

乌鲁木齐国际机场风切变特征及其定量分析

程海艳

民航新疆空管局空管中心气象中心, 新疆 乌鲁木齐
Email: haiyan8693@126.com

收稿日期: 2021年2月9日; 录用日期: 2021年3月8日; 发布日期: 2021年3月16日

摘 要

风切变的预报是航空气象中的一个重点, 但是由于其突发性强、持续时间短且尺度小等特点, 预报难度较大。本研究利用2011~2019年乌鲁木齐机场航空器空中报告、跑道自动观测系统(AWOS)数据对乌鲁木齐机场风切变特征进行分析, 结果表明: 乌鲁木齐机场空中风切变主要发生在1500米以下, 4月和5月是多发时期, 主要发生时段为10:00~17:00, 东南风和强对流天气是造成风切变的两个主要原因。进一步分析AWOS的风数据发现除跑道两端风速差外, 风向差大于30°时跑道两端的风速和可以作为跑道水平风切变是否超过安全阈值的另一个判据。

关键词

低空风切变, 水平风切变, 东南风, 定量分析

Characteristics and Quantitative Analysis of Wind Shear at Urumqi International Airport

Haiyan Cheng

Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang
Email: haiyan8693@126.com

Received: Feb. 9th, 2021; accepted: Mar. 8th, 2021; published: Mar. 16th, 2021

Abstract

The forecast of wind shear is key point in aviation meteorology, but it is difficult to forecast due to its strong suddenness, short duration and small scale. The characteristics of wind shear are analyzed on the basis of aircraft air report and the real-time AWOS data from airport runways at the Urumqi international airport from 2011 to 2019. The results show: the wind shear mainly occurs below 1500 m, in April and May, and 10:00~17:00 in a day, and the southeast wind and strong

convective weather are the two main causes of wind shear. Further analysis of AWOS wind data found that in addition to the difference in wind velocity between two ends of the runway at the same time, the sum of wind speeds at both ends of the runway when the difference in wind direction is greater than 30° can be used as another criterion for whether the horizontal wind shear of the runway exceeds the safety threshold.

Keywords

Low-Level Wind Shear, Horizontal Wind Shear, Southeast Wind, Quantitative Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

风切变是指风向风速突然发生变化的一种现象。航空气象中将发生在 600 米以下的风切变称为低空风切变,它对处于起飞和着陆阶段的航空器危害极大。风切变的预报是航空气象中的一个重点,但是由于其突发性强、持续时间短且尺度小等特点,难以预测。因此,分析风切变的分布特征和发生原因[1] [2] [3],有利于预报员了解风切变最可能发生的高度、位置、成因等,提高风切变预报预警服务的及时性和准确性。

目前监测风切变的主要手段有低空风切变预警系统(LLWAS)、终端区天气雷达(TDWR)、激光测风雷达等[1]。而乌鲁木齐机场目前没有能够直接监测风切变的相关设备,航空器空中报告是空中风切变信息的唯一来源。

乌鲁木齐国际机场自德国引进了一套机场跑道自动观测系统(AWOS),分别安装在距机场东西跑道两端(机场跑道方向为 07/25 方向) 300 m 和距跑道中线(MID) 120 m 处,可为用户实时提供风、温度、湿度等常规的气象资料。张利平等[4]利用 AWOS 的风数据分析了乌鲁木齐机场发生东南大风时跑道水平风切变的特征,发现 AWOS 实时数据能反映跑道贴地层水平风切变的情况,可为乌鲁木齐机场风切变警报提供参考。但是,要实现实时地监测和告警还需以 AWOS 实时数据为基础搭建相应的风切变告警系统。为改善乌鲁木齐机场现阶段无水平风切变告警系统的情况,本文尝试通过统计方法定量分析跑道水平风切变值与 07/25 两端风向、风速的关系,帮助预报员在没有风切变告警系统时快速判断跑道上是否有风切变发生,为风切变的预警和预报提供依据。

2. 数据与方法

空中风切变特征分析所用资料为乌鲁木齐机场 2011~2019 年的 85 份航空器空中报告,根据航空器空中报告的内容可以得到乌鲁木齐机场空中风切变的时间分布特征、高度分布情况以及常见的形成原因。

对于水平风切变的计算,主要采用美国机场低空风切变警报系统的水平风切变强度标准值,跑道水平风切变的分析资料为 2011~2019 年空中风切变日对应的跑道两端 AWOS 的风数据,该风数据为两分钟平均值,时间精度为 15 秒。水平风切变计算方法如下:

$$\beta = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \theta} \quad (1)$$

其中, U_1 、 U_2 分别为跑道两端的风速, θ 为跑道两端的风向差,当水平风切变数值 $\beta \geq 7.7$ m/s [4] (下文称 7.7 m/s 为安全阈值),认为跑道水平风切变值超过安全阈值,可能对飞行造成危害。

3. 风切变特征分析

3.1. 风切变的成因分析

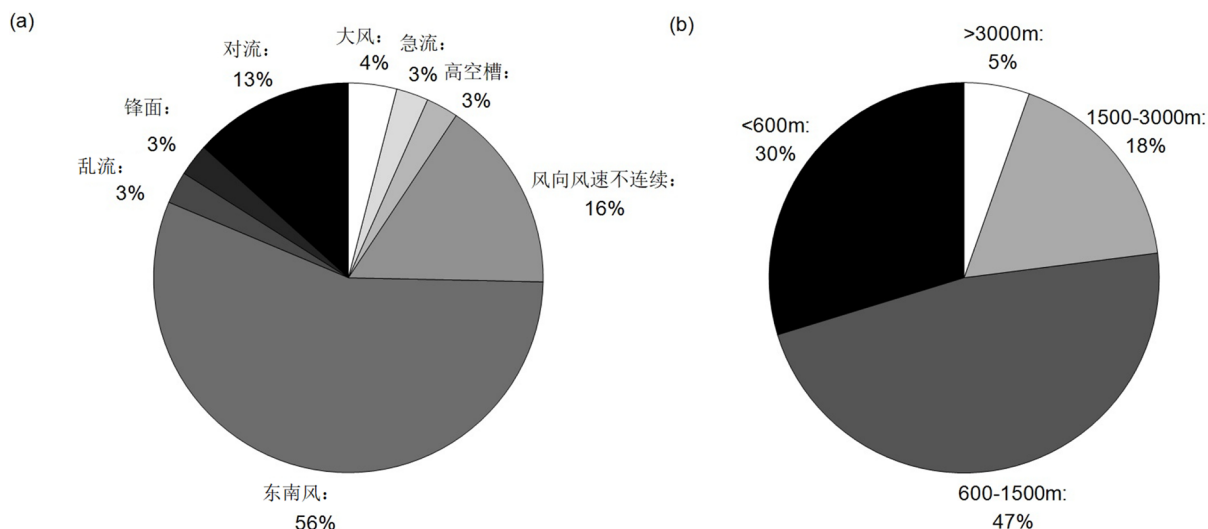


Figure 1. The causes (a) and vertical distribution (b) of wind shear in Urumqi Airport
图 1. 乌鲁木齐机场风切变成因(a)和垂直(b)分布情况

分析风切变的形成原因，能够帮助预报员快速判断在何种天气条件下最易出现风切变。85份航空器空中报告中，有75份详细记录了风切变的形成原因，经统计后可分为以下八类：高空槽、锋面、湍流、急流、大风、对流、风向风速不连续以及东南风型(图1(a))。其中东南风是造成乌鲁木齐机场空中风切变最主要的原因，占了总数的56%。东南风是乌鲁木齐机场特有的一种地域性大风天气，通常风向在 $120^{\circ}\sim 160^{\circ}$ 之间，基本为正侧风(乌鲁木齐机场跑道方向为07/25)，风速较大时，极易超标，从而影响飞机正常起降。另一方面，东南风具有明显的阵性，起始突然，极易造成一定范围内风向和风速的突变，进而产生风切变。冬季，由于低层强烈逆温的存在，东南风很难下传到地面，因此在逆温层顶附近极易出现明显的风速或风向切变。已有研究表明，当1000米以上东南风风速超过 16 m/s 时，就可以预报中度及以上的风切变[2]。风向风速不连续型占到了总数的16%，是引起乌鲁木齐机场风切变的第二大原因。此型是指上下层风向风速的突然变化，这种情况可以出现在有强烈天气发生时，也可以出现在无任何强天气发生的情况下，比较难把握，需要预报员时刻关注垂直方向上风的变化情况。对流型则是引起乌鲁木齐机场风切变的第三大原因，占总数的13%。一般对流天气发生时，对流云体或其下方均存在强烈的上升或下沉气流，紊乱的气流极易产生风切变现象。其余几种类型的占比较小，在3%~4%，不做具体讨论。

3.2. 风切变的垂直分布

85份航空器空中报告中有7份未报告具体高度，有4份为整层均有不同程度风切变，对剩余74份报告分析发现：乌鲁木齐机场的风切变多出现在3000米以下，共有70份，占到总数的95%，如图1(b)，即风切变多发生在起飞和进近着陆阶段。其中，又以1500米以下最甚，共57份，达到了总数的77%，该层次也是比较容易出现空中东南风的层次。对1500米以下风切变的成因进行分析发现：10份对流型风切变和42份东南风型风切变分别有8份和31份发生这个层次。说明对流云和东南风对1500米以下风场的影响最为明显。600米以下层次风切变即低空风切变共22份，占总数的30%。3000米以上的风切变

次数为 4 次, 占总数的 5%, 表明在高空飞行较低空更为平稳。

3.3. 风切变的时间分布

由乌鲁木齐机场风切变的月分布图(图 2(a)), 可知风切变每月均有发生, 除 4 月(19 份)、5 月(14 份)和 9 月(2 份)外分布较为平均。其中, 4 月、5 月是乌鲁木齐机场春季东南大风多发时段[5], 且 5 月雷雨天气逐渐增加, 这是导致 4 月、5 月发生风切变频次较高的一个原因; 而 9 月雷雨天气逐渐结束, 天气相对平稳, 导致风切变次数较少。分析风切变日变化分布图(图 2(b)), 可知, 10:00~17:00 为发生风切变比较多的时段。02:00~06:00 期间无风切变报告, 主要原因是该时段航班量稀少。

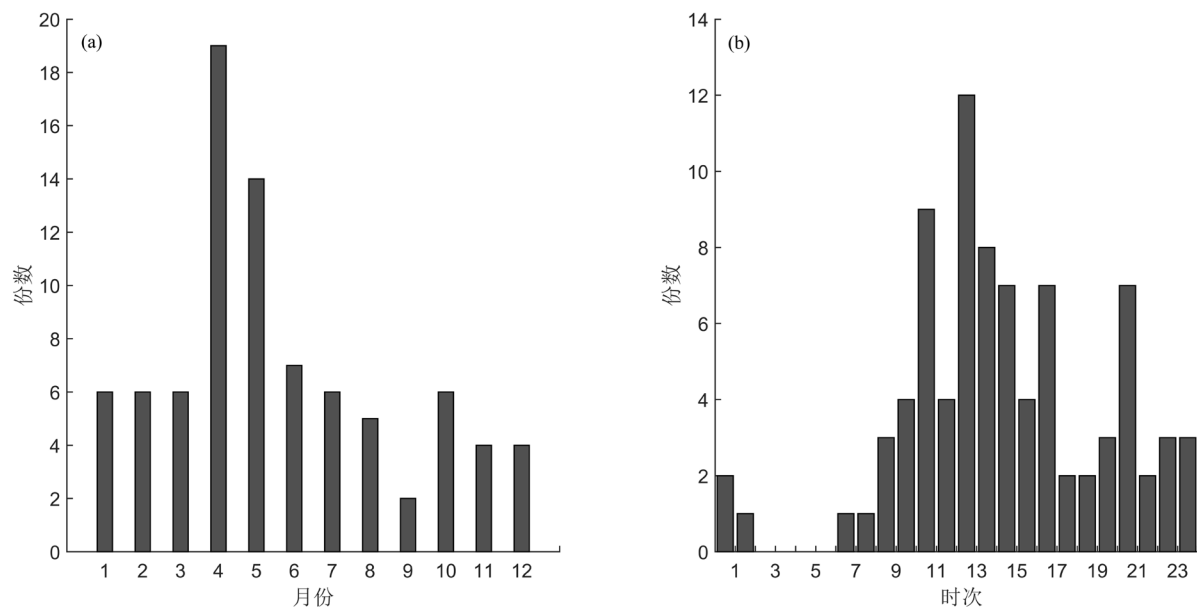


Figure 2. The monthly distribution (a) and daily distribution (b) of wind shear in Urumqi Airport

图 2. 乌鲁木齐机场风切变月分布(a)和日分布(b)情况

4. 跑道水平风切变定量分析

利用乌鲁木齐机场跑道两端 AWOS 数据根据公式(1)计算跑道水平风切变, 共得到 11 个达到的风切变预警标准的样例。其中有 6 个属于东南风型, 3 个属于对流型。对 11 个样本分析发现水平风切变的持续时间与跑道两端风向、风速差异的持续时间密切相关, 短的只有几分钟, 长的可达 1 小时。为了进一步分析水平风切变与跑道两端风向风速的关系, 下文将对对流型和东南风型风切变时跑道两端的风向风速做具体分析, 并在此基础上对跑道水平风切变与跑道两端的风向风速之间的关系做定量分析, 以便日后直接运用于日常工作中。

4.1. 对流型风切变特征

2019 年 7 月 18 日乌鲁木齐机场受对流天气影响, 于 11:40 (北京时, 以下同)前后 07 方向出现 20 m/s 的阵风, 随后开始影响 MID、25 方向跑道, 25 方向在 11:45 前后出现 15 m/s 的偏南阵风, 11:30~13:00 之间收到 2 份关于风切变的航空器空中报告。通过计算风切变值发现在这期间有四个时间段的风切变数值超过了安全阈值, 四个时段分别为: 11:34~11:48、11:54~11:59、12:14~12:15、12:33~12:35, 其中第一份航空器空中报告的报告时间在 11:34~11:48 之间, 通过分析发现这段时间内跑道水平风切变值基本都大于 10 m/s, 最大的风切变值则超过了 17 m/s (图 3(a))。

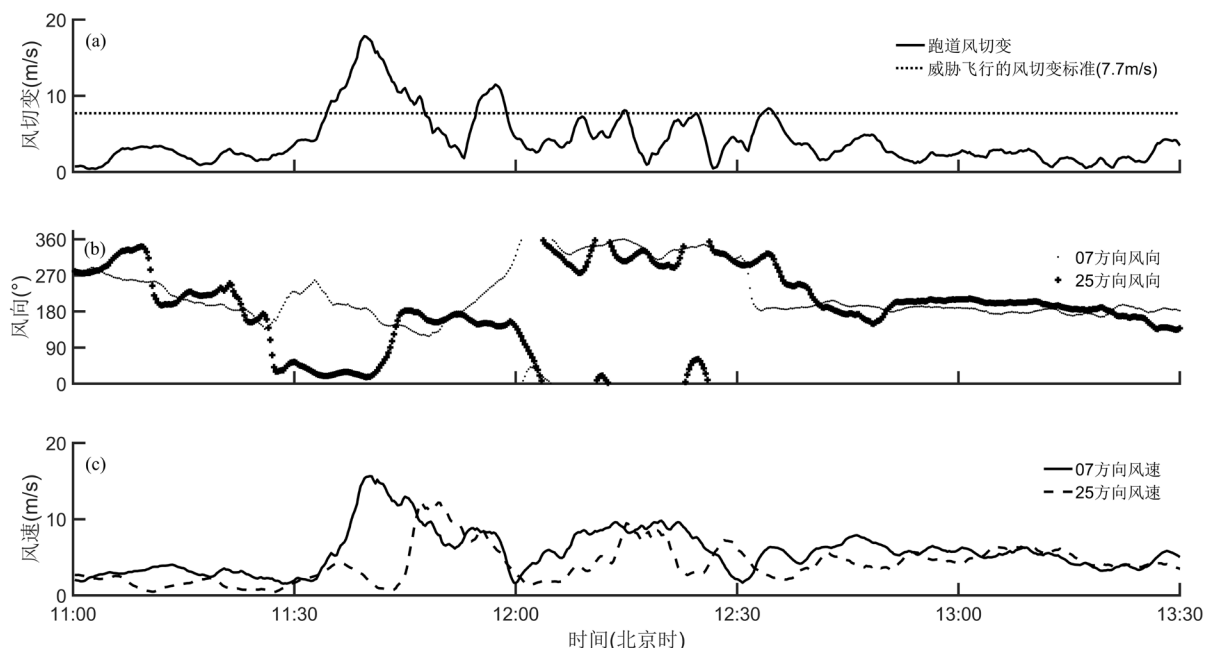


Figure 3. Characteristics of horizontal wind shear and wind direction and speed at both ends of runway of Urumqi airport on July 18, 2019

图 3. 2019 年 7 月 18 日乌鲁木齐机场跑道两端水平风切变及风向风速特征

由图 3 可知, 11:30 左右跑道两端有明显的风向差异, 风向差在 $130^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 之间, 但由于跑道两端风速基本一致且风速较小, 因此没能超过安全阈值。11:35~11:40 之间, 07 方向风速陡增, 风向以偏南风为主, 25 方向的风向风速与之前无明显变化且风速有减小趋势, 跑道两端风向差在 $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 之间, 风速差由 1 m/s 增加至 14 m/s , 在这期间跑道水平风切变也随着两端差异的增加明显增大, 并在 11:40 左右达到最大。11:40 后, 25 方向的风向开始由偏东风转为偏南风, 风速迅速增大, 07 方向风向以东南风为主, 风速逐渐减小, 跑道两端风向差和风速差异逐渐减小, 跑道水平风切变也随之减小, 但由于跑道两端风速都较大, 所以仍然能超过安全阈值。11:47 以后, 跑道两端风速减小, 风向风速变化逐渐同步, 此时水平风切变很少超过安全阈值, 只在少数风向有明显差异或两端风速都明显增加时, 跑道水平风切变才会超过安全阈值。

4.2. 东南风型风切变特征

2019 年 4 月 13 日乌鲁木齐机场出现东南大风天气, 期间 07 方向瞬时最大风速 20 m/s , 并在 11:30~13:00 之间收到 5 份关于风切变的航空器空中报告。通过计算跑道两端水平风切变值发现(图 4(a)), 12:00~13:00 跑道上出现明显水平风切变, 其中 12:20~12:40 水平风切变最强, 20 分钟的平均风切变值为 12 m/s , 最大风切变值 16 m/s 。

由图 4 可知, 12:00 之前, 07 方向和 25 方向均为东北风, 风向在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间, 风速在 5 m/s 左右, 跑道两端风向风速基本没有差异, 跑道水平风切变维持在 1 m/s 左右。12:00 左右, 07 方向风速陡增, 风向开始从东北向偏东/东南方向转换, 25 方向风速和风向则没有明显变化, 跑道两端出现风向、风速的差异, 风切变也随之明显增加, 并超过安全阈值。但是这种情况仅持续两分钟, 12:02, 07 方向的风向由东南风转向偏东/东北风, 风速也有所减小, 跑道两端风向风速差异减小, 水平风切变回到安全阈值以下。12:05~12:20, 07 方向的风向再次转为东南风并稳定维持, 风速则在 8 m/s 附近波动, 25 方向的风向风速仍然没有明显的变化, 跑道两端再次出现较明显的差异, 跑道水平风切变值基本稳定在安全阈值以上。

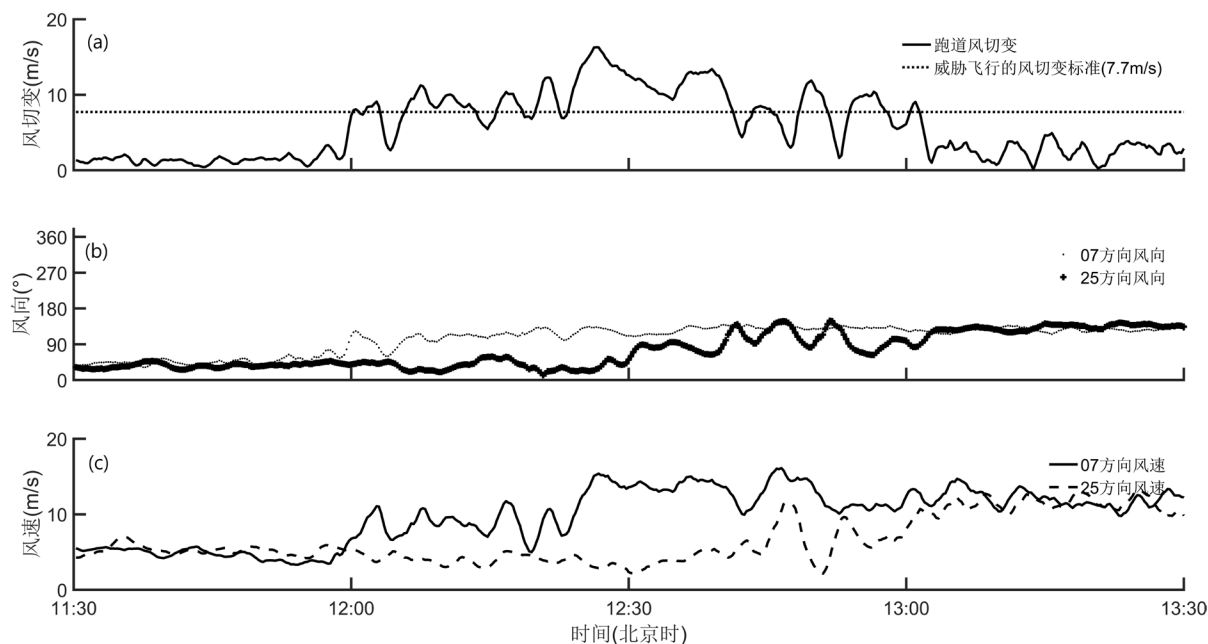


Figure 4. Characteristics of horizontal wind shear and wind direction and speed at both ends of runway of Urumqi airport on April 13, 2019

图 4. 2019 年 4 月 13 日乌鲁木齐机场跑道两端水平风切变及风向风速特征

12:20~12:40, 07 方向的风速再次陡增并稳定在 14 m/s 左右, 风向在 110°~140°之间, 25 方向的风速则在 4 m/s 左右, 风向在 20°~100°之间变化, 在此期间跑道水平风切变的平均值为 12 m/s, 水平风切变达到最大时(16 m/s)的风向差和风速差分别为 110°和 12 m/s。12:40~13:00, 25 方向的风向风速不稳定, 与 07 方向的差异逐渐减小, 仅在风向风速有明显差异时水平风切变值才会超过安全阈值。13:00 之后, 25 方向的风速稳定上升并维持在 11~12 m/s, 风向稳定为东南风, 风向在 120°~140°, 此时 07 方向与 25 方向的风向和风速差异消失, 跑道水平风切变数值在 3 m/s 附近波动。

4.3. 跑道水平风切变的定量分析

通过上述分析可知跑道水平风切变与跑道两端的风向、风速差异有密切关系。为了能更为直观和便捷地在日常工作中利用这种关系判断跑道上是否有水平风切变发生, 图 5 给出了在不同风向差时风切变与风速差的关系。

从图 5(a)可知, 跑道水平风切变与跑道两端风速差的变化趋势基本一致, 两者之间的相关系数为 0.85, 跑道两端的风速差越大, 跑道水平风切变值越大。并且, 当跑道两端风速差大于 7.7 m/s 时, 跑道水平风切变就会超过安全阈值(图 5(a)、表 1)。这一现象在跑道两端风向基本一致时(图 5(b))尤为明显, 即当跑道两端风向一致时, 跑道水平风切变基本由跑道两端的风速差决定。但进一步分析发现, 当跑道两端风向的差异超过 30°时, 即使跑道两端风速差只有 1 m/s, 也会出现跑道水平风切变超过安全阈值的情况。因此, 对所有风向差超过 30°的数据进行了统计分析, 发现当风向差大于 30°时跑道两端的风速和可以作为是否超过安全阈值的另一个判据。

表 1 第二行给出了当跑道两端的风向差超过 30°时, 跑道水平风切变值超过安全阈值所需的条件。仅从计算风切变的公式出发, 当 $\theta = 180^\circ$ 时, 水平风切变公式可简化成是风速和的函数。这时, 只需跑道两端的风速和大于 7.7 m/s, 水平风切变值即可超过安全阈值。考虑到 AWOS 显示界面风速为整数, 所以将这个临界值取为 8 m/s。为了扩大样本量, 将 85 个风切变日的 AWOS 数据均作为筛查对象, 共得到 108,865

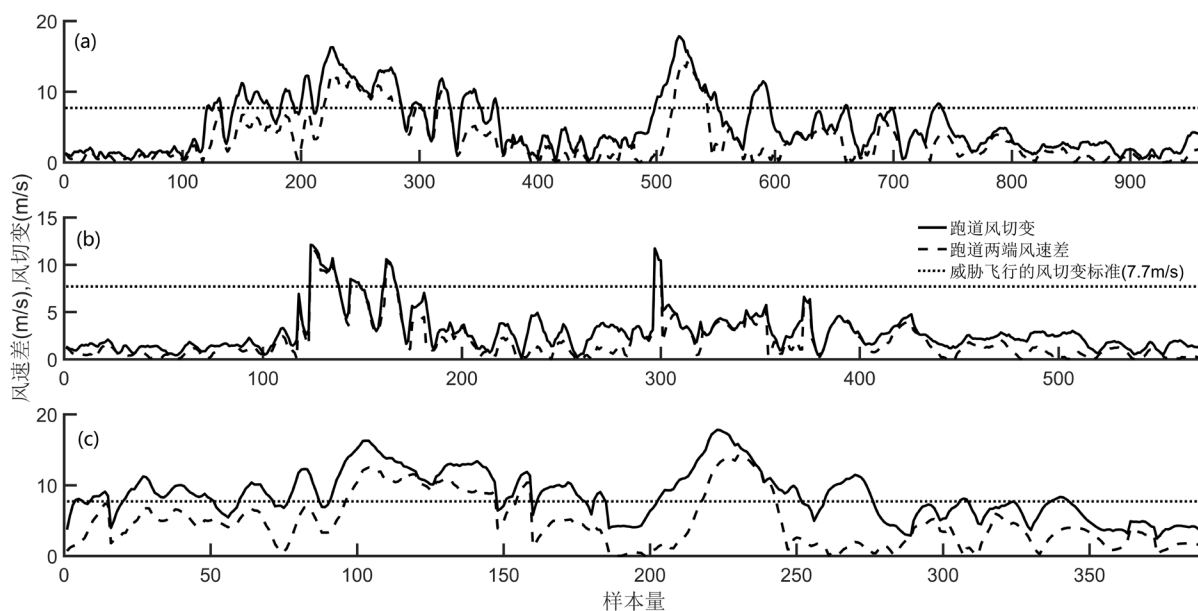


Figure 5. The relationship between runway horizontal wind shear and wind speed difference under different wind direction: (a) $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$, (b) $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$, (c) $30^{\circ}\sim 180^{\circ}$

图 5. 不同风向差时跑道水平风切变与风速差的关系(a) $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$, (b) $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$, (c) $30^{\circ}\sim 180^{\circ}$

个风速和大于 8 m/s 的数据, 然后找出其中水平风切变值低于安全阈值的数据(108,041), 最后找到低标准数据中风向差的最大值(110°), 认为当风向差大于最大值时, 风切变便能超过安全阈值, 对飞行安全造成影响, 以此方法得到了表 1 中风向差与风速和的关系。

Table 1. A short-sheet of strong runway horizontal wind shear

表 1. 强烈跑道水平风切变速查表

风向差/ $^{\circ}$	0~30	40	50	60	70	80	90	100	120~180
风速差/m/s					7.7				
风速和/m/s	-	22	18	14	13	11	10	9	8

由上述分析可得, 日常工作中可以通过两种途径判断是否有强烈水平风切变发生: 1) 跑道两端风速差大于 7.7 m/s ; 2) 当跑道两端风向差大于 30° 时, 除风向差外还可利用风速和作为判据, 例如: 当跑道两端风向差大于等于 120° 时, 跑道两端的风速和只要大于 8 m/s , 跑道水平风切变就能超过安全阈值, 当跑道两端风向差大于等于 100° , 且跑道两端风速和大于 9 m/s 时, 水平风切变便能超过安全阈值, 以此类推。在没有安装相关风切变告警系统时, 强烈跑道水平风切变速查表(表 1)可以作为快速判断跑道上是否有强烈风切变发生的依据。

5. 结论和讨论

文章通过分析 2011~2019 年航空器空中报告以及对应的 AWOS 风数据, 得到如下结论:

1) 乌鲁木齐机场空中风切变多由东南风和对流天气引起, 主要出现在起飞和进近着陆阶段, 以 1500 米以下最为集中, 占到了总数的 77%;

2) 乌鲁木齐机场空中风切变每月均有发生, 其中 4 月、5 月出现次数最多, 9 月最少, 风切变主要发生于 10:00~17:00;

3) 当跑道两端风速差大于 7.7 m/s 时, 跑道水平风切变值就会超过安全阈值; 但当跑道两端的风向差大于 30°时, 即使跑道两端风速差很小, 跑道水平风切变也会超过安全阈值; 此时, 可根据跑道两端的风速和来判断跑道水平风切变值是否超过安全阈值, 如: 当跑道两端风向差大于等于 120°时, 只要风速和大于 8 m/s, 跑道水平风切变值就会超过安全阈值出现强烈风切变, 对飞行造成威胁。

参考文献

- [1] 南博文, 邢杉, 巩敏莹. 基于航空器报告的西安机场风切变分析与预警[C]//中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 中国气象学会: 中国气象学会, 2016: 3.
- [2] 王春红. 乌鲁木齐机场东南大风的低空风切变特征及飞行安全保障[J]. 空中交通管理, 2001(5): 34-37.
- [3] 汪青春, 王振宇, 朱西德, 戴升, 张成昭, 李海红. 青海省三江源机场低空风切变的初步分析[J]. 青海气象, 2008(3): 1-6.
- [4] 张利平, 王春红. 乌鲁木齐机场东南大风过程温压湿及水平风切变特征[J]. 气象科技, 2007(5): 719-722.
- [5] 杨洪儒, 王楠. 地窝堡机场东南大风特征及其大气结构[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 393-398.