# 黄海气象海况对海上发射运载火箭的影响

林 晨<sup>1</sup>, 蔺而亮<sup>1</sup>, 刘 旸<sup>2</sup>, 李振凯<sup>1</sup>, 杨晓论<sup>1</sup>

(1.太原卫星发射中心,山西太原 030001; 2.军事科学院,北京 100094)

摘 要:海上发射运载火箭的实施过程会受到气象海洋环境的影响和制约,气象海洋环境会直接影响海上发 射窗口期的选择及发射安全。为避免海上发射在复杂气象海况条件下发生设备重大损坏、窗口长期延后和人员安 全事故等问题,通过分析黄海海域波浪场、风场、温度场及降水场的分布特征及变化规律,对基于季节变化特征的 海上发射实施阶段及季节性预防趋势进行分析总结,为以后在不同季节极端天气下海上发射运载火箭提供参考。 关键词:黄海海域;海上发射;波浪场;风场;降水场

中图分类号: V 475.1 文献标志码: A DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.02.004 引用格式: 林晨, 蔺 而亮, 刘 旸, 等. 黄 海气象海况对海上发射运载火箭的影响[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41 (2): 20-27.

# Influence of Meteorological Sea Conditions Over the Yellow Sea on the Implementation of Sea Launch

LIN Chen<sup>1</sup>, LIN Erliang<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, LI Zhenkai<sup>1</sup>, YANG Xiaolun<sup>1</sup>

(1.Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, Shanxi, China;2.Academy of Military Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The implementation process of sea launch is bound to be affected and restricted by the meteorological and marine environment, which directly affects the selection of sea launch windows and launch safety. In order to avoid the occurrence of major equipment damage, long-term window delay, and personnel safety accidents in the sea launch under complex weather conditions, in this paper, the distribution characteristics and change rules of the wave field, wind field, temperature field, and precipitation field in the Yellow Sea are analyzed, and the implementation phase and seasonal prevention trend of the sea launch are designed and analyzed based on the characteristics of seasonal changes. It provides reference experience for the implementation of sea launch under extreme weather conditions in different seasons.

Key words: Yellow Sea; sea launch; wave field; wind field; precipitation field

0 引言

我国开拓海上航天工作以来,已于黄海海域完成多次运载火箭发射任务,海上发射运载火箭日益频繁。海上发射具有提高火箭运载能力、航落区安全性高、可执行特殊轨道发射等优势<sup>[11]</sup>。当前多型号运载火箭考虑实施海上发射,由此可见海上发射对于中国航天发展起到举足轻重的作用,是未来航天领域重要的发射模式。然而机遇与风险并存,数

次海上发射虽然都圆满完成,但恶劣气象海况所导 致的问题也愈发突出,严重影响海上发射实施的稳 定性和可靠性<sup>[2]</sup>。

黄海位于北纬 31°43′~39°02′,东经 119°10′~ 126°17′,西部是江苏北部、朝鲜和辽东半岛。黄海 的面积大约 400 000 km²,最深的地方在黄海的东南 方,大约有 140 m。根据黄海天然的地理特点,海洋 学家把黄海划分成北部黄海与南部黄海 2个区域<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2024-02-07;修回日期:2024-02-25

作者简介:林 晨(1995—),男,本科,工程师,主要研究方向为航天测试发射、气象海洋观测、预报分析。

通信作者: 蔺而亮(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为气象海洋观测、预报分析、资料同化。

黄海的气象海况要素具有明显的季节性和纬向性<sup>[4]</sup>。针对黄海地区的波浪特征,国内外学者已 经做了很多相关方面的研究。其中,有一些研究是 利用实测资料开展的,因实测资料具有时空限制性 和区域性,无法满足在长时间跨度、大区域尺度情 况下对波浪分布特征的研究需求<sup>[5]</sup>。卫星遥感资料 比海上单点观测具有空间分辨率高、覆盖范围广、 可连续观测等优势,已被越来越多地应用于海面 风、浪场的研究<sup>[6]</sup>。

本文对黄海区域部分要素场数据的年、季度变 化规律进行分析,全面分析比较各时段开展海上发 射的优缺点及准备需求,所得结论对火箭海上发射 海洋水文保障具有重要的科学参考价值。

## 1 资料应用

本文采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)第五代再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5,ERA5)的高时空分辨率的气象要素场(2m温度、 10m风场、降水等,0.25°×0.25°)和波浪场(0.5°×0.5°), 时间分辨率为1h,针对黄海区域近10年(2013— 2022年)的特征进行分析,包括四季2m温度、10m风场、总降水量、降水时间、有效波高的分布规律。根据 资料的分辨率特征,选取的研究范围为东经119.375°~ 126.875°,北纬31.068°~39.809°,范围如图1所示。



图1 研究范围 Fig.1 Study region

ECMWF 是全球知名的再分析数据集。相对 于其他的气象数据,ECMWF 具有如下优势:首先, 在空间分辨率上有较大的改善,分辨率较高;其次, ECMWF 同时也包括海上各要素场形成趋势随时 间的改变情况,与其他再分析数据相比数据准确性 更高。许多研究人员将其用于大气和海洋研究,例 如,NASEEF 等利用 39 年 ERA5 数据(1979— 2017年)分别研究了台风对印度洋海域百年一遇波 浪极值的影响、该区域波浪及气候特征的变化趋 势。BRUNO等<sup>[7]</sup>利用实测资料评估了ERA5数据 在涌浪占主导海域的适用性,结果证明ERA5数据 具有良好的适用性。

2 黄海气象海洋要素场分布特征分析

#### 2.1 各要素场的全年分布

统计分析了 2013—2022 年间隔为1h的 ERA5 海浪场、风场再分析资料,多年平均有效波高、风速 与风向在黄海海域的分布,如图2所示。由图2可 知,黄海海域平均有效波高呈现由南向北降低的趋 势,远海高近岸低,全年平均有效波高在1.5 m 以下。





平均风速整体分布与波高分布较为一致,大部 分海域平均风速在5~7 m/s。黄海北部、中部风向 以西北向为主,而南部风向多为东北向。温度场整 体分布呈现自北向南逐步递增趋势,全年温度分布 季节性特征明显,最高温可达26℃,最低温可至 -4℃。降水场分布呈现自西北向东南逐步递增趋 势,全年降水分布季节性特征明显。

#### 2.2 波浪场的季节分布

黄海的波浪具有明显的季节性。为研究南海

波浪场季节变化特征,将2013—2022年时间间隔为 1h的有效波高数据进行多年季节平均。

由图3可知,黄海有效波高的季节性变化显著, 冬季(12—2月)因风力强,有效波高最大,中部和南 部海区略高于1.3 m,其他海区在0.8~1.3 m;春季 (3—5月)黄海波浪减弱,除黄海东南部略大于 1.0 m外,其余海区有效波高均小于1.0 m;夏季(6— 8月)黄海北部和中部波浪进一步减弱,在0.5~ 0.9 m;秋季(9—11月)波浪开始增大,黄海中部和 南部增大到1.0~1.4 m。



Fig.3 Average annual effective wave height of each season in the yellow sea during 2013-2022

#### 2.3 风场的季节分布

黄海区域受季风影响明显,其风场的基本特征 为冬、夏季风盛行,具体分布如图4所示,冬季风持 续时间为10月份至次年3月份,期间由于蒙古高压 控制黄海北部,偏北风盛行。4月份风向多变,夏季 风持续时间为5月份至9月中旬,期间受到印度低 压和太平洋副热带高压的影响,导致偏南风盛行。 黄海海域沿岸风力较弱。

黄海海域春季平均风速为5~7 m/s,夏季北黄 海为4~5 m/s,南黄海为5~6 m/s;秋季风力增大, 平均风速为5~7 m/s;冬季风力最大,平均风速为 6~8 m/s,黄海东南部可达8~9 m/s。

#### 2.4 温度场的季节分布

黄海气温分布的显著特点是自南向北气温递 减,具体分布如图5所示。夏季气温最高,大部海域 为22~26.4℃;秋季黄海北部和中部气温为16~ 18.4℃,黄海南部气温18~20.4℃;冬季气温最低, 黄海北部气温为-4~4.4℃,黄海南部气温为6~ 10.4℃;春季黄海气温为8~14.4℃。





Fig.4 Average annual wind speed and direction over the Yellow Sea in each season



图5 黄海海域各季节多年平均气温

![](_page_3_Figure_7.jpeg)

#### 2.5 降水场的季节分布

黄海各季节总降水量的分布特点是:西北部 少,东南部多,具体分布如图6所示。 黄海降水以降雨为主,北部沿岸冬季偶有降 雪,但雪量不大。年降水量低于东海而多于 渤海。

![](_page_4_Figure_2.jpeg)

Fig.6 Average annual total precipitation of the Yellow Sea in each season

黄海夏季降水量最多,黄海南部降水量在 400 mm以上;冬季降水量最少,黄海北部和西部降 水量在100 mm以下,黄海东部和南部降水量在 100~200 mm;春季降水量为100~300 mm,秋季降水量为150~400 mm。黄海各季节降水天数的分布特点与总降水量基本一致,具体分布如图7 所示。

![](_page_4_Figure_6.jpeg)

Fig.7 Average annual precipitation days in each season over the Yellow Sea

3 不同气候场分布特征对海上发射 影响情况分析及实施建议

波浪场、风场主要对海上航行、窗口选取、发射 稳定等方面存在一定影响。恶劣的波浪场环境可 能对船只航行安全构成威胁,剧烈晃动条件下极可 能影响火箭对准流程,导致精度收敛无效,最终影 响发射进程。降水场主要对海上无线通信及设备 工作状态产生具体影响,高湿环境下部分无线设备 通信介质状态发生改变,工作效能降低,很大程度 上影响通信信号传输质量。温度场变化主要影响 设备工作状态,温度变化幅度较大的区域会使设备 工作性能更不稳定。

#### 3.1 波浪场

通过对黄海海域波浪场2013—2022年,时间间 隔为1h的ERA5资料进行分析,数据能够很好地反 映黄海海域10年的波浪场变化情况及年、季节具体 分布特征。年均有效波高在1.5m以下,季节分布 特征明显,由于受到哈德莱环流影响,平均有效波 高呈现出从夏季到冬季逐渐增大趋势,在冬季达到 顶峰;从冬季到夏季逐渐减弱趋势,在夏季降至最 低点。

根据波浪场特征分析结论,海上发射宜选取春季末期、夏季、秋季初期时段进行,该时段黄海波浪场有效波高趋势偏小,出现极端海况可能性最小。 根据波浪场季节分布特征情况,在不同季节进行海上发射时,应做好不同程度设备紧固、人身安全防护工作。当在冬季开展海上发射时,应优先选取黄海北部、西北部以及近岸海域实施发射<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 风场

分析 ERA5 2013—2022年的每小时风场资料, 数据能够很好地反映黄海海域10年的风场变化情况及年、季节具体分布特征。年均风速在5~7 m/s, 季节分布特征明显,由于受到以冬、夏季风系统盛 行的影响,风向变化情况明显。在冬季,以北风和 西北风居多;在夏天,以东南风和西南风居多。平 均风速呈现出从夏季到冬季逐渐增大趋势,在冬季 达到顶峰,以及从冬季到夏季逐渐减弱趋势,在夏 季降至最低点。综合数据分析,黄海地区的风场分 布呈显著的季节、区域性特征,其中大风风场集中 于秋、冬季,秋季主要位于朝鲜半岛南侧海域;冬季 大风风场主要集中于山东半岛东北、东南侧,朝鲜 半岛南侧,其中风场极大值区域主要集中于朝鲜半 岛的西南侧和南海海域2个区域。临近海岸后,风 场强度急剧下降,表明风受陆地下垫层的作用 强烈<sup>[9]</sup>。

根据风场特征分析结论,海上发射宜选取春、 夏、秋季时段进行,该时段黄海风场整体趋势偏小, 大风风场分布于南侧,整体出现大风天气的情况可 能性小,冬季大风风场分布范围较为广泛,出现大 风情况可能性大。根据风场季节分布特征情况,在 不同季节进行海上发射时,应做好不同程度设备紧 固防护工作。在秋季末期开展海上发射时,应优先 选取黄海中部及中部以上区域;在冬季开展海上发 射时,应优先选取黄海西部、山东半岛南部和近岸 区域实施发射。

#### 3.3 温度场

分析 ERA5 2013—2022年的每小时温度场资料,数据能够很好地反映黄海海域10年的温度场季节变化具体分布特征。温度场季节分布特征明显, 在冬季,温度呈明显的纬向分布,黄海北部及山东 半岛南侧部分海域出现0℃及以下的温度情况,其 他季节平均温度在15℃以上。温度变化季节性特 征明显。

根据温度场特征分析结论,海上发射宜选取 春、夏、秋季时段进行,该时段黄海温度场整体温度 变化幅度小,温度在15℃以上,当需要选取冬季开 展海上发射时,应做好设备低温防护工作,并选取 黄海南侧海域实施发射<sup>[10]</sup>。

#### 3.4 降水场

分析 ERA5 2013—2022年的每小时降水场资料,数据能够很好地反映黄海海域近10年的降水场变化情况及年、季节具体分布特征,整体分布特征较波浪场、风场、温度场存在明显差异。年均降水纬向分布、季节分布特征明显,由于受到海洋气候变化影响,降水变化情况明显。夏季,黄海海域整体降水量大,纬向分布趋势差异较小;冬季,降水大值区域整体向南收缩,黄海中部以北区域降水量大幅度减小。平均降水量呈现从冬季到夏季逐渐增大趋势,在夏季达到峰值,以及从夏季到冬季逐渐减小趋势,在冬季降至最低点。综合数据分析黄海地区的降水场分布呈显著的季节、纬向特征,其中

夏季降水场大值区域广泛分布,尤其在沿岸及黄海 南部达到峰值,春、秋过渡季节降水大值区域向中 部移动,冬季则主要集中于朝鲜半岛南侧<sup>[11]</sup>。临近 海岸,受海上与陆地冷暖气流剧烈的交汇过程,降 水强度增大。

根据降水场特征分析结论,海上发射宜选取 春、秋、冬季时段的中部、北部区域进行,该时段黄 海降水场整体趋势偏小,降水场大值区域多分布于 南侧,整体出现极端降水天气的情况可能性小,夏 季降水大值区域覆盖全面,出现极端降水情况可能 性大。根据降水场季节分布特征情况,在不同季节 进行海上发射时,应做好相应的设备防雨工作。当 在夏季开展海上发射时,着重避开沿岸海域及黄海 南部海域实施发射。

### 4 结束语

本文根据未来高频次开展海上发射的潜在需求,利用2013—2022年时间间隔为1h、不同分辨率的ERA5资料,对波浪场、风场、温度场、降水场数据进行了年、季度、纬向的分析研究。

黄海海域的各要素场在分布上存在明显差异。 综合情况分析,春季中后期、夏季、秋季初中期情况 最佳,该时段黄海海域大部分区域风速、浪高整体 偏小,大风巨浪出现频率低,温度适宜设备工作,但 需要进行完备的设备防雨防潮防护工作,从而为火 箭发射窗口提供更多更稳定的气象海洋时间窗 口<sup>122</sup>。冬季整体情况最为恶劣,大风情况突出,同 时伴有较大波浪,易对海上测试、通信作业、发射窗 口执行等产生不利影响,尤其黄海南部、东南部海 域,该区域在冬季同样伴有强降水,综合来看该季 节适宜海上发射工作程度较低,若海上发射需要在 该季节进行,则需要做好充足防护准备,预置发射 窗口选择余量。

波浪、风力、温度、降水是较为显著的气象海洋 要素,也是以往海上发射历程中出现过的影响要 素,但海上天气要素影响复杂,海上开展航天发射 工作并不仅仅受此几种要素影响。未来需要持续 对大气环流、海洋洋流、西太平洋副高、热带气旋等 趋势性大型气象海洋系统进行深入研究,丰富气象 海洋特征性、规律性资料,提高海上指定区域气象 海况分析预报能力,为未来平台航渡、测试开展、窗 口选择等海上发射必要工作提供有价值的预报参 考。同时,根据气象海洋要素情况,未来海上发射 可以选择优势季节及优势点位实施。

#### 参考文献

- [1] 韩秀丽,许国志,李成,等.海上发射气象保障需求分析[J].导弹试验技术,2022(4):49-51.
- [2]李利群,李成,韩秀利,等.运载火箭海上发射运用样式 研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2023(5): 60-66.
- [3] 高瑞华,王式功,张孝峰,等.渤海海峡大风的气候特征 分析[J].海洋预报,2008(3):7-15.
- [4] 王金明,鲍国苗,刘勇,等.新型运载火箭结构优化设计与试验验证[J].上海航天(中英文),2021,38(3): 134-146.
- [5] 陈卫标,刘继桥,侯霞,等.大气环境监测卫星激光雷达 技术[J].上海航天(中英文),2023,40(3):13-20,110.
- [6] 王璐,胡伟东,安大伟,等.天线形变对风云卫星遥感图 像的影响[J].上海航天,2018,52(2):136-143.
- [7] 滕华超,陈艳春,杨蕾,等.大气环流客观分型在渤海海 峡大风气候特征分析中的应用[J].海洋气象学报, 2018,38(3):118-126.
- [8] 杨景泰,隋玉秀,王健,等.大连地区雷暴大风的气候和 天气学特征[J].气象与环境学报,2017,33(6):49-57.
- [9] 孙尚,翟兴辉,张凯诚,等.大气环境监测卫星姿轨控分系 统设计与在轨验证[J].上海航天(中英文),2023,40(3): 132-136.
- [10] 邱博,张录军,谭慧慧.中国大风集中程度及气候趋势 研究[J].气象科学,2013,33(5):543-548.
- [11] 郑卓,禹春梅,程晓明,等.运载火箭智能控制的能力特 征与关键技术[J].上海航天(中英文),2022,39(4): 52-57,93.
- [12] 杜梦莹,李艳,冯娟.亚洲季风区内北半球秋季哈德莱 环流特征及其与热带海温之间关系[J].高原气象, 2022,41(6):1399-1409.
- [13] 张新文,林冠英,刘同木,等.卡尔曼滤波在海洋浮标数据 预处理中的应用[J].广东海洋大学学报,2024,44(1): 118-124.
- [14] 王凯悦,张苏平,薛允传,等.夏季低压控制下黄海西北 部海域海雾发生气象条件合成分析[J].海洋气象学 报,2018,38(3):47-56.
- [15] 张增健,李程,徐珊珊,等.国外海洋观测系统对我国的 启示[J].海洋技术学报,2023,42(6):95-104.
- [16] 王阳,王宝来,刘大辉,等.海上火箭热发射过程中发射 平台耦合运动响应分析[J].船舶,2022,33(6):37-46.
- [17] 牛向华,朱文会,孙秀军,等.面向海上发射任务的气象 海洋无人观测系统设计与实现[J].水下无人系统学 报,2022,30(2):245-253.

- [18] 滕佳华,高吉喜,游代安,等.大气环境监测卫星在生态环 境行业应用分析[J].上海航天(中英文),2023,40(3): 21-29.
- [19] 刘佳俊,毛玉明,博伟,等.固液捆绑火箭星箭耦合分析技术研究[J].上海航天(中英文),2022,39(5): 66-70.
- [20] 董长哲,张娟,石新宇,等.大气环境监测卫星校飞试验 设计与验证[J].上海航天(中英文),2023,40(3): 122-131.
- [21] 俞俊,程小明,范垂中,等.海上发射平台对冲击载荷的 运动响应研究[J].中国造船,2021,62(3):139-148.
- [22] 张桥容,张龙海,周明.考虑雷击与浪涌的气象观测数 据质量控制方法[J].电子设计工程,2024,32(4): 144-148.
- [23] 王偲宇,孟志平,肖潇. 浪涌设备校准自动测量系统的 研制[J].安全与电磁兼容,2023(5):42-48.
- [24] 彭伟, 厉运周, 高艳波, 等. 我国海洋观测仪器设备体系

化发展研究[J].仪器仪表学报,2023,44(12):88-100.

- [25] 厉运周,孔庆霖,杨英东,等.高精度海洋观测浮标运动测量系统设计与试验[J].仪器仪表学报,2023,44(11):1-12.
- [26] 武文豪,徐霄阳,张晨光,等.海洋上层高分辨率温度链 观测系统设计[J].海洋技术学报,2023,42(5):26-35.
- [27] 李东泽,李瑞,吴克俭.太平洋涌浪池年际变化与成因研 究[J/OL].海洋科学进展:1-14[2024-02-28].http://kns. cnki.net/kcms/detail/37.1387.P.20231123.1337.002.html.
- [28] 陈旺,邵庆龙,周晓,等.海洋一号卫星观测任务规划算 法设计及系统应用[J/OL].中国空间科学技术:1-9 [2024-02-28]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/ 11.1859.V.20230325.1643.004.html.
- [29] 韩林生,王祎.全球海洋观测系统展望及对我国的启示 [J].地球科学进展,2022,37(11):1157-1164.
- [30] 朱小伟,侯堋,刘晓建,等.台风影响下珠江口实测波浪 特征分析[J].人民珠江,2023,44(11):78-84.

(上接第19页)

- [10] 徐克俊.发射工程学概论[M].北京:国防工业出版社, 2003:445-449.
- [11] 李学锋,尚腾,苏磊,等.新一代大型运载火箭长征五号控制技术[J].导弹与航天运载技术,2021(5): 59-60.
- [12] 宋征宇,吴义田,徐珊姝,等.长征八号:长征火箭系列 商业化与智慧化的先行者[J]. 深空探测学报, 2021(1):7-8.
- [13] 杨明,黄卫东,沈伟,等.固体发动机不同角度跌落数值 模拟及试验分析[J].含能材料,2018(9):726-727.
- [14] 宋仕雄,史宏斌,刘中兵,等.低温状态点火瞬间固体发动机药柱结构响应分析[J].固体火箭技术,2018(3): 278-279.
- [15] 杨欣茹, 王猛, 高莉, 等. 固液捆绑火箭发动机健康诊断 技术[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(5): 9-10.
- [16] 李安顺,吴斌,汪小丽,等.新一代固液捆绑火箭安全控 制技术研究[J].中国航天,2022(9):9-13.
- [17] 夏盛勇,胡春波.液态铝和三氧化二铝物性参数计算方 法综述[J].推进技术,2019,40(5):961-963.
- [18] 吕久明,谷锁林,张艳兵,等.太空快速响应发射场能力 建设[J].国防科技,2018,39(6):15-19.
- [19] 赵辉,万俊伟,鲍忠贵,等.自主可控技术在试验任务领域的应用研究[J].飞行器测控学报,2015,34(2):

110-113.

- [20] 陈玉龙,廖兴禾,施力琪,等.航天快速发射体系建设研 究[J].中国航天,2022(11):51-53.
- [21] 贾璐,张雅声,王琛.航天快速发射系统发展现状与特 点分析[J].中国航天,2018(10):59-60.
- [22] 刘党辉,尹云霞.快速航天发射现状与建设[J].国防科 技,2018(6):9-11.
- [23] 郑卓,禹春梅,程晓明,等.运载火箭智能控制的能力特 征与关键技术[J].上海航天(中英文),2022,39(4): 52-54.
- [24] 李培岳,张永福,李赫才.航天装备实战化维修保障能 力架构研究[J].设备管理与维修,2022(5):137-139.
- [25] 邵业涛,周宏,晏政,等.液体运载火箭液氧煤油并行加 注适应性研究[J].宇航总体技术,2022,6(3):32-33.
- [26] 张雷杰,高彦峰,纪晶晶,等.CZ-6A运载火箭9A工位 低温加注系统建设项目管理探索与实践[J].航天工业 管理,2022(9):124-129.
- [27] 肖士利,郭振,谢志丰,等.中国运载火箭地面系统发展 方向研究[J].宇航总体技术,2020,4(2):25-32.
- [28] 刘阳,辛腾达,同江.下一代智慧发射场发展研究[J]. 宇航总体技术,2023,7(2):61-68.
- [29] 史会涛,王立扬,李金鑫,等.运载火箭去任务化工作探 索与实践[J].中国航天,2022(增刊1):76-80.