

文影,高山红,吴炜.山东半岛南岸近岸海雾时空特征及其成因探究[J].海洋气象学报,2025,45(3):1-17.
WEN Ying, GAO Shan hong, WU Wei. Spatio-temporal features and mechanisms of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(3): 1-17. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241012001. (in Chinese)

山东半岛南岸近岸海雾时空特征及其成因探究

文影¹, 高山红^{1,2}, 吴炜^{3,4}

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 4. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘要 影响山东半岛南岸的海雾可大致分为大范围海雾与近岸海雾, 对港口交通运输与近岸作业等造成严重不利影响的主要是后者, 但相关研究却相对较少且深度不够。针对 2008—2023 年山东半岛南岸的近岸海雾事件, 基于近岸站点、再分析格点与卫星数据, 统计分析近岸海雾的时空分布特征并初步探究其成因。结果表明: (1) 近岸海雾按照雾区特征可细分为 5 种类型, 分别受控于 5 种不同的天气形势, 这 5 种海雾发生次数的月际变化差异明显; (2) 近岸海雾的时空演变具有显著的日变化特征, 其中快变的天气系统会强烈影响雾区形态的演变, 而天气系统变化缓慢时, 海面温度与气海温差是雾区变化的重要影响因素; (3) 近岸海雾事件中几乎均伴随着海陆风过程, 其中海雾发生与陆风环流建立在时间上高度相关且呈现一致的月际变化。研究揭示海陆风环流在山东半岛南岸近岸海雾过程中可能扮演关键性作用, 有待于进一步借助高时空分辨率的数值模式进行详细探究。

关键词 山东半岛; 近岸海雾; 时空特征; 海面温度; 海陆风环流

中图分类号: P732.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2025)03-0001-17

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241012001

Spatio-temporal features and mechanisms of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore

WEN Ying¹, GAO Shan hong^{1,2}, WU Wei^{3,4}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 4. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China)

Abstract There are two types of sea fog affecting the Shandong Peninsula's southern shore, namely widespread sea fog and coastal sea fog. Although the coastal sea fog predominantly causes considerable interruptions to port operations and coastal activities, existing studies on this phenomenon remain limited and lack depth. This study aims to explore the spatio-temporal distribution patterns of the coastal sea fog events in the Shandong Peninsula's southern shore from 2008 to 2023, as well as the underlying causes, using data of coastal stations, reanalysis grid data and satellite observations. The major findings are as follows. (1) Based on the geographical spread of fog areas, we further divide the coastal sea fog into 5

收稿日期: 2024-10-12; 修回日期: 2024-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004204); 国家自然科学基金项目(U2342214, 42075069)

第一作者: 文影, 1306170871@qq.com。

通信作者: 高山红, gaosh@ouc.edu.cn。

types under 5 kinds of synoptic situations, and the monthly variations of each type's frequency are significantly different. (2) The spatio-temporal evolution of coastal sea fog displays significant diurnal variations. Rapidly changing synoptic systems have a substantial influence on the morphology of fog areas, while sea surface temperature and sea-air temperature difference play crucial roles in fog development under slowly changing synoptic situations. (3) Most coastal sea fog episodes are accompanied by sea-land breeze processes. There is an essential temporal correlation between the emergence of sea fog and the establishment of land breeze circulation, both of which demonstrate consistent intermonthly fluctuations. This study suggests that the sea-land breeze circulation may play an important role in the formation of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore. To better understand this mechanism, additional research should be conducted utilizing high-resolution numerical models.

Keywords Shandong Peninsula; coastal sea fog; spatio-temporal feature; sea surface temperature; sea-land breeze circulation

0 引言

海雾是一种发生在海上大气边界层内,海面大气水平能见度(以下简称“能见度”)低于1 km的海洋灾害性天气^[1-2]。黄海是我国海雾的高发区,其海雾主要发生于春夏季^[1,3-6]。海雾造成的低能见度会严重影响港口交通、海上运输与作业、海上大型活动等,譬如位处黄海北部的青岛近岸海域约70%的船舶碰撞事件是由海雾导致的^[4-5]。截至目前,已有大量的黄海海雾观测分析工作^[4-5,7-16]。这些研究主要是基于沿岸和岛屿站点的气象变量观测、海上各种观测平台(如商船、科考船、舰艇、钻井平台与浮标等)的观测以及卫星可见光云图和卫星反演等观测,对黄海海雾的时空分布和生成条件进行统计分析。研究^[4,17-18]表明,3—7月是黄海雾季,黄海几乎全海区都有可能发生海雾,有些海雾的雾区甚至达到海盆尺度。前人通过卫星可见光云图和天气图,对有利于黄海海雾发生的天气形势进行总结^[1-3,14,19-20],发现入海变性高压型、中国大陆东移低压或低压槽、北太平洋高压脊和入西太平洋高压型是控制黄海海雾演变的主要天气系统(以下简称“海雾天气形势”)。同时研究者也注意到,海雾天气形势存在明显的季节差异,如黄海春夏季成雾的背景环流分别是冬季风系统中的大陆高压和夏季风系统中的太平洋副热带高压^[10,21]。

Wang等^[22]在进行黄海海雾的数据同化研究时就注意到黄海海雾可以大致分为发生于开阔海域的大范围海雾与沿岸生成的近岸海雾。然而,前人通常利用沿岸站点与海上有限的船舶观测进行海雾的时空特征统计,该方法同时统计了影响该地区的大范围

与近岸海雾,并未区分雾区类型^[1,3-6,14,16-17,22]。Jin等^[23]明确了黄海大范围海雾与山东半岛南岸近岸海雾的分类标准后,从卫星云图上肉眼甄别出海雾的雾区信息,统计了2011—2020年黄海海雾的发生次数(即雾频),发现山东半岛南岸近岸海雾约占总数的30%。图1(时间为北京时,下同)给出了2类海雾的可见光云图示例,大范围海雾的覆盖范围甚广(图1a—b),而近岸海雾的发生、演变过程通常局限于近岸(图1c—d)。基于二者空间分布的差异,近岸海雾可能更多受沿岸局地中小尺度天气环流的影响。

海陆风环流是由海陆热力差异驱动的沿岸局地大气环流^[24]。山东半岛三面环海,海陆热力差异显著,春夏季海陆风事件频发^[25-28]。Jin等^[23]通过研究一个典型的山东半岛南岸近岸海雾个例,揭示了海陆风环流在近岸海雾演变中的重要作用。也有少数研究者^[25,29-33]曾简单提及海陆风环流对近岸海雾的可能影响作用。因此,在山东半岛南岸的近岸海雾演变过程中,海陆风环流的存在及其重要作用是否具有普遍性?这个科学问题值得深入研究。围绕此问题,文中拟利用地面观测、卫星观测与再分析格点数据,针对近16年(2008—2023年)影响山东半岛南岸近岸海雾的时空分布特征展开统计分析,并尝试探讨其成因。

1 数据与方法

1.1 数据

1.1.1 地面观测数据

数据来源于中国气象局标准气象站的常规地面观测资料。数据包括山东半岛南岸的5个沿岸气象站(日照站、黄岛站、青岛站、海阳站和乳山站),观

测气象要素包括温度、气压、相对湿度、能见度、风向和风速等,时间分辨率为1 h。数据涵盖36个海雾

事件的演变过程,并在事件前后各延长12 h,用于展示海陆风的观测事实。

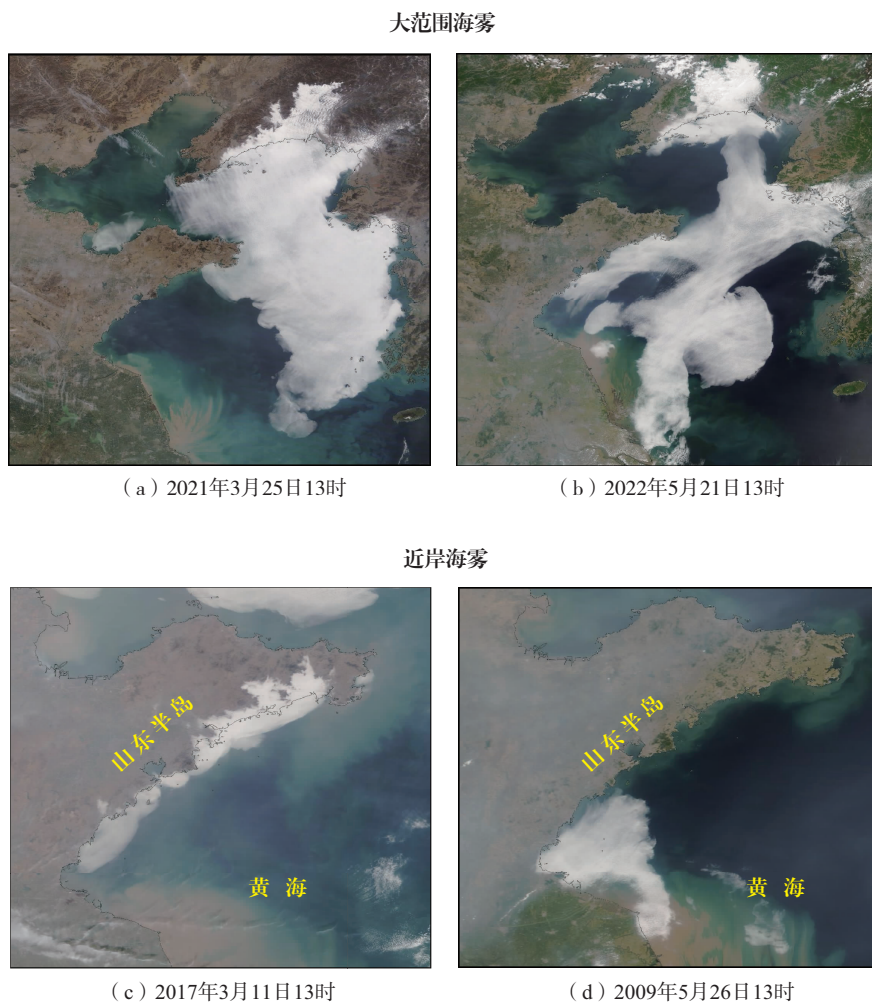


图1 两类海雾的卫星可见光云图样例

Fig.1 Satellite visible cloud imagery examples of two types of sea fog

1.1.2 卫星观测数据

利用日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)提供的葵花系列静止卫星数据识别海雾雾区与演变过程。数据包括可见光、短波通道IR4和长波通道IR1数据(时间分辨率为1 h,下载网址为<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/GAME/>)。

1.1.3 再分析格点数据

使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5数据分析近岸海雾的天气特征。数据的时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直方向共37个气压层,下载网址为<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>。

1.2 方法

1.2.1 海雾识别

为了刻画海雾的演变过程,同时区分近岸与大范围海雾这两种类型,主要借助葵花系列静止卫星数据进行识别。

黄海海雾在可见光云图上有较为明显的特征,如表现为暗淡柔和的乳白色,表面纹理均匀且与海岸线吻合,位置相对固定、少变^[8,14-15,34-35],大量研究^[1,4,6-7,9,17,36]基于此特征对黄海海雾进行识别。虽然白天可见光云图上可以肉眼识别海雾,但是夜间海雾的识别通常依赖卫星反演方法。文中采用Wang等^[22]针对黄海海雾所提出的夜间反演方法,基于短波通道IR4和长波通道IR1的亮温差

(brightness temperature difference, BTD; 即 IR4 的亮温减 IR1 的亮温) 来诊断雾区。具体来说, 当亮温差处于 $[-5.5, -2.5]$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 将其识别为海雾雾区。已有研究^[21, 37-40]表明利用该方法反演得到的黄海海雾结果是可靠的。

1.2.2 海陆风识别

黄海海雾以平流冷却雾为主^[1, 4-5, 23], 其发生时盛行背景风为偏南风^[17, 36, 41]。当山东半岛南岸偏南背景风较强时, 垂直海岸线的海陆风信息往往淹没其中^[23, 28]。因此, Jin 等^[23]采用滑动平均方法过滤沿岸地面站点观测风中的背景风, 成功获取了日变化显著的海陆风信息。这个滑动平均方法^[23, 42]的具体做法如下。

一个样本量为 n 的序列 x , 其滑动平均后的序列 X 表示为

$$X_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1}, j=1, 2, \dots, n-k+1 \quad (1)$$

其中: k 为滑动长度, 取奇数时, 滑动平均得到的序列为原始时间序列的整点时刻, 若取偶数, 将对准原始时间序列的中间位置。沿岸地面观测数据的时间分辨率为 1 h, 24 h 滑动平均可以用于过滤掉大尺度背景风场信息, 从而反映出受局地中小尺度因素影响的日变化特征, 因此公式(1)中的滑动长度 k 取 25。

基于山东半岛南岸国家级基本气象站的地面风观测数据, 利用以上滑动平均方法获取影响近岸海雾的海陆风演变信息。针对每一次海雾过程, 在海雾发展成熟时期的雾区范围内, 利用地面观测捕捉海陆风信息, 并将多个站点观测的平均结果作为此次海雾事件中海陆风的演变信息。

1.2.3 EEOF 分解和 K-means 聚类

黄海海雾的发生存在特定的海雾天气形势^[1, 6, 14, 17]。文中针对每一个海雾事件, 使用 ERA5 数据中 1 000 hPa 位势高度场信息来刻画海雾天气形势。同时, 为了更好地捕捉到天气系统的演变特征, 选取海雾发生前 24 h、12 h 与海雾发生时刻的位势高度场信息进行分析, 分析方法为基于经验正交分解(empirical orthogonal function, EOF) 的扩展 EOF (extended EOF, EEOF)^[42-44]与 K-means 聚类^[45]。

EEOF 是在 EOF 的基础上, 以固定空间内多次连续观测所构成的扩展矩阵为变量场, 展示出变量场移动分布特征的一种方法^[43-44, 46]。EEOF 分解结

果分为两部分, 一是反映空间结构演变特征的荷载向量场组, 二是对应向量场组的时间序数。针对 1 000 hPa 位势高度场 EEOF 分解得到的时间序数值相近的个例表示空间结构相似, 因此进一步通过对时间序列聚类可以实现海雾天气形势的分型。聚类采用 K-means 聚类方法, 目的是将 n 个海雾个例的天气形势分为 k 类, 每类都具有较高相似度。具体来说, 首先将 EEOF 分解得到的时间序列作为不同海雾个例天气形势的特征值, 其次基于 k 个随机的初始聚类中心将其分为 k 类, 每类的平均值再作为下一次的聚类中心, 不断迭代, 直到聚类中心稳定不变或达到最大迭代次数后停止。 k 值的选择通常采用手肘法, 需要先计算出每个海雾个例的特征值与聚类中心的欧式距离 d 。

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - C_{ij})^2} \quad (2)$$

其中: x 为时间序列值, C_i 为第 i 个聚类中心, x_j 、 C_{ij} 为第 j 个 x 和 C_i 的值。整个数据的损失函数(sum of squared errors, SSE)的计算公式为

$$V_{\text{SSE}} = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |d(x, C_i)|^2 \quad (3)$$

其中: V_{SSE} 代表 SSE 的值, SSE 值越小, 说明聚类效果越好。理论上, 随着分类数 k 值的增加, 每类中样本之间的聚合程度随之增加, 相应的 SSE 会减小; 当 k 值超过某一个数后(最优 $k \in [2, \sqrt{n}]$ ^[47]), SSE 不再显著降低, 即认为该值为 k 的最优值。然而, 可能会出现 SSE 下降比较均匀的现象, 此时该方法不易判断, 可使用轮廓系数来补充说明^[48], 个体轮廓系数计算公式为

$$S_i = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (4)$$

$$a(i) = \frac{1}{n_c - 1} \sum_{i, j \in C_c, i \neq j} d(i, j) \quad (5)$$

$$b(i) = \min \left\{ \frac{1}{n_p} \sum_{i \in C_c, j \in C_p} d(i, j) \right\} \quad (6)$$

其中: $a(i)$ 表示当前类中样本之间的平均欧拉距离, $b(i)$ 表示其他类中样本之间的最小平均欧拉距离, C_c 、 C_p 分别表示当前类与其他类, n_c 、 n_p 分别表示当前类与其他类对应的样本数。公式(4)反映了聚类程度, 值域为 $[-1, 1]$ 。轮廓系数的数值越高, 说明聚类效果越好, 然而该方法也存在一定局限性, 例如虽然轮廓系数较高, 但对应的某些聚

类样本数非常大,而其他样本数非常小,该 k 值不具有平衡性和解释性。因此在实际应用中,需同时考虑损失函数和轮廓系数,根据研究对象的特点进行综合考虑。

2 近岸海雾的时空特征及天气特征

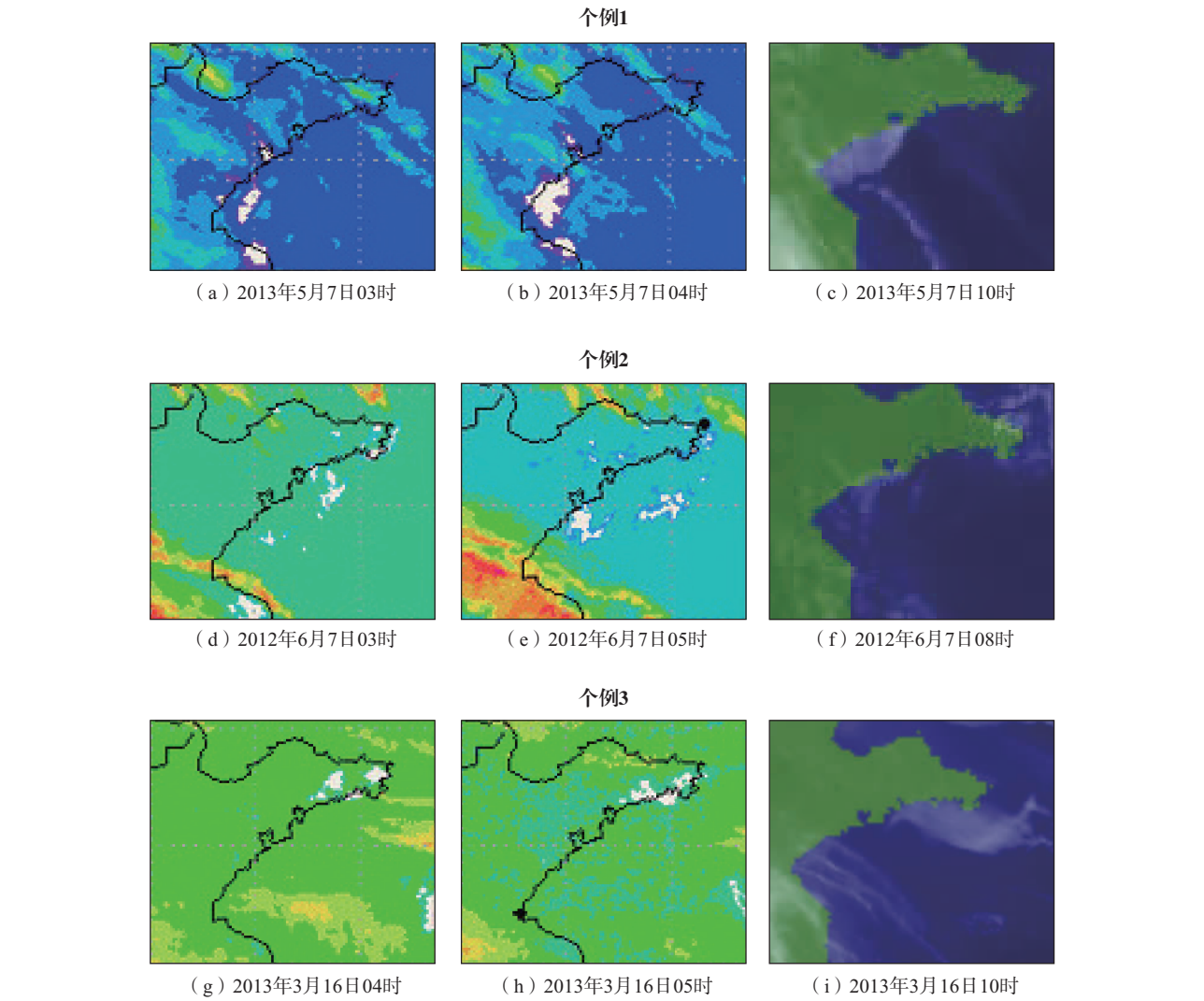
2.1 时空特征

2.1.1 近岸海雾个例

聚焦于黄海海雾多发的 3—7 月^[1,4,17],利用 1.2.1 节中的海雾识别方法,针对近 16 年(2008—2023 年)发生在山东半岛南岸的近岸海雾个例进行统计分析。为了清晰地展示海雾的演变过程,将受其他天气系统(如云雨带、气旋、台风等)影响而无法完整识别海雾过程的个例剔除。最终得到 37 个近岸海雾个例,详见表 1,图 2 展示了其中 5 个典型海雾个例的演变过程。

表 1 山东半岛近岸海雾个例的时间分布
Table 1 Temporal distribution of coastal sea fog cases over the Shandong Peninsula

年份	海雾个例数					合计
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	
2008	1	1	0	0	0	2
2009	0	0	1	0	0	1
2010	0	0	1	1	0	2
2011	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	3	1	1	5
2013	3	0	2	0	0	5
2014	0	2	0	0	0	2
2015	2	2	1	1	0	6
2016	0	0	0	1	0	1
2017	2	0	1	1	1	5
2018	1	0	0	0	0	1
2019	0	1	1	0	0	2
2020	0	0	0	0	1	1
2021	0	0	0	0	0	0
2022	0	1	1	0	1	3
2023	1	0	0	0	0	1
合计	10	7	11	5	4	37



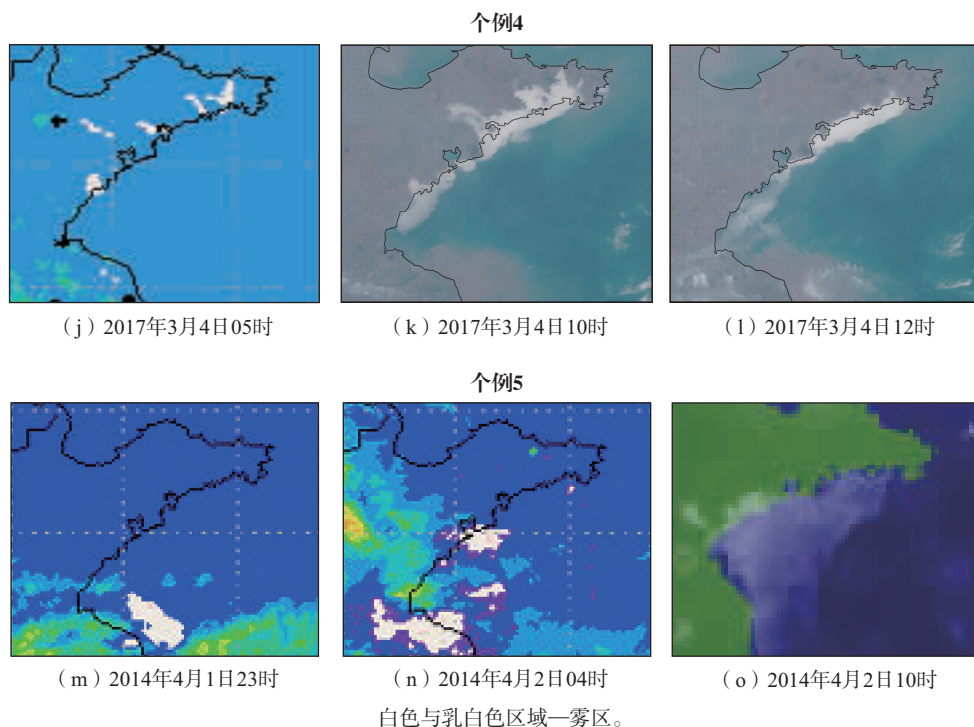


图2 山东半岛南岸5个典型近岸海雾个例的时空分布

Fig.2 Spatio-temporal distribution of 5 typical coastal sea fog cases along the Shandong Peninsula's southern shore

2.1.2 近岸海雾的时空特征

基于1.2.1节海雾识别方法和Jin等^[23]判别雾区大小的标准,统计了2008—2023年大范围海雾与近岸海雾的年平均逐月雾频(图3)。对比前人根据站点观测数据的统计结果^[17,49],图3展示的黄海海雾逐月雾频及其变化趋势是可靠的。区分雾区类型后发现,大范围海雾的雾频峰值出现在6月而近岸海雾则在7月,而且后者的逐月雾频起伏幅度远小于前者。这表明相比于主要受控于季节变化明显的天气形势的大范围海雾,近岸海雾可能更多受沿岸局地大气环流的影响。

观察对比37个近岸海雾个例的雾区演变(图略),可将其分为5类(图4a)。这5类近岸海雾发生区域(标记,占比)分别为海州湾海域(雾区Ⅰ,20.5%)、青岛近岸海域(雾区Ⅱ,20.5%)、青岛以东海域(雾区Ⅲ,18.0%)、山东半岛南岸贴岸带状海域(雾区Ⅳ,18.0%)和充满山东半岛南岸海域(雾区Ⅴ,23.0%)。每类雾区的发生频率较为相近,没有明显的主次差别,但它们的月雾频存在显著的差异(图4b—f)。具体而言,雾区Ⅰ主要发生于3—6月,其中3、4月雾频较低,5月迅速增长达到峰值,

6月逐渐减少,至7月完全消失。雾区Ⅱ集中发生于5—7月,5月开始出现,6月达到峰值,7月稍有降低但仍保持较高的雾频。雾区Ⅲ离散发生于3月和6、7月,在3、7月有较高的雾频,而4、5月未发生。雾区Ⅳ多发生于3、4月,夏季几乎不发生。雾区Ⅴ在4—7月都可能发生,雾频表现为先增加后降低,5月为峰值。

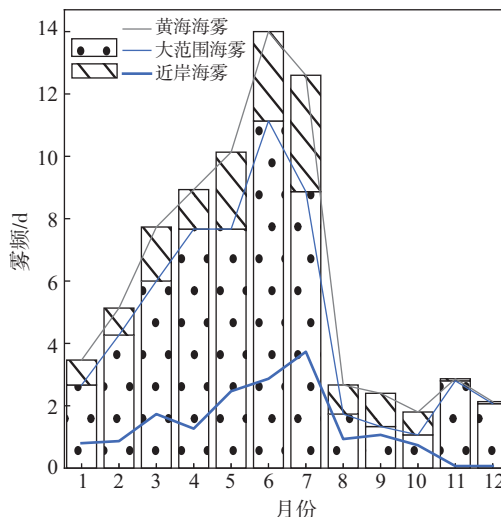


图3 2008—2023年黄海海雾逐月雾频分布

Fig.3 Monthly frequency of sea fog over the Yellow Sea averaged from 2008 to 2023

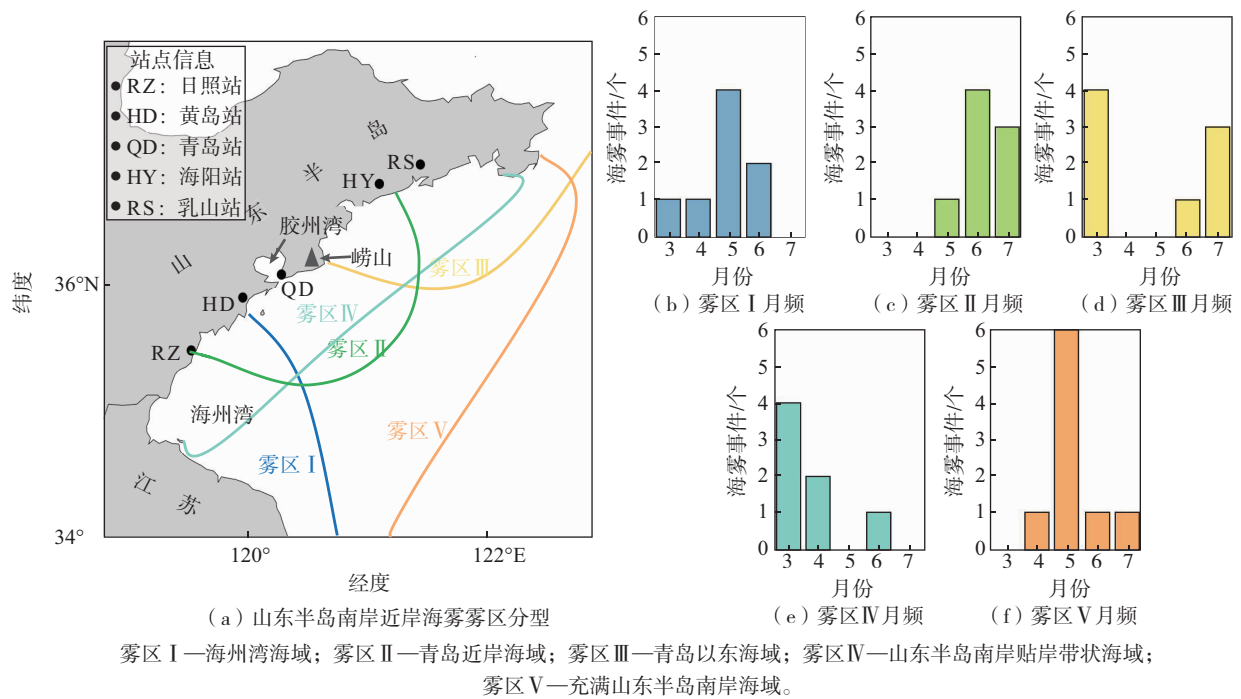


图4 山东半岛南岸近岸海雾的分类与不同类型雾区3—7月的逐月雾频
Fig.4 Classification of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore and monthly fog frequency of different types of fog areas from March to July

进一步统计了37次近岸海雾事件的持续时段,发现其不仅在持续时间上比大范围海雾短,而且存在显著的日变化特征。近岸海雾一般发生于夜间且持续时间为7~22 h(图5a—b);月平均发生时刻(图5a

中黑色实线)呈现为3—5月逐步提前,5—7月逐步延迟,而月平均持续时间(图5b中黑色实线)的变化趋势恰好相反。这表明,海雾发生时间越早的月份,其持续时间也普遍更长,而发生时刻最早的月份是5月。

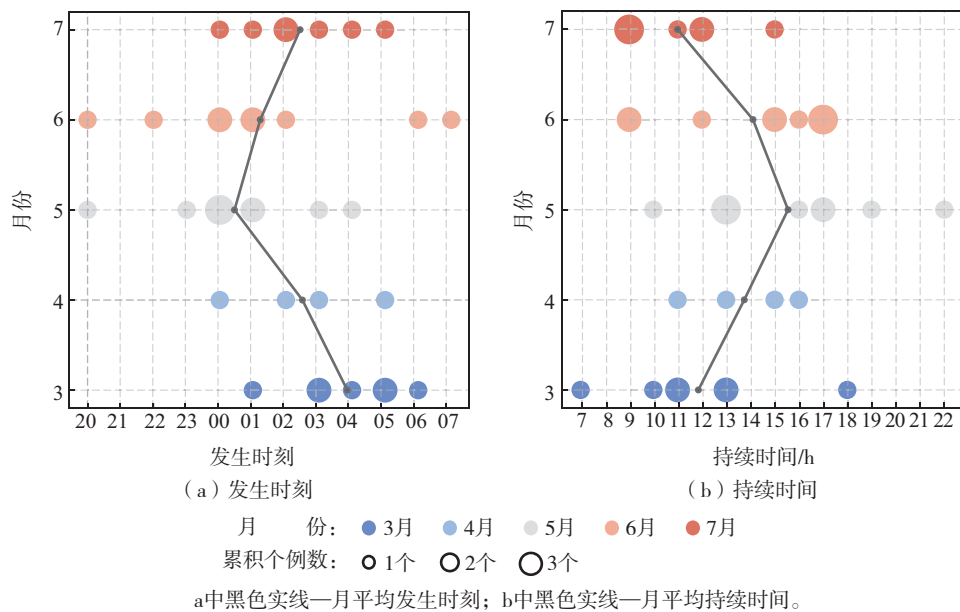


图5 山东半岛南岸近岸海雾3—7月发生时刻与持续时间的散点分布
Fig.5 Scatter plot of occurrence time and duration of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore from March to July

2.2 天气特征

尽管通过人工查看天气图的主观方式可以归纳总结出不同类型海雾的天气形势,但 EEOF 与 K-means 聚类分析相结合的方法无疑是一种客观与高效的途径。聚焦于 2008—2023 年平流冷却雾盛行的 3—7 月,对海雾发生前 24 h、12 h 和发生时刻的 1 000 hPa 位势高度场(范围为 $28^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 132^{\circ}\text{E}$)进行 EEOF 分解。分解结果显示模态一的方差贡献达 90.16%(图略),因此仅保留模态一并将海雾个例对应的时间序列作为天气形势的特征值集,对其进行 K-means 聚类分析,最后结合手肘法和轮廓系数在考虑研究对象特性的基础下确定聚类个数,将空间模态相似的个例进行聚类从而完成客观分型。

2.2.1 EEOF 与 K-means 聚类方法的检验

为了检验 EEOF 与 K-means 聚类分析方法的可行性,挑选 2011—2020 年共 52 次黄海大范围海雾事件(时间分布表略)来进行效果检验,原因是这类海雾的天气形势已经较为明确^[1,14]。

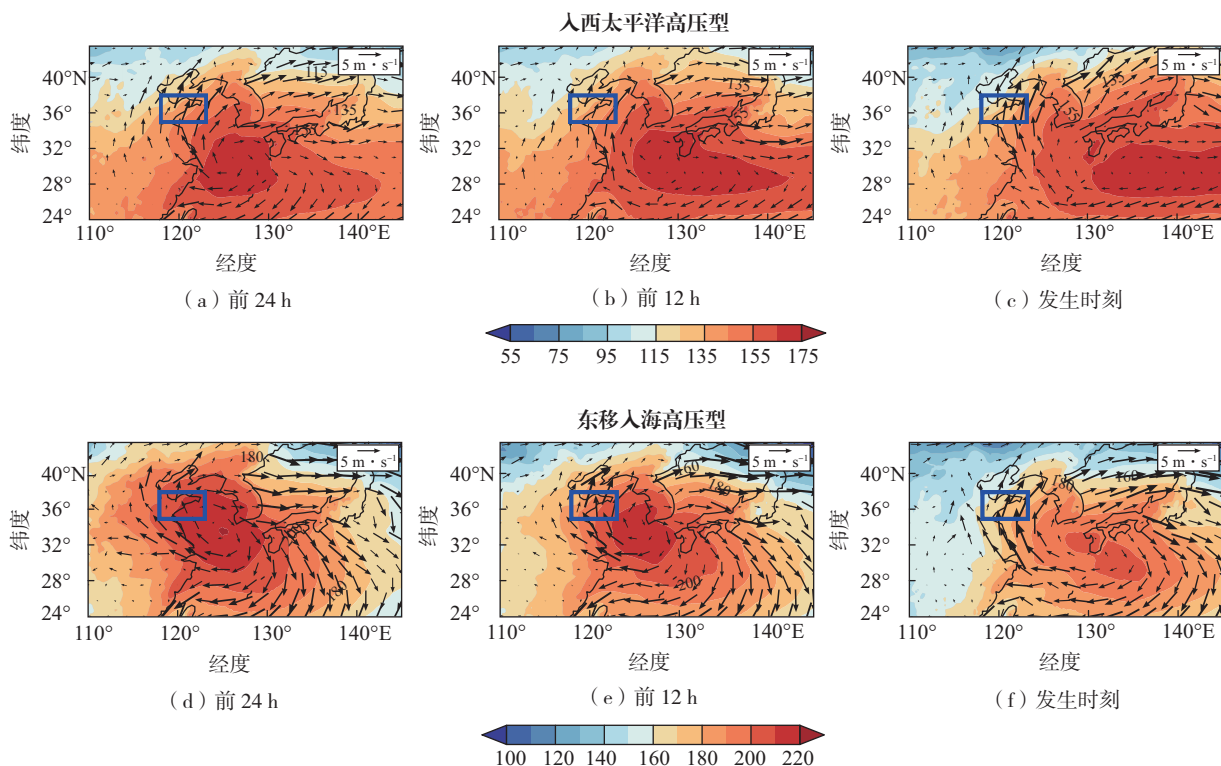
基于 K-means 损失函数和轮廓系数(图略),黄海大范围海雾可分为 4 种天气型(图 6),分别是入西太平洋高压型(22.2%)、东移入海高压型(11.1%)、中国大陆东移低压槽前型(37.0%)和太

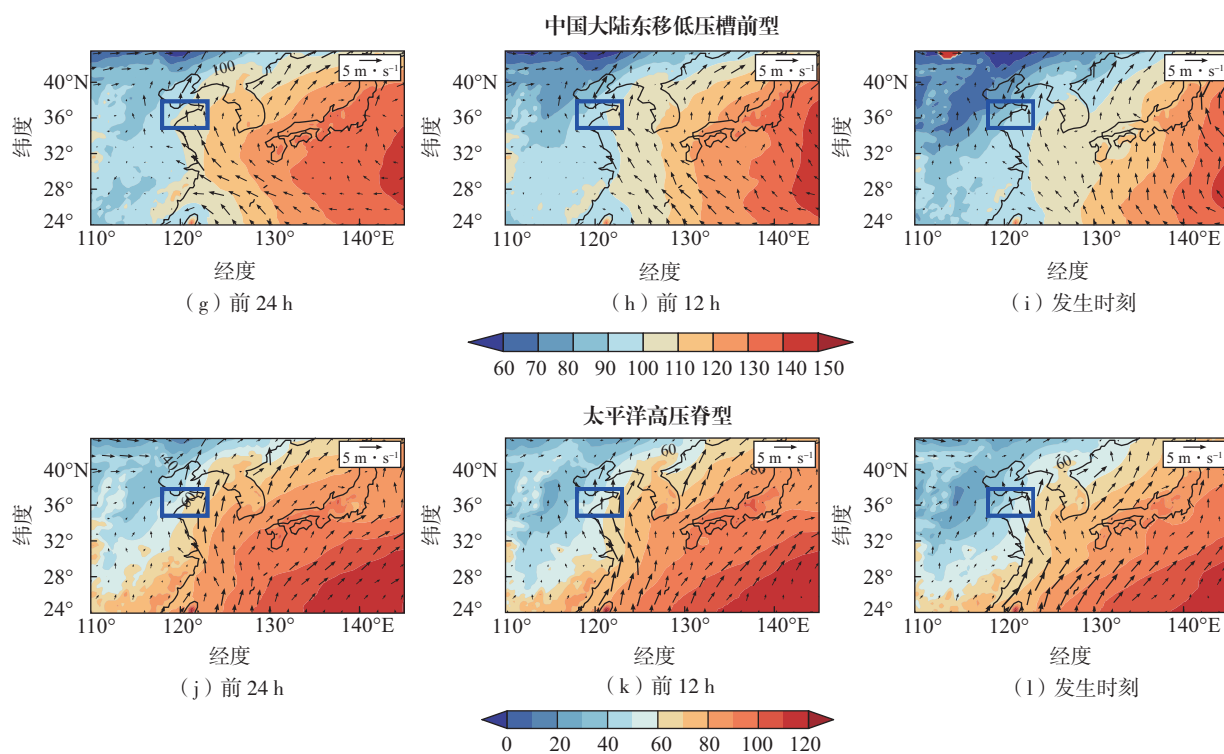
平洋高压脊型(29.6%)。4 种天气型均表现为,控制黄海海域的高压系统具有纬向跨度大、中心偏离中国近海的特征。海雾发生于高压系统的东北部,偏南气流将低纬洋面上方的暖湿空气由南向北输送至相对较冷的黄海海面,形成的海雾分布范围广、持续时间长^[1,14,17]。对比前人的研究^[1,14],此客观分型结果与已有人工分型结果非常一致。值得指出的是,人工分型基于沿岸站点观测而非海雾雾区。由于人工分型所选择的海雾过程持续时间超过 1 d,而且多着眼于“能够将暖湿空气吹向某些冷海区的天气形势”^[1](如高压后部型或低压前部型,亦或二者同时存在),导致所挑选的黄海海雾往往就是大范围海雾过程。

因此,基于对黄海大范围海雾天气分型效果的考察,认为将 EEOF 与 K-means 聚类分析组合方法用于黄海海雾天气型的客观分类是可靠的。

2.2.2 近岸海雾的天气特征

针对表 1 给出的 37 个近岸海雾个例,进行 EEOF 分解与 K-means 聚类分析。根据 K-means 聚类的损失函数和轮廓系数(图 7),选取损失函数的拐点处和轮廓系数的较大值,在最优 k 值的取值范围内(最优 $k \in [2, \sqrt{n}]$),确定分类数为 5。





色阶及图内数字—1 000 hPa位势高度, 单位为gpm; 箭头—1 000 hPa风场, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 蓝线框—山东半岛。

图6 黄海大范围海雾天气形势的客观分型结果

Fig.6 Objective classification results of synoptic situations of widespread sea fog over the Yellow Sea

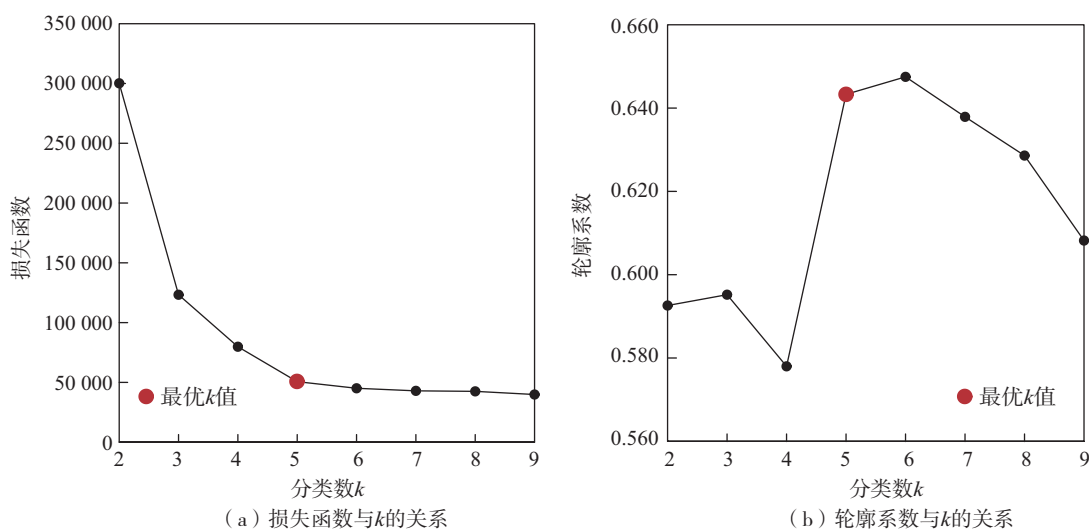


图7 近岸海雾个例 K-means 聚类分析中的损失函数和轮廓系数

Fig.7 Loss function and silhouette coefficient in K-means clustering analysis of coastal sea fog cases

山东半岛南岸的近岸海雾分为5种天气型(图8),分别是东移入海高压型(13.5%)、南下入海高压型(16.2%)、西太平洋高压脊Ⅰ型(32.4%)、西太平洋高压脊Ⅱ型(13.5%)和黄海高压—江淮淮静止锋型(24.3%)。

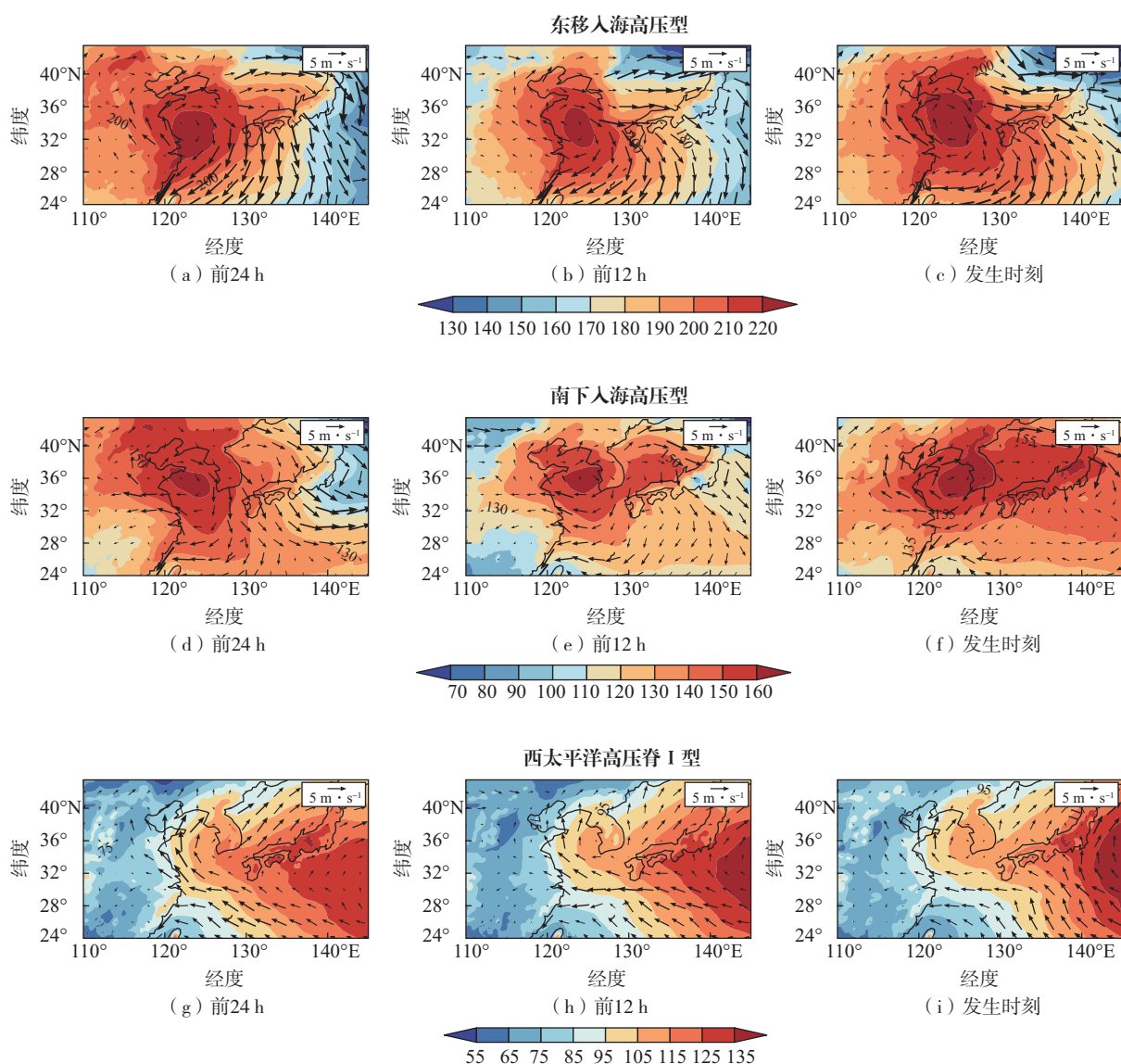
图8中的5种天气型对应着不同的气候背景与

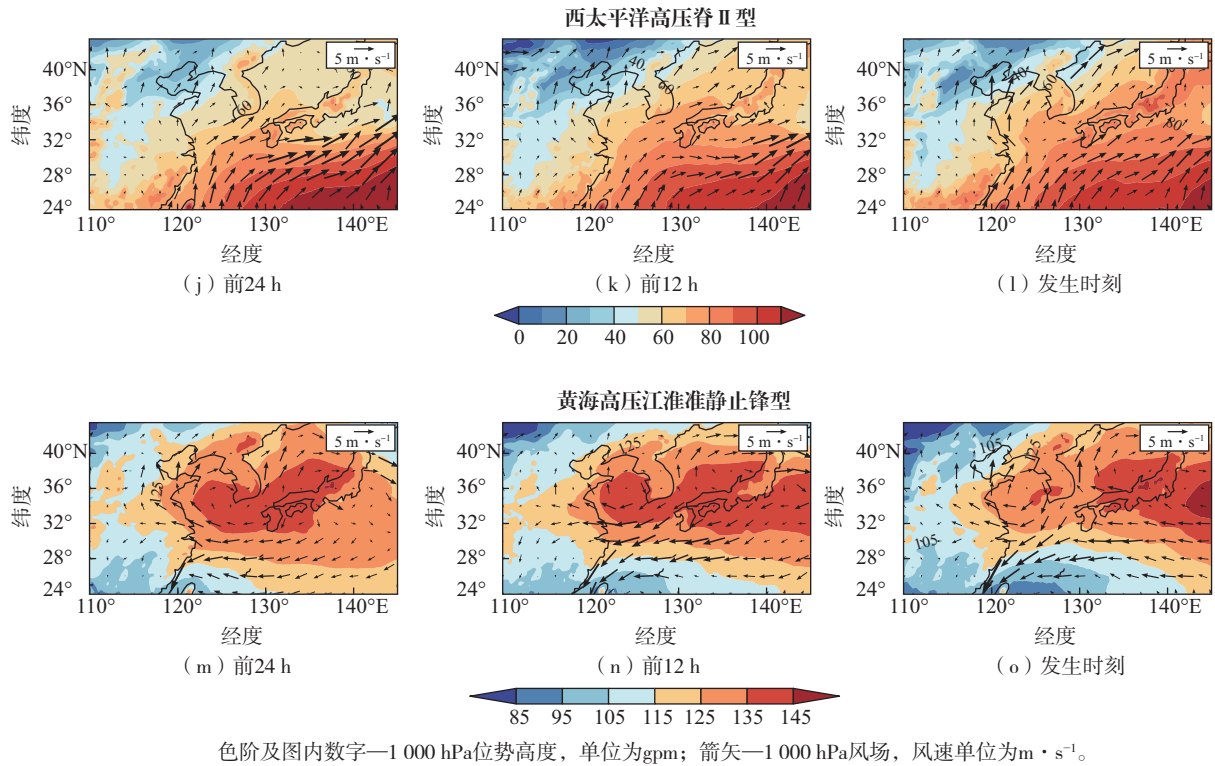
天气特征。东移入海高压型发生在春季,大陆冷高压东移入海,强度先减弱后增强,高压中心由黄海西南部移动至中部,近岸逐渐受到来自海洋的西南气流的影响(图8a—c)。南下入海高压型同样发生于春季,差异在于冷高压的移动路径为由北向南移动入海,高压最终维持在黄海与日本海,呈东北—西南向带状分

布,其西部和北部外围与海岸线平行,中心位于黄海东北部(图 8f),整个过程中高压形态快速变化,导致近岸的风压场随之变化(图 8d—f)。西太平洋高压脊 I 型发生于春末和夏季、高压脊线位于 30°N 以北且高压脊缓慢东退、近岸风压场强度逐渐减弱的过程(图 8g—i)。基于 925 hPa 的位势高度场和温度场(图略),该天气型的形成是由于冷高压从鄂霍次克海南下至西北太平洋,在洋面长期维持并变性,伴随着夏季风的建立,低压系统向东北方向移动,与高压相互作用导致高压系统向西北、东南移动,形成西太平洋高压脊 I 型。西太平洋高压脊 II 型发生于夏季,高压位于 30°N 以南,过程中高压脊缓慢向西北方向延伸,近岸风压场强度逐渐增强(图 8j—l)。黄海高压—江淮准静止锋型主要发生在春末夏初,东—西走向的

带状高压维持在黄海和日本半岛附近海域,高压西部边缘与近岸海岸线贴合。整体上看, 30°N 以南存在低压北上并逐渐增强,位势场从南向北呈现出低—高一—低的分布模态(图 8m—o)。高压范围与强度随着南北两侧低压的增强而缩小、减弱,近岸气压梯度减小,天气状态稳定(图 8m—o)。

海雾发生于海上大气边界层内,其中的水汽条件与层结状况受控于具体的天气系统,而水汽与层结状况将直接导致海雾的特征出现差异。进一步考察了图 8 中每个分图对应的 1 000 hPa 水汽通量及其水汽通量散度(图略),分析了山东半岛南岸近海区域的水汽来源与水汽条件。基于分析结果与图 8 的信息,总结了近岸海雾 5 种天气型的基本特征(表 2)。





色阶及图内数字—1 000 hPa位势高度,单位为gpm; 箭头—1 000 hPa风场, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图8 山东半岛南岸近岸海雾天气的客观分型结果

Fig.8 Objective classification results of synoptic situations of coastal sea fog along the Shandong Peninsula's southern shore

表2 控制近岸海雾的5种天气型特征

Table 2 Characteristics of 5 synoptic types influencing coastal sea fog

天气型	天气系统	多发季节	天气过程	系统变化	高压中心位置	高压形态	水汽来源	水汽辐合区	水汽辐合强度/ ($\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
东移入海高压型	大陆移动性入海高压	春季	冷高压东移入海	慢变	黄海-中南部	椭圆状	黄海-西南部	成山头及以南海域	小于4
南下入海高压型	大陆移动性入海高压	春季	冷高压南下入海	快变	黄海-东部	东北-西南带状	黄海-东南部	贴岸带状, 海州湾极大值	小于10
西太平洋高压脊Ⅰ型	太平洋副热带高压	春末、夏季	太平洋高压脊缓慢东退	慢变	日本以东海域	高压脊线位于 30°N 以北	日本以南海域	山东半岛南岸海区	大于12
西太平洋高压脊Ⅱ型	太平洋副热带高压	夏季	太平洋高压脊缓慢西伸	慢变	日本以南海域	高压脊位于 30°N 以南	台湾附近海域	山东半岛南岸海区	大于12
黄海高压-江淮准静止锋型	太平洋副热带高压	春末、夏初	高压在黄海和日本海	快变	黄海和日本海	东-西走向带状	太平洋-海域	山东半岛南岸海区	大于12

东移入海高压型、南下入海高压型受到冬季风系统下大陆移动性入海高压的影响,但由于高压的移动路径与形态差异导致近岸海域的水汽来源与水汽条件不同,南下入海高压型的水汽辐合区和强度都更大,受高压形态影响易出现雾区Ⅰ和Ⅳ;东移入海高压型的水汽辐合区位于成山头近海,易出现雾区Ⅲ。西太平洋高压脊Ⅰ型、西太平洋高压脊Ⅱ型、黄海高压-江淮准静止锋型受到夏季风系统下的太平洋副热带高压影响,此时气候背景场水汽条件充沛,有利于海雾生成。当存在分裂的高压位于黄海

时,易出现雾区Ⅲ、Ⅳ,黄海高压-江淮准静止锋型影响下易出现雾区Ⅳ;当高压以副热带太平洋高压脊的形式存在时,有利于雾区Ⅴ的形成,然而随着下垫面海面温度(以下简称“海温”; sea surface temperature, SST)升高,受临界海温与气海温差($t_a - t_s$)的影响可能多出现雾区Ⅱ和雾区Ⅲ。

3 时空分布特征的成因探究

前人研究表明,天气系统控制下的大气层结和水汽状况是海雾发生的重要影响因素^[1,14],海雾雾

区通常对应着水汽辐合区^[50]。海雾直接受海洋的影响,下垫面海温与气海温差,是导致黄海平流冷却雾发生的重要因素^[4,17,50]。此外,海陆风是近岸海陆热力差异的产物,对近岸海雾的发生、发展存在显著影响^[23]。

3.1 天气特征与海雾的联系

在 2.2 节分析结果的基础上,针对山东半岛南

岸的 37 个近岸海雾事件,统计了不同月份和天气形势下出现的雾区类型,如图 4a 所示。统计结果(表 3)表明:东移入海高压型控制下主要出现雾区Ⅲ;南下入海高压型则主要出现雾区Ⅳ;而西太平洋高压脊Ⅰ型可出现多种雾区类型,其中以雾区Ⅱ、Ⅴ为主;西太平洋高压脊Ⅱ型主要出现雾区Ⅲ;黄海高压-江淮准静止锋型则主要出现雾区Ⅰ。

表 3 天气型与不同雾区的对应关系

Table 3 Correspondence between synoptic type and fog area

单位:%

雾区	不同天气型下雾区出现比例(月份)				
	东移入海高压型	南下入海高压型	西太平洋高压脊Ⅰ型	西太平洋高压脊Ⅱ型	黄海高压江淮准静止锋型
I	—	33.3(3)	10(6)	—	44.4(4,5)
II	—	—	40(5,6,7)	25(7)	—
III	100(3)	—	10(7)	50(6,7)	—
IV	—	66.7(3,4)	—	—	22.2(5,6)
V	—	—	40(5)	25(6)	33.4(4,5)

注:括号内数字为近岸海雾发生的月份,“—”表示没有对应值。

由表 3 可以看出,不同天气系统控制下出现的雾区存在显著差异。利用 37 个近岸海雾事件中的 3 个典型海雾个例,详细分析天气系统对海雾时空特征的影响。个例 5 对应黄海高压-江淮准静止锋型天气型控制下的雾区Ⅴ,海雾最初在连云港外海生成(图 9a),夜间高压范围逐渐扩大,受西南气流引导,海雾渐向东北方向发展(图 9b),由于水汽条件充沛,最终充满了整个山东半岛南岸海区(表 2),此时高压中心位于黄海中部,海雾位于高压外围西侧,雾区轮廓与高压等值线贴合(图 9c)。个例 6 对应南下入海高压型天气型控制下的雾区Ⅳ,海雾最初在海州湾生成,此时山东半岛受南风影响(图 9d),随后高压逐渐呈现出边缘平行于海岸线的带状分布,近岸风场转为西南风,海雾向东北发展,最终呈紧贴海岸的带状分布,雾区范围与高压形态有较好的对应(图 9e),由于 3 月水汽条件较差,日出后随着太阳辐射增强海雾逐渐消散(图 9f)。个例 7 对应黄海高压-江淮准静止锋型天气型控制下的雾区Ⅰ,海雾最初在海州湾生成,受局地高压系统控制,海雾位于高压西部,且一直约束在雾区Ⅰ范围内(图 9g—i)。这 3 个海雾个例的演变过程表明,它们发生于快变的天气系统下,海雾雾区显著受天气系统影响,通常位于高压西侧且受海岸线约束。

3.2 海温对海雾的影响

图 10 展示了 2008—2023 年间山东半岛近海

3—8 月 SST 与气海温差的气候态空间平均。在山东半岛南部海域,SST 和气海温差表现出显著的季节性变化。3 月,122°E附近存在一个东北—西南走向的海温锋,其西侧凸出一个向西北延伸的高温舌,且高温舌两侧的气海温差为-1.5~0.5℃(图 10a)。从 4 月开始,SST 基本呈现为由南向北降低的趋势,气海温差为 0~2.0℃,而成山头海域的 SST 始终偏低(图 10b—e)。4 月,青岛海域东南部开始出现局地冷水团(图 10b),并随时间不断向外扩展(图 10c—e),至 8 月基本消失(图 10f)。冷水团区域对应着气海温差的高值区,为 0.5~2.0℃,在偏南风背景下该条件极有利于海雾的形成^[6,51-55]。此外,青岛近海冷水团的存在也有助于海陆风环流的形成^[9,56-58]。

较冷的海温下垫面和合适的气海温差是形成海雾的必要条件。下垫面海温处于[5,25]℃时最适宜海雾生成,超过 25℃的海域极少有雾,且气海温差为正时适宜海雾生成^[59-60]。3 月,海温低值和气海温差正值的交集区位于青岛以东至成山头的近岸海域,离岸范围受海温锋约束,该范围与雾区Ⅲ高度重合,在偏南背景风的配合下,有利于雾区Ⅲ的形成。据表 2 统计,该时期多出现雾区Ⅲ,受东移入海高压型天气型控制,高压系统变化缓慢,大气层结稳定,水汽条件较差,因此下垫面海温成为重要的影响因素。

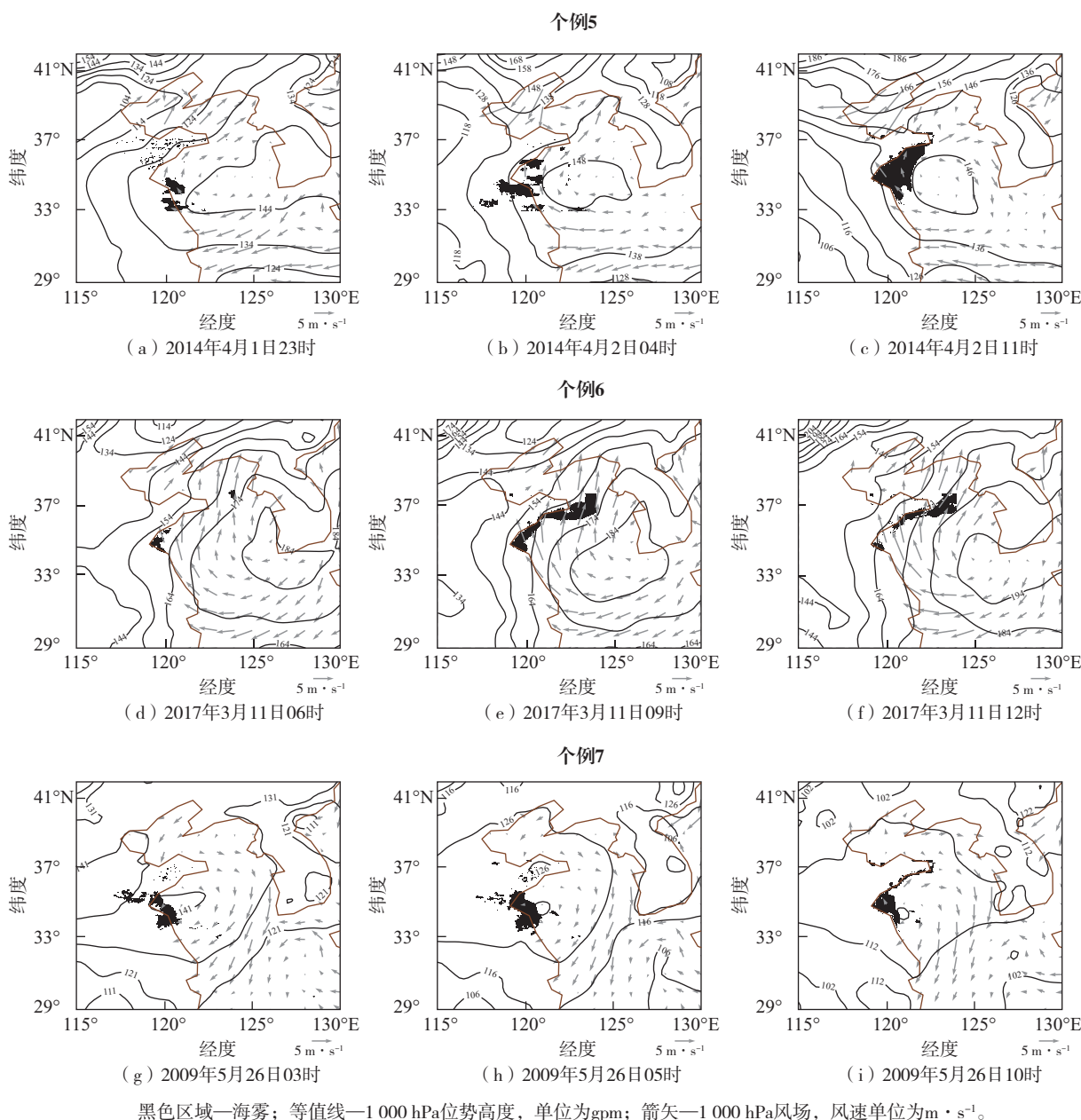


图9 典型个例的雾区演变过程与相应的天气形势

Fig.9 Evolution of fog areas of typical sea fog cases and corresponding synoptic situations

6、7月,山东半岛南岸存在2个冷水区,且对应着气海温差正值,它们分别位于青岛和成山头附近海域,两区域与雾区Ⅱ、Ⅲ相对应。据表2统计,该时期多出现雾区Ⅱ、Ⅲ,受西太平洋高压脊Ⅰ型和西太平洋高压脊Ⅱ型天气型影响,西太平洋高压脊稳定少变,山东半岛南岸盛行西南风,有利于海雾在适宜的下垫面和气海温差下发生。4、5月,下垫面海温与气海温差适宜,5种雾区均有可能发生。

3.3 海陆风对海雾的影响

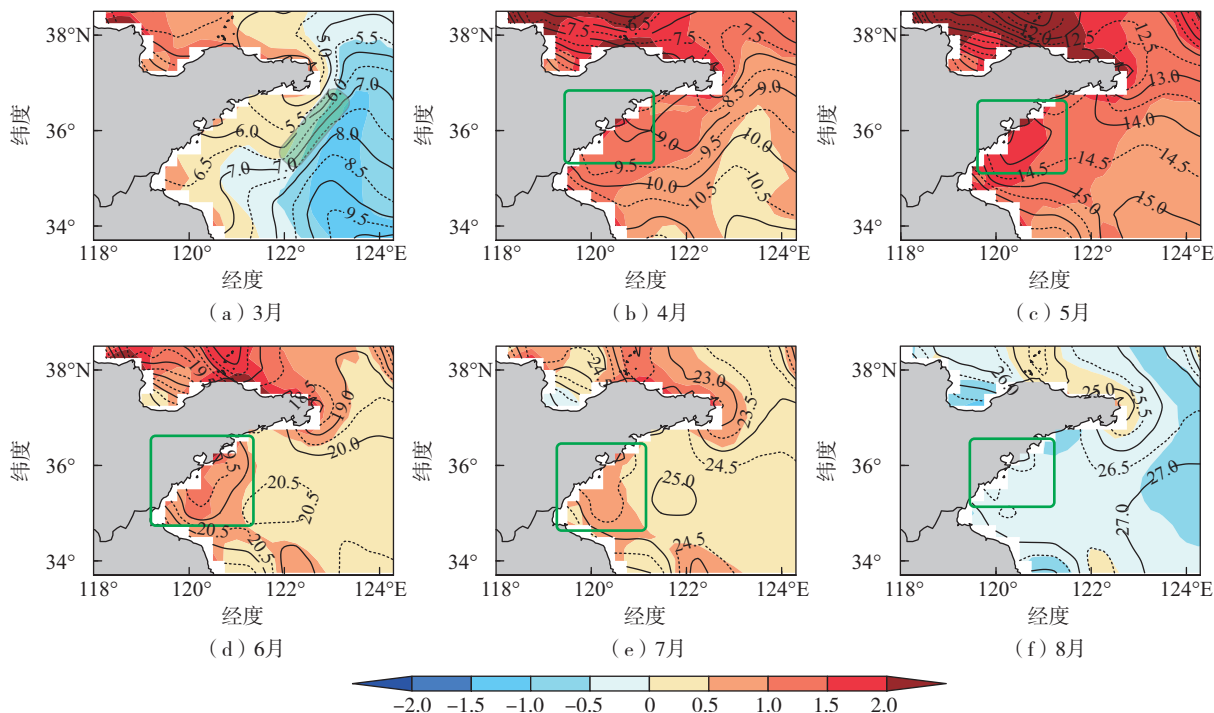
山东半岛南岸典型海雾个例的观测分析与数值

模拟结果^[24]表明,海陆风环流会显著影响近岸海雾的生成与发展,特别是夜间离岸陆风环流造成近岸的增湿降温作用会促进海雾的发生。针对表1中海雾事件,结合1.2.1节方法所得到的海雾雾区,采用1.2.2节中的方法统计了海陆风信息。

图11展示了海雾的演变过程(彩色线条)和陆风的起止时刻(黑色实线)。研究发现海雾发生过程中均存在陆风的建立。随着夜间太阳辐射的减弱,陆地辐射冷却作用导致其温度逐渐低于近岸海温,海陆热力差异的反转导致陆风环流建立,

约84%的个例建立于日落后至海雾发生前,仅个例21(发生于6月)建立于海雾发生后,个例12(发生于5月)与个例16(发生于5月)建立时刻与海雾发生时刻几乎一致。海雾发生时刻早于陆

风建立时刻的个例处于5月与6月,该时期夏季风背景下偏南风水汽输送盛行,夜间辐射冷却增强后,有利于成雾。这可能是海雾发生时刻早于陆风的重要原因之一。



色阶—气海温差, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; 等值线—海温, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; a中绿色阴影区—海温锋; b、c、d、e、f中绿色方框—青岛冷水团区域。

图10 2008—2023年3—8月的月平均海温和气海温差

Fig.10 Monthly average SST and air-sea temperature difference ($t_a - t_s$) from March to August of 2008–2023

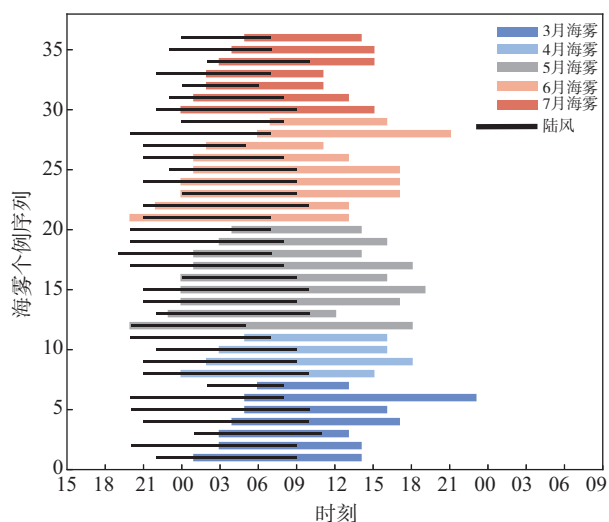


图11 近岸海雾与海陆风的演变过程

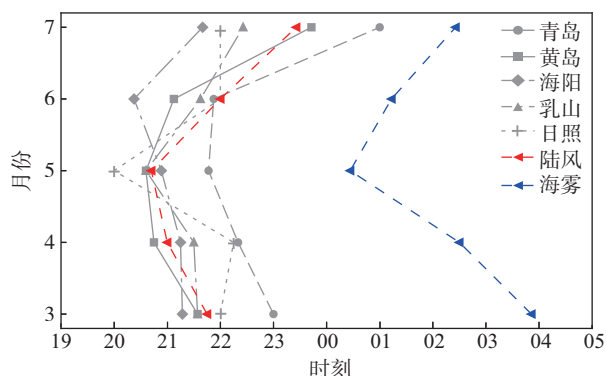
Fig.11 Evolution of coastal sea fog and sea-land breeze

基于5个近岸站点的观测信息,系统展示了山东半岛南岸海陆风环流的季节变化特征(图12)。

结果表明,陆风发生时刻普遍表现为3—5月提前,5—7月推迟。其中海阳站月变化的转折点在6月,这可能是因为成山头的冷海温导致海陆温差变化滞后^[61],从而影响海陆风的起止时间。同时,青岛站陆风发生时刻明显晚于其他站点,与其相邻的黄岛站差异十分显著,这可能是青岛西傍胶州湾、东靠崂山,导致海陆风环流结构比较复杂^[26,57–58,62–63]。近岸海陆风的特征与雾区存在密切联系。譬如,由于南北两侧接陆地,海州湾同时受到2支海陆风环流的影响,于是观察到在多个海雾事件中首先在海州湾出现雾斑而后扩展的现象(图略);雾区I、V的发生多是如此。

利用1.2.2节中的方法对多个站点信息进行整合,用以代表海雾事件中海陆风的起止时间。结果发现陆风建立时刻与海雾发生时刻在时间上高度相关且呈现一致的月际变化规律。Jin等^[23]的个例研究揭示了海陆风环流对近岸海雾的影响机制,即陆

风环流建立后,低层离岸风将夜间陆地上空辐射冷却后的空气带到近海,同时与环流在海上的下沉支共同阻挡水汽向内陆的扩散,从而有利于近海的降温增湿,对海雾的发生具有促进作用。这里的统计表明,山东半岛南岸的近岸海雾与海陆风环流之间存在紧密的联系,极有可能受到该影响机制的作用,但需要借助数值模拟进一步研究。



灰色线—各站点的陆风发生时刻;红色线—成熟阶段海雾影响的站点子集的平均陆风发生时刻;蓝色线—可见光与卫星反演确定的海雾生成时刻。

图 12 海雾与陆风演变过程的月平均变化

Fig. 12 Monthly average variations of evolution of sea fog and land breeze

4 结论与展望

山东半岛南岸是中国沿海重要的港口区域,海雾造成的低能见度对海上运输等造成严重危害。影响山东半岛南岸的海雾多为平流冷却雾,进一步可以细分为大范围海雾与近岸海雾,二者的时空特征、生成条件存在差异。近岸海雾发生于近岸,并持续影响近岸,对港口运输、近岸活动等造成严重影响。然而,前人的研究未对二者进行区分,近岸海雾的时空特征尚未有针对性地系统统计。因此,利用站点、卫星数据、再分析数据,针对近岸海雾展开研究,以期了解时空分布特征并尝试探讨其成因。

(1)影响山东半岛南岸的近岸海雾可分为青岛以西的海州湾海域型(占比为20.5%)、青岛近岸海域型(占比为20.5%)、青岛以东海域型(占比为18.0%)、山东半岛南岸贴岸带状海域型(占比为18.0%)和充满山东半岛南岸海域型(占比为23.0%),5类海雾发生频率相近。时间上,5类近岸海雾的日变化特征显著,多表现为夜间生成,午后消散,持续时间为7~22 h;而雾频月际变化规律因雾

型的不同而有所差异。

(2)东移入海高压型、南下入海高压型、西太平洋高压脊Ⅰ型、西太平洋高压脊Ⅱ型和黄海高压—江淮准静止锋型是有利于近岸海雾发生的5种天气型。与大范围海雾相比,影响近岸海雾的天气系统尺度更小,影响范围更局地,高压中心多位于黄海水域,其中黄海高压—江淮准静止锋型是近岸海雾特有的天气型。

(3)快变的天气系统会显著影响海雾雾区的演变,雾区多位于高压外围的西侧,而天气系统变化缓慢时,下垫面海温和气海温差是首要影响因素,雾区随之呈现出季节变化的特征。

(4)海雾发生过程中均受到陆风的影响,其中91%的海雾事件中,陆风的建立时刻早于海雾的生成时刻,提前1~6 h。月平均结果进一步表明,陆风对近岸海雾的影响时段具有显著的月际变化规律,即3—5月,陆风的影响时段逐渐缩短,从6 h减至3.5 h;5—7月,陆风的影响时段相对稳定,维持在3 h左右。此外,陆风建立时刻与近岸海雾发生时刻呈现一致的月际变化规律,即3—5月发生时间逐渐提前,5—7月呈现推迟趋势。

前人^[23]通过一个典型个例详细剖析了海陆风环流对近岸海雾生成、发展的影响。文中统计分析表明,海陆风环流与近岸海雾的时空分布存在普遍联系,即陆风环流建立时刻与海雾发生时刻存在一致的月变化趋势;山东半岛南岸不同位置海陆风环流的差异与海雾雾区存在密切联系,其中青岛地区由于受到胶州湾、崂山等复杂因素的综合影响,导致其具有独特的海陆风演变过程。这些现象值得借助高时空、高地形分辨率的数值模拟进行进一步探究。

参考文献:

- [1] 王彬华.海雾[M].北京:海洋出版社,1983:53-73.
- [2] 刁学贤.青岛及近海海雾的统计分析[J].海洋预报,1992,9(3):45-55.
- [3] 王彬华.中国近海海雾的几个特征[J].海洋湖沼通报,1980,2(3):9-20.
- [4] ZHANG S P, XIE S P, LIU Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms[J]. J Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [5] 张苏平, 鲍献文.近十年中国海雾研究进展[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(3): 359-366.

- [6] 黄彬,毛冬艳,康志明,等.黄前海雾天气气候特征及其成因分析[J].热带气象学报,2011,27(6):920-929.
- [7] 王帅,傅聘,陈德林,等.2009年春季一次黄前海雾的观测分析及数值模拟[J].大气科学学报,2012,35(3):282-294.
- [8] 郑新江.黄前海雾的卫星云图特征分析[J].气象,1988,14(6):7-9,65.
- [9] 孟宪贵,张苏平.夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(6):16-23.
- [10] 王鑫,黄菲,周发琇.黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J].海洋学报,2006,28(1):26-34.
- [11] SHI X M, LIU X Y, GU Y, et al. Analysis of meteorological conditions for a sea fog process in 2016[J]. Atmos Clim Sci, 2021, 11(3):419-425.
- [12] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure Appl Geophys, 2007, 164(6):1121-1159.
- [13] SONG S T, SHI X M, ZHANG S P, et al. Springtime sea fog penetration in Qingdao: anomalous moistening and diurnal cooling[J]. Front Earth Sci, 2022, 10:956836.
- [14] 杨悦,高山红.黄前海雾天气特征与逆温层成因分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(6):19-30.
- [15] 赵永平,陈永利,王丕浩.黄、东海海雾过程及其大气和海洋环境背景场的分析[J].海洋科学集刊,1997,38(1):69-78,252.
- [16] 张守宝.高压系统影响下黄前海雾的形成机制研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [17] GAO S H, LIN H, SHEN B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. Adv Atmos Sci, 2007, 24(1):65-81.
- [18] 吴晓京,李三妹,廖蜜,等.基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J].海洋学报,2015,37(1):63-72.
- [19] 王彬华.中国近海海雾持续和消散问题的探讨[J].山东海洋学院学报,1980,10(2):20-30.
- [20] 柳龙生,王慧,黄彬.2022年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2022,42(4):95-105.
- [21] 张红岩,周发琇,张晓慧.黄海春季海雾的年际变化研究[J].海洋与湖沼,2005,36(1):36-42.
- [22] WANG Y M, GAO S H, FU G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Wea Forecasting, 2014, 29(2):205-225.
- [23] JIN G Q, GAO S H, SHI H, et al. Impacts of sea-land breeze circulation on the formation and development of coastal sea fog along the Shandong Peninsula: a case study[J]. Atmosphere, 2022, 13(2):165.
- [24] YANG L, LIU J W, REN Z P, et al. Atmospheric conditions for advection-radiation fog over the western Yellow Sea[J]. J Geophys Res: Atmos, 2018, 123(10):5455-5468.
- [25] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M/OL]. Berlin: Springer Netherlands, 1988 [2024-09-02]. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-3027-8#publish-with-us>.
- [26] 盛春岩,王建林,刁秀广.2006年8月青岛国际帆船赛期间海陆风特征及三维结构分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2007,155(4):609-614.
- [27] 吴增茂,龙宝森.青岛局地风特征的分析[J].海洋湖沼通报,1993(1):16-22.
- [28] 常志清,吴增茂,高山红.青岛海陆风三维结构的数值模拟[J].青岛海洋大学学报(自然科学版),2002,32(6):877-883.
- [29] 高佳琦,苗峻峰,许启慧.海陆风识别方法研究进展[J].气象科技,2013,41(1):97-102.
- [30] 李慧琳,孙连强,徐璐璐.海陆风影响下的黄海北部沿岸天气特征分析[J].安徽农业科学,2010,38(3):1313-1316.
- [31] 庄子善,郑美琴,王继秀,等.日照沿海海陆风的气候特点及其对天气的影响[J].气象,2005,31(9):66-70.
- [32] 薛德强,郑全岭,钱喜镇,等.山东半岛的海陆风环流及其影响[J].南京气象学院学报,1995(2):293-299.
- [33] XU J J, JIA H W, ZHOU H Y, et al. Influences of offshore background wind on the formation of sea-land breeze and the characteristics of pollutant diffusion[J]. Environ Sci Pollut Res, 2021, 28(48):68318-68329.
- [34] GAO Y, LIU D Y, YAN S Q, et al. Influence of sea-land breeze on the formation and dissipation of severe dense fog and its burst reinforcement in the Yellow Sea coastal area, China[J]. Sci China Earth Sci, 2024, 67(2):432-449.
- [35] 蒋尚城.应用卫星气象学[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [36] FU G, GUO J T, XIE S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea[J]. Atmos Res, 2006, 81(4):293-303.
- [37] 黄彬,高山红,宋煜,等.黄海平流海雾的观测分析[J].

- 海洋科学进展,2009,27(1):16-23.
- [38] GAO S H, WU W, ZHU L L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huang-hai Sea using MTSAT-1R IR data[J]. *Acta Oceanol Sin*,2009,28(2): 23-35.
- [39] 高小雨,高山红.黄前海雾短时临近预报中云水路径的 EnKF 同化研究[J]. *海洋与湖沼*,2019,50(2): 248-260.
- [40] YANG Y, GAO S H. The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea fog development[J]. *J Geophys Res: Atmos*,2020,125(4):e2019JD031562.
- [41] 白慧,张苏平,丁做尉.青岛近海夏季海雾年际变化的低空气象水文条件分析:关于水汽来源的讨论[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*,2010,40(12): 17-26.
- [42] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [43] CHEN J M, HARR P A. Interpretation of extended empirical orthogonal function (EEOF) analysis[J]. *Mon Wea Rev*,1993,121(9):2631-2636.
- [44] 赵玉衡.热带海温异常梯度结构和演变特征及对大气的影 响研究[D].兰州:兰州大学,2020.
- [45] 王千,王成,冯振元,等.K-means 聚类算法研究综述[J]. *电子设计工程*,2012,20(7):21-24.
- [46] WEARE B C, NASSTROM J S. Examples of extended empirical orthogonal function analyses[J]. *Mon Wea Rev*,1982,110(6):481-485.
- [47] REZAEI M R, LELIEVELDT B P F, REIBER J H C. A new cluster validity index for the fuzzy c-mean[J]. *Pattern Recognit Lett*,1998,19(3/4):237-246.
- [48] ROUSSEUW P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis[J]. *J Comput Appl Math*,1987,20:53-65.
- [49] GAO X Y, GAO S H, LI Z R, et al. A revised method with a temperature constraint for assimilating satellite-derived humidity in forecasting sea fog over the Yellow Sea[J]. *Front Earth Sci*,2023,10:992246.
- [50] 黄彬,许健民,史得道,等.黄渤海一次持续性海雾过程形变特征及其成因分析[J]. *气象*,2018,44(10): 1342-1351.
- [51] 曹祥村,邵利民,李晓东.黄渤海一次持续性大雾过程特征和成因分析[J]. *气象科技*,2012,40(1):92-99.
- [52] 宋亚娟.北太平洋海雾发生频率的气候学特征[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- [53] 傅方奇,杜雪婷,王健捷,等.2022 年春季浙江一次持续性海雾过程的特征及成因[J]. *海洋气象学报*,2024, 44(3):78-86.
- [54] 王海平,张增海,黄奕武,等.2024 年春季海洋天气评述[J]. *海洋气象学报*,2024,44(3):162-172.
- [55] 黄奕武,刘达,王靖,等.2023 年春季海洋天气评述[J]. *海洋气象学报*,2023,43(3):113-124.
- [56] 黄浩,陈学恩,林璘.青岛冷水团的生成与演变研究[J]. *海洋与湖沼*,2019,50(6):1191-1200.
- [57] 张存义.青岛冷水团强度的划分及其多年变化的分析[J]. *海洋科学*,1986,10(3):48-51.
- [58] 张启龙,刘志亮,齐继峰,等.青岛冷水团的消亡机理研究[J]. *海洋学报*,2016,38(5):27-33.
- [59] 张苏平,任兆鹏.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*,2010,68(4): 439-449.
- [60] 任兆鹏,张苏平.黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*,2011,41(5):23-30,109.
- [61] 陆雪,刘子洲,翟方国.近 18 a 山东半岛南部海域海面温度的长期变化研究[J]. *海洋科学*,2023,47(4): 37-53.
- [62] WU Z M, SCHLUNZEN K H. Numerical study on the local wind structures forced by the complex terrain of Qingdao area[J]. *Acta Meteor Sinica*,1992,6(3): 355-366.
- [63] SHENG L F, SCHLUNZEN K H, WU Z M. Three-dimensional numerical simulation of the mesoscale wind structure over Shandong Peninsula[J]. *Acta Meteor Sinica*,2000,14(1):98-107.