

西南地区飞机颠簸气象成因分析

王菲¹, 许鲁君², 梁珊珊³, 李耀辉⁴, 刘辉志¹, 刘翔卿⁵

1. 云南大学大气科学系, 昆明, 650500
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029
3. 中国民航大学, 天津, 300300
4. 中国民用航空飞行学院, 四川广汉, 618307
5. 云南机场集团有限责任公司腾冲机场, 云南腾冲, 679100

摘要: 飞机颠簸主要由大气湍流引起, 而湍流的形成与风速变化、温度变化、地形等因素密切相关。尤其在西南地区, 由于地形复杂, 高原对气流的抬升作用显著。飞机在穿越这些区域时, 容易受到不稳定气流的影响, 出现颠簸。利用再分析数据、地形数据、卫星数据和航空器空中报告对 2024 年 4 月 4 日由腾冲飞往昆明的 MU5954 航班颠簸事件进行分析, 结果表明飞机颠簸位置下方为山脉迎风坡和背风坡的分界区域, 气流不稳定。垂直速度、散度、涡度的正负相间分布和冷暖平流交汇, 这些因素共同作用引发大气湍流, 使飞机在飞行过程中易发生颠簸。

关键词: 飞机颠簸; 西南地区; 气象条件; 高原地形

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2505.25053

Analysis of Meteorological Causes of Aircraft Bumpiness in the Southwest Region

Fei WANG¹, Lujun XU², Shanshan LIANG³, Yaohui LI⁴, Huizhi LIU¹, Xiangqing LIU⁵

1. Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming, 650500
2. Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy Sciences, Beijing, 100029
3. Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300
4. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan, 618307
5. Yunnan Airport Group Corporation Limited, Tengchong Airport, Tengchong, Y

收稿日期 2025-03-29; 网络预出版日期

作者简介 王菲 (2001-), 女, 硕士生, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: 12024118070@stu.ynu.edu.cn

通讯作者 许鲁君, 副研究员, 主要从事陆面过程和大气边界层研究。E-mail: xulujun@mail.iap.ac.cn

李耀辉, 研究员, 主要从事天气、气候与气候变化以及航空气象等方面的研究。E-mail: liyh@cafuc.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (42275079、42430607、42411530052); 云南省基础研究计划项目 202401BC070004

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42275079, 42430607, 42411530052), Yunnan Provincial Basic Research Program (Grant 202401BC070004)

31 unnan, 679100

32

33 **Abstract:** Aircraft bumpiness is primarily caused by atmospheric turbulence, which is
34 closely related to changes in wind speed, temperature, and topography. This is
35 especially the case in the southwestern region, where the complex terrain and the
36 significant uplifting effect of the plateau on air currents make aircraft more susceptible
37 to turbulence when flying through these areas. Using reanalysis data, topography data,
38 satellite data and aircraft in-flight reports, an analysis was conducted on the turbulence
39 event experienced by flight MU5954 from Tengchong to Kunming on April 4, 2024.
40 The results indicate that the location below the turbulence was the boundary between
41 the windward and leeward slopes of the mountains, where the air currents were unstable.
42 The alternating positive and negative distributions of vertical velocity, divergence, and
43 vorticity in upper-level jet stream areas, combined with the convergence of cold and
44 warm airflows, jointly trigger atmospheric turbulence, making it easier for aircraft to
45 experience bumpiness during flight.

46 **Keywords:** Aircraft Bumpiness; Southwestern region; Meteorological Conditions;
47 Plateau Topography

48

49 1 引言

50 飞机颠簸是指飞机在飞行过程中, 由于受到气流或其他外部因素的影响, 突
51 然出现忽上忽下、左右晃动和振颤等现象。强烈的颠簸不仅会给乘客和机组人员
52 带来身体的不适, 也会影响飞机的飞行状态和机动性能, 增加潜在的风险。例如,
53 2023年7月10日国航CA1524航班在飞行过程中突遇晴空颠簸, 导致两人受伤。
54 2024年5月21日新加坡航空SQ321航班遭遇了严重颠簸, 飞机在3分钟内从
55 11300米高度急剧下降到9400米, 造成1人死亡, 30人受伤。除了对机上人员
56 的安全造成威胁外, 飞机颠簸也给航空业带来了一定的经济损失。据统计, 仅在
57 美国, 由于颠簸造成的飞机磨损、飞行员为避免颠簸改变航线而增加的燃油消耗
58 等, 使航空业每年损失1.5亿至5亿美元。并且研究发现, 气候变化使晴空湍流
59 出现的频率提高, 颠簸平均持续的时间也在变长 (Prosser et al., 2023), 这意味着
60 人们乘坐飞机出行时遇到颠簸的可能性在不断增加。因此, 飞机颠簸是确保飞行
61 安全面临的一个重大挑战。通过研究分析飞机颠簸的原因, 可以为颠簸预防策略
62 的制定提供理论依据, 这对于提升飞行安全具有重要意义。

63 研究表明, 飞机颠簸是由大气湍流引起的 (李子良和黄仪方, 2008)。飞机在
64 飞行过程中受到来自不同方向, 不同速度的气流影响, 这些气流会对飞机产生不

65 同的力, 导致飞行姿态发生变化, 进而使飞机出现晃动等现象。Sharman 和 Lane
66 (2016) 指出晴空湍流 (Rossow and James, 2000; Wasson et al., 2022)、对流湍
67 流 (Sharman and Lane, 2016; Sharman and Trier, 2019)、低空急流 (Clark and Peltier,
68 1984; Petenko et al., 2020)、山地波湍流 (Doyle et al., 2011) 以及飞机尾流涡旋
69 所产生的湍流 (Sharman et al., 2006) 均是导致飞机颠簸的原因。大量的飞行实践
70 说明飞机颠簸和大气湍流通常发生在具有以下特征的区域: (1) 风的垂直切变区,
71 (2) 风的水平切变区, (3) 流场的辐合或辐散区, (4) 流场的水平变形区, (5)
72 流场变化的不连续区, (6) 强的水平温度梯度区 (干全等, 2002)。在我国, 根据
73 飞机颠簸事件的空间分布, 可以发现西南地区、西藏地区是我国飞机颠簸的主要
74 高发区 (张林意等, 2024)。这些地区地理环境复杂, 天气多变, 极大地增加了航
75 空安全保障的难度。特别是由盆地飞往高原机场的时候, 经常会出现飞机颠簸。
76 通过对不同高原航线飞机颠簸的概率进行分析, 发现云贵高原航线的飞机颠簸概
77 率较大 (黄仪方等, 2011)。并且高原航班在进离场阶段遭遇颠簸的频率要远远高
78 于巡航阶段 (黄萌等, 2024)。

79 基于西南地区飞机颠簸频次较高的现象, 接下来分析其成因。西南地区地形
80 复杂, 高原的抬升作用显著。当气流经过高原地区时, 被迫上升, 形成强烈的垂
81 直运动。这种地形引起的气流变化会增强高空风速, 从而有利于高空急流的形成。
82 高空急流内部具有强大的水平风切变和垂直风切变, 这导致飞机在急流附近遭遇
83 颠簸的可能性较高, 且发生颠簸时, 颠簸强度较大。此外, 高原地区的地形有利
84 于山地背风波的形成。背风波中, 垂直气流和水平气流存在明显差异。背风波的
85 波动影响范围在水平方向可伸展几十千米至几百千米, 垂直方向可伸展到整个对
86 流层, 对飞行产生极大影响 (徐海等, 2007)。许多飞行报告显示: 飞机进入波动
87 气流后, 往往一两分钟就丧失几百米的高度, 而且丧失高度的过程完全处于平滑
88 无扰的状态, 而后又抬升, 如此反复多次。如果在夜间或云中飞行, 飞行人员在
89 丧失高度时毫无警觉, 就极易导致飞行事故。并且 Hines (1960) 的研究发现垂直
90 传播的山地背风波随高度增加、空气密度减小, 振幅会随之增大或者产生风切变,
91 任意一个情况均会导致重力波破碎并产生湍流 (Prusa et al., 1996; Fritts and
92 Alexander, 2003)。

93 同时由于高原地面辐射增温不均匀, 地面加热会产生明显的水平温度切变和
94 水平风切变 (特别是在加热中心区域), 加热中心伴随上升运动、加热中心外侧
95 伴随下沉运动 (邹波, 2004), 从而触发局地热力对流。另一方面这种不均匀加热
96 也会导致大气层结不稳定, 一旦遇到外界扰动, 便容易发展出积云对流。这种热
97 力—动力耦合效应通过云系特征显现: 以未闭合的细胞状云系、地形云和积云
98 线观测到的次数较多。具体而言, 随着季节从春到夏, 高原上空暖空气开始活跃,

99 而地面温度比较低，暖空气和地面之间温差较大，对流强烈，容易形成未闭合的
100 细胞状云系。积云线则是由积云、浓积云组成。因此，云内或云的周边地区乱流
101 较强，飞机经过该云系时往往会引发中度或中度以上的颠簸（孙智博,2011）。综
102 上所述，高原地区的热力作用是造成飞机颠簸的关键因素之一，高原热力作用通
103 过引发大气动力变化，促使湍流发展，显著增加了飞机飞行过程中的颠簸风险。

104 随着近年来民航业的快速发展，民航作为西南地区重要的交通运输方式之一，
105 研究该地区飞机的飞行安全尤为重要。本文聚焦于西南地区复杂地形下发生的颠
106 簸事件，探究地形如何通过影响动力和热力因素改变气象条件，进而导致飞机颠
107 簸的机制。

108

109 2 数据与方法

110 2.1 气象数据

111 本文所用到的气象数据来源于欧洲中期天气预报中心（ECMWF）发布的
112 ERA5 再分析数据集（地址：<https://cds.climate.copernicus.eu>）。ERA5 是 ECMWF
113 第五代全球大气再分析产品，提供了自 1950 年至今的全球气候数据。该数据集
114 的时间采用协调世界时（UTC），水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直方向上包含
115 37 个等压面，从近地面的 1000hPa 延伸至高层大气的 1hPa。涵盖了不同高度层
116 中大气变量的每小时再分析数据，包括散度、位势高度、位势涡度、经向风和纬
117 向风等要素。通过结合观测数据和数值模型，ERA5 能够提供一个全球完整且一
118 致的数据集，适用于天气分析、气候研究和环境监测等多种应用领域。

119

120 2.2 地形数据

121 本文对地形的分析采用 ETOPO（Earth Topography）2022 数据（地址：
122 <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>）。该数据集由美国国
123 家海洋和大气管理局（NOAA）下属的国家环境信息中心（NCEI）2022 年发布，
124 集成了来自区域和全球数据集的地形、测深和海岸线数据，以实现地球表面物
125 理特征全面、高分辨的呈现。ETOPO 2022 数据集包括基岩数据、高程数据和冰
126 面数据，每类数据均提供 15 弧秒、30 弧秒、60 弧秒三种分辨率的版本，以满足
127 不同精度的需求。

128

129 2.3 卫星数据

130 本文用到的卫星数据为 MODIS/Aqua 数据（地址：[https://ladsweb.modaps.eo](https://ladsweb.modaps.eosds.nasa.gov/search/)
131 [sdis.nasa.gov/search/](https://ladsweb.modaps.eosds.nasa.gov/search/)）。MODIS 是搭载在 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪，
132 Aqua 卫星在当地时间下午大约 1:30 从南向北（升轨）经过赤道，夜间 1:30 左

133 右从北向南（降轨）经过赤道，这种特殊的过境时间对于观测下午的对流活动和
134 云的形成发展过程具有重要意义。Aqua 卫星提供的数据产品包括 MYD00F、M
135 YD021KM、MYD0HKM、MYD02QKM、MYD03 等，涵盖了多种类型和分辨率
136 的数据：MYD00F 包含未经处理的原始数据，MYD021KM、MYD0HKM、MYD
137 02QKM 分别提供 1 公里、500m、250m 分辨率的校准辐射率数据，MYD03 是 1
138 公里分辨率的地理定位数据，为精确分析提供地理位置参考。
139

140 2.4 飞机颠簸数据资料

141 颠簸数据来源于话音方式的航空器空中报告（以下简称“航空器报告”）。航
142 空器在飞行过程中遇到颠簸、积冰、风切变等危险天气时，飞行员通过语音的方
143 式向空管部门进行报告，再由管制部门向气象预报员传递飞机信息。航空器报告
144 主要包括重要天气发生的时间、位置、高度、强度、航班号、机型等信息。相较
145 于卫星数据，航空器报告能够客观地反映出颠簸的真实情况，是研究颠簸最直观
146 的数据资料。

147

148 2.5 颠簸指数

149 飞机颠簸的形成与多种气象条件密切相关，其中动力因素通过改变大气的风
150 场结构，导致飞机遭遇强烈的风速变化。热力因素通过引发对流运动，增强湍流
151 的强度和频率，从而引发飞机颠簸。根据大气环境场中的气象要素值计算颠簸指
152 数，对飞行过程中是否有遭遇颠簸的风险有一定的指示。本文主要选取垂直风切
153 变指数（VWS），MOSCAT 概率预报因子指数（Moscat），水平辐散指数（DIV），
154 水平温度梯度指数（HTG）计算并分析。

155 （1）垂直风切变指数（VWS）

156 具有风速垂直切变环境的重力波称为 Kelvin-Helmholtz（K-H）波。垂直风切
157 变与产生颠簸的 K-H 波有关。垂直风切变指数表达式为：

$$158 \quad VWS = |V_H| = \left(\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

159 其中 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 为垂直高度上经向风的变化， $\frac{\partial v}{\partial z}$ 为垂直高度上纬向风的变化。

160 （2）MOSCAT 概率预报因子指数（Moscat）

161 MOSCAT 概率预报因子指数被认为是 NCEP 嵌套网格模型（NGM）模式输
162 出统计（MOS）的概率预测中最有效的预报因子。其表达式为：

$$163 \quad Moscat = |V|D_{ef} \quad (2-2)$$

164 其中 $|V|$ 为合成风速， $|V| = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$ ， D_{ef} 为水平变形项，是切变变形项和拉伸

165 变形项的矢量和, $D_{ef} = (D_{SH}^2 + D_{ST}^2)^{\frac{1}{2}}$ 。 D_{SH} 为切变变形项, $D_{SH} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 。 D_{ST}

166 为拉伸变形项, $D_{ST} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 。

167 (3) 水平辐散指数 (DIV)

168 水平风场的强辐合辐散区与风场的切变区域对应良好, 并且辐合可以对锋生
169 产生作用。其表达式为:

$$170 \quad DIV = \left| \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right| \quad (2-3)$$

171 其中 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 指经向风沿经度方向的变化, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 指纬向风沿纬度方向的变化。

172 (4) 水平温度梯度指数 (HTG)

173 由热成风定义及其表达式 $\vec{V}_T = \frac{R}{f} \ln \frac{p_0}{p_1} \vec{k} \times \nabla T$ 可知, 水平温度梯度可以用来判
174 断垂直风切变和风场形变, 因此可作为颠簸诊断指数。其表达式为:

$$175 \quad HTG = |\nabla_H T| = \left(\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

176 其中 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 指温度沿经度方向的变化, $\frac{\partial T}{\partial y}$ 指温度沿纬度方向的变化。

177 上述颠簸指数的阈值如下表所示, 阈值的选取主要来源于参考文献(申燕玲
178 等, 2017; 苏腾, 2016; 刘雷, 2018; 闫文辉等, 2022)。

179 表 1 飞机颠簸指数对应阈值

指数名称	无颠簸	轻度颠簸	中度颠簸	重度颠簸	严重颠簸
VWS($\times 10^{-3} s^{-1}$)	4	6	8	10	12
Moscat($\times 10^{-3} ms^{-2}$)	0.3	1.1	1.7	2.7	3.3
DIV($\times 10^{-4} s^{-1}$)	0	0.4	0.8	1.2	1.6
HTG($\times 10^{-5} K \cdot m^{-1}$)	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8

180 颠簸指数通过量化的方式, 将复杂的气象条件转化为具体的数值。其中垂直
181 风切变指数、MOSCAT 概率预报因子指数、水平辐散指数从动力方面对颠簸评
182 估。水平温度梯度指数则是从热力角度评估颠簸。借助颠簸指数, 不仅有助于更
183 好地分析颠簸产生的原因, 还能为飞行员提供更准确的飞行建议和安全措施。

184

185 3 西南地区飞机颠簸事件分析

186 造成飞机颠簸的直接原因是大气湍流。湍流中气流方向和速度的剧烈变化,
187 导致飞机垂直方向上原有的受力平衡被打破, 进而引发颠簸现象。常见的引起大
188 气湍流的因素包括风速变化、温度变化、地形因素等。我国西南地区, 地形复杂
189 且天气条件多变, 气流经过山地时受到阻碍和扰动, 容易出现湍流。在这样的背
190 景下, 飞机在西南地区飞行时遭遇颠簸的频率显著增加。接下来选取颠簸个例分

191 析其气象成因。

192

193 3.1 个例介绍

194 本文选取的颠簸事例为 2024 年 4 月 4 日，协调世界时（UTC）6 时 49 分，
195 由保山腾冲机场飞往昆明机场的 MU5954 航班在腾冲上空（24.95° N，98.48°
196 E），高度 5700 米处发生轻度颠簸，持续时间为 20~30 秒。

197 为便于分析，取此次颠簸事件的发生位置为 25° N，98° E。根据飞机所在
198 高度 5700 米，将几何高度转换为位势高度：

$$199 \quad Z \equiv \frac{\phi}{g_0} = \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{g_0} = \int_0^Z \frac{g}{g_0} dz \quad (3-1)$$

200 其中 $g_0 = 9.8\text{m/s}^2$ ，是全球海平面上重力加速度的平均值。由于 g 在对流层和平
201 流层低层中随高度变化并不太大，因而位势高度 Z 和几何高度 z 在数值上相当一
202 致。

203 根据标准大气的规定，在 11000 位势米（gpm）高度以下的大气是多元大气。
204 则有压高公式：

$$205 \quad Z = \frac{T_0}{\Gamma} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\Gamma R_d}{g_0}} \right] \quad (3-2)$$

206 其中 $p_0 = 1013.25\text{hpa}$ ， $T_0 = 288.15\text{K}$ ， $\Gamma = 0.0065\text{K/gpm}$ 。代入位势高度后，
207 确定颠簸位置所在高度对应的气压为 490hPa。

208

209 3.2 地形分析

210 腾冲驼峰机场坐落于保山市西北部，海拔高度为 1887.8 米，属于典型的高
211 原机场。机场西南侧空旷无高山遮挡，东侧紧邻高黎贡山（图 1）。这种大幅度的
212 地形起伏对气流产生了显著影响，易形成山谷环流、山地波等特有现象。研究表
213 明，腾冲机场常年盛行西南风（吴加传和刘翔卿，2017），当西南气流遇到高黎贡
214 山的阻挡时，气流被迫绕流、爬升。这一过程加剧了气流的不稳定性，进而引发
215 湍流，对途径该区域的飞机产生不利影响。

216 根据 2024 年 4 月 4 日的卫星观测结果（图 2）可以看出，云南上空存在大
217 范围的山地波状云系，并且与该地区的山脉走向大致平行。这一现象与西风带气
218 流遇到南北走向的山脉时被迫抬升的情况密切相关。部分气流在迎风坡上升，冷
219 却后水汽凝结，形成云带，通常与山脉走向相平行。当气流到达背风坡时开始下
220 沉，温度逐渐升高，不利于云的形成。因此，山脉背风坡一般为少云或者无云的
221 区域。这种上升气流和下沉气流的交替出现，形成了波动，在传播过程中进一步
222 发展成山地波。对于 MU5954 航班，从腾冲飞往昆明的航程中，飞机不可避免需

223 要穿越山地波影响的区域，存在航行方向与山地波的传播方向大致垂直的状态。
224 飞机经历垂直气流方向的频繁变化时，升力与重力之间的平衡被打破，进而出现
225 颠簸。

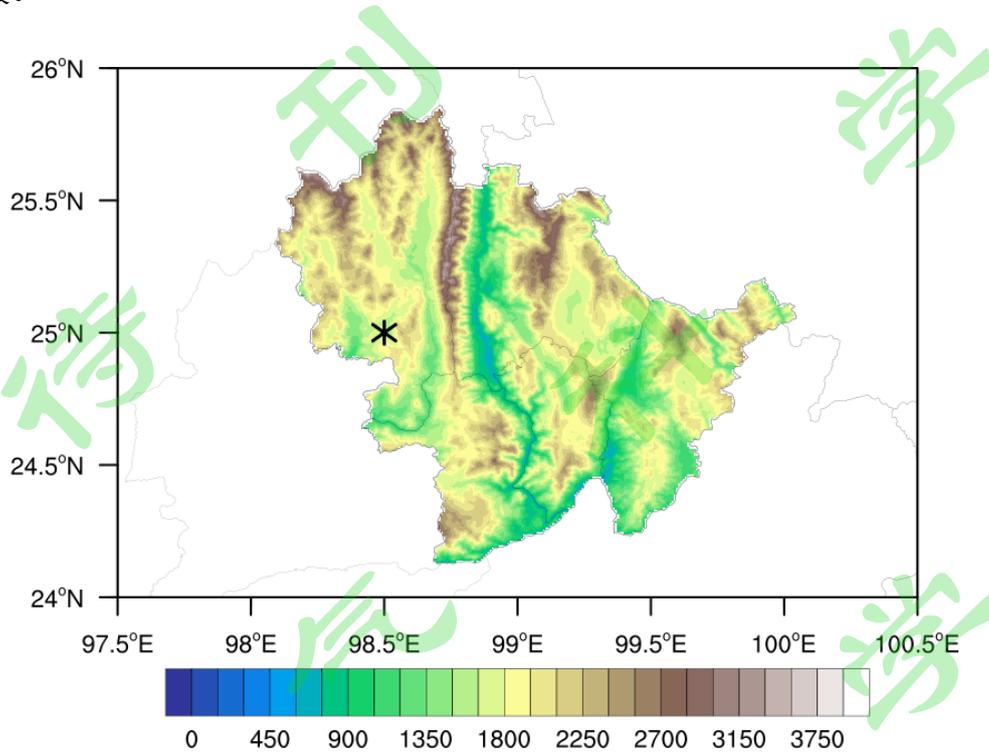


图 1 保山市地形图 (单位: m) (黑色星号为腾冲机场位置)

Fig.1 Topographic Map of Baoshan (unit: m)(The black star indicates the location of Tengchong Airport.)

226
227
228
229
230
231
232

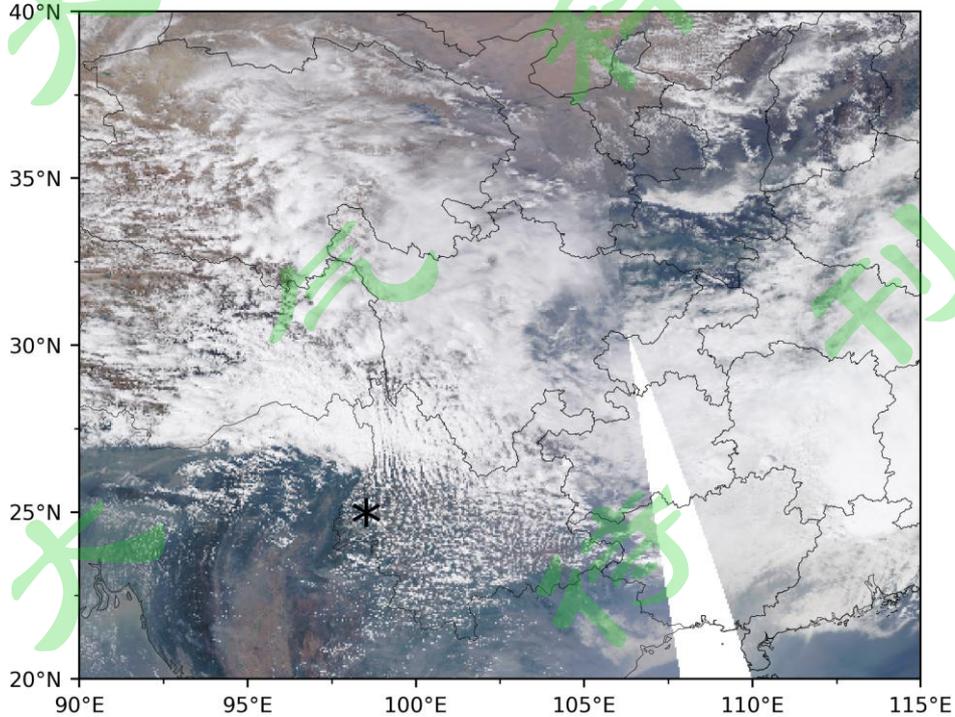


图 2 2024 年 4 月 4 日卫星云图，黑色星号为腾冲机场位置

Fig.2 April 4, 2024, satellite cloud map, The black star indicates the location of Tengchong Airport

233 3.3 环流形势

234 飞机颠簸的发生与大气环流之间存在密切联系。根据大气的环流形势，可以
235 得出天气系统的分布信息。天气系统通过影响风速、风向、气压和温度等气象要
236 素，导致飞机遭遇气流的突然变化，发生颠簸。因此，分析颠簸背景下的环流形
237 势至关重要。2024年4月4日07:00 UTC，根据500hPa高度上的天气形势（图
238 3），云贵高原附近 $100^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$ 之间存在一个低压槽，槽线附近气流呈明显
239 的气旋性弯曲。飞机颠簸位置的风速为 $27m/s$ ，风向为西风，处于槽后脊前，靠
240 近槽线。临近区域温度梯度大，容易引发湍流。此外，在云南省，南北方向上存
241 在风速梯度差异。北部地区的风速范围主要集中在 $10 \sim 20m/s$ ，而南部地区的风
242 速更高，范围大致在 $20 \sim 30m/s$ 。飞机穿越风速梯度较大的区域时，气流的不均
243 匀性会导致飞机遭遇强烈的湍流和风切变，进而破坏飞机的飞行姿态和稳定性，
244 可能引发颠簸。

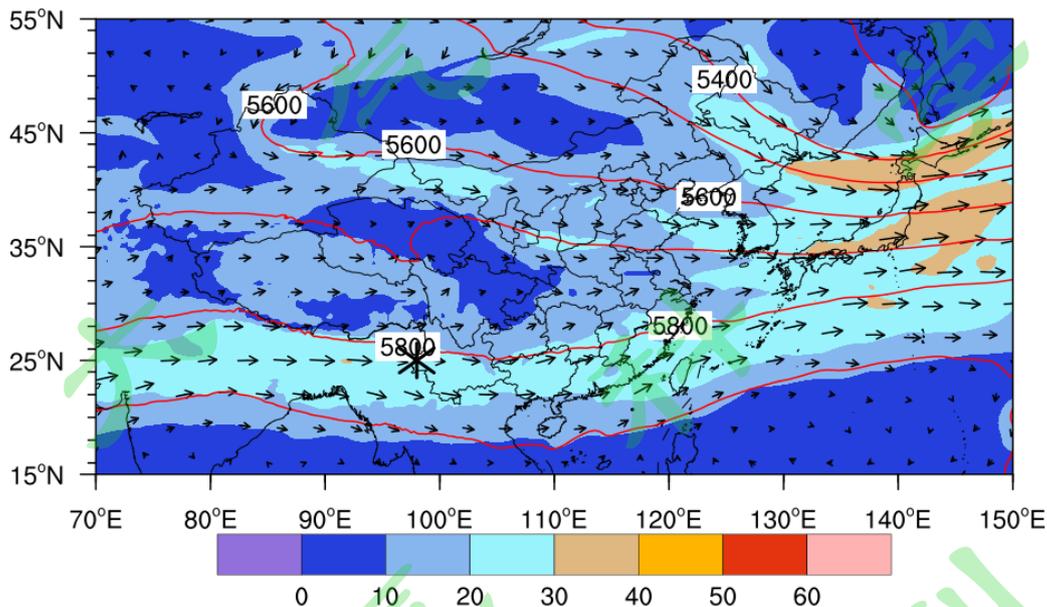


图 3 2024 年 4 月 4 日 07:00 UTC 500hPa 位势高度场和全风速场（等值线表示位势高度，单位为 gpm，风速单位为 m/s ），黑色星号为颠簸位置。

Fig. 3 The geopotential height and wind speed fields at 07:00 UTC on April 4, 2024:500 hPa geopotential height field and wind speed field (contour lines represent potential height in gpm, and wind speed unit: m/s). The black star indicates the bumpiness location.

245 3.4 热力因素

247 温度变化是热力湍流形成的主要驱动力，在高原表现得尤为明显。高原海拔
248 高，太阳辐射强，由于地形起伏不平，导致地表接收的太阳辐射极不均匀。特别
249 是在午后，地表因太阳辐射强烈增温，导致近地面空气受热上升，与周围较冷空

250 气形成显著垂直温差，从而引发热力对流。在颠簸位置下方，西风带中的气流沿
 251 迎风坡上升时，低海拔的暖空气被输送到高海拔，这一过程表现为 98° E 以西存在
 252 在暖平流。气流越过山脉，沿背风坡下沉，高海拔的冷空气被输送到低海拔，表
 253 现为 98° E 以东存在冷平流（图 4a）。沿纬线方向， 25° N 以北存在暖平流，以
 254 南存在冷平流（图 4b）。根据 P 坐标系中不计摩擦力的地转 ω 方程可知，暖平流
 255 产生上升运动，冷平流产生下沉运动，即零温度平流线两侧的垂直运动方向相反
 256 （黄仪方和马婷, 2012）。说明 $25^{\circ} \text{ N}, 98^{\circ} \text{ E}$ 附近是冷暖平流的过渡区域（图 5a），
 257 温度梯度大，同时也是上升气流和下沉气流的过渡区域。当飞机穿越该区域时，
 258 会先后受到不同方向和速度的气流影响，原有的飞行受力平衡被打破，可能发生
 259 颠簸。

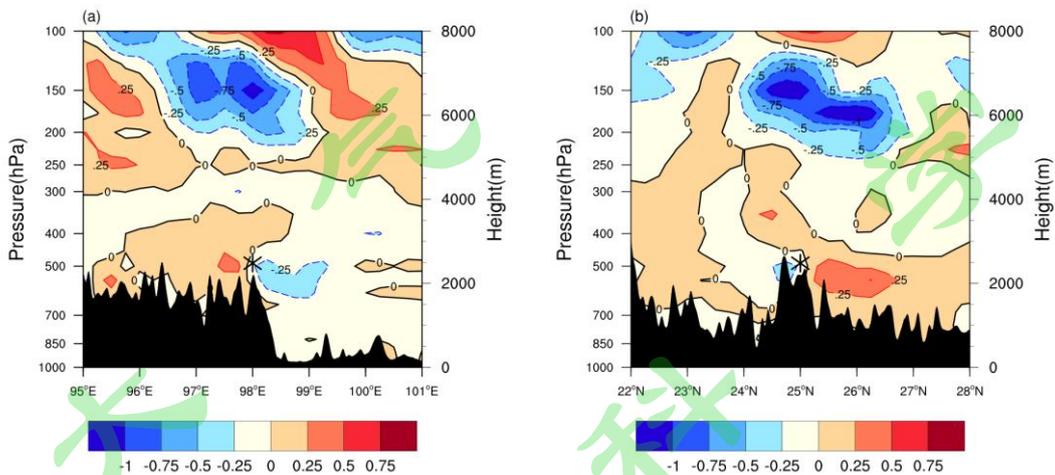


图 4 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 以 25° N 为剖面的温度平流分布 (单位: K/s); (b) 以 98° E 为剖面的温度平流分布 (单位: K/s)。黑色星号为颠簸位置。阴影区域为地形。
 Fig. 4 April 4, 2024, 07:00 (a) Temperature advection distribution along the 25° N cross-section (unit: K/s); (b) Temperature advection distribution along the 98° E cross-section (unit: K/s). The black star indicates the bumpiness location. The shaded area represents the terrain.

260
 261 水平温度梯度指数 (HTG) 在热成风背景下代表形变和垂直风切变，常常被
 262 用作航线预报 (林嘉希, 2021)。HTG 值越大，表示水平温度梯度越强，相应的大
 263 气稳定性越差，飞机颠簸的可能性越高。 $25^{\circ} \text{ N}, 98^{\circ} \text{ E}$ 位置 HTG 的值为
 264 $0.8 \times 10^{-5} \text{ K/m}$ ，云南北部的多数区域 HTG 值大于 $1.3 \times 10^{-5} \text{ K/m}$ (图 5b)。根
 265 据 HTG 阈值与颠簸程度的对应关系，当 $\text{HTG} > 0.8 \times 10^{-5} \text{ K/m}$ 时，表明大气中
 266 存在较强的水平温度梯度，这种温度梯度的变化会导致空气密度的不均匀分布，
 267 进而影响飞机的升力。飞机穿越这些区域时，很可能出现轻度或轻度以上颠簸。

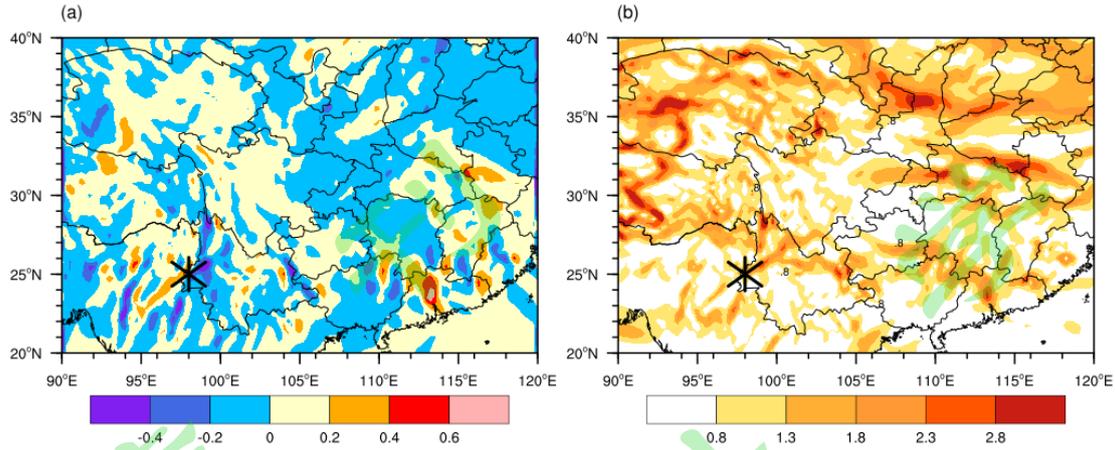


图 5 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 500hPa 温度平流分布 (单位: K/s); (b) 500hPa 水平温度梯度指数分布 (单位: $10^{-5}K/m$)。黑色星号为颠簸位置。

Fig.5 April 4, 2024, 07:00 (a) Temperature advection distribution at 500hPa (unit: K/s); (b) Horizontal temperature gradient index distribution at 500hPa (unit: $10^{-5}K/m$). The black star indicates the bumpiness location.

268

269 3.5 动力因素

270 风速变化引起的大气湍流往往体现在垂直气流、辐合辐散等对飞机升力的改变。
 271 下面从速度场，散度场和涡度场的分布情况对颠簸原因进行诊断。

272 垂直速度是天气分析诊断中的关键物理量，它反映了大气中垂直运动的强度和方向，对天气系统的形成和发展起着至关重要的作用。根据前文对环流形势的分析，颠簸发生的位置位于西风带，西风气流遇到南北走向的山脉时受到阻挡，
 273 在迎风坡被抬升，在 $98^{\circ} E$ 以西形成了上升气流区，最大上升速度 $0.5 Pa/s$ 。
 274 当气流越过山脉后，在背风坡下沉，形成了 $98^{\circ} E$ 以东的下沉气流区，最大下沉速度 $0.7 Pa/s$ (图 6a)。
 275 沿纬线方向，在 $25^{\circ} N$ 以南为下沉气流区，最大下沉速度 $0.4 Pa/s$ ，而 $25^{\circ} N$ 以北是上升气流区，最大上升速度 $0.7 Pa/s$ (图 6b)。这说明颠簸位置东西、南北两侧的垂直气流方向均是相反的，是上升、下沉气流的过渡区，垂直速度梯度较大。在这种环境中，垂直气流速度变化快、方向突变，
 276 飞机很可能出现突然跃升或下降的现象，导致颠簸。

282

283

284

285

286

287

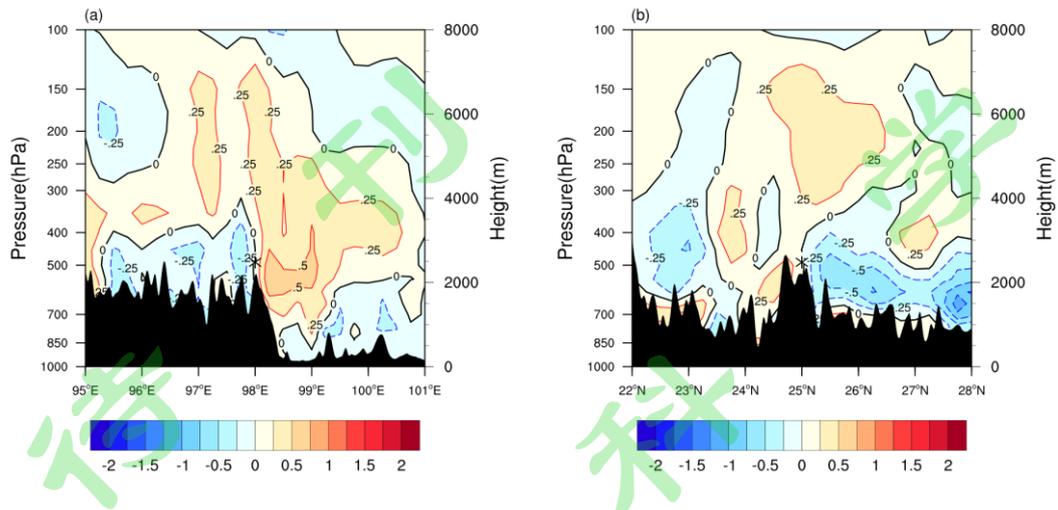


图 6 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 以 25° N 为剖面的垂直速度分布 (单位: Pa/s); (b) 以 98° E 为剖面的垂直速度分布 (单位: Pa/s)。黑色星号为颠簸位置。阴影区域为地形。
 Fig. 6 April 4, 2024, at 07:00 (a) the vertical velocity distribution along the 25° N cross-section (unit: Pa/s); (b) the vertical velocity distribution along the 98° E cross-section (unit: Pa/s). The black star indicates the bumpiness location. The shaded area represents the terrain.

288 选取垂直风切变指数 (VWS) 来分析水平风的垂直变化。该指数表示垂直风
 289 切变的强度。指数越大, 说明垂直风切变越强, 风速或风向的变化越快, 反之,
 290 指数越小, 则表示垂直风切变较弱。 25° N, 98° E 位置的 VWS 值为 $6 \times 10^{-3} s^{-1}$,
 291 云南省内大部分地区 VWS 值在 $4 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$ 范围内 (图 7a)。对于 MOS-
 292 CAT 概率预报因子指数, 反应的是发生湍流的概率。 25° N, 98° E 位置附近多
 293 数区域 Moscat 值大于 $0.3 \times 10^{-3} ms^{-2}$ (图 7b)。根据指数阈值与颠簸的关系得出
 294 结论, 该区域存在较强的垂直风切变, 且发生湍流的概率较大, 飞机在此区域飞
 295 行容易发生轻度颠簸或中度颠簸。

296
 297
 298
 299
 300
 301
 302
 303
 304
 305
 306

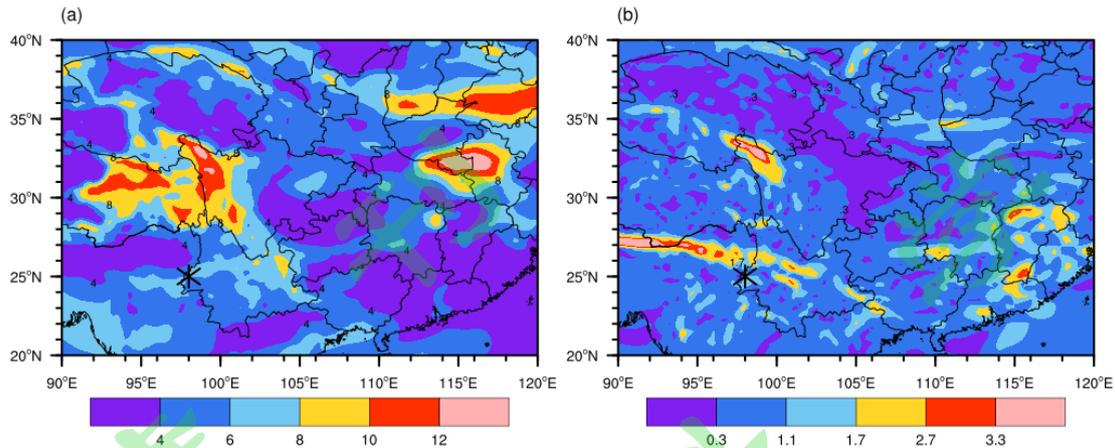


图 7 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 500hPa 垂直风切变指数分布 (单位: $10^{-3}s^{-1}$); (b) 500hPa MOSCAT 概率预报因子指数分布 (单位: $10^{-3}ms^{-2}$)。黑色星号为颠簸位置。

Fig. 7 April 4, 2024, at 07:00 (a) the vertical wind shear index distribution at 500hPa (unit: $10^{-3}s^{-1}$); (b) the MOSCAT probability forecast factor index distribution at 500hPa (unit: $10^{-3}s^{-1}$). The black star indicates the bumpiness location.

307

308 散度的分布可以反映大气中气流的辐合或辐散情况。并且根据达因补偿原理，
 309 大气上下层速度辐合辐散相互补偿以维持大气运动的平衡和稳定，可以由上下两
 310 层气流的辐合辐散关系，对气流的垂直运动进行分析。当上层气流辐合，下层气
 311 流辐散时，两层之间气流作下沉运动。同理，当下层气流辐合，上层气流辐散时，
 312 两层之间气流作上升运动。上层气流的辐散或辐合越强，两层之间气流的垂直运
 313 动越强，越容易引发飞机颠簸（黄仪方和马婷, 2012）。分析此次颠簸事件的散度
 314 分布情况发现，颠簸位置处于散度负值区，气流辐合，上方 400hPa 附近气流辐
 315 散，即两气压层之间存在上升运动，气流沿迎风坡上升。随着地形高度的下降，
 316 $98^{\circ} E$ 以东下层辐散，上层辐合，存在下沉运动，气流沿背风坡下沉（图 8a）。
 317 这与对垂直速度分布的诊断一致。而 $25^{\circ} N$ 附近区域以南，700~400hPa 气压层
 318 之间上层气流辐合，下层气流辐散，存在下沉运动， $25^{\circ} N$ 以北则是上层气流辐
 319 散，下层气流辐合，存在上升运动（图 8b）。这表明沿纬向方向，500hPa 附近是
 320 下沉气流和上升气流的过渡区。同样，在 500hPa 气压层上， $25^{\circ} N$ ， $98^{\circ} E$ 位置
 321 的散度值为 $10^{-6}s^{-1}$ ，南侧散度为负，北侧散度为正（图 9a）。这种正负散度的过
 322 渡区域，气流的辐合和辐散变化剧烈，通常伴随风速和风向的快速变化，飞机经
 323 过该区域时容易发生颠簸。

324 选取水平辐散指数 (DIV) 对颠簸进行评估, 水平辐散指数较高的区域通常
 325 伴随着气流的快速变化, 这种变化可能导致大气湍流的产生, 从而增加飞机颠簸
 326 的可能性。25° N, 98° E 位置南北两侧的水平辐散指数相对较大, 介于
 327 0~0.8 × 10⁻⁴s⁻¹之间 (图 9b)。结合水平辐散指数阈值和颠簸强度的关系, 得出
 328 结论: 颠簸发生位置附近气流存在较强的辐合或辐散, 气流的扰动可能引发大气
 329 湍流, 从而导致飞机出现轻度或中度颠簸。

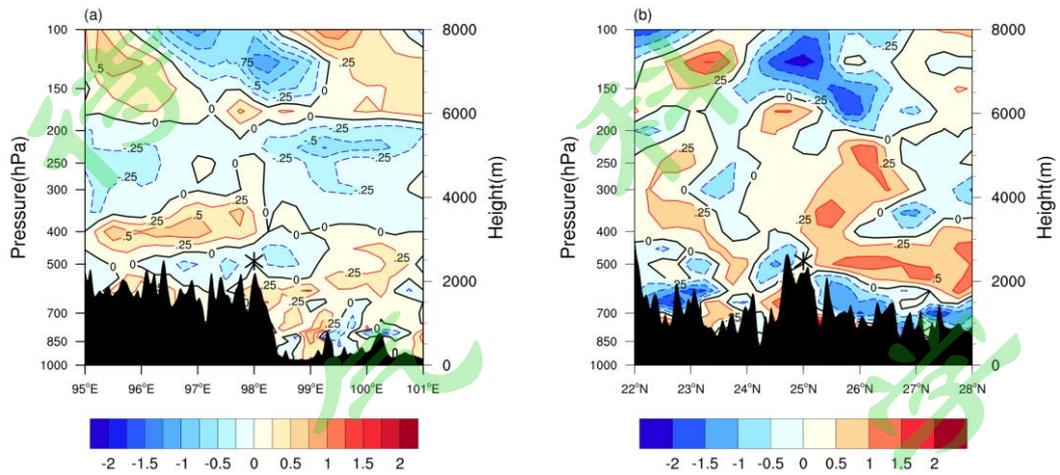


图 8 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 以 25° N 为剖面的散度分布 (单位: 10⁻⁴s⁻¹); (b) 以 98° E 为剖面的散度分布 (单位: 10⁻⁴s⁻¹)。黑色星号为颠簸位置。阴影区域为地形。
 Fig.8 April 4, 2024, at 07:00 (a) the divergence distribution along the 25° N cross-section (unit: 10⁻⁴s⁻¹); (b) the divergence distribution along the 98° E cross-section (unit: 10⁻⁴s⁻¹). The black star indicates the bumpiness location. The shaded area represents the terrain.

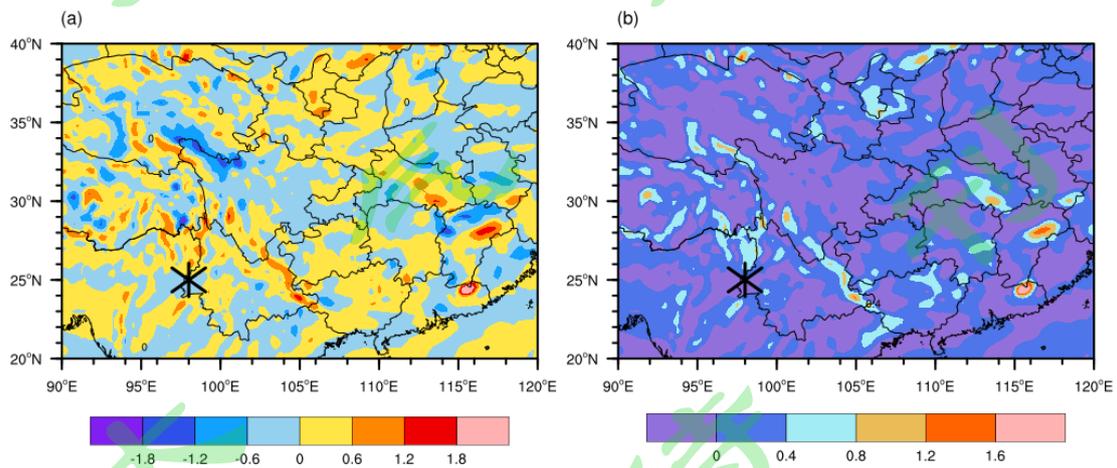


图 9 2024 年 4 月 4 日 07:00 (a) 500hPa 散度分布 (单位: 10⁻⁴s⁻¹); (b) 500hPa 水平辐散指数分布 (单位: 10⁻⁴s⁻¹)。黑色星号为颠簸位置。
 Fig.9 April 4, 2024, at 07:00 (a) the divergence distribution at 500hPa (unit: 10⁻⁴s⁻¹); (b) the horizontal divergence index distribution at 500hPa (unit: 10⁻⁴s⁻¹). The black star indicates the bumpiness location.

330 涡度用于描述流体的旋转程度，当气团的涡度值为正时，表示该气团出现逆
 331 时针转动；反之，涡度为负值时，气团顺时针转动。从涡度的垂直分布情况可以
 332 看出，颠簸位置下方， 98° E 以西的迎风坡为反气旋性环流影响区域，以东的背
 333 风坡为气旋性环流影响区域（图 10a）。 25° N 处于负涡度区，南北均是正涡度区
 334 （图 10b）。即在该高度气压层上， 25° N， 98° E 临近区域涡度梯度大，受到气
 335 旋性环流和反气旋性环流的共同影响，气流的方向和速度变化大。在 500hPa 高
 336 度上的涡度场也可以观察到， 25° N， 98° E 位置处于正负涡度的过渡区域（图
 337 11）。这种涡度分布与颠簸发生的位置对应关系较好，因此，当飞机穿越正负涡
 338 度的过渡区时，容易发生颠簸。

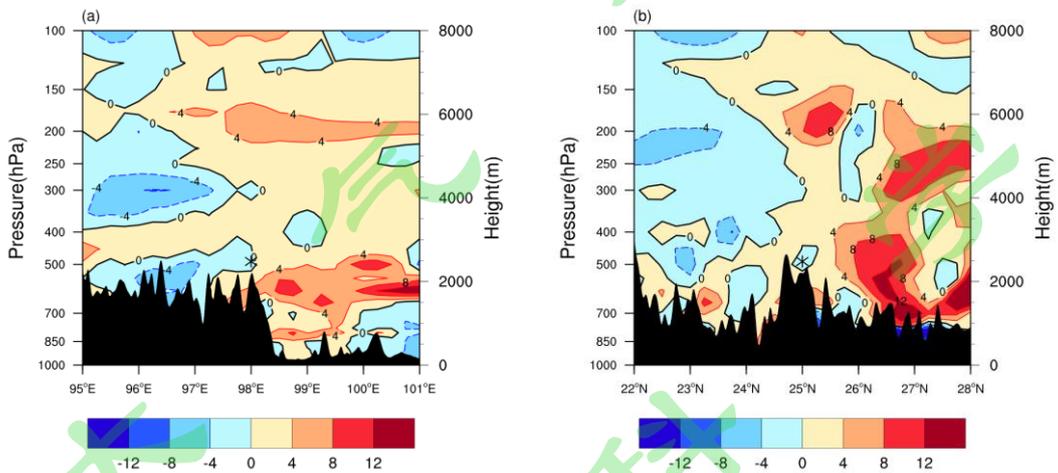


图 10 2024 年 4 月 4 日 07:00，(a) 以 25° N 为剖面的涡度分布（单位： s^{-1} ）；(b) 以 98° E 为剖面的涡度分布（单位： s^{-1} ）。黑色星号为颠簸位置。阴影区域为地形。
 Fig.10 On April 4, 2024, at 07:00, (a) the vorticity distribution along the 25° N cross-section (unit: s^{-1}); (b) the vorticity distribution along the 98° E cross-section (unit: s^{-1}); The black star indicates the bumpiness location. The shaded area represents the terrain.

339

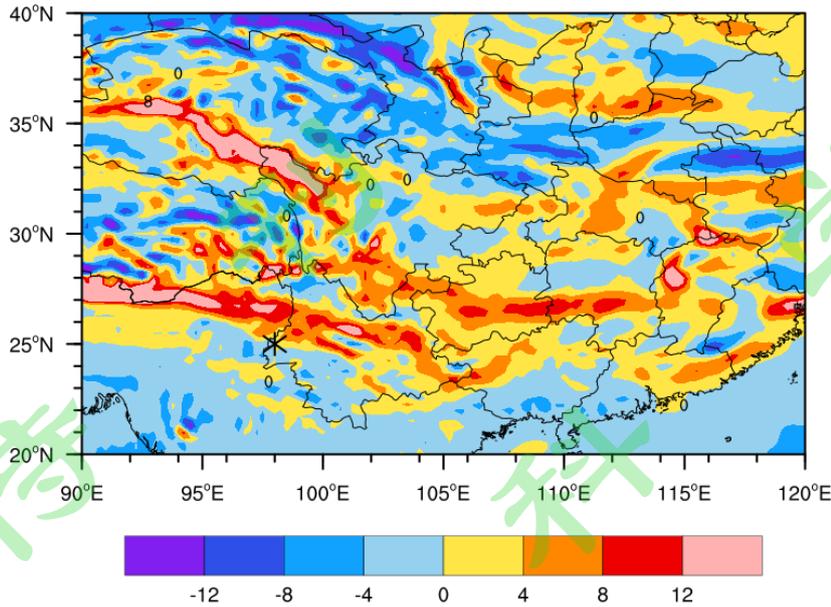


图 11 2024 年 4 月 4 日 07:00, 500hPa 涡度分布 (单位: s^{-1})。黑色星号为颠簸位置。
 Fig. 11 On April 4, 2024, at 07:00, the vorticity distribution at 500hPa (unit: s^{-1}). The black star indicates the bumpiness location.

340

341 通过上面对垂直速度、水平风的变化、散度以及涡度的分布进行诊断后,可
 342 以得出,在西风带中,当气流遇到南北走向的山脉阻挡时,会在迎风坡被抬升,
 343 随后在背风坡下降,形成上升与下沉气流的过渡区域。这与飞机颠簸发生的位置
 344 相对应。同时,正负散度以及正负涡度的过渡区也和颠簸位置对应良好,这种动
 345 力场对应关系使得该区域的气流不稳定,影响飞机飞行。

346

347 4 结果与讨论

348 本文通过对西南地区飞机颠簸的气象条件进行深入分析,揭示了飞机颠簸的
 349 成因及其与气象条件的关系。在此基础上,以 2024 年 4 月 4 日发生在腾冲至昆
 350 明航线上的飞机颠簸为例进行分析。通过对地形因素、环流形势、热力因素、动
 351 力因素的诊断,得出发生此次颠簸的可能原因。研究表明:

352 (1) 造成飞机颠簸的直接原因是大气湍流,常见的引起大气湍流的因素有风速
 353 变化、温度变化、地形因素以及天气系统等。

354 (2) 西南地区地形复杂,高原的抬升作用更明显。与其他地区相比,飞机颠簸
 355 频次更高。并且在分析飞机颠簸的原因时需要重点关注地形的影响。地形通过动
 356 力和热力的综合作用,在高原上空产生山地波及未闭合的细胞状云系、积云线等
 357 特殊云状。在这些区域存在强烈的垂直气流和湍流,对飞行影响显著,容易引发
 358 颠簸。

359 (3) 在对 2024 年 4 月 4 日 MU5954 航班颠簸成因分析的过程中，发现腾冲机
360 场西南侧空旷，东侧靠近高黎贡山，西风带中的气流遇到南北走向的山脉受到阻
361 挡，在迎风坡产生上升气流，背风坡产生下沉气流，在高空形成山地波状云系。
362 颠簸位置下方是山脉迎风坡和背风坡的分界处，附近垂直速度、散度、涡度的正
363 负相间分布，以及冷暖平流的过渡区，与颠簸位置有较好的对应关系。这些区域
364 易产生不稳定气流，是导致飞机颠簸的重要因素。

365

366 考虑到西南地区不同区域在地形特征与气象条件方面存在显著差异，这些差
367 异可能导致飞机颠簸的类型和成因有所不同。因此，未来的研究将拓展至更多西
368 南地区的事例，例如飞行航线为高原与盆地之间的颠簸等，通过对比分析不同事
369 例中的飞机颠簸特征及其成因机制，进一步验证并完善本研究的结论，以期为西
370 南地区航线飞行安全提供更具普适性和针对性的理论支持。

371

参考文献

- 372
373 Clark T L, Peltier W R. 1984. Critical level reflection and the resonant growth of
374 nonlinear mountain waves [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(21): 3122-
375 3134. doi:10.1175/1520-0469(1984)041<3122:CLRATR>2.0.CO;2
- 376 Doyle J D, Jiang Q, Smith R B, et al. 2011. Three-dimensional characteristics of
377 stratospheric mountain waves during T-REX [J]. *Monthly Weather Review* 139(1):
378 3-23. doi:10.1175/2010MWR3466.1
- 379 Fritts D C, Alexander M J. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle
380 atmosphere [J]. *Reviews of Geophysics*, 41(1). doi:10.1029/2001RG000106
- 381 干全, 李子良, 徐妮. 2002. 飞行颠簸的一种客观预报技术[J]. *四川气象*, 22(1):
382 40-41. Gan Quan, Li Ziliang, Xu Wei. 2002. An objective forecast technique on
383 aviation turbulence [J]. *Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese)*, 22(1): 40-
384 41. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2002.01.014.
- 385 Hines C O. 1960. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights [J].
386 *Canadian Journal of Physics*, 38(11): 1411-1481. doi:10.1139/p60-150
- 387 黄仪方, 孙智博, 肖焕权. 2011. 我国高原重要航线飞机颠簸分布规律分析 [J].
388 *中国民航飞行学院学报*, 22(1): 5-9. Huang Yifang, Sun Zhibo, Xiao Huanquan.
389 2011. Analysis on the rules of distribution of airplane turbulence of important
390 routes on plateau of China [J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*
391 (in Chinese), 22(1): 5-9. doi:10.3969/j.issn.1009-4288.2011.01.001.
- 392 黄仪方, 马婷. 2012. 现代气象资料在飞机颠簸预报中的应用 [J]. *科技创新导报*
393 (8): 219-221,223. Huang Yifang, Ma Ting. 2012. Application of modern
394 meteorological data in aircraft turbulence forecasting [J]. *Science and Technology*
395 *Innovation Herald (in Chinese)*, (8): 219-221,223. doi:10.6660/j.cnki.1674-
396 098x.2012.08.080.
- 397 黄萌, 吴俊杰, 任佳莉, 等. 2024. 高原航线飞机颠簸的时空分布特征研究 [J].
398 *科技和产业*, 24(10): 206-211. Huang Meng, Wu Junjie, Ren Jiali, et al. 2024.
399 Spatial and temporal distribution characteristics study of aircraft turbulence on the
400 plateau route [J]. *Science Technology and Industry (in Chinese)*, 24(10): 206-211.
401 doi: 10.3969/j.issn.167-1807.2024.10.032.
- 402 李子良, 黄仪方. 2008. 大气湍流引起飞机颠簸的理论分析和数值试验 [J]. *中国*
403 *海洋大学学报(自然科学版)*, 38(6): 887-894. Li Ziliang, Huang Yifang. 2008.
404 Numerical simulation and dynamical analysis of atmospheric turbulence influence
405 in the aircraft bumps [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*,

406 38(6): 887-894. doi:10.16441/j.hdxh.2008.06.005.

407 林嘉希 2021. 飞机颠簸的环境气象特征及预测研究 [D]. 南京航空航天大学硕
408 士学位论文. Lin Jiayi. 2021. Environmental characteristics and prediction of
409 aviation turbulence [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of
410 Aeronautics and Astronautics

411 刘雷. 2018. 基于 NOAA 数据资料的晴空湍流预测方法研究 [D]. 中国民用航空
412 飞行学院硕士学位论文. Liu Lei. 2018. Study on the forecasting method of clear
413 air turbulence based on the NOAA data [D]. M. S. thesis (in Chinese), Civil
414 Aviation Flight University of China

415 Petenko I, Casasanta G, Bucci S, et al. 2020. Turbulence, low-level jets, and waves in
416 the tyrrhenian coastal zone as shown by sodar [J]. *Atmosphere*, 11(1): 28.
417 doi:10.3390/atmos11010028

418 Prosser M C, Williams P D, Marlton G J, et al. 2023. Evidence for large increases in
419 clear-air turbulence over the past four decades [J]. *Geophysical Research Letters* ,
420 50(11): e2023GL103814. doi:10.1029/2023GL103814

421 Prusa J M, Smolarkiewicz P K, Garcia R R. 1996. Propagation and breaking at high
422 altitudes of gravity waves excited by tropospheric forcing [J]. *Journal of the*
423 *Atmospheric Sciences* , 53(15): 2186-2216. doi:10.1175/1520-
424 0469(1996)053<2186:PABAHA>2.0.CO;2

425 Rossow V J, James K D. 2000. Overview of wake-vortex hazards during cruise [J].
426 *Journal of Aircraft*, 37(6): 960-975. doi:10.2514/2.2723

427 Sharman R D, Trier S B. 2019. Influences of gravity waves on convectively induced
428 turbulence (CIT): A review [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 176: 1923-1958.
429 doi:10.1007/s00024-018-1849-2

430 Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al. 2006. An integrated approach to mid- and upper-
431 level turbulence forecasting [J]. *Weather and Forecasting*, 21(3): 268-287.
432 doi:10.1175/WAF924.1

433 Sharmen R D, Lane T P. 2016. Aviation turbulence : processes, detection, prediction
434 [M]. Switzerland: Springer. doi:10.1007/978-3-319-23630-8

435 申燕玲, 王东海, 巩远发. 2017. 中国冬季飞机颠簸的统计分析 [J]. 成都信息工
436 程大学学报, 32(4): 426-432. Shen Yanling, Wang Donghai, Gong Yuanfa, 2017.
437 A statistical analysis of the aircrafts turbulence properties in winter over China [J].
438 *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 32(4):
439 426-432. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.04.013

440 苏腾. 2016. 应用 AMDAR 数据探寻高空颠簸区的方法研究 [D]. 中国民用航空
441 飞行学院硕士学位论文. Su Teng. 2016. Study on method of exploring the
442 turbulence areas based on the application of AMDAR data [D]. M. S. thesis (in
443 Chinese), Civil Aviation Flight University of China

444 孙智博. 2011. 我国产生飞机颠簸的特殊云状及其分布规律分析 [D]. 中国民用
445 航空飞行学院硕士学位论文. Sun Zhibo. 2011. Analysis on special cloud shape
446 that makes airplane turbulence and the rules of distribution in China [D], M. S.
447 thesis (in Chinese), Civil Aviation Flight University of China

448 Wasson G, Das S, Panda S K. 2022. Numerical simulation of a clear air turbulence
449 (CAT) event over Northern India using WRF modeling system [J]. Natural
450 Hazards, 114(3): 2605-2631. doi:10.1007/s11069-022-05481-x

451 吴加传, 刘翔卿. 2017. 腾冲机场气候特点分析 [J]. 科技风, (17): 130+132. Wu
452 Jiachuan, Liu Xiangqing. 2017. Analysis of the climatic characteristics of
453 Tengchong airport [J]. Science and Technology Wind (in Chinese), (17): 130+132.
454 doi:10.19392/j.cnki.1671-7341.201717113

455 徐海, 黄仪方, 李跃春, 等. 2007. 成都-拉萨航线一次严重颠簸过程分析 [J]. 中国
456 民用航空飞行学院学报, 18(6): 3-7. Xu Hai, Huang Yifang, Li Yuechun, et al.
457 2007. Analysis of a severe aircraft turbulence event on the Chengdu-Lhasa airline
458 [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China (in Chinese), 18(6):3-7.
459 doi:10.3969/j.issn.1009-4288.2007.06.005.

460 闫文辉, 黄兴友, 赵钰锦, 等. 2022. 民机阵风载荷测量试飞颠簸潜势诊断技术研
461 究 [J]. 热带气象学报, 38(1): 113-123. Yan Wenhui, Huang Xingyou, Zhan Yujin,
462 et al. 2022. Research on diagnosis technique of turbulence potential for civil
463 aircraft gust load measurement flight tests [J]. Journal of Tropical Meteorology (in
464 Chinese), 38(1): 113-123. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.011.

465 张林意, 孙华波, 王纯, 等. 2024. 基于 QAR 飞行大数据的空中颠簸风险时空分
466 布模式探索与分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 49(3): 482-490. Zhang
467 Linyi, Sun Huabo, Wang Chun, et al. 2024. Spatiotemporal pattern of air
468 turbulence risks with QAR Flight big data [J]. Geomatics and Information Science
469 of Wuhan University (in Chinese), 49(3): 482-490.
470 doi:10.13203/j.whugis20210616

471 邹波. 2004. 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,
472 27(4): 527-531. Zou Bo. 2004. A preliminary dynamical study on the effects of
473 surface heating on air turbulence [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology

