

贵州区域多次飞机颠簸事件成因分析

赵丹丹, 罗浩

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: 2023年9月18日; 录用日期: 2023年11月7日; 发布日期: 2023年11月14日

摘要

在扰动气流或不均匀空气动力冲击下, 飞机颠簸事件层出不穷, 直接诱发左右摇晃、上下抛掷、前后颠簸及局部抖动等不良乘客体验屡见不鲜, 严重情况下致使仪表不准、操作困难由潜至显的威胁极大提升。为确保飞机运行安全, 颠簸成因和发育规律先行探明尤为关键, 故本研究立足于贵州复杂地形、地貌、气象等区域特色, 结合地区航空器所测数据, 基于ERA5理论框架对发生颠簸的季节特征及物理量场分布特征进行研讨, 结果表明: (1) 冬春季节出现颠簸的概率远大于夏秋两季, 1月、2月、3月出现颠簸的概率大于其它月份; (2) 2023年2月3日多次颠簸原因属于高空急流型, 颠簸位置主要集中在急流北侧以及急流中心; (3) 颠簸发生之际, 大气层对流不稳定, 中高层干冷, 中低层暖湿, 在冷暖平流交汇区内颠簸现象颇为明显; (4) 颠簸位置与正涡度区、涡度梯度大值区、负散度梯度大值区匹配度较高。

关键词

飞机颠簸, 急流, 涡度场, 散度场, 贵州地区

Analysis of the Causes of Multiple Aircraft Turbulence Events in Guizhou Area

Dandan Zhao, Hao Luo

Guizhou Air Traffic Control Sub-Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 18th, 2023; accepted: Nov. 7th, 2023; published: Nov. 14th, 2023

Abstract

Under the impact of disturbed airflow or uneven aerodynamics, aircraft turbulence events emerge in an endless stream, which directly induce bad passenger experiences such as left and right shaking, up and down throwing, front and back tossing, and local jitter. In severe cases, the threat of inaccurate instruments and operational difficulties from sub-to-significant is greatly enhanced. In order to ensure the safety of aircraft operation, it is particularly important to explore the caus-

es and development rules of turbulence in advance. Therefore, based on the regional characteristics of complex topography, geomorphology and meteorology in Guizhou, combined with the measured data of regional aircraft, this study discusses the seasonal characteristics and physical quantity field distribution characteristics of turbulence based on the ERA5 theoretical framework. The results show that: (1) The probability of turbulence in winter and spring is much greater than that in summer and autumn, and the probability of turbulence in January, February and March is greater than that in other months. (2) The causes of several turbulences on February 3, 2023 belong to the upper-level jet stream type, and the turbulences are mainly concentrated on the north side of the jet stream and the center of the jet stream; (3) When the turbulence occurs, the convection in the atmosphere is unstable, the middle and upper layers are dry and cold, and the middle and lower layers are warm and humid. The turbulence phenomenon is quite obvious in the cold and warm advection intersection area. (4) The turbulence position has a high matching degree with the positive vorticity area, the large vorticity gradient area and the large negative divergence gradient area.

Keywords

Aircraft Bumps, Jet Stream, The Vorticity Field, Divergence Field, Guizhou Region

Copyright © 2023 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

据统计,与天气相关的飞行事故中,飞机颠簸所造成的飞机事故占 65% [1], 主要由于大气存在乱流所致,根据乱流成因可分为动力湍流、热力湍流、晴空乱流等[2]。目前预报颠簸的手段可大致分为两类,首先,基于传统天气图的定性预报,研究产生飞机颠簸的天气形势和环境条件,如高空槽、切变线、高空急流和高空脊处容易产生颠簸;其次,根据理论和经验,基于数值预报的定量预报[3][4]。

飞机颠簸按照等级通常可划分为轻度颠簸、中度颠簸和强颠簸,据国际航空运输协会统计,近年来世界范围内商业飞机遭遇的严重颠簸事件,每年约 5000 起。对此,国内外学者开展了大量研究,目前多数研究成果主要集中于风场、温度场和重力波等气象条件以及地形因素对飞机颠簸形成的作用,高空中水平风切变产生的湍流是引起高空飞行颠簸的重要因素,同时风垂直切变对引发飞机起飞和着陆时低空飞行颠簸有重要作用[5][6][7],温度场的变化(包括垂直与水平温差梯度的改变)将促进颠簸的发生,温度梯度越大,颠簸越强[7][8]。李子良等[9][10][11]对重力惯性波及其不稳定引发急流附近颠簸产生的可能机制进行研究,指出重力波失稳破碎为湍流是其可能机制。上述研究成果对于分析和发现颠簸事件的分布规律具有理论指导意义,不过航空气象目前对于颠簸的预报产品往往存在着颠簸范围预报过大、强度预报模糊以及空报率较高、缺乏明确指示性等问题。造成使用时的困惑从而降低产品的参考价值。

关于颠簸的研究已经成为航空气象的重点和难点,如今数值预报在形势预报方面与实际大气的拟合度较高,本文以 2018~2022 年贵阳机场所接收的航空器语音报告作为数据支撑,做出统计分析,选择 2023 年 2 月 3 日(北京时)的航空器语音报告作个例分析,从天气学及物理量场的角度寻找颠簸发生的规律,有利于使用数值预报产品中丰富的物理量场进行颠簸预报,以期提高颠簸预报的准确率,来提升气象防灾减灾能力。

2. 资料与方法

目前对于飞机颠簸的持续有效监测仍然比较困难, 话音方式的航空器空中报告是颠簸的主要记录方式。航空器空中报告是飞行员通过语音的方式向地面空中交通管制人员传递飞机信息的报告, 包括了飞机飞行过程中的飞行参数、时间、位置、高度所遭遇的天气等信息。当飞机遭遇颠簸时, 飞行员会向地面传递话音式报告。

使用飞机观测资料、中国气象局天气预报系统 MICAPS 系统中的地面实况观测资料、欧洲中心 (ECMWF)提供的 ERA5 再分析资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 h)进行分析。

飞机颠簸是飞机遭遇大气湍流扰动产生的, 湍流的成因与风切变密切相关, 当温度场和风场急剧变化时, 就会出现强烈的乱流, 由此引起飞机突然产生颠簸。本文根据引发湍流的诱因, 从天气形势、温度平流、物理量场等方面分析此次飞机颠簸发生的动力和热力条件。

通过统计分析发现 2023 年 2 月 3 日发生的航空器颠簸报告数量较多且强度较大, 共收到 12 份颠簸报告。为便于分析研究颠簸位置的原因及分布规律, 根据发生颠簸的高度, 其中将颠簸发生高度在 4800~6300 m 的报告点分析集中在 500 hPa~400 hPa 上; 根据发生颠簸报告的时间点, 把此次系列颠簸报告时间段共划分 5 段(表 1), 08 时, 包括序号为 1~3 的颠簸事件(北京时, 下同); 11 时, 包括序号为 4~5 的颠簸事件; 17 时, 包括序号为 6~8 的颠簸事件; 20 时, 包括序号为 9~11 的颠簸事件; 23 时, 包括序号 12 的颠簸事件报告; 根据颠簸发生的经纬度, 把发生的位置集中在 27°N , 107°E 。

Table 1. List of aircraft turbulence report events on February 03, 2023

表 1. 2023 年 02 月 03 日航空器颠簸报告事件列表

序号	时间(北京时)	位置(经纬度)	高度(m)	强度
1	8:01	27.88°N, 107.18°E	4200~6000	未知强度颠簸
2	9:43	27.52°N, 106.30°E	6300	中度颠簸
3	9:43	27.52°N, 106.30°E	6300	中度颠簸
4	11:23	26.19°N, 107.98°E	5400	中度颠簸
5	11:57	26.22°N, 107.71°E	4800	中度颠簸
6	17:00	27.47°N, 106.98°E	6300	中度颠簸
7	17:08	27.39°N, 106.70°E	4800	中度颠簸
8	17:13	27.51°N, 106.99°E	5400	轻到中度颠簸
9	19:28	26.98°N, 107.79°E	5100	中度颠簸
10	19:30	26.98°N, 107.79°E	5400	中度颠簸
11	20:30	27.20°N, 108.12°E	5400	中度颠簸
12	23:14	26.89°N, 107.49°E	5700	中到强度颠簸

3. 近五年颠簸统计分析(2018.09.01~2023.08.31)

3.1. 颠簸的季节特征统计分析

本次季节统计从 2018.09.01~2023.08.31, 颠簸的季特征统计图如图 1 所示, 根据图 1 表明 2018 年 9 月到 2023 年 9 月期间, 春、夏、秋、冬四个季节占比分别为 37.99%、13.24%、15.2%、37.99%, 可以看出冬春季节出现颠簸的占比 71.57%明显多于夏秋的 28.43%, 而在出现概率较多的冬、春季, 其中冬季出现颠簸的概率为四季里面最大的, 占比为 37.99%。

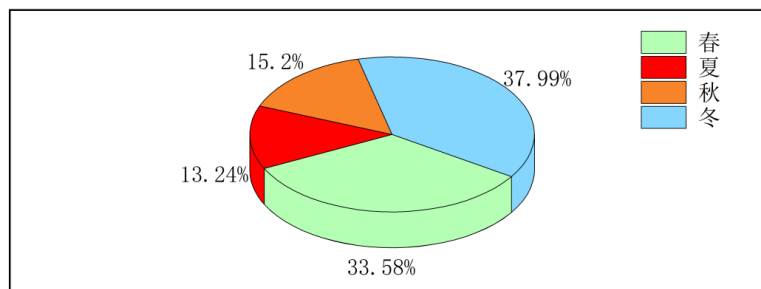


Figure 1. Statistical map of seasonal characteristics of regional turbulence in Guizhou
图 1. 贵州区域颠簸的季节特征统计图

3.2. 颠簸月度变化统计分析

1~12月月度颠簸次数统计如图2所示。2018.09~2023.09年5年累计每月发生颠簸次数的统计来看,10月最少,为7次;1~3月份显著较多,均多于50次,其中2月最多,为63次;6~10月的颠簸次数显著减少,均低于30次。总体来说,有明显的月度变化特征,其中2月份出现次数最多。

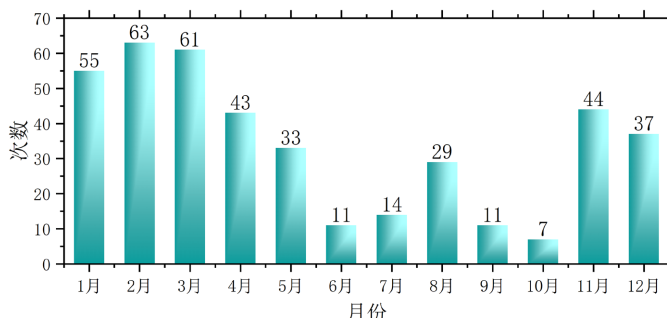


Figure 2. Statistical map of monthly characteristics of regional turbulence in Guizhou Province
图 2. 贵州区域颠簸的月度特征统计图

3.3. 历年2月份颠簸统计分析

从2019年2月至2023年2月份统计的颠簸次数如图3所示,从2月份的统计的年际特征来看,发生颠簸的次数呈现增加的趋势;其中2023年发生的颠簸次数最多,为28次;2020年2月份颠簸出现次数最少,为2次;分析发现2023年2月出现次数最多,又对2月每日发生颠簸的次数统计发现,如表2所示,02月03日当天出现12次,故选取这天作为典型个案分析。

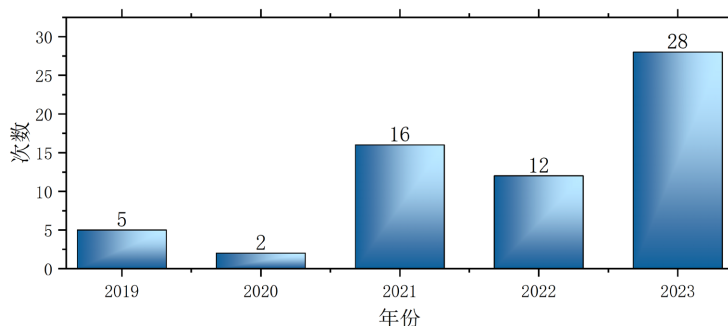


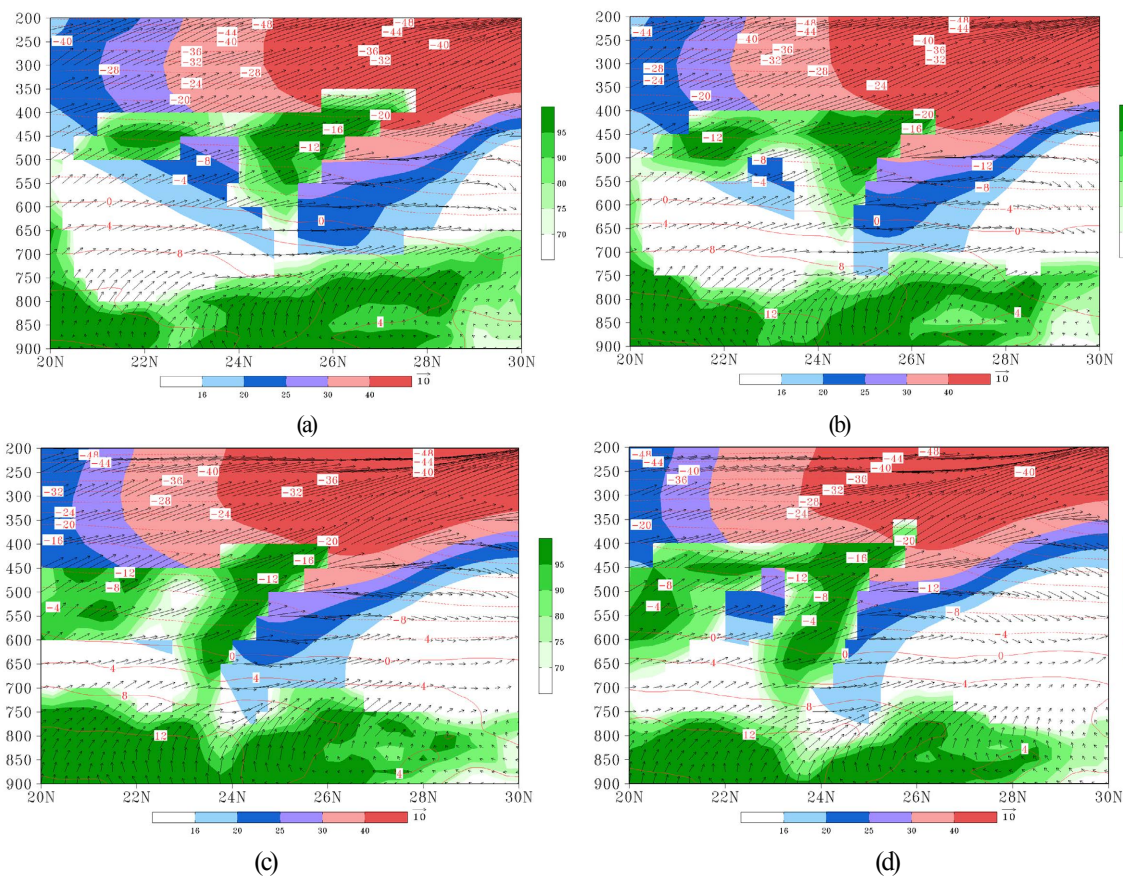
Figure 3. Monthly statistical map of Guizhou region from February 2019 to February 2023
图 3. 贵州区域 2019~2023 年 2 月份颠簸的月度统计图

Table 2. February 2023 bumpy statistics
表 2. 2023 年 2 月颠簸统计

序号	日期(北京时间)	次数
1	2月2日	2
2	2月3日	12
3	2月7日	1
4	2月8日	1
5	2月9日	1
6	2月10日	4
7	2月13日	2
8	2月14日	1
9	2月21日	1
10	2月25日	1
11	2月26日	1
12	2月28日	1

4. 颠簸区的天气形势及物理量场动力学特征

4.1. 垂直剖面图分析



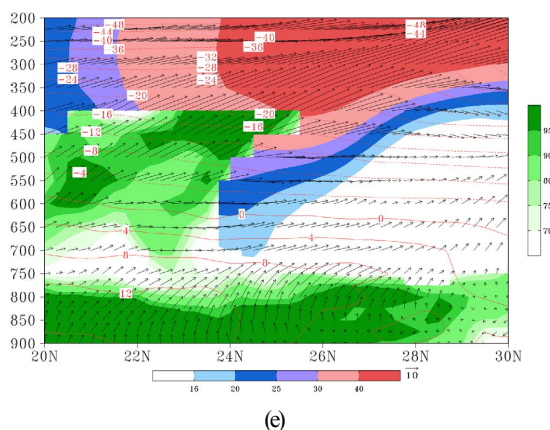


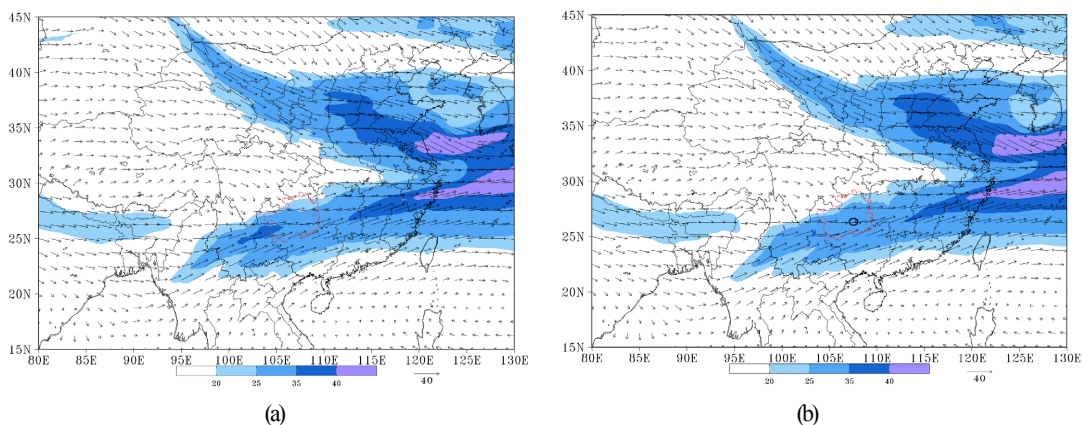
Figure 4.3 February 08:00 (a) and 11:00 (b) 107.0°E north-south profile (green represents relative humidity, the rest of the color represents the size of the wind speed, wind speed unit is meter/second); North-South profile at 107°E at 17:00 (c) and 20:00 (d) on 3 February

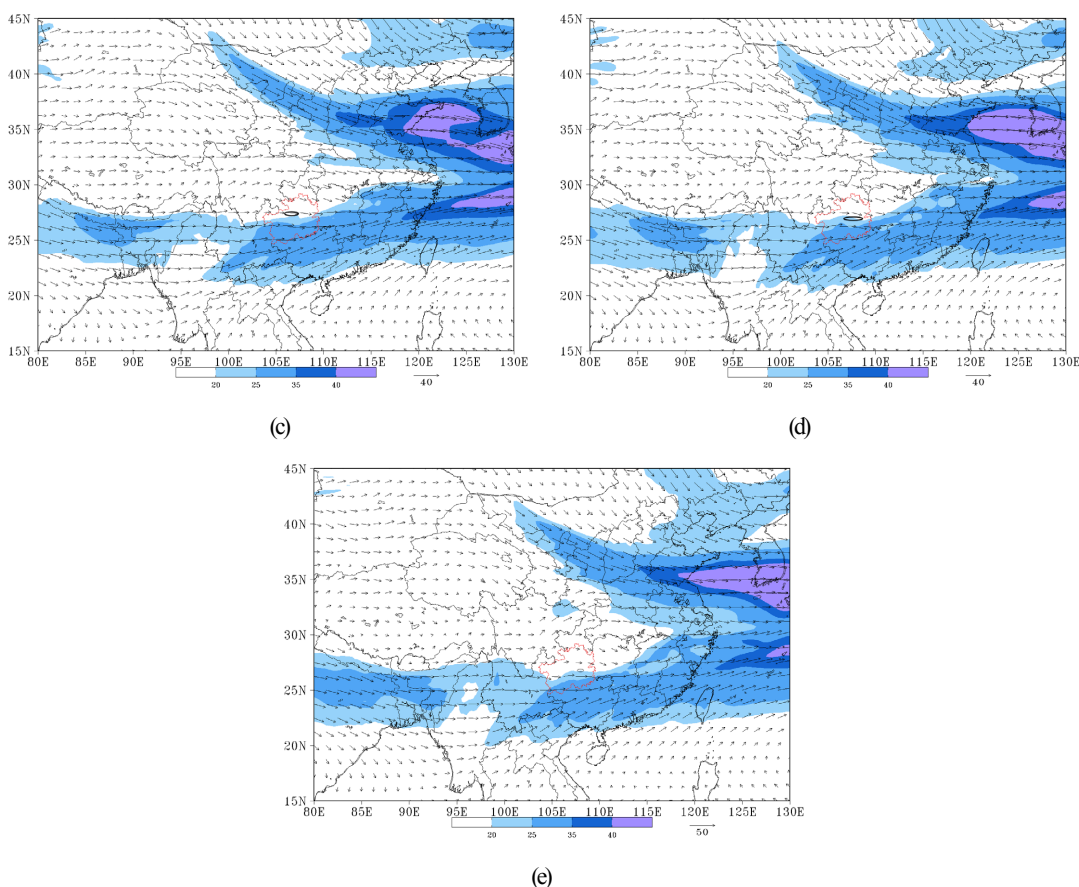
图 4.2 2月3日 08时(a)和 11时(b) 107°E 的南北剖面图(绿色代表相对湿度, 其余彩色代表风速大小, 风速单位为米/秒); 2月3日 17时(c)和 20时(d) 107°E 的南北剖面图; 2月3日 23时(e) 107°E 的南北剖面图

沿 107°E 作风温场的垂直剖面图, 如图 4(a)~(e)所示, 发现颠簸区域 26°N~28°N 之间, 中低层 750 hPa 以下, 相对湿度在 80%以上, 天空状况为满天云, 中高层相对湿度为 0, 无云, 所以本次颠簸可以判断为不是云中颠簸[12]; 从图 4 可知, 500 百帕皆位于-12°C左右, 在北纬 27°, 700~500 百帕区间, 风随高度顺转, 说明在此区间存在暖平流, 500~300 百帕区间, 风随高度逆转, 说明有暖平流, 说明 5000 百帕是冷暖平流交汇区, 冷暖平流交汇存在强烈的气流不稳定, 当飞机在穿越大气层时, 由于气流不稳定就有可能产生颠簸。从风场来看, 低层 700 hPa 附近有一条 16~20 米/秒的偏西南急流, 从 11~23 时, 急流带明显南退; 中高层 500 hPa 附近有 30~40 的偏西到西南的急流带影响此次颠簸区域, 李子良(2008)等揭示了急流附近南北侧的反气旋与气旋式切变中晴空湍流和飞机颠簸产生的物理本质。因此根据图垂直剖面分析来看此次飞机颠簸发生的原因, 极有可能是急流引起的, 从目前来看 2 月 3 日的个例分析表明风对颠簸的影响已经较为清晰了, 所以接下来对风场及物理量场做一个详细的分析。

4.2. 风场分析

从图 5(a)所示, 有一股 25~35 的偏西急流生成, 随着时间推移, 从图 5(b)~(e)所示, 偏西的急流带整体偏南移动, 随着急流带位置的移动, 颠簸的位置也随之在往偏南的方向移动, 其中 08、17、20、23 时的颠簸位置始终位于急流区的北侧, 除 11 时位于急流带中心。





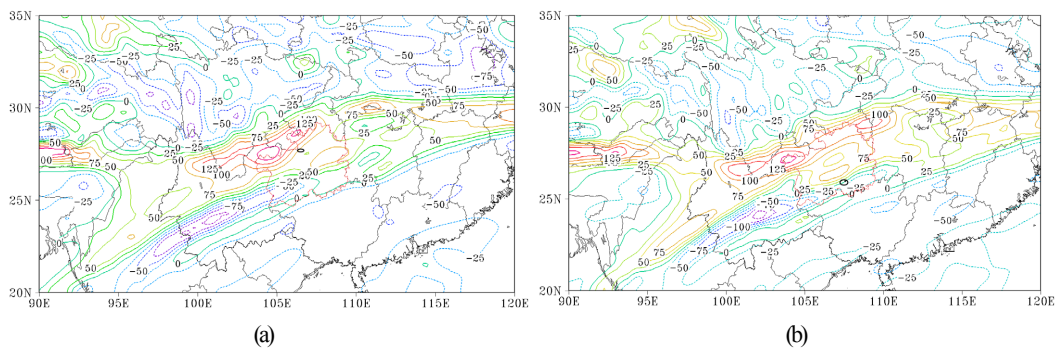
(The black circle in the legend indicates the bumpy area)
(图例中黑色圆圈表示颠簸区域)

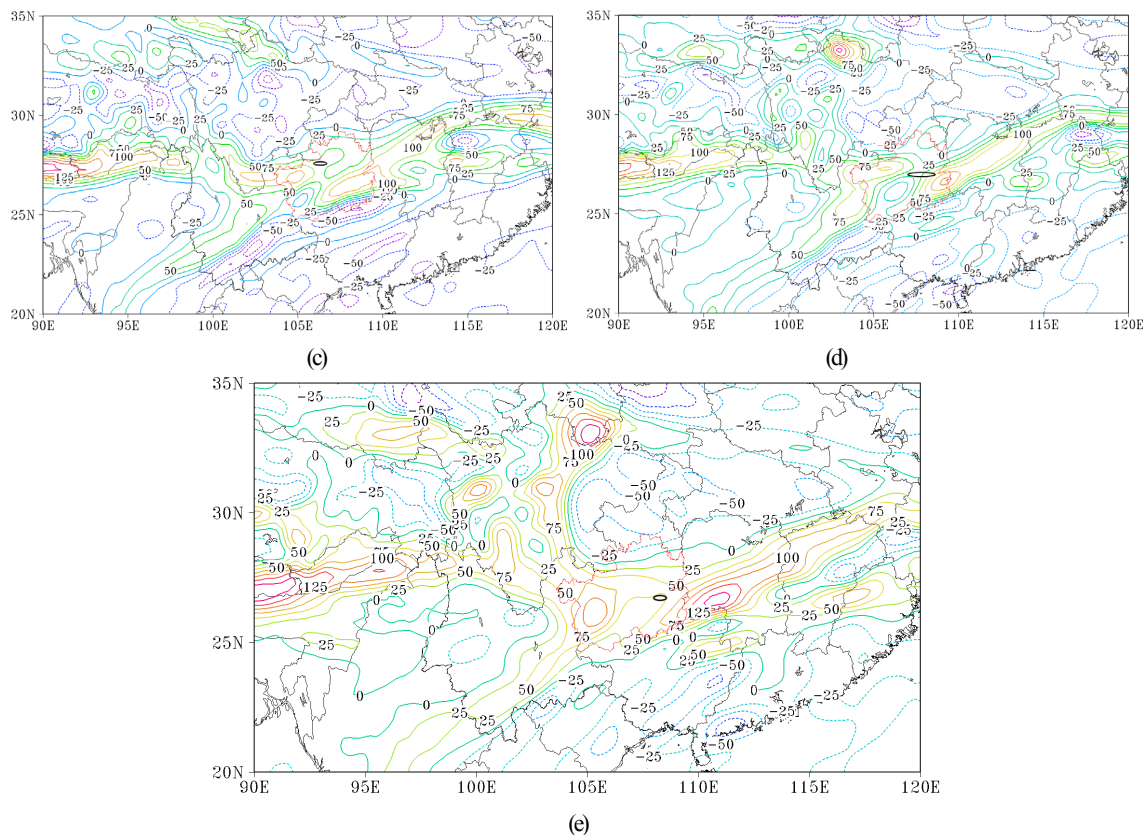
Figure 5. 500 hPa wind field map at 08:00 (a) and 11:00 (b) on February 3 (wind speed unit: m/s); 500 hPa wind field map at 17:00 (c) and 20:00 (d) on February 3; 500 hPa wind field map at 23:00 (e)

图 5. 2月3日 08时(a)和 11时(b) 500 hPa 风场图(风速单位: 米/秒); 2月3日 17时(c)和 20时(d) 500 hPa 风场图; 2月3日 23时(e) 500 hPa 风场图

4.3. 涡度场的诊断分析

图 6(a)~(e)为颠簸区的涡度场。500 hPa 涡度场大值中心位于贵州的边界区, 如图 6(b), 图 6(d)所示, 11 时、20 时两个时次的颠簸报告区域位于涡度等值线最为密集的区域且靠近涡度大值中心。而 08 时、17 时、23 时的报告涡度值在 $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 左右, 梯度不大但存在一定的辐合上升运动。





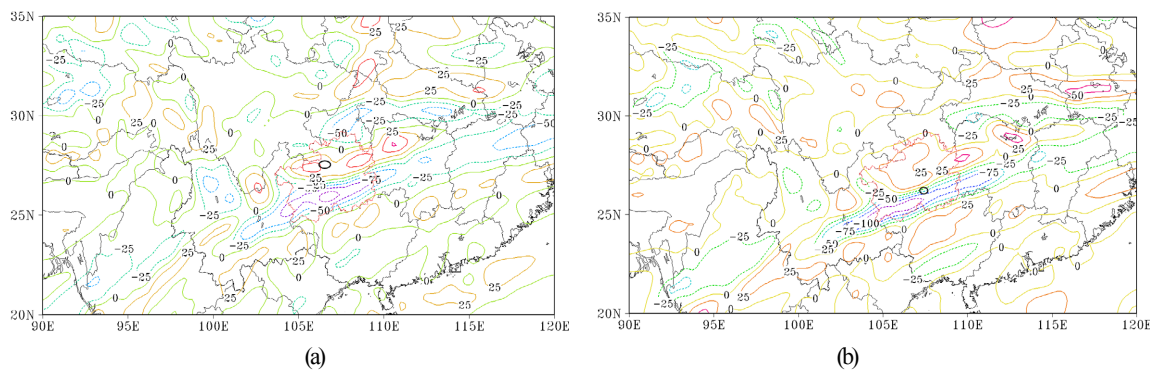
(The black circle in the legend indicates the bumpy area)
(图例中黑色圆圈表示颠簸区域)

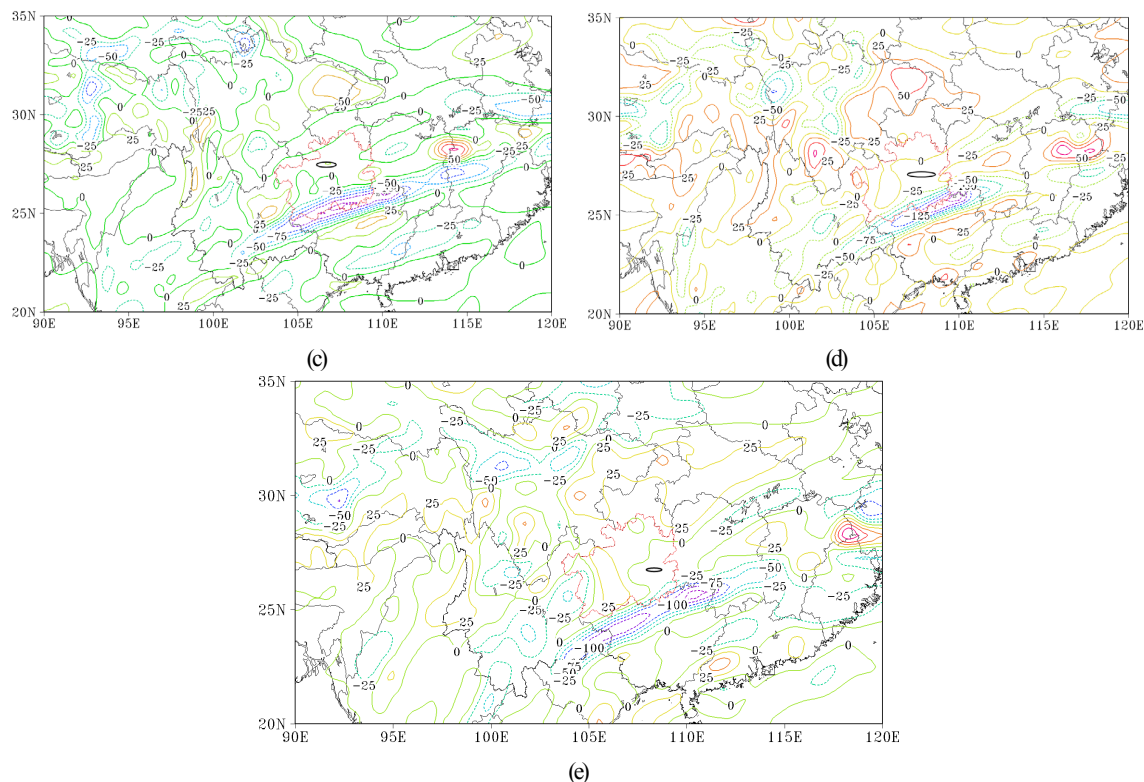
Figure 6. 500 hPa vorticity field at 08:00 (a) and 11:00 (b) on February 3 (unit: $10^{-5} s^{-1}$); 500 hPa vorticity field at 17:00 (c) and 20:00 (d) on February 3; 500 hPa vorticity field at 23:00 (e) on February 3

图 6. 2月3日 08时(a)和 11时(b) 500 hPa 涡度场图(单位: $10^{-5} s^{-1}$); 2月3日 17时(c)和 20时(d) 500 hPa 涡度场图; 2月3日 23时(e) 500 hPa 涡度场图

4.4. 散度场的诊断分析

2月3日贵州区域散度场的大值中心呈东北-西南走向分布(图 7), 后逐渐南移加强。在 500 hPa 上图 7(a)、图 7(c)所示, 颠簸区域位于正散度区, 而 08 时位于正散度大值中心; 图 7(b)所示, 颠簸报告区域位于等值线最为密集区, 散度中心值为 $-100 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。20 时、23 时(图 7(d)、图 7(e))的颠簸报告分布在由正散度向负散度过渡区, 等值线稀疏, 可见颠簸发生位置与正、负散度区无关。





(The black circle in the legend indicates the bumpy area)
(图例中黑色圆圈表示颠簸区域)

Figure 7. 500 hPa divergence field at 08:00 (a) and 11:00 (b) on February 3 (unit: 10^{-5}s^{-1}); 500 hPa divergence field at 17:00 (c) and 11:00 (d) on February 3; 500 hPa divergence field at 23:00 (e) on February 3

图 7. 2月3日 08时(a) 和 11时(b) 500 hPa 散度场图(单位: 10^{-5}s^{-1}); 2月3日 17时(c)和 20时(d) 500 hPa 散度场图; 2月3日 23时(e) 500 hPa 散度场图

5. 结论

从近几年的统计分析发现, 发生颠簸的次数与季节更替有很大的关系, 月份之间也存在较为明显的差异性。通过统计, 本文选取了出现颠簸次数最多的 2 月 3 日作为本次论文的个例分析, 着力从统计、天气形势及物理量场中寻找发生颠簸的规律, 得到以下结论:

- (1) 冬春季节出现颠簸的概率远远大于夏秋季; 1~3 月出现颠簸的概率也是大于其它月份。
- (2) 2023 年 2 月 3 日发生的颠簸原因属于高空急流型, 产生颠簸的位置主要集中在急流的北侧或者急流中心。
- (3) 正涡度区或者涡度梯度大值区及负散度梯度大值区有利于颠簸发生。
- (4) 颠簸发生时大气层对流不稳定, 中高层干冷, 中低层暖湿, 颠簸出现在冷暖平流交汇区。

6. 讨论

通过近几年的话音式航空器报告可知, 飞机颠簸呈现逐年增加的趋势, 尤其在冬春季节尤为明显。一些研究使用气候模式研究了颠簸的未来的变化, 气候变化将导致航班颠簸更加频繁、严重颠簸增加得更加显著[13] [14]。面对气候变化, 人类只能尽力减缓和适应它。本研究选取了较有代表性的个例, 分析各次实例中颠簸的物理量分布特征。由于再分析资料时间和空间分辨率的限制, 在以后的研究中需要更多的航空器实例以及更高分辨率的气象资料加以验证和完善飞机颠簸的动力学特征。

参考文献

- [1] Sharman, R., Brown, B.G. and Dettling, S. (2000) Preliminary Results of the NCAR Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (ITFA) to Forecast Cat. (Pre-Prints)
- [2] 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.
- [3] 王洪芳, 金维明, 王炳仁, 等. 飞机颠簸及预报方法研究[J]. 气象科技, 1997, 25(1): 29-34.
- [4] 周林, 黄超凡, 钟中, 等. 一次南海高空晴空颠簸事件的形成机制研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(4): 570-576.
- [5] 蒋一柅. 晴空颠簸对于民航的危害与应对[J]. 科技风, 2013(16): 209-210.
- [6] Colson, D. and Panofsky, H.A. (2010) An Index of Clear Air Turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **91**, 507-513. <https://doi.org/10.1002/qj.49709139010>
- [7] Gultepe, I. and Starr, Do. (1995) Dynamical Structure and Turbulence in Cirrus Clouds: Aircraft Observations during FIRE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52**, 4159-4182. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<4159:DSATIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<4159:DSATIC>2.0.CO;2)
- [8] 李子良, 陈会芝. 飞机颠簸的气象条件分析[J]. 高原山地气象研究, 1999, 19(2): 22-23.
- [9] 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.
- [10] 李子良, 黄仪方. 重力惯性波及其不稳定——急流附近飞机颠簸产生的可能机制[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 859-865.
- [11] 李子良, 黄仪方. 大气湍流引起飞机颠簸的理论分析和数值试验[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(6): 889-894.
- [12] 孙智博. 我国产生飞机颠簸的特殊云状及其分布规律分析[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2011.
- [13] Williams, P.D. and Joshi, M.M. (2013) Intensification of Winter Transatlantic Aviation Turbulence in Response to Climate Change. *Nature Climate Change*, **3**, 644-648. <https://doi.org/10.1038/nclimate1866>
- [14] Williams, P.D. (2017) Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 576-586. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6268-2>