空特征, 对海上船舶活动对莱州湾海洋生态红线区、海洋功能区海域生态环境的潜在压力进行直观、量化评估。结果表明, 莱州湾船舶活动集中在海湾西南部海域和港口航运区、农渔业区等海洋功能区; 渔业船舶活动日变化、季节变化特征较为明显; 莱州湾西南部海域和龙口港区西北部海域受海上船舶活动的潜在压力较大。建议在每年的 9—11 月份, 加强对莱州湾渔业船舶活动和海上捕捞作业的监管, 做好黄河口、莱州浅滩等海洋生态红线区生态环境质量监测, 防范商业船舶活动对周边养殖区和海洋牧场海域生态环境的不良影响。

关键词: 莱州湾; 海上船舶活动; 时空特征; 生态环境; 潜在压力; 船舶自动识别系统 (AIS); 多尺度空间模型

中图分类号: X826

文献标志码: A

Spatial-temporal features and potential pressure of marine vessel activities based on AIS and multi-scales spatial model

LIU Bai-jing^{1,2}, JIA Jing³, WU Xiao-qing^{*1,4}, DU Pei-pei¹

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, the Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China*; 3. *Environmental Sciences and Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*; 4. *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*)

Abstract: Based on the ship automatic identification system (AIS) data, the spatial-temporal feature of fishing vessels and commercial ships activities were identified, and the potential pressure caused by marine ships on ecological red line sea

area and marine functional zone in Laizhou Bay were assessed by using GIS spatial analysis and geospatial simulation methods. Results show that maritime vessel activities in Laizhou Bay are concentrated in the southwest sea area and marine functional areas, such as port shipping area, agricultural fishery area and so on; the daily and seasonal variations of fishing vessels are more obvious; the potential pressure of the marine vessel activities in the southwestern sea area of the Laizhou Bay and the northwest of Longkou port area is greater. It is recommended to strengthen the supervision of fishing activities and fishing operations in Laizhou Bay in the 9–11 months of the year. Ecological environment quality monitoring of marine ecological red line areas such as Yellow River Estuary and Laizhou shoal should be carried out, and prevent the harmful effect resulted from commercial vessel activities on the marine environment of culture zone and oceanic pasture surrounding the port and shipping zone.

Key words: Laizhou Bay; marine vessel activities; spatial-temporal features; ecological environment; potential pressure; automatic identification system (AIS); multi-scales spatial model

0 引言

海上交通运输活动是人类开发利用海洋的重要方式, 捕捞船舶、油轮、集装箱货轮、游船等各类海上船舶带来水下噪声、有机污染、海洋垃圾、生物损害、底质破坏、非本地物种引入等生态压力, 给海洋生态保护和海域管理带来巨大挑战^[1-3]。分析、直观量化海上交通运输活动对海洋生态环境的潜在压力, 对优化海域空间资源利用, 维护海

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-04-03.

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-14); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资金项目 (XDA11020305)。

作者简介: 刘柏静 (1993 -), 女, 博士生, E-mail: bjlju@yic.ac.cn; 吴晓青* (1978 -), 女, 博士, 副研究员, E-mail: xqwu@yic.ac.cn.

洋生态安全,实施有效的海洋生态保护与管理措施具有重要意义^[4-5].

近年来,国外学者日益重视多种人类活动对海洋生态系统的累积影响,将海上交通活动作为一种重要的人类活动类型纳入累积压力生态评估框架^[6-8],以揭示船舶活动对海洋生物栖息地造成的各类生态压力,并通过船舶活动密度、船舶污染物排放量等指标量化评估船舶活动产生的压力强度^[9-13].国内学者则更多地关注海上交通流量估算、船舶碰撞风险和船舶信息动态管理等海上交通和海事管理方面^[14-15].近年来虽然开展了船舶溢油生态损害、压舱水生态风险评估等方面的研究^[16-17],但是未有针对区域性海上船舶活动特征及其对海洋生态敏感区的空间影响进行分析的报道.现有海域生态环境人为影响分析大多是采用海水理化性质、污染物状况、海洋生物指示物种等海洋环境质量指标间接表征^[18-19]多种人类活动对海域生态环境的压力,很难直观揭示单一人类活动的压力水平,识别出压力活动来源及其分布,故难以对区域海域使用管理和海洋生态保护提出有针对性的宏观决策建议.

本文以莱州湾为例,基于船舶 AIS 数据,结合海洋生态红线区等生态敏感区和海洋基本功能区分布,采用地理空间模拟方法,空间量化评估海上船舶活动对海洋生态系统的潜在压力,揭示莱州湾海域船舶活动时空分布特征及其对海洋生态环境的压力格局,对指导海湾船舶活动分类、分区和分时段管理,改善莱州湾海洋生态环境具有重要的决策意义.

1 研究区概况

莱州湾西起黄河新入海口,东至龙口妃姆岛高角,海岸线长 319.06 km,海域面积 6966.93 km².湾内水深较浅,多在 10 m 以内,地势平坦,滩涂广阔,自然资源储量十分丰富,是山东省和渤海地区重要的渔业资源区^[20].近年来,山东省和沿海市县已划定海洋生态红线区^[21]和海洋功能区^[22],以加强海域使用管理和海洋生态保护.但随着港口码头建设、海洋资源开发利用及航运经济的发展,莱州湾海洋交通运输活动日益频繁,给海洋生态红线区落地管理和海域使用管理带来诸多挑战.

2 数据与方法

2.1 船舶 AIS 数据采样处理

研究采用的船舶数据主要来源于岸基 AIS,由“船讯网”提供,包含船名、船长、吃水、船舶类型、船位、航向、航速和航行状态等静态和动态信息,可实现研究范围内的船舶识别跟踪.区域特定时段内的 AIS 数据可用于进行海上交通密度和流量统计,开展船舶碰撞风险管理等相关研究.

研究利用 2016 年全年的船舶 AIS 数据,分析海上船舶活动特征及其对莱州湾海洋生态环境的潜在压力.由于数据量巨大,采用均匀采样法对 AIS 数据进行预处理.具体做法是,自 2016 年 1 月 1 日起,每隔 5 日进行日采样,全年共选取 71d 的数据;每日又选取整时段的第 1 分钟,共计 24 min 的船舶分布数据.按照船舶经纬度信息导入 GIS,进行海上船舶活动数量、密度统计和时空变化特征分析,为方便对比分析,将船舶密度换算为“艘次/(km²·h)”.船舶类型分为渔业船舶和商业船舶两类,暂不考虑作业船、公务船以及未标注类型的其他类型船舶.

2.2 生态环境压力评估方法及参数确定

基于 GIS 和地理空间模拟方法^[10],建立海上船舶活动对海域生态环境的多尺度空间压力评估模型:

$$Q_c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^u a_{jl} S_i P_{li} E_j \quad (1)$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^u a_{jl} S_i P_{li} E_j \quad (2)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^u a_{jl} S_i P_{li} E_j \quad (3)$$

式中: Q_c 表示每个单元格网的压力值; Q_j 表示每个海域分区的压力值; Q_i 表示每种船舶类型产生的压力值; c 为 1 km × 1 km 的格网单元,共计 6532 个格网; j 为海域分区,依据莱州湾海洋功能区和海洋生态红线区划分,共 18 类; l 为压力类型,包括物理、化学和生物影响三个方面; i 为船舶类型,分为商业船舶和渔业船舶; a_{jl} 为海域生态压力敏感系数,反映第 j 种海洋功能区或海洋生态红线区受 l 类压力类型的影响或破坏程度,取值为 1、2、3,数值越大,说明船舶活动对海域环境的生态影响或者破坏越大; S_i 为第 i 类船舶的分布密度等级,按照 1 km² 内的船舶数量进行划分,并赋值为 1、2、3,数值越大,船舶密度越高; P_{li} 为船

舶压力强度, 反映 i 类型船舶对海域生态环境产生的第 l 种压力强度的大小, 按照压力作用时间及损害程度进行强度等级赋值; E_j 表示 j 类海洋功能分区是否存在, 取值为 0 或 1。

表 1 为船舶压力类型及压力强度 (P_{lm}) 等级赋值, 表 2 为海域分区生态压力敏感系数 (a_{jl}) 赋值。

表 1 船舶压力类型及压力强度 (P_{lm}) 等级赋值

Tab. 1 The ecological pressure types and levels resulting from marine vessel activities

压力类型	主要压力 ^[2,21-22]	赋值	
渔业船舶	物理影响	海底拖网导致的底质破坏、磨损	2
	化学影响	废气渔网等海洋垃圾 少量有机物输入	1
	生物影响	选择性物种攫取 非目标物种死亡	3
商业船舶	物理影响	水下噪音、碰撞、局部水动力干扰	3
	化学影响	海洋垃圾、化学污染物(合成、非合成)	2
	生物影响	生物碰撞死亡、引入非本地物种	2

表 2 海域分区生态压力敏感系数 (a_{jl}) 赋值

Tab. 2 The sensitive coefficient “ a_{jl} ” for different sea areas under marine vessel activities pressure

海域分区	物理影响	化学影响	生物影响
沙源保护海域	2	2	2
砂质岸线与邻近海域	3	3	2
特殊保护海岛	2	2	2
海洋特别保护区	3	3	3
海洋自然保护区	3	3	3
重要渔业海域	3	3	3
重要河口生态系统	2	2	3
重要滨海旅游区	2	3	2
重要滨海湿地	3	2	2
自然景观与 历史文化遗迹	3	3	3
保留区	2	2	3
港口航运区	1	1	1
工业与城镇用海区	1	1	1
海洋保护区	3	3	3
矿产与能源区	1	1	1
农渔业区	2	3	2
特殊利用区	1	1	1
旅游休闲娱乐区	1	3	2

本研究邀请多位从事海洋环境、海洋生态研究的专家, 根据船舶活动造成的物理、化学、生物影响的频率和范围, 以及不同海域分区生态敏感性的不同, 依据预先设定的模糊评判标准, 对 P_{li} 和 a_{jl} 进行打分赋值 (表 1、表 2), 并取多次结果的

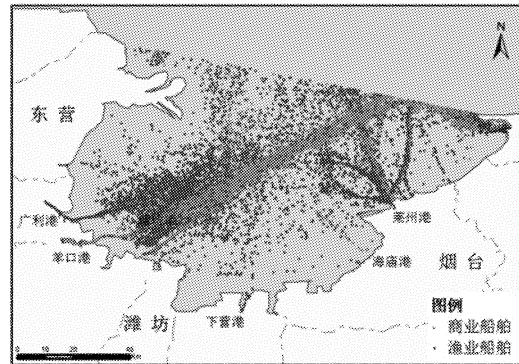
众值以减少主观任意成分, 在 GIS 中实现对不同海域分区的渔业、商业船舶活动压力的累加计算和空间统计分析, 进而揭示船舶活动压力的空间分布格局。

3 结果与分析

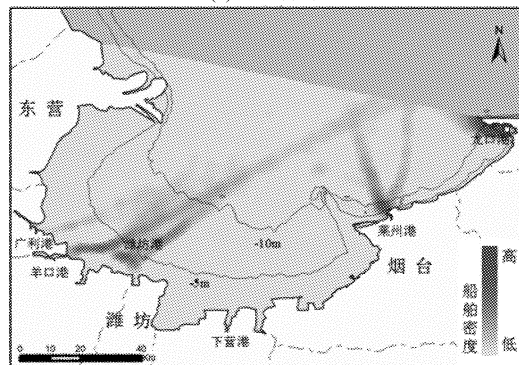
3.1 莱州湾海上船舶活动时空分布特征

3.1.1 船位密度及分布

基于 GIS 得到 2016 年莱州湾船位分布及船舶密度图 (图 1)。由图 1 可以看出, 莱州湾海域船舶高度集中在小清河口至龙口港海域, 总体呈以港口、码头为依托, 逐渐向海里延伸的分布格局。渔业船舶多活动于捕捞区及开放式养殖用海海域, 以 $-5\text{ m} \sim -10\text{ m}$ 水深海域分布最广; 商业船舶除靠泊在码头及锚地区外, 多聚集在航道区和海湾中部公共海域。龙口港附近海域船舶分布密



(a) 船位分布



(b) 船舶密度

图 1 莱州湾船舶活动的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of marine vessel activities in Laizhou Bay

度最高, 约为 $(6 \sim 7)$ 艘次 / $(\text{km}^2 \cdot \text{h})$; 潍坊港次之, 其周边海域商业船舶聚集明显; 莱州港附近海域船舶分布密度最大值介于 $(4 \sim 5)$ 艘次 / $(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, 但港口边界 10 km 以外海域的船舶分布密度突降为 $(0 \sim 1)$ 艘次 / $(\text{km}^2 \cdot \text{h})$. 除大型港口用海区、航道水域外, 羊口港和广利港、莱州三山岛等

渔港码头附近也聚集大量进出海及靠泊的渔业船舶,这与莱州湾海洋渔业基础设施建设和海洋捕捞活动、开放式养殖区分布一致^[25-26]。

3.1.2 船舶流量时间分布

以小时为单位进行船舶数量分布日变化统计(图2)。结果显示,莱州湾海域商业船舶数量一天内无明显的时段变化特征,中午时段数量相对较多;而渔业船舶数量呈现较为明显的波动,6~7时和16~17时两个时段渔业船舶数量较多,4~5时和20~21时是渔业船舶数量明显上升和明显回落的转折点。总体来看,午夜及中午时段,商业船舶活动量相对较大,其他时间段渔业船舶活动频繁,这与渔业船舶就近作业、受昼夜交替影响较大有关。

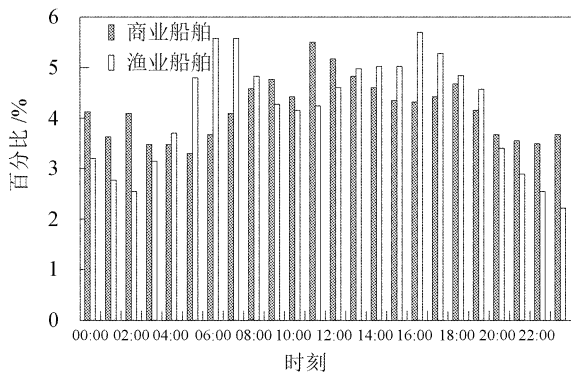


图2 莱州湾船舶数量日变化特征

Fig.2 The daily variation characteristics of marine vessel activities in Laizhou Bay

计算莱州湾不同季度各类型船舶平均数量及相对全年长系列均值的变化率发现,秋季为莱州湾船舶数量的显著跳跃点,升降幅度极大(图3、表3)。其中,商业船舶活动数量无明显的季节变化,春、秋季略高于夏、冬季,空间分布集中于莱州湾主要港口航运区内;渔业船舶活动数量呈现秋季>春季>冬季>夏季的特征,具有较为明显的季节差异,特别是进入九月份,休渔期一结束,海湾西南部海域、莱州三山岛渔港北部海域的渔业船舶量猛增。春季,莱州湾海域渔业船舶活动仍主要分布在海湾西南部海域,莱州三山岛渔港周边渔船活动较为分散,以湾内活动为主。夏季和冬季,受禁渔期管理和北方气候条件的影响,莱州湾渔业船舶活动量大幅下滑。

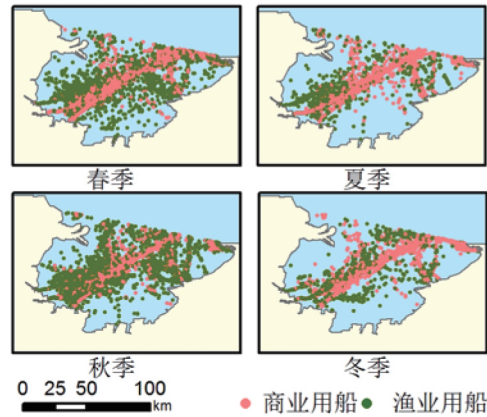


图3 莱州湾海上船舶分布季节变化

Fig.3 The seasonal variation characteristics of marine vessel activities in Laizhou Bay

表3 莱州湾海上船舶数量季节变化统计

Tab.3 Quantity statistics of maritime ships in Laizhou Bay

要素	1—12月		春季 3—5月		夏季 6—8月		秋季 9—11月		冬季 12—2月	
	均值/艘次	相对变化%	均值/艘次	相对变化%	均值/艘次	相对变化%	均值/艘次	相对变化%	均值/艘次	相对变化%
商业船舶	33 830	26.99	42 960	-17.45	27 920	3.10	34 880	128.85	29 560	12.62
渔业船舶	42 045	-7.72	38 800	-61.47	16 200	128.85	96 220	-59.66	16 960	-38.69
全部船舶	75 875	7.76	81 760	-41.85	44 120	72.78	131 100	-38.69	46 520	-38.69

3.2 莱州湾船舶活动潜在压力分析

利用GIS空间分析功能,统计莱州湾海上船舶落入各海洋功能区和海洋生态红线区的船舶数量,并计算船舶密度。结果显示,莱州湾海上船舶集中分布在港口航运区和农渔业区,平均船舶密度分别为12.93艘次/(km²·h)和3.26艘次/(km²·h)(表4);保留区和海洋保护区平均为1~2艘次/(km²·h);近岸分布的海洋功能区船舶活动量较少,这与海洋基本功能区划确定的主导功能一致。海洋生态红线区中,重要渔业海域平

均船舶密度为1.36艘次/(km²·h),其他类型均不足1艘次/(km²·h),这主要是由于海洋生态红线区在莱州湾海域分布较为分散,区域内的海域使用活动受到严格管控,船舶活动较少的缘故。尽管船舶活动量小,但是对具有较高生态敏感性的海洋生态红线区来说,可能造成重要水产种质资源丧失、底质破坏、水动力干扰、水质污染、生物入侵等生态压力,其环境影响不容忽视。未来一段时间,随着潍坊港、龙口港、莱州港等港口建设和港口经济的发展以及海上粮仓战略的实施,莱州

湾海上船舶活动数量将日益增多、艘次更为密集 带来较大压力。化, 将会给海洋生态红线区落地保护和海域管理

表 4 海洋功能区船舶分布统计

Tab. 4 Statistics of maritime ships distribution in different marine functional zones

区域	渔业船舶		商业船舶		总和		
	艘次	百分比/%	艘次	百分比/%	艘次	百分比/%	平均密度/(艘次/(km ² · h))
农渔业区	9 983	51.89	14 020	46.76	24 003	48.77	3.26
港口航运区	5 610	29.16	12 485	41.64	18 095	36.76	12.93
工业与城镇用海区	10	0.05	28	0.09	38	0.08	0.04
矿产与能源区	0	0	0	0	0	0	0
旅游休闲娱乐区	25	0.13	45	0.15	70	0.14	0.22
海洋保护区	3 058	15.89	2 538	8.46	5 595	11.37	1.03
特殊利用区	20	0.10	23	0.08	43	0.09	0.84
保留区	533	2.77	845	2.82	1 378	2.80	1.24

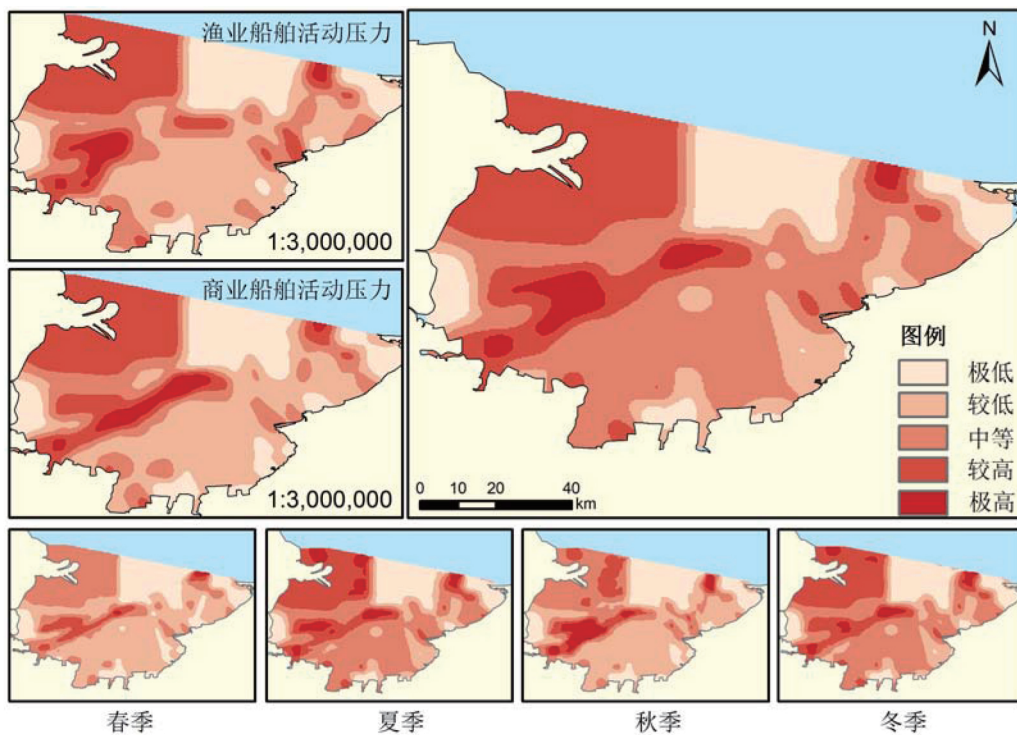


图 4 莱州湾船舶活动对海域生态环境的空间压力分布

Fig. 4 The spatial distribution of potential pressure caused by marine vessel activities in Laizhou Bay

潜在压力估算结果如图 4 所示, 2016 年全湾 35.08% 的海域受到中等及以上压力, 大部分海域船舶活动压力相对不大。从四季压力估算结果来看, 各季度受到较高及以上潜在压力面积占比从大到小依次为: 秋季 (11.66%) > 春季 (7.58%) > 夏季 (3.76%) > 冬季 (3.37%), 与各季度船舶活动艘次排序有所差异, 说明考虑海洋生态敏感区的必要性。从空间分布上来看, 压力高值区主要集中于海湾西南部至东北部海域航道区, 这主要是由于航道区域船舶活动密集, 且位于农渔业区, 过多的船舶活动可能会对水产种质资源保护和养

殖环境带来不利影响。不同季节压力高值区分布与渔业船舶活动季节性差异有关, 春季全湾整体压力水平较低; 夏季和冬季除航道外, 黄河口附近海域受到的生态环境压力强度也较高, 这主要是由于该处有大量油井分布, 造成了油轮的高度聚集; 随着秋季捕捞活动的增多, 莱州湾船舶活动压力变为由渔业船舶活动主导, 压力高值区块状分布于潍坊港附近农渔业区, 高强度捕捞活动给莱州湾海域生态环境带来极大压力。该压力评估结果与 2016 年山东省海洋环境公报^[27] 公布的莱州湾整体水质状况呈现较高的一致性, 均表明莱州

湾西南部海域生态环境状况最为严峻,中部海域其次,黄河入海口附近海域也需加强管理,莱州湾船舶活动对其海域水质的影响不容忽视。将莱州湾船舶活动压力评估结果与莱州湾生态系统健康评价^[28]结果进行相关分析,二者的相关性度量值为 0.547,呈较强相关性,侧面说明本研究采用的地理空间模拟方法的科学性和准确性。

商业船舶活动压力高值区集中在潍坊港附近港口航运区。尽管龙口港、莱州港与潍坊港船舶密度均极高,但因潍坊港周边存在水产种质资源保护区和农渔业区,频繁的商业船舶活动对该区域生态环境的潜在压力相对较大。

渔业船舶压力高值区集中在西南部海域、莱州三山岛渔港和龙口港西北部。值得注意的是,黄河口海洋保护区也存在较大压力,主要原因是该处已建有自然保护区、海洋特别保护区和水产种质资源保护区,拥有大面积自然湿地,珍稀濒危物种、特有海洋经济物种多种多样,具有重要的生态系统服务功能,海域生态环境极为敏感和脆弱,这些区域不仅渔船密度高、分布广,高强度的渔业船舶活动将可能对特殊物种保护和渔业资源造成明显损害,相关职能部门应予以高度重视,对进出黄河口海域的渔业船舶加强监管。

4 结 语

本文借鉴人类活动对海洋生态系统的累积影响评估研究框架,基于海上船舶 AIS 数据和 GIS 空间分析方法,分析莱州湾渔业和商业船舶活动时空分布特征,半定量化、直观地揭示了海上渔业船舶、商业船舶对莱州湾海洋生态红线区、海洋基本功能区海域生态环境的潜在压力。

研究结果显示,莱州湾海上船舶活动较为密集,商业船舶呈现以潍坊港、龙口港、莱州港为依托,沿航道向外海散射分布的空间特征;渔业船舶聚集在莱州湾西南部海域以及莱州港航道区。莱州湾商业船舶活动受季节和天气变化影响不大;渔业船舶活动的季节变化和日变化相对较为明显,秋季休渔期结束后以及白天工作时间的渔船活动密集。海上船舶活动对海域生态环境的潜在压力高值区集中在莱州湾西南部海域和龙口港区西北部海域,主要原因是这些海域商业船舶、渔业船舶密集,而且周边分布着水产种质资源保护区等海洋生态红线区和农渔业区、保留区等对海洋交通活动比较敏感的海域分区。高强度的海上

交通活动可能对周边海域带来持续的噪声干扰、船舶溢油污染、大量的海洋垃圾、重要渔业资源品种减少、非本地种引入等物理、化学和生物影响,给莱州湾水产种质资源保护、渔业资源恢复和海域管理带来不利影响。

结合莱州湾海上船舶分布时空特征以及海洋生态敏感区分布,建议在每年的 9 月—11 月加强渔业船舶活动和捕捞作业的监管,尤其是在黄河口、莱州浅滩等海洋生态红线区分布海域,在早晨和傍晚船舶高密度时间段加强监督巡逻,控制渔船污染物排放和拖网方式对底栖生物和底质的破坏;严格监控潍坊港、龙口港、莱州港几大港口区、航道区和海湾中部海域的商业船舶活动,防范其对周边开放式养殖区、海洋牧场区海域生态环境的不良影响。

参考文献(References):

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
XIAO D N, CHEN W B, GUO F L. On the basic concepts and contents of ecological security [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354-358. (in Chinese)
- [2] 杨帆,李捷,于淑亭,等.船舶压载水浮游生物检测方法研究进展[J].环境科学与技术,2017,40(4):45-49.
YANG F, LI J, YU S T, et al. Advances in detection of plankton in ballast water [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(4): 45-49. (in Chinese)
- [3] 郭子坚,连军岭,王文渊,等.基于 RRM 的沿海港口生态风险评估方法研究[J].港工技术,2017,54(2):54-56.
GUO Z J, LIAN J L, WANG W Y, et al. Research on ecological risk assessment of coastal ports based on RRM [J]. Port Engineering Technology, 2017, 54(2): 54-56. (in Chinese)
- [4] 曹忠祥,高国力.我国陆海统筹发展的战略内涵、思路与对策[J].中国软科学,2015(2):1-12.
CAO Z X, GAO G L. The connotation of and policy recommendation for overall planning development of land and sea in China [J]. China Soft Science, 2015(2): 1-12. (in Chinese)
- [5] 薛永武.海洋生态视域下的海陆统筹发展战略[J].山东师范大学学报(人文社会科学版),2015,60(5):111-121.
XUE Y W. Development strategies of unified planning of land and sea from the perspective of marine ecology [J].

- Journal of Shandong Normal University (Humanities and Social Sciences) 2015 60(5):111-121. (in Chinese)
- [6] PARRAVICINI V, ROVEREA 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.
- [7] MURRAY C C, AGBAYANI S, ALIDINA H M, et al. Advancing marine cumulative effects mapping: An update in Canada's Pacific waters [J]. Marine Policy, 2015, 58:71-77.
- [8] MACH M E, WEDDING L M, REITER S M, et al. Assessment and management of cumulative impacts in California's network of marine protected areas [J]. Ocean and Coastal Management, 2017, 137:1-11.
- [9] DALTON T, THOMPSON R, JIN D. Mapping human dimensions in marine spatial planning and management: An example from Narragansett Bay, Rhode Island [J]. Marine Policy, 2010, 34:309-319.
- [10] St MARTIN K, HALL-ARBER M. The missing layer Geo-technologies, communities, and implications for marine spatial planning [J]. Marine Policy, 2008, 32(5): 779-786.
- [11] LONGLEY K, LIPSKY A. Human use characterization and visualization in marine spatial planning efforts in the Northeast [C]// Oceans - San Diego, 2013:1-8.
- [12] HALPERN B S, KAPPEL C V, SELKOE K A, et al. Mapping cumulative human impacts to California current marine ecosystems [J]. Conservation Letters, 2009, 2(3):138-148.
- [13] KARK C. Investigating options on how to address cumulative impacts in marine spatial planning [J]. Ocean & Coastal Management, 2014(102):139-148.
- [14] 刘敬贤, 韩晓宝. 渤海海峡船舶流的调查与分析 [J]. 航海工程, 2008, 37(4):95-98.
LIU J X, HAN X B. Survey and analysis of vessel traffic flow in the Bohai Strait [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(4):95-98. (in Chinese)
- [15] 金兴赋, 付玉慧, 张连东. 基于 AIS 数据的成山头水域船舶交通流研究 [J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(1):33-36.
JIN X F, FU Y H, ZHANG L D. Research on vessel traffic flow at Chengshantou water area based on AIS data [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2012, 38(1):33-36. (in Chinese)
- [16] 王召会, 王摆, 吴金浩, 等. 海洋保护区溢油污染综合评价方法研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6):161-165.
WANG Z H, WANG B, WU J H, et al. Research on comprehensive assessment method of oil spill pollution for marine protected area [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(6):161-165. (in Chinese)
- [17] 唐议, 苏舒. 防控船舶压载水造成的生物入侵的管理问题 [J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(1):130-137.
TANG Y, SU S. Study on ballast water management for prevention and control of invasive species introductions [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(1):130-137. (in Chinese)
- [18] 王洋, 朱文斌, 王忠明, 等. MPI 在杭州湾北岸海洋环境质量评价中应用 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2015, 34(2):132-135.
WANG Y, ZHU W B, WANG Z M, et al. Assessment on marine environmental quality north bank of Hangzhou Bay by MPI [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2015, 34(2):132-135. (in Chinese)
- [19] 徐冠球, 张秋丰, 屠建波, 等. 2015 年天津市海洋生态红线区海洋环境质量综合评价 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(1):120-125.
XU G Q, ZHANG Q F, TU J B, et al. Comprehensive assessment of marine environment quality in marine ecological redline areas of Tianjin city in 2015 [J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(1):120-125. (in Chinese)
- [20] 张锦峰, 高学鲁, 庄文, 等. 莱州湾渔业资源与环境变化趋势分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2014(3):82-90.
ZHANG J F, GAO X L, ZHUANG W, et al. Analysis of long-term changes in fishery resources and environment in the Laizhou Bay [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(3):82-90. (in Chinese)
- [21] 山东省人民政府. 山东省渤海海洋生态红线区划定方案(2013—2010) [R] 2013.
- [22] 山东省海洋与渔业厅. 山东省海洋功能区划(2011—2020) [R], 2012.
- [23] 尹小贝. 船舶污染环境承载指数综合评价指标体系 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2):594-597.
YIN X B. Carrying index of comprehensive evaluation index system on environmental pollution from ships [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S2):594-597. (in Chinese)
- [24] 刘晓东, 姚琪, 王鹏, 等. 太湖流域内河船舶污染负荷估算 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(12):129-131.

(下转第 128 页)

- [9]ZHANG C R , ZHANG Z H , ZHENG L , et al. A decision support system for the allocation of yard cranes and blocks in container terminals [J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research* , 2011 , 28 (6) :803-829.
- [10]GUO X , HUANG S Y. Dynamic space and time partitioning for yard crane workload management in container terminals [J]. *Transportation Science* , 2012 , 46 (1) : 134-148.
- [11]檀财茂 , 黄有方 , 严伟 , 等. 空间和设备资源限制条件下集装箱码头堆场空间分配两阶段优化方法 [J]. *上海海事大学学报* , 2016 , 37 (3) :1-6.
TAN C M , HUANG Y F , YAN W , et al. A two-stage optimization method of container yard space allocation with space and equipment resource constraints [J]. *Journal of Shanghai Maritime University* , 2016 , 37 (3) : 1-6. (in Chinese)
- [12]STASKO T H , GAO H O. Reducing transit fleet emissions through vehicle retrofits , replacements , and usage changes over multiple time periods [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* , 2010 , 15 (5) :254-262.
- [13]STASKO T H , GAO H O. Developing green fleet management strategies: Repair/ retrofit/ replacement decisions under environmental regulation [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* , 2012 , 46 (8) : 1216-1226.
- [14]PARTHANADEE P , BUDDHAKULSOMSIRI J , CHARNS-ETHIKUL P. A study of replacement rules for a parallel fleet replacement problem based on user preference utilization pattern and alternative fuel considerations [J]. *Computers & Industrial Engineering* , 2012 , 63 (1) :46-57.
- [15]ANSARIPOOR A H , OLIVEIRA F S , LIRET A. A risk management system for sustainable fleet replacement [J]. *European Journal of Operational Research* , 2014 , 237 (2) :701-712.
- [16]FAN W , MACHEMEHL R , GEMAR M , et al. 不确定性条件下的设备替换优化的随机动态规划方法 [J]. *交通运输系统工程与信息* , 2014 , 14 (3) :76-84.
FAN W , MACHEMEHL R , GEMAR M , et al. A stochastic dynamic programming approach for the equipment replacement optimization under uncertainty [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* , 2014 , 14 (3) :76-84. (in Chinese)
- [17]国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴. 2013 [M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- [18]IPCC2006. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 [M]. 日本全球环境战略研究所 2006: 1-7.
- [19]国家发改委应对气候变化司. 2014 年中国区域电网基准线排放因子 [EB/OL]. (2015-02-05) [http://www.tanpaifang.com/download/China% 20 ' s% 20 regional% 20 power% 20 grid% 20 baseline% 20 emissions% 20 factor% 20 2015. pdf](http://www.tanpaifang.com/download/China%20's%20regional%20power%20grid%20baseline%20emissions%20factor%202015.pdf)

(上接第 121 页)

- LIU X D , YAO Q , WANG P , et al. Calculation on pollution load of inland river ships in Taihu lake basin [J]. *Environmental Science & Technology* , 2009 , 32 (12) :129-131. (in Chinese)
- [25] 马彩华 , 宋百慧 , 游奎. 基于灰色关联分析法的莱州湾海洋渔业产业结构研究 [J]. *中国渔业经济* , 2017 , 35 (2) :87-95.
MA C H , SONG B H , YOU K. Research on Laizhou Bay 's marine fishery industrial structure based on gray correlation analysis [J]. *Chinese Fisheries Economics* , 2017 , 35 (2) :87-95. (in Chinese)
- [26] 孙鹏飞 , 单秀娟 , 吴强 , 等. 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化 [J]. *生态学报* , 2014 , 34 (2) :367-376.
SUN P F , SHAN X J , WU Q , et al. Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2014 , 34 (2) :367-376. (in Chinese)
- [27] 山东省海洋与渔业厅. 2016 年山东省海洋环境状况公报 [R] , 2017.
- [28]SONG D B , GAO Z Q , ZHANG H , et al. GIS-based health assessment of the marine ecosystem in Laizhou Bay , China [J]. *Marine Pollution Bulletin* , 2017 , 125 (1-2) :242-249.