

边界层低空急流激光雷达观测及其对 PM_{2.5} 的影响傅一原¹, 宋小全^{1,2*}, 廉文超¹¹中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 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

摘要 大气边界层低空急流是一种重要的边界层物理过程,与污染传输、航空安全、风能开发利用等存在密切联系。基于多普勒测风激光雷达自 2020 年 9 月 21 日至 2021 年 5 月 8 日布设于辽宁葫芦岛市开展风场观测实验,使用激光雷达垂直风场观测资料对该区域大气边界层低空急流展开观测研究,并结合 ERA5 再分析资料与环境监测站 PM_{2.5} 质量浓度数据分析。研究时段内,低空急流出现频率为 0.11,平均急流风速为 13.2 m·s⁻¹,急流风向主要集中在东北向与西南向,急流高度主要在 500 m 以下,在 200~300 m 频率最高;低空急流风向在冬季与春季存在明显差异,冬季主要集中在东北向,春季主要集中在西南向。分析表明,该区域边界层低空急流的风向主要受到大尺度天气环流背景以及海岸线走势的影响;在沿海区域,海陆热力性质差异引起的温度梯度会根据不同背景风场为急流形成提供有利或不利条件,进而影响不同风向情况下的急流发生频率。夜间边界层低空急流通过增强近地层大气垂直扩散能力,加速 PM_{2.5} 质量浓度的降低或削弱其增长速度。

关键词 大气光学;多普勒激光雷达;大气边界层;低空急流;PM_{2.5}质量浓度

中图分类号 P412.25;P425.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222098

1 引言

低空急流(LLJ)是水平风速在大气垂直剖面上出现极大值的现象,其中发生在大气边界层内的低空急流被称为边界层低空急流,是一种重要的大气边界层物理过程,对近地层大气与地面之间的相互作用有着重要的影响^[1]。低空急流在垂直结构上的特点,使其常出现在暴雨等强对流天气^[2-3]、航空安全^[4]、污染物输送^[5-6]、风能开发利用^[7]等研究工作中。

低空急流的观测依赖于垂直风场的有效探测,主要探测手段包括无线电探空仪、风廓线雷达、多普勒激光雷达。Farquharson等^[8]在非洲热带区域的探空风场观测数据资料中观察到水平风速垂直廓线上出现极大值的现象。Blackadar^[9]在对夜间低空急流的频率进行统计研究后,提出惯性振荡是夜间低空急流的主要成因。Holton^[10]在惯性振荡的基础上指出,倾斜地形带来的热强迫作用对于边界层风日振荡具有重要的驱动作用。Bonner^[11]使用了美国地区 47 个观测站点两年的无线电探空测风数据,对低空急流的区域分布以及统计特征展开了分析,一定程度上验证了 Blackadar 的理论。相较于无线电探空仪,风廓线雷达具有连续观测能力,在研究低空急流的时间变化特征上具有明显

的优势。Song等^[12]通过 6 年的风廓线雷达观测数据,发现了低空急流发生频率存在着年际变化。Wu等^[13]利用风廓线雷达观测资料,研究了天津区域的低空急流统计特征,及其对该区域雾的影响。

多普勒激光雷达可以获取高时空分辨率的垂直风场信息^[14-15],相较于风廓线雷达,拥有更高的垂直分辨率以及更低的探测盲区,在观测低空急流的结构特征上具有明显的优势^[16-17]。Banta等^[18]使用激光雷达与 60 m 梯度塔观测数据对美国中部堪萨斯区域的低空急流现象进行了综合观测研究,包括低空急流的统计特征及其与近地层湍流之间的联系。Carroll等^[19]利用三台多普勒激光雷达对美国大平原区域低空急流进行了研究,发现强低空急流现象常与更高混合层深度的情况同时出现。Wagner等^[20]使用激光雷达与 WRF 模式对北海南部区域的低空急流进行了观测,发现海陆温差日变化引起的气压梯度与惯性振荡是该区域低空急流的主要成因。

边界层低空急流较强的水平风速以及较低的垂直高度,使其具备强水平运输能力并且伴有较强的水平风垂直切变。边界层急流对于污染物的水平运输作用具有两面性,降低主要排放区的污染程度,加剧非排放区域的污染程度^[21]。廖晓农等^[22]通过对一次污染迅速

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-02-07; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3700402)、国家自然科学基金(61775200)

通信作者: *songxq@ouc.edu.cn

消除的过程研究,发现急流的发展将导致平均湍流扩散作用增大、混合层升高,进而减轻污染。利用多普勒激光雷达的高垂直分辨率优势可以在观测低空急流垂直结构的同时,通过垂直风速的有效探测获取相应的湍流参数^[23-24],进而更好地分析低空急流对污染垂直扩散的影响。

在我国,对于低空急流的研究主要集中在与降雨相关的天气尺度低空急流上,而对于边界层低空急流的研究较少,由于观测资料相对缺乏,对边界层低空急流结构特征的研究工作相对较少^[25]。相干多普勒测风激光雷达布设于辽宁葫芦岛市觉华岛,自 2020 年 9 月至 2021 年 5 月获取连续高时空分辨率的垂直风场观测资料。觉华岛为距离陆地约 10 km 的渤海海岛,在海陆因素影响下低空急流特征鲜明,具有一定的研究意义。本文将基于多普勒测风激光雷达观测数据,结合 ERA5 再分析资料与环境监测站 PM_{2.5} 质量浓度数据,研究该区域边界层低空急流结构特征及其对 PM_{2.5} 质量浓度的影响。

2 数据与方法

2.1 多普勒激光雷达

实验观测设备为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,仪器参数如表 1 所示。观测场地位于辽宁省葫芦岛市觉华岛南侧(120.788°E, 40.482°N)。观测时间为 2020 年 9 月 21 日至 2021 年 5 月 8 日,文中时间均为北京时间(BJT=UTC+8)。

表 1 多普勒激光雷达参数表
Table 1 Parameters of coherent Doppler lidar

Parameter	Value
Wavelength / μm	1.5
Detection range / m	45-6000
Range resolution / m	15-30
Radial wind speed range / (m·s ⁻¹)	-37.5-37.5
Wind speed accuracy / (m·s ⁻¹)	0.1

实验期间激光雷达主要工作在多普勒波束扫描(DBS)模式下,仰角为 60°,距离向分辨率设置为 30 m,垂直距离分辨率约 26 m。综合考虑数据质量及观测模式,选取了 2020 年 11 月至 2021 年 5 月(共 183 天)的激光雷达观测的风场资料作为研究数据。选取的研究数据包括水平风速、水平风向、垂直风速标准差的垂直廓线资料,时间分辨率均为 10 min。观测起始时间到结束时间内总计应有 10 min 平均的风廓线 26359 条,实际有效观测记录风廓线 24550 条,有效探测率达 93%。较高的时间、垂直空间分辨率以及有效探测率为观测研究低空急流的垂直结构提供了有利条件。

2.2 ERA5 再分析资料与 PM_{2.5} 质量浓度数据

为分析大尺度天气形势以及海陆热力性质对低空急流的影响,使用 ERA5 再分析资料作为补充资料。文中使用的 ERA5 数据是由欧洲中期天气预报中心制作,由哥白尼气候数据中心与前者共同提供,可在 <https://cds.climate.copernicus.eu> 网站下载。选取的数据时段为 2020 年 11 月至 2021 年 5 月,逐小时数据。分析过程主要使用到两个子数据集^[26-27],包括 1000 hPa 温度与平均海平面气压,水平空间分辨率均为 0.25°×0.25°。

为分析低空急流现象对污染物浓度的影响,选取 PM_{2.5} 质量浓度作为代表。文中所使用的 PM_{2.5} 质量浓度数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台,该平台公布数据由全国各区域环境站实时监测得出。观测实验场所在地的葫芦岛市共有 4 个地面环境监测站:龙港区站(120.909°E, 40.7136°N)、化工街站(120.839°E, 40.751°N)、新区站(120.834°E, 40.707°N)、东城区站(120.870°E, 40.768°N),分别距离观测场地 27 km、30 km、25 km、28 km。为降低偶然因素的影响,葫芦岛市 PM_{2.5} 逐小时质量浓度数据由前述站点观测值平均计算所得。

2.3 低空急流判定标准

低空急流是风速廓线的特殊形式,目前对于低空急流的判别标准往往是根据研究目的、研究手段以及观测区域的环境特点来进行选取。常用的低空急流结构特征包括急流速度、急流高度以及急流风向,急流速度是水平风速垂直廓线上的风速极大值,急流高度是风速极大值所对应的高度,急流风向是风速极大值高度处的水平风向。Bonner^[11]在使用无线电探空数据资料时,对急流速度设置了分级阈值,并且要求急流速度与急流上方最小速度之间的差值要大于分级阈值的 50%,这一判定标准也被后续研究工作广泛沿用^[28]。Baas 等^[29]在使用风廓线雷达数据提取低空急流时,要求急流速度与急流上方最小速度之差至少大于等于 2 m·s⁻¹,并且大于等于急流速度的 20%,在一些使用多普勒激光雷达研究低空急流的工作中也选取了类似或相似的判断标准^[1, 20]。Wu 等^[13]使用风廓线雷达对天津地区的低空急流进行判别时,沿用 Bonner 的判别方法中 50% 的阈值条件,并对速度分级进一步细化调整。

随着低空急流观测手段的发展,所获取的风速廓线垂直分辨率以及时间分辨率都有了明显的提升,为垂直风场观测研究提供了更好的条件。但是由于垂直分辨率的提高,观测数据中更小尺度的边界层风场扰动也随之增多,单用阈值判断时会出现误判急流高度或者漏判的情况,这在一些研究工作中也可以看到^[19, 30-31]。因此,除前述的判别外, Tuononen 等^[32]对急流特征进行了更进一步的时间高度连续性判别。

综合考虑研究区域以及观测设备特点,参考文献 [13] 和 [29] 的急流判定标准,将本研究的急流判定条

件取为:1)风速极大值应大于等于 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 2)风速极大值与上方最小风速之差要大于等于风速极大值的 $1/2$ 。然而对于垂直分辨率相对较高的观测资料而言,一条风廓线经过判定可能会得到多个满足前述条件的水平风速极大值点。因此,参考 Tuononen 的连续性判别方法,进一步进行时间高度连续性判别:当一条风廓线存在至少一个满足急流判定条件的风速极大值时,就认定为急流风廓线。如果一条急流风廓线的前 1 h 内均无急流风廓线,则选取它的待定极大值点中高度最低的一处作为这条风廓线的急流高度。如果一条急流风廓线的前 1 h 内存在急流风廓线,则选取时间最接

近的急流风廓线的急流高度作为参考高度,选取最接近参考高度的待定极大值点高度作为这条风廓线的急流高度。

3 结果与分析

3.1 低空急流统计特征

使用 2.3 节中的急流判定标准,对观测时段内的风廓线进行了判别,得到如图 1 所示的急流时间分布图。图 1 中横轴代表日期,纵轴代表每日 144 条 10 min 平均廓线对应的时间,空白方格代表因现场供电中断等原因造成的数据缺失。

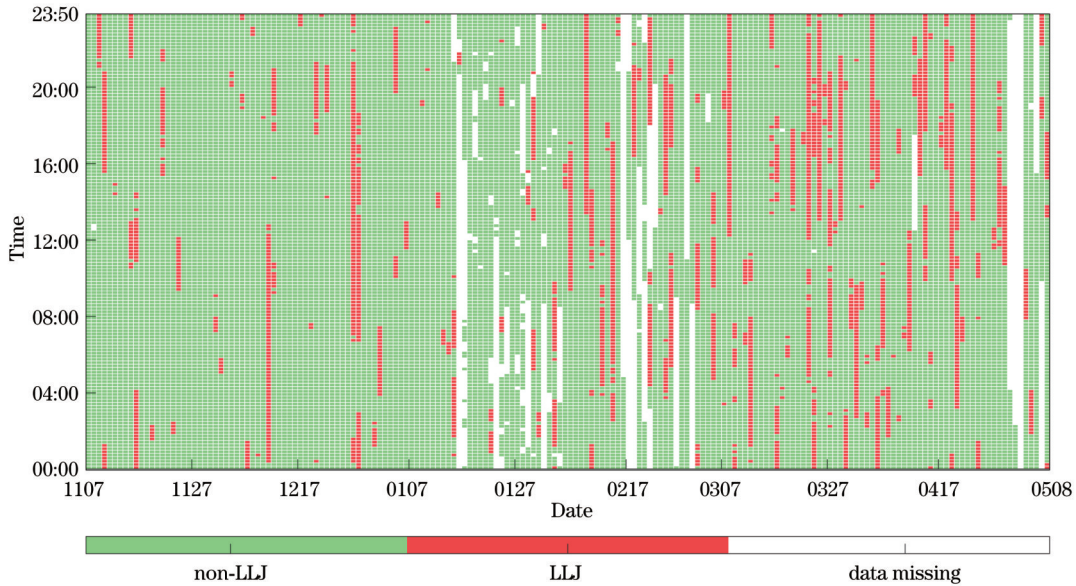


图 1 低空急流时间分布图
Fig. 1 Time distribution of LLJ

根据急流判别结果,可以得到如图 2 所示的不同月份急流频率变化图。急流频率 2020 年 11、12 月相较 2021 年 3、4 月明显偏低,在 1 月至 2 月存在明显升高趋势,变化趋势与 Wu 等^[13]于天津地区观测结果具有一定的相似性。

利用有效观测时段内总计 24550 条 10 min 平均风

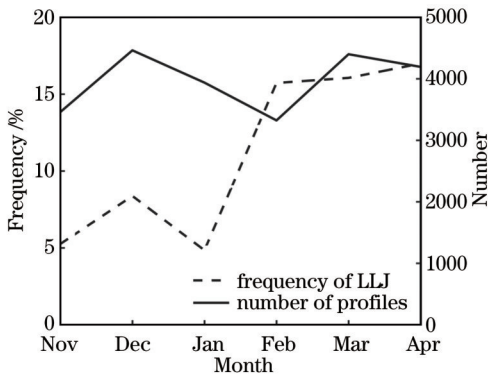


图 2 不同月份低空急流发生频率折线图
Fig. 2 Line chart of the frequency of LLJ in different months

廓线对该区域的边界层低空急流情况进行了统计,共有 2766 条风廓线判定为急流廓线,急流发生频率约为 0.11。图 3 为总体统计结果直方图:急流速度总体呈递减分布[图 3(a)];87% 的急流廓线的急流高度在 500 m 以下,急流高度在 200~300 m 之间存在峰值[图 3(b)];急流风向主要集中在东北向与西南向[图 3(c)];急流存在日变化特征,在 19 时至 20 时出现频率最高[图 3(d)]。

边界层低空急流通常存在显著的日变化特征,然而在图 3(d)中,急流发生频率的日变化并不明显。通过对两个主要急流风向下的急流廓线分型,并分别计算急流风速、急流高度及厚度[上下最大风速一半的高度差,图 4(b)、(e)中上下虚线的高度差]、急流发生频率的日变化折线,得到了图 4。如图 4(a)、(d)所示,急流风向处于西南象限的低空急流相较于急流风向处于东北象限的低空急流,其急流风速变化幅度更大。如图 4(b)、(e)所示,除 4 时之外,西南象限低空急流相较于东北象限低空急流,急流高度整体相对较低。如图 4(c)、(f)所示,东北象限的低空急流,其急流频率日变

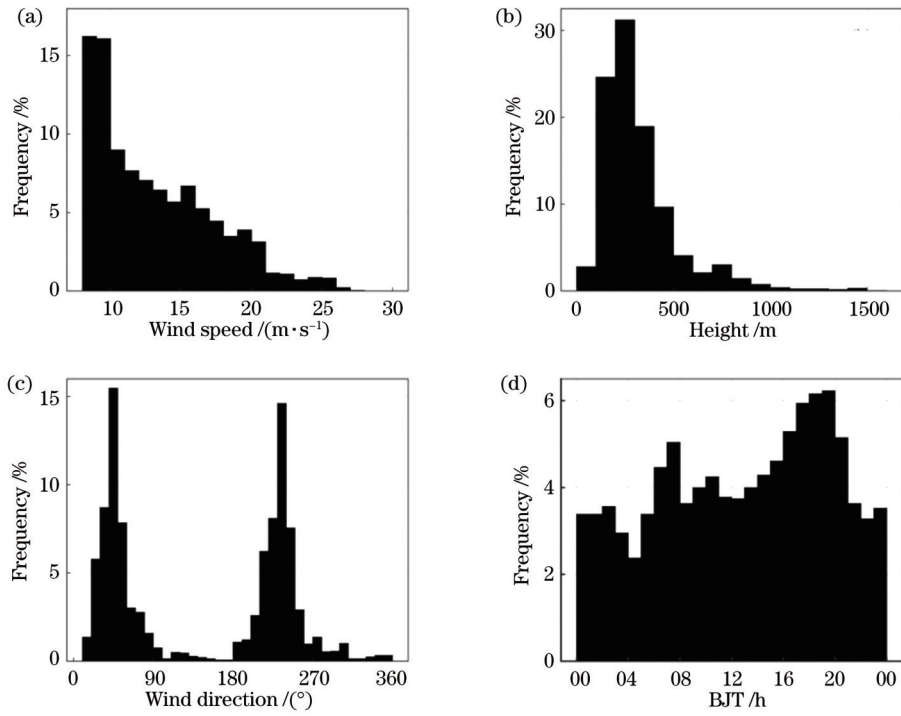


图 3 低空急流特征。(a)急流速度;(b)急流高度;(c)急流风向;(d)急流频率日变化

Fig. 3 LLJ characteristics. (a)LLJ wind speed; (b) LLJ height; (c) LLJ wind direction; (d) diurnal variation of LLJ frequency

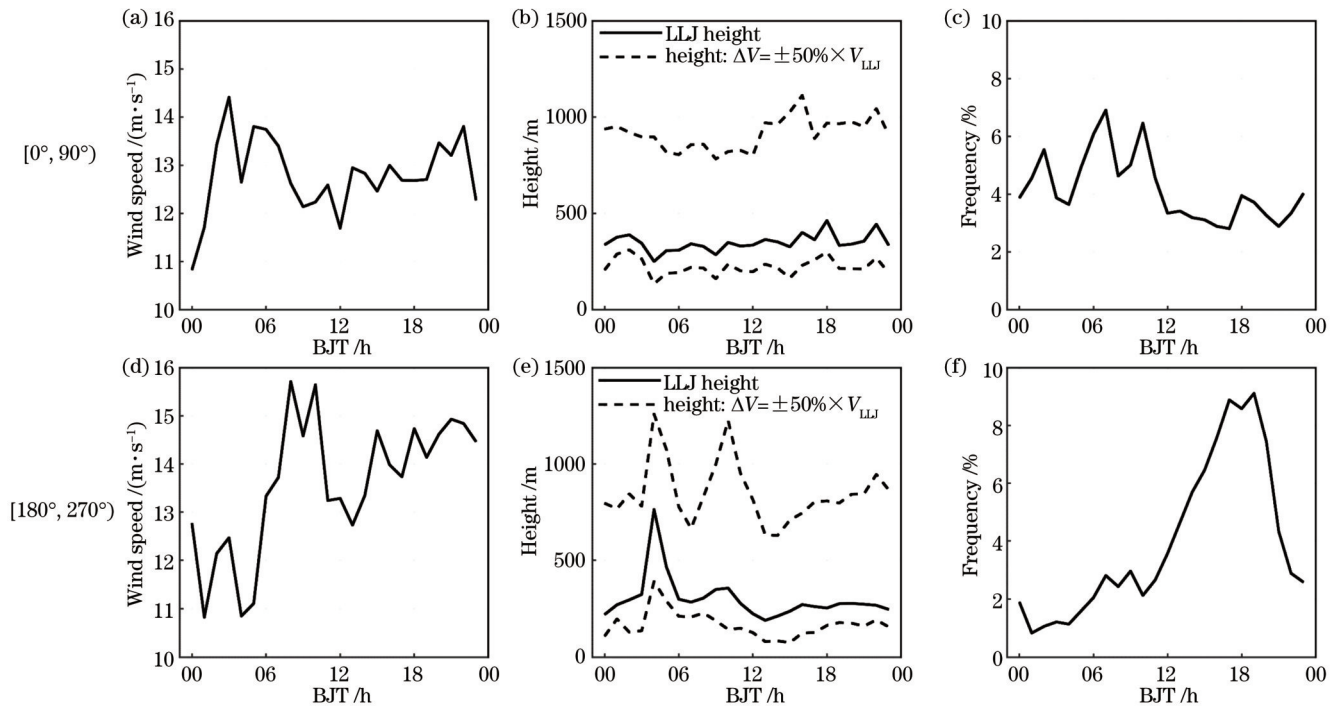


图 4 不同急流风向下的低空急流特征日变化折线图。(a)(d)急流风速;(b)(e)急流高度;(c)(f)急流频率

Fig. 4 Diurnal variation line chart of LLJ characteristics under different jet wind directions. (a) (d) LLJ wind speed; (b) (e) LLJ height; (c) (f) LLJ frequency

化不明显,而西南象限的低空急流,其急流频率日变化特征明显。

由于观测样本较好地涵盖了冬季(2020年12月、2021年1月、2月)以及春季(2021年3月、4月、5月),在此对冬季、春季的急流风向进行统计分析[图5(a)、

(b)],同时统计了两个季节所有风廓线259m处(急流高度的中位数)风向数据[图5(c)、(d)]。冬季急流主要集中在东北向,春季急流主要集中在西南向。在图5(c)中,冬季全时段内存在相当数量的西北风、西南风情况,与急流风向分布存在明显差异,将在3.2节中讨

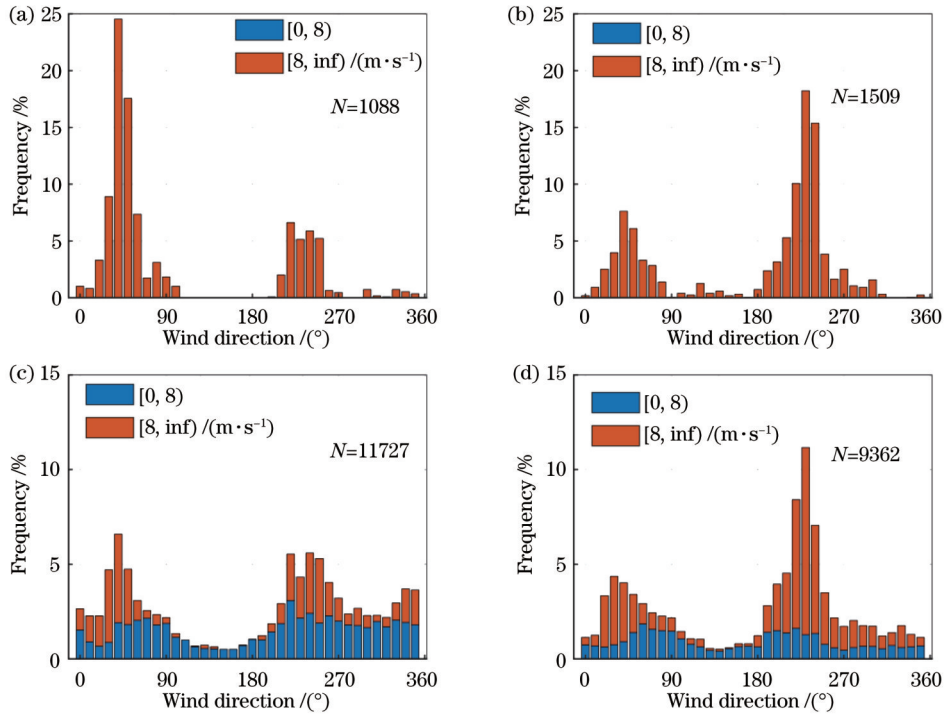


图 5 风向分布直方图。(a)冬季和(b)春季急流风廓线;(c)冬季和(d)春季所有风廓线

Fig. 5 Wind direction distribution histogram. (a) Winter and (b) spring of LLJ wind profiles; (c) winter and (d) spring of all wind profiles

论分析。在图 5(d)中,春季风向分布更集中,分布特征与急流情况较为相似。

3.2 急流风向特征分析

3.2.1 急流风向分布特征与天气背景形势关系

边界层低空急流风向的分布受天气背景形势的影响,图 6 为 ERA5 再分析资料中平均海平面气压的月平均结果,子图分别代表 6 个主要观测月份(2020 年 11 月至 2021 年 4 月)。如图 6 所示,图中加号表示观测场地的位置,在不同月份相对气压较高区域的位置和范围会发生变化,观测区域的背景风场也随之发生变化。在这 6 个月份中主要存在两类天气背景形势,第一类所在月份为 2020 年 11 月、12 月以及 2021 年 1 月、2 月,第二类所在月份为 2021 年 3 月、4 月。第一类天气背景形势,观测区域西北方向的海平面气压相对较高,第二类观测区域的东南侧的海平面气压相对较高。当相对高压区域出现在西北侧时,水平气压梯度从西北侧指向东、东南侧,在地转偏向力的作用下,观测区域风场更易出现北风、东北风。当相对高压区域出现在东南侧,水平气压梯度从东南侧指向北、西北侧,观测区域风场则更易出现西南风。

从图 6 可以看出,11 月至 4 月整体最高气压呈下降趋势。在观测区域所在网格(40°~42°N, 119°~121°E),2020 年 11 月至次年 4 月最大气压最小气压之差分别为 0.25 hPa、0.36 hPa、0.24 hPa、0.43 hPa、0.46 hPa、0.38 hPa,与图 2 中不同月份低空急流发生频率的相关系数达到了 0.9。这表明天气背景不仅通过大尺度环流作用影响着边界层急流风向分布,还可

以通过中尺度范围内较强的水平气压梯度为边界层急流的形成提供有利条件。

3.2.2 急流风向分布特征与海陆热力性质差异关系

从图 4 可以看到,冬季背景风场中包含相当数量的西北和西南象限的风,但是冬季的急流风向主要集中在东北象限,在这里对其展开讨论。考虑到观测区域临近海岸线大致呈西南东北走向,冬季西南与东北象限之间急流发生频率差异可能是海陆热力性质差异所致。

为了观察海陆热力性质差异引起的水平温度梯度分布对于边界层低空急流的影响,选用了 ERA5 数据中 1000 hPa 温度数据代表近地层水平温度梯度的分布特征。在观测场地西北侧陆地区域选取(120.25°E, 41°N)作为陆地点,在观测场地东南侧海洋区域选取(121.25°E, 40°N)作为海洋点,观测点接近二者的连线中点。对冬季两处地点 1000 hPa 的温度差异进行了分月小时平均统计,结果如图 7 所示。结果显示,在冬季夜间以及日间大部分情况下,海洋上空近地层温度要高于陆地上空近地层温度。水平温度梯度的存在使得离岸风(西北风)产生,并在地转偏向力的作用下发生偏转,转至东北方向。如果此时背景风场也处于北向或东北方向,就会为急流的形成提供有利条件。如果背景风场处于西南方向,此时温度梯度的存在就会对急流的形成起到抑制作用。所以在冬季即便有相当数量西南象限的背景风情况,其形成急流的比例也明显低于背景风来自东北象限的情况。

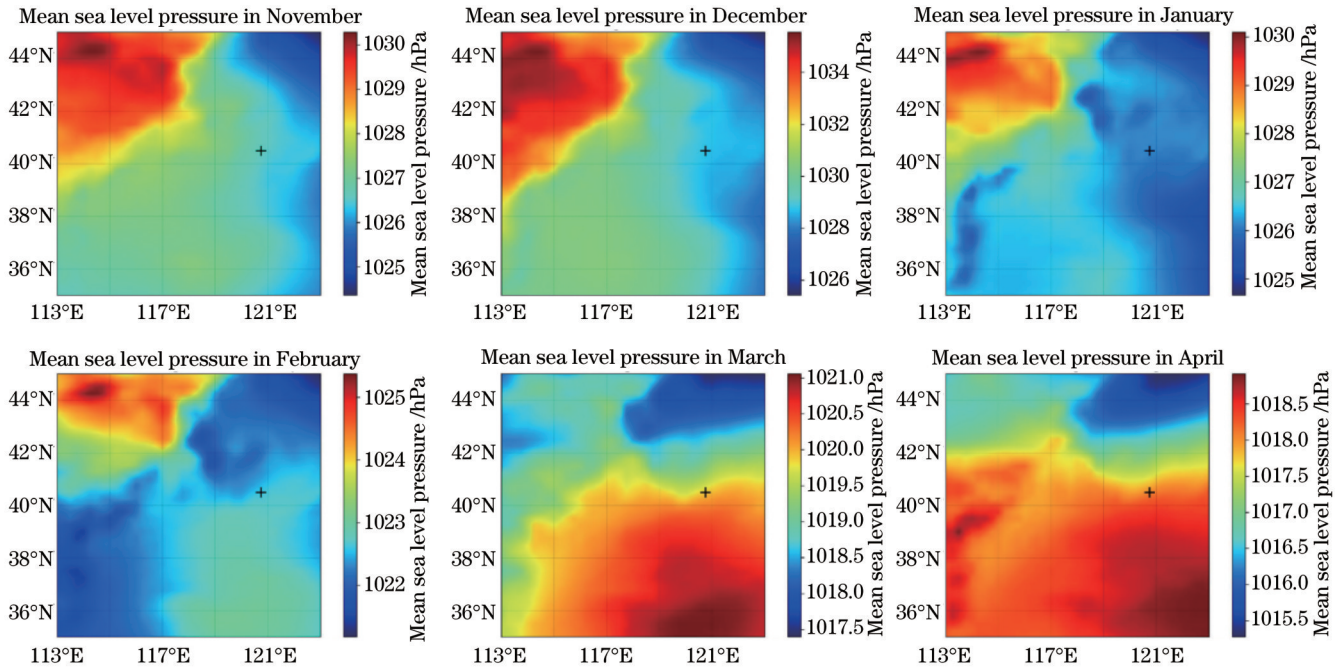


图 6 ERA5 平均海平面气压月平均结果图 (2020 年 11 月至 2021 年 4 月)

Fig. 6 Monthly average results of the ERA5 mean sea level pressure (November 2020 to April 2021)

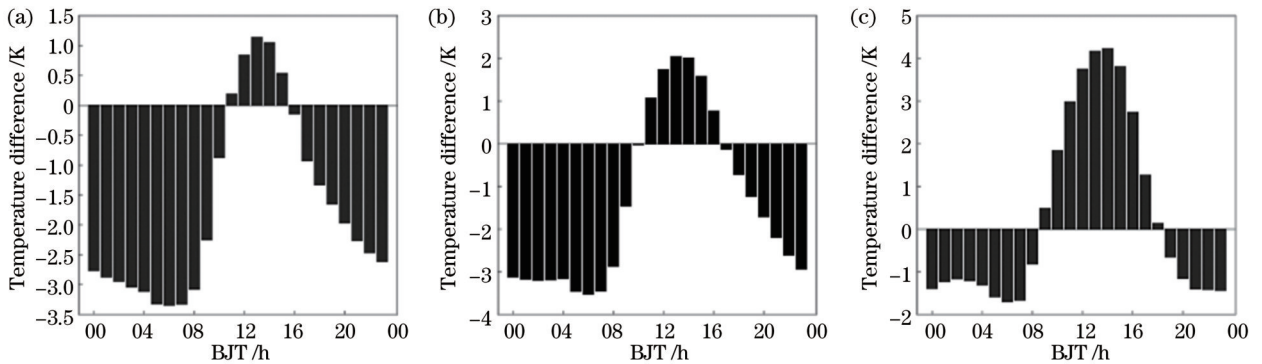


图 7 冬季 1000 hPa 陆海温差日变化统计直方图。(a)2020 年 12 月;(b)2021 年 1 月;(c)2021 年 2 月

Fig. 7 Statistics histograms of daily variation of 1000 hPa land-sea temperature difference in winter. (a) December 2020; (b) January 2021; (c) February 2021

在这里,定义:当陆地点气压高于海洋点气压时,对于风向为东北象限的情况为有利气压条件;当陆地点气压低于海洋点气压时,对于风向为西南象限的情况为有利气压条件。当气压处于有利条件时,若温度梯度有利于气压梯度的进一步增强,则为温度梯度有利条件。当陆地点温度低于海洋点温度时,有利于陆海气压梯度进一步增大,对于风向为东北象限的情况为温度梯度有利条件。与之类似,当陆地点温度高于海洋点温度,对于风向为西南象限的情况为温度梯度有利条件。对判定为低空急流情况的风廓线取急流风向作为划分风向,对非低空急流情况下的风廓线取急流中位高度(259 m)处水平风向划分。由此,可以对冬季有效观测时段内的风廓线水平气压与温度梯度有利条件进行判别,按照不同风向、急流与非急流情况划

分得到了表 2。

从表 2 可以看出:在冬季无论是急流情况还是非急流情况,海平面气压的分布都更有利于东北象限的风速增长;对于气压与温度梯度同时处于有利条件的风廓线比例,东北象限要明显高于西南象限。对于气压条件有利却未形成 LLJ 的情况,温度梯度不利于急流形成的比例可以通过表 2 中的数值计算得出(1-气压有利且温度梯度有利的比例)。对于东北象限,不利于急流形成的温度梯度情况所占比例约为 16.6%,而对于西南象限约为 63.3%。综上可知,海陆热力性质差异导致的水平温度梯度是沿海区域边界层低空急流重要影响因素之一,并且在不同风向情况下,为急流形成提供有利或不利条件,进而影响边界层急流风向分布特征。

表 2 不同风向急流/非急流情况下气压/温度梯度有利条件统计表

Table 2 Statistical table of favorable conditions for barometric pressure/temperature gradients under different wind direction LLJ/non-LLJ conditions

Condition	Number of qualified wind profiles/number of selected wind profiles			
	LLJ	Non-LLJ	LLJ	Non-LLJ
Favorable barometric conditions	630/752 (83.8%)	1739/2907 (59.8%)	98/285 (34.4%)	1831/3586 (51.1%)
Favorable barometric conditions and temperature conditions	555/630 (88.1%)	1450/1739 (83.4%)	30/98 (30.6%)	672/1831 (36.7%)

3.3 边界层低空急流对 PM_{2.5} 质量浓度影响

选取 2020 年 12 月 11 日的多普勒激光雷达观测结果进行个例分析,根据 2.2 节中提到的急流判定条件,该日 0 时至 12 时左右为低空急流时段,与目视判别的结果基本一致。图 8(a)~(c)分别为该次急流过程中多普勒激光雷达观测的水平风速、水平风向以及垂直风速标准差结果,横轴表示时间变化,纵轴表示高度变化。从图 8(a)可以看到,急流形成初期 500 m 高度内水平风速呈逐渐升高趋势,3 时 250 m 高度处风速达到 15 m·s⁻¹。7 时左右,急流逐渐减弱抬升并于 12 时左右基本消失。从图 8(b)可以看到,急流持续时间、高度范围内风向基本以东北向为主,并逐渐呈顺时针偏转。急流发生的主要时段内,200 m 高度下垂直风速标准差值与日间混合层发展阶段的值较为接近[图 8(c)],

表明大气垂直扩散能力得到了增强。

图 8(d)为 PM_{2.5} 质量浓度时序曲线图,实线是 12 月 11 日的 PM_{2.5} 质量浓度值,虚线为 12 月 PM_{2.5} 质量浓度分时月平均值。葫芦岛市 12 月份为冬季,混合层发展时间主要在 8 时至 16 时,在日间人为活动排放与混合层高度变化共同作用下,PM_{2.5} 质量浓度呈双峰双谷。12 月 11 日 0 时至 4 时,PM_{2.5} 质量浓度迅速下降(下降速度明显超过当月平均结果),并基本维持在 20 μg·m⁻³ 直至 17 时,PM_{2.5} 质量浓度日间峰值受到明显抑制。当急流发生在混合层发展之前,受到急流下方强水平风垂直切变影响,大气垂直扩散能力增强,大气环境容量增大。由于夜间 PM_{2.5} 沉降以及生产生活排放量降低,大气上空空气相对清洁,大气扩散能力增强在此时起到加快近地层 PM_{2.5} 质量浓度降低速度的作用。

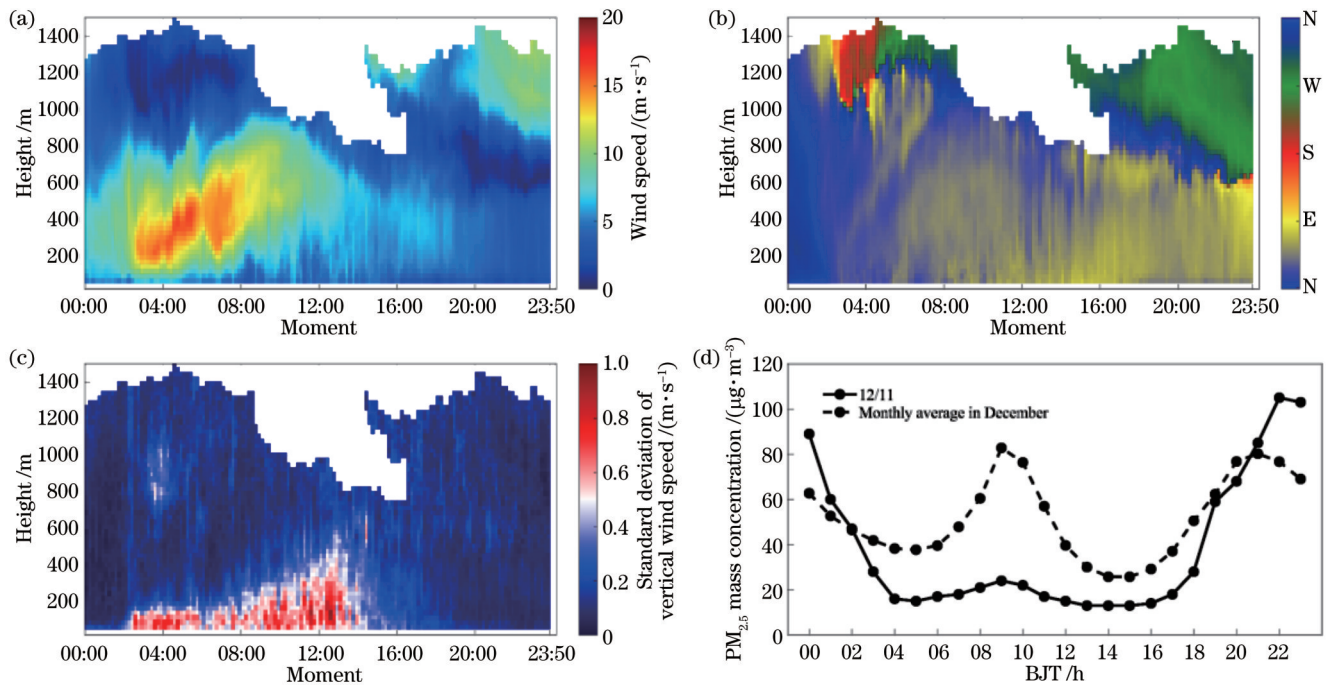


图 8 低空急流过程观测结果(2020 年 12 月 11 日)。(a)水平风速;(b)水平风向;(c)垂直风速标准差;(d) PM_{2.5} 质量浓度时序图
Fig. 8 Observation results of LLJ process (December 11st, 2020). (a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction; (c) vertical wind speed standard deviation; (d) PM_{2.5} mass concentration time sequence diagram

为排除日间边界层发展的对大气扩散能力的影响,选取 0 时至 6 时、18 时至 23 时的低空急流情况下激光雷达观测结果与 PM_{2.5} 质量浓度数据来分析。此处

使用的垂直风速标准差由急流中位高度(259 m)下的 9 个距离库的观测值平均所得,时间尺度为 1 h。图 9 为选取时段内低空急流情况下 PM_{2.5} 质量浓度变化散

点图,横轴为当前急流时刻 $PM_{2.5}$ 质量浓度值,纵轴为下一时刻与当前时刻 $PM_{2.5}$ 质量浓度差值,圆圈的标记

面积(单位:平方磅,1 磅=453.59237 g)为激光雷达测得垂直风速标准差的 100 倍。

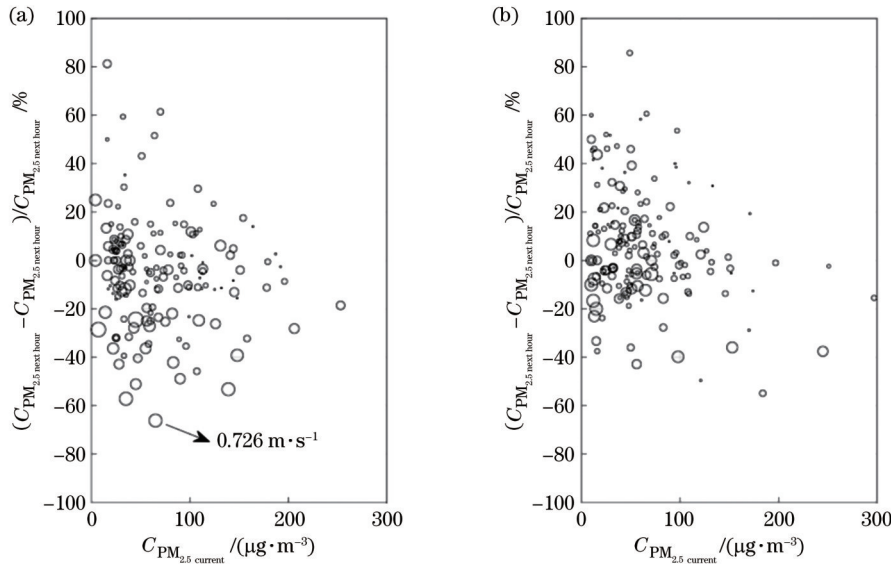


图 9 低空急流情况下 $PM_{2.5}$ 质量浓度相对变化散点图。(a) 00 时至 06 时;(b) 18 时至 23 时

Fig. 9 Scatter chart of $PM_{2.5}$ mass concentration relative change during LLJ. (a) 00:00-06:00; (b) 18:00-23:00

在图 9 中存在相当数量的点落在当前质量浓度低于 $50 \mu g \cdot m^{-3}$,且在 $\pm 20\%$ 范围内变化,这是由于当污染物浓度本身较低时,垂直扩散增强所引起的 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化效果也同样减弱。在图 9(a)中,可以看到沿纵轴负方向圆圈大小相对较大,说明垂直扩散能力增强有利于 $PM_{2.5}$ 浓度的降低。然而在图 9(b)18 时至 23 时,由于该时段处于该区域 $PM_{2.5}$ 显著增长阶段,前述情况明显减少,此时垂直扩散能力的增强起到降低 $PM_{2.5}$ 增长速度的作用。综上可知,当夜间边界层低空急流发生时,通过增强近地层大气垂直扩散能力,可以加速 $PM_{2.5}$ 浓度的降低或削弱其增长速度。

4 结 论

本文利用相干多普勒测风激光雷达长期垂直风场观测资料,对辽宁省葫芦岛市觉华岛大气边界层低空急流进行了观测研究。在有效观测的 24550 条风廓线中,共有 2766 条风廓线被判定为低空急流风廓线,急流发生频率为 0.11。研究时段内,平均急流风速为 $13.2 m \cdot s^{-1}$,急流风向主要为东北向与西南向,87.1% 急流高度在 500 m 以下。低空急流风向在冬季与春季存在明显差异,冬季低空急流风向主要集中在东北向,春季低空急流主要集中在西南向。

结合多普勒激光雷达观测结果与 ERA5 再分析资料得到结论如下:辽宁省葫芦岛市觉华岛地处中纬度沿海区域,海岸线呈西南东北走向,该区域的边界层低空急流具有明显的季节性变化特征,其急流风向主要受到大尺度天气形势季节特性以及海岸线走势的影响,具有明显的地域特征。对于沿海区域,海陆热力性

质差异引起的温度梯度会根据不同背景风场为急流形成提供有利或不利条件,进而影响急流风向分布。当边界层低空急流发生在非混合层发展阶段时,可以通过增强近地层大气垂直扩散能力,加速 $PM_{2.5}$ 质量浓度的降低或削弱其增长速度。该研究结果、结论对后续相似区域进行边界层低空急流观测以及空气污染研究具有一定的参考意义。我国海岸线漫长,沿海地区地形复杂,目前的单站观测远无法囊括其特征。并且,边界层低空急流的水平分布特征及其对污染水平输送的影响仍需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Marke T, Crewell S, Schemann V, et al. Long-term observations and high-resolution modeling of midlatitude nocturnal boundary layer processes connected to low-level jets [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2018, 57 (5): 1155-1170.
- [2] Fu S M, Tang H, Li Y, et al. On the relationship of a low-level jet and the formation of a heavy-rainfall-producing mesoscale vortex over the Yangtze River basin[J]. Atmosphere, 2021, 12 (2): 156-170.
- [3] 田莹, 叶成志, 姚蓉. 2008—2018 年江南暖区暴雨特征[J]. 大气科学学报, 2022, 45(1): 51-64.
Tian Y, Ye C Z, Yao R. Statistical analysis of the characteristics of warm-sector rainstorms in the southern part of the Yangtze River during the period of 2008—2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(1): 51-64.
- [4] 李健, 栗敬仁, 田军. 利用风廓线雷达研究郑州机场低空急流特征及其对飞行的影响[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 343-352.
Li J, Li J R, Tian J. Study on the characteristics of low-level jet and its impact on flights at Zhengzhou Airport based on wind profiler radar data[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35 (3): 343-352.
- [5] Zhu X W, Ma Z Q, Li Z M, et al. Impacts of meteorological

- conditions on nocturnal surface ozone enhancement during the summertime in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 225: 117368.
- [6] Udina M, Soler M R, Olid M, et al. Pollutant vertical mixing in the nocturnal boundary layer enhanced by density currents and low-level jets: two representative case studies[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2020, 174(2): 203-230.
- [7] 杨从新, 罗颂, 李寿图, 等. 低空急流结构变化对水平轴风力机气动性能的影响[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 107-113.
Yang C X, Luo S, Li S T, et al. Effects of different low-level jet structures on aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(5): 107-113.
- [8] Farquharson J S. The diurnal variation of wind over tropical Africa[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1939, 65(280): 165-184.
- [9] Blackadar A K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1957, 38(5): 283-290.
- [10] Holton J R. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain[J]. *Tellus*, 1967, 19(2): 200-205.
- [11] Bonner W D. Climatology of the low level jet[J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(12): 833-850.
- [12] Song J, Liao K, Coulter R L, et al. Climatology of the low-level jet at the southern great Plains atmospheric boundary layer experiments site[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(10): 1593-1606.
- [13] Wu B G, Li Z F, Ju T T, et al. Characteristics of Low-level jets during 2015-2016 and the effect on fog in Tianjin[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 245: 105102.
- [14] 宋小全, 龙文睿, 云龙, 等. 多普勒激光雷达多波束测风精度及获取率分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1001001.
Song X Q, Long W R, Yun L, et al. Analysis of accuracy and acquisition rate of Doppler lidar multi-beam wind measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001001.
- [15] 王筱晔, 吴松华, 刘晓英, 等. 基于相干多普勒激光雷达的飞机尾涡观测[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0901001.
Wang X Y, Wu S H, Liu X Y, et al. Observation of aircraft wake vortex based on coherent Doppler lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0901001.
- [16] 黎倩, 郑佳锋, 朱克云, 等. 基于激光测风雷达的低空急流结构特征研究[J]. *激光技术*, 2020, 44(5): 557-562.
Li Q, Zheng J F, Zhu K Y, et al. Structural characteristics of low-level jet based on wind lidar[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 557-562.
- [17] 马秋杰, 李珍妮, 宋小全, 等. 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(4): 61-67.
Ma Q J, Li Z N, Song X Q, et al. Observational study of low-level jet based on Doppler wind lidar[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2019, 39(4): 61-67.
- [18] Banta R M, Newsom R K, Lundquist J K, et al. Nocturnal low-level jet characteristics over Kansas during cases-99[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(2): 221-252.
- [19] Carroll B J, Demoz B B, Delgado R. An overview of low-level jet winds and corresponding mixed layer depths during PECAN[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 9141-9160.
- [20] Wagner D, Steinfeld G, Witha B, et al. Low level jets over the southern north sea[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2019, 28(5): 389-415.
- [21] 肖之盛, 孟凡, 徐峻, 等. 低空急流理论及其对空气污染物传输影响研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(2): 111-118.
Xiao Z S, Meng F, Xu J, et al. Research advances in Low-Level Jets theory and their impact on air pollutant transmission[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(2): 111-118.
- [22] 廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 等. 边界层低空急流导致北京 PM_{2.5} 迅速下降及其形成机制的个案分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 51-59.
Liao X N, Sun Z B, He N, et al. A case study on the rapid cleaned away of PM_{2.5} pollution in Beijing related with BL jet and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 51-59.
- [23] 刘佳鑫, 云龙, 邵士勇, 等. 深圳地区多普勒测风激光雷达的湍流观测[J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(5): 383-391.
Liu J X, Yun L, Shao S Y, et al. Observation of turbulence using Doppler wind lidar in Shenzhen[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(5): 383-391.
- [24] 靳翔, 宋小全, 刘佳鑫, 等. 基于多普勒激光雷达的边界层内湍流参数估算[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110001.
Jin X, Song X Q, Liu J X, et al. Estimation of turbulence parameters in atmospheric boundary layer based on Doppler lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110001.
- [25] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 2014, 72(2): 191-206.
Liu H B, He M Y, Wang B, et al. Advances in low-level jet research and future prospects[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(2): 191-206.
- [26] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present [EB/OL]. (2018-06-14) [2022-03-09]. <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.
- [27] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present [EB/OL]. (2018-06-14) [2022-03-09]. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- [28] Allen C J T, Washington R. The low-level jet dust emission mechanism in the central Sahara: observations from Bordj-Badji Mokhtar during the June 2011 Fennec Intensive Observation Period[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(6): 2990-3015.
- [29] Baas P, Bosveld F C, Klein Baltink H, et al. A climatology of nocturnal low-level jets at cabauw[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(8): 1627-1642.
- [30] Banta R, Mahrt L, Vickers D, et al. The very stable boundary layer on nights with weak low-level jets[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(9): 3068-3090.
- [31] Banta R M, Pichugina Y L, Newsom R K. Relationship between low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(20): 2549-2555.
- [32] Tuononen M, O'Connor E J, Sinclair V A, et al. Low-level jets over Utö, Finland, based on Doppler lidar observations[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(9): 2577-2594.

Lidar Observations of Boundary Layer Low-Level Jet and Its Effect on $PM_{2.5}$

Fu Yiyuan¹, Song Xiaoquan^{1,2*}, Lian Wenchao¹

¹College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

²Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, Shandong, China

Abstract

Objective Low-level jet (LLJ) is a phenomenon where the horizontal wind speed appears to be extreme in the vertical profile. When the extreme value is within the atmospheric boundary layer, it is called boundary layer LLJ. The characteristics of LLJ in the vertical structure make it often appear in the research on heavy convective weather such as heavy rainfall, aviation safety, pollutant transport, and wind energy development and utilization. Main observation instruments for LLJ and vertical wind fields include radiosonde, wind profile radar, and Doppler wind lidar. Doppler lidar can obtain vertical wind field information with a high spatial and temporal resolution. Additionally, its higher vertical resolution and lower detection blind area give itself an obvious advantage in observing the structural features of LLJ. The higher detection accuracy of vertical wind speed enables us to better find the change of atmospheric vertical diffusion ability in the LLJ process, which is also a key mechanism of the impact of LLJ on pollutant concentration. In China, the LLJ research is mainly focused on weather-scale LLJ related to rainfall, while less research is on boundary layer LLJ. Due to the lack of observation data, the studies on structural characteristics of LLJ are rare. Juehua Island, an island about 10 km offshore in the Bohai Sea, has a distinctive LLJ structure due to the influence of land and sea, which makes our study meaningful.

Methods The coherent Doppler wind lidar is operated in Juehua Island, Huludao City, Liaoning Province from September 21st, 2020 to May 8th, 2021. The vertical wind field lidar data is employed to find the atmospheric boundary layer LLJ in this area. Statistical characteristics are analyzed by combining the mean sea level pressure and 1000 hPa temperature data provided by the ERA5 reanalysis model. Combined with the $PM_{2.5}$ mass concentrations of Huludao City, the impact of LLJ on the change in $PM_{2.5}$ mass concentrations is analyzed. In previous studies, the criteria for LLJ are often selected according to the research purposes, instruments, and environmental characteristics of the observation area. Referring to Wu and Bass, our criteria for judging the LLJ are as follows. The extreme value of wind speed should be greater than or equal to $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The difference between the extreme wind speed and the minimum wind speed at higher altitudes shall be greater than or equal to half of the maximum wind speed.

Results and Discussions Among effectively observed 24550 wind profiles, 2766 wind profiles are determined as LLJ wind profiles. During the observation period, the occurrence frequency of LLJ is 0.11, with obvious monthly changes (Fig. 2). The average jet wind speed is $13.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and the wind directions of the jets are mainly concentrated in the northeast and southwest. Statistically, the jet height is mainly below 500 m, and the height of maximum frequency is between 200 m and 300 m (Fig. 3). The mean sea level pressure of ERA5 reanalysis data shows that the observation area is mainly affected by two types of weather background situations during the study period, which is one reason why the LLJ is concentrated in the southwest and northeast (Fig. 6). Correlation analysis indicates that strong horizontal pressure gradient provides favorable conditions for LLJ formation in the boundary layer. In winter, the wind direction distribution of LLJ is different from that of the background wind field (Fig. 5). Because the land temperature is lower than the ocean temperature at most time in winter (Fig. 7), the temperature gradient can enhance the horizontal pressure gradient difference between the northwest and southeast, which is conducive to the formation of the northeast jet and plays a role in hindering the formation of the southwest jet (Table 2). Doppler wind lidar could catch the process of the atmospheric boundary layer LLJ from formation to extinction. Through the standard deviation of vertical wind speed provided by the lidar and $PM_{2.5}$ mass concentration data of Huludao City, LLJ has accelerated the reduction of $PM_{2.5}$ mass concentration by enhancing the vertical diffusion ability of the near-surface atmosphere (Fig. 8). The relative change of $PM_{2.5}$ mass concentration at the time of LLJ is shown in Fig. 9, and the size of the circle in the figure is determined by the standard deviation of vertical wind speed.

Conclusions Huludao City is located in the mid-latitude coastal area, with the coastline trending southwest-northeast.

The atmospheric boundary layer LLJ in this region has obvious seasonal characteristics. Its wind direction is mainly affected by the seasonal characteristics of the large-scale weather situations and the trend of the coastline, with obvious regional characteristics. For coastal areas, differences between the thermal properties of land and sea will provide favorable or unfavorable conditions for LLJ formation in different background wind fields, thus affecting the LLJ distribution under different wind directions. When the LLJ occurs at night, the decrease in $PM_{2.5}$ mass concentration can be accelerated or its growth rate can be weakened by enhancing the vertical diffusion ability of the near-surface atmosphere. The conclusions are of certain reference significance for subsequent LLJ observation in the boundary layer and the study on air pollution in similar areas. The coastline of China is extensive with complex topography of coastal areas, and the current single-station observation is far from covering LLJ's characteristics. Additionally, the relationship between the horizontal distribution characteristics of the LLJ in the boundary layer and the coastal tomography needs further exploration.

Key words atmospheric optics; Doppler lidar; atmospheric boundary layer; low-level jet; $PM_{2.5}$ mass concentration