

房云龙,郑标,赵铁成,等.青岛流亭机场海风特征分析及对飞行的影响[J].海洋气象学报,2018,38(4):115-121.
Fang Yunlong, Zheng Biao, Zhao Tiecheng, et al. Analysis on the characteristics of sea breezes at Qingdao Airport and their impacts on the flight[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 115-121. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.012. (in Chinese)

青岛流亭机场海风特征分析及对飞行的影响

房云龙,郑标,赵铁成,潘江勇,于璐璐

(中国民用航空青岛空中交通管理站,山东 青岛 266108)

摘要:通过分析2008—2016年青岛流亭机场(简称青岛机场)各季节地面风向日变化规律,发现有两支海风环流影响青岛机场:一支是西支海风,风向 $210^{\circ}\sim 230^{\circ}$,一般上午影响机场,午后发展至最强,下午消失;另一支为南支海风,风向 $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$,午后影响机场,下午取代西支海风,傍晚发展至最强,夜间逐渐减弱消失。两支海风夏季最为明显,南支海风强度季节性差异强于西支海风。海风对机场飞行的影响主要体现在两支海风引起的三种海风锋型低空风切变,分别为西支海风锋引起的侧风切变、两支海风环流相互作用引起的侧风切变以及南支海风引起的顺风切变,其季节及日变化规律为:夏季出现概率最大,春、秋季次之,冬季几乎不会发生;一天中最可能发生时段分别为08:00—11:00、12:00—15:00和15:00—17:00,具体时段在各季节略有差异。

关键词:青岛机场;海风;海风锋型低空风切变

中图分类号: P425 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0115-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.012

Analysis on the characteristics of sea breezes at Qingdao Airport and their impacts on the flight

FANG Yunlong, ZHENG Biao, ZHAO Tiecheng, PAN Jiangyong, YU Lulu

(Qingdao Air Traffic Management Station of Civil Aviation Administration of China, Qingdao 266108, China)

Abstract By analyzing the diurnal variation of the surface wind direction at Qingdao Liuting International Airport (Qingdao Airport for short) from 2008 to 2016, it is found that there are two sea breeze circulations influencing Qingdao Airport. One is the west branch sea breeze (WBSB), whose direction ranges from 210° to 230° . It generally affects the airport in the morning, reaches the peak in the afternoon, and then gradually disappears. The other is the south branch sea breeze (SBSB), whose direction ranges from 150° to 170° . It affects the airport in the afternoon, then replaces WBSB, reaches its peak in the evening, and fades away at night. The two sea breezes are the most obvious in summer, and the seasonal intensity variation of SBSB is stronger than that of WBSB. The main impact of the sea breezes on the flight is three types of sea breeze frontal low-level wind shear (SBFLLWS): two types of cross wind shear caused by WBSB front and the interaction of two sea breeze circulations respectively, and the tail wind shear caused by SBSB. The seasonal variation of SBFLLWS is that the probability is the highest in summer, followed by spring and autumn, and almost the least in winter. Three types of SBFLLWS are respectively most likely to occur from 08:00 to 11:00, from 12:00 to 15:00, and from 15:00 to 17:00, and the specific period of time varies slightly in each season.

Key words Qingdao Airport; sea breeze circulation; sea breeze frontal low-level wind shear

收稿日期:2018-03-14; 修订日期:2018-06-27

基金项目:中国民用航空局空中交通管理局2016年科技项目(机场终端区高分辨率气象信息集成技术研究)

作者简介:房云龙,男,工程师,主要从事航空天气预报和航空气象服务工作, fang_yunlong@163.com。

引言

海陆风是因海洋和陆地受热不均匀而在海岸附近形成的白天由海洋吹向陆地(称为海风),夜间由陆地吹向海洋(称为陆风)的一种有日变化的风系^[1-4]。海风从海面向陆地推进过程中,风向风速突然发生变化引发的低空风切变对航空飞行会产生显著影响^[5-6]。航空气象学中的低空风切变(Low-Level Wind Shear, LLWS)是指高度500 m以下的大气中风向风速突然发生变化的天气现象^[7-9],主要影响飞机起飞和着陆,严重低空风切变能够改变飞行航迹、影响仪表准确性及飞机稳定性和操作性,甚至引起飞行事故。据世界民航组织统计,1964—1983年,低空风切变至少造成28架大型运输机出现飞行事故,导致超过500人死亡和超过200人受伤^[7]。国内外许多学者对低空风切变时空分布、形成原因、预警技术及历史个例做了大量研究^[10-16]。海风锋是引起沿海机场低空风切变的重要原因之一,海风锋型低空风切变是海陆风环流影响机场运行的关键因素^[7,17-18]。

青岛流亭机场(简称青岛机场)位于山东半岛东南部、青岛市北部,跑道方向是 $171^{\circ}\sim 351^{\circ}$ 。机场距离胶州湾约5 km,距离青岛南部沿海约30 km。青岛海岸线曲折,三面环海,西为胶州湾,东、南为黄海,海洋对青岛天气、气候有着重要影响^[19-23],海陆风现象是海洋影响天气的重要体现。目前已经

有大量关于青岛海陆风形成机理、建立时间、影响区域、出现频率、发展强度等特征的研究成果^[24-33],但研究区域主要集中在青岛南部沿岸,鲜有关于青岛机场海陆风现象及对飞行影响的研究^[34]。

理论研究和实际观测均已证实,海风环流强于陆风环流^[24,29],本文利用2008—2016年逐时地面风场观测资料分析青岛机场海风特征及对飞行的影响,为飞机起飞着陆过程中如何降低其对飞行造成的影响提出合理建议。

1 青岛机场海风特征分析

1.1 影响胶州湾东北沿岸的海风环流

如图1所示,A为青岛机场(位于胶州湾东北沿岸),J为胶州湾,Q为青岛南部沿海,Y为黄海(此处仅指青岛南部近海且不包含胶州湾,下同)。常志清等^[29]通过数值模拟研究发现有两支影响胶州湾东北沿岸的海风环流,一支产生于黄海与陆地之间^[24-28],称为“南支海风环流”,简称“南支环流”。研究表明,该支环流一年四季均可发生^[25],7—8月表现最为明显,建立时间一般在10:00—12:00(北京时间,下同),维持6~9 h,发生概率为30%~35%^[26-27]。另一支环流产生于胶州湾与胶州湾东北沿岸之间^[24,29-30],称为“西支海风环流”,简称“西支环流”。西支环流大多出现在5—10月,发生频率为10%~25%,海风强度4~6 m/s;冬季西支海风很弱,出现次数也很少^[29]。

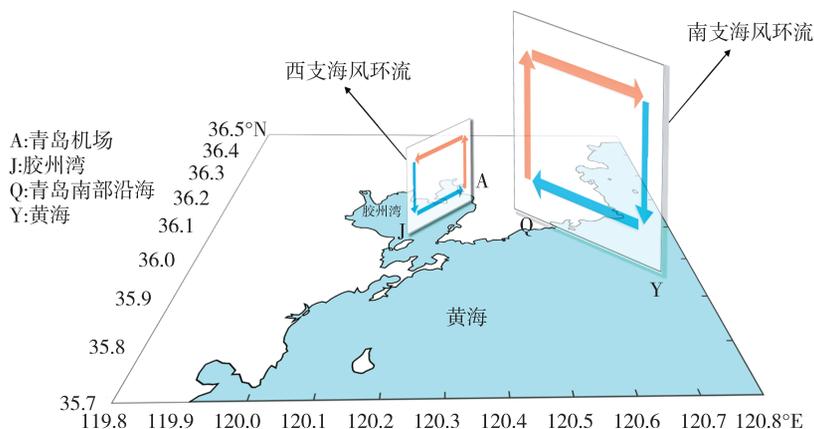


图1 影响胶州湾东北沿岸的两支海风环流示意图

Fig.1 Diagram of two sea breeze circulations affecting the northeast coast of Jiaozhou Bay

数值模拟结果表明,两支海风环流在合适的气象条件下都可向内陆推进一定区域^[24],但是否影响机场还有待实况数据进一步验证。海风环流的强度、厚度与水体大小、水陆温差等因素密切相关^[35],

胶州湾是黄海伸入山东半岛南部的一个半封闭海湾,水体面积远小于黄海,且夏季胶州湾海温高于黄海海温^[36-37],因此,西支环流强度、厚度一般弱于南支环流^[28]。

1.2 基于观测数据的海风特征分析

目前关于胶州湾东北沿岸海陆风现象的研究主要为个例分析或数值模拟^[24,28-30],海风环流建立时间、强度及环流间相互作用还缺乏实况数据的统计验证。理论研究和实际观测已经证实,对于非均一下垫面(例如山地或沿海),地面风向日变化受地形热力状况影响显著^[38],在沿海地区,海陆风是造成地面风向日变化的主要原因^[39-40],因此本文根据风向日变化规律研究影响机场的海风特征。

胶州湾和黄海分别位于机场西南和东南方向,故分析西南风(180°~200°和210°~230°两个风向

段)和东南风(120°~140°和150°~170°两个风向段)频率日变化规律,资料为2008年1月—2016年12月机场风场逐时观测数据。如图2所示,210°~230°风向段于日出之后出现频率迅速增多,春、夏季于12:00、秋、冬季于13:00达到极大值,除冬季之外,频率日峰值为15%左右。该风向段频率日较差(频率日极大值与日极小值之差)呈现一定的季节性变化,数值在9%~14%之间(表1),夏、秋季频率日变化略强于冬季和春季。180°~200°风向段出现频率虽明显多于210°~230°风向段,但日变化较为和缓(图2),除秋季外,其他季节风向频率日较差均小于等于7%(表1),日变化幅度较小。

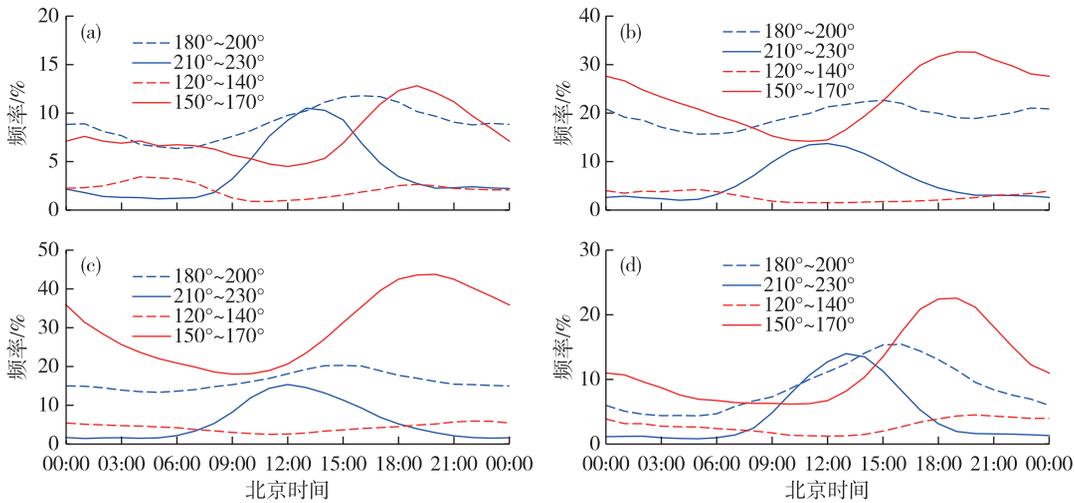


图2 4个风向段(180°~200°、210°~230°、120°~140°和150°~170°)出现频率日变化(a.冬季,12月—次年2月;b.春季,3—5月;c.夏季,6—8月;d.秋季,9—11月)

Fig.2 Diurnal variation in frequency of four wind direction segments (180°~200°, 210°~230°, 120°~140°, and 150°~170°) (a. winter, DJF; b. spring, MAM; c. summer, JJA; d. autumn, SON)

表1 各季节4个风向段出现频率日较差

Table 1 Daily range in frequency of four wind direction segments during each season %

季节	180°~200°	210°~230°	120°~140°	150°~170°
冬季	5.4	9.4	2.5	8.3
春季	7.0	11.7	2.7	18.4
夏季	6.9	13.9	3.4	25.7
秋季	11.3	13.2	3.3	16.4

东南风日变化规律为:150°~170°风向段频率从中午开始增多,日落后1~2h达到极大值,夜间缓慢减少(图2)。频率日较差季节性差异显著,夏季为25.7%,春、秋季数值接近,分别为18.4%和16.4%,冬季只有8.3%(表1)。120°~140°风向段频率日较差很小(图2,表1),没有明显日变化规律。

西南风和东南风日变化规律反映了西支海风和南支海风的基本特征:上午西南风频率增多,表明西支环流一般上午开始影响机场,海风方向为210°~230°。研究指出,海风环流一般在下午至傍晚发展到最强阶段^[1-2],但青岛机场西南风频率中午开始降低,同时东南风频率显著增加,表明机场下午存在南支海风取代西支海风的过程。南支海风方向为150°~170°,于傍晚达到最强。夜间,海陆温差减弱,南支环流逐渐减弱消失。

如表1所示,夏季210°~230°与150°~170°风向段频率日较差高于其他季节,表明两支海风夏季最强,春、秋季次之,冬季最弱。夏季150°~170°风向段频率日较差高达25.7%,冬季仅为8.3%,而210°~230°风向段频率日较差在各季节差异相对较小,表明南支海风强度的季节性差异强于西支海风。

2 海风对青岛机场飞行的影响

海风从海面向陆地推进过程中抬升陆地上较暖空气层形成的锋面称为海风锋,海风锋是一种中尺度浅薄冷锋,可造成所经过地区温度降低、露点升高、风向转为向岸风^[7,35,38]。在适当气象条件下海风锋可引发低空风切变、颠簸及局地对流,其中海风锋型低空风切变对飞行的影响最为显著^[7]。

相对飞行方向,低空风切变分为顺风切变、逆风切变、侧风切变及垂直风切变等四类。大气中水平风矢量按飞行方向可分解为顺风(飞行方向与风向相同)/逆风(飞行方向与风向相反)和左/右侧风,飞行中顺风/逆风逐渐增大为顺风/逆风切变;侧风出现变化为侧风切变;垂直气流发生变化称为垂直风的切变^[7]。一般海风锋附近风速较大,锋后风速逐渐减小^[27],无强烈垂直气流^[27,29],因此海风锋造成的低空风切变主要体现为顺风、逆风或侧风切变。

2.1 海风锋型低空风切变模型

本文以机场地面突然转为向岸风或向岸风显

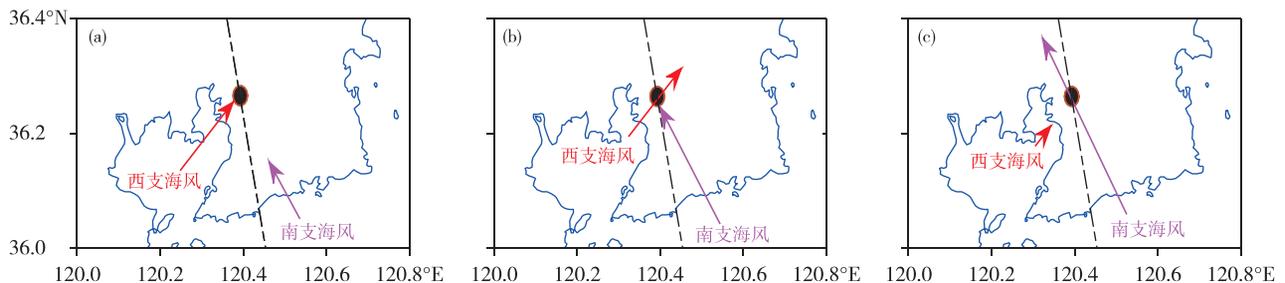


图3 三种海风锋型低空风切变(a.西支海风锋引起的侧风切变,b.两支海风环流相互作用引起的侧风切变,c.南支海风引起的顺风切变;黑色圆点为青岛机场,黑色断线为机场跑道延长线方向,红色箭头为西支海风,紫色箭头为南支海风)

Fig.3 Three types of sea breeze frontal low-level wind shear (a. cross wind shear caused by the west branch sea breeze front, b. cross wind shear caused by the interaction of two sea breeze circulations, c. tail wind shear caused by the south branch sea breeze; black dot: location of Qingdao Airport, black dashed line: runway extension line, red arrow: west branch sea breeze, purple arrow: south branch sea breeze)

2.2 海风锋型低空风切变季节及日变化规律

海风锋型低空风切变发生概率与海风环流强度及发生频率密切相关,因此,夏季发生海风锋型低空风切变的概率相对最大,春、秋季次之,冬季各风向段频率变率基本小于2%(图4a),发生海风锋型低空风切变概率很低。

海风锋型低空风切变日变化规律判断条件如下。

1)条件A。210°~230°风向段频率变率(1 h 频率变化)最大的时段,对应西支海风锋最可能过境

时段,易出现西支海风锋引起的侧风切变。显著增大作为海风锋开始影响机场的特征指标,向岸风速逐渐减小趋于稳定,表示海风锋已经过境。在西支海风和南支海风的共同作用下可引起以下三种类型低空风切变。

1)西支海风锋引起的侧风切变(图3a)。西支海风锋过境时,风向突然转变为西南风,跑道侧风分量显著增大。飞机由北向南起飞和着陆易引起右侧风切变;反之易引起左侧风切变。

2)两支海风环流相互作用引起的侧风切变(图3b)。黄海距离机场较远,南支海风影响机场的时间晚于西支海风。南支海风锋到达机场后,两支环流相互作用,机场近地面交替出现西南风或东南风,飞机受到左侧风和右侧风交替影响进而引起侧风切变。

3)南支海风引起的顺风切变(图3c)。南支海风完全取代西支海风后,风向稳定为东南风。一般海风风速于海风锋处最大,锋后逐渐减小^[27],因此,飞机由南向北起飞和着陆时,顺风逐渐增大,易引起顺风切变;反之,飞机由北向南起飞和着陆时,海风(逆风)逐渐减小,也会引起顺风切变。

时段,易出现西支海风锋引起的侧风切变。

2)条件B。210°~230°风向段频率变率 <0 且150°~170°风向段频率变率 >0 ,最初一段时间(一般1 h),易出现两支环流相互作用引起的侧风切变。

3)条件C。150°~170°风向段频率变率极大值,对应南支海风完全取代西支海风的最可能时段,易出现南支海风引起的顺风切变。

如图4b所示,210°~230°风向段频率变率于09:00达到峰值,08:00和10:00为次峰值,因此春季满足条件A的时段大致为08:00—10:00,同理满

足条件 B 与条件 C 的时段分别为 12:00—13:00 及 16:00—17:00。夏、秋季以相同方式分析得出(图 4c、d),具体数值见表 2 所示。三类海风锋型低空

风切变最可能出现时段大致为 08:00—11:00、12:00—15:00 及 15:00—17:00,具体时间在不同季节略有差异。

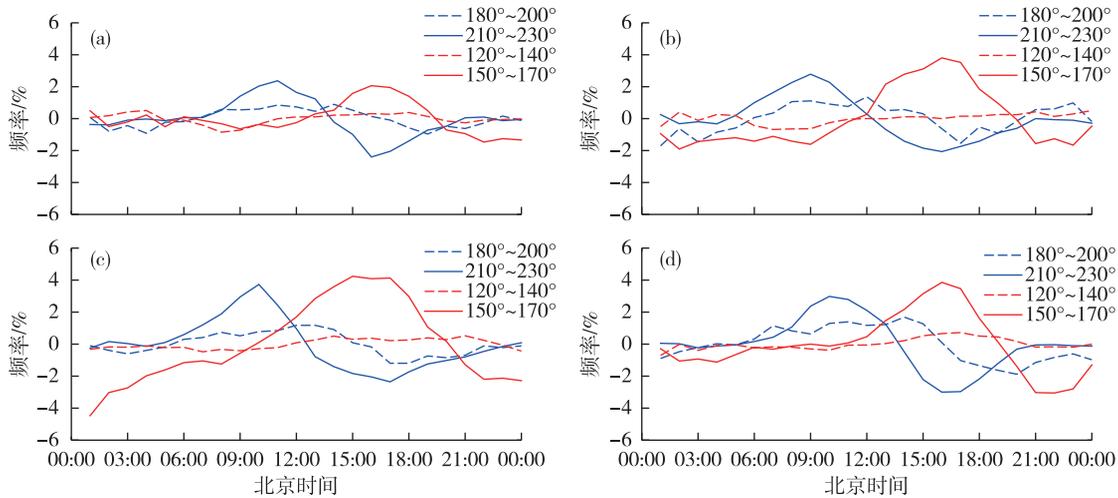


图4 4个风向段(180°~200°、210°~230°、120°~140°和150°~170°)出现频率变率(a.冬季,b.春季,c.夏季,d.秋季)
Fig.4 Same as Fig.2, but for frequency variation

表2 三种类型海风锋型低空风切变在四季最可能出现时间

Table 2 The most probable time of three types of sea breeze frontal low-level wind shear during each season

季节	西支海风锋引起的侧风切变	两支环流相互作用引起的侧风切变	南支海风引起的顺风切变
冬季	—	—	—
春季	08:00—10:00	12:00—13:00	16:00—17:00
夏季	09:00—11:00	12:00—13:00	15:00—17:00
秋季	09:00—11:00	14:00—15:00	16:00—17:00

2.3 海风锋型低空风切变应对建议

随着青岛机场航班量迅速增加^[41],飞机遭遇海风锋型低空风切变的几率随之上升。青岛机场受到两支海风环流共同影响导致低空风切变,是区别于其他机场的显著特点。航空用户可以根据海风锋型低空风切变形成机理,按照各季节最可能发生时段制定预警方案:上午(春季 08:00—10:00,夏、秋季 09:00—11:00),风向突然转为西南风或西南风风速突然增大时,易出现西南侧风引起的低空风切变;中午及午后(春、夏季 12:00—13:00,秋季 14:00—15:00),当地面交替出现西南风和东南风时,易出现左右侧风引起的低空风切变;下午(夏季 15:00—17:00,春、秋季 16:00—17:00),地面风稳定为东南风后,起飞着陆时可能遭遇顺风切变。

需要指出的是,低空风切变的发生通常具有突发性和不确定性,且维持时间很短,对于低空风切变的探测还是一个难题^[7],目前还没有可靠连续的探测数据,飞行员报告风切变有时也有一定的主观

性^[15]。本文依据机场多年地面风场数据统计得出的海风锋型低空风切变季节及日变化规律,是统计上最可能发生的时间。另外,由于缺乏有效的低空风场探测数据,本文分析结果仅限于近地面低空风切变,对于空中情况未来还有待于利用实际探测数据进行进一步验证。

3 结论

利用 2008—2016 年青岛机场地面风场逐时观测数据,通过统计 4 个风向段(180°~200°、210°~230°、120°~140°和 150°~170°)在不同季节出现频率日变化规律及频率日较差,分析了影响机场的海风特征,结论如下:

- 1) 有两支海风环流影响青岛机场,分别为产生于胶州湾的西支海风环流和产生于黄海的南支海风环流。
- 2) 西支海风风向为 210°~230°,一般上午影响机场,午后最强,下午消失。

3)南支海风风向为 $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$,午后影响机场,下午取代西支环流,傍晚发展至最强,夜间逐渐减弱消失。

4)西支环流与南支环流夏季最强,春、秋季次之,冬季最弱,南支环流强度的季节变化强于西支环流。

5)海风对青岛机场飞行的影响主要体现在两支海风引起的三种类型低空风切变,分别为西支海风锋引起的侧风切变、两支海风环流相互作用引起的侧风切变以及南支海风引起的顺风切变。

6)三种海风锋型低空风切变季节及日变化规律为:夏季出现概率最大,春、秋季次之,冬季几乎不会发生;一天中最可能出现时段分别为08:00—11:00、12:00—15:00和15:00—17:00,具体发生时段在各季节略有差异。

参考文献:

- [1] Haurwitz B. Comments on the sea-breeze circulation [J]. *J Meteor*, 1947, 4(1): 1-8.
- [2] Defant F. Local winds [M] // Malone T F. *Compendium of meteorology*. Boston, Massachusetts: AMS, 1951: 655-672.
- [3] Estoque M A. A theoretical investigation of the sea breeze [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1961, 87(372): 136-146.
- [4] Huang W-R, Chan J C L, Wang S-Y. A planetary-scale land-sea breeze circulation in East Asia and the western North Pacific [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2010, 136(651): 1543-1553.
- [5] Chiba O. The turbulent characteristics in the lowest part of the sea breeze front in the atmospheric surface layer [J]. *Bound-Layer Meteor*, 1993, 65(1-2): 181-195.
- [6] 顾问,张晶,谈建国,等.上海夏季海风锋及其触发对流的时空分布和环流背景分析[J].*热带气象学报*, 2017, 33(5): 644-653.
- [7] International Civil Aviation Organization. Manual on low-level wind shear: Doc 9817-AN/449 [R/OL]. 2005. <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2194.pdf>.
- [8] 楚建杰,王新,须剑良,等. MH/T 4016.2-2007 民用航空气象第2部分: 预报[S].北京: 中国民航出版社, 2007: 10.
- [9] 中国民用航空局. 中国民用航空气象工作规则(CCAR-117-R2) [EB/OL]. (2016-03-28) [2018-03-14]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201605/t20160530_37631.html.
- [10] 马有鹏. 兰州机场低空风切变管制指挥应对策略研究[J].*空中交通*, 2017(3): 11-14.
- [11] 蔡丽娜. 东北地区低空风切变统计分析[J].*空中交通*, 2017(5): 46-49.
- [12] 史丹妮,梁升,王伯睿. 首都机场低空风切变时空分布特征及成因分析[J].*空中交通*, 2014(8): 41-43.
- [13] 熊兴隆,杨立香,马愈昭,等. 基于模糊C均值的低空风切变预警算法[J].*计算机应用*, 2018, 38(3): 655-660.
- [14] 穆玉娇,申辉,张静,等. 新津机场一次低空风切变天气过程研究[J].*中国民航飞行学院学报*, 2016, 27(1): 34-36.
- [15] Chan P W. Severe wind shear at Hong Kong International Airport: climatology and case studies [J]. *Meteor Appl*, 2017, 24(3): 397-403.
- [16] Cornman L B. Low-level windshear alert system: US5351045 [P]. 1994-09-27.
- [17] Lee O, Shun CM. Observation of sea breeze interactions at and near Hong Kong International Airport [J]. *Meteor Appl*, 2003, 10(1): 1-9.
- [18] Wood R, Stromberg I M, Jonas PR. Aircraft observations of sea-breeze frontal structure [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1999, 125(558): 1959-1995.
- [19] 李德萍,薛允传,董海鹰,等. 青岛地区气象灾害分析评估[J].*山东气象*, 2013, 33(1): 1-6.
- [20] 张凯静,江敦双,丁锋. 青岛市短时强降水的气候特征和天气系统分型[J].*海洋气象学报*, 2018, 38(1): 108-114.
- [21] 崔宜少,闫景鹏,李强. 山东半岛大风的统计与分析[J].*山东气象*, 2013, 33(1): 22-26.
- [22] 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.
- [23] 杨晓霞,夏凡,杨璐瑛. 山东 WRF 集合概率预报对台风“麦德姆”逐6h精细化预报检验[J].*山东气象*, 2016, 36(3): 20-27.
- [24] 薛德强,郑全岭,钱喜镇,等. 山东半岛的海陆风环流及其影响[J].*南京气象学院学报*, 1995, 18(2): 293-299.
- [25] 黄容,漆梁波,李庆宝,等. 青岛近海夏季海风分型及预报[J].*气象*, 2008, 34(专刊): 223-229.
- [26] 高荣珍,林行,孙贞. 青岛近海夏季海风特征及其预报方法研究[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(5): 699-704.
- [27] 孙贞,高荣珍,张进,等. 青岛地区8月一次海风环流实例分析和WRF模拟[J].*气象*, 2009, 35(8): 76-84.
- [28] 吴增茂,龙宝森. 青岛局地风特征的分析[J].*海洋湖沼通报*, 1993(1): 16-22.
- [29] 常志清,吴增茂,高山红. 青岛海陆风三维结构的数值模拟[J].*青岛海洋大学学报*, 2002, 32(6): 877-883.
- [30] 盛春岩,陈优宽. 2006年8月青岛一次强海风过程“人”字形结构分析[J].*气象*, 2007, 33(8): 35-39.
- [31] Sheng C Y, Xue M, Gao S T. The structure and evolution of sea breezes during the Qingdao Olympics sailing test event in 2006 [J]. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(1): 132-142.

- [32] 李庆宝, 苗世光, 刘学刚, 等. 边界层流场和地形特征对青岛奥帆赛场午后海风影响的研究[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 985-997.
- [33] 马艳, 高荣珍, 苗世光, 等. 城市化对青岛夏季海陆风环流影响的个例分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1690-1696.
- [34] 赵永聚, 郑标. 低空风切变预警预报系统研制及应用情况介绍[J]. 空中交通管理, 2010(2): 47-49.
- [35] 王衍明. 大气物理学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993: 381-385.
- [36] 杨玉玲, 吴永成. 90年代胶州湾海域的温、盐结构[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(3): 31-36.
- [37] 孙松, 孙晓霞, 张光涛, 等. 胶州湾气象水文要素的长期变化[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 632-638.
- [38] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 284-289.
- [39] Dai A, Deser C. Diurnal and semidiurnal variations in global surface wind and divergence fields[J]. J Geophys Res, 1999, 104(D24): 31109-31125.
- [40] Yu R, Li J, Chen H M. Diurnal variation of surface wind over central eastern China[J]. Climate Dyn, 2009, 33(7/8): 1089-1097.
- [41] 房云龙. 重要天气对青岛机场航空飞行的影响研究[J]. 空中交通, 2014(4): 66-68.