收稿 <日> <月>, <年>; 修订 <日> <月>, <年>; 接收 <日> <月>, <年> DOI: xxx/xxxx

arXiv:2602.08787v1 [stat.AP] 9 Feb 2026

研究论文

为美国东海岸海上风能开发与运营提供参考的可达性与可服务性评估

Cory Petersen[1] | Feng Ye[2] | Jiaxiang Ji[1] | Josh Kohut[3] | Ahmed AzizEzzat*[1,4] | David Saginaw[5] | Avril Montanti[5] | Jack Cammarota[5]

[1]罗格斯新泽西州立大学工业与系统工程系，美国新泽西州[2]克莱姆森大学工业工程系，美国南卡罗来纳州[3]罗格斯新泽西州立大学海洋与沿海科学系，美国新泽西州[4]高丽大学大学学院，韩国首尔[5]Blue Ocean Transfers，McQuilling Renewables，美国纽约州

通信
*Ahmed Aziz Ezzat，96 Frelinghuysen Rd，Piscataway，NJ，08854，美国 邮箱：aziz.ezzat@rutgers.edu

摘要

海上风电项目的经济成功取决于对建设以及运营与维护（O&M）成本的准确预测。这些预测必须考虑恶劣海气象条件带来的物流复杂性，因为这类条件可能导致海上资产在较长时间内无法抵达。为此，本研究有两个目标：（1）为美国东海岸的主要海上风能区域提供高分辨率的可达性估算值；该地区蕴藏着巨大的海上风能潜力；（2）引入一项新的运营指标，称为可服务性。提出这一指标的动机是，需要评估沿船舶航行路径抵达海上资产的可达性，而非像文献中通常所做的那样，仅评估特定地点的可达性。我们假设，相较于可达性，可服务性与海上作业的相关性更高，因为它能更真实地反映船舶从港口驶往作业地点再返回途中，作业成功与安全的程度。分析显示，即使是彼此邻近的海上地点，其可达性和可服务性也存在显著的时间和空间变化。我们还发现，单纯依赖数值海气象数据，可能会在估算可达性和可服务性时引入相当大的偏差，这表明有必要采用一种结合数值数据与观测数据来源的统计方法，例如本文提出的方法。总体而言，我们的分析阐明了高分辨率海气象信息和模型在支持海上作业方面的价值，包括但不限于未来的海上风能开发。

关键词：
可达性、可服务性、物流、海上能源、运营与维护

1 引言

在全球能源需求不断增长的推动下，沿海国家正转向利用海上能源资源，以获取海洋蕴藏的丰富能源，同时促进沿海经济体的经济发展和可持续增长。在这些海洋能源资源中，海上风能凭借其众多环境和经济效益[1]，预计将快速发展，成为全球可再生能源发电的重要来源。尤其是美国，其海岸线外多个地理区域均蕴藏着巨大的海上风电潜力[2]。其中，美国东海岸凭借

相对较浅的海域、稳定的风力以及邻近主要沿海人口中心等优势[3]，预计将成为未来海上风电开发项目的首个也是最大的贡献地区[4,5]，因此，美国东海岸是美国近期最具可行性和经济前景的海上风电开发区域，也是本研究的地理重点。

为了确保未来海上风电项目取得经济成功，并降低其开发和运营的风险，需要对建设、运营和维护（O&M）的需求与成本进行准确且因地制宜的预测[6,7,8]。例如，仅运营与维护活动就占海上风电项目生命周期成本的 ~30-40%[9]。因此，精准估算运营与维护支出的工作，更不用说削减这些支出，都可能对海上风电项目未来的经济前景产生重大影响。然而，准确预测海上风电的运营与维护需求并非易事，部分原因在于动态的海洋气象环境带来了复杂的后勤问题，可能严重妨碍风电场运营商有效、安全地安排、调度并开展海上关键建设及运营与维护作业[10,11]。

与陆上风电场不同，海上环境中的运营活动在很大程度上受到恶劣海洋气象条件的制约。如果这些条件超出预估的安全限值，人员、材料和设备便无法运送至海上资产。因此，时效性强的维护作业可能要等到海况好转后才能进行，这会对海上资产的可用性造成重大影响，尤其是在涉及敏感或高成本维修时[12,13]。近期研究表明，在风电场中恰当建模海洋气象条件，有助于将海上风电场的运营与维护总成本降低多达 7%[14,15]。这是因为，准确掌握海洋气象条件能够让运营人员主动选择成功概率较高的时段安排维护任务，从而减少因资产停机和维护中断造成的不必要延误，最终降低总体运营与维护成本[16,17]。

鉴于其对海上建设和运维规划的影响，先前已有研究致力于考察海上地点的可达性，其中绝大多数研究聚焦于北海的海上风电项目[18,19,16,20]。我们的研究具有以下独特之处：

- 据作者所知，本研究首次尝试为美国东海岸附近的潜在海上风能区域提供高分辨率的可达性估计。我们希望研究结果能及时为该地区现有及未来大型海上风电场的开发商和运营人员提供参考，指导其建设和运维规划，并支持其物流规划决策。鉴于船舶短缺已被认为是美国及其他地区海上风能开发的主要瓶颈[21]，因此，充分利用船舶资源，同时考虑关于可达性的高保真度、精确信息，将成为海上风电行业实现经济效益的关键[22]。

- 大多数公开发表的可达性评估研究主要依赖数值模型数据来得出可达性估计值[23,20,18,24]。这是因为准确估算可达性所需的长时间序列时空观测数据通常难以获取，对于新开发的海上风电项目尤其如此。鉴于数值模型固有的偏差，我们提出一种统计回归框架，将时间上稀缺、空间上稀疏的观测数据与数值模型数据相结合，从而得出准确的高分辨率可达性估计值；仅依赖观测数据或数值模型数据均无法得出此类估计值。

- 我们提出一种新的物流指标，称为可服务性，旨在评估海上场址沿船舶航行路径的可达性，并考虑船舶的运行剖面。这不同于通常采用的可达性定义，后者仅考虑海上场址的海洋气象条件，可能导致过于保守的物流决策，进而因海洋气象评估不够精确而错失作业机会。我们假设，与可达性相比，可服务性对于建设与运维规划更为重要，因为它更真实地反映了从港口到场址的整个海上任务期间海上作业的成功情况。

- 我们对美国东海岸附近主要海上能源区域的可达性和可服务性进行了季节间及场址间比较。分析揭示了可达性和可服务性显著的时空变异性，可为未来海上能源项目的开发商降低经济投标风险（租赁前期），以及确定建设、运营和维护期间的物流需求，提供关键见解。

本文结构如下。第2节介绍本研究使用的数据及其与美国海上风电行业的相关性。第3节介绍所提出的可达性估计框架，该框架结合观测数据和数值模型数据；此外，还提出可服务性这一新的物流指标，用于评估船舶航线上的可达性。第4节展示了我们对美国东海岸海域可达性和可服务性的评估结果，并讨论相关分析和发现

以及该区域海上风电区域的相关情况。最后，第5节总结全文，概述未来研究方向，并讨论本文所采用的方法和分析在蓝色经济的更广泛行业和应用中的适用性。

2 数据描述与探索性分析

若干因素会影响海上资产的可达性。这些因素可大致分为：

- 环境因素，指可能限制船舶、设备、物资和人员安全抵达海上资产的海洋气象条件（即海况和天气状况）。
- 运营因素，指可用的后勤资源（例如运输方式、通达系统），以及与待执行海上作业任务相关的运行参数（例如任务持续时间、复杂程度、船舶的预期航行路径和运行剖面）。

下文将逐一描述这几组因素。

2.1 环境因素

在环境因素方面，本研究重点关注两个海洋气象变量：有效波高，记作 H；以及风速，记作 v。有效波高通常被视为海上通达的主要决定因素，因为船舶有规定的安全上限，记作 H^*，超过该限值便无法安全执行海上任务。另一方面，风速可能危及船舶航行安全，使靠泊、系泊、转运和吊装作业更加复杂，并限制区域运输方式。我们将风速安全限值记作 v^*。本研究中，关于 H 和 v 的数据来自两个主要来源：(*i*) 在美国东北部使用十三个浮标收集的一组观测数据；以及 (*ii*) 从两个数值模型中提取的一组海洋气象数据。下文将介绍这些数据集及其与美国东海岸附近海上风能区域的相关性。本研究使用的所有观测数据集和数值数据集均可公开获取，相关数据集的访问参考资料已在相应内容中列出。

2.1.1 观测数据

收集了从2019年1月至2023年12月的五年观测数据，主要来自三个来源：（*i*）由美国国家海洋和大气管理局（NOAA）维护的国家数据浮标中心（NDBC）[26]（共7个浮标），提供3米高度的风数据（*m*）以及波浪相关数据；（*ii*）ASOW（Atlantic Shores海上风电）浮标[27]（共4个浮标），提供10-*m* 风数据以及波浪数据；以及（*iii*）由纽约州能源研究与发展局（NYSERDA）支持的浮标[28]（共2个浮标），提供10-*m* 风数据以及波浪数据。图1显示了这些浮标的地点，叠加在美国东海岸的海上风能区域之上。

需要注意的是，最初考虑了该区域内数量更多的浮标，但由于严重的数据缺失或时间覆盖不足，部分浮标被剔除。此外，考虑到ASOW浮标彼此位置接近，已将其数据汇集到一个中心位置以提高数据覆盖，我们称之为ASOW 合并数据。数据汇集通过对四个ASOW数据集取平均值并排除空值条目来实现：若在给定时间戳仅有一个浮标报告了数值，则采用该数值；若有多个浮标报告了数值，则将所有非空值的平均值记录为汇集条目。汇集过程完成后，共选取了来自10个不同地点、自2019年1月开始至2023年12月的五年数据。三个来源的数据均以10分钟或1小时间隔记录。所有10分钟数据均被处理为小时平均值。此外还进行了数据预处理，以剔除错误或物理上不合理的数值，从而确保输入海洋气象数据集的质量。

表 1 详细列出了每个浮标的坐标和覆盖范围。每个数据集的时间覆盖范围各不相同，并且存在几段缺失值。NOAA浮标的数据最完整，覆盖时间较长，且包含近海平面风浪数据。所有浮标的观测数据都可以自然地视为空间时空数据，因此我们分别用 H_{it} 和 v_{it} 表示在位置 i、时间 t 观测到的有效波高和风速，其中 $i \in \{1, \ldots, I\}$ 和 $t \in \{t_i^o, \ldots, t_i^e\}$ 满足 $I = 10$ 个位置，而 t_i^o 和 t_i^e 分别是第 i 个浮标数据的开始和结束时间。

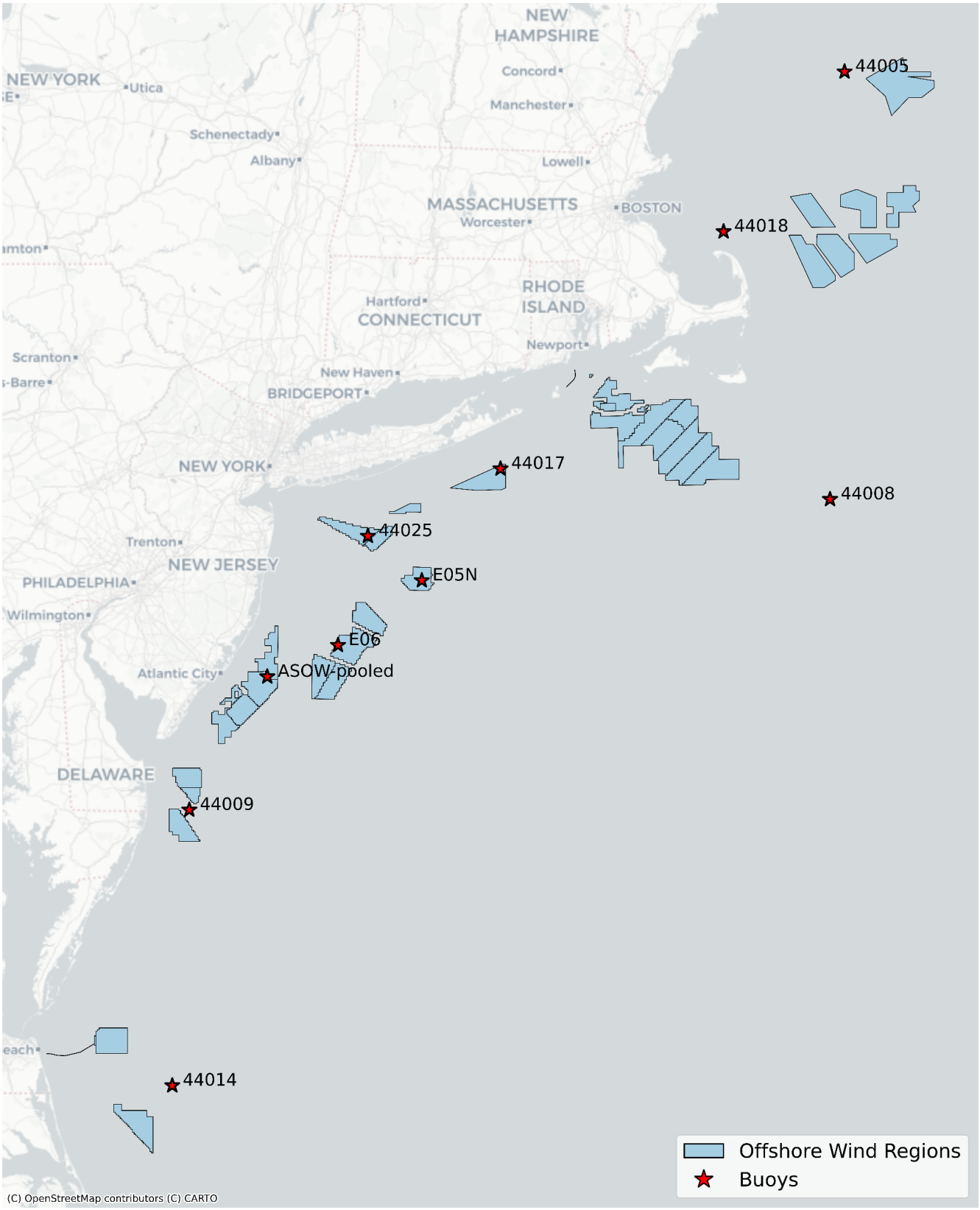

图1 地理地图显示了美国东海岸海上风电区域（蓝色多边形）上浮标的位置（红色星号）；该地图改编自海洋能源管理局（BOEM）截至8月 2025[25]的资料。原本有四个彼此相近的ASOW浮标，其数据已合并（以扩大数据覆盖范围）至一个中心位置，并标注为ASOW 合并数据。有关观测数据的更多详情，请参见表 1。

Buoy	纬度	经度	变量	开始	End	缺失百分比
44005	43.20	-69.13	H	2019年1月4日 18:00	2023年12月31日 23:00	21.0% (21.2%*)
			v	2019年6月4日 07:00	2023年12月31日 23:00	24.5% (30.9%*)
44008	40.50	-69.25	H	2019年5月10日 14:00	2023年12月31日 23:00	1.5%（8.5%*）
			v	2019年5月10日 14:00	2023年12月31日 23:00	0.7%（7.7%*）
44009	38.46	-74.69	H	2019年1月1日 00:00	2023年12月31日 23:00	4.4% (4.4%*)
			v	2019年5月7日 18:00	2023年12月31日 23:00	25.7% (30.9%*)
44014	36.60	-74.84	H	2019年1月1日 00:00	2023年12月31日 23:00	20.7%（20.7%*）
			v	2019年1月1日 00:00	2023年12月31日 23:00	18.4%（18.4%*）
44017	40.69	-72.05	H	2019年1月1日 00:00	2023年1月21日 13:00	22.4% (37.0%*)
			v	2019年1月1日 00:00	2023年1月21日 13:00	20.8% (35.8%*)
44018	42.20	-70.15	H	2019年1月1日 00:00	2023年12月31日 23:00	26.7% (26.7%*)
			v	2019年1月1日 00:00	2023年12月31日 23:00	26.0% (26.0%*)
44025	40.26	-73.18	H	2019年1月1日 00:00	2023年12月18日 12:00	1.4%（2.1%*）
			v	2019年1月1日 00:00	2023年9月4日 19:00	2.6%（8.9%*）
E05N	39.97	-72.72	H	2019年-08-12 00:00	2021-09-19 23:00	0.2% (57.9%*)
			v	2019年-09-01 00:00	2021-09-14 02:00	11.6% (65.0%*)
E06	39.55	-73.43	H	2019年-09-04 00:00	2022年-03-27 23:00	6.0% (51.8%*)
			v	2019年-09-04 00:00	2022年-03-27 23:00	15.0% (55.3%*)
ASOW-1	39.31	-74.11	H	2021年5月17日 01:00	2023年12月31日 23:00	41.8%（69.4%*）
			v	2021年10月7日 15:00	2023年12月31日 23:00	42.9%（74.5%*）
ASOW-2	39.57	-73.97	H	2022年8月14日 01:00	2023年10月23日 20:00	13.2%（79.3%*）
			v	2022年8月14日 01:00	2023年10月23日 20:00	13.2%（79.3%*）
ASOW-4	39.20	-74.08	H	2021-05-14 17:00	2022-06-14 05:00	68.1%（93.1%*）
			v	2021-05-14 17:00	2022-06-14 05:00	68.1%（93.1%*）
ASOW-6	39.27	-73.94	H	2020-02-26 14:00	2021-05-14 13:00	47.2%（87.2%*）
			v	2020-02-26 14:00	2021-05-14 13:00	46.9%（87.1%*）
ASOW 合并数据	39.34	-74.03	H	2020-02-26 14:00	2023年12月31日 23:00	32.3% (47.9%*)
			v	2020-02-26 14:00	2023年12月31日 23:00	32.8% (48.3%*)

表 1 本研究使用的观测数据概述，数据来自 13 个不同的浮标，包括位置、时间覆盖范围，以及波高 (H) 和风速 (v) 的缺失值百分比。最后一列中，括号前的数值表示在可用数据窗口（开始和结束日期之间）内缺失值的百分比，而括号中的数值表示 2019年1月至 2023年12月这五年期间缺失值的百分比。底行中的黄色单元格表示合并四个 ASOW浮标后的数据缺失值，与仅覆盖五年期间的四个 ASOW 地点相比，这些数值显著降低。

2.1.2 数值模型数据

数值模型数据分别来自美国国家海洋和大气管理局的全球预报系统（GFS）[29] 以及由 GFS 驱动的 WaveWatch III 波浪模型[30]，用于提供风速和波浪数据。下文将这些数据统称为数值模型数据或数值模型输出。这两个模型的网格分辨率分别为 0.5° x 0.5° 和 0.25° x 0.25°，并提供风速和有效波高的逐小时数据。所有数值模型输出均可公开获取[29,31]。本研究选取的网格点尽可能与各浮标位置在空间上匹配。在每个浮标位置，提取其周围的四个数值模型网格点（北、南、东和西）。随后，使用德洛内三角剖分法对模型值进行插值，得到浮标精确位置处的数值。与仅赋予最近网格点˜相比，这种方法有助于减少固有的空间偏差。我们分别用 H_{it} 和 $\tilde{v}_{it}$ 表示位置 i 在时间 t 的有效波高和风速数值模型输出。

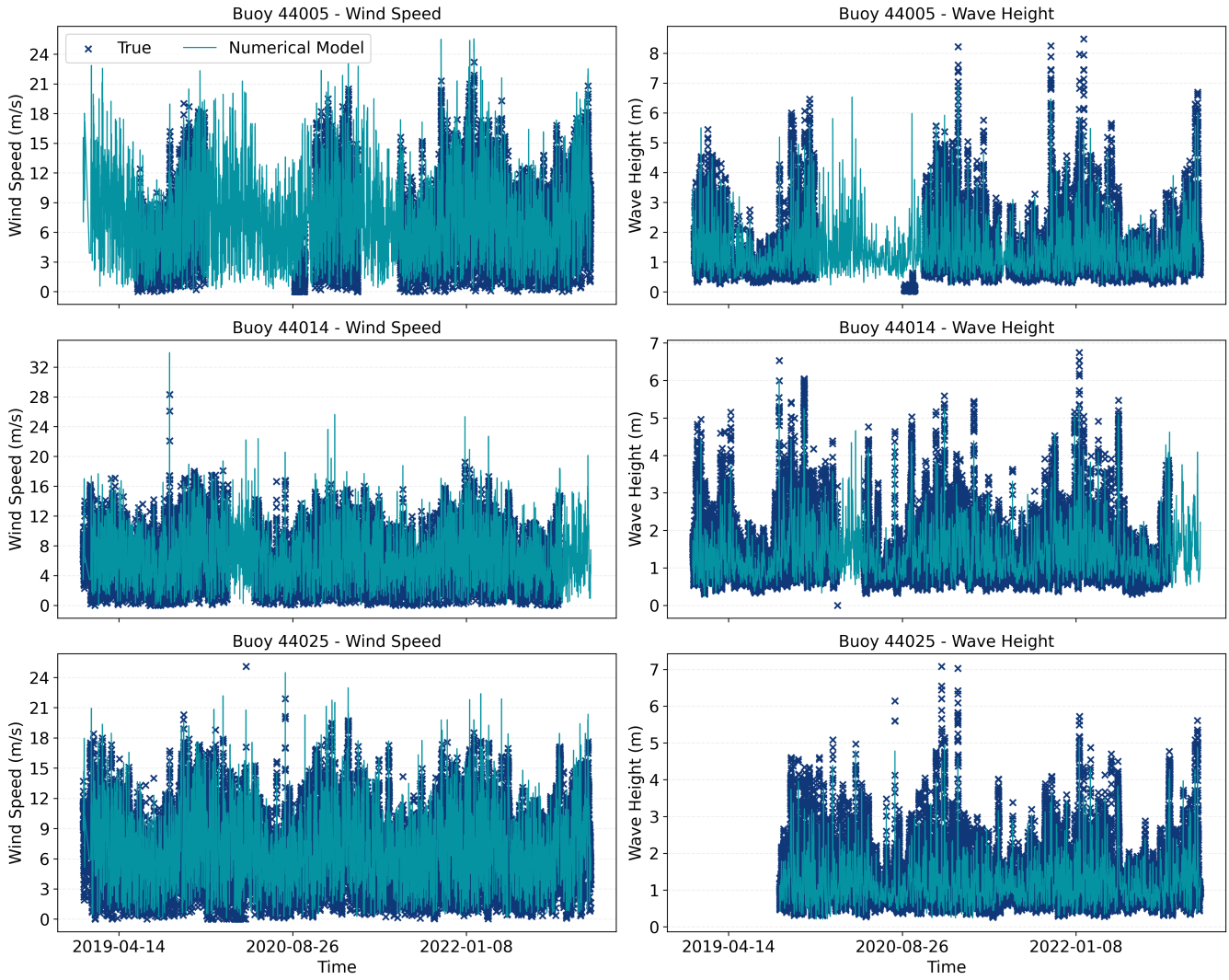

图2 2019年1月至2023年12月期间，GFS 和由 GFS 驱动的 WAVEWATCH III 在三个 NOAA 浮标（44005、44014 和 44025）处的五年风速（左）和有效波高（右）时间序列（分别以青色线条表示），以及浮标观测（以藏青色十字标记表示）。尽管数值模型有时会出现数据缺失，但与观测数据相比，其覆盖范围要完整、连续得多。

图2显示了三个浮标位置（44005、44014 和 44025）处风速（左）和有效波高（右）的数值数据与观测数据时间序列。图中清晰呈现了五年期间数值模型输出的完整性，以及观测数据中存在的大量缺口。数值模型输出在所有场址均提供了连续的时间覆盖，而观测数据记录则存在长时间段的缺失数据。

我们还观察到，数值模型输出虽然总体上与观测数据一致，但往往表现出明显的偏差。在图3中，这一点更加明显；该图放大展示了数值模型输出在选定短时间段（约两周）内的情况。尽管趋势和幅度总体一致，但在估算海洋气象条件时，可以观察到相当明显的低估和高估偏差[32,33]。这些偏差在恶劣海洋气象条件下尤为显著，而这类条件与海上可达性密切相关，因为它们处于或接近海上作业的关键安全阈值。在数据丰富性与保真度之间的这种权衡，促使人们需要采用一种统计处理方法，例如第3节提出的方法，将两类数据源（即观测数据和数值模型数据）结合起来，以生成可靠的高分辨率可达性估计；若仅使用观测数据或数值模型数据，这些估计实际上难以获得。

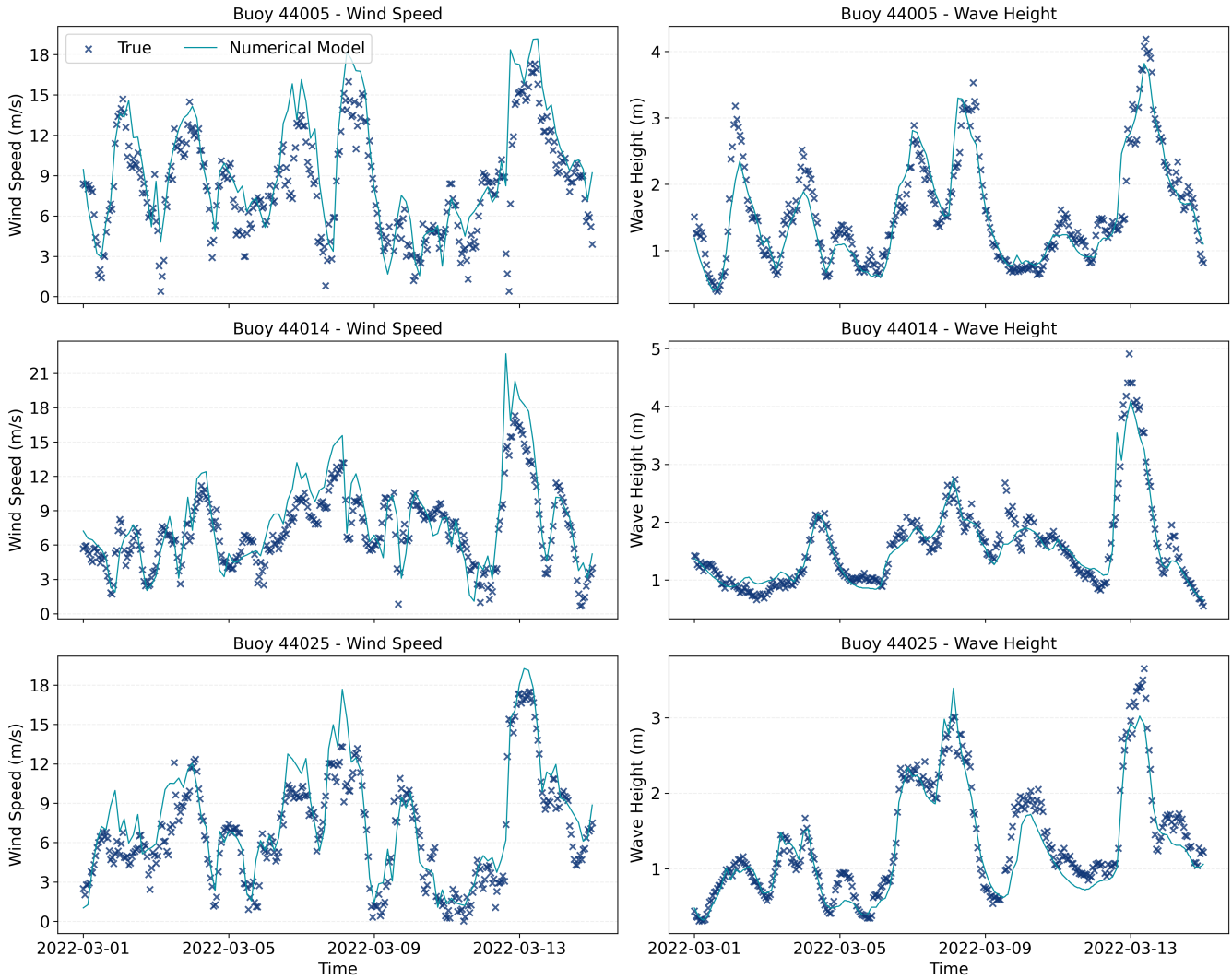

图3 2022年3月，约两周时间内数值模型输出（青色线条）与观测数据（蓝色十字标记）的放大视图。尽管整体上吻合，仍可观察到明显的低估和高估偏差，尤其是在与海上作业可达性评估最相关的恶劣海洋气象条件下。

2.2 运营因素

本研究考虑两组运行参数。第一组运行参数是所要执行的海上任务持续时间。该参数通过最小天气窗口长度来定义，下文记为 ζ；完成该海上任务需要满足这一长度才能确保安全。例如，如果 $\zeta = 12$ 小时，操作人员就需要将该任务安排在预计至少有连续十二小时能够通达海上资产的时段。第二组参数是海洋气象环境的安全限值，其由所考虑的海洋气象变量的上限向量表示；在本研究中，有效波高记为 H^* ，风速记为 v^* 。

能否抵达海上资产取决于 ζ、 H^*和 v^*的组合，而这些因素又受到所采用的海上任务类型和运输系统的影响。在本研究中，我们以 $H^* \in [1.5m, 4.5m]$ 为步长，按 0.25-m 的增量进行取值。此区间的上下限旨在反映常见船员转运船（CTV）至配备先进登乘系统[24]的大型服务作业船（SOV）的标准安全限值。风速的安全限值设为 12 ms^{-1}，即 $v^* = 12\ ms^{-1}$；多个来源均将其报告为空中运输[14,17,34]的上限。我们还为 ζ选取了不同的数值，以反映不同类型的维护作业。具体而言，我们选取 $\zeta \in \{2, 6, 12, 18, 24\}$ 小时，以体现从轻微维修到更复杂维修[35,24]的不同任务严重程度。

此外，对于标准海上作业，物流规划人员通常能够获得船舶计划航线和运行剖面的相关信息。运行剖面是对船舶在整个航程期间将执行的活动清单（例如航行、待机、装卸）及各项活动所占时间比例的细分，同时还包括各项活动期间的航行速度和燃料消耗。正如我们将在第3.3节中介绍的那样，这些信息将是定义可服务性这一运营层面的考虑物流因素的指标的关键输入。

3 方法

我们提出了一个两阶段方法框架。首先，我们提出一种时间序列回归模型，同时利用观测数据和数值模型数据。这种建模方法考虑季节性和时间趋势，同时校正数值模型输出的偏差，从而生成高分辨率的海洋气象条件时间序列，供后续物流分析和规划使用。相关内容见第3.1节。其次，我们使用统计模型输出，即高分辨率的海洋气象条件时间序列，来评估可接近性、可达性和可服务性等作业指标。这些指标将在第3.2节和第3.3节中明确定义。

3.1 海洋气象条件的统计建模：结合数值数据与观测数据

观测数据能够提供有关海洋气象条件的高保真信息，但如果仅用这些数据估算可达性，评估就会局限于有测量数据的时段。由于这些时段覆盖的时间有限，且存在相当长的缺失数据连续区间，因此可能会因遗漏季节间和年际变化等重要时间特征而得出误导性的估算值。一种可行的替代方案是使用数值模型数据，这类数据相当丰富，而且与观测数据相比，数据缺失问题并不严重。然而，如第1节所述，数值模型存在显著偏差，可能会大幅增加可达性估计误差。

为解决这些局限性，我们提出一种统计框架，将高保真（但稀缺）的观测数据与相对充足（但保真度较低）的数值模型数据相结合，以改进可达性估计。第一步是提取站点特定时间序列，其中包含两组数据均可获取时段的观测数据和数值模型数据。随后，我们在每个站点使用时间序列回归（TSR）模型，以数值模型数据为自变量对观测数据进行回归。令$\mathbf{x}_{it} = [x_{it,1}, ..., x_{it,M}]^T$表示位置 i 在时间 t的 M 个感兴趣海洋气象变量组成的向量。例如，如果仅使用波高作为可达性的唯一决定因素，则 $\mathbf{x}_{it} = \{H_{it}\}$。如果使用波高和风速共同作为可达性的决定因素，则有 $\mathbf{x}_{it} = [H_{it}, v_{it}]^T$。因此， $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^M$ 是安全限值向量，逐元素作用于$\mathbf{x}_{it}$。所提出的TSR模型定义如下式（1）。

$$x_{it,m} = \theta_0 + \theta_1 \tilde{x}_{i,t,m} + \theta_2 \tilde{x}_{i,t-1,m} + \theta_3 \tilde{x}_{i,t-24,m} + \sum_{k=1}^{K} \alpha_k s_{k,t} + \sum_{k=1}^{K} \beta_k c_{k,t} + \sum_{k=1}^{K} \psi_k s'_{k,t} + \sum_{k=1}^{K} \omega_k c'_{k,t} + \epsilon_{it}, \quad \forall i \in \{1, ..., I\}, \quad \forall m \in \{1, ..., M\} \tag{1}$$

其中， θ_0、 θ_1、 θ_2和 θ_3 分别为截距、当前数值模型值$\tilde{x}_{it,\,m}$及其在 $t-1$ 和 $t-24$ 小时处的滞后值的回归系数。系数 $\{\alpha_k\}_{k=1}^K$ 和 $\{\beta_k\}_{k=1}^K$ 与第一三角基（月周期）的正弦项和余弦项相关联，而 $\{\psi_k\}_{k=1}^K$ 和 $\{\omega_k\}_{k=1}^K$ 是第二三角基（年周期）的正弦项和余弦项的系数。基函数$s_{k,\,t}$、$c_{k,\,t}$、$s'_{k,\,t}$以及$c'_{k,\,t}$ 在公式（2）中定义，各自捕捉不同时间尺度上的周期效应。项$\epsilon_{i,\,t}$ 是零均值误差项，其方差记为 η。

$$s_{k,t} = \sin\left(\frac{2\pi kt}{720}\right), \quad c_{k,t} = \cos\left(\frac{2\pi kt}{720}\right), \quad s'_{k,t} = \sin\left(\frac{2\pi kt}{8760}\right), \quad c'_{k,t} = \cos\left(\frac{2\pi kt}{8760}\right), \tag{2}$$

使得 K 为傅里叶对的数量。我们发现， $K = 8$ 是在过拟合与欠拟合之间取得平衡的合理选择，这一判断基于独立的全年验证集上的平均绝对误差评估。

式（1）中采用参数形式的理由如下。在探索性数据分析中，我们注意到两个主要特征：季节性变异和显著的自相关。这促使我们引入傅里叶项，其三角函数能够捕捉月度和年度季节性。此外，滞后一个小时的项能够捕捉短期自相关，而滞后一天的项则能够捕捉昼夜季节性。因此，式（1）的构建旨在校准数值模型输出，而三角级数项则用于解释数值模型未能充分说明的剩余时间变异。

我们拟合了 20 个不同的 TSR模型（10 个场址 $\times 2$ 海洋气象变量 $= 20$ 模型）。令 $\mathbf{H}_{i,m}$ 表示式（3）中所示的第 i 个场址和第 m 个海洋气象变量对应的 TSR模型回归矩阵。

$$\mathbf{H}_{i,m} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{x}_{i,1} & s_{1,1} & c_{1,1} & \cdots & s_{K,1} & c_{K,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \tilde{x}_{i,T} & s_{1,T} & c_{1,T} & \cdots & s_{K,T} & c_{K,T} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

然后，任意时刻 t （包括没有观测数据的时段）的 TSR 模型输出记作 $\hat{x}_{it,\,m}$，并按式（4）确定。

$$\hat{x}_{it,m} = \mathbf{h}_{i,m}^{new}(\mathbf{H}_{i,m}^{T}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{x}_{i,m}, \tag{4}$$

其中，$\mathbf{h}_{i}^{new}{}_{,\,m} = [1, \tilde{x}_{i,t}^{new}, s_{1,t}, c_{1,t}, ..., s_{K,t}, c_{K,t}]^{T}$，满足 $\tilde{x}_{i\,t}^{new}{}_{,}$ 是时刻 t的数值模型输出，而 $\mathbf{x}_{i,\,m} = \{x_{it,m}\}_{t=1}^{T}$。

3.2 可接近性与可达性

建立 TSR 模型后，我们使用这些模型来预测各个位置多年间的海洋气象条件。随后利用这些预测值计算每个场址的重要作业指标。可接近性定义为海洋气象条件低于规定安全限值的时间比例。将第 i个场址的可接近性记作 $R_i(\mathbf{x}^*)$，其数学表达式如式（5）所示。

$$R_i(\mathbf{x}^*) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left[\prod_{m=1}^{M}\mathbb{1}(x_{i,t,m} < x_m^*)\right], \tag{5}$$

其中，T是用于评估可接近性的总数据点数，$\mathbb{1}(\cdot)$ 是一个指示函数；若条件 C 成立，则 $\mathbb{1}(C) = 1$，否则为 0。如果使用数值模型输出而非观测数据来计算式（5），则 $\mathbf{x}_{it}$ 应替换为其数值模型估计值 $\tilde{\mathbf{x}}_{it}$。

尽管 $R_i(\mathbf{x}^*)$ 是一个有用的指标，但它不足以为海上建设和运营与维护规划提供依据，因为维护等海上作业任务需要在足够长的时间内持续抵达海上设施。因此，可达性通过寻找持续时间至少达到天气窗口最短时长 ζ的连续可接近海气象特征，反映了这一额外要求。与可接近性不同，估算可达性时会考虑时间步与海洋气象协变量的交集；只有当任务开始时间 t^* 之后整个任务期间的每项海洋气象变量均未超出安全限值时，某一位置才被视为可达。该指标可用数学形式表示，如式（6）所示。

$$A_i(\mathbf{x}^*, \zeta) = \frac{1}{T-\zeta+1}\sum_{t^*=1}^{T-\zeta+1}\left[\prod_{m=1}^{M}\prod_{t=t^*}^{t^*+\zeta-1}\mathbb{1}(x_{i,t,m} < x_m^*)\right] \tag{6}$$

与可接近性类似，如果使用数值模型输出而非观测数据来计算式（6），则 $\mathbf{x}_{it}$ 将替换为其数值模型估计值 $\tilde{\mathbf{x}}_{it}$。

3.3 可服务性：用于评估船舶航线可达性的一项拟议作业指标

传统的可达性定义侧重于单一海上场址（一个空间位置）。虽然这在作业方面具有一定价值，但它没有考虑到海上作业并非空间静止不变，而是需要船舶在高度动态且空间变化各异的海洋气象条件下，从港口航行至海上资产。因而，单一位置（无论是港口还是海上场址）的可达性，可能不足以真实反映任务成功的可能性。随着海上风力涡轮机不断在更深水域安装，这一空间因素的重要性只会日益增加。近期研究人员认识到，有必要开发严格的作业指标，以评估船舶沿航行路径（而不仅仅是在场址或港口）的可达性；随着拖航至岸作业对大型涡轮机安装越来越重要，这一点尤为如此[36]。

为弥补这一差距，我们引入新的运营指标——可服务性，并将其定义为船舶在整个任务期间沿完整作业航线的可达性。与只考虑一个空间位置天气窗口持续情况的可达性不同，可服务性考虑船舶位置的变化（例如人员转运船），包括从港口出航、现场作业以及返回港口。

显然，可服务性评估的一项关键输入是预期的船舶航线和运行剖面信息，其中列出了船舶在整个航程中要开展的活动说明及其持续时间。对于任何持续时间或复杂程度的标准海上作业，海员和物流规划人员通常都能获得这些信息。运行剖面会转换为时空位置矩阵 $\mathbf{P}$，其中每个条目 $p_{j,\,t}$ 都是一个二进制变量，用于指示是否

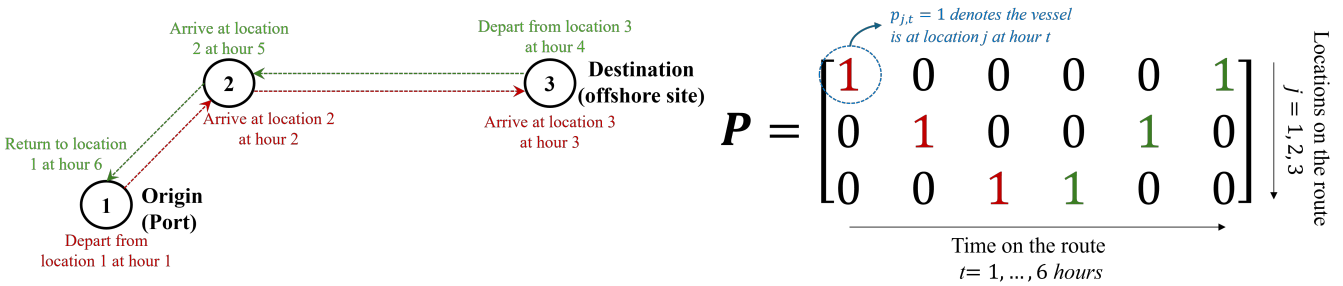

图 4 左：船舶航线示例，展示了运行剖面中的船舶活动随时间的分布。红色文字表示从港口到场址的航程活动，绿色文字表示返程活动。右：对应的位置矩阵 **P**，根据船舶航线和运行剖面信息构建。位置矩阵 **P** 编码了船舶在每个时间步的预期位置，是可服务性计算的重要输入。

预计船舶在时间 t 位于航线上的位置 j。图 4（左）展示了一个为期六小时的任务航线示例，其中包括港口（位置 1）、中间场址（位置 2）和海上场址（位置 3）。这些航线信息与船舶作业剖面共同用于构建船舶位置矩阵（右），该矩阵将用于可服务性计算。

我们将航线 r 上的可服务性定义为海洋气象安全限值 $\mathbf{x}^* = [x_1^*, x_2^*, ..., x_M^*]^T$、作业窗口 ζ 和位置矩阵 **P** 的函数，如式（7）所示：

$$S_r(\mathbf{x}^*, \zeta, \mathbf{P}) = \frac{1}{T-\zeta+1} \sum_{t^*=1}^{T-\zeta+1} \left[\prod_{\substack{j=1,\cdots,J(r) \\ t=t^*,\cdots,t^*+\zeta-1 \\ p_{j,t}=1}} \prod_{m=1}^{M} \mathbb{1}(x_{j,t,m} < x_m^*) \right], \quad such\ that \quad t^* + \zeta - 1 \leq T, \tag{7}$$

其中，$x_{j,t,m}$ 表示第 m 个海洋气象变量（例如有效波高或风速）在位置 j 和时间 t 的取值。航线被离散为 $J(r)$ 个空间点，船舶可能经过这些点，并于任务开始时间 t^* 出发。式（7）的数学表达式要求船舶经过的航线中每个位置的所有海洋气象条件均低于规定的安全限值（由条件 $p_{j,t} = 1$ 编码）。在任何经过的位置或任何变量上出现超限，都会使该任务开始时间对应的可服务性评分为零。对所有任务开始时间的评分取平均值后，可得到最终的特定航线可服务性评分 $S_r(\mathbf{x}^*, \zeta, \mathbf{P})$，该评分反映了完整任务能够沿此船舶航线不间断完成的时间比例。

显而易见，可服务性本质上是一项具有时空特征且针对特定航线的指标，因为它直接利用船舶的位置以及随时间变化的船舶位置 预期海气象特征信息。因此，它能根据任务期间观测到的各项参数，更真实地评估任务成功可能性。这与空间上独立的指标形成鲜明对比，例如可达性和可接近性；后者忽略船舶的行驶路径，只考虑单一位置的海洋气象条件，无论该位置是港口还是海上场址。

4 结果

在介绍可达性和可服务性分析之前，我们先在第4.1节展示此前在第3.1节介绍的海洋气象统计模型的价值。随后将在第4.2节和第4.3节介绍可达性和可服务性分析。

4.1 气象海洋模型结果

为评估气象海洋模型的性能，我们使用四年数据进行训练（2019年1月至2022年12月），然后使用第五年进行测试（2023年1月至2023年12月）。我们使用三项关键指标，并在测试集上进行评估：决定系数(R^2)，反映模型的解释能力；均方根误差 （均方根误差），用于量化

	有效波高， H						风速， v					
Buoy	**TSR（所提出的）**			**数值**			**TSR（所提出的）**			**数值**		
	R^2	RMSE	Bias	R^2	RMSE	Bias	R^2	RMSE	Bias	R^2	RMSE	Bias
44005	0.893	0.281	-0.019	0.885	0.308	-0.033	0.760	1.870	0.137	0.652	2.251	1.003
44008	0.934	0.266	0.005	0.929	0.277	-0.033	0.778	1.653	0.046	0.664	2.034	0.916
44009	0.864	0.226	-0.077	0.867	0.228	-0.082	0.773	1.534	-0.216	0.734	1.661	0.478
44014	0.910	0.241	0.071	0.915	0.234	0.068	0.697	1.746	0.063	0.567	2.085	0.839
44017	0.903	0.221	0.054	0.897	0.226	-0.069	0.735	1.690	0.027	0.592	2.097	0.934
44018	0.875	0.261	-0.100	0.872	0.266	-0.098	0.753	1.741	-0.027	0.660	2.040	0.818
44025	0.883	0.216	-0.044	0.888	0.212	-0.052	0.730	1.730	-0.204	0.657	1.951	0.649
E05N	0.889	0.239	0.055	0.874	0.253	0.048	0.727	1.683	0.122	0.587	2.070	0.968
E06	0.875	0.247	0.038	0.858	0.263	0.010	0.790	1.779	0.454	0.590	2.281	1.495
ASOW 合并数据	0.782	0.276	0.122	0.824	0.247	0.109	0.697	1.774	-0.102	0.657	1.890	0.370
平均值	0.895	0.254	0.030	0.885	0.263	-0.026	0.744	1.72	0.030	0.636	2.036	0.847

表2 比较 TSR 与数值模型在所有浮标上的模型性能评估，包括 R^2、均方根误差和偏差；评估指标为有效波高（左）和风速（右）。绿色单元格表示各项指标中的最佳表现。

平均平方偏差的平方根；以及偏差，用于衡量预测值与真实值之间的平均有符号误差。我们将TSR模型的性能与未经偏差校正的原始数值模型输出进行比较。

表2展示了测试集中所有浮标的 TSR 模型与原始数值模型输出的性能对比，评估指标为有效波高（左）和风速（右）。总体而言，TSR 模型在大多数地点、所有指标以及两种变量上均表现出稳定的改进。风速方面的改进更为显著：TSR 模型的平均值 R^2 为 0.744，而数值模型为 0.636；同时，均方根误差从 2.036 降至 1.720。此外，偏差几乎被消除（TSR 模型为 –0.030，而数值模型为 +0.847 ）。有效波高方面也报告了显著（但幅度较小）的改进：TSR 模型的 R^2 为 0.895，而数值模型为 0.885；均方根误差为 0.254，而数值模型为 0.263。虽然偏差的绝对值几乎保持不变，但 TSR 的轻微高估（+0.030）可能优于数值模型的低估（–0.026），因为在海上作业中，尤其是涉及人员转运的作业，采取保守做法比采取宽松做法更安全。总体而言，这些结果表明对海洋气象条件的估算更加准确，并支持在后续可达性和可服务性分析中采用 TSR 气象海洋模型。第4.3节将展示，这些估算性能上的差异会对最终的可达性和可服务性估算值产生相当显著的影响。

图5展示了大西洋沿岸三个不同浮标（44005、44014 和 44025）的风速（左）和有效波高（右）时间序列数据。这与前文图3所示的数据相同，但此处加入了 TSR 模型拟合结果（红线）。从图中可以直观看出，TSR模型显著降低了数值模型的偏差，更好地反映了海气象特征，尤其是在恶劣条件下。

4.2 可接近性、可达性与可服务性评估

现在，我们将重点转向可达性和可服务性分析。在第4.2.1节中，我们对图1地理地图所示的所有浮标开展可接近性和可达性分析。随后，在第4.2.2节中，我们对美国东海岸的一条具有代表性的实际航线进行可服务性评估。在这两项分析中，我们都使用有效波高和风速变量开展多变量评估。鉴于风速的安全阈值较为宽松（$v^* = 12m/s$），在大多数情况下，以有效波高作为唯一海洋气象变量时，多变量分析与单变量分析之间并无显著差异。因此，除非另有说明，以下大多数分析均呈现多变量情景的结果。

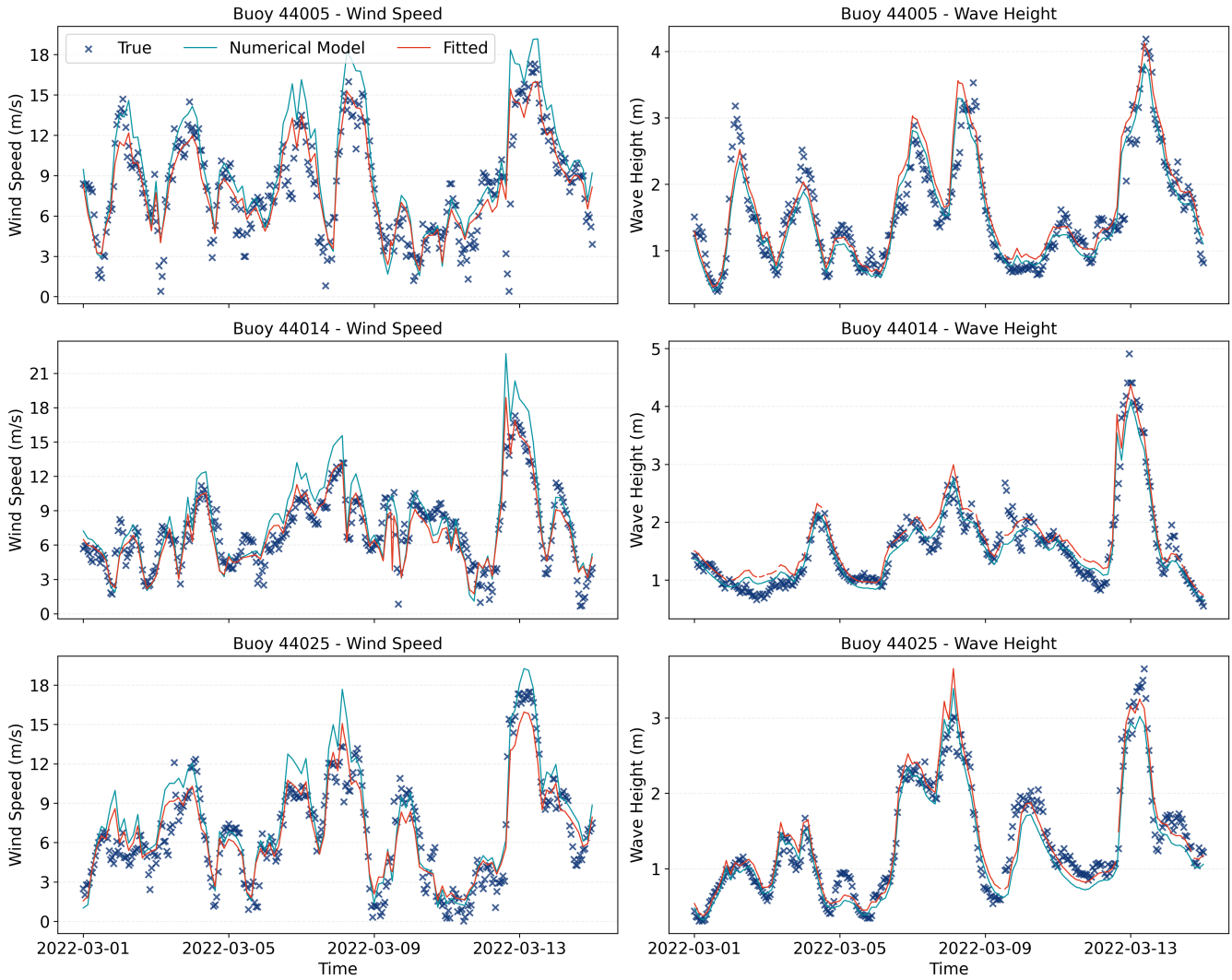

图5 放大的时间序列比较：2022年3月浮标44005、44014和44025的风速（左）和有效波高（右）数值模型（青绿色线条）、真实观测值（深蓝色标记）与 TSR 模型拟合结果（红线）。与原始数值模型输出相比，拟合后的 TSR 模型更贴近观测值，尤其是在峰值和突变期间，表明其预测能力有所提升。

4.2.1 美国东海岸的可接近性与可达性分析 st

我们比较了图1所示美国东海岸沿线10个地点的可接近性和可达性。图6总结了这一比较：对于同一地点，可接近性数值始终高于可达性数值，这反映了天气窗口持续性要求更为严格（也更贴近实际）。事实上，可接近性的平均值始终比可达性高出5%至10%。这进一步证实了区分这两项指标的重要性，也说明为何可达性指标所体现的时间持续性与海上作业更加相关。

图7展示了不同地点（不同曲线）在各种波高阈值下的可达性变化，H^*（x 轴）。不出所料，随着有效波高阈值 H^* 升高，可达性单调递增。递增的速率和幅度因地点而异。例如，浮标44008在所有波高阈值下的可达性得分均最低，表明该处条件持续较为恶劣。考虑到它是离岸最远的位置，这一结果并不意外，也再次凸显了与较浅水域的海上风电设施相比，较深海域的海上风电设施所面临的挑战。另一方面，浮标44018在1.5-m 阈值下的可达性得分最高，但在

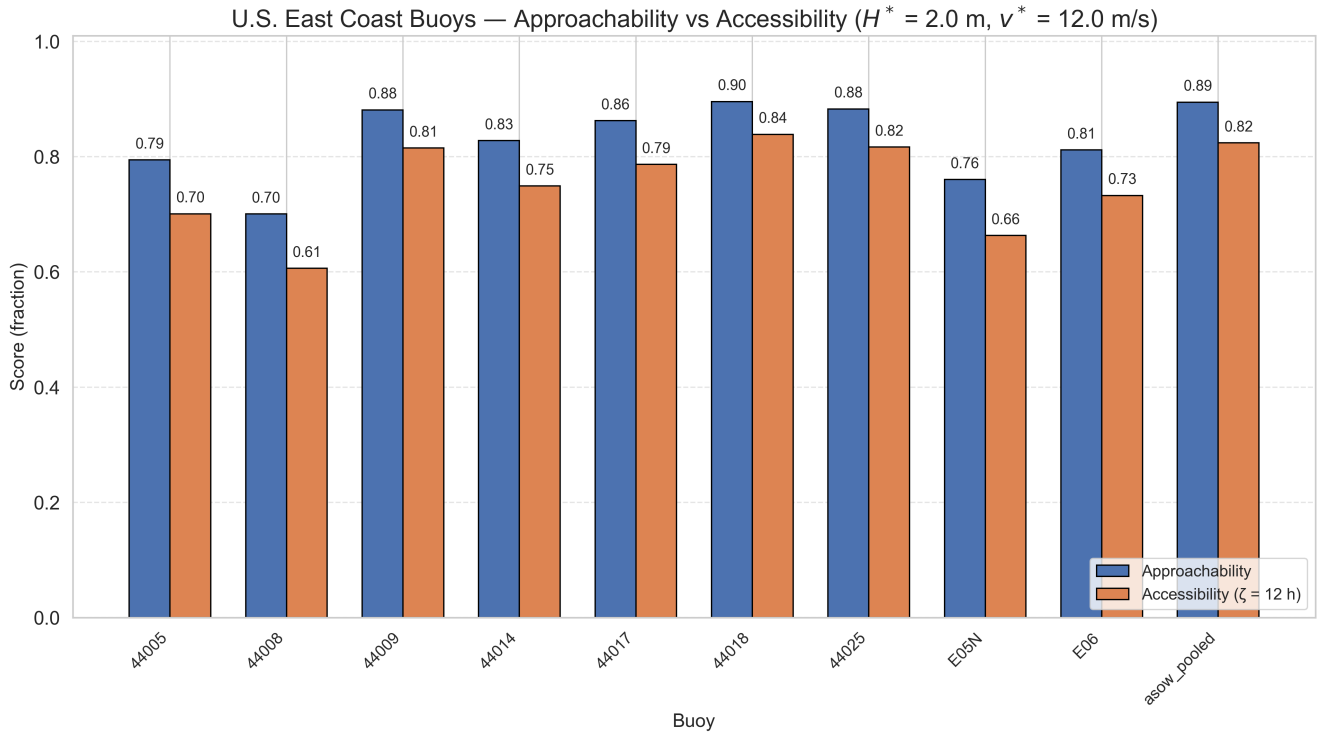

图6 美国东海岸10个地点的可接近性（蓝色）与可达性（橙色）对比。所用参数为安全限值 $H^* = 2.0\text{m}$、 $v^* = 12.0$ m/s，以及任务持续时间 $\zeta = 12\,\text{h}$。

4.5米阈值下，其得分在十个浮标中排名倒数第三。这表明海洋气象条件呈现重尾分布：相当一部分波高值低于1.5米阈值，但仍有数量不可忽视的恶劣环境条件。

图7中的另一项有趣发现是，可达性存在明显的空间差异。这凸显了使用可达性来估算成功服务海上地点概率的局限性。例如，如果船舶航行的距离相当于浮标44018与浮标44005之间的距离（约向东北方向一度），那么仅依赖任一浮标的可达性评分，都无法准确反映整条航线上出现有利条件的可能性。在最低阈值下，两个浮标的可达性相差超过20%，这说明仅采用单点分析时，空间变异可能会误导任务可行性评估，也进一步凸显了采用特定航线后勤指标（如可服务性）的必要性。

为进一步阐明可达性的空间差异，图8并列展示了两处海洋气象条件迥异地点的热力图，呈现可达性随任务持续时间 ζ 和波高阈值 H^* 变化的情况：浮标44008（距岸最远）和 ASOW 合并数据（距岸最近的地点之一）。结果表明，随着任务持续时间增加，可达性会下降，这符合天气窗口持续性要求变得更加严格的预期。不过，两种情况下的下降速度差异显著。对于浮标44008，在最低 H^* 阈值下，可达性得分从 0.49 降至 0.32（下降 17%）。而 ASOW 合并数据的可达性得分下降幅度更大，从 0.74 降至 0.54。尽管如此，数据趋势在某种程度上相似：随着 H^* 增加、 ζ 降低，可达性得分会上升。不过，任务成功率计算中空间因素的重要性显而易见：与同一任务在 ASOW 浮标附近相比，在浮标44008附近执行任务，在任何阈值下都远不太可能遇到有利条件。这表明，场址适宜性存在一种权衡：距岸较近意味着物流需求显著降低，但海上风电场的能源产量也可能较低。

图9考察了同样两个地点的可达性季节性变化：浮标44008（离岸最远）和 ASOW 合并数据（离岸最近的地点之一）。具体而言，我们比较了不同波高阈值下总体可达性得分与夏季和冬季期间的可达性得分。结果显示出明显的季节差异。例如，浮标44008（上图）在夏季月份的可达性得分显著较高，在冬季为 0.27，而在

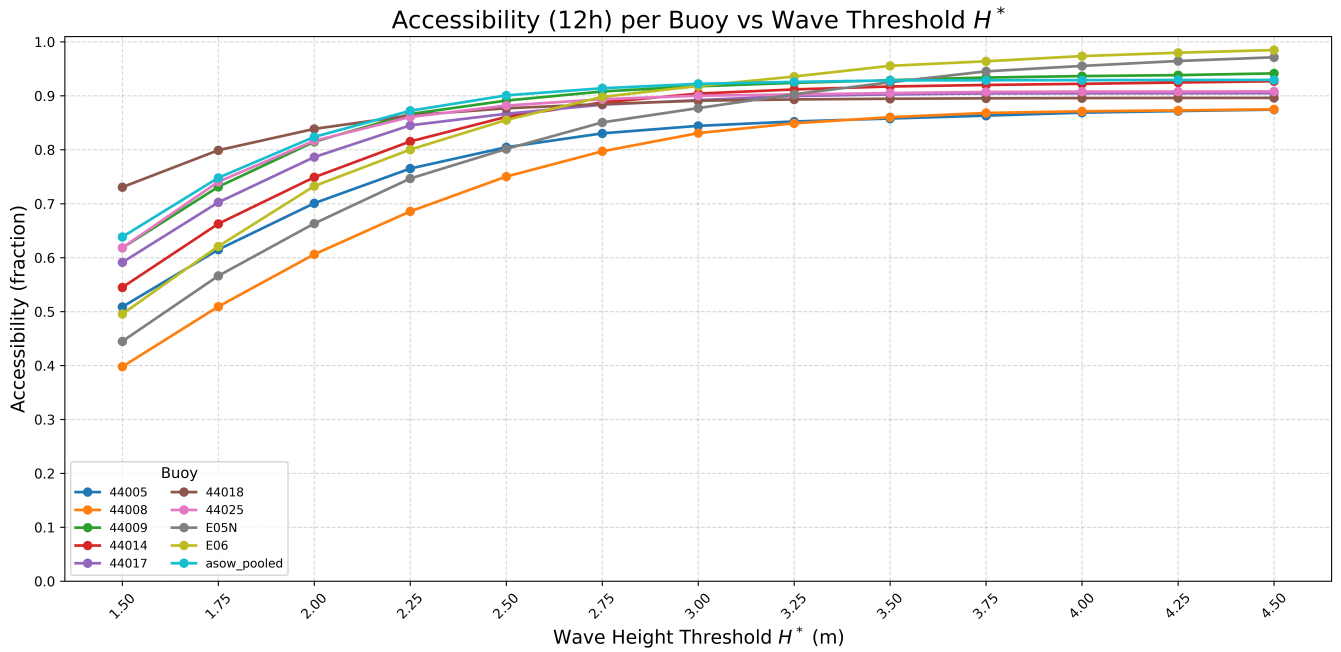

图7 不同地点（不同曲线）的可达性随显著波高阈值变化的情况，H^*。阈值越高，可达性越高，但空间变异性十分明显。此处假设任务持续时间为 $\zeta = 12$ 小时。

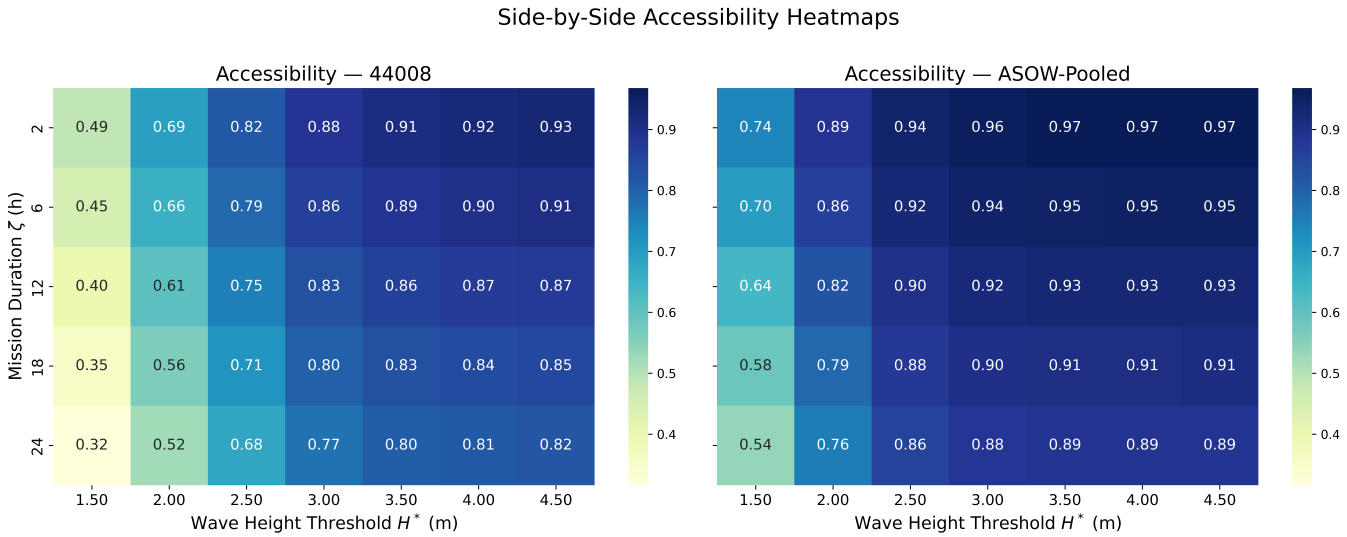

图8 并列展示的热力图，显示可达性随任务持续时间 ζ 和波高阈值 H^*的变化。结果显示的是浮标 44008（左）和 ASOW 合并数据（右）。

1.5-*m* 波高阈值下升至 0.59。ASOW-pooled地点的季节差异没有那么明显，但仍然可以看出。在这里，1.5-*m* 波高阈值下，可达性从 0.50 上升至 0.75。无论哪种情况，可达性数值都存在明显的时间变化。这对战略性运维规划非常重要，因为运营人员可能会选择在夏季月份安排最重要的维修和维护作业[37,38]。

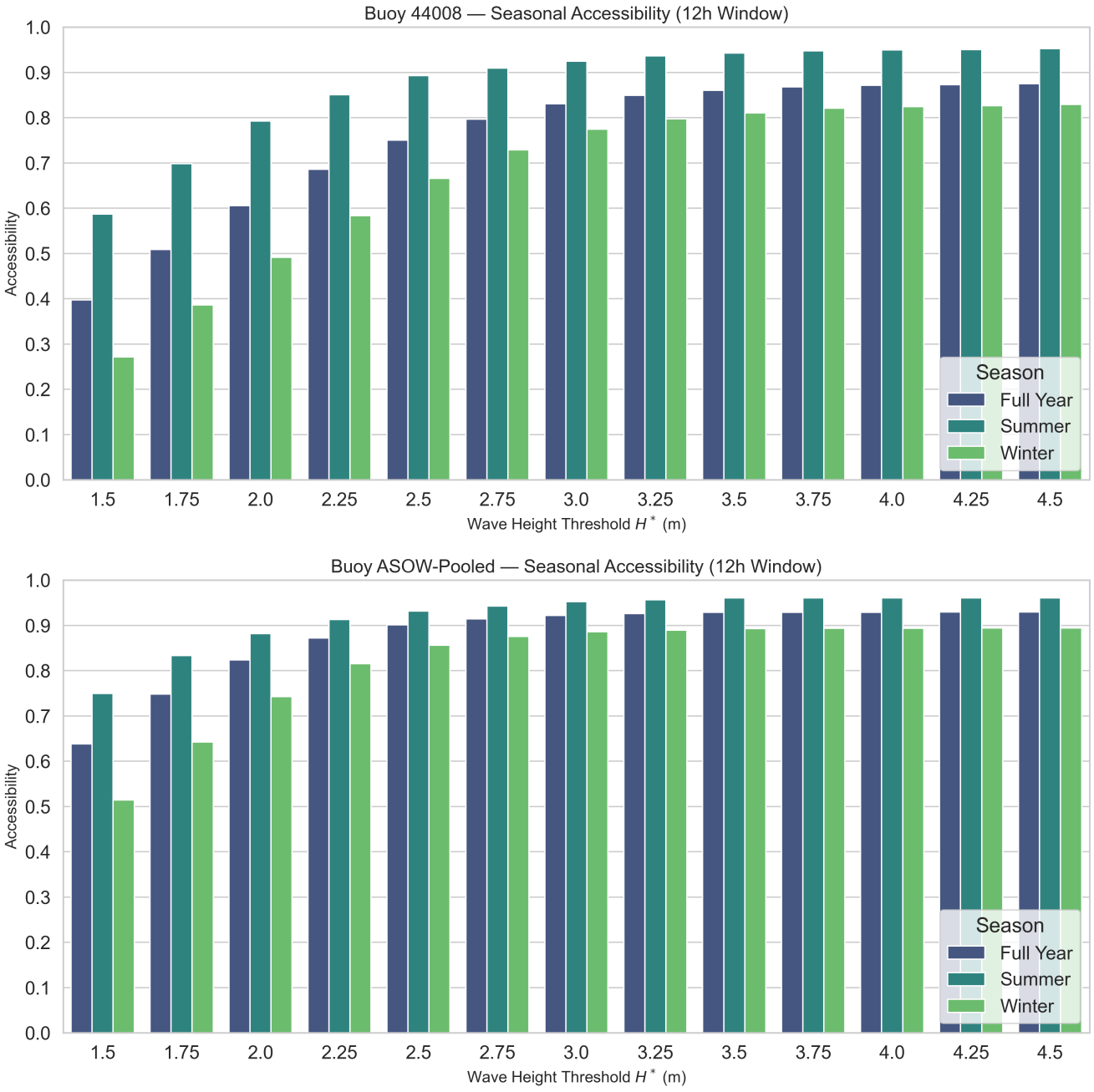

图9 季节性可达性随显著波高阈值 H^* 的变化情况，展示了位置44008（上图）和 ASOW 合并数据（下图）。结果按全年、夏季和冬季分别呈现，任务时长为 $\zeta = 12\text{-}h$。

4.2.2 可服务性

第4.2.1节的分析表明，可达性在空间和时间上均存在显著差异。空间差异尤其凸显了依赖单一地点估算可能如何误导作业规划；而时间变化则揭示了任务持续时间和季节性如何对有利条件的持续性产生关键影响。因此，这些发现表明，尽管可达性具有参考价值，但仅凭可达性可能不足以真实反映任务成功的可能性。这凸显了采用更相关的物流指标——可服务性——的必要性，以便更准确地考量海上作业的时空动态。

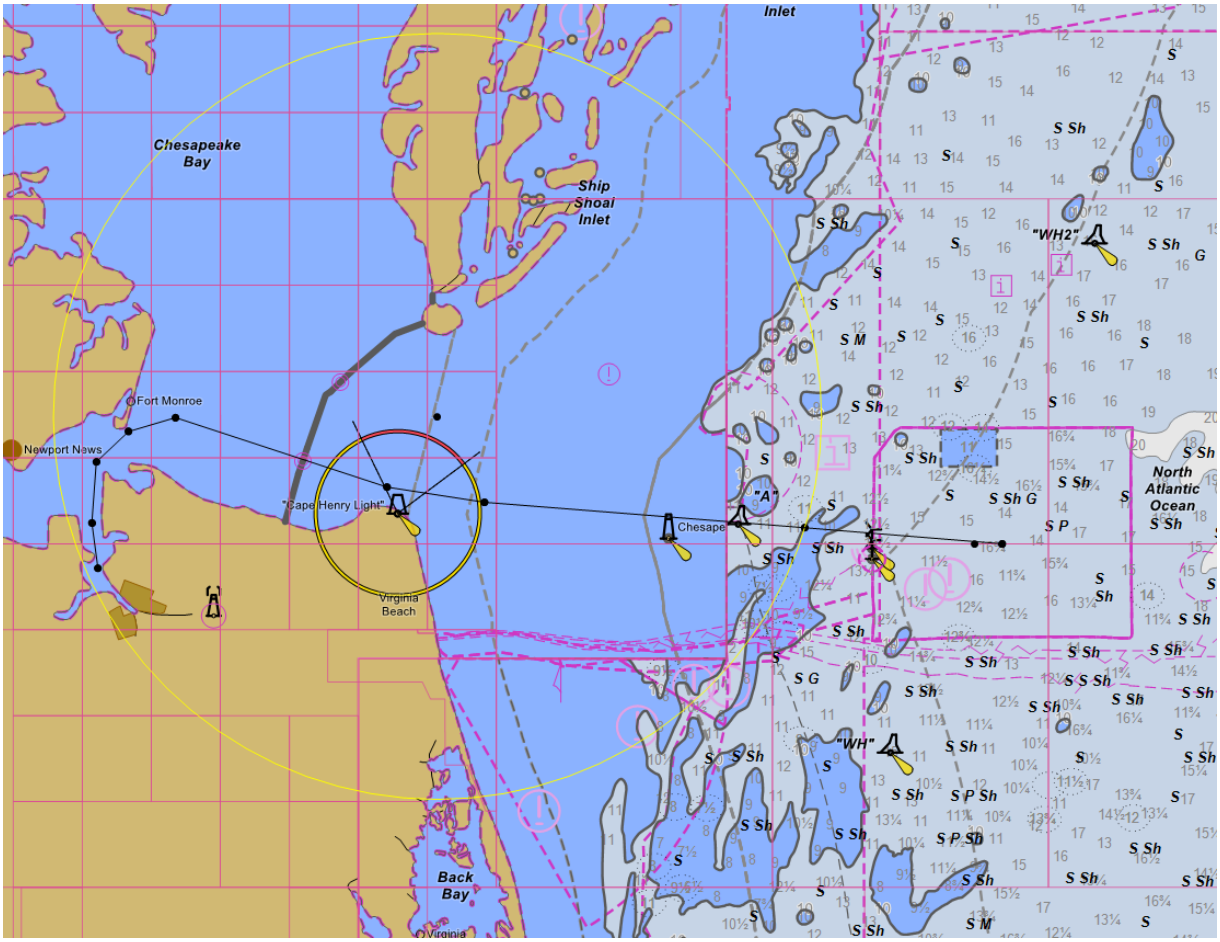

图10 航海图展示了一条具有代表性的中大西洋船员转运船（CTV）服务航线（黑色实线），从诺福克港口区域驶往切萨皮克湾入口附近的一处海上风电地点。背景图像取自美国国家海洋和大气管理局的电子航海图[39]。

作为案例研究，我们考察一项由人员转运船执行的12小时往返任务，航线位于美国中大西洋地区（MAR），但我们的框架也适用于持续时间和复杂程度各异的航线。美国中大西洋地区有多个已租赁及规划中的海上风电项目。图10展示了美国中大西洋地区的航海图，以及具体的人员转运船行驶路径（以黑线表示）；该路径由我们的行业合作伙伴 Blue Ocean Transfers（BOT）提供。BOT提供的任务运行剖面规定，船舶从港口出发，经过五小时航程后抵达切萨皮克湾入口附近的海上位置，并在此开展三小时的服务活动，然后返回港口。随后，我们根据运行剖面中的船速输入确定船舶沿航线的位置，并将航线离散为六个空间位置（港口、目的地和四个中间点）。除船舶停留三小时的目的地外，船舶在每个位置停留一小时，由此得到以下位置矩阵： $\mathbf{P}$。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 100000000000 \\ 010000000001 \\ 001000000010 \\ 000100000100 \\ 000010001000 \\ 000001110000 \end{bmatrix}$$

图 11 展示了航线上各地点的可接近性和可达性得分（面板 A），以及这些地点可达性数值的空间分布（面板 B），假设 $H^* = 2\ m$、$v = 12\ ms^{-1}$ 和 $\zeta = 12h$。面板 A 显示，可接近性与可达性得分存在明显差异；随着船舶航行的距离增加，这些得分似乎也随之

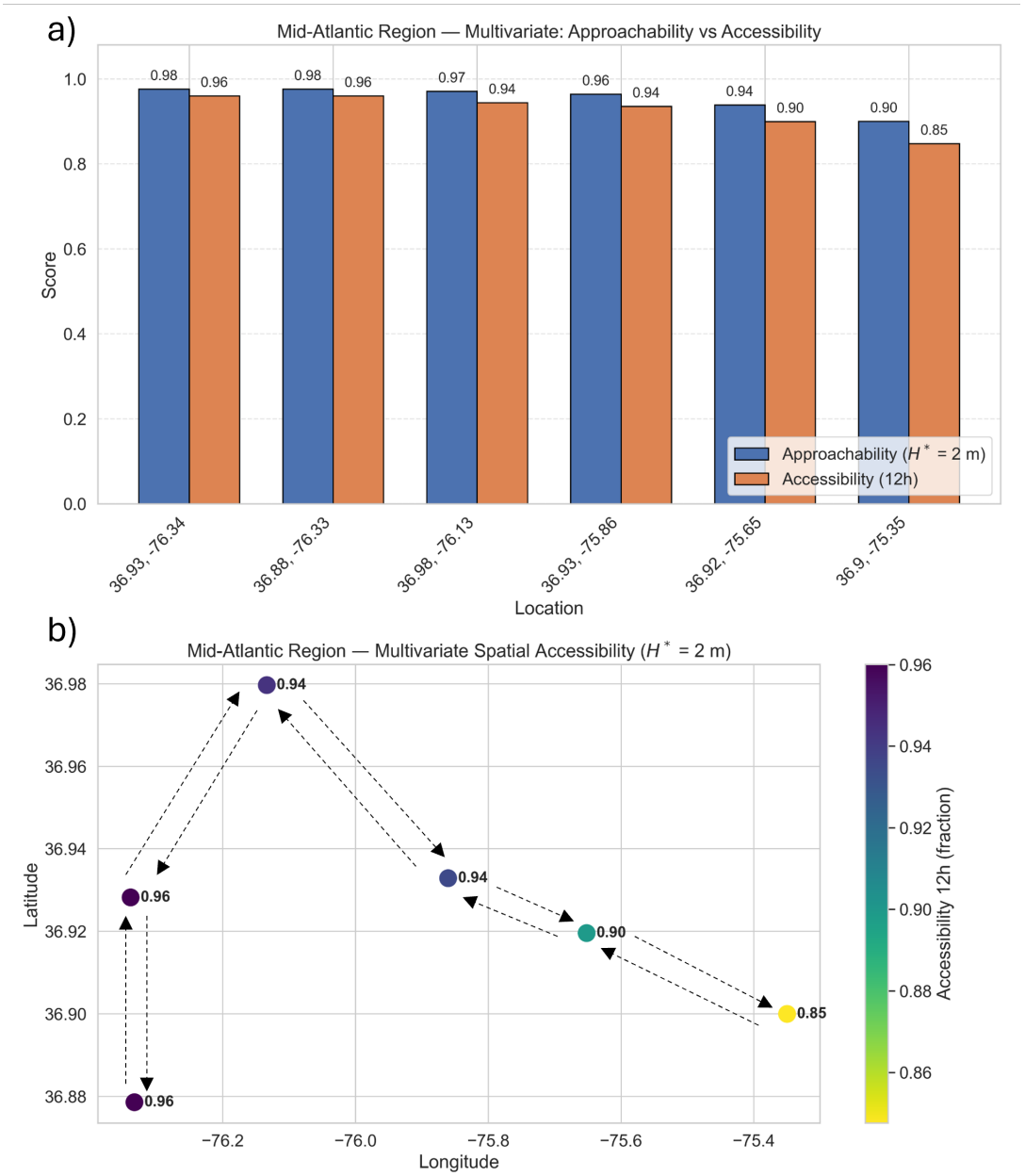

图 11 面板 A：航线上每个位置的可接近性和可达性。面板 B：沿航线的可达性空间变化。假设采用 $H^* = 2m$、$v^* = 12ms^{-1}$ 和 $\zeta = 12h$。箭头表示图10中所示的 MAR 船舶航行路径，船舶从最左下方的位置（港口）驶向最右侧的位置（风电场），然后返回。

距离。在海上目的地站点（36.9° N，75.35° W），不考虑天气窗口持续时间的可接近性，明显至少低估了5%的任务可行性。图B更清楚地凸显了船舶从港口驶往海上目的地的过程中，可达性如何逐渐降低；距离更远的地点，有利条件持续出现的频率也更低。风险规避型规划者可能会建议将0.85作为代表任务成功的可达性评分；正如一句常见格言所说：“木桶的容量取决于最短的那块木板，”这意味着只要有一个地点不可达，整条航线就不可达。然而，运行现实是，在一条持续 ζ 小时的服务航线上，我们不需要任何一个特定地点的有利条件持续 ζ 小时。因此，以海上场址作为整个任务可达性的指标可能过于保守，导致因海洋气象评估不够精确而错失机会。同样，使用港口的可达性评分，或所有场址的平均可达性，都会低估任务成功的可能性。

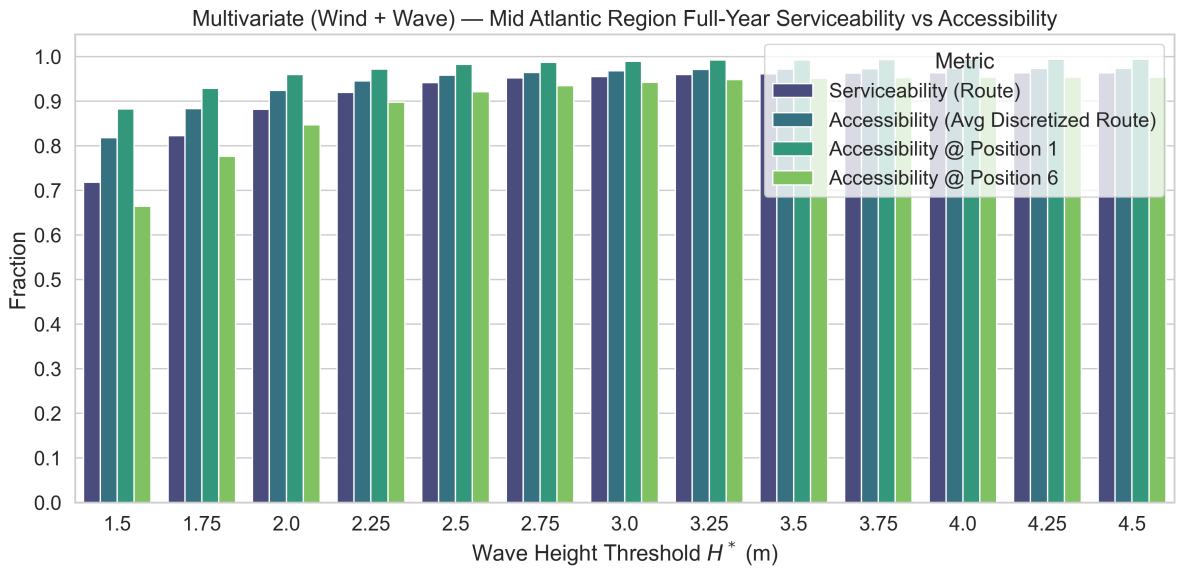

图12 中大西洋航线上航线可服务性与多种12小时可达性评估的比较。位置1代表港口（36.88, -76.33），位置6约为海上风电场的中心点（36.90,-75.35）。可服务性数值更接近目的地的可达性，这反映了在目的地停留时间较长，而目的地的海洋气象条件更为恶劣。

我们推测，可服务性是一种能够缓解这些局限的物流指标。图12展示了不同波高阈值下各条航线特定的可服务性（使用式（7）中提出的表达式计算），并与规划人员在缺少可服务性指数时可采用的另外三种评分进行比较：位置1（港口）的可达性、位置6（目的地）的可达性，以及航线平均可达性（六个位置的平均值）。值得注意的是，可服务性数值始终低于航线的平均可达性，其数值更接近目的地的可达性，而非港口的可达性。尽管船舶在港口和航行途中都会停留一段时间，但任务的大部分时间（三小时）是在海上场址度过的，而那里的条件往往更为恶劣。任务在目的地暴露于恶劣条件下的时间比例更高，这实际上使整体可服务性指标向风电场的可达性水平降低。

另一项观察结果是，随着 H^* 增加，位置1的可达性得分上升得更快，这进一步印证了较平静且更避风的港口条件能够持续提供较高的可作业窗口。相比之下，位置6的可达性曲线在所有阈值下都较低，因此限制了可服务性，即使在 H^* 较高时也是如此。因此，我们认为，可服务性数值更真实地反映了船舶在整个任务期间的作业航程。

4.3 | 其影　准确海洋气象信息对可达性和可服务性的影响　　y

为确保对航线层面的可达性和可服务性进行精准评估，有必要获取高分辨率海洋气象信息。这是我们在第3.1节介绍的TSR海气象模型的优势之一。在本节中，我们将考察该模型对于可达性和可服务性评估的价值。我们认为，在可服务性的背景下，使用这一海洋气象模型尤为恰当。这与仅依赖数值模型数据的做法形成对比，后者是文献中通常采用的方法。虽然数值模型数据覆盖范围广泛，但其时空分辨率可能不足以解析航线层面的动态变化，并且在严重海洋气象条件下可能表现出明显偏差，而这些条件与可达性和可服务性评估最为相关。

为说明这一点，图13比较了第2.1节所述拟合TSR模型与数值模型计算得出的航线平均可达性和可服务性数值。由图可见，在较低阈值下（$H^* \leq 2m$），数值模型得出的可达性和可服务性数值幅度大于TSR模型的结果。可服务性数值的差异更加显著（平均约为1–4%）。这可能归因于数值模型存在偏差，导致其高估任务成功的可能性。

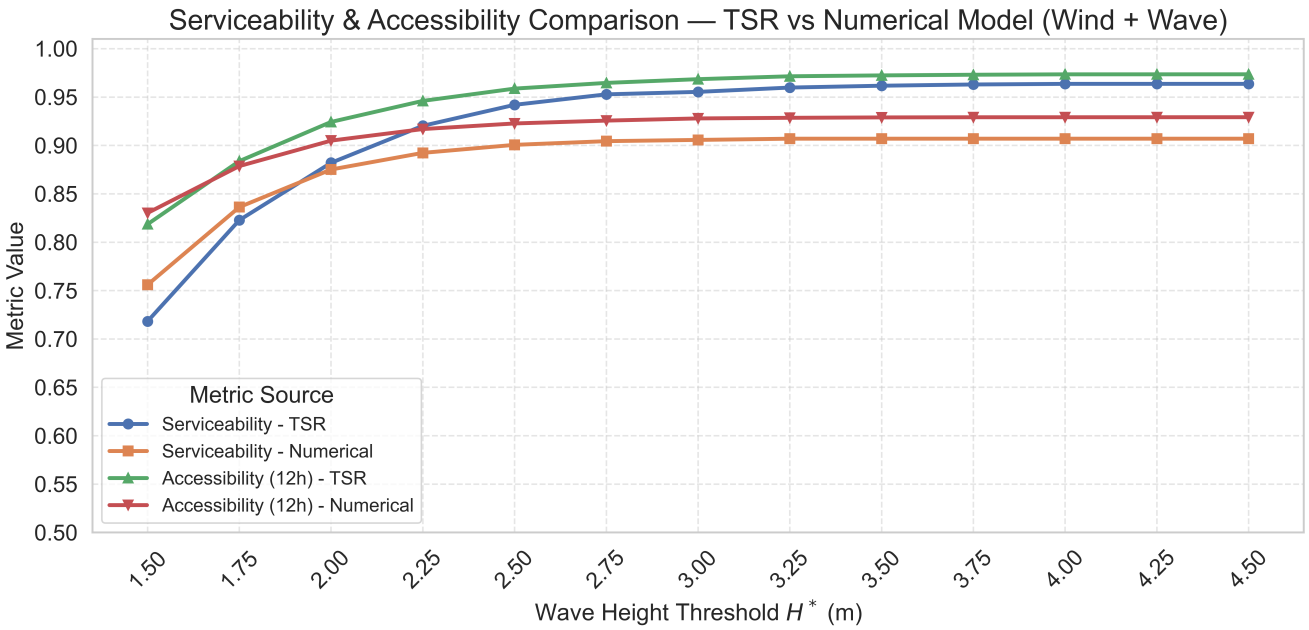

图13 使用数值模型与 TSR 模型得出的可达性和可服务性评分。使用数值模型似乎会在较低阈值下高估可达性和可服务性，而在较高阈值下低估二者。

值得注意的是，在较高波高阈值下（$H^* > 2m$），数值模型与TSR模型之间的关系会反转：平均而言，数值模型得出的可达性和可服务性评分低于TSR模型的结果。我们认为，考虑到该模型具有更强的解释力，尤其是在严重海洋气象条件下能够更有效地降低模型误差，因此TSR模型得出的数值更能反映潜在的真实值；这一点已在第4.1节中说明。因此，数值模型可能会低估波高约为1.5至2米时的可达性和可服务性数值，但在阈值大于2米时则可能反过来高估这些数值。较低阈值与人员转运船（CTV）的日常运营更相关，而较高阈值通常适用于较大型船舶；这类船舶通常用于执行耗时更长、复杂程度更高的任务。

图13中观察到的可服务性评分差异引出了一个值得探讨的问题：这种百分比点差异对海上能源运营经济性的影响。要明确回答这一问题，需要将可服务性框架严格整合到运维成本模型中，这也是后续工作的重点。尽管如此，我们假设，将高分辨率、特定航线的可服务性信息纳入船舶调度和运营与维护模型，可能会为海上风能运营带来显著的经济收益。这是因为此类信息能够帮助运营人员更准确地识别适合安排船舶的机会性天气窗口，从而降低物流需求和运营与维护成本。文献和实践中不断积累的证据支持这一假设：更高分辨率的海洋气象和物流信息能够显著改善海上作业效率和整体项目可用率[14,40,41]。

5 结论与未来研究方向

本文提出了一个用于可达性和可服务性评估的方法框架，重点关注美国东海岸，以为该地区海上风能区域的物流规划、开发以及运营与维护提供参考。本研究旨在弥补针对该地区海气象特征量身定制的详细物流信息的不足，而这类信息是降低任何大型海上能源开发项目风险的关键输入。我们的研究取得了若干独特贡献，包括首次公开发布并全面评估美国东海岸的物流可达性，以及提出一项新的物流指标——可服务性。与文献和实践中常用的指标不同，该指标不仅考虑天气模式的时间持续性，还考虑船舶沿航线行驶时所经历的海洋气象条件

情况。我们认为，与传统的可接近性和可达性评估相比，这项指标能够更真实、更贴合实际运营地呈现任务成功的真实可能性。这些贡献共同提供了一种严谨的方法，将高分辨率海洋气象信息与符合实际情况的海上风电场建设以及运维船舶调度与排程联系起来。这些方法使规划人员能够超越静态的点位可达性分析，转而评估整条航线的可行性，并纳入有关海洋气象条件时空变异性的重要信息。

虽然第4.2.2节所述的可服务性案例研究聚焦于大西洋中部地区某一特定的12小时作业剖面，但我们指出，这仅是示例，并不限制所提出的可服务性指标的一般适用性。事实上，第3.3节提出的可服务性指标适用于任何时长和复杂程度的航线，前提是能够获得船舶的运行剖面信息。这一要求是合理的，因为海员和物流规划人员通常都能获得此类剖面信息，以用于标准海上作业。可利用可服务性框架的这种普适性，对不同区域航线在多样环境和作业条件下的可服务性评分进行比较评估。此类评估将为详细的项目选址决策、技术经济分析、船舶调度和运维规划提供极有价值的信息，从而取代常用的空间独立指标；这些指标可能会错误估算海上作业所涉及的实际物流需求和成本。

展望未来，本研究还有多种可能的拓展方向。例如，未来的分析可纳入更多与运营相关的海洋气象变量（如波浪周期、波向），以评估可达性和可服务性。此外，虽然本文聚焦于美国中大西洋地区，但该框架可直接推广至其他海上风电潜力显著的地区，包括美国境内的太平洋沿岸和墨西哥湾，以及世界其他地区。此外，借助气象海洋模型的概率特性，未来还可开发一种数据驱动的模拟框架，直接用于在考虑环境和作业不确定性的情况下，为海上风能开发及其运营与维护的物流规划提供依据。该框架有助于得出经过验证的结论，说明不同地区之间以及季节性可服务性评分差异会如何影响船舶调度决策、运维计划和整体项目可用率。另一个值得关注的方面是，利用船舶作业航线中的更多信息，获取有关特定航线燃料消耗、排放和成本的重要概率性洞见。随着人们对船舶电气化的兴趣不断升温，这一点尤为重要；船舶电气化不仅适用于海上风电，也适用于蓝色经济中其他以海洋为基础的产业。

6 参考文献

参考文献

1. Musial W, Spitsen P, Duffy P, 等。《海上风电市场报告：2023年版》。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2023年。2. Musial W, Ram B. 美国大型海上风电：机遇与障碍评估。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2010年。3. 研发路线图4.0。技术报告，国家海上风能研究与发展联盟；纽约州奥尔巴尼：2024年。4. Gallaher A, Graziano M, Axon S, Bertana A.《破风》：北大西洋地区美国与欧洲在海上风能领导力方面的方法比较。《可再生能源与可持续能源评论》2023年；187：113766。doi: 10.1016/j.rser.2023.113766 5. 新泽西州环境保护部—海上风电。https://dep.nj.gov/offshorewind/；。6. Musial W, Spitsen P, Duffy P, 等。《海上风电市场报告：2022年版》。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2022年。7. Sheng S, Fields J, Cooperman A, Shields M. 风电场运营与维护的挑战及研究机遇。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2023年。8. Maples B, Saur G, Hand M, Van De Pietermen R, Obdam T. 降低海上风能成本的安装、运营与维护策略。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2013年。

9. Stehly TJ, Beiter PC. 2018年风能成本评估。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2020年。10. Dalgic Y, Lazakis I, Dinwoodie I, McMillan D, Revie M. 海上风电场运营与维护活动的高级物流规划。《海洋工程》2015年；101：211–226。11. Dinwoodie I, Endrerud OEV, Hofmann M, Martin R, Sperstad IB. 海上风电场运营与维护仿真模型验证的参考案例。《风能工程》2015年；39(1)：1–14。12. Elsahhar AU, Ezzat AA, Elsabbagh A, Elbanhawy AY. 老化风电场故障与维护记录分析，为资产寿命终止管理提供依据。《风能》2025；28(6)：e70024。13. Carroll J, McDonald A, McMillan D. 海上风力涡轮机故障率、维修时间和非计划运维成本分析。《风能》2016年；19(6)：1107–1119。14. Papadopoulos P, Coit D, Ezzat A. 把握机会：考虑可达性、发电量和船员调度的海上风电场维护优化。《*IEEE*可持续能源汇刊》2021年；13(1)：111–121。15. Papadopoulos P, Fallahi F, Yildirim M, Ezzat AA. 海上风电场发电与维护的联合优化：平衡风能运营的短期和长期需求。《*IEEE*可持续能源汇刊》2023年；15(2)：835–846。16. Catterson V, McMillan D, Dinwoodie I, 等。用于评估海上风电维护通行波高预报器的经济影响指标。《风能》2016年；19(2)：199–212。17. Papadopoulos P, Coit D, Ezzat A. STOCHOS：海上风电场随机机会式维护调度。《*IISE*汇刊》2022年：1–15。18. Martini M, Guanche R, Losada IJ, Vidal C. 北海海上风电场运营与维护可达性评估。《风能》2017年；20(4)：637–656。19. Van Bussel G, Bierbooms W. DOWEC海上参考风电场运营与维护策略中不同运输方式的分析。《*Proc OW EMES*，那不勒斯》2003年：1–12。20. Silva N, Estanqueiro A. 天气状况对葡萄牙海上风电场运营作业窗口期的影响。《风能工程》2013年；37(3)：257–268。21.《美国海上风电：支援船瓶颈隐现》。https://www.marinelink.com/news/ offshore-wind-support-vessel-bottlenecks-508436；2024年。访问日期：2024年1月19日。22. Shields M, Marsh R, Stefek J, 等。本土海上风能供应链需求。技术报告，美国国家可再生能源实验室（NREL）；科罗拉多州戈尔登（美国）：2022年。23. Van Bussel GJ, Bierbooms W. DOWEC海上参考风电场：运营与维护运输分析。《风能工程》2003年；27(5)：381–391。24. Rowell D, Jenkins B, Carroll J, McMillan D. 漂浮式风电场场址的可达性与现有固定式风电场场址相比如何？《能源》2022年；15(23)：8946。25. BOEM。BOEM海上可再生能源活动。https://www.boem.gov/renewable-energy/offshore-renewable-activities；。26. 美国商务部、美国国家海洋和大气管理局。NDBC站点页面。https://www. ndbc.noaa.gov/station_page.php?；1996年。国家数据浮标中心。27. Atlantic Shores Offshore Wind（ASOW）。Atlantic Shores海上风电数据。https://erddap.maracoos.org/erddap/ tabledap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000；2020年。28. 纽约州能源研究与发展局。NYSERDA漂浮式激光雷达浮标数据。https://oswbuoysny.resourcepanorama.dnvgl.com/；2019年。

29. Storm Glass。API 文档。https://docs.stormglass.io/#/sources；2025年。Stormglass.io。30. 美国国家海洋和大气管理局。WAVEWATCH III 模型说明。https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/；2025年。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）。31. ncep.noaa.gov 上的 NOMADS。Nomads.ncep.noaa.gov。https://nomads.ncep.noaa.gov/；无日期。32. Gilbert C, Browell J, McMillan D. 概率性通行预测，以改善海上作业。《国际预测学杂志》2021；37(1)：134–150。33. Ye F, Brodie J, Miles T, Ezzat AA. AIRU-WRF：一种物理引导的时空风速预测模型及其在美国中大西洋海上风能区的应用。《可再生能源》2024年；223：119934。34. Türk M, Emeis S. 海上湍流强度与风速的关系。《风工程与工业空气动力学杂志》2010；98(8–9)：466–471。doi：10.1016/j.jweia.2010.02.005 35. Dowell J, Zitrou A, Walls L, Bedford T, Infield D. 分析风浪数据以评估海上风电场的维护通行。在：ESREL。；2013年：743–750。36. McMorland J. 漂浮式风电的运营与维护：整体方法综述、建模与机会式维护策略。博士论文。斯特拉斯克莱德大学，苏格兰格拉斯哥；2024年。37. Byon E, Ding Y. 基于部分可观测马尔可夫决策过程的风力涡轮机季节相关状态维修。《*IEEE*电力系统汇刊》2010；25(4)：1823–1834。38. Besnard F, Fischer K, Tjernberg LB. 海上风电场维护支持组织优化模型。《*IEEE*可持续能源汇刊》2012；4(2)：443–450。39. 美国国家海洋和大气管理局（NOAA）。海岸测量办公室。电子海图 US2EC03M（发布于2025-07-22）和 US3EC08M（发布于2025-09-03）。NOAA 电子海图；2025年。访问日期：2025年9月4日。40. Petersen C, Ji J, Ye F 等。数据驱动的概率模拟：支持蓝色经济的船舶作业。审稿中2025。41. Kolios A, Richmond M, Koukoura S, Yeter B. 天气预报不确定性对海上风电场可用性评估的影响。《海洋工程》2023；285：115265。