

黄海西部近岸 5 个浮标站海气要素多尺度特征及与 ERA5 对比分析

苗田田^{1, 2)} 李肖霞^{1, 3, 4, 5)} 林行²⁾ 权继梅^{1, 3, 4)} 刘宝君²⁾

姜心肇⁶⁾

¹⁾ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

²⁾ 青岛市气象局, 青岛 266003

³⁾ 临近空间环境特性及效应全国重点实验室, 北京 100081

⁴⁾ 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081

⁵⁾ 中国气象局智能气象观测技术重点开放实验室, 北京 100081

⁶⁾ 邳州市气象局, 邳州 221325

摘 要

本文以黄海西部近岸气温、气压、海温三类海洋气象基本要素为研究对象, 基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月该海域 5 个浮标站实测数据与同期 ERA5 再分析数据, 分析了三类要素的多尺度变化特征与响应机制, 将实测与 ERA5 数据进行对比分析并评估了 ERA5 在黄海西部浅海区域的适用性。研究结果表明: 三要素间存在显著相关性, 强度表现为气温-海温 ($r \approx 0.9$) > 气温-气压 ($r \approx -0.8$) > 海温-气压 ($r \approx -0.55$); 气温和海温均呈单峰型日变化和夏秋高、冬春低的变化特征, 但海温变化幅度显著低于气温, 且日谷值滞后气温 1 h, 气压呈双峰双谷型日变化和秋冬高、春夏低的变化特征; 海气温差呈现规律日变化, 夜间扩大并于 06 时达峰值, 白天缩小并于 16 时达谷值, 海温 8 月至次年 2 月高于气温, 时间占比约 58%; 在典型天气过程响应方面, 海雾过程受暖湿平流与冷海面共同作用, 海气温差扩大至 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 形成了平流冷却雾的热力条件; 江淮气旋影响下要素响应时序为气温 > 气压 > 海温; 寒潮过程中气温断崖式下降 $14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 海温仅下降 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; ERA5 无法解析海温日变化特征, 分别低估气温、气压和海温约 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.26 hPa 和 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 黄海西部近岸、实测浮标、ERA5 再分析资料、多尺度特征分析、数值模式评估

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3104205), 青岛市气象局青年专项 (2025qdxq02), 中国气象局智能气象观测技术重点开放实验室开放研究课题 (ZNGC2024QN02)

第一作者: 苗田田, 主要从事综合气象探测技术研究, Email: mtt_0106@126.com

通讯作者: 李肖霞, 主要从事海洋气象探测技术研究, Email: lxaooc@cma.gov.cn

引言

黄海作为西北太平洋典型的半封闭陆架浅海,是东亚海气能量交换的关键区域(曹超等, 2014)。其西岸是我国社会经济发展和海洋战略实施的关键地带,近岸海域更是海洋资源开发利用、海上交通运输、防灾减灾以及海洋生态保护的核心区域。该区域复杂的气象与海洋环境,不仅受东亚季风、温带气旋等大尺度环流的系统性影响,还深受局地海陆热力差异、复杂地形以及潮流、浪混合等近岸动力-热力过程的综合调制,形成了独特的时空多尺度变化特征(Yun and Ha, 2022; Liu et al, 2023; 刘长华等, 2024)。

在这一复杂背景下,该区域频繁发生季节性海雾(张苏平等, 2008; 刘志杰等, 2024; 朱智慧等, 2024)、气旋发展(柳龙生等, 2024; 吴涛等, 2023; 张可和丛春华, 2026)及海洋边界层热力结构演变(Storto et al, 2018; 方祥生和高辉, 2024)等多尺度天气过程,均与气温、气压和表层海水温度(以下简称海温)等海洋气象基本要素的协同响应密切相关。研究表明,气温通过感热通量驱动海温变化并调控大气边界层稳定性(庄园煌等, 2018; 王婷等, 2024); 气压梯度变化影响海面风应力进而驱动海水混合(夏天竹等, 2024); 而海温的热惯性效应则缓冲大气强迫并通过潜热释放反馈天气系统(李肖霞等, 2023); 海-气温差则直接决定海气界面热通量强度,对海雾和低云形成具有触发作用(张苏平和任兆鹏, 2010; Zhang et al, 2023)。这些研究表明,天气系统的生成并非单一过程驱动,而是多要素非线性响应的结果。因此,系统解析多要素耦合响应机制,是深化区域天气气候认识和提升预报能力的关键(Cheng et al, 2015; Wang et al, 2024; 钟沃谷和吴志伟, 2025)。

然而,要精确刻画黄海西部近岸这种多尺度、多要素的变化特征,首先依赖于高精度、高时空分辨率的观测数据。近年来,观测与数值模拟技术的进步为深化黄海海域的研究提供了重要支撑。在观测技术领域,我国自主研发的海洋浮标系统具备高精度、分钟级数据获取能力,为捕捉浅海区海气界面高频过程带来了独特优势(曹晓钟等, 2019; 秦世广等, 2022)。目前以沿岸海域为主的海洋气象观测网络已基本建成可对近岸海域海洋气象基本要素进行长期、连续的观测,基于该网络获得的海洋参数连续资料已成为支撑一系列重要海洋研究成果的基础(王素娟等, 2014; Huang et al, 2021; 2023; 冯志明等, 2026)。在数值模拟领域,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出了第五代全球大气再分析资料(ERA5)(Hersbach et al, 2020; 陈君芝等, 2023),该资料通过同化多源观测数据实现了 0.25° 网格与逐小时输出的高时空覆盖,已成为海洋气象研究的重要工具(Decker et al, 2012; 覃皓等, 2022; 林小红等, 2025)。然而,尽管技术支撑日益完善,现有研究仍存在一定局限:一方面,多

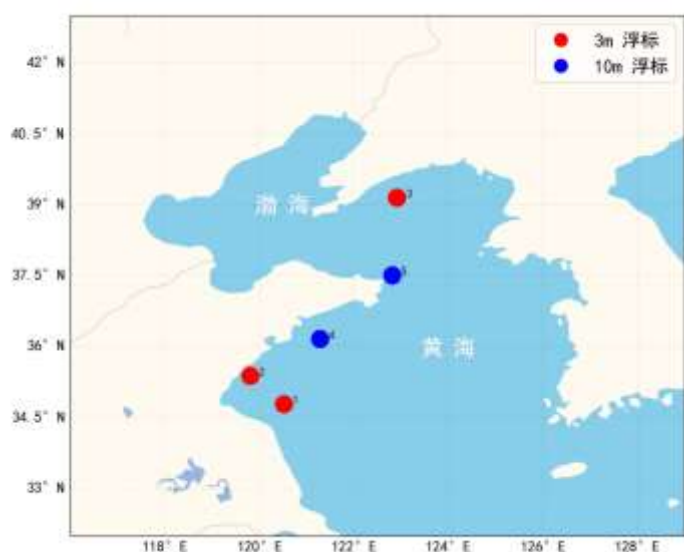
数工作聚焦于单一要素的统计特征（姜雯斐等，2018），缺乏对多要素在不同天气尺度过程中响应时序与滞后效应的定量刻画；另一方面，ERA5 再分析资料在开放海域表现优异，但其在浅海区域、特别是针对极端天气过程的响应能力仍缺乏系统评估。上述局限共同制约了对黄海海气交互机制的完整认知与精准预测（谭海燕等，2021；耿姗姗等，2023）。

为此，本文基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站的高分辨率实测资料与 ERA5 再分析资料，通过多尺度对比与个例分析相结合的方法，系统解析气温、气压、海温的变化特征及其对极端天气过程的响应机制，并定量评估 ERA5 再分析资料在浅海区域的适用性。本文的创新性在于：1）首次在黄海水域基于高分辨率浮标数据，同步揭示了气温、气压、海温等海洋气象基本要素的多尺度协同变化规律，弥补了以往单要素或分离研究的不足；2）量化了三类典型天气过程（海雾、气旋、寒潮）中海洋气象基本要素的响应特征，深化了对浅海区域海气相互作用过程机理的认识；3）系统评估了 ERA5 在浅海区域的适用性及其系统性偏差，为区域数值模式的改进提供了精确的观测依据和校正参考。研究成果将对提升黄海天气预报精度与防灾减灾决策提供数据支撑。

2 资料与方法

2.1 浮标数据

本文选取黄海西部近岸 5 个观测浮标，包括 3 个直径 3 m 的小型浮标（编号 1、2 和 3）及 2 个直径 10 m 的大型浮标（编号 4、5）（图 1）（林晓娟等，2023；孔莉莎等，2025）。各浮标因规格、安装海拔不同，搭载的气象传感器安装位置存在差异，具体安装参数见



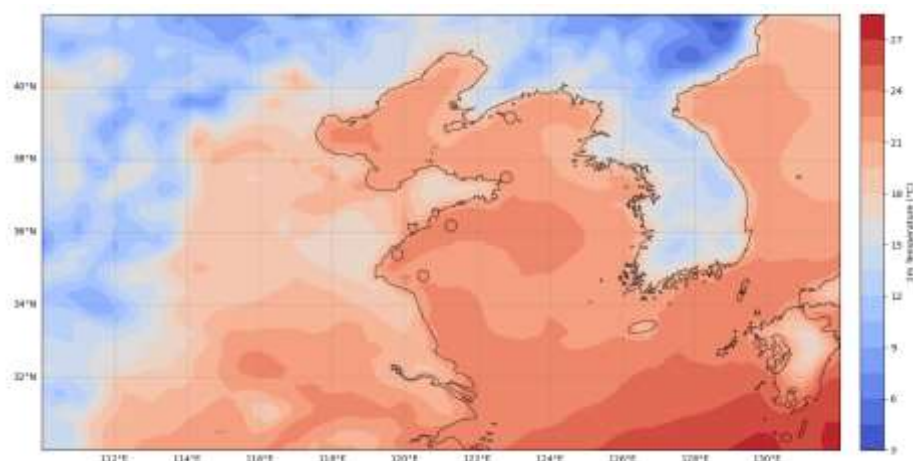


图 1 2023 年 10 月 1 日 20 时 ERA5 和实测 2 m 气温 (T2m) 实况

Fig.2 The 2 m temperature of ERA5 reanalysis data and the observed by buoys (dots) at 20:00 BT 1

October 2023

2.3 浮标站间数据一致性检验

为评估浮标观测数据的可靠性，并为后续将多站数据用于区域特征分析提供依据，我们对 5 个浮标站经过高度订正后的气温、气压、海温序列进行了两两一致性分析。研究选取了南北跨度最大（浮标站 3-浮标站 1，简称编号 3-1）、中等距离（编号 5-4）以及空间最近（编号 2-1）的三组代表性站对，计算了其相关系数（R）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）和平均偏差（Bias），如表 2 所示。

表 2 的结果揭示了浮标观测数据的一致性与空间分布特征。各站对间气温、气压和海温序列均呈现高度同步变化，相关系数（R）介于 0.94—1.00，表明观测系统能同步捕获区域信号。R、MAE 与 RMSE 值均表现出与站间距离显著相关的规律，距离最近的站对（编号 2-1）具有最高的 R 值与最小的误差；随着距离增加，站对（编号 5-4、编号 3-1）的 R 值依次略降，而误差则相应上升，反映出差异主要来源于空间间隔所对应的真实环境梯度。Bias 值进一步刻画了各要素随纬度的分布结构，即高纬度站点相对于低纬度站点的气温与海温 Bias 均为负值，而气压 Bias 均为正值，表明高纬度海域具有更低的气温与海温，以及略高的平均海平面气压。综上所述，浮标观测数据质量可靠，其变化趋势的高度同步性，为后续合并将 5 个浮标站资料合并进而提取区域共性演变特征提供了有力支撑。

表 2 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸浮标站观测数据一致性关键统计量

Table 2 Key statistics of consistency for buoy observations in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

要素	对比组 (站点对)	相关系数 (R)	平均绝对误差 (MAE)	均 方 根 误 差 (RMSE)	平均偏差 (Bias)
气温	编号 3-1	0.979	2.800 °C	3.333 °C	-2.668 °C
	编号 5-4	0.981	1.433 °C	1.769 °C	-0.628 °C
	编号 2-1	0.992	0.889 °C	1.230 °C	-0.082 °C
气压	编号 3-1	0.940	2.256 hPa	3.153 hPa	0.349 hPa
	编号 5-4	0.992	0.872 hPa	1.197 hPa	-0.177 hPa
	编号 2-1	1.000	0.203 hPa	0.276 hPa	-0.038 hPa
海温	编号 3-1	0.981	3.055 °C	3.146 °C	-3.055 °C
	编号 5-4	0.988	2.388 °C	2.573 °C	-2.388 °C
	编号 2-1	0.995	1.040 °C	1.233 °C	-0.634 °C

2.4 气温和气压订正公式

由于不同浮标站气温和气压传感器安装高度存在差异,需将各站观测值统一订正至同一参考高度。

气温订正采用近地层温度直减率近似:

$$T_0=T_h+0.0065h$$

式中: T_0 为参考高度气温 (单位: °C), T_h 为高度 h 处实测气温 (单位: °C), h 为传感器安装高度 (单位: m)。其中 $0.0065\text{ °C}\cdot\text{m}^{-1}$ 为国际标准大气条件下的干绝热温度直减率,适用于近海低高度、无强逆温的近地层条件。本文气温传感器安装高度均小于 10 m, 满足该近似前提。该订正仅用于消除观测高度差异,与海表温度变化无直接物理联系。气温统一订正至 2 m 高度可表示为:

$$T_2=T_h+0.0065(h-2)$$

气压订正采用近地层静力平衡近似:

$$P_0=P_h+0.13h$$

式中: P_0 为参考高度气压 (单位: hPa), P_h 为高度 h 处实测气压 (单位: hPa), $0.13\text{ hPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 为低高度范围内气压随高度变化的经验订正系数,适用于米级高度差的气压统一订正。

需要指出的是,近海浮标的气温观测,除受安装高度影响外,还可能受到标体辐射效应的影响,尤其在弱风条件下,这可能成为近地层气温观测的一项不确定性来源。本文实施高度订正,主要目的在于统一 5 个浮标站观测数据的比较基准。鉴于本文结果主要侧重多站点

资料的整体变化特征、天气过程响应及 ERA5 适用性分析，因此该问题不改变本文关于要素时序变化和过程响应的基本结论，但后续工作中将结合辐射、风速及传感器结构信息，进一步评估并订正该类影响。

2.5 数据评估方法

为定量评估 ERA5 与浮标数据之间的误差，引入偏差 (Bias)、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 作为偏差的统计量，引入相关系数 (R) 作为相关程度的统计量（其数学定义与 2.3 节所用指标一致）；为定量评估气温、气压和海温三者之间的响应关系，引入拟合方程和 R 作为关联程度的统计量。

3 海洋气象基本要素多尺度响应特征分析

本章聚焦黄海西部近岸海域的整体变化特征，先对 5 个浮标站的实测数据、以及对应站点位置的 ERA5 插值数据分别求取站点间算术平均，得到实测与 ERA5 两组独立的平均序列，再基于这两组序列，从日变化、月际变化及天气过程响应 3 个尺度，系统分析气温、气压、海温与海气温差的时序特征。采用多站平均旨在提取区域共性信号，便于与 ERA5 进行区域对比，2.3 节的一致性检验结果为此提供了依据。需注意，该方法适用于分析区域尺度温度、气压等标量要素的变化规律，但会平滑站点间的海陆风向等局地差异，故不用于刻画单站的环流特征。

3.1 日变化特征分析

为消除季节分布不均对日变化分析的影响，本文仅选取 24 h 内各时刻均存在有效记录的“数据完整日”，在此基础上分析黄海西部近岸气温、气压、海温及海—气温差的日变化特征。

海上气象要素的日变化主要受太阳辐射及其控制下的近地层热力过程调制，但不同要素的响应特征存在明显差异（

图 2）。浮标观测表明，气温呈显著单峰型日变化（

图 2a），日出后随近地层净辐射通量增加而持续升高，于 16 时达到峰值 14.5 °C；随后随着净辐射通量由正转负，大气边界层内感热收支减弱，气温逐步下降，并于次日 06 时降至谷值 13.0 °C，平均日较差为 1.5 °C（Stull, 1988；赵丽芳等，2019）。ERA5 数据能够再现气温的日变化形态，但峰值出现时间提前约 1 h，且整体存在系统性低估。

气压日变化呈现典型的双峰双谷结构（

图 2b）。夜间至清晨近地层冷却增强，空气密度增加，使气压在 10 时出现主峰（1018.6 hPa）；午后在太阳加热作用下，大气边界层加深并伴随动量与热量的垂直混合，气压于 16

时降至谷值（1016.6 hPa）；受半日周期大气潮汐振荡影响，21 时出现次峰（1017.9 hPa）。

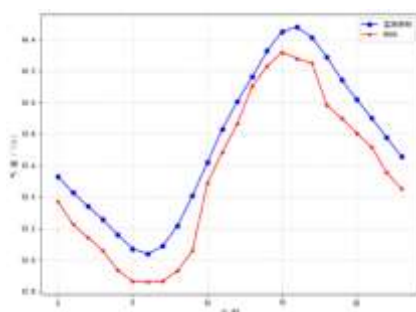
ERA5 较好再现了气压日变化的相位特征，但同样表现出幅值偏低的系统性偏差。

相比大气要素，海温日变化幅度较小（

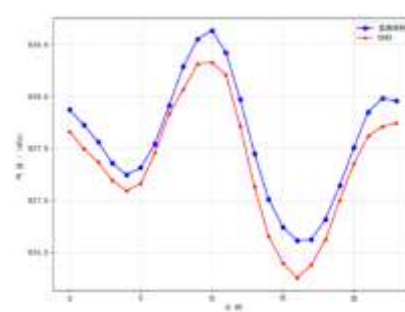
图 2c），日较差仅为 0.4 °C。在白天太阳辐射和上层海洋混合层共同作用下，海温于 16 时达到峰值 14.4 °C；夜间受海水热惯性及混合过程持续影响，海温缓慢下降，并于 07 时降至谷值 14.0 °C，较气温谷值滞后约 1 h。由于时间分辨率和平滑效应的限制，ERA5 海温表现为近似“阶梯式”变化，难以解析实测海温的真实日变化过程。总体来看，气温升高对应气压降低，而海温变化相对缓慢，在一定程度上削弱了气温与气压的日变化幅度，对局地热力过程起到调节作用。

海气温差定义为海温与气温之差。鉴于 ERA5 难以刻画海温日变化，本文仅基于浮标资料分析海-气温差的日变化特征。如

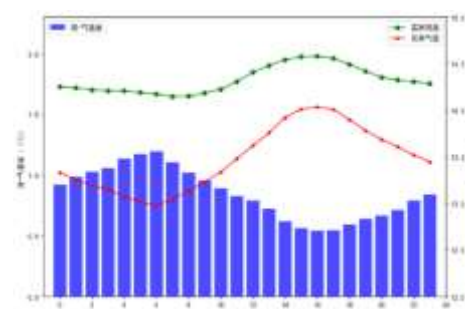
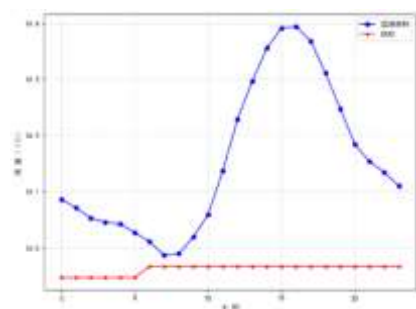
图 2d 所示，海气温差呈单峰型日变化。夜间至清晨，气温降温速率快于海温，海气温差逐步扩大，并于 06 时达到峰值 2.0 °C；白天随着近地层净辐射增强，气温快速上升，海气温差逐步缩小，在 16 时达到谷值 0.5 °C；其后气温下降速率再次快于海温，海气温差重新增大。该过程表明，海气温差的日变化主要由气温与海温之间的相位差控制，其中气温变化起主导作用，海温的弱变化对差值起平滑调节作用。夜间海气温差达到峰值时，海洋向大气的潜热输送增强，为黄海海雾和低云的形成提供有利的热力条件（史得道等，2018；Yun and Ha, 2022）。



(a) 气温



(b) 气压



(c) 海温

(d) 海气温差

图 2 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站平均海洋气象基本要素日变化

Fig.3 Diurnal variations of the average basic marine meteorological elements at five buoy sites in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

3.2 月际变化特征分析

上述日变化特征揭示了黄海海气界面热力过程的昼夜变化特征,但观测要素的周期性调制还显著受季节尺度太阳辐射变化及大尺度环流背景的共同影响。本节基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站点的月均值结果(图 3),进一步分析气温、气压、海温及海-气温差的月际变化特征,并探讨其与区域气候背景之间的关系。

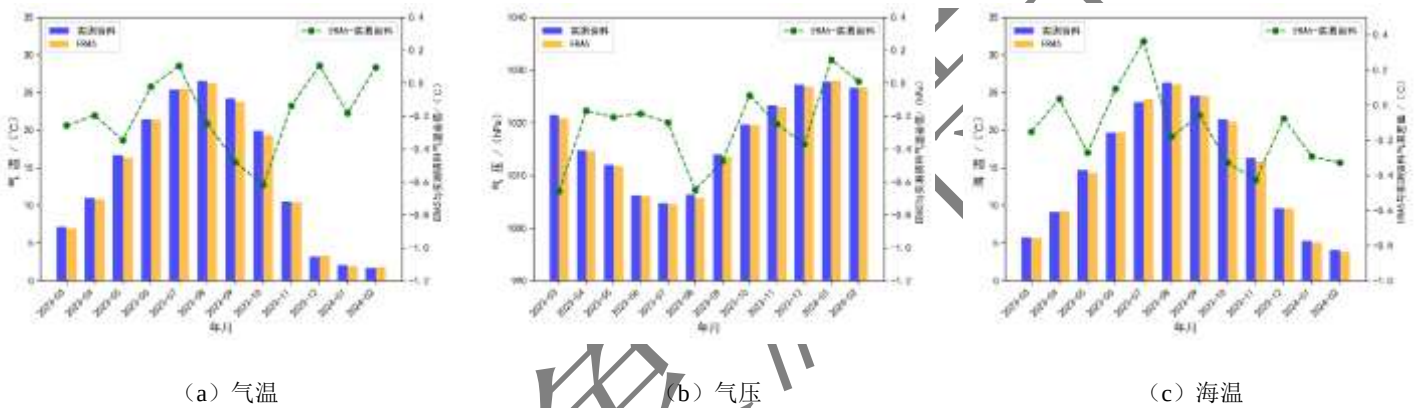


图 3 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站平均海洋气象基本要素月变化

Fig.4 Monthly variations of basic marine meteorological elements at five buoy sites in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

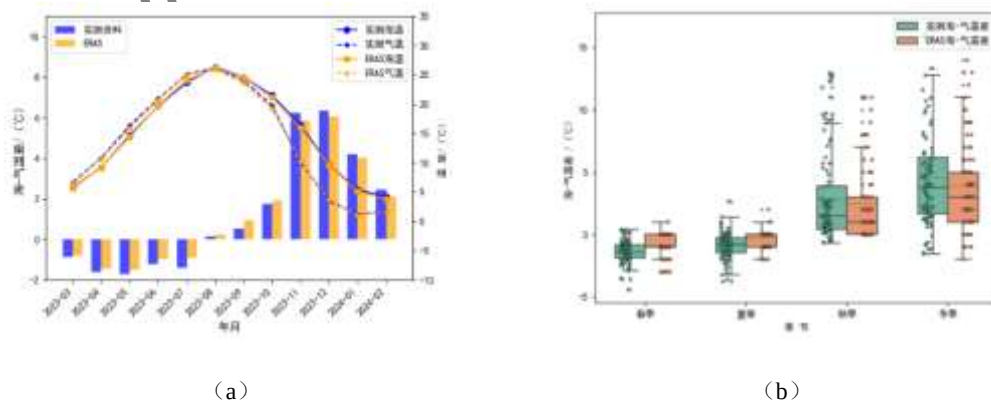


图 4 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站平均海气温差 (a) 月均值和(b)季节变

Fig.5 Variation of (a) monthly mean value and (b) season variation of ai-sea temperature difference at five buoy sites in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

海上气象基本要素在 2023 年 3 月至 2024 年 2 月的热力学年内,呈现出清晰的月和季节变化(图 3)。浮标观测表明,气温表现为夏秋高、春冬低的分布特征(图 3a)。自 2023 年 3 月起,随着太阳辐射增强及东南季风输送暖湿气流,气温月均值逐步升高,并于 8 月达到月均值最大值 26.5 °C;进入秋季后,海洋持续释放夏季储存热量,使气温维持在相对较高水平;冬季在频繁冷空气南下影响下,海洋散热增强,气温明显下降,并于 2024 年 2 月降至该时段的最低值 1.7 °C。

气压的季节变化特征与气温总体相反,整体呈现冬季月均值偏高、夏季月均值偏低的特征(图 3b),其中秋季月均值略高于春季。2023 年春季气压月均值维持在相对较高水平,随后在夏季副热带高压边缘活动及季风槽影响下逐步降低,并于 7 月达到该时段月均值最低值 1004.7 hPa;入秋后,随着冷空气活动增强,气压逐渐回升,并于 2024 年 1 月达到周期内的月均值最高值 1027.7 hPa。

海温的月变化趋势与气温一致,亦呈现夏秋高、春冬低的分布特征(图 3c)。春季以来,海温月均值逐步升高,并于 8 月达到该时段月均值最大值 26.3 °C;秋季太阳辐射减弱后,海洋向大气释放热量,海温开始下降,但受较大热容量影响,降温过程相对缓慢;冬季在冷空气作用下,上层海洋混合增强,海温月均值进一步降低,并于 2024 年 2 月达到该时段最低值 4.1 °C。总体来看,在观测时段内,ERA5 资料能够较好再现气温、气压和海温的月际变化趋势,但在幅值上对各要素均存在一定系统性偏差。

海气温差具有显著的月、季节差异特征(图 4)。春季随着太阳辐射增强,气温升高速率快于海温,海气温差呈负值并逐步扩大,于 5 月达到该时段月均值最低值-1.7 °C。夏季随着上层海洋混合层变浅、温跃层逐渐形成,海温升高速率有所加快,气温虽仍高于海温,但二者差值逐渐缩小,并于 8 月转为正值。秋季太阳辐射减弱且冷空气开始频繁南下,气温在短时间内显著下降,而海温因热惯性降温滞后,导致海气温差迅速增大,并于 11 月达到最大值 6.3 °C;冬季海气温差月均值有所回落,但整体仍显著高于其他月份,表明冬季海洋持续向大气提供热量补给。从全年分布来看,海温月均值在 8 月至次年 2 月高于气温月均值,时间占比约为 58%,而 3—7 月气温月均值高于海温月均值,占比约为 42%。从季节分布来看(图 4 图 4b),春、夏季海气温差中位数接近 0 °C,箱体区间窄、离群值少,数据分布相对集中;秋、冬季受冷空气活动频繁影响,海气温差中位数显著抬升,箱体宽度与极值范围明显扩大,正离群值数量大幅增加,差值波动更为显著。ERA5 能够模拟海气温差的变化

趋势，但对峰值和谷值的幅度存在低估，主要与其对浅海区域中小尺度过程及局地极端热力变化解析能力有限有关，因此在高精度通量估算和区域气候分析中需谨慎使用。

3.3 典型个例分析

本节研究选取海雾、江淮气旋和寒潮等 3 个典型个例，基于逐小时气温、气压数据和日均海温数据量化分析极端条件下黄海西部近岸海洋气象基本要素响应特征。

3.3.1 海雾过程

2023 年 6 月 6—9 日，受南方暖湿气流影响，黄海海域发生两次海雾过程（聂高臻和王慧，2023），本文选取 6—7 日过程进行分析。浮标观测表明，自 6 月 5 日起海面气压持续下降（图 5b），指示研究海域位于低压系统前部，有利于暖湿气流向北输送，为海雾生成提供了动力背景。

热力要素对该过程表现出明显响应特征。过程初期（5—6 日），海温和气温分别维持在约 18.8 °C 和 19.0 °C，海气温差较小，近地层热力稳定度相对较弱（图 5d）。随着暖湿平流增强，气温对大气强迫的响应更为敏感，6 日夜间降温幅度较小，并于 7 日 15 时升至 23.4 °C（图 5a）；相比之下，海温受海洋热惯性制约，仅表现为微弱变化（图 5c）。二者响应幅度的显著差异导致日均海气温差由接近零迅速扩大至 7 日的 -3.3 °C（图 5d），从而形成暖湿空气覆盖冷海面的热力配置。从大尺度环流背景来看，本次海雾过程发生在 500 hPa 平直西风带槽前环流配置下，黄海海域受中低层偏西至西南暖湿气流持续控制，同时海平面气压场显示研究区处于低压前部，环流形势稳定，无强冷空气或锋面快速过境，为暖湿空气在冷海面发生平流冷却、形成稳定逆温层提供了有利的大尺度背景，与平流冷却雾的形成机制完全吻合（Yun and Ha, 2022；柳龙生等，2024）。

ERA5 资料能够较好再现该海雾过程中气温、气压及海气温差的整体演变趋势，尤其对 7 日海气温差显著负值的刻画较为准确，表明其在天气尺度上对动力与热力强迫具有一定表征能力。然而，在局地 and 短时尺度上，ERA5 仍存在不足，主要表现为对气温日变化的平滑处理以及对海温变化响应略有滞后，这在一定程度上可能影响其对海雾发生与消散具体时刻的精确描述。

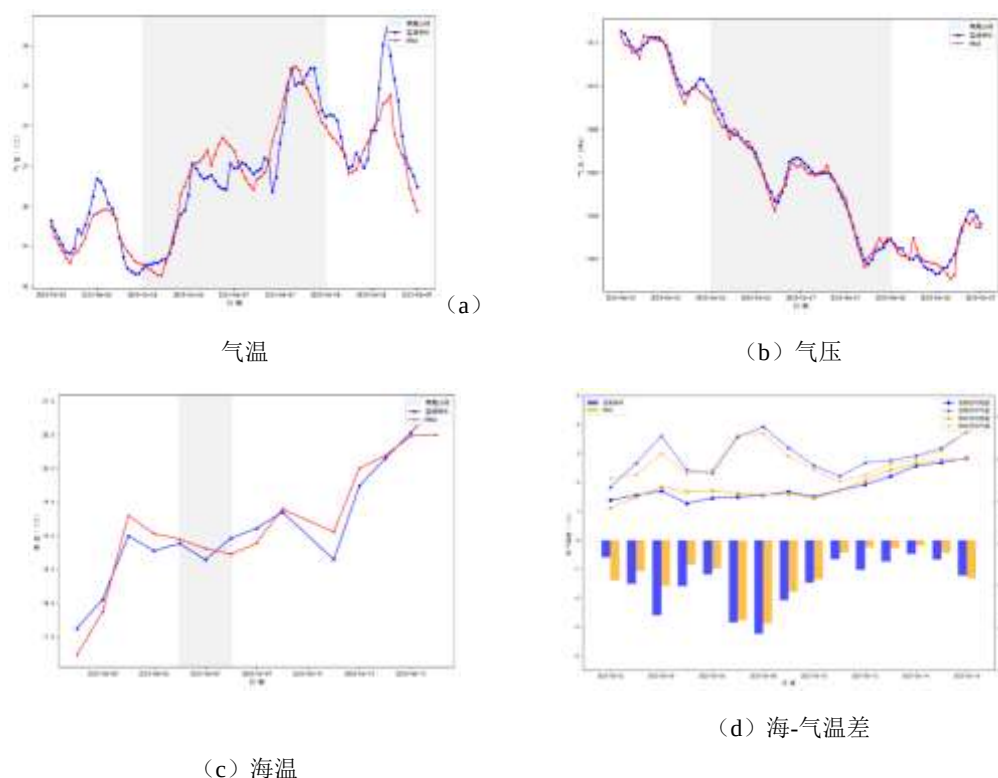


图 5 2023 年 6 月 6-7 日海雾过程影响期间海洋气象基本要素日变化

Fig.6 Diurnal variation of basic marine meteorological elements during the sea fog event in 6-9 June 2023

3.3.2 江淮气旋过程

2023 年 8 月 27—28 日，受入海江淮气旋影响，黄海海域出现大风、强降水并伴随 2.5—4 m 巨浪过程。浮标观测表明，在冷锋过境的直接作用下，气温首先发生快速响应，于 28 日 05 时降至最低值 21.3 °C（图 6a）（傅刚等，2024；Zhang et al, 2024）。随后，随着气旋发展过程中斜压结构增强，斜压能量释放并向动能转化，气压持续下降，并于 14 时达到最低值 1001.6 hPa，较气温极值滞后约 9 h（图 7b）。相比大气要素，海洋响应明显滞后，上层海洋混合层在强风作用下逐步加深，海温于 30 日降至最低值 25.3 °C，较气压极值滞后约 2 d（图 7c）。

在 28 日 05—14 时气压持续下降阶段，气温呈现“降温—回升—二次降温”的三段式演变特征（图 6a）。从中高层环流演变来看，本次江淮气旋影响期间，500 hPa 高度场呈现明显加深东移的槽系结构，东亚中纬度等高线显著加密，西风急流活动增强；黄海海域处于槽前偏西至西南气流控制区，暖湿空气持续向北输送，为气旋发展维持提供了充足的水汽与能量条件。这一环流背景也直接解释了气温“降温—回升—二次降温”的三段式演变：气旋前部与近中心区域的交替控制，使低层暖湿平流在冷锋影响间歇期对近地层气温形成短暂抬升（Lackmann, 2011）。综合来看，该过程清晰反映了江淮气旋影响下典型的海气响应链条：

冷锋触发气温骤降，气旋发展及其伴随的斜压能量释放导致气压持续下降，而气旋大风增强海表动量通量并驱动上层海洋垂直混合，最终引发海温下降（李肖霞等，2023）。过程结束后，气温与气压随气旋东移迅速回升，而海温因海洋热惯性较大，缓慢回升持续约 11 d 后才回到月际下降趋势，体现出大气对天气系统的快速响应与海洋缓慢调整并存的典型海气相互作用特征（Cheng et al, 2015）。

ERA5 资料能够再现江淮气旋影响期间气温、气压和海温的整体变化趋势，但在时序和幅度上仍存在偏差。从响应时序看，ERA5 模拟的气温和气压最低值分别出现在 28 日 07 时和 16 时，均较浮标观测滞后约 2 h；海温日均最低值延迟至 9 月 1 日，较实测结果滞后约 2 d。从响应幅度看，ERA5 明显低估冷锋过境时的气温日较差以及气旋影响期间海温的下降速率，反映出再分析资料在刻画气旋大风驱动的上层海洋垂直混合过程方面仍存在不足。

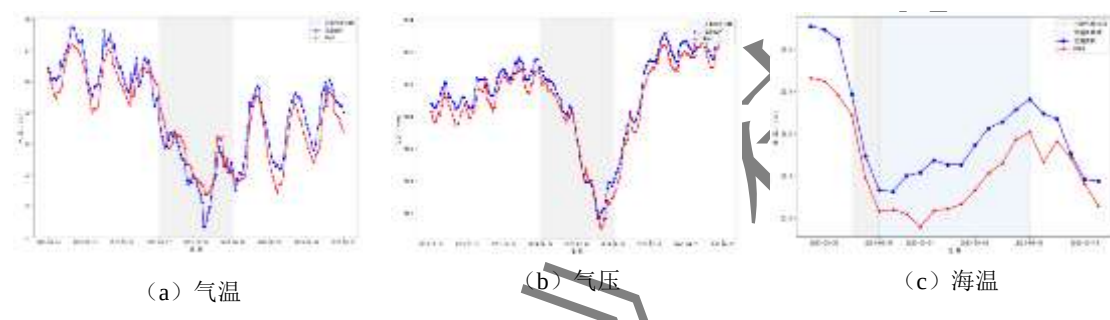


图 6 2023 年 8 月 27-28 日江淮气旋影响期间海洋气象基本要素日变化

Fig.7 Diurnal variation of basic marine meteorological elements during the influence of Changjiang-Huaihe cyclone in 27-28 August 2023

3.3.3 寒潮过程

2023 年 11 月 22—24 日，一次强寒潮过程影响黄海海域（霍达等，2024）。浮标数据显示，气温的响应最为迅速剧烈，22 日 16 时气温为 16.1 °C，随后开始急剧下降，于 24 日 08 时降至过程最低值 1.2 °C，40h 内降温幅度近 14.9 °C，呈现“断崖式”下降特征（图 7a）。气压场演变清晰地指示了天气系统的更替，前期受冷锋前暖低压活动影响，气压持续下降，22 日前出现 1010.0 hPa 的过程最低值；随着强冷空气主体南下，冷高压系统迅速加强并控制该海域，气压于 24 日 08 时升至 1033.5 hPa 的峰值，与气温最低值出现时间一致（图 7b）。海温响应表现出明显的缓变与滞后特征，其日均值从 22 日的 16.4 °C 降至 24 日的 14.0 °C，降幅 2.4 °C，且降温过程呈现明显的阶段性，23 日海温降幅为 0.2 °C，24 日则显著下降 2.2 °C（图 7c）。

从中高层环流背景来看，本次寒潮过程发生在 500 hPa 长波槽显著加深南压的环流配置下，黄海海域处于深槽后部的西北气流控制区，等高线密集，高空偏北气流为强冷空气向南

爆发提供了稳定的输送通道。这一环流配置直接驱动了近地层冷暖空气的强烈置换，造成气温的断崖式下降；而深厚冷高压的持续控制，也进一步解释了海温响应的滞后性与缓变性，与海洋热惯性的核心特征完全匹配。海温变化幅度与速率远低于气温，体现了上层海洋的热惯性效应（Cheng et al, 2015；李肖霞等，2023）。上述时序响应与量化关系表明，本次过程表现出气温先导骤降、强冷高压控制、海温滞后缓变的典型特征，完整刻画了寒潮影响下大气系统快速更替驱动海洋要素发生滞后调整的海气相互作用物理图像。

ERA5 在此次寒潮过程中整体再现了各要素变化趋势，但在精确度上存在系统性偏差。主要表现为对气温骤降幅度模拟偏弱，削弱了寒潮的极端性；对海温的模拟存在系统性低估，且日际变化较实测更为平缓。这些偏差显示 ERA5 在刻画强天气事件的局地极端值和海洋精细响应方面存在局限，但其对天气尺度过程的演变趋势仍具备参考价值。

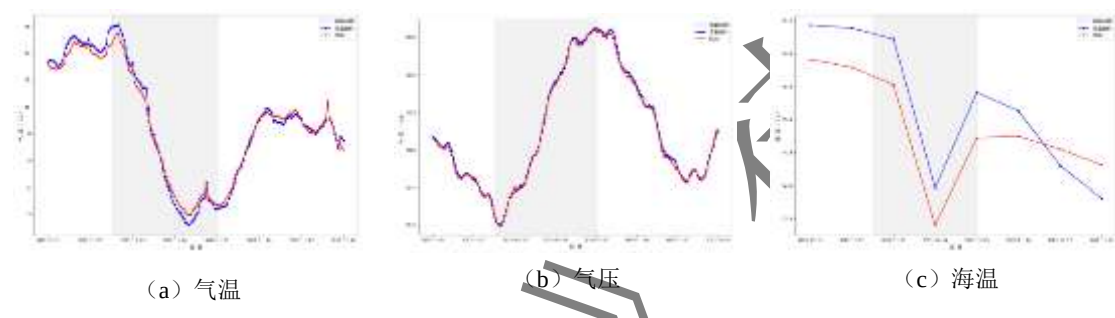


图 7 2023 年 11 月 21—28 日寒潮影响期间海洋气象基本要素日变化

Fig.8 Diurnal variation of basic marine meteorological elements during the cold wave event in 21-28

November 2023

4 ERA5 与浮标数据的对比分析

由上述分析可知，ERA5 能够捕捉气温、气压和海温的变化特征，但仍存在系统性偏差。为进一步定量评估 ERA5 在黄海西部近岸海域的适用性，本节采用 5 个浮标站点逐站时空匹配后的全样本数据开展统计评估，不进行站点算术平均，以避免站点间正负偏差相互抵消，从而确保评估结果的客观性与统计可靠性。

4.1 两种资料单一要素间相关性分析

为进一步量化评估 ERA5 的表征能力，本章节对 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个站点的气温、气压和海温逐小时资料（图 8）和日均值数据（图 9）进行对比分析。通过将 ERA5 和浮标数据进行时空匹配，获得气温、气压和海温逐小时资料分别为 38 556 条、38 362 条和 18 596 条，日均值数据分别为 1652 条、1652 条和 1022 条。

逐小时资料显示（图 8），ERA5 与浮标数据在气温、气压和海温上均表现出较高的相关性（ $r > 0.994$ ），但存在系统性低估，偏差分别为 $-0.189\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 -0.259 hPa 和 $-0.141\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均

绝对偏差分别为 0.752 °C、0.534 hPa 和 0.463 °C，均方根误差分别为 1.010 °C、1.048 hPa 和 0.585 °C。尽管 ERA5 海温数据无法很好地反映日变化特征，其与浮标数据的相关性仍优于气温和气压且误差最低。这主要归因于海温本身日变化幅度小、热惯性强的物理属性，以及 ERA5 对海温气候态分布具有较强的模拟能力。相比之下，气温和气压更易受局地天气过程、地形及高频波动影响，导致 ERA5 在刻画其短时变化时存在局限，相关性因而相对较低。

日均值分析结果（图 9）显示，时间平均有效平滑了高频波动，使得 ERA5 与浮标实测值的相关性进一步提高，平均绝对误差与均方根误差均显著降低。日均值下的系统性偏差与逐小时尺度基本一致，气温、气压和海温的平均偏差分别约为 -0.190 °C、-0.259 hPa 和 -0.133 °C，进一步验证了 ERA5 存在稳定的负偏差，进一步验证了 ERA5 存在系统性低估。因此，在将 ERA5 资料应用于黄海海域的高精度研究时，建议依据浮标数据对其系统性偏差进行校正。

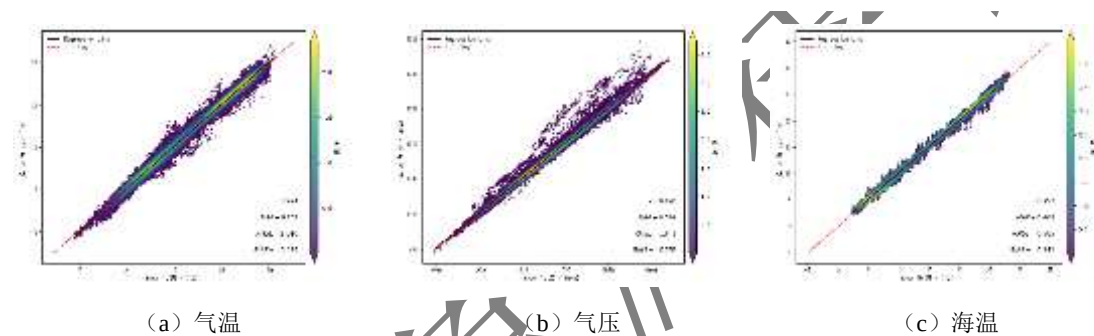


图 8 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 ERA5 与 5 个浮标站全样本逐小时数据对比

Fig. 9 Comparison of hourly data between ERA5 reanalysis data and full-sample from five buoy sites in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

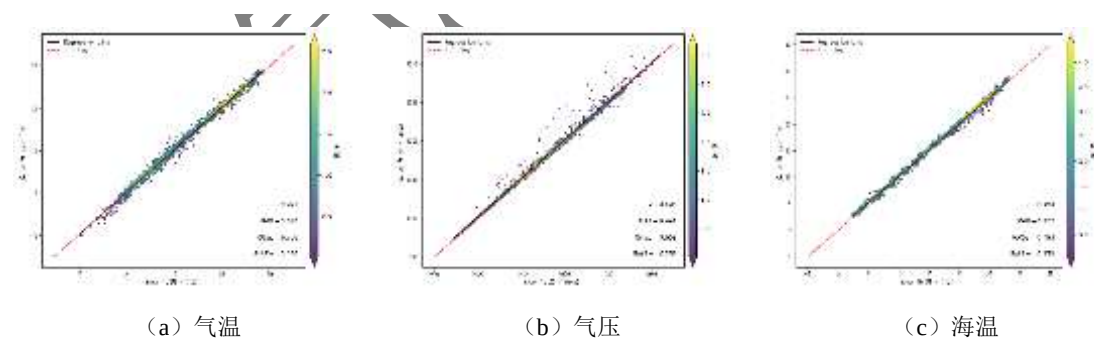


图 9 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 ERA5 与 5 个浮标站全样本的日均值数据对比

Fig. 10 Comparison of daily mean values between ERA5 reanalysis data and observations from five buoy sites in the western coast of the Yellow Sea from March 2023 to February 2024

4.2 单一资料不同要素间相关性分析

338

表 3 黄海西部近岸不同要素间相关性统计量

339

Table 3 Statistics between different meteorological elements in the western coast of the Yellow Sea

要素	时间分辨率	相关系数		回归方程	
		浮标	ERA5	浮标	ERA5
气温 (x)	逐小时	0.895	0.909	$y = 1.043x - 1.564$	$y = 1.035x - 1.515$
海温 (y)	日均值	0.911	0.923	$y = 1.058x - 1.980$	$y = 1.051x - 1.962$
气温 (x)	逐小时	-0.790	-0.801	$y = -0.816x + 1028.748$	$y = -0.840x + 1028.657$
气压 (y)	日均值	-0.804	-0.813	$y = -0.817x + 1028.743$	$y = -0.839x + 1028.615$
海温 (x)	逐小时	-0.528	-0.536	$y = -0.644x + 1026.303$	$y = -0.644x + 1025.819$
气压 (y)	日均值	-0.564	-0.577	$y = -0.664x + 1026.931$	$y = -0.674x + 1026.644$

340

本章节基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸 5 个浮标站的观测数据，系统分析了气温、气压与海温的两两相关性及回归关系（表 3），并对比了浮标数据与 ERA5 数据的结果差异。分析表明，不同要素间相关性存在明显差异，且 ERA5 能够较好地再现各要素间的统计关系。

344

在要素间相关性方面，气温与海温呈高度正相关，逐小时和日均值相关系数分别为 0.895 和 0.911，体现了海气间紧密且直接的热力耦合关系；气温与气压呈稳定负相关，逐小时和日均值相关系数分别为-0.790 和-0.804，符合热力环流机制的基本原理；相比之下，海温与气压的相关性最弱，逐小时和日均值相关系数分别为-0.528 和-0.564，表明其相互作用受到更复杂的大气环流和海洋动力过程共同影响。

349

从时间尺度对比来看，日均值数据的相关性普遍高于逐小时数据，特别是在海温-气压关系中体现最为明显。这一特征表明，时间平均有效平滑了高频波动，使得要素间在天气尺度上的关系更加凸显，反映出不同时间尺度下主导物理过程的差异。

352

通过与浮标数据对比发现，ERA5 能够较好地再现各要素间的统计关系。各组合的相关系数差异均小于 0.02，回归方程斜率和截距也极为接近。值得注意的是，ERA5 模拟的要素间相关性略高于实测值，这源于模式的平滑效应消除了实测数据中由仪器噪声、小尺度湍流等引起的随机误差，因此在天气尺度上的相关性表现更优。

356

回归分析表明，不同时间尺度下气温与海温的回归斜率均接近 1.0，表明海温对气温变化的响应近乎同步，印证了二者通过直接热交换实现的紧密耦合；气温与气压的回归斜率约为 0.816-0.840 hPa/°C，显示气温每降低 1 °C，气压约上升 0.816-0.840 hPa；海温与气压的回

归关系则显示出,海温每升高 1 °C对应气压下降约 0.644-0.674 hPa,该斜率数值凸显了其相互作用的间接性与复杂性。这些定量关系为理解区域海气相互作用提供了关键的参数化依据。

5 结论与讨论

本文基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月黄海西部近岸实测浮标数据和 ERA5 再分析资料,揭示了海气要素多尺度变化特征及气旋响应机制,同时定量分析了 ERA5 与浮标数据的偏差,初步结论如下:

1) 气温、气压和海温要素间呈现显著相关性。气温-海温呈极强的正相关,相关系数约为 0.9; 气温-气压呈显著的负相关,相关系数约为-0.8; 海温-气压呈一定的负相关,相关系数约为-0.55。在日变化方面,气温和海温均呈单峰型变化,但海温日较差显著低于气温,且海温谷值滞后于气温 1h,气压呈双峰双谷型日变化,峰值分别出现在 10 时和 21 时。月际尺度上,气温与海温均呈夏秋高、冬春低的变化特征,气压则呈现为秋冬高、春夏低。

2) 海-气温差的变化受气温主导,受海温调节。在日尺度上,夜间至清晨海-气温差逐步扩大,于 06 时达到峰值,日出后随气温快速上升,海-气温差逐步缩小,在 16 时达到谷值,16 时以后,因太阳辐射减弱海-气温差再次扩大。在月际尺度上,海-气温差 5 月最小,11 月最大,海温 8 月至次年 2 月高于气温,占比 58%,3-7 月气温高于海温,占比 42%。

3) 三类典型天气过程揭示了黄海西部近岸海气系统的多尺度响应机制。海雾过程表现为暖湿平流与冷海面作用,导致海气温差急剧扩大至-3.3 °C,构成平流雾的热力条件;江淮气旋过程呈现“气温-气压-海温”的响应链,体现了大气强迫海洋的完整过程;寒潮过程则以气温“断崖式”下降、气压骤升和海温显著滞后为特征,凸显了海洋的热惯性效应。上述个例共同表明,大气快速变化驱动海洋滞后调整是区域海气相互作用的核心机制。

4) ERA5 具有高相关性但存在系统偏差与平滑效应。在变化特征上,ERA5 再现了三要素的月际变化特征和气温、气压的日变化特征,但对海温日变化特征的解析能力不足。在系统性偏差上,ERA5 低估气温约 0.19 °C,低估气压约 0.26 hPa,低估海温约 0.14 °C,建议在实际应用中对 ERA5 进行区域校正。

本研究结论基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月的观测数据得出,虽能清晰刻画该时段内要素的多尺度变化与过程响应,但其长期气候代表性仍需更长时序资料的检验。此外,文中日变化分析为多种天气条件下的综合平均结果。未来的研究将依托更长时间序列的观测资料,结合辐射、云量等辅助信息,区分不同天气背景下的要素变化规律,并重点量化海-气温差等关键参数的阈值对黄海海雾、低云生消的指示意义,从而获得更有代表性和更有价值的结论。

参考文献

- 曹超, 蔡锋, 郑勇玲, 等, 2014. 中国近海海底地形特征及剖面类型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 45(2): 483-495. Cao C, Cai F, Zheng Y L, et al, 2014. Topography characteristics and profile type of China offshore submarine[J]. J Central South Univ (Sci Technol), 45(2): 483-494 (in Chinese).
- 曹晓钟, 李肖霞, 雷勇, 等, 2019. 国产海洋气象漂流观测仪在台风观测中的应用分析[J]. 气象, 45(10): 1457-1463. Cao X Z, Li X X, Lei Y, et al, 2019. Typhoon observation and analysis of domestic marine meteorological drift buoy experiment[J]. Meteor Mon, 45(10): 1457-1463 (in Chinese).
- 陈君芝, 施晓晖, 温敏, 2023. ERA5再分析10 m风速数据在“两洋一海”的适用性分析[J]. 气象, 49(1): 39-51. Chen J Z, Shi X H, Wen M, 2023. Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of “two oceans and one sea”[J]. Meteor Mon, 49(1): 39-51 (in Chinese).
- 方祥生, 高辉, 2024. 2024年初夏江南异常多雨的环流背景及热带西印度洋破纪录暖海温的作用[J]. 气象, 50(12): 1441-1450. Fang X S, Gao H, 2024. Circulation background of abnormal rainfall in the area south of Yangtze River in June 2024 and role of record-breaking warm SST in tropical western Indian Ocean[J]. Meteor Mon, 50(12): 1441-1450 (in Chinese).
- 冯志明, 潘宁, 高聪晖, 2026. 台湾海峡区域格点分析风场极大值订正技术研究[J]. 大气科学, 50(1): 122-134. Feng Z M, Pan N, Gao C H, 2026. Correction techniques for the maximum wind speeds of the gridded analysis dataset for the taiwan strait[J]. Chin J Atmos Sci, 50(1): 122-134 (in Chinese).
- 傅刚, 鄢琬, 倪晶, 等, 2024. 爆发性气旋研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 54(10): 1-12. Fu G, Yan S, Ni J, et al, 2024. Recent advance of explosive cyclone researches[J]. Period Ocean Univ China, 54(10): 1-12 (in Chinese).
- 耿姗姗, 韩春花, 徐珊珊, 等, 2023. ERA5海面气压和风速再分析资料在渤海和北黄海适用性分析[J]. 海洋通报, 42(2): 159-168. Geng S S, Han C H, Xu S S, et al, 2023. Applicability analysis of the sea surface pressure and wind speed of ERA5 reanalysis data in the Bohai Sea and the northern Huanghai Sea[J]. Mar Sci Bull, 42(2): 159-168 (in Chinese).
- 霍达, 周宁芳, 马殿博, 2024. 2023年11月大气环流和天气分析[J]. 气象, 50(2): 257-264. Huo D, Zhou N F, Ma D B, 2024. Analysis of the November 2023 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 50(2): 257-264 (in Chinese).
- 姜雯斐, 虞兰兰, 于清溪, 等, 2018. 气候变化背景下渤海海温时空特征分析[J]. 广西科学院学报, 34(3): 216-221. Jiang W F, Yu L L, Yu Q X, et al, 2018. Spatio-temporal analysis of the sea surface temperature in the Bohai and Yellow seas under the background of climate Change[J]. J Guangxi Acad Sci, 34(3): 216-221 (in Chinese).
- 孔莉莎, 吴焕萍, 李玉, 2025. 浮标海面风资料的质量控制及中国近海风的基本特征分析[J]. 海洋预报, 42(4): 26-36. Kong L S, Wu H P, Li Y, 2025. Quality control of buoy surface wind data and analysis of basic characteristics of wind in China's offshore areas[J]. Mar Forecasts, 42(4): 26-36 (in Chinese).
- 李肖霞, 张雨潇, 曹晓钟, 等, 2023. 台风利奇马(1909)海温变化特征分析[J]. 大气科学, 47(5): 1295-1308. Li X X, Zhang Y X, Cao

419 X Z, et al, 2023. Analyzing sea temperature variation in response to typhoon Lekima (1909)[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5):
420 1295-1308 (in Chinese).

421 林小红, 蒋滔, 张文娟, 等, 2025. “杜苏芮”(2023)台风外雨带闪电活动特征及与强降水微物理结构的关系[J]. 气象学报, 83(1):
422 80-95. Lin X H, Jiang T, Zhang W J, et al, 2025. Lightning activity in the outer rainbands of typhoon Doksuri (2023) and its
423 relationship with the microphysical structure of heavy rainfall[J]. Acta Meteor Sin, 83(1): 80-95 (in Chinese).

424 林晓娟, 李响, 刘晓燕, 等, 2023. EC预报数据在中国近海的适用性研究[J]. 海洋预报, 40(6): 51-66. Lin X J, Li X, Liu X Y, et al,
425 2023. Applicability of EC forecast data in China's offshore waters[J]. Mar Forecasts, 40(6): 51-66 (in Chinese).

426 刘长华, 陈晓, 王春晓, 等, 2024. 黄海冷水团低温中心季节与年际变化特征研究综述[J]. 海洋环境科学, 43(3): 475-488. Liu C H,
427 Chen X, Wang C X, et al, 2024. Review on seasonal and interannual variation characteristics of low temperature center in the
428 Yellow Sea cold water mass[J]. Mar Environ Sci, 43(3): 475-488 (in Chinese).

429 柳龙生, 刘莲, 黄彬, 2024. 一次入海温带气旋背景下的海雾观测分析和数值模拟[J]. 大气科学, 48(4): 1627-1639. Liu L S, Liu L,
430 Huang B, 2024. Observation and numerical simulation on a sea fog event during an extratropical cyclone entering the sea[J]. Chin
431 J Atmos Sci, 48(4): 1627-1639 (in Chinese).

432 刘志杰, 王炜, 廖志宏, 等, 2024. FY-4A温度廓线和融合海温数据协同同化的海雾模拟效果分析[J]. 气象, 50(5): 547-560.
433 Liu Z J, Wang W, Liao Z H, et al, 2024. Coordinate influence of FY-4A temperature profiles and fusion SST data on the sea fog
434 simulation[J]. Meteor Mon, 50(5): 547-560 (in Chinese).

435 聂高臻, 王慧, 2023. 2023年夏季海洋天气评述[J]. 海洋气象学报, 43(4): 110-122. Nie G Z, Wang H, 2023. Summer 2023 marine
436 weather review[J]. J Mar Meteor, 43(4): 110-122 (in Chinese).

437 覃皓, 郑凤琴, 伍丽泉, 2022. 台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用[J]. 应用气象学报, 33(4): 477-488. Qin H, Zheng F Q,
438 Wu L Q, 2022. The interaction between intensity and rainfall of Typhoon Rammasun(1409)[J]. J Appl Meteor Sci, 33(4): 477-488
439 (in Chinese).

440 秦世广, 雷勇, 李肖霞, 等, 2022. 国产海洋气象漂流浮标运行评估分析[J]. 气象科技, 50(4): 467-475. Qin S G, Lei Y, Li X X, et al,
441 2022. Operational assessment of domestic marine meteorological drifting buoys[J]. Meteor Sci Technol, 50(4): 467-475 (in
442 Chinese).

443 史得道, 吴振玲, 罗凯, 等, 2018. 2015-04-28渤海海雾形成过程中的海气相互作用分析[J]. 热带气象学报, 34(3): 324-331. Shi D D,
444 Wu Z L, Luo K, et al, 2018. Analysis of air-sea interaction on the formation of April 28, 2015 sea fog over Bohai Sea[J]. J Trop
445 Meteor, 34(3): 324-331 (in Chinese).

446 谭海燕, 邵珠晓, 梁丙臣, 等, 2021. ERA5风场与NCEP风场在黄海、东海波浪模拟的适用性对比研究[J]. 海洋通报, 40(5): 524-540.
447 Tan H Y, Shao Z X, Liang B C, et al, 2021. A comparative study on the applicability of ERA5 wind and NCEP wind for wave
448 simulation in the Huanghai Sea and East China Sea[J]. Mar Sci Bull, 40(5): 524-540 (in Chinese).

449 谭哲韬, 张斌, 吴晓芬, 等, 2022. 海洋观测数据质量控制技术研究现状及展望[J]. 中国科学: 地球科学, 52(3): 418-437. Tan Z T,
450 Zhang B, Wu X F, et al, 2022. Quality control for ocean observations: from present to future[J]. Sci China Earth Sci, 65(2):
451 215-233.

452 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 等, 2014. FY-3B/VIRR海表温度算法改进及精度评估[J]. 应用气象学报, 25(6): 701-710. Wang S J, Cui P,
453 Zhang P, et al, 2014. The improvement of FY-3B/VIRR SST algorithm and its accuracy[J]. J Appl Meteor Sci, 25(6): 701-710 (in
454 Chinese).

455 王婷, 祝从文, 马双梅, 2024. 东亚夏季风和中国雨季的趋势变化和关键区气温和海温的影响[J]. 大气科学, 48(3): 1217-1232.
456 Wang T, Zhu C W, Ma S M, 2024. Changes in the East Asian summer monsoon and rainy season in China and critical impacts of
457 regional air and sea surface temperature anomalies[J]. Chin J Atmos Sci, 48(3): 1217-1232 (in Chinese).

458 吴涛, 许冠宇, 李双君, 等, 2023. 一次春季江淮气旋混合型对流天气特征及成因分析[J]. 气象, 49(1): 27-38. Wu T, Xu G Y, Li S J,
459 et al, 2023. Characteristics and causes of a mixed-type convective weather during the formation and development of a Jianghuai
460 cyclone in spring[J]. Meteor Mon, 49(1): 27-38 (in Chinese).

461 夏天竹, 李肖霞, 于润玲, 等, 2024. 基于四种资料的超强台风利奇马(1909)期间海面风变化特征对比分析[J]. 大气科学, 48(6):
462 2374-2388. Xia T Z, Li X X, Yu R L, et al, 2024. Comparison between 4 datasets applied in characteristics analysis of sea surface
463 wind during Super Typhoon Lekima (1909)[J]. Chin J Atmos Sci, 48(6): 2374-2388 (in Chinese).

464 姚日升, 涂小萍, 徐蓉, 等, 2024. 基于浮标观测和ERA5资料的浙江沿海海浪特征分析[J]. 海洋预报, 41(5): 34-43. Yao R S, Tu X
465 P, Xu R, et al, 2024. Sea wave characteristics along Zhejiang coast based on buoy observations and ERA5 data[J]. Mar Forecasts,
466 41(5): 34-43 (in Chinese).

467 张可, 丛春华, 2026. 1949—2020年黄渤海区域台风特征分析[J]. 气象, 52(1): 44-55. Zhang K, Cong C H, 2026. Typhoon
468 characteristics in the Huanghai and Bohai Sea region during 1949-2020[J]. Meteor Mon, 52(1): 44-55 (in Chinese).

469 张苏平, 任兆鹏, 2010. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验[J]. 气象学报, 68(4): 439-449. Zhang S P, Ren
470 Z P, 2010. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: observations and
471 numerical simulations[J]. Acta Meteor Sin, 68(4): 439-449 (in Chinese).

472 张苏平, 杨育强, 王新功, 等, 2008. 低层大气季节变化及与黄海雾季的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 38(5): 689-698.
473 Zhang S P, Yang Y Q, Wang X G, et al, 2008. Seasonal variations in the atmospheric stratification and the relations with the
474 Yellow Sea fog season[J]. Period Ocean Univ China, 38(5): 689-698 (in Chinese).

475 赵丽芳, 沈占锋, 李春明, 等, 2019. 地表净辐射通量观测、模拟和同化的研究进展[J]. 遥感学报, 23(1): 24-36. Zhao L F, Shen Z F,
476 Li C M, et al, 2019. The progress introduction on the study of surface net radiation flux observation, simulation, and assimilation[J].
477 J Remote Sens, 23(1): 24-36 (in Chinese).

478 钟沃谷, 吴志伟, 2025. 海-气耦合过程对东亚冬季风季节-次季节变异的影响及预测[J]. 气象学报, 83(4): 1043-1057. Zhong W G,

479 Wu Z W, 2025. Impact of air-sea interaction on seasonal-to-subseasonal variability and prediction of the East Asian winter
480 monsoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(4): 1043-1057 (in Chinese).

481 朱智慧, 郑运霞, 刘飞, 等, 2024. 上海沿海海雾分类及其时空特征分析[J]. *气象*, 50(12): 1509-1518. Zhu Z H, Zheng Y X, Liu F, et
482 al, 2024. Classification and spatio-temporal characteristics of sea fog in Shanghai coastal area[J]. *Meteor Mon*, 50(12): 1509-1518
483 (in Chinese).

484 庄园煌, 张井勇, 王远皓, 等, 2018. 中国东北暖季气温变化特征及其与海温和大尺度环流的关系[J]. *气候与环境研究*, 23(4):
485 479-492. Zhuang Y H, Zhang J Y, Wang Y H, et al, 2018. Variability of warm season surface air temperature over northeastern
486 China and its relationships with sea surface temperature and large-scale atmospheric circulation pattern[J]. *Climatic Environ Res*,
487 23(4): 479-492 (in Chinese).

488 Cheng Y C, Plag H P, Hamlington B D, et al, 2015. Regional sea level variability in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J].
489 *Cont Shelf Res*, 111: 95-107.

490 Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al, 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower
491 observations[J]. *J Climate*, 25(6): 1916-1944.

492 Fu G, Li P Y, Chen L J, et al, 2023. Historic and future perspectives of storm and cyclone[J]. *Adv Atmos Sci*, 40(3): 447-463.

493

-
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.
- Huang B Y, Liu C Y, Freeman E, et al, 2021. Assessment and intercomparison of NOAA daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1[J]. *J Climate*, 34(18): 7421-7441.
- Huang B Y, Yin X G, Carton J A, et al, 2023. Understanding differences in sea surface temperature intercomparisons[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 40(4): 455-473.
- Lackmann G, 2011. Midlatitude synoptic meteorology: dynamics, analysis, and forecasting[M]. Amer Meteor Soc.
- Li X X, Zou D W, Feng W Y, et al, 2019. Study of quality control methods for moored buoys observation data[C]//2019 International Conference on Meteorology Observations (ICMO). Chengdu, China: IEEE: 1-4.
- Liu H, Cheng X H, Qin J H, et al, 2023. The dynamic mechanism of sea level variations in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Climate Dyn*, 61(5-6): 2937-2947.
- Storto A, Martin M J, Deremble B, et al, 2018. Strongly coupled data assimilation experiments with linearized ocean-atmosphere balance relationships[J]. *Mon Wea Rev*, 146(4): 1233-1257.
- Stull R B, 1988. Boundary layer clouds[M]//Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Wang K Y, Ma Z, Miao Q S, et al, 2024. Synthetic analysis of meteorological elements for the sea fogs occurred in northwest the Yellow Sea under low pressure control and comparison with sea fogs occurred under high pressure control in summer[J]. *Mar Sci Bull*, 26(1): 1-18.
- Yun J, Ha K J, 2022. Physical processes in sea fog formation and characteristics of turbulent air-sea fluxes at Socheongcho ocean research station in the Yellow Sea[J]. *Front Mar Sci*, 9: 825973, doi: 10.3389/fmars.2022.825973.
- Zhang S Q, Liao Q H, Liu C L, et al, 2024. Diagnostic study of an extreme explosive cyclone over the Kuroshio/Kuroshio extension region[J]. *J Ocean Univ China*, 23(3): 605-617.
- Zhang Z W, Li Y Y, Li L, et al, 2023. Characteristics of advection fog at Qingdao Liuting International airport[J]. *Atmosphere*, 14(8): 1310, doi: 10.3390/atmos14081310.

Multi-Scale Characteristics of Air-Sea Elements at Five Buoy Sites in the Western Coast of the Yellow Sea and Their Comparison with ERA5 Reanalysis Data

MIAO Tiantian^{1, 2} LI Xiaoxia^{*1, 3, 4, 5} LIN Hang² QUAN Jimei^{1, 3, 4} LIU Baojun² JIANG Xinzhaoh⁶

¹ Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

² Qingdao Meteorological Office of Shandong Province, Qingdao 266003

³ State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-space, Beijing 100081

⁴ Meteorological Sounding Engineering Technology Research Centre, CMA, Beijing 100081

⁵ Key Laboratory of Intelligent Meteorological Observation Technology, CMA, Beijing 100081

⁶ Pizhou Meteorological Office of Jiangsu Province, Pizhou 221325



Abstract: The focus of this study is on three basic marine meteorological elements, i.e., air temperature (AT), sea-level pressure (SLP), and sea surface temperature (SST), in the western coast of the Yellow Sea. Based on the observations from five buoy sites in this sea area from March 2023 to February 2024 and the contemporaneous ERA5 reanalysis data, we analyze the multi-scale variation characteristics and response mechanisms of the three meteorological elements, conduct a comparative analysis between the in-situ data and ERA5 reanalysis data, and assess the applicability of ERA5 data in the shallow waters of the western Yellow Sea. The results show that there exists a significant interdependence among the three variables: AT and SST show a strong positive correlation ($r \approx 0.9$), while AT inversely correlates with SLP ($r \approx -0.8$), and SST demonstrates a moderate negative relationship with SLP ($r \approx -0.55$). Both AT and SST exhibit unimodal diurnal variations, and they reach peaks in summer and autumn, decreasing in winter and spring. However, SST shows smaller diurnal and seasonal thermal amplitudes than AT, and the lowest values of SST also lag behind those of AT by one hour in daily minima and one month in seasonal minima. In contrast, SLP exhibits double-peak and double-valley diurnal variations, and it reaches peak in autumn and winter, decreasing in spring and summer. The sea-air temperature gradient (SST–AT) exhibits a regular diurnal cycle, increasing at night and peaking at 06:00 BT, then shrinking during the day time and falling to its bottom at 16:00 BT.

On an annual scale, SST exceeds AT from August to the following February, accounting for approximately 58% of the whole year. In terms of responses to typical weather processes, these key elements present distinct response patterns: During the sea fog event in June, warm-humid advection over cold sea surface drives the SST–AT down to $-3.31\text{ }^{\circ}\text{C}$, forming the thermodynamic conditions for advective cooling fog. Under the influence of the Jiang-Huai cyclone in August, the elements respond in a clear sequence: $\text{AT} > \text{SLP} > \text{SST}$. Throughout the cold wave event in November, AT shows a “cliff-like” drop of $14.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ within 40 h, while SST decreases by only $2.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the same period. Compared to observations, ERA5 reanalysis fails to resolve the diurnal variation characteristics of SST, and underestimates AT, SLP and SST by approximately $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.26 hPa and $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively.

Key words: the western coast of the Yellow Sea, observation buoy, ERA5 reanalysis data, multi-scale characteristics, model evaluation