

朱志凡,曹洁,邱晓滨,等.ERA5资料在天津环渤海地区海陆风特征分析中的适用性评估[J].海洋气象学报,2024,44(1):1-10. ZHU Zhifan, CAO Jie, QIU Xiaobin, et al. Applicability assessment of ERA5 in investigating characteristics of sea-land breeze over Tianjin Circum-Bohai area[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(1): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231025002. (in Chinese)

ERA5资料在天津环渤海地区海陆风特征分析中的适用性评估

朱志凡^{1,2,3}, 曹洁^{1,2,3}, 邱晓滨^{4,5}, 赵玮⁶

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏南京210044;2.气象灾害教育部重点实验室,江苏南京210044;3.南京信息工程大学大气科学学院,江苏南京210044;4.天津市海洋气象重点实验室,天津300074;5.天津市气象科学研究所,天津300074;6.北京市气象台,北京100089)

摘要: 使用2018年3月—2021年2月欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料和站点逐小时风向、风速等资料,采用常规方法筛选天津环渤海地区海陆风事件,比较分析不同资料呈现出的海陆风起讫时间、持续时间、强度等指标表征的海陆风特征的年均和季节差异,以评估ERA5资料的适用性。结果表明:(1)2套资料四季分布对应较好,均能显示夏季海陆风日数最多这一基本特征;海风持续时间较陆风持续时间更长,年均强度高于陆风,最强均出现在春季。(2)年均差异主要表现为,站点资料显示的海风开始和结束时间呈弱双峰结构,陆风开始和结束时间均早于ERA5资料,平均海风和陆风持续时间短于ERA5资料。(3)季节差异主要表现为,ERA5资料显示陆风强度极小值出现在夏季,海风最长持续时间主要出现在秋季;站点资料显示陆风强度极小值在秋季,海风最长持续时间出现在春夏两季。评估结果显示,较长时间序列ERA5资料与站点资料的相关性较高,适用于天津环渤海地区海陆风特征研究。

关键词: 海陆风;天津环渤海地区;ERA5资料;适用性

中图分类号: P445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2024)01-0000-00

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231025002

Applicability assessment of ERA5 in investigating characteristics of sea-land breeze over Tianjin Circum-Bohai area

ZHU Zhifan^{1,2,3}, CAO Jie^{1,2,3}, QIU Xiaobin^{4,5}, ZHAO Wei⁶

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education, Nanjing 210044, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 5. Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China; 6. Beijing Weather Forecasting Center, Beijing 100089, China)

Abstract: The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis v5 (ERA5) and hourly observation data of wind direction and speed at meteorological stations from March 2018 to February 2021 are adopted to investigate the characteristics of the sea-land breeze over Tianjin area. Firstly, conventional methods are used to identify the sea-land breeze events over Tianjin Circum-

收稿日期:2023-10-25;修回日期:2024-01-01

基金项目:国家自然科学基金项目(91937301);江苏省双创博士项目(JSSCBS20220553)

第一作者简介:朱志凡,男,硕士研究生,主要从事中小尺度天气学研究,202212010038@nuist.edu.cn。

通信作者简介:曹洁,女,博士,教授,主要从事中尺度动力学和数值预报研究,003542@nuist.edu.cn。

Bohai area. Secondly, the interannual average and seasonal differences of sea-land breeze characteristics, such as the starting and ending time, duration, and intensity, are analyzed and compared based on these two sets of data with the purpose to make an assessment of the applicability of ERA5. Similarities and differences are concluded as follows. (1) Both data are capable of revealing the fact that sea-land breeze events mostly occur in summer with similar distributions in all 4 seasons. The sea breeze lasts longer than the land breeze with stronger intensity. Both breezes reach their maximum intensities in spring. (2) There are interannual differences revealed by these two sets of data. Compared to results revealed by ERA5, the starting and ending time of the sea breeze revealed by the observation data have a weaker bimodal structure. The observed starting and ending time of the land breeze are ahead of their correspondences revealed by ERA5. The durations of both the sea breeze and the land breeze are shorter revealed by the observation data. (3) There are also seasonal differences. The minimum intensity of the land breeze revealed by ERA5 appears in summer and the longest duration of the sea breeze appears in autumn. However, the minimum intensity of the land breeze revealed by the observation data appears in autumn and the longest duration of the sea breeze is in spring and summer. The assessment indicates that ERA5 with the duration of three years, highly correlated with the observation data, are suitable for analyzing the sea-land breeze over Tianjin Circum-Bohai area.

Keywords: sea-land breeze; Tianjin Circum-Bohai area; ECMWF Reanalysis v5 (ERA5); applicability

引言

海陆风是由于海洋和陆地表面的热力和辐射特性差异,造成低层大气中产生不稳定温度梯度,从而引发的一种以日周期交替变化为重要特征的中尺度天气现象^[1]。海陆风在触发灾害性天气^[2-5]、影响大气和近海环境污染扩散^[6-8]等方面的研究较多。随着全球变暖和城市化程度加剧,热岛效应加强,热岛环流与海陆风环流共同影响着沿海地区极端天气、气候、环境等事件^[9-12]。研究海陆风等局地环流中小尺度天气系统的结构特征,具有重要意义。

国内外研究发现,不同地区的海陆风具有不同的季节特征。刘馨尹^[13]发现中国沿海5个不同纬度地区的海陆风多发生在夏秋季节,且随纬度降低,海陆风发生频次升高、海风开始时间延后。杨林^[14]发现中低纬度地区的海陆风强度在冬夏季更强,晴天比阴天更强。与国内研究结论相反,Coulibaly等^[15]发现西非几内亚海岸地区的海陆风,在冬季最为常见。可见,各地区因纬度、海岸线和下垫面等差异,呈现不同特征。中国是世界上海岸线最长的国家之一,海岸线形态奇特,南北跨越超40纬度,不同沿海地区的海陆风差异明显。天津环渤海地区紧邻北京,是人口密集的沿海重要工业化城市,其地理位置使其成为连接华北、东北和华东地区的重要交通枢纽,也是连接中国内地和国际市场的重要通道。天津拥有丰富的港口资源和沿海资源,对中国及周

边国家的贸易有着重要影响。在高速发展的大背景下,有必要对天津环渤海地区海陆风开展深入研究。

对海陆风的研究主要使用3类资料:观测资料^[16-18]、数值模式模拟资料^[19-21]和再分析资料^[22]。不少研究学者对比分析了不同资料揭示的不同地区的海陆风特征^[15,16,23],而对天津环渤海地区海陆风的研究,大多聚焦观测和模拟资料显示的海陆风空间结构特征^[24-26],对ERA5资料在天津地区海陆风起讫时间、持续时间、强度的年均和季节特征的适用性评估较少。随着观测数据的增多,检验数值模式常用的ERA5资料与站点资料近年在天津地区海陆风统计特征的异同,是开展环渤海地区海陆风的数值模拟和热动力精细化特征分析的基础,有利于未来提高极端天气、气候和环境事件的预报水平。

1 资料和方法

1.1 资料

使用2018年3月—2021年2月欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料(<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>),空间分辨率为 0.125° ,时间分辨率为1 h。沿用许启慧^[27]研究天津海陆风特征使用的塘沽站(117.71°E , 39.00°N)、大港站(117.28°E , 38.51°N)和汉沽站(117.46°E , 39.14°N)这3个具有代表性的沿海国家级气象观测站,站点

离海岸线的距离在 5~10 km 之间(图 1),能够很好的捕捉到海陆风这一天气系统。ERA5 资料选取站点临近格点资料来表示。

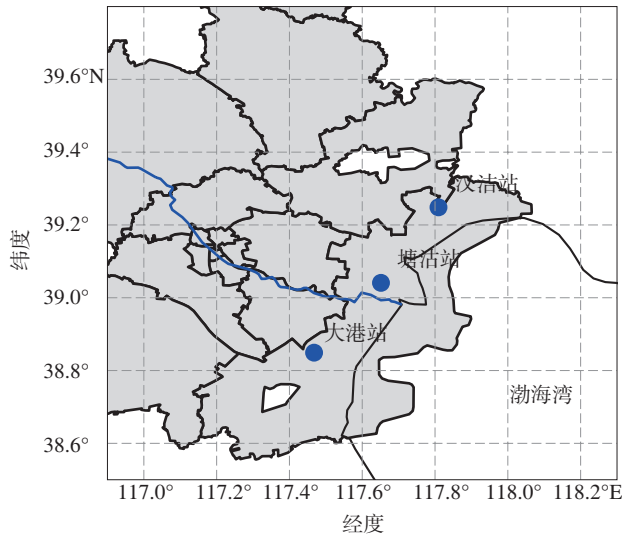


图 1 地理位置及站点分布

Fig.1 Geographical location and distribution of meteorological stations

1.2 筛选方法

国内外对于海陆风的筛选条件,多基于风速风向的改变、海陆温差、背景风场、云量、太阳辐射等。表 1 列举了部分研究对不同地理位置海陆风的判定标准。

表 1 国内外研究对海陆风过程的判定标准
Table 1 Criteria for determining sea-land breeze events in worldwide researches

研究	判定标准
Borne 等 ^[28]	700 hPa 等压面上风向风速的变化,陆海温差大于或等于 3 °C,近地面风向改变大于 30°,风向峰值急剧变化比率大于 6
Prtenjak 等 ^[29]	夜间风为离岸风或静风,白天至少连续 4 h 的向岸风,日气压变化小于 5 hPa,日平均云量小于或等于 4/10,陆海温差大于或等于 3 °C
Papanastasiou 等 ^[30]	日出至日落,至少连续 2 h 的向岸风,日落至日出,大部分时间是离岸风,白天 850 hPa 等压面为离岸风,日最大陆海温差大于 0 °C
邱晓暖等 ^[31]	去除背景风后,海风时间段(陆风时间段)出现海风(陆风)时次大于或等于 4 次
刘馨尹 ^[13] 、 黄利萍等 ^[32]	700 hPa 风向风速变化,700 hPa 风速小于 11 m·s ⁻¹ ,日最大陆海温差大于 2 °C,日出后 1 h 至日落前 5 h,地面风向变化大于 30°

实测风是局地风场和背景风场的叠加,强背景风会掩盖海陆风信息。为研究局地风场特征,沿用

邱晓暖等^[31]的方法,首先,由公式(1)~(4)区分背景风场和局地风场。

$$\bar{u} = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} U_0, \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} V_0, \quad (2)$$

$$u_l = U_0 - \bar{u}, \quad (3)$$

$$v_l = V_0 - \bar{v}. \quad (4)$$

其中: U_0 、 V_0 是站点资料或再分析资料实测 u 、 v 风场, \bar{u} 、 \bar{v} 是背景风, u_l 、 v_l 是局地风。该方法已证实可以有效利用国家级气象观测站数据对海陆风局地环流进行研究。

其次,由于观测站仪器故障等原因,站点数据出现缺测,因此在使用前需要对缺测数据进行处理。规定 1 d 之内,缺测时次超过 2/3(即缺测时次大于 7 h)所在日为无效天^[31];其他少量缺测时次,根据气象要素的连续性,用相邻时次的气象要素值补充修订。表 2 是对站点数据有效时次及有效日数统计,可见研究时段内各个站点有效时次比例超过 97%,即站点数据有效性较高。

表 2 站点数据有效时次及有效日数

Table 2 Numbers of valid hours and days revealed by observation data

站点	有效时次 /h	有效时次 比例	有效日数 /d	有效日数 比例
塘沽站	25 704	97.72%	1 068	97.45%
大港站	25 731	97.82%	1 069	97.54%
汉沽站	25 722	97.79%	1 069	97.54%

最后,对站点资料和 ERA5 资料进行时空一致性检验评估。通过检验研究时段内塘沽站、大港站、汉沽站风速及风向等要素,显示 2 套资料的各要素序列时空间变化合理,且站点资料的风速平均值相比于 ERA5 资料偏小 1.7~2.2 m·s⁻¹(图略)。

1.3 海陆风日及相关特征量定义

综合考虑表 1 各种算法,主要借鉴邱晓暖等^[31]的方法、刘馨尹^[13]的指标、以及吴增茂^[33]对海陆风日最大风速的限制,并根据天津地区海岸线的角度以及本研究时段内 ERA5 资料和站点资料的风速平均值差异进行微调和测试,最终定义海陆风日满足以下条件:

(1)海风出现时间段为 12:00—20:00,规定出现海风不少于 5 次,陆风出现时间段为 1:00—

9:00,出现陆风不少于3次;ERA5资料当日最大风速小于或等于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,站点资料当日最大风速小于或等于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,则定义当天为海陆风日。

(2)在海陆风日,5:00以后,当海风在A时刻出现并持续3h及以上(D1),记A为海风开始时间,D1为海风持续时间,A+D1为海风结束时间。

(3)在海陆风日,14:00前,当陆风在B时刻出现并持续2h及以上(D2),记B为陆风开始时间,D2为陆风持续时间,B+D2为陆风结束时间。

(4)海风(陆风)强度由公式(5)得到,定义为发生海风(陆风)时间段内的最大全风速。

$$I = \vec{V}_{\max(t_{\text{start}}-t_{\text{end}})} \quad (5)$$

海风(陆风)角度以海岸线为准,3个站点垂直于海岸线吹向内陆的风为海风,反之为陆风。考虑风向左右的摆动等原因,具体海风和陆风的风向角度定义如表3所示。

表3 各站点对应的海风风向和陆风风向
Table 3 Directions of sea breeze and land breeze at each station

站点	海风风向	陆风风向
塘沽站	$60^\circ \sim 150^\circ$	$260^\circ \sim 320^\circ$
大港站	$70^\circ \sim 150^\circ$	$260^\circ \sim 330^\circ$
汉沽站	$110^\circ \sim 180^\circ$	$280^\circ \sim 360^\circ$

2 气候特征分析

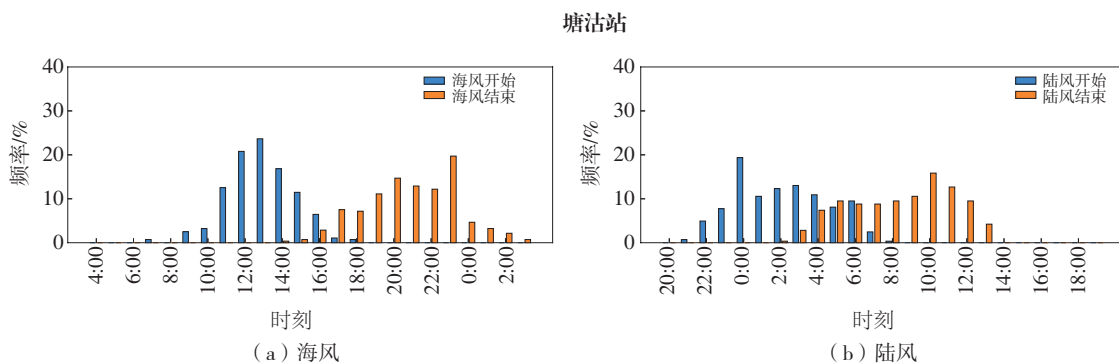
2.1 海陆风开始和结束时间

筛选ERA5资料和站点资料得到的塘沽站海陆风日数分别为286d和251d,大港站海陆风日数分别为159d和205d,汉沽站海陆风日数分别为232d和192d。除大港站外,ERA5资料识别结果多于站点资料。

由ERA5资料和站点资料显示的海风和陆风开

始和结束时间的年均日分布频率(图2和图3)可见:海风一般在11:00—15:00开始,17:00—23:00结束,陆风一般开始于23:00—次日03:00,结束于06:00—10:00。具体来看,ERA5资料得到的塘沽站海风开始时间更集中,超50%的海风都发生在12:00—14:00(图2a),站点资料显示的海风开始时间随着日出后逐渐延后,最常出现在14:00(图3a)。2套资料显示的海风开始时间较一致,均在0:00—3:00发生(图2b、图3b);ERA5资料显示的海风结束时间多为10:00,而站点资料多为6:00—7:00。ERA5资料显示大港站海风开始时间呈双峰分布,多发生在11:00和15:00—16:00,与结束时间的双峰分布对应,分别在17:00和20:00(图2c);站点资料显示12:00和14:00为海风主要开始时间,18时和20时是主要结束时间,双峰结构较弱(图3c)。2套资料呈现的陆风开始(图2d)和结束时间(图3d)一致,且陆风出现频率均随时间推移而降低,集中在6:00—8:00结束。ERA5资料显示汉沽站海风主要开始于10:00之后,于13:00和16:00出现峰值(图2e);而站点资料显示超50%以上海风发生在13:00—15:00,较ERA5资料早1h发生(图3e)。2套资料显示的海风结束时间(图2f、图3f)分布较平均,主要结束于上午9:00左右。

可见,2套资料显示的海风和陆风开始和结束时间峰值结构类似,但具体时间有差异。不同站点的年均差异主要为:ERA5资料显示的塘沽站海风开始时间略早于站点资料显示的开始时间,而结束时间晚于站点资料显示的结束时间;站点资料显示的陆风结束时间则提前于ERA5资料。ERA5资料显示的大港站和汉沽站海风开始和结束时间呈双峰结构,显示的陆风结束时间相较于站点资料,有1h左右的延迟。



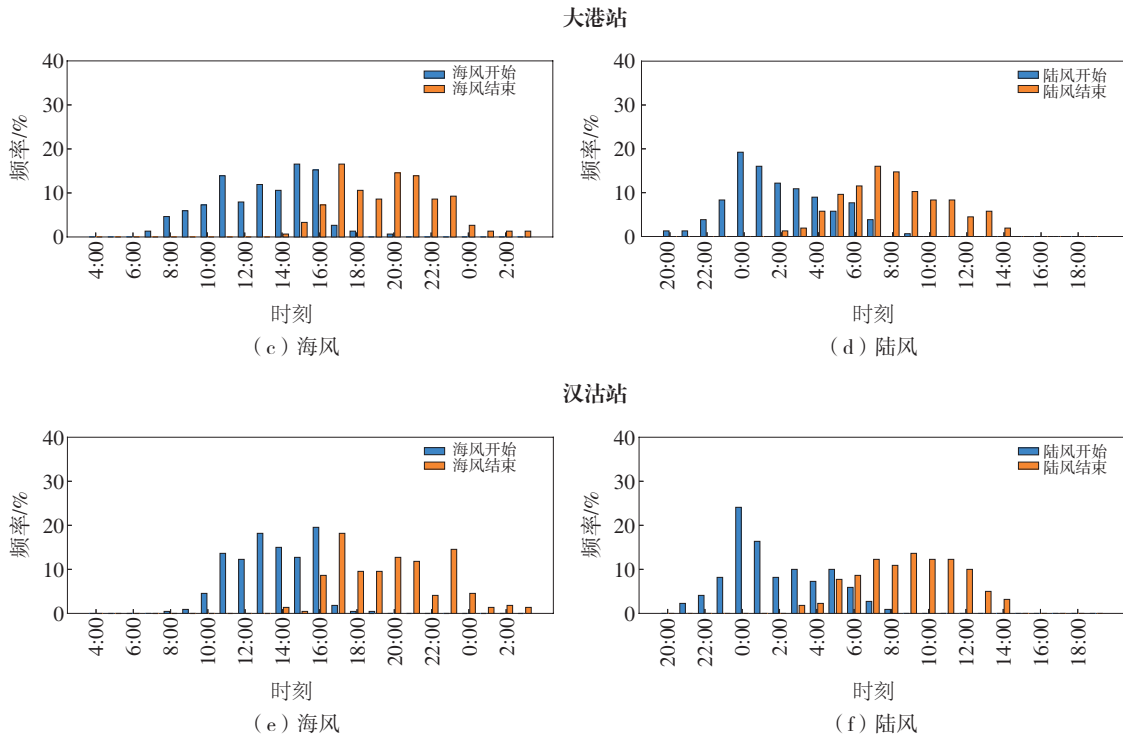
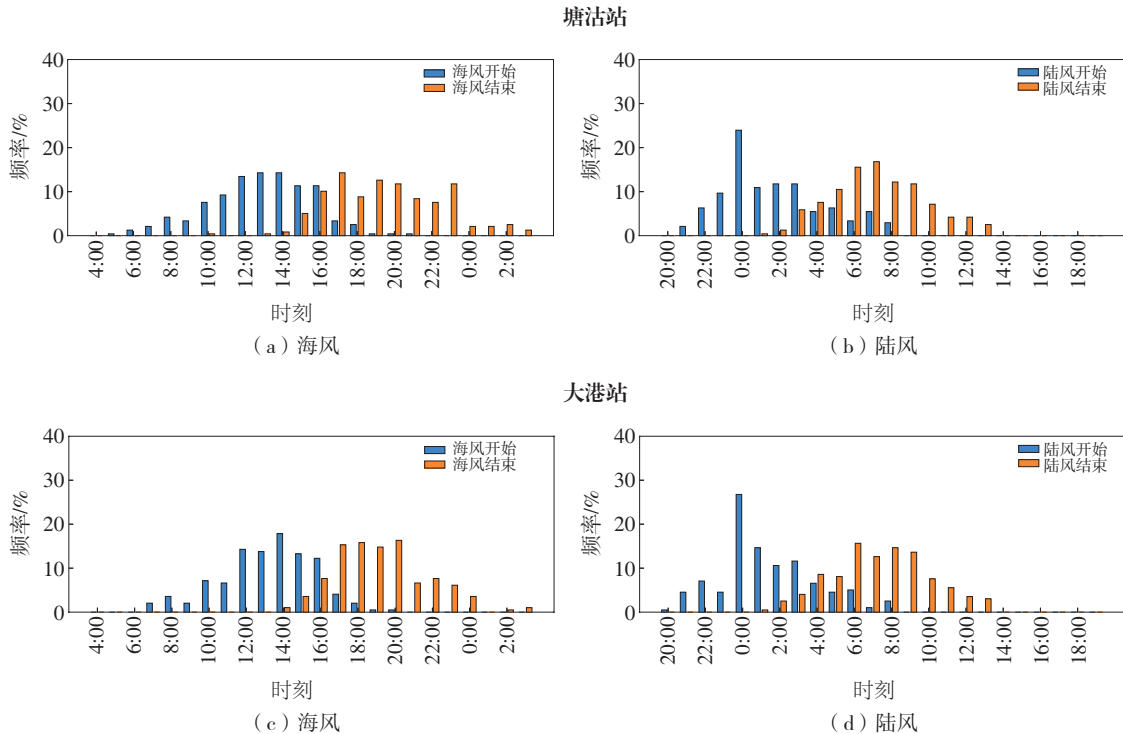


图 2 ERA5 资料显示的海陆风开始和结束时间的发生频率
 Fig.2 Frequency of starting time and ending time of sea/land breeze revealed by ERA5

2.2 海陆风持续时间

进一步对比分析不同站点的海风和陆风持续时间的特征,如图 4 可见:由年均来看,ERA5 资料显示的塘沽站海风持续时间主要为 7~11 h(图 4a),

相较于站点资料的 5~10 h 更集中;而陆风持续时间有 1 h 的相位差(图 4b),站点资料显示 50%的陆风过程持续 4~8 h,ERA5 资料较站点资料平均长 0.2~0.8 h。



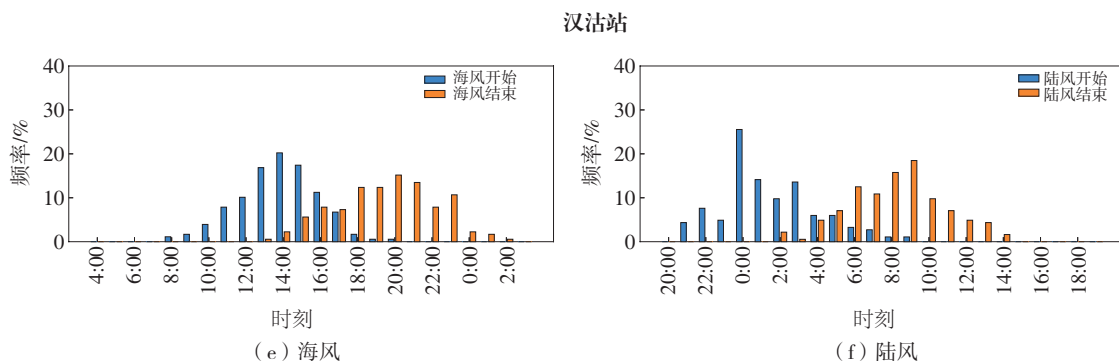
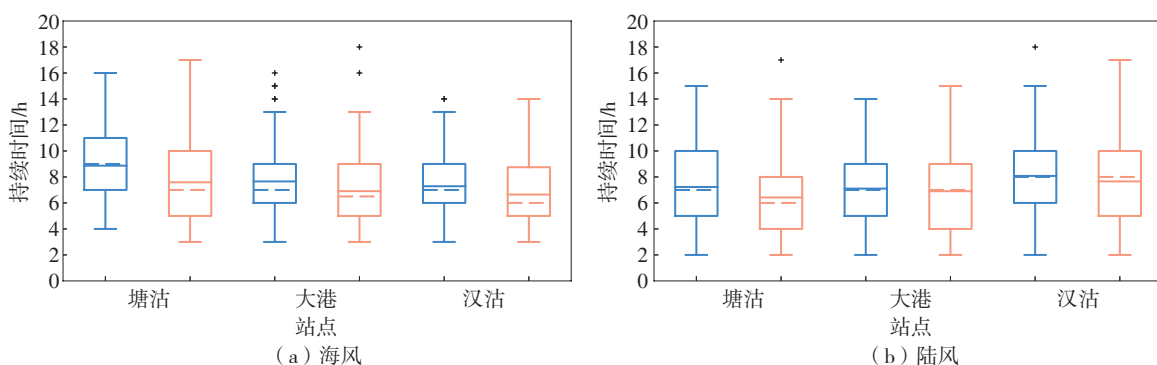


图3 站点资料显示的海陆风开始和结束时间的发生频率
Fig.3 Frequency of starting time and ending time of sea/land breeze revealed by observation data



蓝色箱体—ERA5资料；橙色箱体—站点资料；箱中实线—平均值；箱中虚线—中位数；箱的上下边框—海风（陆风）持续时间的上下四分位数；连接箱体顶部和底部的线—海风（陆风）的最长、最短持续时间；黑色加号—离群值，是偏离总体统计的结果。

图4 2套资料海风和陆风持续时间对比
Fig.4 Comparison of durations of sea breeze and land breeze revealed by two sets of data

2套资料显示的大港站与汉沽站海风持续时间均为5~9 h,陆风持续时间为5~10 h。此外,2套资料分析得到的3个站点上四分位数相同,而ERA5资料显示的下四分位数偏大1 h,说明站点资料在识别持续时间较短的海陆风事件时,略优于ERA5资料。ERA5资料统计出的3个站点海风持续时间更集中,塘沽站、大港站海风持续时间长于陆风持续时间,汉沽站则相反。

3 不同季节的海陆风特征对比分析

3.1 海陆风日数

图5显示了使用不同资料在3个站点识别出来的海陆风日数在各个季节的分布情况,对比可见:3个站点都在夏季出现最多海陆风事件,塘沽站夏季海陆风日数更是多达91 d。ERA5资料显示3个站点春秋季节海陆风日数差异小(图5a),冬季除大港站以外,都达到了最小值。站点资料显示3个站点冬季海陆风日数均为最小值,且春季高于秋季(图

5b)。2套资料的四季分布除大港站的冬季以外都有很好的对应。根据测风数据检验推测,是由于站点数据风向与ERA5资料均值之间有系统性偏差,导致大港站风向筛选出现偏差。但从总体结果来看,与吴增茂^[33]对天津地区海陆风的研究结论一致,即春、夏为海陆风的高发季节,冬季发生频率最低。剔除大风日的影响后,季节分布的差异更多的是由天津地区局地热力因素的差异导致,夏季海陆温差大,更容易达到海陆风环流所需要的温度场形势,冬季海陆温差小,海陆风发生更加困难。

3.2 海陆风开始和结束时间

为对比分析不同站点海陆风日的海陆风开始和结束时间异同特征,图6—9显示了2套资料识别出不同季节海风(陆风)开始(结束)时间的频率分布。2套资料显示塘沽站夏、冬季(图6d、图6j)的海风开始时间在平均值附近的分布十分相似。比较海风平均开始时间可见,2套资料夏季平均开始时间一致(13:00左右),而站点资料显示的冬季平均开始

时间 (12:48) 比 ERA5 资料对应平均开始时间 (13:57) 偏早 1 h,且冬季的双峰高发时间段分别分布在均值的 ± 1 h 处,说明 2 套资料各自均值间隔 1 h

附近均为海风开始的高发期。ERA5 资料显示的海风开始时间高峰期在春季提前于站点资料约 1 h (图 6a),秋季则延迟约 2 h(图 6g)。

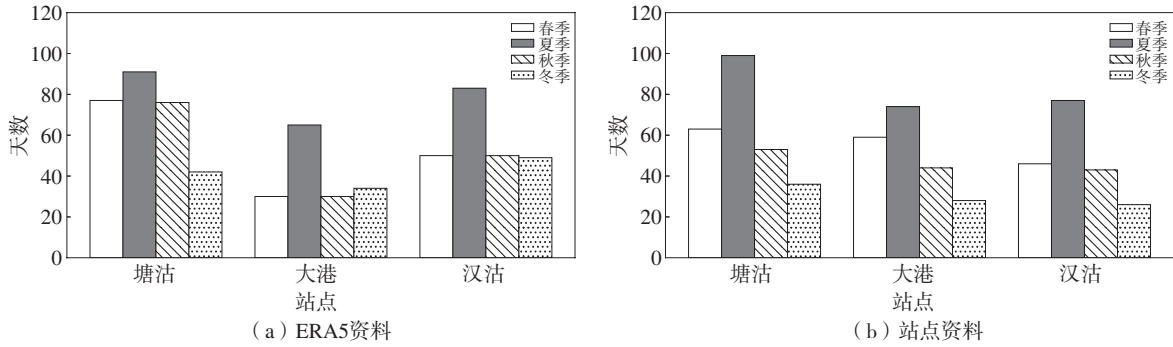
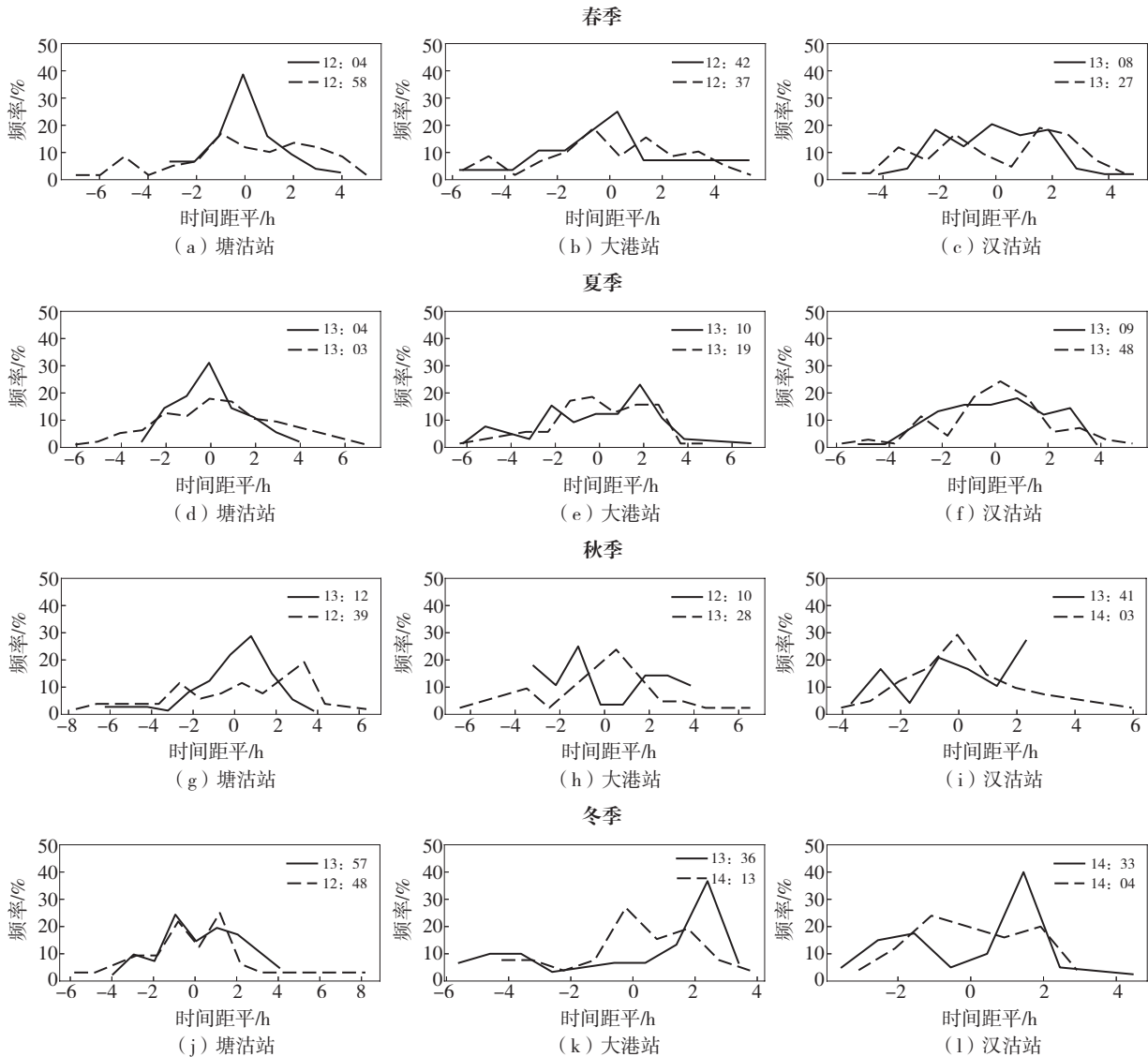


图 5 不同季节各站海陆风日数对比

Fig.5 Comparison of sea-land breeze days at each station in each season by ERA5 and observation data



实线—ERA5数据; 虚线—站点数据; 图例中时间—平均开始时间。

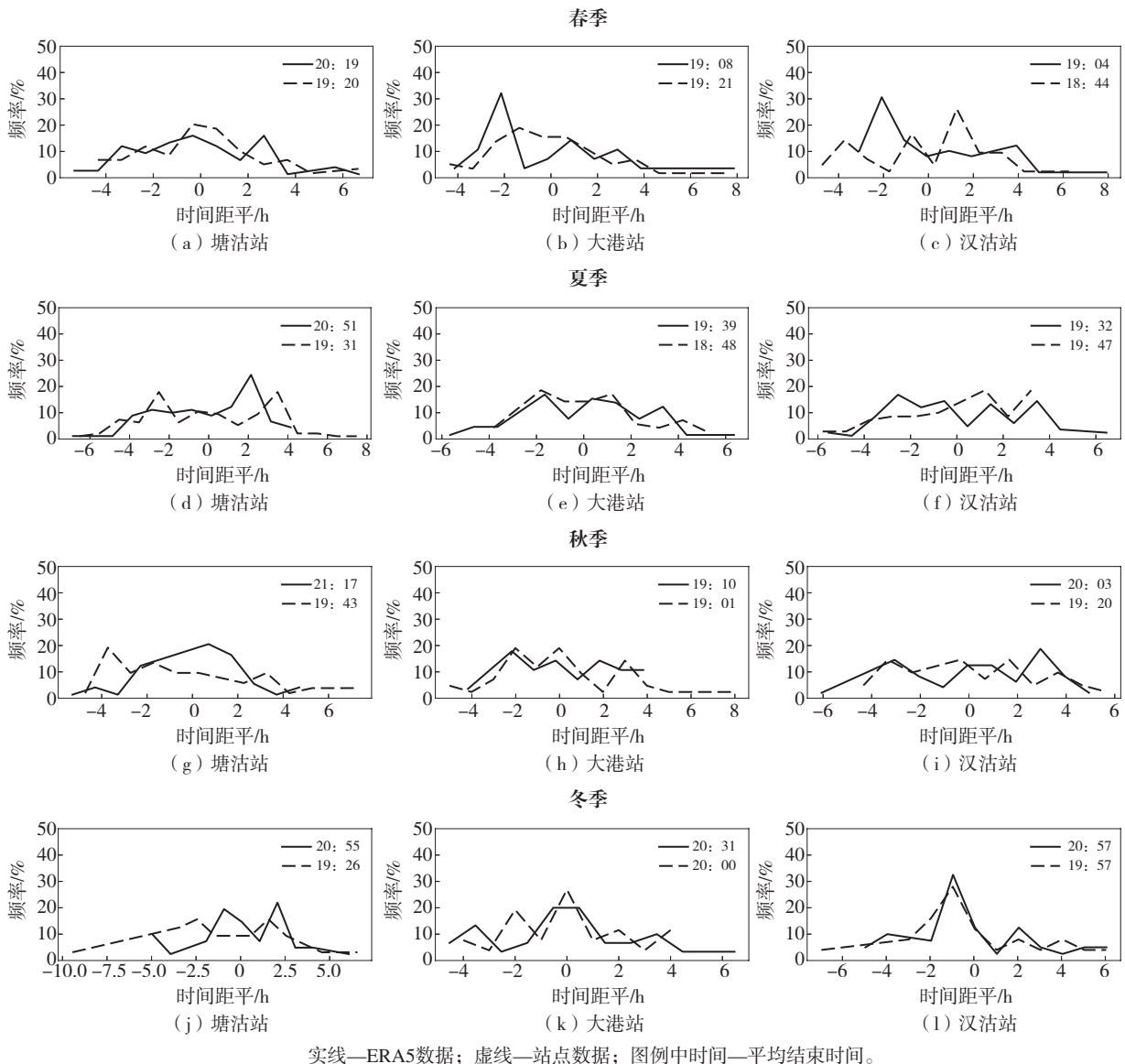
图 6 不同季节海风开始时间距平分布

Fig.6 Anomaly distribution of sea breeze's starting time at each station in each season

具体到站点,ERA5 资料显示塘沽站平均海风开始时间早于站点资料对应结果,而大港站、汉沽站则相反。ERA5 资料显示海风开始时间的峰值在春季先于站点资料 1 h;夏季峰值时间段基本符合,即 2 套资料对应较好;秋季提前于站点资料;冬季塘沽站(图 6j)海风开始时间分布走势相同,ERA5 资料显示大港站(图 6k)和汉沽站(图 6l)均有平均值以上的峰值,而站点资料显示存在平均值以下的峰值。

图 7 显示了 2 套资料不同季节海风平均结束时

间。塘沽站春季(图 7a),大港站夏季(图 7e)、秋季(图 7h)、冬季(图 7k)和汉沽站冬季(图 7l)在均值附近呈现相似分布形势;ERA5 资料显示大港站春季(图 7b)海风结束时间多数早于平均时间,而站点资料结果不明显;ERA5 资料显示汉沽站春季(图 7c)海风结束时间呈现提前结束趋势,且仅有一个峰值,而站点资料出现双峰分布形势。除大港站春季、汉沽站夏季以外,ERA5 资料显示的平均海风结束时间均迟于站点资料对应结果。



实线—ERA5数据;虚线—站点数据;图例中时间—平均结束时间。

图 7 不同季节海风结束时间距平分布

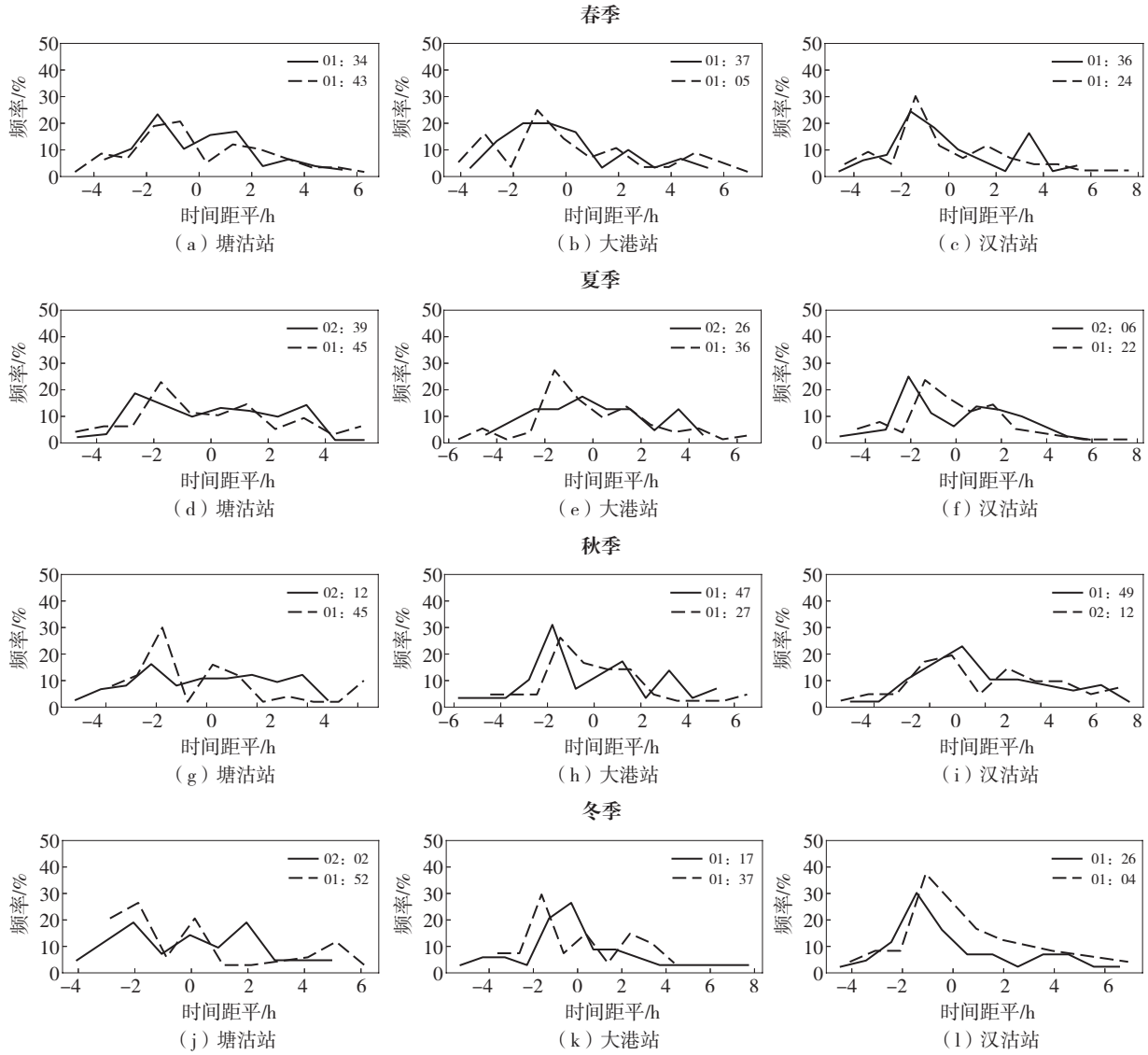
Fig.7 Anomaly distribution of sea breeze's ending time at each station in each season

陆风开始时间的分布形势表现为均在平均值前出现高频时段,且随时间推移,发生频率逐渐降低(图 8)。在平均开始时间之前约 2 h,3 个站点在四

季均有一个明显的高发频率峰值,而在平均开始时间之后,ERA5 资料显示的塘沽站夏季(图 8d)、秋季(图 8g),大港站春季(图 8b)、夏季(图 8e)、秋季

(图 8h)以及汉沽站春季(图 8c)陆风开始时间,均在均值后 2~4 h 内再次出现峰值;站点资料二次高发峰值出现时间更加提前,约在均值后 0~2 h。2

套资料的差异主要体现在,站点资料显示的塘沽站春季(图 8a)、大港站冬季(图 8k)、汉沽站秋季(图 8i)平均陆风开始时间均晚于 ERA5 资料对应结果。



实线—ERA5数据;虚线—站点数据;图例中时间—平均结束时间。

图 8 不同季节陆风开始时间距平分布

Fig.8 Anomaly distribution of land breeze's starting time at each station in each season

站点资料陆风结束时间相较于 ERA5 资料峰值明显。塘沽站随着季节的推移,站点资料陆风结束时间的峰值逐渐由平均值以下变化至平均值以上,而 ERA5 资料显示春季(图 9a)、夏季(图 9d)峰值持续 2 h,陆风结束时间大多晚于站点资料;2 套资料在大港站春季(图 9b)、夏季(图 9e)、冬季(图 9k)走势一致;ERA5 资料显示汉沽站春季(图 9c)、秋季(图 9i)陆风结束时间围绕均值呈双峰分布,而站点资料仅出现单峰。

3.3 海陆风持续时间

对比 2 套资料显示的不同季节海风和陆风持续时间(图 10),可见:ERA5 资料显示的海风和陆风持续时间均长于同站点同季节站点资料显示持续时间。

具体来看,ERA5 资料显示塘沽站海风(图 10a)春、秋、冬季海风的持续时间主要分布在 6~11 h,较站点资料结果更集中,而站点资料显示的陆风持续时间(图 10b)在夏季更集中。2 套资料显示的大港站海风(图 10c)和陆风(图 10d)持续时间在春、夏

季对应较好,ERA5 资料显示的秋、冬季海风持续时间相较于站点资料延长了 1.1~1.4 h。ERA5 资料显示的汉沽站春、夏、秋季海风(图 10e)持续时间比

站点资料对应结果更为集中;而陆风(图 10f)持续时间峰值区相比于站点资料延后 1 h。整体来看,2 套资料具有较好的一致性。

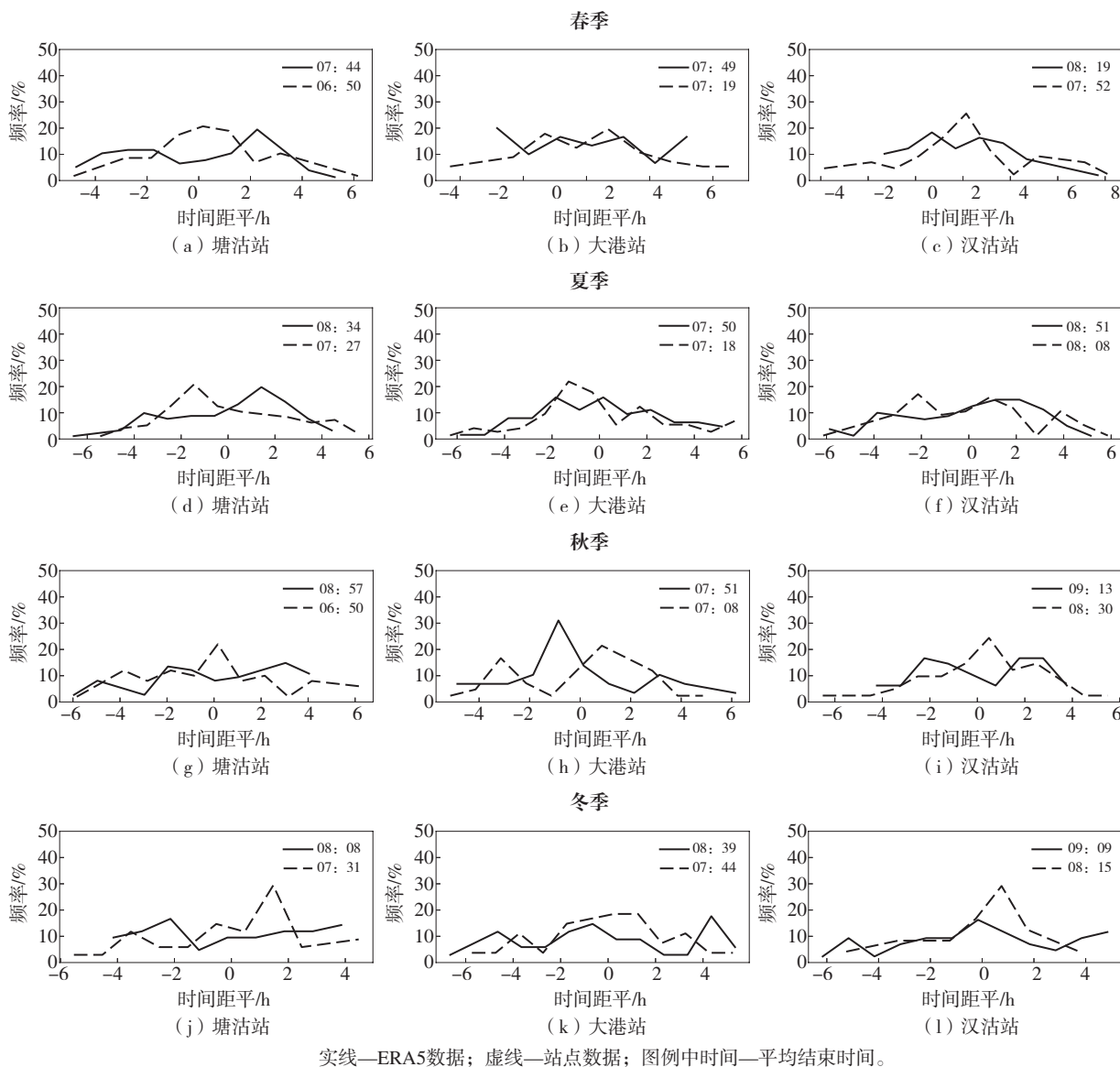
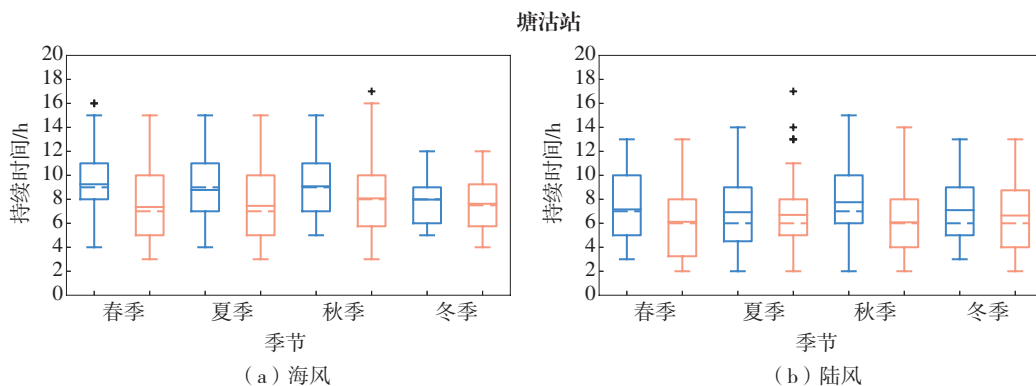


图9 不同季节陆风结束时间距平分布

Fig.9 Anomaly distribution of land breeze's ending time at each station in each season



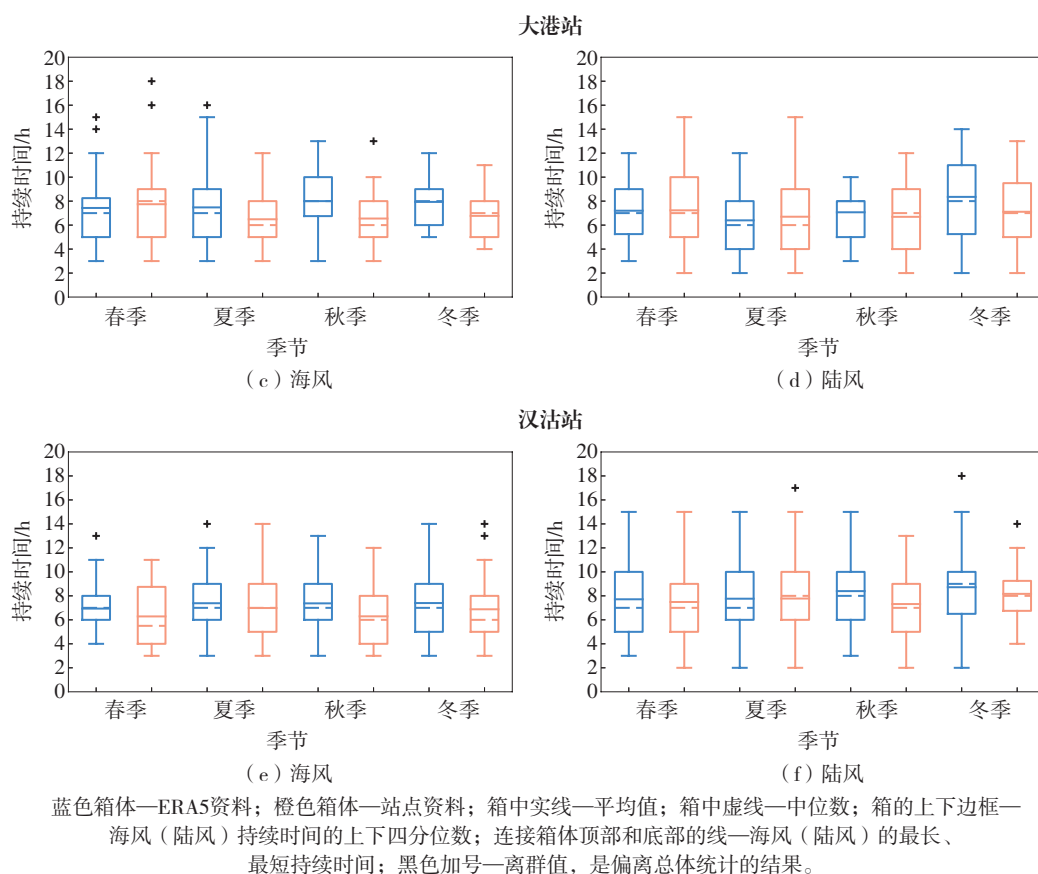


图 10 各站点各季节海风、陆风持续时间对比

Fig.10 Comparison of durations of sea breeze and land breeze at each station in each season

3.4 海陆风强度

对比 2 套资料识别的 3 个站点各季节和年均海风强度可见, ERA5 资料(图 11a)和站点资料(图 11b)显示 3 个站点春季海风最强。由年均来看,塘沽站、大港站、汉沽站 ERA5 资料海风强度依次递减,且随着季节推移,ERA5 资料显示的海风强度逐渐减弱,在冬季最弱。站点资料显示大港站在冬季海风强度略微增强,海风强度演变与 ERA5 资料显示结果较相似;强度值方面,春季塘沽站和大港站海风强度差异为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。

对比陆风强度(图 11c、11d)可见,大港站陆风强度最低,站点资料显示的塘沽站陆风强度与 ERA5 陆风强度相比,偏弱 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。由四季差异来看,春季陆风强度达到最强,其中,ERA5 资料显示的塘沽站春季陆风强度比其他两站偏强 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 2 套资料显示的陆风强度在冬季均有所回升。

由海风和陆风强度总体分布趋势可见:海陆风强度在春季最强,在秋冬季强度最低,个别站点在冬季会出现第二次峰值。这与秋冬季地表辐射冷却迅

速、气温下降有关,大气层结稳定使得风速减小;而春夏季的大气层结不稳定,从而导致海风普遍增强,且海风强度高于陆风强度。此外,使用 ERA5 资料评估天津环渤海地区的 3 个站点得到的结果,与站点观测资料结果对应较好。

4 结论

使用 2018 年 3 月—2021 年 2 月 ERA5 资料与站点资料,对天津环渤海地区海陆风事件进行筛选,并对海陆风的统计特征开展对比分析。结果表明:

(1) 海风一般在 11:00—15:00 开始,17:00—23:00 结束,陆风一般开始于前日 23:00—次日 03:00,结束于 06:00—10:00。2 套资料都体现夏季海陆风日数最多这一基本特征,且四季分布基本有较好的对应。海风持续时间较陆风持续时间更长,具体表现为 2 套资料中大港站海风和陆风的持续时间在春、夏季节分布一致,汉沽站冬季海风以及夏季陆风持续时间集中程度相似;2 套资料年均海风强度高于陆风强度,且强度在春季最大。

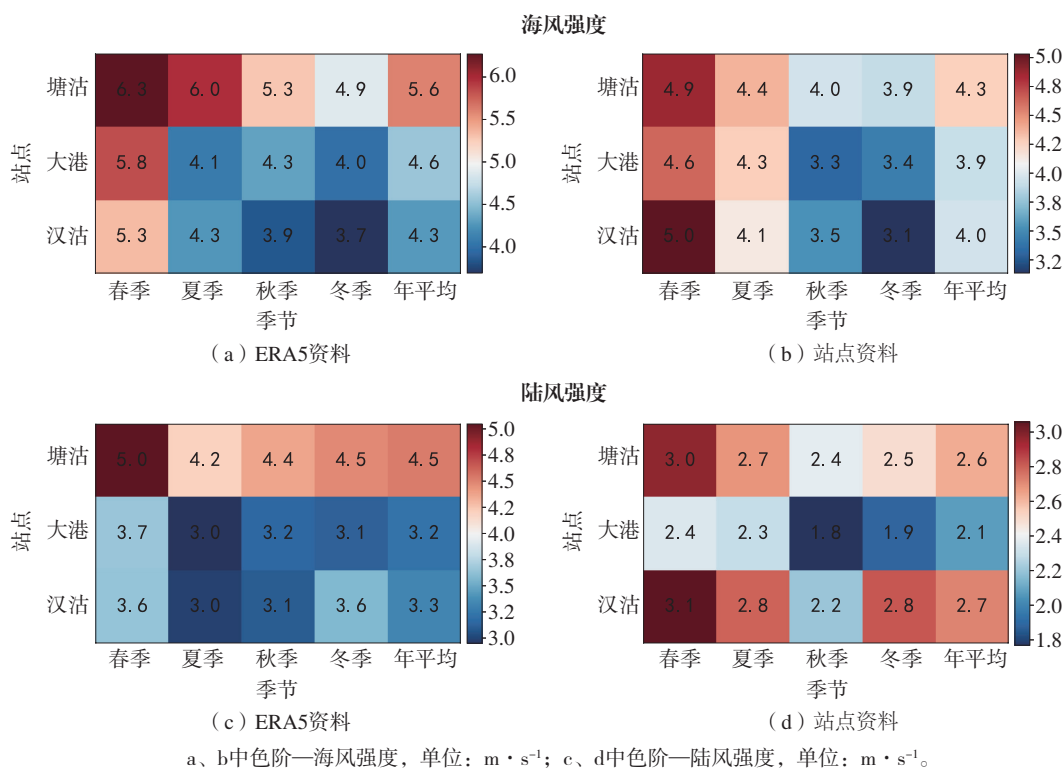


图 11 2套资料各季节及年均海风和陆风的强度对比

Fig.11 Comparison of seasonal and interannual average intensity of sea breeze and land breeze revealed by two sets of data

(2) 年均差异表现为, ERA5 资料显示塘沽站海风开始时间略早于站点资料, 大港站和汉沽站相反, 且站点资料显示海风开始和结束时间呈弱双峰结构。ERA5 资料显示陆风开始和结束时间均晚于站点资料约 1 h。站点资料显示平均海风和陆风持续时间均短于 ERA5 资料, 且后者显示的海风持续时间分布更加集中, 平均海风和陆风强度更强。

(3) 季节差异主要表现为, ERA5 资料显示春、秋季海陆风日数差异小, 站点资料显示冬季海陆风日数最少。2 套资料显示汉沽站春季海风结束时间在均值附近的双峰分布差异较大; 站点资料显示塘沽站春、夏、秋季、汉沽站四季的陆风平均结束时间峰值明显。塘沽站秋、冬季海风持续时间最长, 大港站和汉沽站则为春、夏季海风持续时间最长; ERA5 资料显示大港站和汉沽站秋季出现海风持续时间最大值。海风强度随季节推移, 站点资料显示大港站秋、冬季强度最小, 冬季出现回升; ERA5 资料显示夏季陆风最弱, 站点资料则显示秋季陆风最弱。

综上, 对较长时间序列 ERA5 资料在表征天津环渤海地区的海陆风特征方面的适用性开展了评估检验, 通过与站点资料对比分析, 证实其适用性。未

来将基于高分辨率模拟结果, 结合环渤海地区雷达等加密观测资料, 对海陆风动热力精细化结构特征、对流触发机制开展研究。

参考文献:

- [1] 王栋成, 邱黎, 董旭光, 等. 基于风廓线雷达资料的蓬莱海陆风时空结构特征[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 71-78.
- [2] 刁秀广. 阵风锋、海风锋和冷锋等触发局地强对流风暴实例分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 45-57.
- [3] 褚颖佳, 高帆, 张永婧, 等. 一次由线状风暴和阵风锋引发的致灾大风成因[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(2): 53-63.
- [4] 梅婵娟, 张灿, 许可, 等. 山东半岛秋季一次脉冲风暴下击暴流观测分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2): 131-139.
- [5] 梁钊明, 高守亭, 王东海, 等. 京津冀地区与海风锋相互作用的对流系统的发展预判分析[J]. 气象学报, 2014, 72(1): 116-132.
- [6] DE TOMASI F, MIGLIETTA MM, PERRONE M R. The growth of the planetary boundary layer at a coastal site: a case study[J]. Bound-Layer Meteorol, 2011, 139(3): 521-541.

- [7] LIU X G, LI J, QU Y, et al. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13 (9): 4501-4514.
- [8] XU J W, HUANG X, WANG N, et al. Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of Eastern China from the perspective of diurnal cycles [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 752: 141928.
- [9] SHEN L X, ZHAO C F, MA Z S, et al. Observed decrease of summer sea-land breeze in Shanghai from 1994 to 2014 and its association with urbanization [J]. *Atmos Res*, 2019, 227: 198-209.
- [10] LI G D, ZHANG X, MIRZAEI P A, et al. Urban heat island effect of a typical valley city in China: responds to the global warming and rapid urbanization [J]. *Sustain Cities Soc*, 2018, 38: 736-745.
- [11] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化 [J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 713-718.
- [12] 王晗, 李峰, 王昊, 等. 基于 FY-3B/VIRR 数据的济南市城市热岛效应与影响因素分析 [J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 126-137.
- [13] 刘馨尹. 中国沿海海陆风环流特征及对 PM_{2.5} 污染的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2021.
- [14] 杨林. 海陆边界层气象特征的分析 [J]. *气象科技*, 1998, 26(2): 57-60.
- [15] COULIBALY A, OMOTOSHO B J, SYLLA M B, et al. Characteristics of land and sea breezes along the Guinea Coast of West Africa [J]. *Theor Appl Climatol*, 2019, 138 (1/2): 953-971.
- [16] ARRILLAGA J A, YACÜE C, SASTRE M, et al. A characterisation of sea-breeze events in the eastern Cantabrian coast (Spain) from observational data and WRF simulations [J]. *Atmos Res*, 2016, 181: 265-280.
- [17] AZORIN-MOLINA C, CHEN D L, TIJM S, et al. A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain) [J]. *Int J Climatol*, 2011, 31(3): 468-486.
- [18] 许启慧, 苗峻峰, 刘月琨, 等. 渤海湾西岸海陆风特征对城市热岛响应的观测分析 [J]. *气象科学*, 2013, 33 (4): 408-417.
- [19] YOU C, CHI-HUNG FUNG J. Characteristics of the sea-breeze circulation in the Pearl River Delta region and its dynamical diagnosis [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2019, 58 (4): 741-755.
- [20] 赵文龙. 广州地区海陆风条件下臭氧污染的数值模拟研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [21] 张振州, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 海南岛地区海陆风的统计分析和数值模拟研究 [J]. *热带气象学报*, 2014, 30(2): 270-280.
- [22] 何礼, 束炯, 钟方潜, 等. 上海海陆风特征及其对臭氧浓度的影响 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(3): 17-21.
- [23] 肖犇, 贾洪伟, 徐佳佳, 等. 上海北侧区域海陆风对污染物扩散的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1552-1561.
- [24] 卢焕珍, 赵玉洁, 俞小鼎, 等. 雷达观测的渤海湾海陆风辐合线与自动站资料的对比分析 [J]. *气象*, 2008, 34 (9): 57-64.
- [25] 于恩洪, 陈彬, 白玉荣. 渤海湾西部海陆风的空间结构 [J]. *气象学报*, 1987, 45(3): 379-381.
- [26] 邱晓暖, 范绍佳. 海陆风研究进展与我国沿海三地海陆风主要特征 [J]. *气象*, 2013, 39(2): 186-193.
- [27] 许启慧. 天津地区海陆风时空变化特征及其对热岛效应的响应研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [28] BORNE K, CHEN D, NUNEZ M. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast [J]. *Int J Climatol*, 1998, 18(8): 901-914.
- [29] PRTENJAK M T, GRISOGONO B. Sea/land breeze climatological characteristics along the northern Croatian Adriatic coast [J]. *Theor Appl Climatol*, 2007, 90(3/4): 201-215.
- [30] PAPANASTASIOU D K, MELAS D. Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment [J]. *Int J Climatol*, 2009, 29(2): 305-315.
- [31] 邱晓暖, 范绍佳. 自动气象站资料在海陆风等局地环流研究中的应用 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2013, 52(2): 133-136.
- [32] 黄利萍, 苗峻峰, 刘月琨, 等. 天津地区夏季海陆风对城市热岛日变化特征影响的观测分析 [J]. *大气科学学报*, 2013, 36(4): 417-425.
- [33] 吴增茂. 渤海南岸海陆风个例分析及判别 [J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(1): 87-91.