

王海霞,张宏升,李云峰,等. 2013. 上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究. 气象, 39(11):1500-1506.

上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究^{*1}

王海霞^{1,2} 张宏升¹ 李云峰² 白敬蒋² 潘江勇^{1,3}

1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

2 民航西北空中交通管理局宁夏分局, 银川 750009

3 民航青岛空中交通管理站, 青岛 266108

提 要: 风廓线雷达资料具有较高的时间和空间分辨率, 但多集中于强对流性天气的预报和分析。文章主要将该资料应用于低层大气风场结构的研究和分析中。利用 2009 年 1 月至 2010 年 6 月共计 18 个月的上海浦东国际机场 LAP-3000 边界层风廓线雷达探测的水平风速风向资料, 根据差值后的每小时平均的风速、风向进行统计分析(垂直分辨率 50 m), 发现风速极大值出现的高度具有重复性, 主要出现在 1000、600、500、450、550 和 250 m, 相邻两层之间的风矢量变差的极大值主要出现在 250 和 300 m 之间。按照国际民航组织建议的水平风的垂直切变强度标准, 将各个层次之间的风矢量进行统计分类, 有轻度、中度、强烈、严重四个等级的风切变, 同时发现不同等级的风切变的发生具有明显的季节特征。对于浦东国际机场区域的低层垂直风场的特征及演变情况初步的分析和探讨, 为今后可以更好地结合 AMDAR 资料、电子探空仪、微波辐射计等探测手段针对机场区域甚至是内陆部分机场关于风切变的精细化预报、预警服务的研究奠定了一定的基础。

关键词: 风切变, 边界层风廓线雷达, 浦东国际机场

中图分类号: P425

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.014

Study on Characteristics of Vertical Wind Field in Lower Atmosphere over Shanghai Pudong International Airport

WANG Haixia^{1,2} ZHANG Hongsheng¹ LI Yunfeng² BAI Jingjiang² PAN Jiangyong^{1,3}

1 Department of Atmospheric and Oceanic Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 Ningxia Sub-Bureau of Northwest Air Traffic Management Bureau, CAAC, Yinchuan 750009

3 Qingdao Air Traffic Management Station, CAAC, Qingdao 266108

Abstract: The wind profiler radar data has high temporal and spatial resolution, but is more used in the forecasts and analysis about the strong convective weather. This paper uses the horizontal wind speed and direction data of LAP-3000 boundary layer wind profile radar from January 2009 to June 2010 over Pudong International Airport in the study and analysis of the wind field structure of the low-level atmosphere. The original data with vertical interpolating (the vertical resolution is 50 m in the altitude range from 150 m to 3250 m, and the time interval is about 15 min), are analyzed statistically. The results show that the maximum values of wind speed appear mainly in the following height: 1000 m, 600 m, 500 m, 450 m, 550 m and 250 m, and the maximum value of wind vector difference between two adjacent layers is between 250 m and 300 m. According to the vertical shear intensity standards of horizontal wind recommended by International Civil Aviation Organization (ICAO), the wind vector difference between different adjacent layers is counted up and divided into mild, medium, strong and severe grades. The results show that the seasonal distribution of different grade wind shear is pronounced. These conclusions are beneficial to the study on

* 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB428501)和宁夏自然科学基金资助项目(NE13258)共同资助

2011 年 6 月 9 日收稿; 2013 年 3 月 15 日收修定稿

第一作者: 王海霞, 主要从事航空天气预报及危害航空安全天气的研究. Email: cangshu2001@163.com

detailed forecasting, and warning of the lower wind shear at airport and even inland airport area based on AMDAR data, microwave radiometer, electric radiosonde and so on.

Key words: wind shear, boundary layer wind-profile radar, Pudong International Airport

引 言

低空风切变是国际航空界公认的飞机起飞和着陆阶段的一个重要危险因素,由于其尺度小,生命周期短,强度大的特点,并且大多与其他恶劣天气同时出现,其探测和预报均是当今气象界和航空界的科学难题和技术难题。据美国国家运输安全委员会统计,自 1975 年以来,由于天气原因在美国发生的恶性空难事故中有 80% 是低空风切变造成的。

近些年,随着我国民航业的飞速发展,航班密度猛烈增长,由于低空风切变导致的飞行不正常事件时有发生,国内大多数机场均有关于风切变的航空器空中报告(孙伟中,2007;李锦耀,2010;冯彦华,2004;张小灵,2006;李秀连等,2010),比较严重的飞行不正常事件有:2005 年 4 月 20 日 13:00—14:15 时(UTC),上海虹桥、浦东机场同时出现了低空风切变影响,3 个航班备降杭州,8 个航班复飞,25 个航班盘旋等待。浦东机场报告,低空风切变主要出现在五边区域上空 200 m 高度附近。梁爱民等(2009)指出,2009 年 5 月,首都国际机场就有 10 架以上航班因进近区域内遭遇低空风切变而复飞。由于国内大部分机场缺少有效的探测手段及预警设备,所以低空风切变的预报及预警仍然是一个亟待解决的危及航空器飞行安全的难题之一,也是大气边界层研究领域中的难点之一。地面常规的气象观测和无线电探空观测资料在时间和空间上都不能很好地满足大气边界层风场精细结构研究的需要,而风廓线雷达自动化程度、稳定性和数据时间分辨率高,弥补了常规无线电探空探测的不足,目前已被大气边界层、大气环境和中小尺度天气系统研究重视和使用。

许多边界层研究人员(Krishna Reddigari et al, 2001; Gregor et al, 2001; Steiner et al, 1994; Williams et al, 1995; Neiman et al, 1998; 孙宪章, 1994; 吴志根等, 2011; 吴志根, 2012; 董保举等, 2009; 赵兴炳等, 2006; Angevine et al, 1998) 从不同方面论证了风廓线雷达资料的可用性和准确性,但基本上都是将风廓线雷达资料用于对流性降水等中小尺度天气的研究中(李晨光等, 2003; Baumann-Stanzer,

2004; 魏东等, 2011; 吴志根, 2012; 唐民等, 2009; 王勇等, 2006), 宋志龙等(2008) 利用风廓线雷达资料可以掌握周边冷暖气流的活动概况,为改进短期-短时天气预报提供新的依据;但利用风廓线雷达研究和分析大气低层垂直风场结构的研究相对不多,查阅近些年文献,仅发现王敏仲等(2012),利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站 2010 年 8 和 10 月边界层风廓线雷达资料,分析了沙漠晴天边界层湍流、大气温度、水平风速风向以及垂直速度的发展演变特征和日变化规律。

本文利用上海浦东国际机场的风廓线雷达资料,AWOS 数据对于浦东机场区域的低层大气垂直风场及风切变特征和演变规律进行初步探讨和分析,旨在为航空气象保障服务提供一定的依据。

1 资料与方法

采用 2009 年 1 月至 2010 年 6 月共计 18 个月的上海浦东国际机场边界层风廓线雷达探测的水平风速风向资料,将各时次原始数据进行垂直方向的插值,垂直分辨率 50 m,探测高度范围为 150~3250 m,时间间隔大约 15 min。为提高数据的覆盖率、减小随机误差对数据质量的影响,将插值后的水平风速、风向进行时间平均,得到每小时平均资料。

按照不同层次之间的风速差、风矢量差统计得出风切变的日、季节及出现的高度等的变化规律。并按标准划分风切变强度等级,利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料(格点距 $1^\circ \times 1^\circ$),对不同等级的风切变过程进行天气形势的分析,找出风切变发生、发展及演变过程中的环流背景的特性。

浦东国际机场安装的是维萨拉公司生产的 LAP-3000 边界层风廓线雷达,由风廓线仪(Profiler)和无线电声波探测系统(RASS)两部分构成。其中,风廓线仪用于探测大气边界层内各高度上的水平风和垂直速度。LAP-3000 为低空大气廓线雷达(lower atmosphere profiler),测量高度大约为 150~3250 m。测场位于 31.00°N , 121.00°E ,海拔高度 5 m。机场位于上海市的东南面,东邻东海,周围地形平坦、开阔,净空条件良好。

2 风廓线雷达数据的统计分析

根据原始的机场测风数据中提取、插值获得小时平均的水平风速值做出如图 1 所示的风速廓线图(其他日期的图略),从图中可以看出,在低层大气中,特别是 1000 m 以下的低层大气风场结构中,基本上都存在风速的极大值(实线标注的地方),从地

面开始,风速逐渐增大,增大到极大值时再逐渐减小(符合边界层特征),即在某一高度层上存在一风速的突变点,这些风速的突变点直接影响起飞及着陆的航空器的飞行安全,但是从图中我们也不难发现,这些风速的极大值点出现的高度并不固定,有的时次出现在近地面 200 m 附近,有的在 1000 m 高度附近。

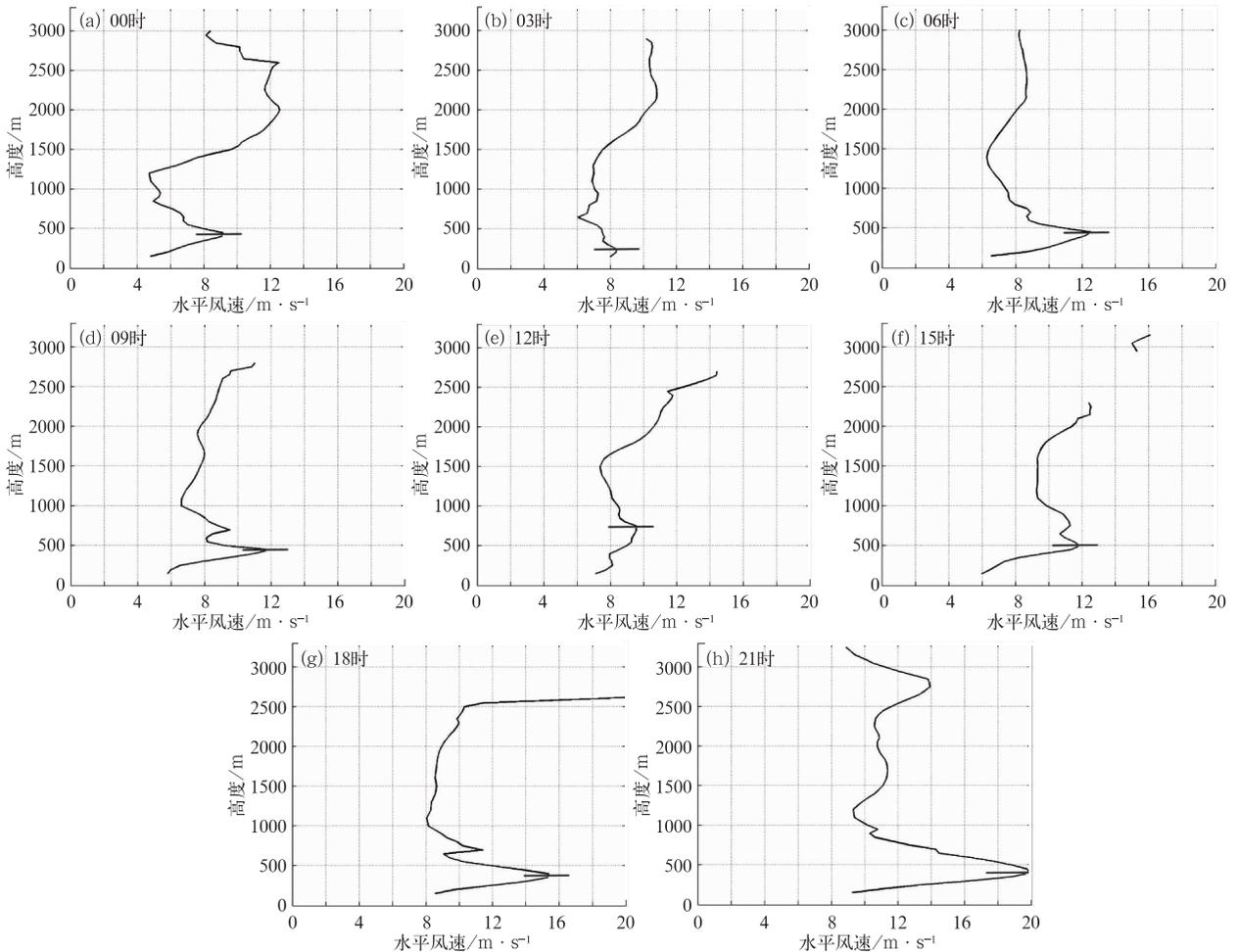


图 1 2009 年 3 月 17 日小时平均风速廓线分布图

Fig. 1 Distributions of hourly average wind speed profile on 17 March 2009

2.1 风廓线资料的统计结果

通过对浦东国际机场 2009 年 1 月至 2010 年 6 月的 18 个月的风廓线雷达数据资料的统计分析(见图 2),发现风速的极大值集中出现在以下高度:1000、600、500、450、550 及 250 m,分别占到总次数的 20.56%、12.41%、8.71%、8.24%、7.41% 和 6.93%;而风速的极大值很少出现在以下高度:200、

900 和 150 m,分别占到总次数的 0.35%、1.43% 和 1.44%;但是风速大并不代表对航空器飞行安全有重要影响,所谓水平风的垂直切变,是指在某一厚度层上出现的风速或风向的变化,所以,有必要分析各个相邻层之间的风速变差,通过两个高度层上的风速变差的统计分析,发现风速变差的极大值通常出现在 250 和 300 m 之间,次极大值出现在 1000 和 1050 m 之间,分别是 23.17% 和 23.05%;风速变差

的极大值很少出现在 950 和 1000 m 及 550 和 600 m 之间,出现的频率仅有 1.49% 和 2.68%;显而易见,在 1000 和 1050 m 之间容易出现较大的风速切变,而在相邻的层次 950 和 1000 m 很少出现较大的风速切变,说明在 950~1050 m 之间非常容易出现

较大的风速切变,在 250~600 m 之间也很容易出现风速的大的切变区。另外,在 1000 m 附近风速极大值出现的概率和 1000 与 1050 m 两层之间风速变差的极大值出现的概率基本相当,所以可认为 1000 m 附近存在较为稳定的低空急流区。

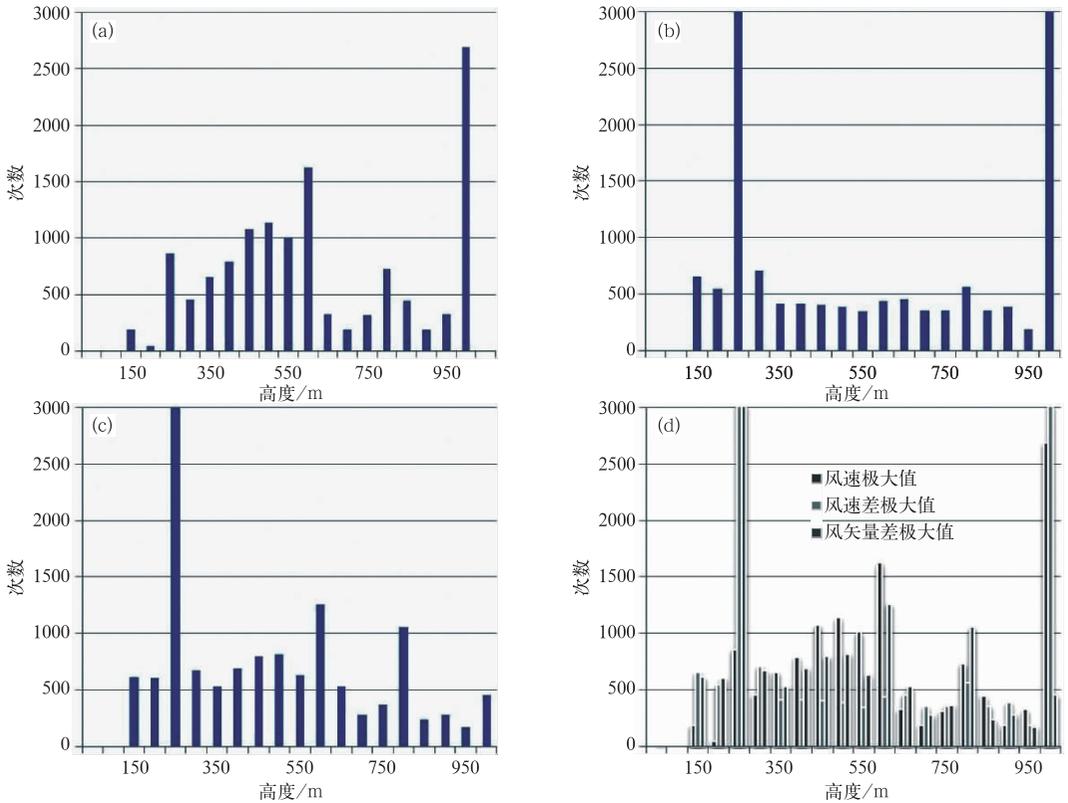


图 2 风速极大值、风速差及风矢量差极大值的高度分布图

(a) 最大风速所在高度出现的次数, (b) 相邻高度层之间风速变差极大值所在高度出现的次数, (c) 相邻高度层之间风矢量差极大值所在高度出现的次数, (d) 风速极大值、风速差及风矢量差极大值所在高度出现的次数

Fig. 2 Distributions of maximum value of wind speed, wind velocity difference and maximum wind vector difference

(a) frequency of the height of maximum wind speed, (b) frequency of the height of maximum value of wind speed between adjacent layers, (c) frequency of the height of maximum wind vector difference between adjacent layers, (d) frequency of the height of maximum wind speed, wind velocity difference and maximum wind vector difference

由于风场是矢量,所以揭示单点上空的风场结构,仅仅考虑风速的切变是远远不够的,应该进而分析两层之间风的矢量差,统计结果表明在 250 和 300 m 之间不仅仅是风速变差极大值出现的概率最高,而且是风矢量差的极大值出现的概率也是最高的,而恰恰在 1000 和 1050 m 之间风矢量差的极大值出现的概率很低,仅占到了 3.49%,远远低于上述的 23.05%,这就更有力地说明了在这一高度层

中风速变化很大,但是风向基本接近,可以更加肯定地认为在 1000 m 附近存在较为稳定的低空急流区,而实际工作中用的 850 hPa 高空图,仅仅可以分析到 1500 m 附近的低空急流区,难以得到如此密集和低高度的探测资料,从而显现出风廓线雷达在时间及空间分辨率的优势,并且如能像多普勒雷达一样实现全国布网,可以有效地弥补我国中小尺度天气探测手段的不足,提高强对流性等中小尺度天

气的监视、预报及预警能力。而同样是在 250 和 300 m 之间的风矢量变差的极大值出现的概率仍然最大,为 23.06%,与上面得到的风速变差极大值出现的概率 23.17% 基本相当,说明在 250 和 300 m 之间确实存在着风向、风速的明显切变,而且出现的概率非常大。

综上所述,航空器在浦东国际机场起飞或着陆时,需着重注意 250 和 300 m 之间及 1000 和 1050 m 之间的风向、风速的切变,做好拉起及复飞等应对措施。

2.2 风切变的强等级划分及季节变化特点

按照国际民航组织所建议的水平风的垂直切变强度标准,空气层垂直厚度 30 m,标准见表 1。

由于文中所用到的数据资料的高度分辨率为 50 m,将其风矢量变差折算成 30 m 之后按表 1 进行风切变等级的划分。通过统计分析,发现在轻度、中度、强烈和严重的风切变出现的频率分别是 57.31%、24.79%、7.08% 及 10.82%。

文中提到的四季,划分如下:3、4、5 月为春季;6、7、8 月为夏季;9、10、11 月为秋季;12、1、2 月为冬季。

通过表 2,可以发现各个季节发生低空风切变的频次大致相同,但不同等级的风切变季节变化明

表 1 国际民航组织所建议的水平风的垂直切变强度标准

Table 1 Level of vertical wind shear strength standard recommended by International Civil Aviation Organization

强度等级	30 m/(m·s ⁻¹)
轻度	0~2
中度	2.1~4
强烈	4.1~6
严重	>6

表 2 浦东国际机场不同强度等级的风切变的季节变化分布(出现的次数)

Table 2 The seasonal change distribution (the number of occurrences) of wind shear strength in different grades at Pudong International Airport

季节	轻度	中度	强烈	严重	总计
春季	1656	320	105	118	2199
夏季	1873	197	61	48	2179
秋季	1826	215	77	65	2183
冬季	1505	341	127	173	2146
总计	6860	1073	370	404	8707

显,轻度风切变夏、秋季出现最多,春季次之,冬季最少;中度及以上等级风切变则冬、春季出现最多,秋季次之,夏季最少。

3 浦东国际机场区域风切变特征分析

通过对风廓线雷达资料的统计分析,在许多次风切变过程中选取一些典型个例,对其风廓线资料及天气形势等因素进行分析,对浦东国际机场区域的低层大气垂直风场及风切变特征和演变规律进行初步探讨和分析。鉴于篇幅原因,这里仅选取 2010 年 2 月 10 日个例进行分析。CA **** 航班在执行 ** 一浦东任务时,于 16:42 机组报告进近着陆过程中,在 1800 英尺(1 inch=0.3048 m)高度附近遭遇低空风切变。

3.1 天气形势分析

通过对 18 个月的部分典型个例的高空环流形势及地面形势(图略)分析,得到以下结论:中度以上低空风切变发生的大尺度环流背景,在 850 hPa 图上亚欧区域为“两槽一脊”环流形势,但槽脊位置根据季节及影响系统的不同可以有所变换,但是强冷空气中心位置一定要偏北,对华东一带无直接影响,华东处于西南低空急流区,且位于强上升运动区或上升运动及下沉运动的交汇区,但这种交汇一定是在垂直方向上的,如中高层为上升运动区,那么低层为下沉运动区,这种情况下发生中度以上强度的低空风切变的概率较大。

统计发现,在 1000 m 以下,特别是 200、900 和 150 m 附近都会有一个风速的极大值区域。而且邻近高度层之间的风矢量切变一般都会达 6 m·s⁻¹ 以上,飞行过程中很可能遭遇低空风切变。

3.2 风廓线资料分析

图 3 中显示,在 700~1000 m 高度之间附近存在一个风速的极小值,且随时间推移风速极小值所在的高度逐渐升高,到 21:00 时前后达到最低点,之后又有所抬升;500 m 高度附近存在一个风速的极大值,且随时间推移风速极大值所在的高度逐渐抬升,傍晚前后逐渐降低,基本稳定在 500 m 高度附近。500 m 以下风向几乎没有显著变化,由于地球自转产生的科里奥利力的作用,顺着地面附近风的方向看,风向随高度的增加逐渐向右偏转。而

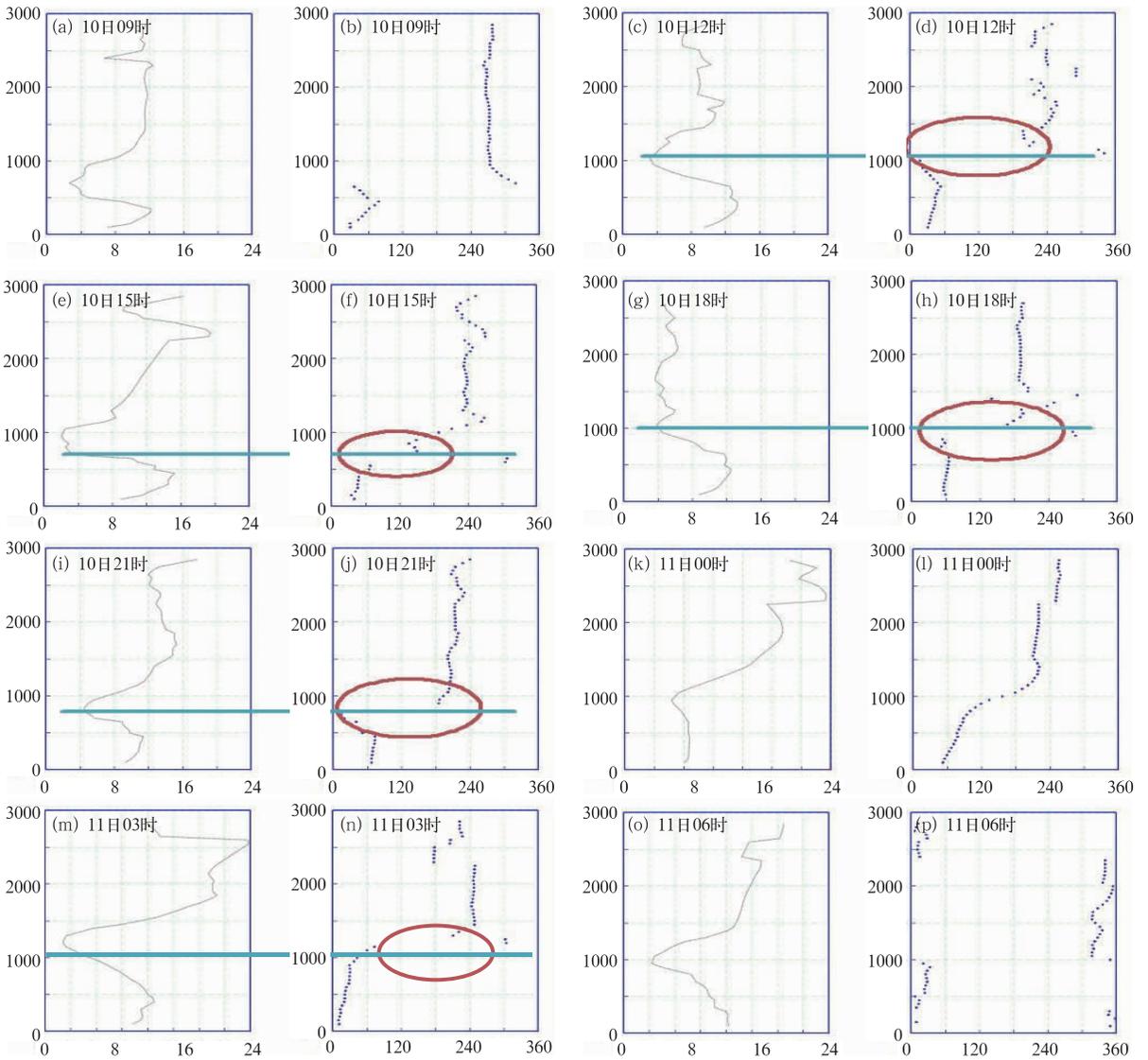


图 3 2010 年 2 月 10—11 日风廓线雷达的平均风速及风向廓线

(a, c, e, g, i, k, m, o)为风速廓线(单位: $m \cdot s^{-1}$),

(b, d, f, h, j, l, n, p)为风向廓线(单位: $^{\circ}$)

Fig. 3 Distributions of wind profiler radar hourly average wind speed and direction profiles on 10 to 11 February 2010

(a, c, e, g, i, k, m, o) the wind speed profile (unit: $m \cdot s^{-1}$),

(b, d, f, h, j, l, n, p) the wind direction profile (unit: $^{\circ}$)

且风向廓线显示在中午到傍晚时间段内,500~1000 m 高度附近存在突变,突变跨越的高度层较厚,特别是中午 12:00 以后风向变化区间也随之增大,通过同一时次的风速及风向廓线的对比可以看出,风向突变的高度基本对应大气边界层内风速极小值所在的高度,航空器空中飞行时遭遇风向突变的同时,往往还可能遇到升力或阻力的改变。

当日机组于 16:42 前后报告遭遇风切变,通过

对相邻高度层之间的风矢量变差的计算,也显示在 17:00 时,400~450 m 高度上存在 $6.42 m \cdot s^{-1}$ 的风矢量变差。

4 小 结

(1) 浦东国际机场区域,风速的极大值集中出现在以下高度:1000、600、500、450、550 和 250 m,

分别占到总次数的 20.56%、12.41%、8.71%、8.24%、7.41% 及 6.93%；而风速的极大值很少出现在以下高度：200、900 和 150 m。950~1050 m 之间和 250~600 m 之间非常容易出现较大的风速切变。另外，在 1000 m 附近风速极大值出现的概率和 1000 与 1050 m 两层之间风速变差的极大值出现的概率基本相当，所以可认为 1000 m 附近存在较为稳定的低空急流区。

(2) 航空器在浦东国际机场起飞或着陆时，需着重注意 250 和 300 m 之间及 1000 和 1050 m 之间的风向、风速的切变，做好拉起及复飞等应对措施。

(3) 通过统计分析，发现在轻度、中度、强烈和严重的风切变出现的频率分别是 57.31%、24.79%、7.08% 及 10.82%。并发现各个季节发生低空风切变的频次大致相同，但不同等级的风切变季节变化明显，轻度风切变夏、秋季出现最多，春季次之，冬季最少；中度及以上等级风切变则冬、春季出现最多，秋季次之，夏季最少。而日变化并不明显，严重风切变集中出现在凌晨 01:00—04:00 和晚上 20:00—21:00。

(4) 以 50 m 为一个高度层，如果相邻高度层之间的风矢量差 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，应提醒机组注意可能遭遇风切变。

(5) 中度以上低空风切变发生的大尺度环流背景，在 850 hPa 图上亚欧区域为“两槽一脊”环流形势。

参考文献

董保举,张晔,徐安伦.2009.高原地区风廓线雷达资料评估.气象科技,37(5):580-583.

冯彦华.2004.白云机场低空风切变的时空特点及其大气环流形势分析.广东气象,(4):5-7.

李晨光,刘淑媛,陶祖钰.2003.华南暴雨试验期间香港风廓线雷达资料的评估.热带气象学报,19(3):269-276.

李锦耀.2010.延安机场春季低空风切变频发原因分析.空中交通管理,(6):22-24.

李秀连,付强,王科,等.2010.风切变对飞行的影响及其预报时效分析.气象科技,38(2):170-174.

梁爱民,陈露.2009.低空风切变与飞行安全.中国民用航空,105(9):32.

宋志龙,冉建新,毛建平.2008.奥帆赛气象服务风廓线雷达的技术保障.气象,34(S1):301-302.

孙伟中.2007.兰州中川机场低空风切变的初步分析.民航科技,(6):11-14.

孙宪章.1994.大气遥感探测系统——风廓线雷达.现代雷达,2:21-30.

唐民,梅珏.2009.上海浦东机场一次连续出现的强对流天气对比分析.气象,35(10):25-31.

王敏仲,魏文寿,何清,等.2012.风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠晴天边界层的探测分析.气象,38(5):577-584.

王勇,安建平,卜祥元,等.2006.边界层风廓线雷达测温系统设计.气象,32(10):52-56.

吴志根.2012.边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究.气象,38(6):758-763.

吴志根,丁若洋,郑杰,等.2011.边界层风廓线仪多普勒频谱高度图综合应用初探.气象,37(8):1006-1017.

魏东,孙继松,雷蕾,等.2011.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析.气象,37(4):412-422.

易仕明,陈奕隆.1988.观测高空风的新装备——风廓线雷达.气象,14(11):3-8.

张小灵.2006.机场低空风切变气象服务探索.空中交通管理,(8):28-30.

赵兴炳,李跃清.2006.风廓线雷达原理及其在高原地区探测结果初析.四川气象,26(2):24-26.

Angevine W M, Bakwin P S, Davis K J.1998. Wind profiler and RASS measurements compared with measurements from a 450-m-tall tower. J Atmos Oceanic Technol,15:818-825.

Baumann-Stanzer K.2004. The UHF wind profiler at Vienna airport-data quality control and comparisons to rawinsonde data. Meteor Atmo Phys,85(1):165-174.

Gregor S L, Howard B B, et al.2001. Wind structure in a supercell thunderstorm as measured by a UHF wind profiler. Amer Meteor Soc,129:1968-1986.

Krishnareddigari K R, Toshiakik, et al.2001. Lower atmospheric wind profiler ar Gadanki, tropical India; Initial result. Meteorol Zeitschrift,10:457-468.

Neiman P J, Ralph F M, Shapiro M A, et al.1998. An observational study of fronts and frontal mergers over the continental United States. Mon Wea Rev,126:2521-2554.

Steiner A, Richner H.1994. Separation of clear-air echoes from precipitation echoes in UHF wind profiler measurements. Ann Geophys,12:497-505.

Williams C R, Ecklund W L, Gage K S.1995. Classification of precipitating clouds in the Tropics using 915-MHz wind profilers. J Atmos Oceanic Technol,12:996-1012.