

西南地区飞机颠簸的时空分布特征及成因探讨

张亚男^{1,2}, 罗 娅^{1,2}, 陈义义^{1,2}, 徐雯雯^{1*}, 黄金全², 李俊瑶², 周海波¹

¹中国民用航空飞行学院, 中国气象局航空气象重点开放实验室, 四川 广汉

²中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年6月28日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年7月31日

摘 要

利用2008年3月~2024年3月西南地区航空器空中报告, 对西南地区飞机颠簸的特征和成因进行了探讨, 得出以下结论: (1) 西南地区飞机颠簸的发生次数总体上呈现上升趋势, 飞机颠簸冬春季发生次数多, 夏秋少, 白天多, 早晚少; (2) 颠簸强度以中度颠簸为主, 而冬春季相较夏秋季更容易出现中度及以上的颠簸; (3) 海拔较低的四川盆地和重庆地区颠簸主要发生在[2100, 6300) m, 位于云贵高原东部的贵州地区颠簸主要出现在[4200, 6300) m, 海拔更高的云南及西藏地区的颠簸则主要位于6300 m以上; (4) 高空急流是飞机颠簸的主要原因, 对应高度主要分布在4200 m以上的中高层, 高空槽对应的飞机颠簸集中在中层[4200, 6300) m, 低空急流和中低层切变线造成的颠簸主要在低层[2100~4200 m)。

关键词

飞机颠簸, 西南地区, 时空分布, 航空器报告

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Causes of Aircraft Turbulence in Southwest China

Yanan Zhang^{1,2}, Ya Luo^{1,2}, Yiyi Chen^{1,2}, Wenwen Xu^{1*}, Jinquan Huang², Junyao Li², Haibo Zhou¹

¹China Meteorological Administration Key Laboratory for Aviation Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan

²Guizhou Branch of Southwest China Regional Administration of Civil Aviation Air Traffic Management Bureau, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 28th, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Jul. 31st, 2025

Abstract

Based on aircraft in-flight reports from March 2008 to March 2024 in the Southwest region, the

*通讯作者。

文章引用: 张亚男, 罗娅, 陈义义, 徐雯雯, 黄金全, 李俊瑶, 周海波. 西南地区飞机颠簸的时空分布特征及成因探讨[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 853-862. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144085

characteristics and causes of aircraft turbulence in this area were explored, and the following conclusions were drawn: (1) The occurrence of aircraft turbulence in the Southwest region generally shows an upward trend. Turbulence occurs more frequently in winter and spring, less in summer and autumn, more during the day, and less in the early morning and evening. (2) Moderate turbulence is the predominant intensity. Compared with summer and autumn, winter and spring are more prone to moderate and above turbulence. (3) In the Sichuan Basin and Chongqing area with lower altitudes, turbulence mainly occurs in the range of [2100, 6300) m. In Guizhou area located in the eastern part of the Yunnan-Guizhou Plateau, turbulence mainly appears in the range of [4200, 6300) m. In Yunnan and Tibet areas with higher altitudes, turbulence is mainly located above 6300 m. (4) The jet stream is the main cause of aircraft turbulence, with the corresponding heights mainly distributed in the middle and upper layers above 4200 m. Turbulence associated with the trough of low pressure is concentrated in the middle layer [4200, 6300) m. Turbulence caused by low-level jet and low-level shear line mainly occurs in the lower layer [2100~4200) m.

Keywords

Aircraft Turbulence, Southwest Region, Spatiotemporal Distribution, Aircraft Report

Copyright © 2025 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/>



Open Access

1. 引言

飞机颠簸是飞机在飞行过程中遇到水平尺度在 0.1 至 1 公里的大气湍流时,产生的不规则振动,这种现象也被称为飞机尺度湍流[1],飞机颠簸不仅会导致乘客感到不适,引发心理压力,增加人员受伤的风险,还可能影响飞行员的操作,导致航班延误,严重时甚至造成飞机设备损坏,引发重大安全事故,威胁飞行安全[2]。对于飞机颠簸特征的研究,黄仪方等[3]据机载快速存储记录器(QAR)记录的飞机过载数据分析了中国高原重要航线飞机颠簸分布规律,发现云贵高原航线比青藏高原航线发生颠簸概率更大;阿利曼等[4]统计了中国东部高空颠簸的时空分布,并探究了颠簸与高空急流和海温异常的关系以及产生这种关系的可能原因;赵懋如等[5]利用语音方式航空器空中报告研究了 2009 年中国大陆飞机颠簸的统计特征以及主要的天气系统,表明和颠簸报告相关的天气系统以急流为主;吴炎成等[6]统计了 10 年来中国周边海域飞机颠簸的时空特征和变化规律,指出 6 月份最容易发生颠簸,并且随着风速的增大发生颠簸的概率也增加。对于飞机颠簸成因的研究,李子良等[7]通过中尺度数值模式 ARPS 模拟气流过山,表明气流过山产生的山脉重力波由于风切变临界层破碎,能在对流层产生较强的湍流引起晴空飞机颠簸,俞飞等[8]将造成华北地区晴空颠簸的天气形势分为高空急流型、高空槽线型、切变线型和高空脊型,并指出温度平流通过在高空急流附近的等温线密集区边缘所激发出的垂直运动将引起飞机颠簸。黄仪方等[9]统计和分析了我国高原地区产生飞机颠簸的大尺度云系的出现和分布规律,发现高空急流云系、未闭合的细胞状云系、山地波中的波状云系和积云线是造成飞机颠簸的主要云系;袁媛等[10]研究表明,四川盆地西北地区 850 hPa 以下存在逆温层以及风向的切变容易产生飞机颠簸。此外,还有其他学者[11]-[16]对飞机颠簸的预报技术和方法进行了研究,对提高飞机运行安全、优化飞行路径规划以及减少因颠簸导致的经济损失具有重要意义。

尽管已有众多研究对飞机颠簸的特征和成因进行了探讨,但针对西南地区这一特殊地理环境下的飞机颠簸研究仍存在不足。西南地区地形起伏较大,高原、山地、盆地等地形相互交错,同时受季风、高原

气象系统以及复杂地形的影响, 大气环流特征复杂多变, 该地区飞机颠簸的时空分布规律与我国其他地区也存在差异。因此, 对西南地区飞机颠簸的时空分布特征及成因展开系统研究, 仍具有重要的理论与现实意义。

2. 资料和处理

本文使用的资料为中国民用航空局空中交通管理局航空气象中心提供的航空器空中报告(Pilot Reports, PTREPs), 时间段为 2008 年 3 月~2024 年 3 月。PTREPs 资料是飞行员在飞行过程中对空中气象条件、飞行状况以及其他与飞行安全相关的信息进行的实时报告, 包括航空器在飞行途中遇到颠簸、积冰、低空风切变等危害天气, 这些信息由飞行员通过语音方式向管制席位报告, 内容包括危险天气的发生时间、具体位置、飞行高度、航班号、机型等关键信息, 管制席位收到报告后会及时通报气象人员, 由气象人员整理并对外发布。PTREPs 资料是当前民用航空观测体系的重要补充, 为飞行安全和气象预报提供了重要的实时数据支持, 在对中国上空飞机颠簸的研究上也具有较好的可行性[17]。

本文主要使用 PTREPs 资料中的颠簸报告, 包括飞机颠簸的时间、位置、强度及高度, 其中时间为北京时间; 颠簸强度参考《国际空中航行气象服务》中的标准分为轻度、轻到中度、中度、中度到严重、严重; 高度为修正海平面气压高度, 它是指以海平面气压调整高度表数值为零, 上升至某一点的垂直距离。对于颠簸发生的位置则有多种表达方式, 需要将其统一成经纬度的表达, 如“泽当附近”, 则取用泽当的经纬度; “资阳 140°径向线 25 公里”, 则以资阳经纬度为标准点, 根据 140°的方位角及 25 km 的距离计算颠簸的经纬度; 若位置描述不清晰, 如“本场 P544 以西”、“纂江-SABED 航段”、无位置描述信息, 以及位置描述点因保密规定无法查找到经纬度, 则剔除该样本。2008 年 3 月~2024 年 3 月西南地区收到颠簸报告共计 6539 份, 通过逐一筛选, 最终得到样本 5236 份。

3. 飞机颠簸的特征分析

3.1. 飞机颠簸的年、月、日变化

从飞机颠簸的年变化可以看到(图 1(a)), 2008 年至 2024 年西南地区飞机颠簸的发生次数总体呈现上升趋势, 2018 年是一个显著的转折点, 颠簸次数从 2017 年的 52 次猛增到 735 次, 2008~2017 年平均每年发生 81 次颠簸, 而 2018~2024 年颠簸年平均发生次数增加至 632 次; 极小值出现在 2008 年, 为 13 次, 极大值出现在 2018 年, 为 735 次。从逐月的分布可见(图 1(b)), 飞机颠簸次数随月份变化先减小后增加, 1 月和 2 月是飞机出现颠簸的高频月份, 分别占比 19.8%(1039 次)和 19.5%(1021 次); 6~9 月飞机颠簸发生的次数较少, 在 120 次左右(2%), 总体来看飞机颠簸冬春季发生次数多, 夏秋少。从一天 24 小时的飞机颠簸次数统计来看(图 1(c)), 颠簸事件的频率呈现出明显的日变化特征, 在 00 时至 05 时期间, 颠簸次数相对较低, 占全天总数的 4.7%; 从 05 时开始, 随着航班早高峰的开始, 颠簸次数开始迅速增加, 从 57 次增加至 114 次; 白天颠簸次数略有波动, 但整体仍处于较高水平, 平均每个时次 285 次; 晚上 22 时开始颠簸次数开始下降, 随后逐渐减少。

3.2. 飞机颠簸的强度及高度特征

图 2 为 2008~2024 年西南地区所有样本及不同季节飞机颠簸强度和高度分布情况。从所有样本飞机颠簸的强度分布可见(图 2(a)), 轻度和轻-中度颠簸出现的次数较少, 分别为 158 次(3%)和 414 次(8%), 发生频率相对较低; 相比之下, 中度颠簸的次数高达 3039 次, 占据了 58%的比例, 说明中度颠簸是最为常见的颠簸类型; 中度-严重(844 次)和严重(781 次)的颠簸出现次数高于轻度和轻-中度, 并且远低于中度颠簸, 但两者总占比达到 31%, 说明在某些情况下飞机也有较大几率遇到剧烈颠簸。从所有不同季

节飞机颠簸的强度分布可见(图 2(b)), 各个季节中颠簸强度多集中在中度, 其次为中度以上的强度, 中度以下强度的颠簸出现次数较少。对于不同的强度等级, 各个季节颠簸发生的频次存在些许区别, 对于轻度颠簸, 春季出现的频率相对较大(5%), 冬季则较少(2%); 对于轻-中度颠簸, 夏季和秋季出现的频率均为 10%, 而春季和冬季出现的频率分别为 9%和 7%; 秋季和夏季出现中度颠簸的频率分别高达 62%和 61%, 春季和冬季出现中度颠簸的频率虽然相对较小, 分别为 58%和 56%, 但出现中-严重的颠簸频率却高于秋季和夏季, 依次为 18%、15%、13%和 11%, 说明冬春季更容易出现强度大的颠簸。

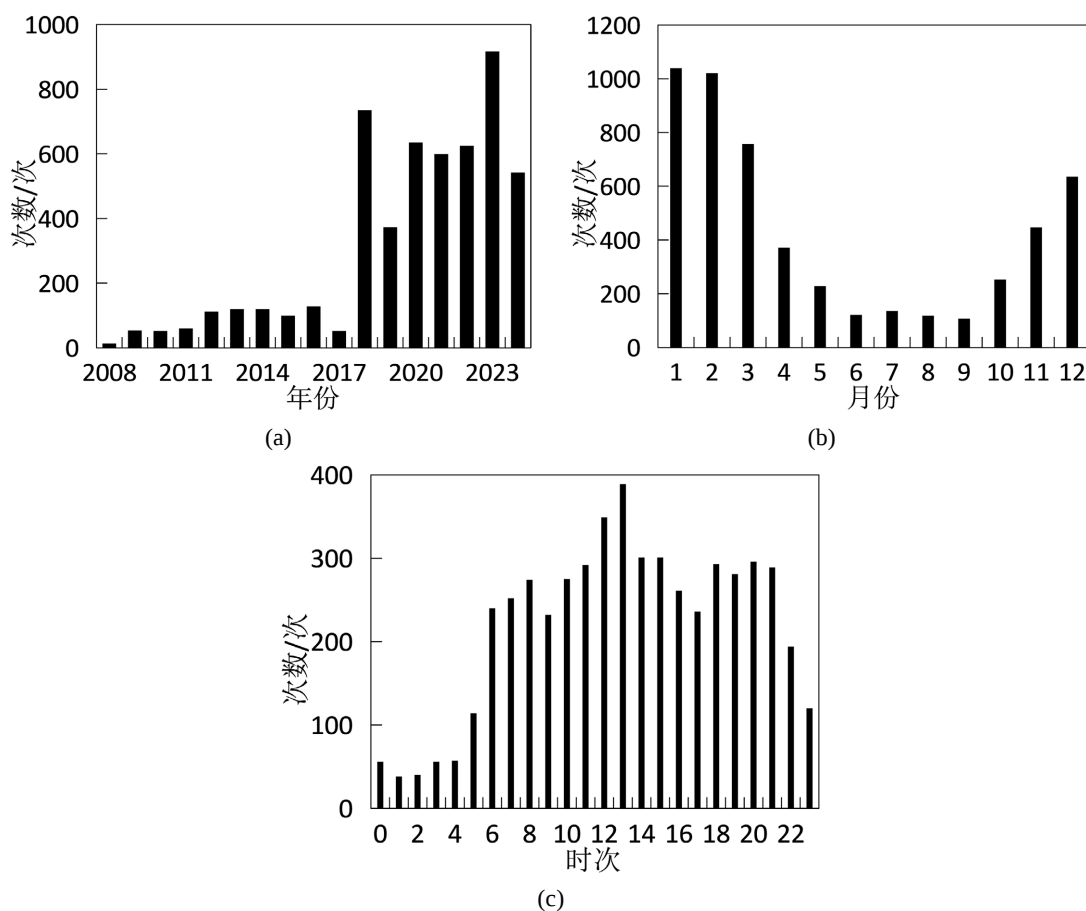
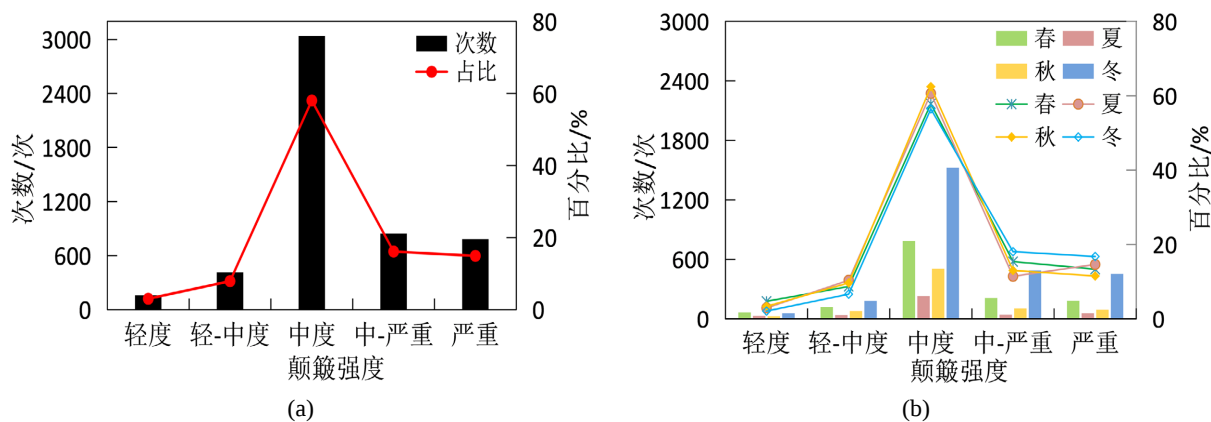


Figure 1. Distribution of aircraft turbulence in the Southwest region from 2008 to 2024. (a) Annually, (b) Monthly, (c) Hourly
图 1. 2008~2024 年西南地区飞机颠簸。(a) 逐年、(b) 逐月、(c) 逐时分布



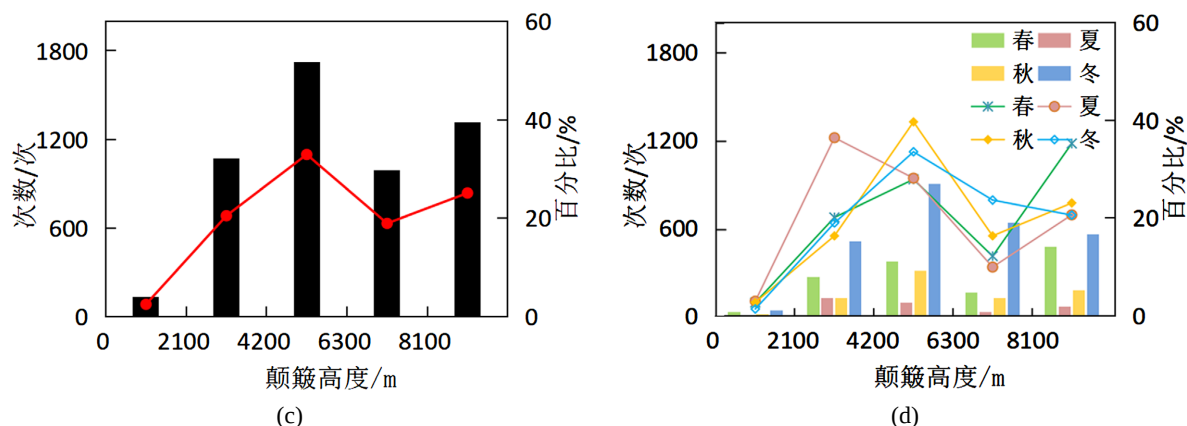


Figure 2. Distribution of aircraft turbulence altitudes in the Southwest region from 2008 to 2024. (a) for all samples, (b) for different seasons, and distribution of aircraft turbulence altitude (c) for all samples, (d) for different seasons

图 2. 2008~2024 年西南地区飞机颠簸高度分布。(a) 所有样本、(b) 不同季节飞机颠簸强度分布和(c) 所有样本、(d) 不同季节

从颠簸发生的高度来看(图 2(c)),随着高度的增加,飞机颠簸次数先增后减再增;颠簸发生在 2100 m 以下的次数明显较少,占比仅有 3% (132 次),4200~6300 m 之间飞机出现颠簸的次数最多,为 1724 次(占比 33%);8100 m 以上高度颠簸的频率也相对较大,占比 25% (1315 次),2100~4200 m 和 6300~8100 m 飞机颠簸的几率差别不大,分别为 20%和 19%,总体来看,飞机颠簸次数在不同高度表现出明显的波动性,低层的颠簸次数显著偏少于中高层。对于不同季节飞机颠簸的高度则呈现明显的季节特征,春季在 2100 米以下高度时,颠簸次数为 43 次(3%),相对较少,而在 8100 米高度时,春季的颠簸次数达到 482 次(36%),是所有高度中最高的,这表明春季飞机更容易在较高高度出现颠簸;对于夏季,颠簸次数最大值出现 2100~4200 m,为 138 次(37%),远高于同等高度的其他三个季节,其次为 4200~6300 m (107 次, 28%),说明夏季中等高度的颠簸较为频繁;秋季时飞机在 4200~6300 m 高度颠簸次数为 322 次,占比高达 40%,是所有季节中该高度最高的;对于冬季,颠簸次数在除了 2100 m 以下(占比 2%)的其他高度上均普遍较高,依次为 522 次(19%)、912 次(34%)、647 次(24%)、565 次(21%)。从颠簸发生的高度来看(图 2(c)),随着高度的增加,飞机颠簸次数先增后减再增;颠簸发生在 2100 m 以下的次数明显较少,占比仅有 3% (132 次),4200~6300 m 之间飞机出现颠簸的次数最多,为 1724 次(占比 33%);8100 m 以上高度颠簸的频率也相对较大,占比 25% (1315 次),2100~4200 m 和 6300~8100 m 飞机颠簸的几率差别不大,分别为 20%和 19%,总体来看,飞机颠簸次数在不同高度表现出明显的波动性,低层的颠簸次数显著偏少于中高层。对于不同季节飞机颠簸的高度则呈现明显的季节特征,春季在 2100 米以下高度时,颠簸次数为 43 次(3%),相对较少,而在 8100 米高度时,春季的颠簸次数达到 482 次(36%),是所有高度中最高的,这表明春季飞机更容易在较高高度出现颠簸;对于夏季,颠簸次数最大值出现 2100~4200 m,为 138 次(37%),远高于同等高度的其他三个季节,其次为 4200~6300 m (107 次, 28%),说明夏季中等高度的颠簸较为频繁;秋季时飞机在 4200~6300 m 高度颠簸次数为 322 次,占比高达 40%,是所有季节中该高度最高的;对于冬季,颠簸次数在除了 2100 m 以下(占比 2%)的其他高度上均普遍较高,依次为 522 次(19%)、912 次(34%)、647 次(24%)、565 次(21%)。

3.3. 飞机颠簸的空间分布特征

图 3 为 2008~2024 年西南地区飞机颠簸空间分布情况,图 3(a)显示了 5236 个颠簸样本的分布,可以看到西南地区颠簸发生的高频区域主要在四川东部和贵州中部,云南区域的颠簸位置主要集中在省中部地区,而西藏的颠簸区则分布在拉萨附近。总的看来,大部分点的颠簸次数都在 10 次以下,各省的颠簸区域主要

集中在省会附近区域,其中四川成都附近最易出现颠簸重复点,颠簸次数在50次及以上的点是西南地区最多的,而贵州区域颠簸重复点则相对较少。对于不同高度上的飞机颠簸分布,西南地区2100 m以下的颠簸较少,主要出现在四川盆地(图3(b));[2100,4200) m和高度上颠簸主要出现在四川东部及贵州中部(图3(c)),尤其是四川盆地,颠簸发生的次数显著增加,而云南和西藏等海拔较高的地区颠簸次数增加不明显;[4200,6300) m高度上云贵地区的颠簸有所增加(图3(d)),尤其是贵州中部,云南东部的颠簸也明显增加;[6300,8100) m西南地区东部的颠簸次数减少(图3(e)),而高海拔的西藏和云南中西部地区颠簸次数增加;高度 ≥ 8100 m时(图3(f)),云南区域和川藏航路上的颠簸次数增多。总的来看,颠簸发生的频次与海拔高度有关,海拔较低的四川盆地和重庆地区颠簸主要发生在[2100,6300) m,位于云贵高原东部的贵州地区颠簸主要出现在[4200,6300) m,海拔更高的云南及西藏地区的颠簸则主要位于6300 m以上。

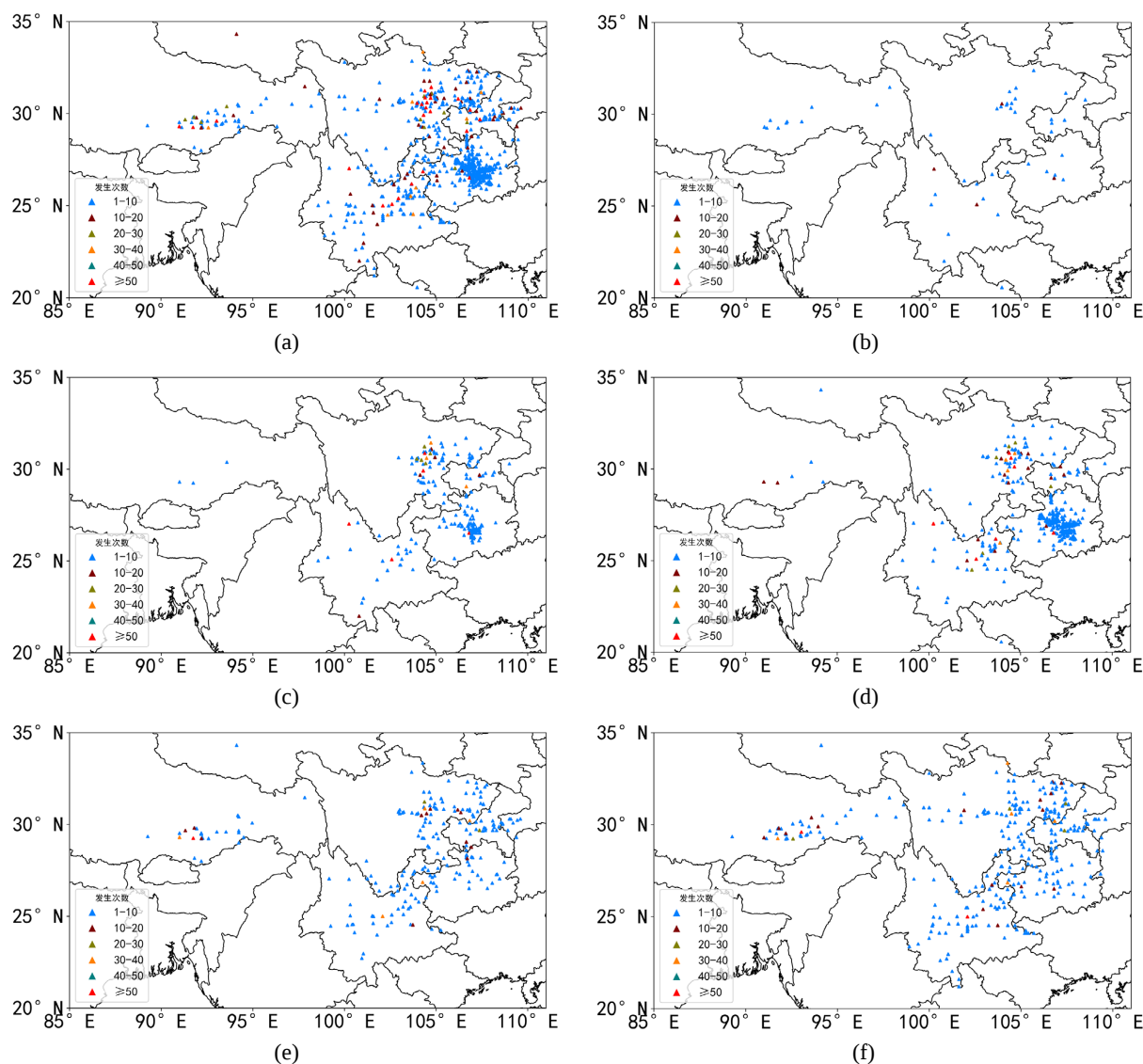


Figure 3. Spatial distribution of aircraft turbulence at different altitudes in the Southwest region from 2008 to 2024. (a) All altitudes, (b) Altitude < 2100 m, (c) Altitude [2100, 4200) m, (d) Altitude [4200, 6300) m, (e) Altitude [6300, 8100) m, (f) Altitude ≥ 8100 m

图 3. 2008~2024 年西南地区不同高度飞机颠簸空间分布。(a) 所有高度, (b) 高度 < 2100 m, (c) 高度[2100, 4200) m, (d) 高度[4200, 6300) m, (e) 高度[6300, 8100) m, (f) 高度 ≥ 8100 m

对于不同季节飞机颠簸的分布(图 4), 总体上看冬春季节是颠簸发生的频发季节, 夏秋季发生的频次相对较低。四川中部区域在春、秋、冬季发生颠簸的频次均较高, 川西颠簸频发季节则在春季; 贵州区域的颠簸主要发生在冬春季, 其次是秋季, 春季发生的次数较少且分布比较分散; 云南地区春季颠簸主要出现在云南中东部, 夏季颠簸出现的频率较低, 秋季主要出现在滇中地区, 而冬季滇西地区出现颠簸的频次相较其他季节更高; 川藏航路在夏季几乎很少出现颠簸, 而春季航路上出现的颠簸的概率相对较大。

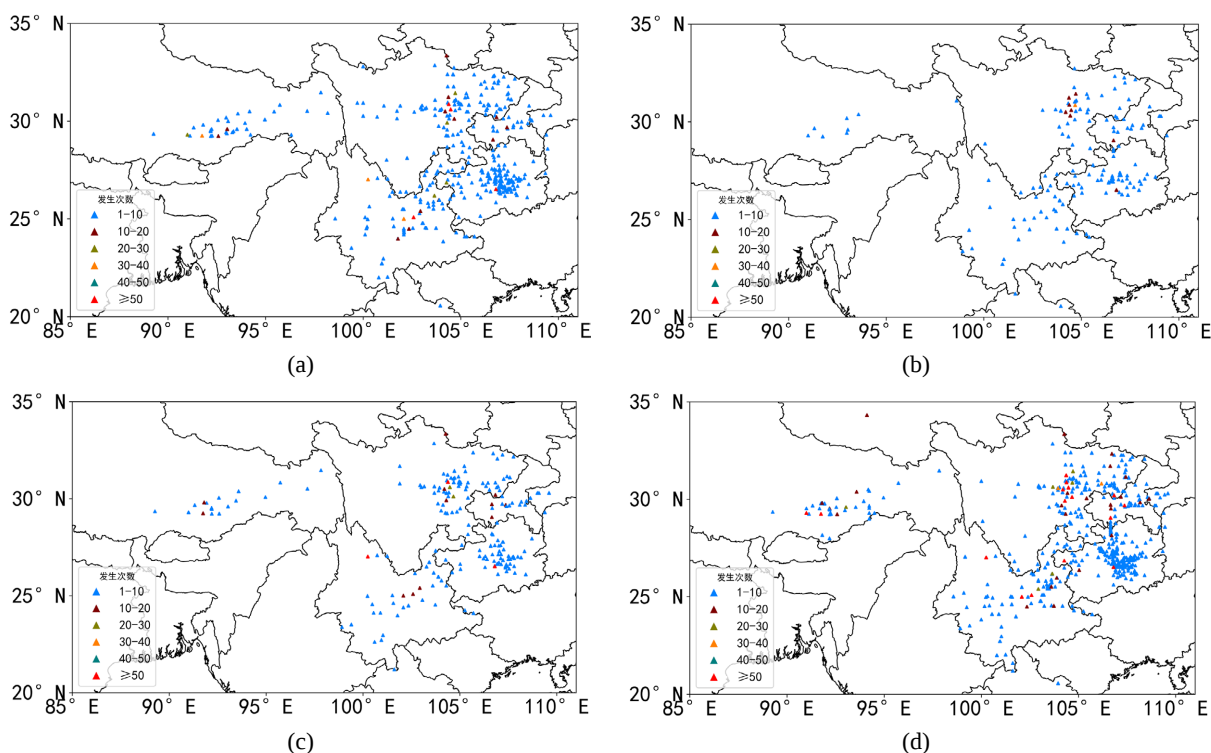


Figure 4. Spatial distribution of aircraft turbulence in the Southwest region during different seasons from 2008 to 2024. (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, (d) Winter

图 4. 2008~2024 年西南地区不同季节飞机颠簸空间分布。(a) 春, (b) 夏, (c) 秋, (d) 冬

4. 西南地区飞机颠簸的成因分析

2008~2024 年西南地区飞机颠簸样本数 5236 个, 记录颠簸影响系统的样本 4591 个, 从影响西南地区飞机颠簸的主要天气系统来看, 低空急流、对流云、高空槽、高空急流、以及中低层切变是造成西南地区飞机颠簸的主要因素。

从图 5 可见, 64% 的飞机颠簸是高空急流引发的, 高空急流也是晴空颠簸的主要诱因之一。高空急流是指在对流层上部或平流层中, 风速达到或超过 30 米/秒的强而窄的气流带, 其风速变化剧烈, 当飞机穿越急流区域时, 不同高度和位置的明显风速切变将使飞机受到不规则的气流冲击从而引发大气湍流的产生, 导致飞机颠簸, 此外在高空急流区边缘, 冷暖平流交汇的梯度带存在上升和下沉气流的转换区, 极易产生飞机颠簸。从飞机颠簸的高度分布来看(图 6), 高空急流下的飞机颠簸主要在 4200 m 以上, [4200, 6300) m 占比 32%, [6300, 8100) m 占比 26%, 而 8100 m 以上占比 28%。

高空槽和对流云引发的飞机颠簸均占比 11% 高空槽主要活动在对流层中层的西风带上, 槽前后的风向切变大, 风速辐合较强, 此外高空槽区伴随着冷暖平流, 槽前附近低层常有锋生现象, 明显的温度切变也

会导致空气的不稳定性[8], 高空槽造成的颠簸高度主要集中在[4200, 6300) m, 占比高达 73%。对流云通常伴随着强烈的天气现象, 如雷暴、强风、冰雹等, 其内部存在强烈的垂直气流和湍流造成飞机颠簸, 颠簸高度比较分散, [2100, 4200) m 和[4200, 6300) m 分别占比 34%和 31%, 8100 m 以上占比也有 22%。

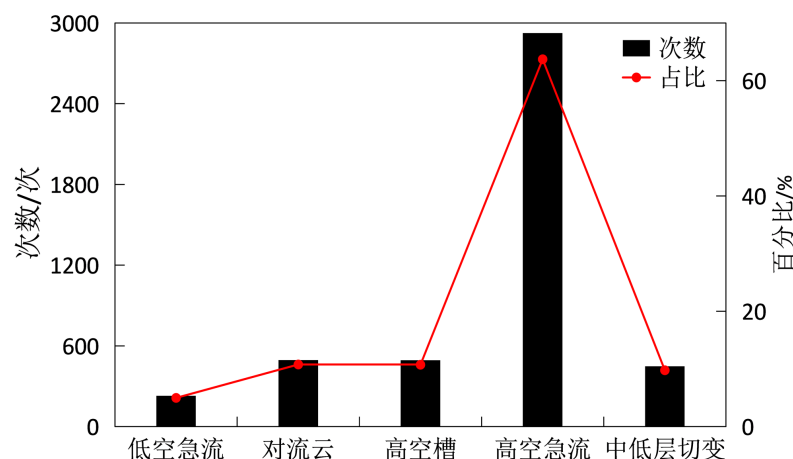


Figure 5. Distribution of weather systems affecting aircraft turbulence in the Southwest region from 2008 to 2024
图 5. 2008~2024 年西南地区飞机颠簸影响系统分布

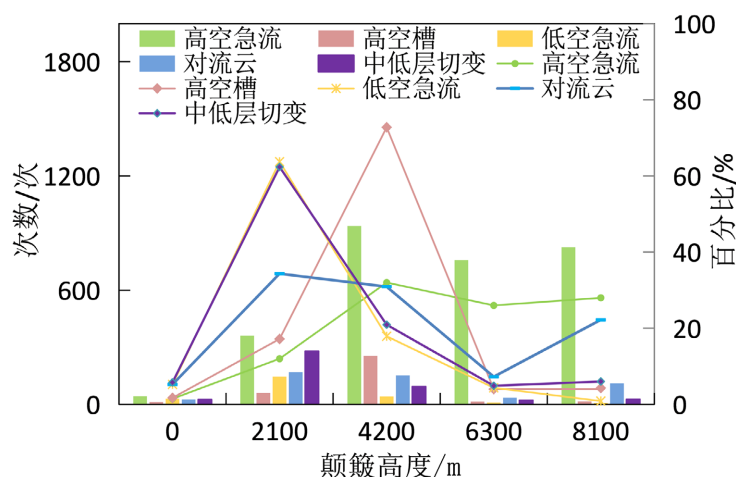


Figure 6. Distribution of aircraft turbulence altitude under different weather systems in the Southwest region from 2008 to 2024

图 6. 2008~2024 年西南地区不同天气系统下飞机颠簸高度分布

中低层切变线与高空槽类似, 在其附近风向和风速存在显著变化, 且切变线附近通常是锋区所在位置, 温度场的变化将促进颠簸的发生, 切变线造成的西南地区飞机颠簸占比为 10%, 但因天气系统位置在对流层中低层, 对应的飞机颠簸高度也主要集中在[2100, 4200) m, 占比高达 62%, 其次是[4200, 6300) m, 占比为 21%。

低空急流造成的飞机颠簸次数最少, 为 229 次(占比 5%), 它是位于对流层下部(距地面 1000~4000 米)的一支强而窄的气流带, 通常风向偏南, 中心风速一般大于 12 米/秒, 低空急流附近风速变化剧烈, 风速在水平和垂直方向上存在显著切变, 并且由于低空急流高度较低, 地形阻挡和摩擦作用会在低空急流附近产生更复杂的气流变化, 增加飞机颠簸的风险, 同中低层切变线类似, 低空急流造成的飞机颠簸高度也较低, 主要集中在[2100, 4200) m, 占比 64%。

5. 结论

(1) 2008 年至 2024 年西南地区飞机颠簸的发生次数总体上呈现上升趋势, 2008~2017 年平均每年发生 81 次颠簸, 2018~2024 年颠簸年平均发生次数增加至 632 次, 飞机颠簸冬春季发生次数多, 夏秋少, 白天多, 早晚少;

(2) 中度颠簸的频次较高, 其次是中度以上, 中度以下颠簸出现的次数相对较少, 冬春季相较夏秋季更容易出现中度及以上的颠簸;

(3) 对于颠簸高度, 低层的颠簸次数显著偏少于中高层, 春季飞机最容易在 8100 m 以上高度出现颠簸, 夏季在中等高度[2100~4200 m]的颠簸较为频繁, 秋季飞机在 4200~6300 m 高度颠簸次数最高, 冬季颠簸次数在 2100 m 以上高度出现的频率差别较小;

(4) 颠簸发生的频次与海拔高度有关, 海拔较低的四川盆地和重庆地区颠簸主要发生在[2100, 6300) m, 位于云贵高原东部的贵州地区颠簸主要出现在[4200, 6300) m, 海拔更高的云南及西藏地区的颠簸则主要位于 6300 m 以上;

(5) 西南地区飞机颠簸主要由高空急流、对流云、高空槽、中低层切变线, 以及低空急流造成, 高空急流是飞机颠簸的主要原因, 对应高度主要分布在 4200 m 以上的中高层, 高空槽对应的飞机颠簸集中在中层[4200, 6300) m, 低空急流和中低层切变线造成的颠簸主要在低层[2100~4200 m)。

基金项目

中国气象局航空气象重点开放实验室面上项目(HKQXM-2024023)资助。

参考文献

- [1] Sharman, R.D. and Lane, T.P. (2016) Aviation Turbulence: Process, Detection, Prediction. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23630-8>
- [2] 刘岳峰, 张凯, 陈越, 等. 民航飞机低空颠簸与地理环境因子相关性研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 683-691.
- [3] 黄仪方, 孙智博, 肖焕权. 我国高原重要航线飞机颠簸分布规律分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 5-9.
- [4] 阿利曼, 王君, 冯锦明, 等. 中国东部高空颠簸时空分布特征及其与热带中东太平洋海温的关系[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 1073-1088.
- [5] 赵懋如, 刘峰. 2009 年飞机颠簸天气浅析[J]. 气象研究与应用, 2010, 31(S2): 4-6.
- [6] 吴炎成, 周林, 刘科峰, 等. 基于 AMDAR 资料应用于中国周边海域飞机颠簸的统计分析[J]. 气象科学, 2014, 34(1): 17-24.
- [7] 李子良, 黄仪方. 地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验[J]. 气象, 2006, 32(11): 32-35.
- [8] 俞飞, 王科, 梁爱民, 申红喜. 华北地区晴空颠簸的分类特征及分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 15-21.
- [9] 黄仪方, 孙智博, 肖焕权, 徐妮. 我国高原地区产生飞机颠簸的大尺度云系及其分布[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 42-45.
- [10] 袁媛, 何冬梅, 张渝杰. 四川盆地低空飞行的气象条件分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 67-73.
- [11] 朱玉祥, 刘海文, 万文龙, 等. 人工智能在飞机颠簸预报中的应用进展及未来趋势展望[J]. 大气科学学报, 2023, 46(6): 825-836.
- [12] 蔡雪薇, 万子为, 吴文辉, 等. 基于湍能耗散率的航空颠簸集成预报方法[J]. 大气科学, 2023, 47(4): 1085-1098.
- [13] 李朝璐, 吴俊杰, 万连成. 基于支持向量机的飞机颠簸预测方法研究[J]. 西安航空学院学报, 2022, 40(3): 24-28, 57.
- [14] 朱志愚. 高空急流区飞机颠簸的一种形成机制的探讨[J]. 成都气象学院学报, 1997, 12(4): 298-302.
- [15] 王淑翠. 飞机颠簸产生的可能机制及其在天气预测上的应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

- [16] 邹波. 地面加热对飞机颠簸影响的动力学初步分析[J]. 大气科学学报, 2004, 27(4): 527-531.
- [17] Sharman, R., Tebaldi, C., Wiener, G., *et al.* (2006) An Integrated Approach to Mid-and Upper-Level Turbulence Forecasting. *Wea Forecasting*, **21**, 268-287. <https://doi.org/10.1175/WAF924.1>