

昆明管制区颠簸的特征及预报初探

窦体正, 杨 雄, 赵德显, 杨志环

民航云南空管分局, 云南 昆明

收稿日期: 2024年8月4日; 录用日期: 2024年9月6日; 发布日期: 2024年9月13日

摘 要

文章利用2021~2023年昆明管制区收到的话音方式航空器空中报告、欧洲中心ERA5再分析资料及美国大气环境预测中心的GFS资料等分析昆明管制区颠簸的特征并开展颠簸预测研究。结果表明, 昆明管制区航路颠簸主要出现在07~23时, 14~15时出现最多; 大部分颠簸出现的高度在6937~8350之间, 导致昆明关键区出现中到强或强颠簸的天气系统主要位于500 hPa高度层附近。颠簸指数的运用要结合天气系统、高低空急流及垂直速度、散度等进行分析; 颠簸易发生在上升和下沉气流交汇区及辐合辐散分界处。昆明管制区内颠簸指数预测产品对颠簸预测有一定的指导意义; 大风季跟踪EI指数 ≥ 11 或Dutton ≥ 80 的大值区能够较好地监视颠簸区域的变化; 颠簸指数预测产品对数值预报产品依赖性很强, 预测有一定偏差时需结合风场的变化进行分析。

关键词

航空器空中报告, 颠簸指数, Ellrod指数, Dutton指数

Preliminary Study on the Characteristics and Forecasting of Turbulence in Kunming Control Zone

Tizheng Dou, Xiong Yang, Dexian Zhao, Zhihuan Yang

China's Civil Aviation Air Traffic Control Yunnan Branch, Kunming Yunnan

Received: Aug. 4th, 2024; accepted: Sep. 6th, 2024; published: Sep. 13th, 2024

Abstract

The article conducts an analysis on the characteristics of turbulence in the Kunming control area and carries out research on turbulence prediction by utilizing pilot reports received in Kunming Control Zone from 2021 to 2023, ERA5 reanalysis data from the European Center, and GFS data from

文章引用: 窦体正, 杨雄, 赵德显, 杨志环. 昆明管制区颠簸的特征及预报初探[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(5): 1173-1183. DOI: 10.12677/ccrl.2024.135133

the US Atmospheric Environment Prediction Center. The results indicate that turbulence on air routes within the Kunming Control Zone mainly occurs from 07:00 to 23:00, with the peak frequency between 14:00 and 15:00. The majority of turbulence events occur at altitudes ranging from 6,937 to 8,350 meters, with weather systems causing moderate to severe or severe turbulence primarily located near the 500 hPa atmospheric pressure level. The application of the turbulence index must incorporate an analysis of weather systems, jet streams at different altitudes, vertical velocities, and divergence, among other factors. Turbulence tends to occur in areas where ascending and descending airflows converge or at the boundaries between converging and diverging flows. The turbulence index prediction products within the Kunming Control Zone provide valuable guidance for turbulence forecasting. During high wind seasons, tracking areas with an EI index ≥ 11 or a Dutton index ≥ 80 can effectively monitor changes in turbulence regions. The accuracy of turbulence index forecasting products heavily relies on numerical weather prediction products, and any significant deviations in forecasts should be analyzed in conjunction with changes in wind patterns.

Keywords

Pilot Reports, Turbulent Index, Ellrod Index, Dutton Index

Copyright © 2024 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

颠簸是影响飞行安全的危险因素之一，其中航路上的颠簸现象通常是由于风场分布的不均匀导致的。基于飞机颠簸对飞行安全的重大影响，国内外学者围绕颠簸从影响因素、诱发机制和预测预报等方面开展了大量的研究。在影响因素方面，利用数值仿真分析技术，探索飞机在大气湍流中发生颠簸的物理机制[1][2]，或基于空气动力学知识，分析空中颠簸与地面加热场、温度场、风场时空分布特征之间的关系[3]。在诱发机制方面，对晴空湍流事例的数值模拟分析推测诱发飞机空中颠簸的原因，俞飞[4]等指出导致晴空湍流最常见的天气形势是高空急流，Sharman[5]认为对流湍流、低空急流(LLT)、山脉波湍流、晴空湍流(CAT)和飞机尾流涡旋所产生的湍流[6]都是导致飞机颠簸的根源。李子良等[7]指出急流重力波不稳定发展破碎为湍流，可能是急流南侧反气旋气流中晴空湍流和飞机颠簸产生和发展的一种机制。李跃春等[8]分析了拉萨航路一次颠簸过程的成因，表明此次颠簸发生在冷暖平流交汇的梯度带上，以及上升和下沉气流的转换区内。高空急流背景下，风的垂直切变区、风的水平切变区、流场的辐合或辐散区、流场的水平变形区、水平温度梯度区等均可造成飞机颠簸。对于飞机颠簸的预报方法通常基于数值模式预报来获得可能产生湍流的大尺度特征信息。本文基于航空器报告和 QAR 数据总结了昆明管制区颠簸的基本特征，利用 ERA5 再分析资料和 NCEP 的 GFS 资料分别计算颠簸指数，通过对比分析探索昆明管制区颠簸预测的思路和方法。对飞机颠簸的研究，分析颠簸发生时刻的天气形势，探索适合的颠簸指数，能够降低因飞机颠簸造成的事故发生概率，为民航安全运输提供科学支撑。

2. 数据处理

2.1. 数据介绍

本文所用颠簸资料来自昆明管制区收到的《话音方式航空器空中报告》和部分航班 QAR 原始数据。利用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析产品 ERA5 (垂直方向 27 层，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)

分析颠簸发生的环流背景,并计算颠簸发生时的 Dutton 指数和 Ellrod 指数;利用美国国家环境预报中心的 GFS 逐小时预报资料(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)计算未来 48 小时颠簸指数预报产品。文中出现的时间除特别标明 UTC 的时间系列图,其余时间均为北京时。

2.2. 数据处理

利用 ERA5 再分析资料和 NCEP 的 GFS 预报资料计算 Dutton 和 Ellrod 指数。利用部分航班 QAR 原始数据计算过载增量的绝对值,提取遭遇颠簸时的颠簸指数数据。

1) QAR 原始数据计算过载增量。

$$\Delta n = \frac{VRTG - 1g}{g}$$

其中 VRTG 是 QAR 数据中所记录的飞机垂直加速度,通常以重力加速度 g 的倍数表示。飞机垂直加速度与重力相差越大,则飞机颠簸强度越大。根据当前民航行业对颠簸风险的认定惯例,当 Δn 绝对值大于 $0.2 g$ 时为轻度颠簸;当 Δn 绝对值大于 $0.5 g$ 且小于等于 0.8 时为中度颠簸;当 Δn 绝对值大于 $0.8 g$ 时为严重颠簸[9]。

2) Dutton 指数计算。Dutton 指数是基于湍流报告与各种天气尺度的湍流的线性回归分析所得到的经验指数,同时考虑了水平风切变和垂直风切变[10]。

$$Dutton = 1.25S_H + 0.25S_V^2 + 10.5$$

$$\text{其中水风切变 } S_H = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}, \text{ 垂直风切变 } S_V = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}。$$

3) Ellrod 指数计算。Ellrod 指数为动力相关颠簸诊断指数,是对锋生函数进行简化得到的,有两种表达形式 Ellrod1 和 Ellrod2 [6]。Ellrod2 指数为 Ellrod1 指数基础上去掉散度项得到,本文中所用 Ellrod 指数均为 Ellrod2。

$$Ellrod1 = S_V \times (D_{EF} + D_{IV}), \text{ Ellrod2} = S_V \times D_{EF}, \text{ 其中垂直风切变 } S_V = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2};$$

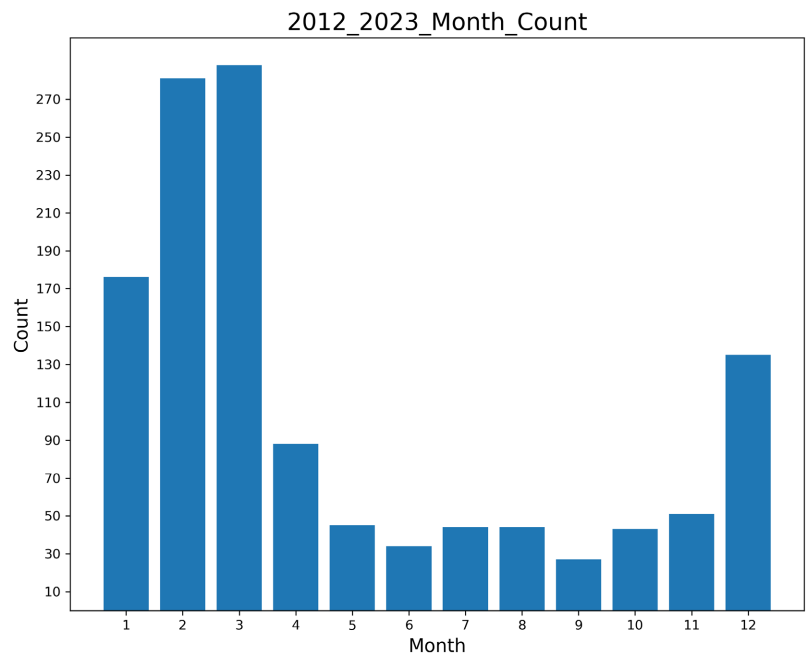
$$\text{散度 } D_{IV} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right); \text{ 水平变形项 } D_{EF} = \sqrt{D_{sh}^2 + D_{st}^2}, D_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, D_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}。$$

3. 昆明管制区内颠簸的概况

2012~2023 年昆明管制区一共收到 1256 份颠簸的航空器报告。图 1(a)表明,颠簸报告全年均有发生,主要是在 12 月至次年 3 月,报告均超过 100 份,3 月份报告最多,为 288 份,2 月份次之,为 281 份。

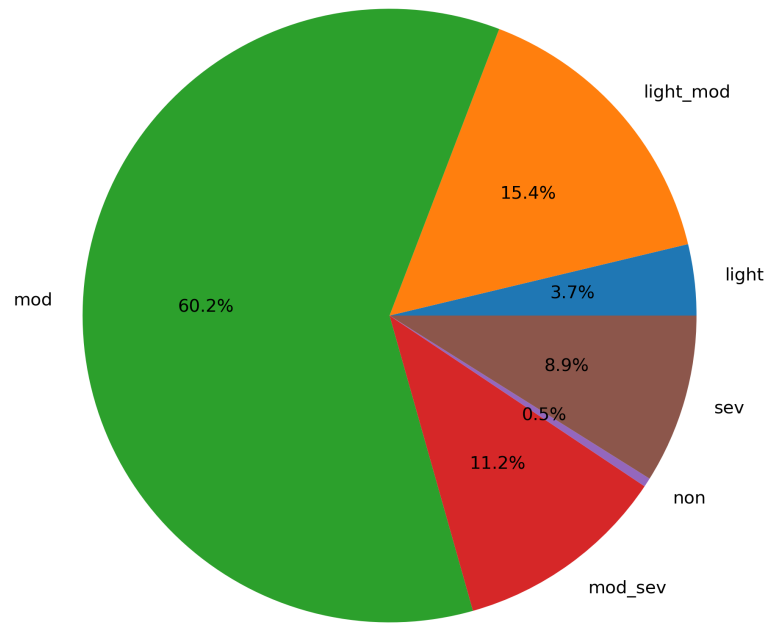
图 1(b)表明,昆明管制区内颠簸强度剧烈,颠簸报告中约 80.3%是中等(含)及以上强度,其中中度颠簸最多,有 756 份,占比高达 60.2%;中到强的颠簸有 141 份,占比 11.2%;强颠簸有 112 份,占比 8.0%。

颠簸出现次数的日变化(图 2(a))表明,颠簸全天均有可能出现,主要出现在 07~23 时,12~17 时报告超过 70 份,其中 14~15 时报告次数最多,02~06 时次很少,其主要原因是大气在热力作用和地面热低压的动力作用下,湍流强度出现明显的日变化,且夜间航班架次较少,颠簸报告次数也相应减少。颠簸出现高度的日变化(图 2(b))表明,颠簸主要出现在 3000 米以上高度的航路上,3000 米以上的各高度层均有不同程度及数量的颠簸报告。大部分颠簸出现的高度在 6937~8350 之间,13~16 时颠簸出现的高度下降至 4500~6500 米之间。



(a)

2012-2023Turb_Intensity_Percentage



(b)

注：light、light_mod、mod、mod_sev、sev 分别代表轻度、轻到中度、中度、中到强和强颠簸。

Figure 1. Annual variation of the frequency of turbulence occurrence in Kunming Control Zone from 2012 to 2023 (a); The proportion of turbulence with different intensities (b)

图 1. 昆明管制区 2012~2023 年颠簸出现次数的年变化(a); 不同强度颠簸的占比(b)

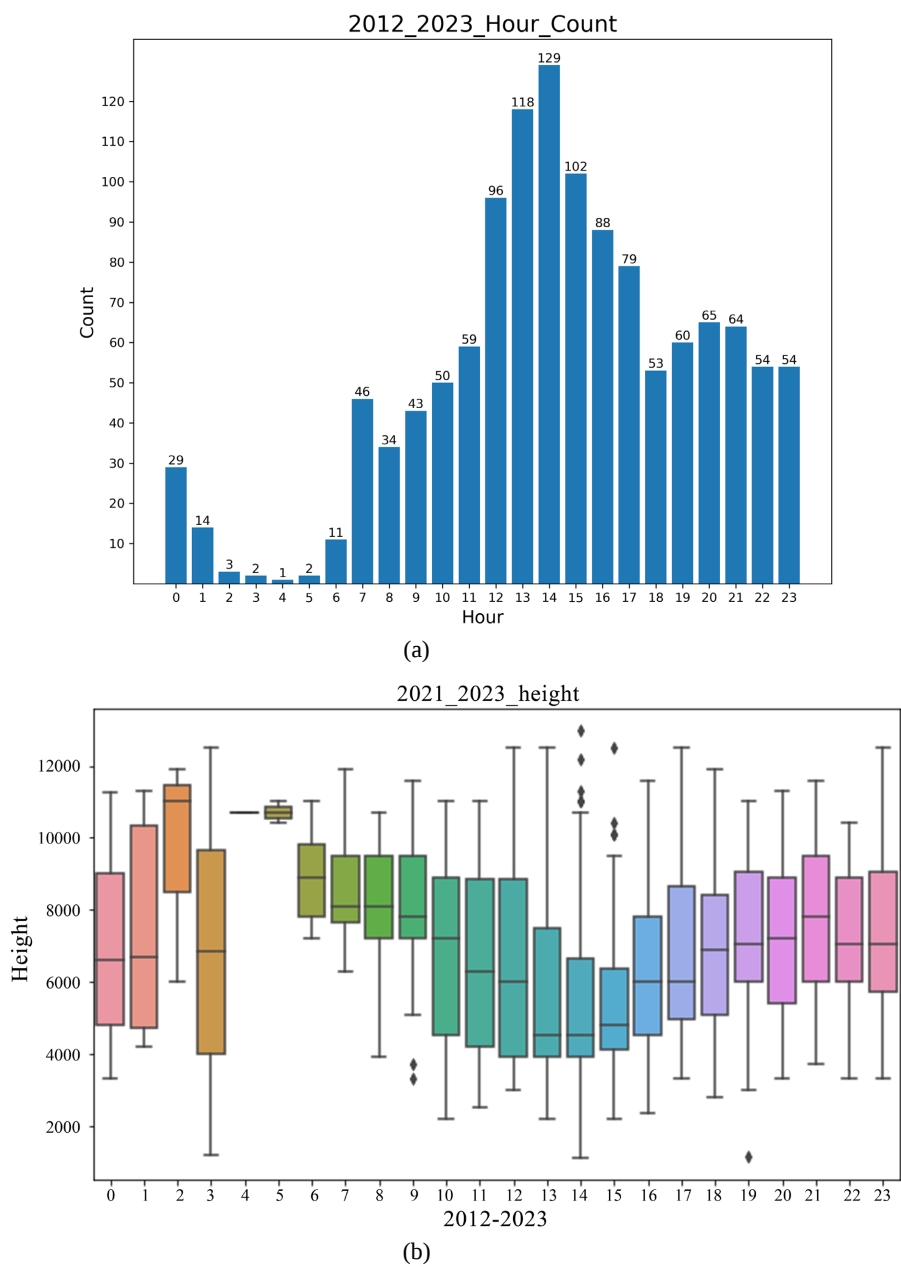


Figure 2. Daily variation of the frequency of turbulence occurrence in Kunming Control Zone from 2012 to 2023(a) and the daily variation of turbulence occurrence height (b)
图 2. 昆明管制区 2012~2023 年颠簸出现次数的日变化(a)、颠簸出现高度的日变化(b)

4. 昆明管制区颠簸的高度、强度特征

2021~2023 年昆明管制区颠簸航空器报告箱线图统计(图 3)表明, 机场关键区常遭遇颠簸的高度为 3600~4500 米(600~650 hPa); 盘龙导航台附近常遭遇颠簸的高度为 4500~7050 米(450 hPa); XISLI、MEBNA 附近常遭遇颠簸的高度为 6000 米(400 hPa); 西山、DODAL 常遭遇颠簸的高度 7200~9800 米(300 hPa)。研究昆明管制区内遭遇不同颠簸强度的高度分布(图 4)发现, 不同强度的颠簸在 3000~10200 米之间均有可能发生, 常遭遇中到强或强颠簸的高度位于 4500~7125 米, 中位数为 5400 米, 即造成中到强或强颠簸的天气系统主要位于 500 hPa 高度层附近。

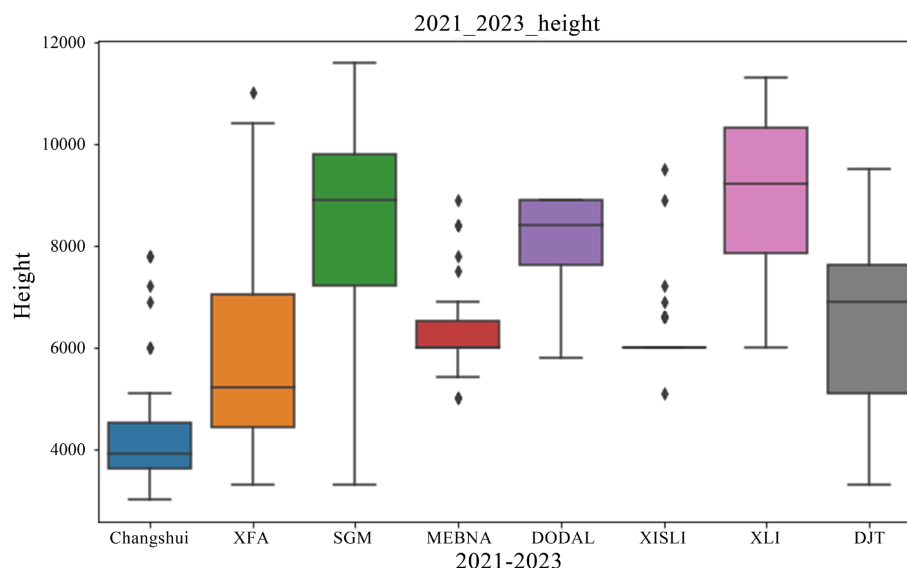


Figure 3. Height statistics of turbulence occurring at different waypoints in Kunming control area. Changshui, XFA, SGM, DJT, and XLI represent the key areas of the airport, Panlong, Xishan, Malong, and Luxi navigation stations, respectively
图 3. 昆明管制区不同航路点颠簸发生高度统计, Changshui、XFA、SGM、DJT、XLI 分别代表机场关键区、盘龙、西山、马龙、泸西导航台

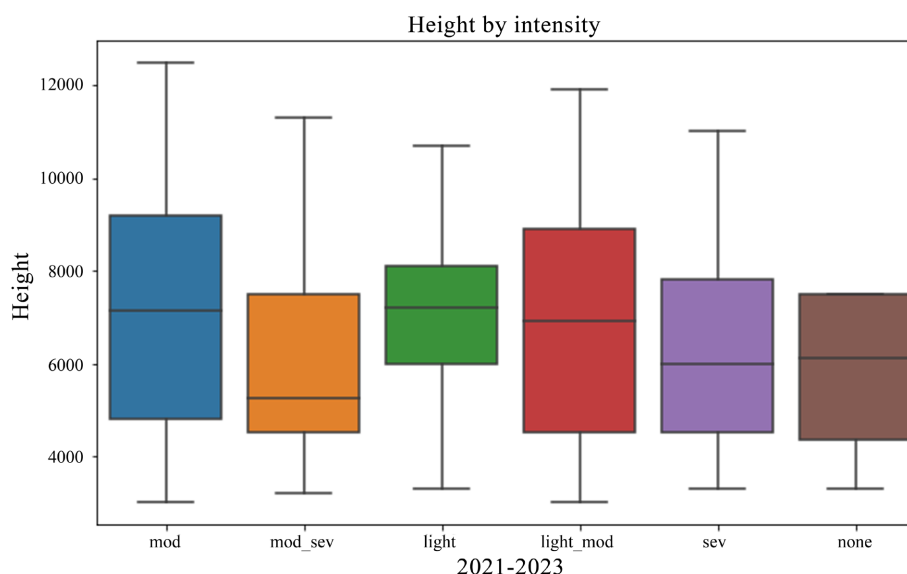


Figure 4. Altitude statistics of different turbulence intensities in Kunming Controlled Area, where light, mod, and sev represent mild, moderate, and severe turbulence, respectively
图 4. 昆明管制区不同颠簸强度发生的高度统计, light、mod、sev 分别代表轻度、中度和强颠簸

5. 大风季颠簸历史个例分析

2022 年 2 月 8 日, 长水机场有四个航班在 14~17 时遭遇颠簸。通过 ERA5 再分析资料计算 Dutton、EI 颠簸指数, 分析颠簸指数在航班遭遇颠簸过程中的变化情况。

2 月 8 日 14 时个例 1 遭遇颠簸的高度 650 hPa (图 5(a))上, EI 指数 ≥ 8 的大值中心呈东西向的带状分布, 覆盖机场中心关键区(图中长方形), 中心大值区(EI 指数 ≥ 8)覆盖跑道南头延长线(一边), 与飞机遭遇颠簸位置相符。EI 指数大指区范围不断扩大, 且中心值在增大。16 时(图 5(b)) EI 指数 ≥ 11 的大值中心覆

盖昆明终端区西南区和东南区，一边 20 公里 4200 米高度 EI 指数 ≥ 11 ，对应个例 2 遭遇颠簸。个例 3 和个例 4 对应高度 500 hPa (图 5(d, e))上，EI 指数 ≥ 8 的大值中心覆盖本场跑道南北头及延长线，在 21 号跑道北头延长线(对应颠簸位置)均出现 ≥ 11 的中心，EI 指数大值区变化不大，2 个航班遭遇颠簸的位置和高度都很相近。

Table 1. Turbulence near Kunming Changshui Airport on February 8, 2022
表 1. 2022 年 2 月 8 日昆明长水机场附近遭遇颠簸情况

编号	出现时间	位置	高度(米)	强度	航班号	机型
个例 1	2022-02-08 14:19	1 边 20 公里	3600	轻到中度	CSN3494	A320NEO
个例 2	2022-02-08 16:22	1 边航迹 20 公里	4200	轻到中度	CCA4275	B737-800
个例 3	2022-02-08 16:25	21 号跑道起飞航迹 25 公里	5100	中到强	OTC7123	A320NEO
个例 4	2022-02-08 17:02	21 号跑道 234°航向 25 公里	5100	中度	LKE9927	A320

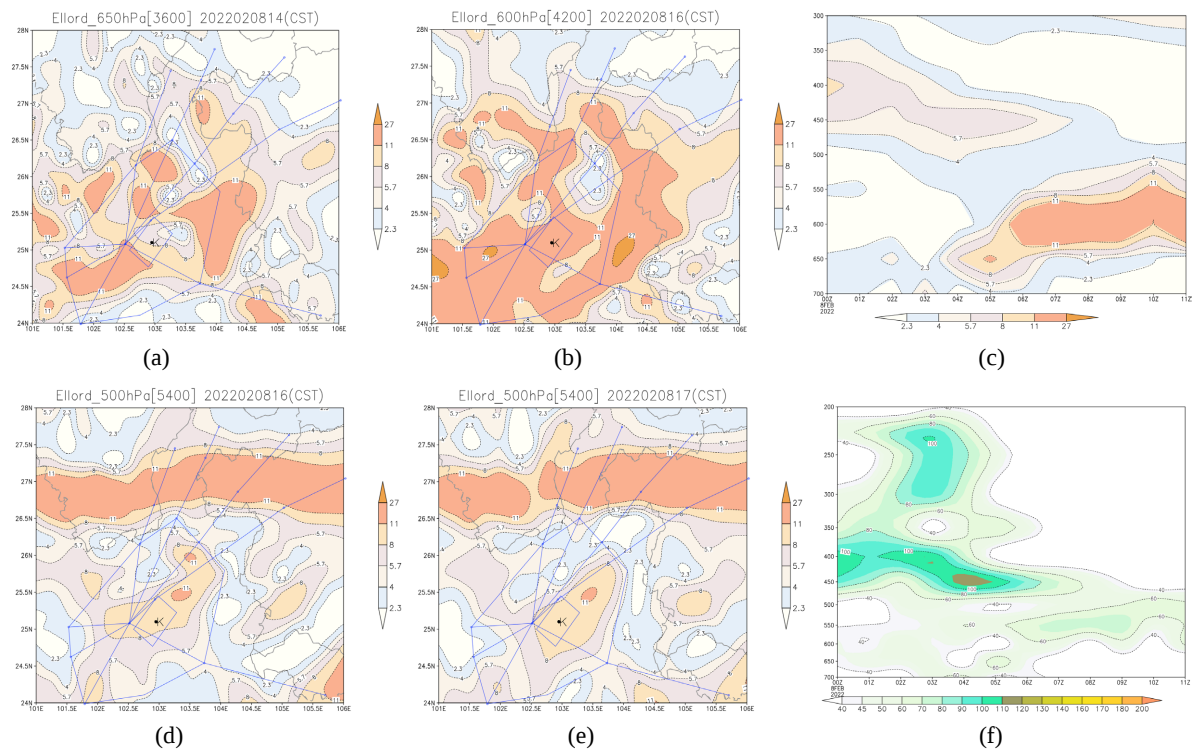


Figure 5. Distribution map of EI index at 650 hPa (a) and 16:00 (b), 600 hPa, 16:00 (d) and 17:00 (e), 500 hPa on February 8, 2022 Beijing time; Time series chart of EI index (c) and Dutton index (f) on February 8th (with UTC time on the horizontal axis)

图 5. 北京时 2022 年 2 月 08 日 14 时 650 hPa (a)和 16 时(b) 600 hPa、16 时(d)和 17 时(e) 500 hPa 的 EI 指数分布图；2 月 08 日 EI 指数(c)和 Dutton 指数(f)时间系列图(横坐标为 UTC 时间)

结合 EI 和 Dutton 时间系列图(图 5(c, f))来看，4 个个例 EI 指数均在 650 hPa~500 hPa 维持了 EI 指数 ≥ 11 的中心，16~17 时大值区向高处扩展，遭遇颠簸的高度也随之增加(见表 1)，Dutton 指数 ≥ 60 的区域也呈现出相似的变化趋势，但其中心值表现不佳，反而在 450 hPa 以上出现 ≥ 110 强中心，同区域 EI 指数仅出现 ≥ 5.7 的小范围区域，主要是 Dutton 指数受高空急流强风速的影响要远大于 EI 指数。

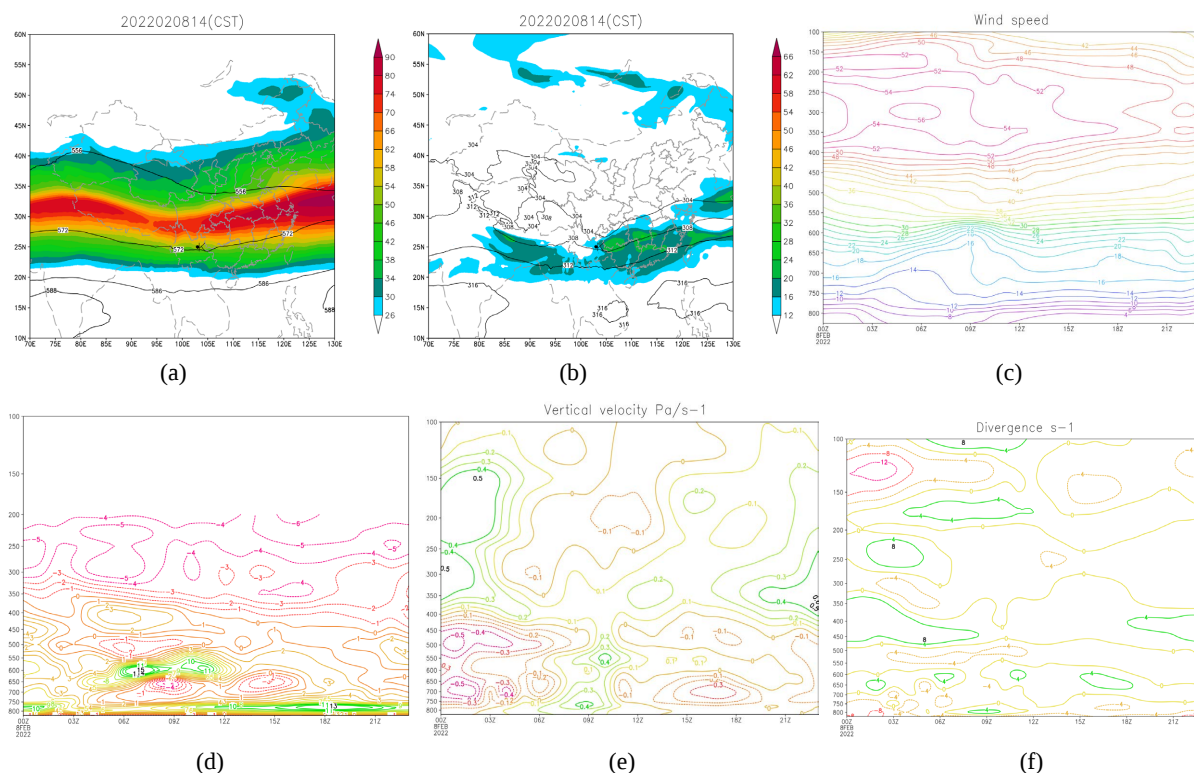


Figure 6. Wind speed maps at 500 hPa (a) and 700 hPa (b) heights on February 8, 2022 at 14:00 Beijing time. Time altitude series chart of wind speed (c), vorticity (d), vertical velocity (e), and divergence (f) from 08:00 on February 8, 2022 to 08:00 on February 9, 2022 (UTC time on the horizontal axis)

图 6. 北京时 2022 年 2 月 8 日 14 时 500 hPa (a)、700 hPa (b) 高度风速图。北京时 2022 年 2 月 8 日 08 时~9 日 08 时风速(c)、涡度(d)、垂直速度(e)和散度(f)时间高度系列图(横坐标为 UTC 时间)

图 6(a)显示 8 日 14 时 500 hPa 高度急流最大风速区位于云南北部 28°N 至 32°N 之间, 其中心风速超过 70 m/s , 14~17 时(图略)急流由北向南移动, 本场上空风速由 36 m/s 增大至 40 m/s 。8 日 14 时 700 hPa 高度低空急流(图 6(b))位于云南中东部和南部, 最大风速区在云南东部, 其中心风速超过 24 m/s , 14~17 时本场上空风速由 14 m/s 增大至 16 m/s 。图 6(c)显示 11 时后 750 hPa 急流中心强度在增强, 急流的厚度也在增加, 650 hPa~600 hPa 急流中心在减弱, 600 hPa~500 hPa 急流中心在增强, 尤其是 14 时后这种趋势更加明显, 这就导致 650 hPa~500 hPa 区间风速切变加大, 结合航空器报告来看, 颠簸主要发生在风速切变较大的时段, EI 指数和 Dutton 指数较好地反应出风速切变增大的过程。

图 6(d)为本场涡度的时间变化图, 8 日 14 时后本场上空 700 hPa~500 hPa 气旋性涡度增大, 中心位于 600 hPa, 中心值为 $18 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$, 颠簸出现时段气旋性涡度大值区一直存在, 14~17 时气旋性涡度中心不断增高, 17 时中心边缘伸展至 500 hPa 附近, 对应飞机遭遇颠簸的高度也从 3600 m 升高至 5100 m。分析垂直速度分布图(图 6(e)), 8 日 14~17 时颠簸对应的高度由弱的上升运动转为下沉运动, 中心位于 550 hPa, 强度为 $0.4 \times 10^{-2}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, 结合经向剖面图(图略)可知, 颠簸发生在上升气流和下沉气流交汇区, 也即易出现湍流的区域。散度场布图(图 6(f))表明, 8 日 14~17 时 600 hPa~500 hPa 有一辐合区维持, 中心值为 $-4 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$, 700 hPa~600 hPa 附近则存在一弱辐散区, 颠簸发生在辐合辐散交汇区。

6. 颠簸指数预报产品对比分析

长水机场基于 GFS 资料开发了未来 48 小时逐小时颠簸指数预报产品, 利用该产品与 ERA5 再分析资料计算得到的颠簸指数进行对比分析, 验证颠簸指数的可靠性。

Table 2. Turbulence index values of CES9615 during the descent process and at similar times to overload on March 3, 2024
表 2. 2024 年 3 月 3 日 CES9615 下降过程与过载相近时刻颠簸指数值

时间	高度/m	经度	纬度	Dutton 指数	EI 指数	QAR 过载增量
11:15:42	9174	105.5	28	191.4	28.9	0.23
11:54:14	4200	102.7	25.6	64.4	5.1	0.21
12:01:10	3600	103	25.5	140.3	8.2	0.34
12:11:46	2178	102.9	25.1	44.7	6.8	0.27
12:18:58	3600	102.6	25	118.5	5.9	0.24
12:38:06	2314	102.9	25.1	45.6	3.6	0.23

一般来说，过载增量越大，颠簸越强。3 月 3 日 CES9615 航班于 12:03 分报告在 3300~3600 米高度遭遇中到强颠簸，分析 QAR 数据(见表 2)发现，此时过载增量最大。下降过程中，11:15 经过颠簸指数大值区短时过载，12:01~12:11 过载增量较大，颠簸较强，下降至 2178 米时飞机复飞。飞机过载增量较大的这些点，Dutton 指数产品均超过 40。飞机两次经过 3600 高度时过载增量均较大，颠簸较强；在对应高度(650 hPa) Dutton 指数分别为 140.3、118.5，EI 指数值分别为 8.2、5.9，与颠簸的强度吻合。在 2200 米高度虽然颠簸指数略小，但飞行高度较低时，切变对飞行的影响大，因此过载也较为明显。

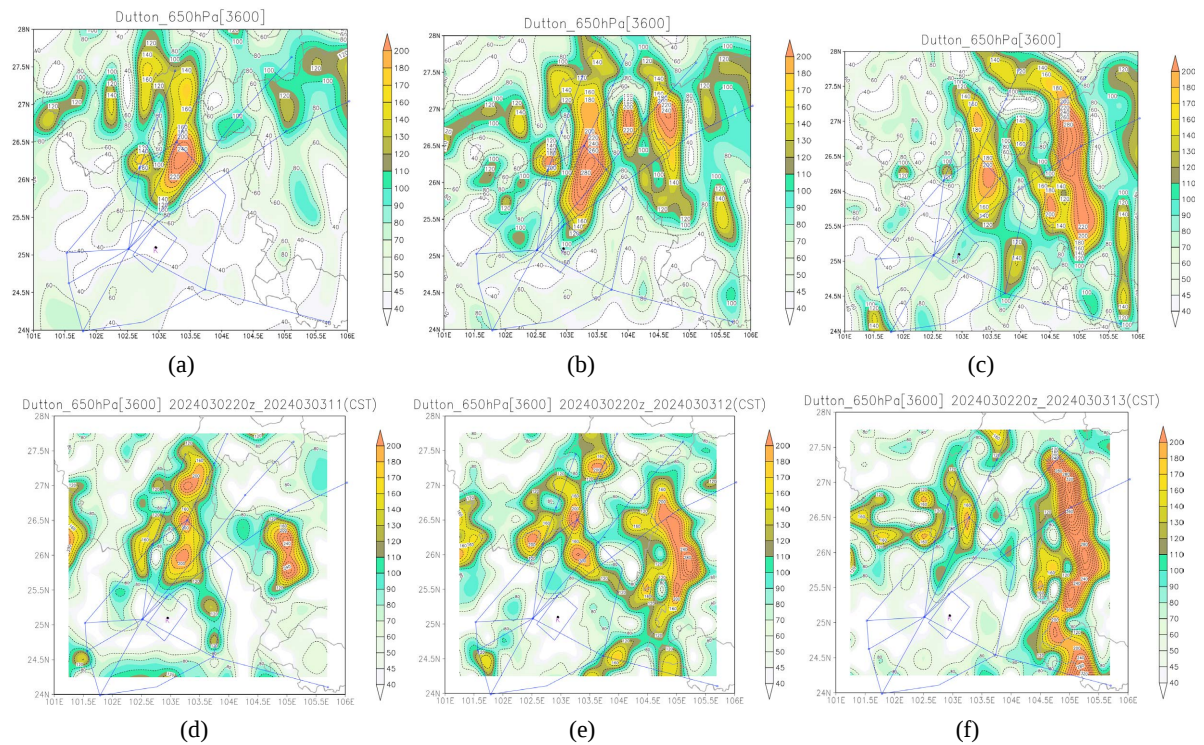


Figure 7. Distribution map of 650 hPa Dutton index calculated by ERA5 at 11:00 (a), 12:00 (b), and 13:00 (c) Beijing time on March 3, 2024; The Dutton index prediction chart at 650 hPa at 11 o'clock (d), 12 o'clock (e), and 13 o'clock (f)

图 7. 北京时 2024 年 3 月 3 日 11 时(a)、12 时(b)、13 时(c) ERA5 计算的 650 hPa Dutton 指数分布图；11 时(d)、12 时(e)、13 时(f) 650 hPa 的 Dutton 指数预测图

从再分析资料得到的 Dutton 指数 650 hPa 分布图可知，11 时(图 7(a))，终端区的西北区有南北向带状大值区，中心值≥24,012 时(图 7(b))该大值区南压覆盖在中心关键期以北，PP521 航点 Dutton 值高达

140, 飞机经过该位置时遭遇中到强颠簸。13 时(图 7(c)), Dutton 指数大值区向东北方向移出关键区, Dutton 指数减小到 80, 14 时后迅速减小至 25 以下, 不再收到颠簸航空器报告。

结合 Dutton 指数预报产品来看, 11 时(图 7(d)) Dutton 指数预报产品与再分析资料相比, 终端区西北区的大值区预报基本一致, 云贵交界处 Dutton 指数预报偏大。12~13 时(图 7(e), 图 7(f))预报终端区西北区的大值区迅速往东北方向移走, 与再分析资料出现较大偏差, 漏报了此次中到强颠簸的过程。

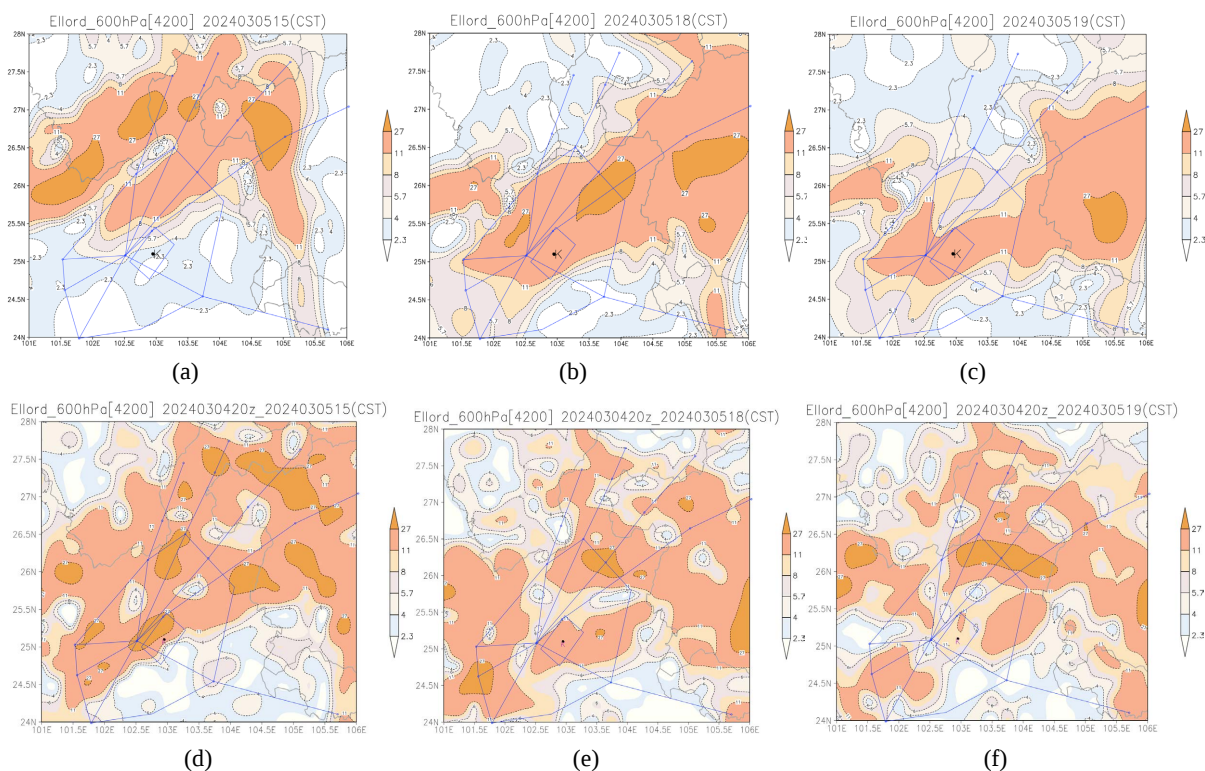


Figure 8. Distribution map of 450 hPa El index calculated by ERA5 at 15:00 (a), 18:00 (b), and 19:00 (c) Beijing time on March 5, 2024; Prediction chart of El index at 600 hPa at 15:00 (d), 18:00 (e), 19:00 (f). (The black circle represents the bumpy position)

图 8. 北京时 2024 年 3 月 5 日 15 时(a)、18 时(b)、19 时(c) ERA5 计算的 600 hPa El 指数分布图; 15 时(d)、18 时(e)、19 时(f) 600 hPa 的 El 指数预测图。(黑色圈为颠簸位置)

2024 年 3 月 5 日 18:18 时飞机在马龙 360°径向 20 km 处 4200~4500 米高度遭遇中到强颠簸。再分析资料计算得到的 El 指数分布图(图 8(a))表明, 5 日 15 时 600 hPa 高度 $El \geq 11$ 的大值区成片覆盖终端区北部并逐渐南压, 18 时(图 8(b))覆盖马龙导航台及附近航路, 大值区呈东西向的窄带状分布; 19 时(图 8(c))窄带状大值区呈西南东北向, 覆盖关键区和终端区东北区。5 日 18:18 时 El 指数高值区覆盖飞机经过的位置, 风的切变和形变大, 遭遇中到强颠簸。

结合 El 指数预报产品分析, 3 月 4 日 20 时初始场预报 3 月 5 日 15 时 El 指数分布(图 8(d))与 ERA5 再分析的 El 指数分布图覆盖区域大体相近, El 指数预报产品覆盖面积稍微大一些, 且 $El \geq 11$ 的大值区提前覆盖马龙附近。18 时 El 指数预报产品(图 8(e))在关键区和终端区东北区的大值区形状相似, 覆盖面积小一些。El 指数预报产品预测出了此次颠簸过程, El 指数的大值区与颠簸遭遇位置相符。预测产品显示 19 时(图 8(f)) El 指数大值区东移, 与 ERA5 计算的 El 指数分布存在一定差别。由于颠簸指数是基于数值预报风场的数据计算得到的, 当数值预报风场差别较大时, 颠簸指数预报产品也会出现偏差。

7. 小结

通过对昆明管制区内航路颠簸的统计和预测案例分析,得到以下结论:

- 1、昆明管制区航路颠簸主要出现在每天的 07~23 时, 14~15 时出现最多; 大部分颠簸出现的高度在 6937~8350 之间。
- 2、机场关键区常遭遇颠簸的高度为 3600~4500 米, 重点关注与跑道平行方向的大值区。造成昆明管制区出现中到强或强颠簸的天气系统主要位于 500 hPa 高度层附近。
- 3、颠簸易发生在上升和下沉气流交汇区及辐合辐散分界处; 颠簸指数的运用要结合天气系统、高低空急流及垂直速度、散度等进行分析。
- 4、昆明管制区内颠簸指数预测产品对颠簸预测有一定的指导意义; 大风季跟踪 EI 指数 ≥ 11 或 Dutton ≥ 80 的大值能够较好地监视颠簸区域的变化; 颠簸指数预测产品对数值预报产品依赖性很强, 预测有一定偏差时需结合风场的变化进行分析。

参考文献

- [1] 辜运燕. 我国西部干线飞机颠簸分布规律分析[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2009.
- [2] 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.
- [3] 邹波. 地面加热对飞机颠簸影响的动力学初步分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 527-531.
- [4] 俞飞, 王科, 梁爱民, 等. 华北地区晴空颠簸的分类特征及分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 15-21.
- [5] Schumann, U. and Sharman, R. (2015) Aircraft Wake-Vortex Encounter Analysis for Upper Levels. *Journal of Aircraft*, 52, 1277-1285. <https://doi.org/10.2514/1.c032909>
- [6] Ellrod, G.P. and Knapp, D.I. (1992) An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use. *Weather and Forecasting*, 7, 150-165. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0150:aocatf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0150:aocatf>2.0.co;2)
- [7] 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.
- [8] 李跃春, 杨晶轶, 徐海, 等. 拉萨航路一次颠簸过程的成因分析和数值模拟[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(1): 56-60.
- [9] 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.
- [10] Dutton, M.J.O. (1980) Probability Forecasts of Clear-Air Turbulence Based on Numerical-Model Output. *Meteorological Magazine*, 109, 293-310.