

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 Qiujie, LI Zhenni, SONG Xiaoquan, et al. Observational study of low-level jet based on Doppler wind lidar[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(4): 61-67. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.007. (in Chinese)

## 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究

马秋杰<sup>1</sup>,李珍妮<sup>1</sup>,宋小全<sup>1,2</sup>,吴松华<sup>1,2</sup>,李荣忠<sup>3</sup>,涂爱琴<sup>4</sup>

(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. 青岛镭测创芯科技有限公司,山东 青岛 266101;4. 山东省气象局大气探测技术保障中心,山东 济南 250031)

**摘要:** 基于相干多普勒测风激光雷达于2018年8月在山东德州获取的为期一个月的风廓线观测数据,进行了低空急流的判定、识别与统计分析。参考BONNER对低空急流的判定标准,对1500 m高度以下的每10 min平均风廓线数据进行低空急流识别与统计,急流发生频率仅为3.6%。参考张世丰对低空急流的判定标准,统计了350 m高度以下10 min平均风廓线的低空急流风速、高度、风向及风切变等结构特征。急流发生频率为24.9%,急流速度主要介于6~10 m·s<sup>-1</sup>之间,急流高度出现3个峰值,分别位于110 m、160 m和220 m左右,急流风向主要为偏东风和偏南风。结果表明,多普勒激光雷达可以获取高时空分辨率的风廓线数据,进而可以有效检测低空急流结构的存在及其特征。

**关键词:** 低空急流;多普勒激光雷达;风廓线;大气边界层

**中图分类号:** P412.25;P412.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)04-0061-07

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.007

## Observational study of low-level jet based on Doppler wind lidar

MA Qiujie<sup>1</sup>, LI Zhenni<sup>1</sup>, SONG Xiaoquan<sup>1,2</sup>, WU Songhua<sup>1,2</sup>, LI Rongzhong<sup>3</sup>, TU Aiqin<sup>4</sup>

(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. Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, China; 4. Atmospheric Sounding and Technical Support Center of Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China)

**Abstract** Based on the wind field observations with the coherent Doppler wind lidar in August 2018 in Dezhou, Shandong, low-level jets (LLJs) are judged, identified, and statistically analyzed. The LLJ identification and statistics are conducted using 10-min averaged wind profile data below 1500 m based on BONNER's criteria for judging LLJ and the frequency of LLJ is 3.6%. With reference to ZHANG Shifeng's criteria for judging LLJ, the speed, height, direction, and shear of LLJ are calculated using 10-min averaged wind profile below 350 m and the occurrence frequency reaches 24.9%. The jet speed is mainly between 6 and 10 m·s<sup>-1</sup> and wind directions are mainly easterly and southerly. There are three peaks of jet height, which are located at about 110 m, 160 m and 220 m. It shows that Doppler wind lidar can effectively get wind profile data of high spatial resolution and thus detect the existence and

收稿日期:2019-08-05; 修订日期:2019-11-11

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(41375016,41471309)

作者简介:马秋杰,女,硕士研究生,主要从事大气测量和激光探测研究,mqj@stu.ouc.edu.cn。

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。

characteristics of LLJ.

**Key words** low-level jet; Doppler lidar; wind profile; atmospheric boundary layer

## 引言

低空急流(low-level jet, LLJ)是一层离地数百米高度上快速流动的空气薄层,其最大风速为  $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [1]。天气学中,我国气象学者将低空急流定义为出现在 600 hPa 以下的强而窄的气流,其风速最大值可达  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,在 850 hPa 或 700 hPa 低空急流最明显 [2-3]。由于低空急流出现的高度、范围、风速强度以及水平和垂直切变均有一定差异,不同的研究者用不同的判据来确定低空急流 [1]。

低空急流的研究最早开始于 20 世纪 30 年代末,GOUALT [4] 和 FARQUHARSON [5] 在对北非地区风场的分析中发现并描述了低空急流的存在。20 世纪 50 年代,BLACKADAR [6] 首次提出低空急流形成的惯性震荡机制,此后各国学者进行了大量的低空急流研究工作。由于低空急流与暴雨等强对流天气 [7-10]、航空安全 [11]、火箭和导弹发射的准确性 [12]、风能 [13]、空气污染物的输送和扩散 [14-15]、森林火灾的蔓延等有密切联系,有关低空急流的时空结构 [16]、形成机制 [6] 以及与强降水等天气相互作用的研究已成为近年来国内外研究的热点之一 [17]。

系留气球、无线电探空和风廓线雷达是对低空急流观测最常用的手段。李炬和舒文军 [18] 利用 3 年夏季系留气球探测结果,分析了北京夏季夜间低空急流的一般特征。张文龙等 [19] 对 89 个探空站每日 2 次的探空资料进行了处理分析,揭示了中国西南低空急流和低层大风的气候学和天气学特征差异。陈楠等 [20] 利用风廓线雷达资料对南京地区低空急流的日变化、月变化、急流中心特征以及伴随的天气情况等多方面进行了统计分析和对比研究。但这些探测手段也存在一些缺点,系留气球受风速和降水的影响较大,当风速介于  $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  或出现降水时仪器便不能正常使用。一般的无线电探空每日只有两次(0000 UTC 和 1200 UTC),难以捕捉到低空急流的连续演变过程和日变化特征。风廓线雷达在低空二三百米存在探测盲区,时空分辨率相对较低。相比较而言,多普勒测风激光雷达除在极端恶劣天气及有云时探测性能降低外,能够提供高分辨率、精细化的三维风场测风数据,可直观地显示低空急流的风速强度、急流轴高度和持续时

间等信息,因此可以有效地探测低空急流的连续变化特征。

大气边界层与人类活动关系密切,边界层内的物质和水汽输送对云和降水的形成,污染物的扩散以及大气化学变化都有着非常重要的作用 [21]。发生在大气边界层内的低空急流,其特点是垂直切变强,但水平切变弱,而且有明显的日变化 [22]。因此,探测和分析大气边界层内风的垂直特征及随时间、高度的变化规律,对了解边界层内风场特性,研究污染物扩散等有重要意义。

本文分别针对大气边界层内的 1 500 m 高度以下范围内存在的低空急流和 350 m 高度以下范围内存在的低空急流开展研究。研究利用相干多普勒测风激光雷达获取的测风数据资料,分别对两种不同高度范围的低空急流进行判定与识别,统计了低空急流速度、高度、风向和风切变等结构特征。

## 1 资料与方法

### 1.1 实验及设备介绍

实验观测地点位于山东省德州市平原县 ( $37^{\circ}28'49.29''\text{N}$ ,  $116^{\circ}41'9.99''\text{E}$ ),海拔高度为 20 m,属于黄河中下游冲积平原,地势平坦。观测时间为 2018 年 8 月 1 日—9 月 5 日,观测仪器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 WindMast PBL 边界层风廓线多普勒激光雷达(图 1),其空间分辨率为 15 m,探测距离范围为 30~4 000 m,具体参数指标见表 1。该激光雷达系统基于光学脉冲相干多普勒频移检测原理,可实现大气边界层三维风场高精度、精细化的探测。实时输出数据产品包括风廓线、湍流强度、垂直气流、边界层(云底)高度、信噪比(SNR)、后向散射强度和地面温湿压等。本文进行分析所使用的数据为 10 min 平均风廓线,高度范围为 56~1 500 m。考虑数据质量控制信噪比等因素,剔除存在风速测量无效值的相应时次数据,仅保留每个高度层均含有效数据的时次。

### 1.2 低空急流的标准与定义

低空急流在大气边界层和天气学领域的概念有所不同。在天气学领域,朱乾根等 [3] 将 600 hPa 以下出现的强而窄的气流称为低空急流。本文研究的对象为大气边界层内的低空急流,即风速垂直



图 1 WindMast PBL 多普勒测风激光雷达  
Fig.1 WindMast PBL (Doppler wind lidar)

廓线在大气边界层内特定高度范围内出现风速极大值,表现为明显的“鼻”状结构,特点是垂直切变强<sup>[22]</sup>。在对低空急流的研究中,对低空急流风速的限定并没有一个严格的规范,最终都是通过研究实验地点的风速状况,选择合适的判定标准,识别较大的观测样本,以保证分析的统计有效性。在风能领域,低空急流由于在风机的扫掠面高度范围内具有强劲的风速和显著的风速垂直切变,因此其相关研究对于风能利用及风机保护均具有重要的意义。

国际上有关低空急流的研究工作一般都对风速的垂直切变进行限制。BONNER<sup>[23]</sup>根据最大风速及风速垂直切变强度将北美地区的低空急流分

为 3 个等级,即在距地 1.5 km 内,风速垂直廓线上最大风速  $v_{\max} \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  且与上方出现的最小风速  $v_{\min}$  或 3 km 高度风速(以较低者为准)的风速差  $\Delta v = v_{\max} - v_{\min} \geq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为第一级标准,而分别对应 16 (20)  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  最大风速、8 (10)  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  垂直风速差的风速带定义为第二(三)级标准。基于 BONNER 的定义标准,WEI et al.<sup>[24]</sup>对低空急流最大速度和垂直风速差的限定都相应减小,以期识别出更多的符合“鼻状”特征的低空急流。国内外常见的低空急流判定标准如表 2<sup>[25]</sup>所示。

表 1 WindMast PBL 多普勒测风激光雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of WindMast PBL (Doppler wind lidar)

技术指标	参数
激光波长	1.5 $\mu\text{m}$ , 人眼不可见且人眼安全
数据刷新率	1 Hz
空间分辨率	15 m
数据刷新时间	1 s~10 min
风速测量范围	0~75 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
探测高度范围	30~4 000 m(长矩型)
风速精度	$\leq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
风向精度	$< 3^\circ$
重量	$< 30 \text{ kg}$
体积	580 mm×387 mm×585 mm(长×宽×高)

表 2 LLJ 判定标准表

Table 2 Criteria for judging LLJ

低空急流判定标准	急流速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大风速与上方最小风速差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	急流高度/m	
BLACKADAR (1957) <sup>[6]</sup>	—	$\geq 2.57$	1 500	
一级标准	$\geq 12$	$\geq 6$	1 500	
BONNER(1968) <sup>[23]</sup>	二级标准	$\geq 16$	$\geq 8$	1 500
三级标准	$\geq 20$	$\geq 10$	1 500	
张世丰(1979) <sup>[26]</sup>	$\geq 4$	$\geq 1$	164(铁塔高度)	
ALLEN (1980) <sup>[27]</sup>	$\geq 16$	—	1 500	
DICKISON and NEUMANN (1982) <sup>[28]</sup>	—	$\geq 3$	1 000	
STULL (1988) <sup>[1]</sup>	—	$\geq 2$	1 500	
SJOSTEDT et al. (1990) <sup>[29]</sup>	—	$\geq 4.5$ (且最大风速与地面风速差 $\geq 10$ )	915	
ANDREAS et al. (2000) <sup>[30]</sup>	—	$\geq 2$ (且最大风速与下方最小风速差 $\geq 2$ )	—	
孙继松 <sup>[31]</sup>	$\geq 11$	—	1 500	
一级标准	$\geq 6$	$\geq 3$	3 000	
WEI et al. (2014) <sup>[24]</sup>	二级标准	$\geq 10$	$\geq 5$	3 000
三级标准	$\geq 14$	$\geq 7$	3 000	
四级标准	$\geq 20$	$\geq 10$	3 000	

## 2 1 500 m高度以下范围内存在的低空急流

由于我国与美国的地理纬度相似,这里选用BONNER在研究北美大平原低空急流的定义作为识别发生在大气边界层内的1 500 m高度以下低空急流的判定标准。一般认为50 m高度以下的大气层,可作为通量等于常数的近地层,在这一层中风速都是向上递增的<sup>[32]</sup>。原始风廓线观测数据共4 425条,观测高度在56~1 500 m,通过设置信噪比对数据进行质控,剔除有无效数据的风廓线后,得到风廓线数据共计728条(图2a)。根据BONNER

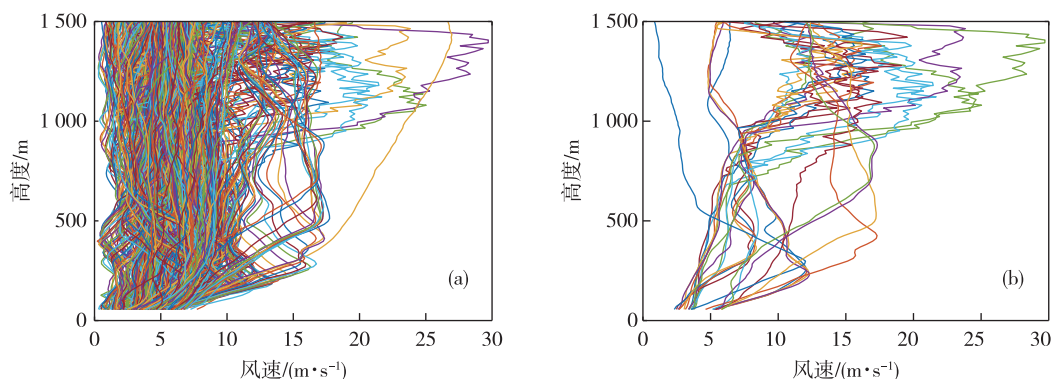


图2 风廓线数据(a.数据筛选与剔除后的原始数据,b.满足BONNER一级标准的低空急流廓线)

Fig.2 Raw data of wind profile (a. after data selection and rejection, b. LLJ profile reaching BONNER's Criterion 1)

## 3 350 m高度以下范围内存在的低空急流

实验观测地点属于平原县风电场,风力发电机典型的轮毂高度在100 m左右,而现代风力发电机叶尖高度可达200 m以上。当存在低空急流时,急流中心附近风速垂直切变很大,如果低空急流的强风速切变发生在叶尖到轮毂高度的位置,这将对风机传动系统的扭矩和风机疲劳载荷影响非常大<sup>[33-36]</sup>。因此,为了更好地进行风资源评估,对风力机进行更可靠的发电预测,需要对低空急流的结构与机制进行准确的分析与研究。

### 3.1 低空急流判定与识别

考虑到低空急流的定义以及低空急流在低层高度出现的频率比更高的高度小,且一般风机的启动风速大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,参考张世丰<sup>[26]</sup>在研究南京164 m铁塔对低空急流的定义,本文将低空急流的判定标准定义如下:1)风速极大值高度 $h \leq 350 \text{ m}$ ; 2)风速极大值 $v_{\max} \geq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 3)风速极大值与其上方出现的最小风速的风速差 $\Delta v = v_{\max} - v_{\min} \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。整个实验周期内共获得完整的原始风廓线4 041条(图3a),其中低空急流出现1 004条次(图

对低空急流定义的第一级标准,识别出满足条件的低空急流共26条(图2b),出现频率为3.6%。第二级标准识别出低空急流13条,出现频率为1.8%。第三级标准识别的低空急流有5条,出现频率为0.7%。

综上所述,观测期间低空急流的出现频率较低,这一方面可能是由于研究地点夏季湿热、风速较小,另一方面则主要是因为BONNER定义的标准对最大风速和垂直风速差的要求相对苛刻。限于满足标准的低空急流样本较少,在此不再对低空急流结构特征方面做进一步分析。

3b),出现频率为24.85%。

低空急流的主要结构特征包括急流速度、急流高度和急流风向3个参数,即低空急流轴心最大风速或风廓线上风速的最大值、低空急流风速廓线中最大风速所在的高度、急流速度处所对应的风向。对满足低空急流定义的风廓线分别进行其结构特征的发生频率直方图统计(图4)。从图中可以看出,急流速度主要介于 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间(图4a);急流出现的高度主要有3个峰值,分别是110 m, 160 m和220 m(图4b),这恰好是风机叶轮所在的高度范围;急流风向以偏东风和偏南风为主(图4c)。因此,当低空急流出现时,必将影响风机发电量和扭矩等。对低空急流结构特征的观测,既可以考虑在低风速情况下充分利用低空急流提高风机的有功功率输出,还可以考虑在高风速情况下避免急流所导致的负载增加所带来的危害。

风廓线观测数目在24 h内基本均匀分布,对低空急流日变化进行统计分析(图5)发现,低空急流在一天中任何时刻都可能发生,发生频率最高的是在午夜到清晨时段,上午及午后急流减弱甚至消散,存在明显的日变化现象。白天和夜间低空急流

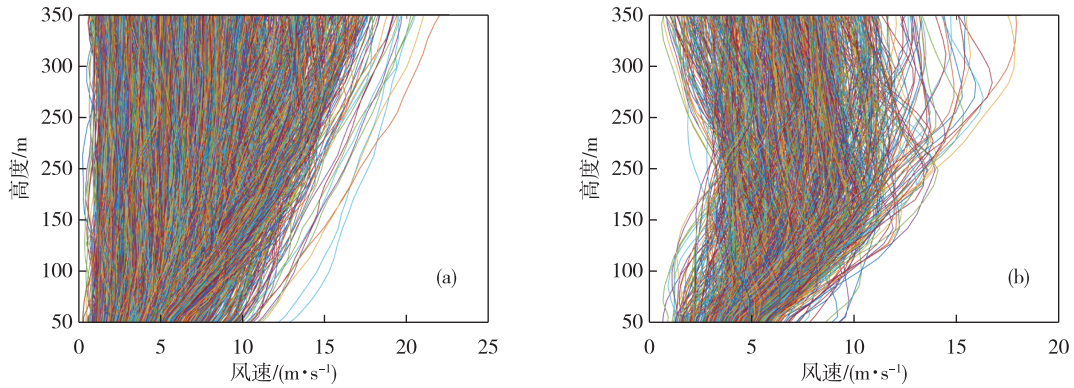


图3 风廓线数据(a.数据筛选与剔除后的原始数据,b.低空急流廓线)  
Fig.3 Raw data of wind profile (a. after data selection and rejection, b. LLJ profile)

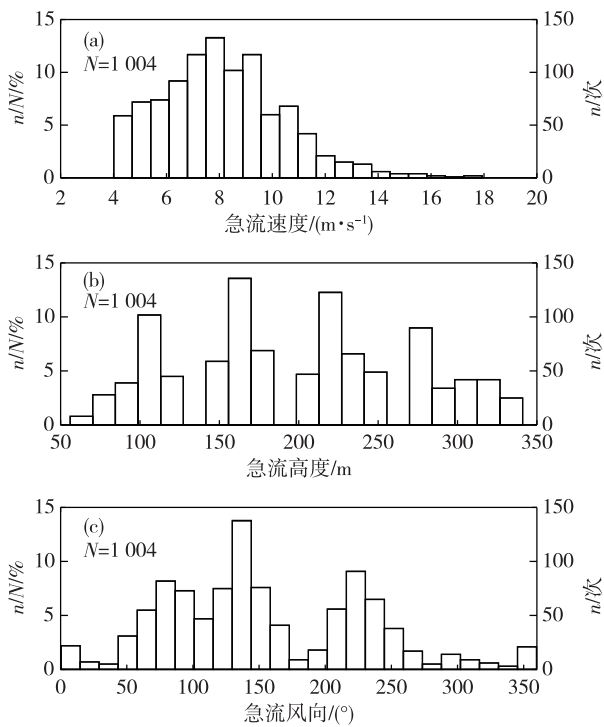


图4 低空急流结构特征直方图(a.急流速度,b.急流高度,c.急流风向; $n$ 表示低空急流发生频次, $N$ 表示低空急流总数)  
Fig.4 Histogram of LLJ (a. jet speed, b. jet height, c. jet direction;  $n$  for the number of LLJ,  $N$  for total number of LLJ)

的发生频率也存在明显差异,19时—次日06时低空急流发生频率为80.8%,高于07—18时的19.2%,

### 3.2 急流速度与急流高度相关性

由低空急流速度随急流高度变化(图6)看出,低空急流符合高度越低风速分布越集中的规律<sup>[37]</sup>。右下部分散点数据的缺失表明风速大的低空急流不会出现在低层高度上,更趋向于分布在较高层。在风速分布上,急流速度主要集中在6~10 m·s<sup>-1</sup>

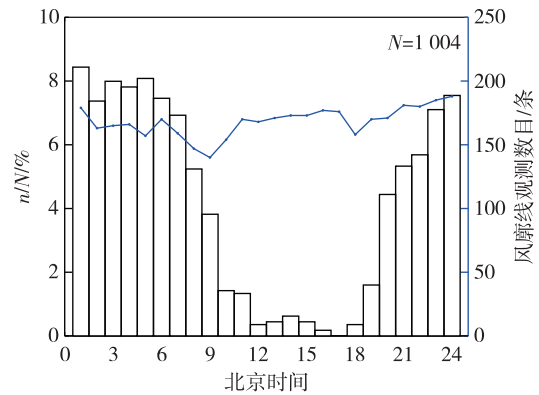


图5 低空急流发生的日变化( $n$ 表示低空急流在各时段发生频次, $N$ 表示低空急流总数,曲线表示风廓线观测数目在24 h内的分布,柱状图表示低空急流在24 h内的分布)  
Fig.5 Diurnal variation of LLJ occurrence ( $n$  for the number of LLJ,  $N$  for total number of LLJ, blue curve for distribution of the number of wind profile observations within 24 h, histogram for distribution of LLJ within 24 h)

之间,且随着高度升高急流速度也在变大,其随高度的变化规律与风速廓线的幂指数律具有相似性。

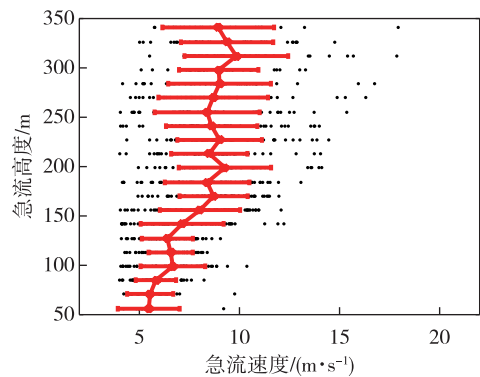


图6 低空急流速度随高度变化  
Fig.6 Change of LLJ speed with height

参考风速廓线幂指数律  $\alpha = \frac{\ln(v_2) - \ln(v_1)}{\ln(z_2) - \ln(z_1)}$ <sup>[38]</sup>, 计算低空急流发生时  $z_1$ 、 $z_2$  不同高度处风速  $v_1$ 、 $v_2$  之间的风切变系数  $\alpha$ 。对于正风切变系数,  $v_2$  和  $z_2$  分别代表急流最大风速值和急流高度, 而  $v_1$  和  $z_1$  分别代表最低层风速和高度; 对负风切变指数而言,  $v_1$  和  $z_1$  分别代表风速极大值所在高度以上的最小风速及其对应高度。线性回归分析结果(图7)显示, 正、负风切变系数近似为一条等值线。

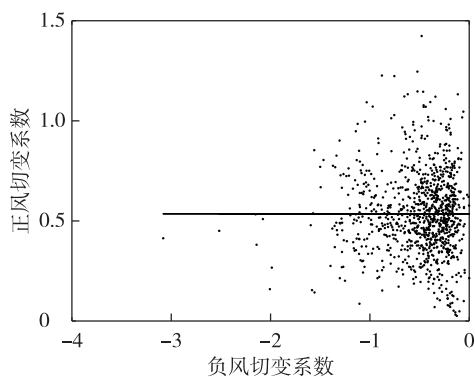


图7 正负风切变之间的相关性

Fig.7 Correlation between positive and negative wind shear

#### 4 结论与讨论

基于相干多普勒测风激光雷达于2018年8月在山东德州获取的10 min平均风廓线观测数据, 进行了低空急流的判定、识别与统计分析, 得到如下结论:

1) 对1 500 m高度以下范围内存在的低空急流, 选用BONNER对低空急流的定义, 第一、二、三级标准下低空急流的出现频率分别为3.6%、1.8%和0.7%。观测期间低空急流出现频率较低, 这既可能是因为研究区域夏季风速较小, 也反映出BONNER定义相对于其他几种定义更加严格、满足判据的数据不多。

2) 针对观测地点属于风电场、风机叶轮高度普遍在几十至一两百米的情况, 参考张世丰对低空急流的定义标准, 对350 m高度以下范围内存在的低空急流进行判定识别。统计显示急流速度主要介于 $6\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 急流高度位于110 m、160 m和220 m三个峰值处, 急流风向主要为偏东风和偏南风。类似的观测和数据统计, 可以为风机针对性地利用低空急流从而增功增效或降低负载提供数据基础和依据。

本文仅使用了一个月的数据, 对结果的统计具有一定的局限性, 今后将使用更多观测数据对结果进行检验。不同的学者用不同的判据来确定低空急流, 在利用多普勒激光雷达开展大量高时空分辨率观测基础上, 根据局地地区气候特征或研究内容, 选取合适的低空急流判据, 会变得更加有数据基础和应用价值。

#### 参考文献:

- [1] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988:670.
- [2] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 573-586.
- [3] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 气象出版社, 1981:161.
- [4] GOUALT J. Vents en altitude a fort Lamy (Tchad) [J]. Ann Phys Globe France d'Outre-Mer, 1938, 5:70-91.
- [5] FARQUHARSON J S. The diurnal variation of wind over tropical Africa [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1939, 65 (280):165-184.
- [6] BLACKADAR A K. Boundary-layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2018, 38(5):283-290.
- [7] 刁秀广, 侯淑梅. 4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3):46-53.
- [8] 刘蕾, 周晶, 付伟, 等. 安徽沿江一次连续性暴雨过程中急流特征分析[J]. 气象科学, 2018, 38(4):545-552.
- [9] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1):106-115.
- [10] VIZY E K, COOK K H. Observed relationship between the Turkana low-level jet and boreal summer convection [J]. Climate Dyn, 2019, 53(7/8):4037-4058.
- [11] 周博坤. 北京首都机场两次连续雷暴日强对流过程分析和成因探讨[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [12] 陈健伟, 王良明, 李子杰. 两种典型低空风切变对火箭弹道特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5):1008-1017.
- [13] GUTIERREZ W, RUIZ-COLUMBIE A, TUTKUN M, et al. Impacts of the low-level jet's negative wind shear on the wind turbine [J]. Wind Energy Sci, 2017, 2(2):533-545.
- [14] 廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 等. 边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析[J]. 环境科学, 2016, 37(1):51-59.

- [15] SULLIVAN J T, RABENHORST S D, DRESSEN J, et al. Lidar observations revealing transport of  $O_3$ , in the presence of a nocturnal low-level jet: Regional implications for "next-day" pollution[J]. *Atmos Environ*, 2017, 100(158):160-171.
- [16] 程佳, 张宁, 朱焱, 等. 苏州城区大气边界层低空急流特征分析[J]. *气象科学*, 2016, 36(6):843-848.
- [17] 赛瀚, 苗峻峰. 中国地区低空急流研究进展[J]. *气象科技*, 2012, 40(5):766-771.
- [18] 李炬, 舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2):360-368.
- [19] 张文龙, 董剑希, 王昂生, 等. 中国西南低空急流和西南低层大风对比分析[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(2):199-210.
- [20] 陈楠, 胡明宝, 张怪怪, 等. 利用风廓线雷达资料对南京地区低空急流的统计分析[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(3):511-517.
- [21] 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.
- [22] 寿绍文, 岳彩军, 姚秀萍. 现代天气学方法[M]. 北京: 气象出版社, 2012:240.
- [23] BONNER W D. Climatology of the low level jet[J]. *Mon Wea Rev*, 1968, 96(12):833-850.
- [24] WEI W, WU B G, YE X X, et al. Characteristics and mechanisms of low-level jets in the Yangtze River Delta of China[J]. *Bound-Layer Meteor*, 2013, 149(3):403-424.
- [25] SHU Z R, LI Q S, HE Y C, et al. Investigation of low-level jet characteristics based on wind profiler observations[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2018, 174:369-381.
- [26] 张世丰. 南京 164 米高塔观测到的超低空急流[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1979(2):140-146.
- [27] ALLEN S C. Observational characteristics of the low-level jet at daily waters during Project Koorin[J]. *Aust Meteor Mag*, 1980, 28(2):47-56.
- [28] DICKISON R B B, NEUMANN H H. The occurrence of nocturnal low-level jets in New England and the Canadian maritimes[J]. *Atmos-Ocean*, 1982, 20(4):287-300.
- [29] SJOSTEDT D W, SIGMON J T, COLUCCI S J. The Carolina nocturnal low-level jet: Synoptic climatology and a case study[J]. *Wea Forecasting*, 1990, 5(3):404-415.
- [30] ANDREAS E L, CLAFFY K J, MAKSHITAS A P. Low-level atmospheric jets and inversions over the western Weddell Sea[J]. *Bound-Layer Meteor*, 2000, 97(3):459-486.
- [31] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. *大气科学*, 2005, 44(3):445-452.
- [32] LUMLEY J L, PANOFSKY H A. The structure of atmospheric turbulence[M]. New York: Interscience Publishers, 1964:239.
- [33] KELLEY N, SHIRAZI M, JAGER D, et al. Lamar low-level jet project interim report[R]. Golden, Colorado, US: National Renewable Energy Laboratory, National Wind Technology Center, 2004.
- [34] STORM B, DUDHIA J, BASU S, et al. Evaluation of the weather research and forecasting model on forecasting low-level jets: Implications for wind energy[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(1):81-90.
- [35] KELLEY N D. Turbulence-turbine interaction: The basis for the development of the TurbSim Stochastic Simulator[R]. Golden, Colorado, US: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [36] LAMPERT A, JIMENEZ B B, GROSS G, et al. One-year observations of the wind distribution and low-level jet occurrence at Braunschweig, North German Plain[J]. *Wind Energy*, 2016, 19(10):1807-1817.
- [37] BANTA R M, NEWSOM R K, LUNDQUIST J K, et al. Nocturnal low-level jet characteristics over Kansas during Cases-99[J]. *Bound-Layer Meteor*, 2002, 105(2):221-252.
- [38] REHMAN S, AL-ABBADI N M. Wind shear coefficients and their effect on energy production[J]. *Energy Convers Manage*, 2005, 46(15/16):2578-2591.