

李珍妮,宋小全,马秋杰,等.辽宁绥中地区海陆风的多普勒测风激光雷达观测与特征提取[J].海洋气象学报,2019,39(4):52-60.

LI Zhenni, SONG Xiaoquan, MA Qiujie, et al. Doppler wind lidar observation and feature extraction of sea-land breeze in Suizhong, Liaoning[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(4):52-60. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.006. (in Chinese)

辽宁绥中地区海陆风的多普勒测风激光雷达观测与特征提取

李珍妮¹,宋小全^{1,2},马秋杰¹,吴松华^{1,2},王箫鹏³,李荣忠⁴

(1. 中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系,山东 青岛 266100;2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,山东 青岛 266237;3. 中国气象局气象探测中心,北京 100081;4. 青岛镭测创芯科技有限公司,山东 青岛 266101)

摘要: 2019年3月,利用相干多普勒测风激光雷达首次在辽东湾西部绥中地区进行了风廓线测量试验。根据研究区域海岸线走向采用风向的十六分位法定义局地海风和陆风,分析和提取海陆风特征验证了多普勒测风激光雷达在春季季风间断期间观测海陆风的可行性,并计算和分析了大气边界层湍流能量的变化以及回流水平变化等特性。结果表明:1) 绥中地区春季存在明显的海陆风环流特征,测风激光雷达观测海陆风出现的时间与地面自动气象站观测的数据较为一致,符合海陆风日的定义。2) 海陆风日发生时,水平局地回流指数(RF)较小,1.2 km以下的RF值小于0.5,使得污染物循环累积,较易形成雾霾天气;但是海风时大气边界层的高度可达1 km以上,有利于低层大气污染物向高层扩散,减轻低层大气污染。研究结果为该地边界层参数化方案的设计和污染的防治提供了参考依据。

关键词: 测风激光雷达;海陆风;绥中;大气边界层;湍流

中图分类号: P412.25;P412.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)04-0052-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.006

Doppler wind lidar observation and feature extraction of sea-land breeze in Suizhong, Liaoning

LI Zhenni¹, SONG Xiaoquan^{1,2}, MA Qiujie¹, WU Songhua^{1,2}, WANG Xiaopeng³, LI Rongzhong⁴

(1. Department of Marine Technology in College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China; 4. Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, China)

Abstract In March 2019, wind profile observations were first carried out with the coherent Doppler wind lidar in Suizhong, to the west of Liaodong Bay. The 16-wind compass rose is applied to define local sea breeze and land breeze along the coastline of the study area. The characteristics of sea-land breeze are analyzed and extracted, the feasibility of using Doppler wind lidar to observe sea-land breeze during spring monsoon break is verified, and the variation characteristics of turbulence energy and horizontal recirculation in the atmospheric boundary layer are calculated and analyzed. The results are as shown below. 1) There is obvious sea-land breeze circulation in the spring of Suizhong, and the existence of sea-

收稿日期:2019-09-29; 修订日期:2019-11-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0213101);国家自然科学基金项目(41375016)

作者简介:李珍妮,女,硕士研究生,主要从事大气测量和激光探测研究,15589854691@163.com。

通信作者:宋小全,男,博士,副教授,主要从事大气激光探测技术研究, songxq@ouc.edu.cn。

land breeze observed by wind lidar is consistent with the data by ground automatic weather stations, according with the definition of sea-land breeze day. 2) When sea-land breeze day appears, the horizontal recirculation factor (RF) is small, lower than 0.5 below 1.2 km, which makes pollutants circulate and accumulate, and thus it is likely to form haze weather; however, the height of atmospheric boundary layer in the case of sea breeze can be higher than 1 km, which makes atmospheric pollutants spread to the upper layer and reduce air pollution in the lower layer. The research results provide reference for the design of boundary layer parameterization scheme and air pollution prevention in Suizhong.

Key words wind lidar; sea-land breeze; Suizhong; atmospheric boundary layer; turbulence

引言

沿海地区由海陆热力性质差异引起的中小尺度风气——海陆风,是沿海地区特殊的气候因素。海陆风影响的水平范围大约在十几公里到几十公里,属中尺度范围^[1]。海陆风可在很大程度上直接影响边界层结构,冷的海风进入暖的陆地之后和地面接触的空气受到加热而呈超绝热状态,使边界层湍流增强并有对流湍流产生,导致具有对流边界层性质的热内边界层(thermal inner boundary layer, TIBL)形成^[2-6];还可影响大气边界层水平和垂直输送扩散,导致污染物的再分布^[7]。结合大、中、小尺度环流,可以为灾害性天气的短时预报和局部地区的天气预报提供依据^[8]。

中国渤海西岸是海陆风的多发地区,其处于中纬度西风带,天气系统复杂多变,高低压交替频繁,各种天气系统相互作用^[9]。许多气象科学工作者对环渤海地区海陆风展开过研究,主要包括海陆风在各个月份出现的频率、海风起止时间、海风伸向内陆的距离、海陆风环流等基本特征^[10-13];通过统计分析结合数值模拟的方法研究海陆风与天气的关系;通过地面雷达观测结合数值模拟研究海陆风期间的热内边界层^[3-4];通过加密自动气象站及雷达观测结合数值模拟研究海陆风辐合线等^[14]。

到目前为止,对海洋大陆昼夜风循环的研究常依赖于像 WRF 这样的中尺度模型^[15-18],基于传统原位观测资料的研究总是受到空间或时间采样限制。而遥感技术如边界层风廓线雷达(工作频率 $10^8 \sim 10^{10}$ Hz)能够获取观测站点上空几公里高度内、分钟级的大气观测数据,空间分辨率可达几十米,探测起始高度通常几百米,可以对整个海陆风垂直结构进行较细致的分析^[19-21],并且广泛应用在海陆风期间污染物的累积与扩散研究^[22]。多普勒测风激光雷达(工作频率 $10^{13} \sim 10^{15}$ Hz)相对于风廓线雷达来说体积和占地面积较小,具有秒级时间分

辨率,空间分辨率可达米级,且探测起始高度通常几十米。引入测风激光雷达有助于突破风廓线雷达在海风测量的时间和空间尺度的一些限制,使得整个海陆风结构的细致分析成为可能^[23-24]。测风激光雷达能够对大气边界层内湍流以及水平和垂直风进行观测,对于研究海陆风对污染物输送的影响来说至关重要。

本文将结合地面气象资料与测风激光雷达资料就绥中地区春季海陆风的基本特征以及垂直结构展开研究。该研究将对绥中地区的空气污染治理,天气预报准确性的提高有较大的推动作用。

1 资料及方法

1.1 站点资料

2019年3月5—18日,相干多普勒测风激光雷达系统架设安装在辽东湾西部的辽宁省葫芦岛市绥中县气象局(40.32° N, 120.33° E)并开展观测(图1)。系统采用中国海洋大学与青岛镭测创芯科技有限公司联合研制的 Wind3D 6000 型相干多普勒测风激光雷达,表1为其性能技术指标。Wind3D 6000 工作在肉眼不可见的红外波段,为扫描型激光雷达系统,可实现地面至 6 000 m 径向距离范围内三维大气风场和风廓线探测,具有秒级的时间分辨率、15 m 的空间分辨率,测速精确度小于或等于 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该系统用于探测风速、风向、风切变、大气湍流,可与风廓线雷达相互补充和印证。结合绥中县气象局自动气象站逐小时的当前大气能见度、天气代码、10 min 平均风向风速等来分析绥中地区在春季海陆风的气象条件。为避免低空建筑物等影响观测结果,系统采用 DBS (Doppler beam swing) 激光多波束扫描测量获取风廓线,分析时剔除最底层两个高度的观测数据。水平风的数据结果分析从 77 m 高度开始,风速风向通过 DBS 合成后再采用 10 min 平均,计算过程中剔除信噪比(SNR)较小的观测,并且保证数据获取率在 90%以上。



图1 安装于绥中的相干多普勒测风激光雷达 Wind3D 6000

Fig.1 Wind3D 6000 (coherent Doppler wind lidar) installed in Suizhong Meteorological Bureau

表1 相干多普勒测风激光雷达 Wind3D 6000 性能技术指标

Table 1 Technical parameters of Wind3D 6000 (coherent Doppler wind lidar)

技术指标	参数
激光波长	1.5 μm (人眼安全、不可见)
数据刷新率	1~10 Hz(可软件设置)
测速精度	$\leq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
扫描伺服精度	$< 0.1^\circ$
距离分辨率	15 m(可软件设置)
扫描模式	DBS
径向探测范围	45~6 000 m
重量	$< 90 \text{ kg}$

1.2 海陆风定义及识别标准

绥中地区地势西北高、东南低,近岸受渤海影响显著;且绥中处于中纬度西风带、东亚季风区,四季分明,大尺度的季风及中小尺度海陆风环流对该地区的天气及气候有重要影响。观测期间绥中地区处于春季,会出现季风间歇期,在无大尺度系统风影响时,能观测到明显的海陆风环流。采用张振维等^[12]对海陆风风向划分的方法,根据绥中地区海岸线走向采用风向的十六分位法定义局地海风和陆风的具体来向,定义 E—SSW 方向为海风方向(向岸流),W—NNE 方向为陆风方向(离岸流),平行于海岸线的 SW 及 WSW 和 NE、ENE 风为海陆风过渡风方向(顺岸流),如图 2 所示,根据站点在观测日的风向变化,可将观测日分为海陆风日和非海陆风日,海陆风日的标准采用于恩洪等^[1]的方法:

- 1) 地面观测风速 $v \leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- 2) 陆风时段在 01—08 时,陆风出现次数 $n \geq 4$,海风出现次数 $n \leq 2$;
- 3) 海风时段在 13—20 时,海风出现次数 $n \geq 4$,陆风出现次数 $n \leq 2$;
- 4) 在一个海陆风日中必须同时满足海风和陆风的以上 3 个标准。

海陆风是由海陆温差所引起的,而海陆温差几乎是天天都存在,但在大尺度天气系统较强时,海陆风常被淹没在梯度风中,较难发现海陆风的出现。考虑到分离纯海陆风在实际应用中意义不大,所以不做 u (东西方向)和 v (南北方向)风量的分解,分析时直接使用全风速。

根据海陆风日的定义,在绥中观测期间海陆风共出现 3 日,分别为 2019 年 3 月 7 日、3 月 10 日及 3 月 13 日。现就观测期间的海陆风典型实例进行分析,并结合当地基本气象要素分析海陆风建立、发展和消亡过程。

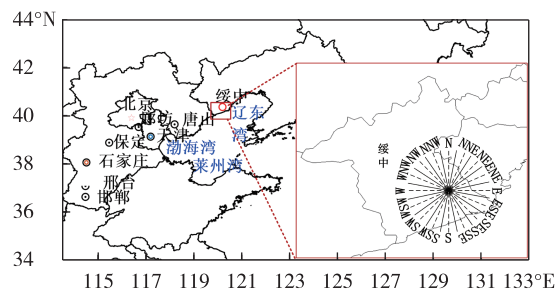


图2 绥中地区海岸线走向及风向十六分位法示意图
Fig.2 Map of coastline of Suizhong and 16-wind compass rose

2 海陆风个例特征分析

2.1 测风激光雷达观测海陆风垂直结构特征分析

在日常的天气预报及气象保障工作中,海陆风环流是必须要考虑的重要因素。我国北方春季处于季风转换期,季风较弱时海陆风易于显现,而季风较强时对海陆风发展不利,尤其在强大的大尺度系统控制时海陆风会被淹没。图 3、4 中分别给出了 2019 年 3 月 10 日(0310)季风间歇期间海陆风日和 3 月 12 日(0312)非海陆风日时测风激光雷达观测的风速风向结果及其对应地面测站水平风局地变化趋势。

图 3a 中 0310 地面测站的风速较小,均不超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,近地面最大强度海风出现在海风时 16:00 为 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。09:00 以前为陆风,09:00—

12:00 为东北偏东的过渡风, 12:00—19:00 为海风时间, 所以 0310 符合所定义的海陆风日特征。一天中, 在 500 m 以下的风层中, 陆风转海风为顺转, 且陆风风向和海风风向均明显, 陆风主要为偏北风, 海风主要为偏南风, 说明背景风场很小或无作用。图 3b 为 0310 测风激光雷达海陆风个例中展现了比较明显的海陆风日的陆风环流的回流气流高度、厚度以及风速风向。

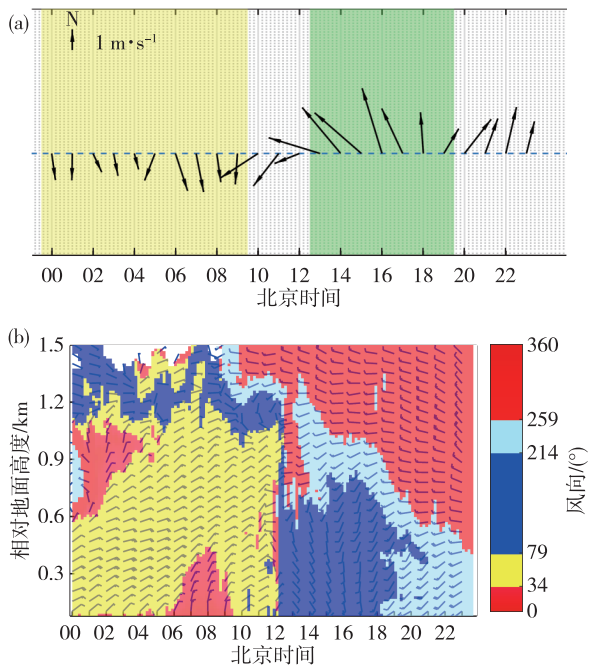


图3 0310 海陆风日地面测站水平风局地变化 (a) 和测风激光雷达观测水平风 (b)
Fig.3 Local variation of horizontal wind by ground automatic weather stations (a) and by wind lidar (b) in the case of sea-land breeze on 10 March 2019

1) 05:00—09:30 风从陆地吹向海洋, 陆风最大发展高度约 0.5 km。陆风和反陆风^[25]并非由一条直线分开, 而是一个主导风向是东北偏东的过渡层, 风速较大可达 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 1.2~1.5 km 的高度上, 反陆风由海洋方向流向陆地。垂直方向反陆风风速较小在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 因此出现在垂直剖面上同时存在风速风向切变现象。这是因为海陆风发生在弱的天气形势下, 往往伴随着新的低值天气尺度系统移来, 在这种有利的天气形势下最易产生低空急流^[1]。

2) 10:00—12:00 陆风结束后, 1.2 km 以下为过渡风, 风速较小基本上不超过 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 12:00 低空过渡风转海风。正是由于过渡带风速低值区的存在使得海风在垂直方向上几乎同时转换, 且发展

迅速。

3) 12:00—19:00 海风环流时, 海风与陆风风速差异不大, 整体上海风强度较小。海风最大影响高度比陆风高, 可达 0.8 km, 这也说明海风在吹向陆地的过程中, 由于陆地增热较快, 大气层结不稳定, 有利于动量上传, 使海风垂直高度增高, 这与模拟结果是相似的^[26]。与陆风时不同的是, 海风时的过渡风为风速较小的西南偏西风, 过渡层较薄。

4) 21:00 之后低空全部为过渡风, 高空均为陆风, 此次海风过程结束。

图 4 给出的是 0312 冬季风期间的个例, 由图 4b 可以看出该地区在 77 m 高度处 09:00—16:00、22:00—23:00 为西北偏西风, 其他时间主要为西北偏北风, 而图 4a 地面测站出现西南偏西风, 可能是因为近地面受到周围地形的影响, 影响自动气象站资料对风向的判断。当天总体上受蒙古北部的中西伯利亚高原和蒙古高原吹来的冬季风的影响, 100 m 以上几乎无海风及过渡风的影响, 风速比 0310 海陆风期间大得多, 最高风速高达 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这是由季风和移动性高压的控制, 弱的高压又使陆风为偏北风造成的。

天气尺度系统是制约海陆风发展的重要因素。背景风场强, 海陆风就弱, 以至于不能生成; 背景风

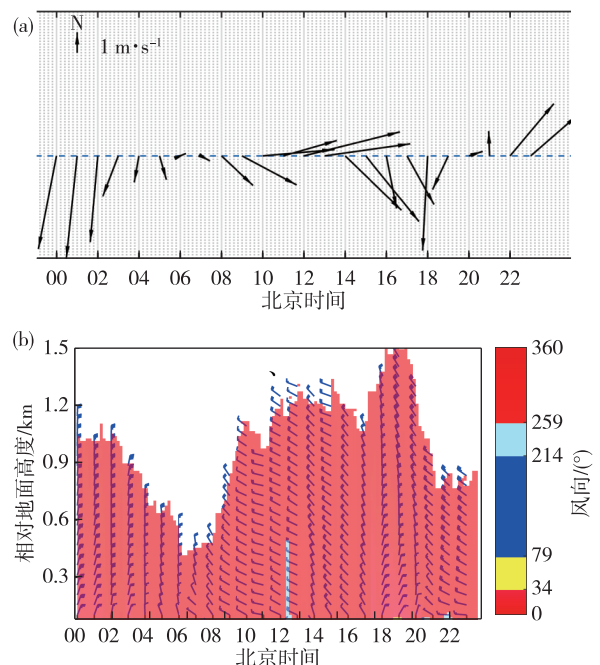


图4 0312 非海陆风日地面测站水平风局地变化 (a) 和测风激光雷达观测水平风 (b)
Fig.4 The same as Fig.3, but for monsoon period on 12 March 2019

场弱,海陆风才能生成并发展到最强^[1]。为了研究海陆风日和非海陆风日地面天气情况,对地面天气形势图^[27]进行了分析。

图 5a 是 0310 陆风期间的地面天气分析图,可以看出,辽东湾西岸的绥中地区没有明显的高低

压,气压等值线稀疏,背景风小,在这种弱的天气形势下形成了海陆风。图 5b 为 0312 非海陆风期间的地面天气分析图,由图可知高低压等值线密集,有明显的大风天气,不利于中尺度海陆风环流的形成。

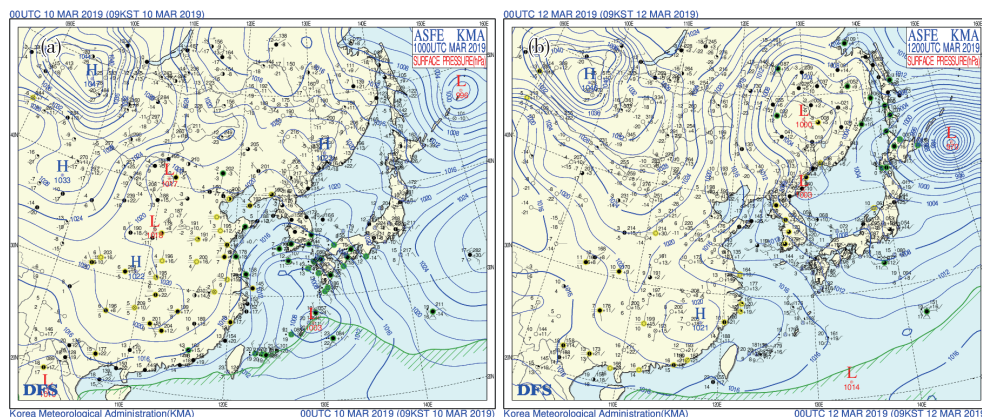


图 5 地面天气形势图(a.0310 陆风期间,b.0312 非海陆风期间;H 表示高压,L 表示低压,蓝色线表示等压线,黄色点表示雾,绿色点表示降水)

Fig.5 Surface synoptic situation (a. during land breeze on 10 March, b. during monsoon period on 12 March; H for high pressure, L for low pressure, blue line for isobar, yellow dot for fog, green dot for precipitation)

2.2 局地回流指数

由唐山、北京、天津、廊坊、保定、石家庄、邢台、邯郸等城市构成了东北—西南走向的带状污染物高排放区^[28],葫芦岛市的绥中地区位于该带状污染物高排放区的东北方向,污染天气频发。污染物在空间的分布是不均匀的,随着排放源的扩散有其自身的特点。风在空间的分布也不一样,随着大型天气系统的变化和地方性天气系统(包括海陆风等)的变化而影响污染物扩散。

为对垂直风场进行深入研究,计算局地回流指数(recirculation factor, RF)。局地回流指数最早是由 ALLWINE and WHITEMAN^[29]提出的,用来反映风场有效输送能力,其认为局地回流是指污染物起初被风场输送出去,但随后又被输送回来的现象,对空气质量有着不可忽视的影响。局地回流指数(RF)计算公式如下:

$$I_{RF} = \frac{\sqrt{(\Delta T \sum_{t_s}^{t_e} u_i)^2 + (\Delta T \sum_{t_s}^{t_e} v_i)^2}}{\Delta T \sum_{t_s}^{t_e} \sqrt{u_i^2 + v_i^2}} \quad (1)$$

式中: I_{RF} 为局地回流指数(RF); t 为相应的数据时刻; t_s 为起始时刻; t_e 为终止时刻; ΔT 为平均数据时间间隔; u_i 为水平风速的东西分量; v_i 为水平风速的南北分量。

局地环流一般是由下垫面不同的热力性质产

生,与太阳的昼夜变换同步,故基本为 1 d 的周期^[30-31]。因此,有的研究中 ΔT 为 1 h, t_s 为起始时刻取 0, t_e 是终止时刻为 23:00^[32-33],而本文为了更加精细化研究采用了 ΔT 为 10 min, t_s 为 00:00, t_e 为 23:50。计算得到各层的逐日局地回流指数廓线如图 6 所示。可以发现 0310(海陆风日)1.2 km 以下高度的 RF 值较小,小于 0.5,代表着该时段内风场使污染物回流堆积的效果较明显,污染物有效扩散的区域小,所以易出现雾霾天气,这解释了图 7 地面测站 0310 10:00 之前(陆风)有 7 个时次大气能见度在 10 km 以下且 0310 对应能见度较低的时间段出现了薄雾和霾的原因;0312 大气能见度高且无污染天气是因为 0312 在冬季风期间 RF 值较大,接近 1,代表的是以平直稳定的输送为主,有助于污染物扩散,从而大气能见度经常较高,天气较晴朗。

3 大气边界层湍流特征分析

3.1 湍流参数计算

海陆风环流的发生发展影响温度场、湿度场和风场的分布,引起低层大气层结状况的变化,对海岸带气候有重要影响,是决定局地天气气候特点的重要因素。针对海陆风期间大气边界层日变化分析与研究需要,可利用测风激光雷达 DBS 观测模式时垂直指向获取的垂直风速或气流结果,研究垂直

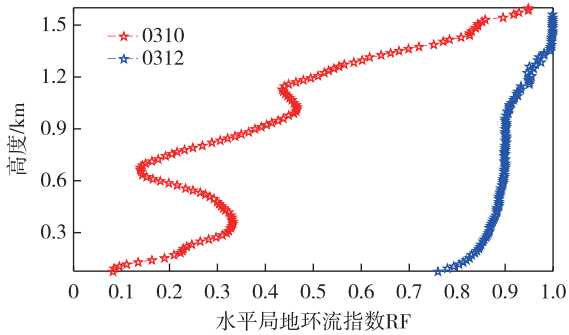


图 6 水平局地环流指数 RF 值
Fig.6 Value of horizontal RF (recirculation factor)

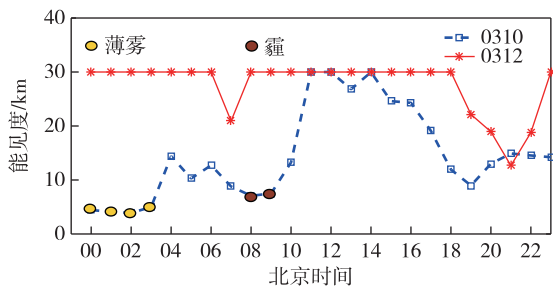


图 7 地面测站能见度日变化及污染情况
Fig.7 Daily variation of visibility and pollution by ground automatic weather stations

方向的湍流特征与运动。为了最小化非湍流尺度的影响,测风激光雷达观测数据通过 1 h 的滑动平均后,计算每个测量高度湍流的诸多参数如风速在垂直方向上的脉动、垂直速度方差等。此外,结合信噪比数据及水平平均风速风向结果,可研究海陆风期间边界层的湍流来源、发展、结构等以及对空气质量的影响。

风速在垂直方向上的脉动用 a' 表示,如式(2)所示,且垂直向上为正。风速在垂直方向上脉动的剧烈情况及发展的高度,可用于对大气边界层进行分类。

$$a' = A - \bar{A} \quad (2)$$

垂直速度方差 σ_A^2 ,代表湍流动能的垂直分量,公式如下:

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{i=0}^{N-1} a_i'^2 = \overline{a'^2} \quad (3)$$

式中: a' 表示观测时刻垂直风速的脉动; A 表示观测时刻垂直风速的实际观测值; \bar{A} 为垂直风速 1 h 的滑动平均值。

计算时本文信噪比阈值选择相对保守,所有不符合阈值的数据均被剔除。这种考虑的弊端是一

些不寻常的现象也会被剔除,比如大气洁净时信噪比较小,未达到阈值造成该数据缺失,这也强调了视觉检查步骤在质量控制中的重要性。计算先采用 10 个连续时间的廓线(大约 2 min 40 s)和 3 个距离门(距离分辨率 15 m)的窗口大小进行中值滤波处理,然后进行 1 h 的滑动平均,并设定垂直风的绝对限值为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 湍流特征分析

研究近地层湍流特征有助于理解湍流输送对气溶胶粒子输送的影响^[34]。试验所在区域地势相对平坦,因此垂直方向上的湍流主要是由热力因素形成,湍流混合和交换作用影响污染物质在垂直方向上的输送。

图 8a 和图 8b 分别为 0310 和 0312 测风激光雷达信噪比时间-高度剖面图,可直观地显示气溶胶的分层现象、云的高度分布特征以及大气边界层高度的变化^[35]。0310 的大气边界层高度的日变化相对于 0312 不明显,全天维持在 1.5~2 km 之间缓慢变化。

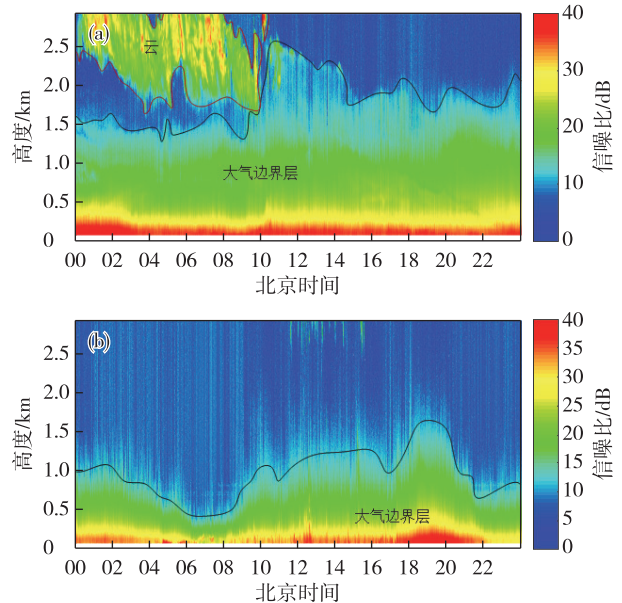


图 8 信噪比时间-高度剖面 (a. 0310 海陆风期间, b. 0312 季风期间; 黑线表示边界层的高度变化, 红线表示激光雷达探测到云的边界)

Fig. 8 Time-height profile of SNR (a. during sea-land breeze on 10 March, b. during monsoon period on 12 March; black line for height change of boundary layer, red line for boundary of cloud by wind lidar)

图 9a 和图 9b 分别为 0310 和 0312 垂直速度脉动时间-高度剖面图,0310 及 0312 边界层发展具有明显日循环特点^[36]。图 9 中静力稳定的空气中带

有弱而散的湍流为稳定边界层。0310 中 00:00—09:00, 由于云对太阳辐射的遮挡作用导致地面受热较慢, 垂直脉动速度接近 0, 不利于污染物在垂直方向上的扩散。在混合层中的湍流通常是对流驱动的, 有利于污染物在垂直方向上扩散^[37]。0310 中 10:00—17:00 和 0312 中 08:00—18:00 为混合层, 垂直方向上的脉动较强, 超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。0310 混合层发展时间比 0312 短, 混合强度比 0312 弱。

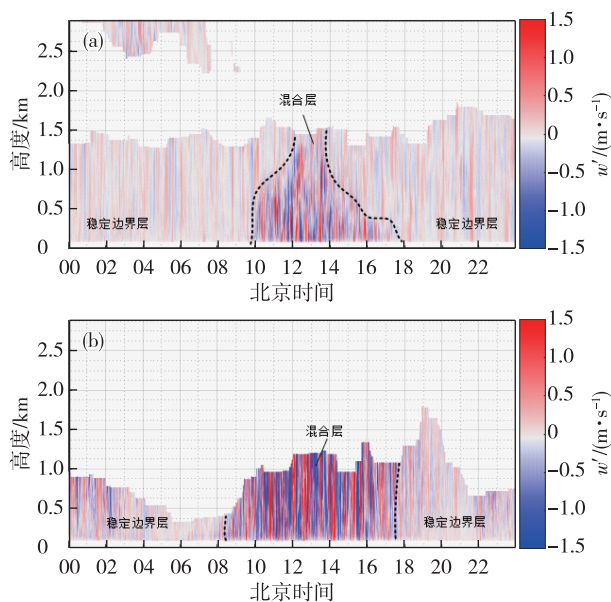


图9 垂直速度脉动时间-高度剖面(a. 0310 海陆风期间, b. 0312 季风期间; 黑色虚线为混合层与稳定边界层的分界)

Fig.9 Time-height profile of vertical velocity fluctuation (a. during sea-land breeze on 10 March, b. during monsoon period on 12 March; black dashed line for dividing line between mixing layer and stable boundary layer)

图 10 为垂直方向上的脉动速度方差, 可见湍流动能主要出现在白天混合层。总体上 0312 混合层湍流动能大值中心较厚, 持续时间更长; 0310 湍流动能的大值中心较 0312 小, 且大值中心比较贴近地面, 随着高度逐渐增加, 湍流动能逐渐消亡, 大约到 1.2 km 以上湍流动能接近于 0。混合层相对于稳定边界层来说垂直方向湍流交换强烈, 从而有利于低层大气污染物向高层扩散, 减轻低层大气污染^[38], 这可以解释图 7 中 0310 空气污染在混合层出现时反而有所好转的原因。

4 结论与讨论

基于多普勒测风激光雷达在辽东湾西部绥中地区进行了风速测量试验, 分析和提取了海陆风特

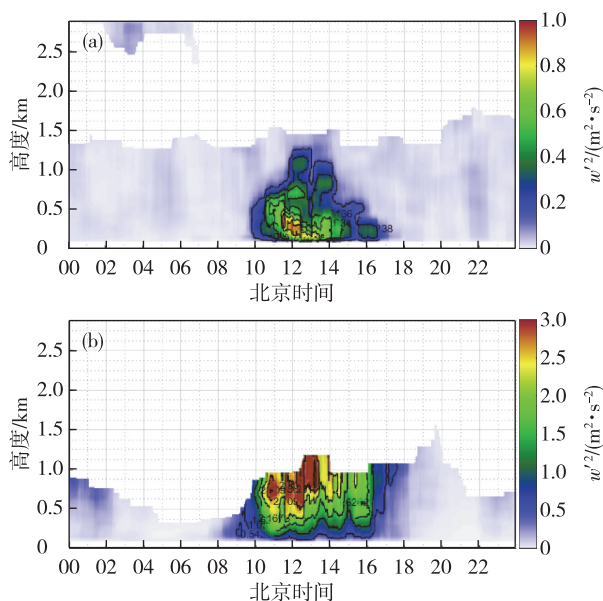


图 10 垂直速度方差时间-高度剖面(a. 0310 海陆风期间, b. 0312 季风期间)

Fig.10 Time-height profile of vertical velocity variance (a. during sea-land breeze on 10 March, b. during monsoon period on 12 March)

征。观测个例结果显示有较明显的海风环流和陆风环流, 海陆风期间近地面风速较小, 风向有顺时针变化等特点, 海风及陆风出现的时间符合海陆风日的定义, 发展高度与历史统计一致。测风激光雷达观测数据相对于风廓线雷达来说, 能更加精细准确地研究海陆风转换的时间及高度特征。此外, 测风激光雷达在海洋气象观测方面, 对来自地表和海面的地杂波不敏感, 适用性优于风廓线雷达。但测风激光雷达工作于光学谱段, 受降水、云等的影响明显。

海陆风期间水平风的局地回流指数较小, 不利于污染物的扩散; 但在垂直方向上, 海风期间形成的混合层内湍流的剧烈运动使得低层大气的空气质量有所好转。海陆风期间与非海陆风期间边界层的变化明显不同, 海陆风期间的边界层高度变化不明显且湍流动能的大值中心较低。根据测风激光雷达观测的湍流数据研究边界层湍流特性, 有助于提升春季季风转换期间辽东湾西岸边界层演变特征的认识。根据测风激光雷达水平风和垂直风的观测研究污染物的扩散, 为该地边界层参数化方案的设计和污染的防治提供参考依据。

沿海地区的边界层结构复杂, 且各地的海陆风是不一样的。目前开展的单站短时测量工作所积累的数据以及得到的初步结论只是对仪器以及算

法进行检验。为揭示沿海边界层普遍性的特征规律,需要多种设备联合开展长期观测。

致谢:辽宁省绥中县气象局为试验的开展提供了大量帮助;孙康闻、石家祥两位硕士研究生执行和承担了本次观测试验,特此一并致谢。

参考文献:

- [1] 于恩洪,马富春,陈彬,等.海陆风及其应用[M].北京:气象出版社,1997:1-146.
- [2] KUNHIKRISHNAN P K, GUPTA K S, RAMACHANDRAN R, et al. Study on thermal internal boundary layer structure over Thumba, India[J]. Ann Geophys, 1993, 11(1): 52-60.
- [3] 殷达中,刘万军,李佃佐.辽东半岛西岸海陆风及热内边界层的观测研究[J].气象,1997,23(9):8-11.
- [4] 刘玉彻,王连仲,赵凡,等.辽宁葫芦岛地区海陆风及热内边界层研究[J].海洋科学,2012,36(1):87-93.
- [5] CALMET I, MESTAYER P. Study of the thermal internal boundary layer during sea-breeze events in the complex coastal area of Marseille[J]. Theor Appl Climatol, 2016, 123(3/4): 801-826.
- [6] MELECIO-VÁZQUEZ D, RAMAMURTHY P, AREND M, et al. Thermal structure of a coastal-urban boundary layer[J]. Bound-Layer Meteorol, 2018, 169(1): 151-161.
- [7] 李浩文,张阿思,步巧利,等.2015年干季佛山一次重空气污染过程形成机理研究[J].环境科学学报,2017, 37(8): 3044-3053.
- [8] 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.
- [9] 王玉国,徐梦阳.辽东湾西部海岛大风规律研究[J].科技视界,2014(11): 12-13.
- [10] 王玉国,吴增茂,常志清.辽东湾西岸海陆风特征分析[J].海洋预报,2004,21(3): 57-63.
- [11] 蒋维楣,王彦昌,钟世远.海岸地区边界层风及其输送扩散特性的观测研究[J].海洋与湖沼,1991(2): 140-147.
- [12] 张振维,李东红,王瑛.辽东湾西部地区海陆风初探[J].气象科学,1991,22(2): 205-213.
- [13] 高佳琦.渤海西部海陆风识别方法及其时空分布特征研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [14] 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, 130.
- [15] PAPANASTASIOU D K, MELAS D, LISSARIDIS I. Study of wind field under sea breeze conditions: An application of WRF model[J]. Atmos Res, 2010, 98(1): 102-117.
- [16] LOUGHNER C P, ALLEN D J, PICKERING K E, et al. Impact of fair-weather cumulus clouds and the Chesapeake bay breeze on pollutant transport and transformation[J]. Atmos Environ, 2011, 45(24): 4060-4072.
- [17] DING A J, WANG T, ZHAO M, et al. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China[J]. Atmos Environ, 2004, 38(39): 6737-6750.
- [18] 王晓峰,王平,张蕾,等.上海“7·31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究[J].高原气象,2015,34(1): 124-136.
- [19] 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),2007,37(4): 609-614.
- [20] 徐峰,王晶,张羽,等.湛江东海岛二月海陆风环流特征研究[J].气象科学,2012,32(4): 423-429.
- [21] 王志春,植石群,丁凌云,等.华南沿海地区车载风廓线雷达资料的分析与应用[J].气候与环境研究,2013, 18(2): 195-202.
- [22] 孟丽红,李英华,韩素芹,等.海陆风对天津市PM_{2.5}和O₃质量浓度的影响[J].环境科学研究,2019,32(3): 390-398.
- [23] IWAI H, MURAYAMA Y, ISHII S, et al. Strong updraft at a sea-breeze front and associated vertical transport of near-surface dense aerosol observed by Doppler lidar and ceilometer[J]. Bound-Layer Meteorol, 2011, 141(1): 117-142.
- [24] FLAMANT C, DEROUBAIX A, CHAZETTE P, et al. Aerosol distribution in the northern Gulf of Guinea: local anthropogenic sources, long-range transport and the role of coastal shallow circulations[J]. Atmos Chem Phys, 2018, 18(16): 12363-12389.
- [25] 郝吉明,马广大,王书肖.大气污染控制工程[M].3版.北京:高等教育出版社,2010:83-84.
- [26] 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.
- [27] 高山红,刘斌,吴炜.区域大气与海洋短期实时预报系统(V9.8)[DB/OL].(2019-03-12)[2019-09-01]. <http://222.195.136.24/>.
- [28] 姚青,刘敬乐,蔡子颖,等.天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析[J].环境科学学报, 2018, 38(10): 3856-3867.
- [29] ALLWINE K J, WHITEMAN C D. Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation[J]. Atmos Environ, 1994, 28(4): 713-721.
- [30] 陈训来,冯业荣,范绍佳,等.离岸型背景风和海陆风对

- 珠江三角洲地区灰霾天气的影响[J].大气科学,2008,32(3):530-542.
- [31] 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.
- [32] 陈晓阳,冯旭,范绍佳,等.回流指数在空气质量变化研究中的应用[J].环境科学学报,2016,36(3):1032-1041.
- [33] 黄俊,廖碧婷,王春林,等.新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用[J].中国环境科学,2019,39(1):92-105.
- [34] 孙文奇,李昌义.数值模式中的大气边界层参数化方案综述[J].海洋气象学报,2018,38(3):11-19.
- [35] 王东祥,宋小全,冯长中,等.相干多普勒激光雷达观测渤海黄海海洋大气边界层高度研究[J].光学学报,2015,35(增刊):1-7.
- [36] 时晓曦,魏晓敏,毕玮,等.青岛混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J].山东气象,2016,36(4):1-6.
- [37] STULL R B.边界层气象学导论[M].杨长新,译.北京:气象出版社,1991.
- [38] 王玉国.辽东湾西岸海陆风特征研究[D].青岛:中国海洋大学,2004.