

基于多源观测的中国及周边区域飞机高空颠簸特征分析

王思贤^{1,2}, 寿亦萱^{2,3*}, 刘海文⁴, 陆风^{2,3}

1. 中国气象科学研究院, 北京 100081;
2. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;
4. 中国民航大学航空气象系, 天津 300300

摘要

飞机高空颠簸是由自由大气中湍流过程诱发的飞行现象, 对飞行安全存在巨大威胁。在全球变暖背景下, 东亚地区飞机颠簸呈逐年增多趋势。为了更好地了解中国及周边区域高空颠簸的来源和发生规律, 本文基于两套不同来源的飞机气象观测资料 (AMDAR), 通过质量控制和标准化处理, 建立了一套以湍流耗散率 (EDR) 表征飞机颠簸的全球一年的颠簸观测数据集。并使用该数据集, 结合 FY-4A 卫星观测和 ERA5 再分析资料, 对我国三类高空颠簸: 晴空颠簸 (CAT)、近云颠簸 (NCT) 以及对流诱导颠簸 (CIT) 的空间分布、季节以及日变化特征进行了初步分析。结果表明, 晴空颠簸高发区主要集中在我国中东部至日本以东洋面上空对流层顶附近; 近云颠簸有 4 个活跃区, 分别位于我国华东、华北、南海地区以及日本上空, 青藏高原北坡至东坡是我国西部近云颠簸易发生区域; 对流诱导颠簸则主要集中出现在华南地区。三类高空颠簸均有显著的季节和日变化特征。其中晴空颠簸在冬春季午后高发, 近云和对流诱导颠簸更易出现在夏季上午时段。

关键词: 飞机颠簸, AMDAR 资料, 卫星观测, 晴空颠簸, 对流诱导颠簸, 近云颠簸

文章编号: 2024070C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2411.24070

收稿日期 2024-07-01 网络预出版日期

* 资助项目: 国家自然科学基金项目 41965001, 国家自然科学基金-中国民用航空局联合研究基金重点项目 (U2033207), 中国气象局创新发展专项 CXFZ2025J061

通讯作者: 寿亦萱, 博士, 研究员, 主要从事卫星天气, 航空气象以及数值模拟研究。

Email: shouyx@cma.gov.cn

Examining Upper-Level Aviation Turbulence over China and its Surroundings based on a combination of multi-source observations

Wang Sixian^{1,2}, Shou Yi-Xuan^{2,3}, Liu Haiwen⁴, Lu Feng^{2,3}

1. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081;
2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,
China Meteorological Administration (LRCVES/CMA) National Satellite Meteorological Center,
3. FengYun Meteorological Satellite Innovation Center (FY-MSIC), Beijing 100081;
4. Department of Aviation meteorology, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300

Abstract

Upper-level aviation turbulence is triggered by turbulence in the free atmosphere. It is a major concern for aircraft operations. Under a warming climate, the turbulence over China shows a trend of increasing. To better understand the sources and characteristics of the upper-level aviation turbulence over China, two sets of Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) are used to establish a one-year global turbulence observation dataset in the form of eddy dissipation rate (EDR) through quality controls and consistency processing. Based on the aviation, FY-4A satellite observations and the ERA5 reanalysis, the spatial distribution, as well as the seasonal and diurnal variations of three types of upper-level aviation turbulence, clear-air turbulence (CAT), near-cloud turbulence (NCT), and convective-induced turbulence (CIT) over China, are analyzed. It is found that the active zone of the clear-air turbulence is prone to occur in the upper troposphere near the tropopause in the vertical direction. Near-cloud turbulence over China has 4 active zones, which are located in eastern, northern China, and the South Sea, as well as over Japan. The northern to eastern slopes of the Qinghai Tibet Plateau are regions with a high probability of near-cloud turbulence in western China. The convective-induced turbulence concentrated more over southern China. All three types of turbulence exhibit typical seasonal and diurnal variations. Clear-air turbulence is more common

in the afternoon during winter and spring seasons, while near-cloud and convective-induced turbulence are more likely to occur in the morning during summertime.

Key words Aviation turbulence, AMDAR data, Satellite observations, Clear-air turbulence, Convective-induced turbulence, Near-cloud turbulence

1. 引言

飞机颠簸是指飞机在经过扰动气流区而出现机身震颤,并在短时间内反复急速上抛急速下降的现象。当它发生在飞机进入巡航飞行阶段时,由于乘客安全意识松懈,常常会造成严重的人员伤害和财产损失。据美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)官网统计,在非致命事故中,飞机颠簸是导致人员受伤的最主要事件类型。美国每年因颠簸受伤的人数平均为 58 人,颠簸造成的飞机机体损伤,飞机延误,燃油损耗所产生的直接经济损失超过 1000 万元/年 (FAA, 2017)。

近年来,中国地区飞机颠簸事件也呈现逐渐增多的趋势。据中国民航统计,2013-2018 年期间,运输航空报告颠簸事件共计 678 次。而 2017-2021 年期间,中国地区所发生的颠簸事件总计超过 1700 次,其中次数最多的年份是 2019 年(统计信息来源于:国际民航组织 第 41 届 技 术 委 员 会 工 作 文 件 https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_235_zh.pdf [2024-10-26], 江南时报 https://www.jntimes.cn/xxzx/202403/t20240324_8236439.shtml [2024-10-26])。在这些颠簸事件中,人员伤亡报道屡见不鲜。例如,2015 年海南航空一架从成都飞往北京的航班,在飞行途中遭遇强烈颠簸,导致部分乘客从座位上飞出,头撞在机舱天花板上受伤。2023 年 7 月 10 日国航一架 A330-300 飞机,从上海飞往北京途中遭遇强烈颠簸,造成部分机组人员和旅客受伤。因此,开展对我国及其周边区域飞机颠簸研究具有重要的现实意义和科学意义。

飞机颠簸成因复杂,影响的因素很多。就高空颠簸而言,目前公认主要来源于两类不稳定。一类是切变不稳定,另一类是对流不稳定。切变不稳定是目前所知的重力波产生的三个重要机制之一 (Storer et al., 2019)。当切变不稳定增强,波的振幅随时间增大,动能逐渐向湍能转换,湍流发生。在晴空无云条件下,湍流通常会引起晴空颠簸 (Clear-air turbulence, CAT)。对流不稳定则通常伴随大气整层热量、动量和水汽的垂直交换,局地产生强烈的上升和下沉运动。对流强度越强,湍流混合作用就越强,与对流直接相关的颠簸通常被称为对流诱导颠簸 (Convective-induced turbulence, CIT)。目前很多研究发现,对流引发强颠簸的概率更高。Kaplan et al. (2005) 对 44 个严重航空颠簸个例进行了深入研究,结果发现 86% 的个例与对流活动有关,14% 则是与晴空湍流有关。除此以外,近年来研究发现在非对流云区附近也会引发高空颠簸,这类颠簸被称为近云颠簸 (Near-cloud turbulence, NCT)。由于引起颠簸的大气湍流的时空特征变化很快,因此人们对颠簸发生

规律和机理至今仍然缺乏充分认识。尤其是中国及其周边区域内的不同类型颠簸的发生规律和时空特征研究相对较少，值得开展深入研究。

过去由于观测资料匮乏，很多研究采用基于数值预报资料计算得到的诊断指数来研究颠簸特征。尽管当前数值预报资料时空分辨率有了显著改善，但是对于由水平尺度介于100-1000m之间的大气湍流所引发的飞机颠簸，完全利用数值预报产品仍可能产生严重的低估。随着资料种类的丰富以及观测时空分辨率的提升，利用多源观测资料开展颠簸特征的研究变得越来越普遍。例如，Wolff 和 Sharman (2008)基于多年的 PIREPs 资料（Pilot report 飞行员报告）结合地形、闪电、卫星和雷达反演的云顶和云底高度等资料，采用统计分析的方法研究了美国大陆区域高空颠簸特征。分析结果显示，美国大陆区域上空颠簸的主要来源包括地形波和高空急流。冬季沿佛罗里达州、德克萨斯州东部以及墨西哥湾一带上空的颠簸与对流密切相关，而俄亥俄州山谷区域的颠簸则与层状云有关。Kim 和 Chun (2011) 利用 5 年的 PIREPs 资料结合地形、闪电以及再分析资料，对韩国高空颠簸特征进行了细致分析。他们将高空颠簸划分为晴空颠簸（CAT）和对流诱导颠簸（CIT）。其中，晴空颠簸又按照与急流和地形波的关系，进一步分类为急流和地形波引发的晴空颠簸。分析结果表明，韩国上空对流诱导颠簸主要发生在夏季，约占中度以上强度颠簸（moderate-or-greater 简称 MOG 级颠簸）的 11%，而与高空急流有关的晴空颠簸在 MOG 级颠簸中占比最高，达 33%以上。

在航空气象中，主要的资料来源有 PIREPs 和 AMDAR 资料。由于 PIREPs 资料主要是通过飞行员在飞行过程中主观判断并记录，因此资料中颠簸发生的时间、位置和强度信息均存在较大的主观性，其中强度以等级形式定性给出，一般分为 4 级（无，轻度，中度和重度）（Schwartz 1996; Sharman et al., 2006, 2014）。为了对颠簸强度进行定量评估，1998 年世界气象组织（World Meteorological Organization，简称 WMO）协调全球航空气象报资料建立了飞机气象资料中继系统（Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR），实现对全球飞机自动观测资料实时交换共享。AMDAR 资料中包含三种形式的飞机颠簸记录：湍流耗散率的三分之一次方（eddy dissipation rate，简称 EDR）（Sharman et al., 2014）；垂直等效阵风风速（derived equivalent vertical gust velocity，简称 DEVG）（Hoblit 1988）；以及湍流等级（Sharman et al., 2014）。在这三种形式的颠簸观测中，EDR 是根据湍流动能转化为热量的速率估算得到，其大小与飞机机型、重量和速度无关，因此能够更为真实地表征颠簸的强度和大气湍流状态（MacCready 1964； Sharman et al., 2014; Cornman

2016)。2018 年国际民航组织颁布的第二十版《国际空中航行气象服务》中明确指出，“颠簸应该以湍流耗散率的三分之一一次方（EDR）形式报告”。目前中国及其周边区域可获取到的 AMDAR 资料中，三种形式的颠簸记录均存在。为了对该地区颠簸特征进行较为客观的分析，本研究将基于 2019 年 3 月-2020 年 2 月的 AMDAR 颠簸观测，构建一套覆盖中国及其周边区域飞机颠簸 EDR 数据集。并在该数据集的基础上，结合 FY-4 卫星观测和 ERA5 再分析资料分析不同类型颠簸的发生规律和时空分布特征。

本文章节安排如下，第 2 节主要介绍本文研究所使用飞机颠簸数据集以及其他观测资料，针对颠簸数据集所采用的质量控制以及颠簸观测量之间的转换方案。第 3 节对转换后的 EDR 数据集进行检验，并在此基础上开展对中国地区颠簸时空特征分析。第 4 节为全文的总结。

2. 数据和方法

2.1 数据介绍

本研究使用的观测资料主要有三类：分别是全球飞机自动观测资料（AMDAR），FY-4A 静止卫星观测和产品，以及 ERA5 全球再分析资料。以下对这三类资料进行简要介绍。

本研究中使用了两套 AMDAR 资料，时间跨度均为 2019 年 3 月-2020 年 2 月。第一套飞机观测数据集由美国大气研究中心地球观测实验室（National Center of Atmospheric Research/Earth Observation Laboratory NCAR/EOL）接收并进行解码处理。该数据集由美国政府和 7 个航空公司（包括 American, Delta, Federal Express, Northwest, United 等）共同资助建立，主要覆盖欧美大陆、太平洋、大西洋、以及中国东南沿海（图 1a）。数据集中的飞机颠簸信息以 EDR 形式记录。第二套飞机观测数据集由中国气象局国家气象信息中心通过 GTS 接收整理（廖捷和熊安元，2010）。观测主要来自亚洲和大洋洲航线的飞机，覆盖范围包括欧洲、美洲、亚洲、大西洋、印度洋、南太平洋和澳大利亚地区，颠簸强度以湍流等级或 DEVG 形式记录。其中 DEVG 主要覆盖北美、澳大利亚、欧洲以及中国（图 1b），湍流等级记录主要覆盖中国、澳大利亚和东南亚（图 1c）。

EDR 作为湍流强度的度量最初是由 MacCready（1964）提出，其核心思想是基于湍流耗散率的三分之一一次方与飞机载量均方根的线性关系，通过垂直风速或者是飞机的垂直加速度来估计湍流强度。EDR 计算方法很多，本文中使用的 NCAR/EOL 接收的 AMDAR 资料中的 EDR 采用的是主流的垂直风速算法（Sharman et al.,2014）。DEVG 是等效垂直

阵风风速，这个参数最早由 Pratt 和 Walker (1955) 提出，是另一种衡量垂直方向上风速变化和湍流大小的指数，与飞机重量、风速、飞机垂直加速度有关。目前欧洲和澳大利亚航空公司的飞机多以 DEVG 作为颠簸强度衡量指标。由于 DEVG 计算中的经验参数依据特定机型获得，所以在实际应用中存在一定的不确定性。据统计，DEVG 对颠簸测量的不确定性约 3%，最大可以达到 12% (WMO, 2003)。由于 EDR 和 DEVG 计算方法不同，EDR 的值域范围在[0,1]之间，DEVG 通常比 EDR 大 1 个量级，表 1 所示是两种颠簸指标的强度分级阈值。

表 1 EDR 和 DEVG 颠簸强度分级阈值(sharman et al., 2014; Stickland 1998)
Table 1 Thresholds of turbulence intensity for EDR and DEVG (sharman et al.,2014; Stickland 1998)

颠簸指标（单位）	无颠簸	轻度颠簸	中度颠簸	重度颠簸
EDR ($\text{m}^{2/3} \text{s}^{-1}$)	0-0.1	0.1-0.22	0.22-0.38	>0.38
DEVG (m s^{-1})	0-2.0	2-4.5	4.5-9	>9

除了采用定量指数衡量颠簸强度以外，目前在部分航空公司的飞机上仍然沿用飞行员报告 (PIREPs) 的方式。为了便于编码，记录常以数字形式表示。湍流等级就是 PIREPs 记录的不同气象条件下颠簸强度的数字表示，分为 0-15 级（表 2）。

表 2 湍流等级含义
Table 2 Meaning of turbulence index

等级	颠簸强度（天气状况）	等级	颠簸强度（天气状况）
0	无颠簸（多云）	8	无颠簸（可能云可能晴空）
1	轻度颠簸（多云）	9	轻度颠簸（可能云可能晴空）
2	中度颠簸（多云）	10	中度颠簸（可能云可能晴空）
3	重度颠簸（多云）	11	重度颠簸（可能云可能晴空）
4	无颠簸（晴空）	12	超重度颠簸（晴空）
5	轻度颠簸（晴空）	13	超重度颠簸（多云）
6	中度颠簸（晴空）	14	超重度颠簸（可能云可能晴空）
7	重度颠簸（晴空）	15	--

Kim 和 Chun (2016) 研究表明轻度及以上强度颠簸大部分集中在 15kft (约 4572m) 以上，因此本研究的数据处理方案以及分析主要针对距离地面 5000m 以上的高空颠簸。图 1 给出了 2019 年 3 月-2020 年 2 月距地 5000m 以上的两套 AMDAR 数据集。如图 1d 所示，中国及其周边区域内三种形式的颠簸记录均存在。因此，为了对该区域上颠簸特征有全面客观认识，需要对两套数据集中不同来源的颠簸信息进行整合，形成标准统一的数据。

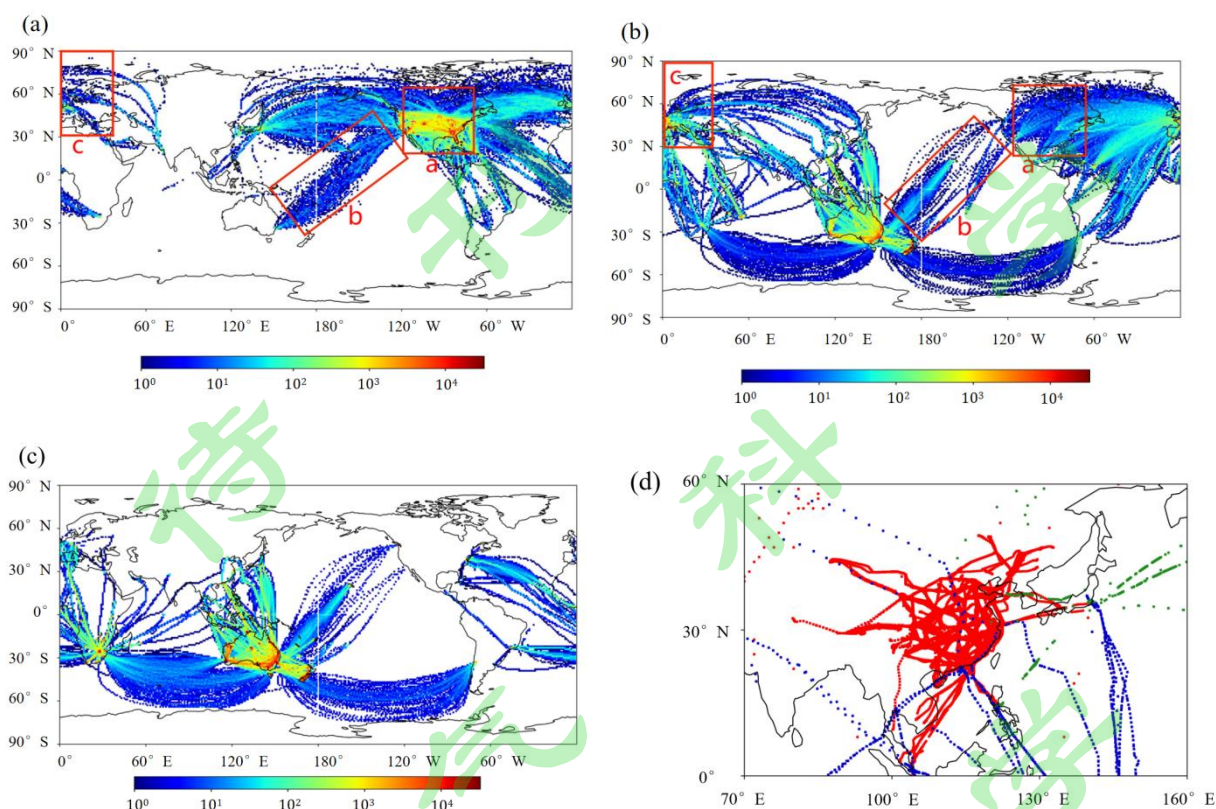


图 1 2019 年 3 月-2020 年 2 月距地 5000m 高空以上两套 AMDAR 数据集中三种形式颠簸记录的空间分布。a) EDR; b) DEVG 和 c) 湍流等级记录 (彩色区域表示累积记录数, 单位: 个;图 a,b 中红色矩形框表示 2.2 节中用于构建 DEVG 和 EDR 转换模型和检验所使用的数据区域。区域 a 为北美大陆区域的观测作为训练样本构建 DEVG 与 EDR 的转换模型, 区域 b 和 c 为用于检验模型的西太平洋和欧洲大陆区域) 以及 (d) 2019 年 8 月 8 日中国及其周边区域三种颠簸参数记录的分布 (红点: 湍流等级; 绿点: EDR; 蓝点: DEVG)。

Figure. 1 Cumulative annual distribution of turbulence above 5000m in a) EDR; b) DEVG; and c) turbulence level from March 1, 2019 to February 29, 2020 in the two AMDAR datasets(the color shading area represents the cumulative number of records; the red rectangular boxes in Figures 1a and b represent the data regions that are used in Section 2.2 to construct the DEVG and EDR conversion model and model verification. Region a is the the North American continental region where is used as the training sample to construct a conversion model, while regions b and c are the Western Pacific and European continental regions respectively where used to test the model);d) the distribution of three turbulence records within China and its surroundings on August 8, 2019. (red spots represent turbulence index, and green and blue spots indicate EDR and DEVG respectively.)

此外, 为了分析不同类型颠簸的来源和分布特征, 本文中还使用了 FY-4A 卫星多通道扫描成像辐射计 (Advanced Geostationary Radiation Imager:AGRI) 通道亮温和定量反演产品以及同时期的 ERA-5 再分析月平均高空资料 (空间分辨率 0.25° , 高空资料的垂直层数为 37 层, 其中对流层低层 1000-750 hPa 以及高层 250-100hPa 垂直分辨率为 25 hPa)。FY-4A 卫星的 AGRI 光谱范围为 0.45-13.6 μm , 共有 14 个通道, 包含 3 个可见光和近红外

通道，3 个短波红外和 8 个中长波红外通道。可见光和短波红外通道的星下点分辨率为 0.5-2km，中长波红外通道的星下点水平分辨率为 4 km。FY-4A 包含全圆盘和中国区观测模式，时间分辨率分别为 1 小时和 5 分钟。除了卫星观测资料以外，本文还使用了 FY-4A/AGRI 的云覆盖率、云顶高度和云顶温度产品，这些产品均是 FY-4A 业务发布产品。云覆盖率是在云检测基础上统计得到的观测像元内云的覆盖百分比。云顶高度和云顶温度产品主要是基于 AGRI 的 10.8 μm 和 12 μm ，以及 13.3 μm CO₂ 吸收通道，采用一维反演的反演方法反演得到。评估结果表明，FY-4A 云顶温度平均偏差为 $\pm 3\text{K}$ ，云顶高度偏差为 $\pm 0.5\text{km}$ （崔林丽等，2020；王富和赵宇，2021）。上述三种定量产品的时空分辨率与 FY-4A/AGRI 的红外通道分辨率一致。

2.2 质量控制方案

在开展对两套飞机观测资料中的颠簸记录的标准化处理之前，首先需要对原始观测数据进行质量评估和质量控制。其中，NCAR/EOL 的 AMDAR 资料中已对 EDR 逐点记录采用 12bit 位质量标识码的质量控制方案。该方案规定如果其中任何一位的标识为失败，则该数据无效。国家信息中心接收并整理的 AMDAR 数据集中目前对 DEVG 以及湍流等级这两种颠簸强度参数均未进行质量控制。为此，本文重点针对这两种参数数据进行质量控制。

图 2 所示是质量控制方案的技术路线图。该技术方案共分为两个部分。第一部分是对数据集中的 DEVG 和湍流等级分别进行极值检查、连续性检验以及孤立点剔除；第二部分是对两种参数再进行交叉检验，进一步剔除可疑记录。各步骤的具体说明如下：

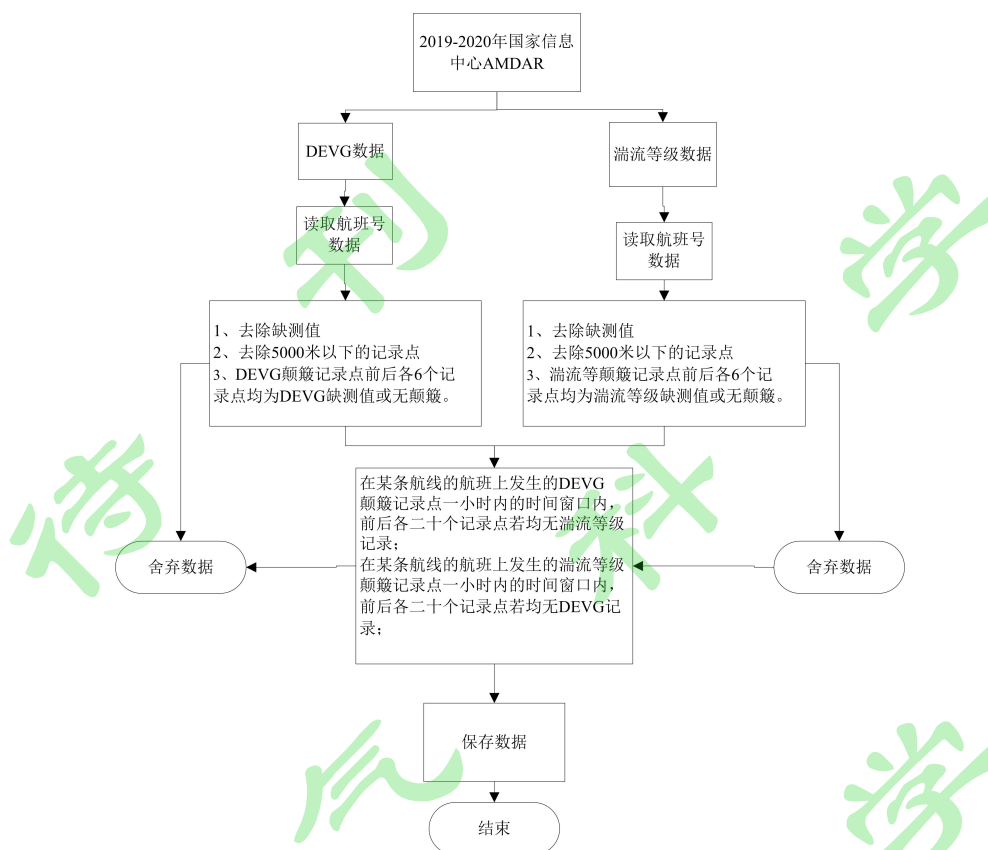


图 2. AMDAR 资料中颠簸观测质量控制技术路线

Figure 2. Flow chart of the quality control scheme for the aviation turbulence in AMDAR

2.2.1 自检验

在自检验中，第一步对两种不同颠簸参数进行缺失值去除；第二步剔除 5000 米以下的记录点；第三步是进行记录中的异常点剔除。

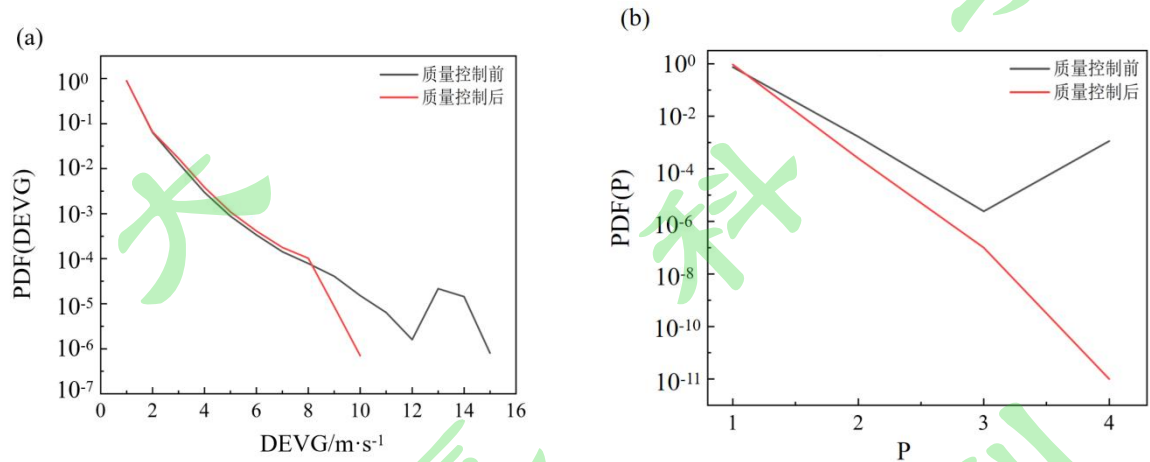
图 3 中的黑线分别为 2019 年 3 月-2020 年 2 月数据集中 5000 米以上原始 DEVG 和湍流等级的概率密度分布。其中，湍流等级在统计时只考虑颠簸强度，将不同天气条件下具有相同强度的颠簸合并，将原始的 0-15 个等级，压缩为 1-4 个等级，分别对应无颠簸，轻度，中度和重度颠簸。由图 3 可见，两种颠簸参数均存在明显的双峰结构。DEVG 的主峰在 0-2 之间，第二个峰值出现在 12-14 之间。湍流等级最高峰在 1-2 之间，次峰出现在等级 3 到等级 4 之间。从过去已有的统计结果表明，无论在哪个区域，且无论以何种形式来表征颠簸强度，中度以上（MOG）的颠簸在总样本中的占比都非常小。例如，Kim 和 Chun(2011)基于 5 年的 PIREPs 资料统计了韩国高空颠簸分布，中度颠簸占比约 2.94%，重度颠簸占比约 0.08%。之后，他们又基于 11 个月的 DEVG 统计了东亚和全球高空颠簸，结果显示全球（东亚）中度和重度颠簸占比约 0.29%（0.37%）（Kim 和 Chun, 2016）。

168 Sharman et al., (2006) 指出, 从气候统计结果看, 高空颠簸记录中无颠簸和轻度颠簸占比
169 最大, 概率密度分布应遵循对数正态分布特征。由此来看, 国家信息中心采集的飞机观测
170 原始颠簸数据存在误测值。为此, 在自检验中我们分别对两种颠簸参数, 针对每个颠簸记
171 录点检查与该点临近的 6 个记录点是否存在有效值, 如果均无, 则将该点作为孤立假值剔
172 除。

173 2.2.2 交叉检验

174 在自检验的基础上, 对两种参数进行交叉检验来进一步剔除异常值。具体来说, 就是
175 以任意 DEVG 或湍流等级记录点为中心, 检查与该点空间上最临近, 且与该点时间相差
176 ± 1 小时以内的 20 个湍流等级或 DEVG 记录点是否存在有效值, 如果均无, 则将该点作
177 为孤立虚假值剔除。

178 经过以上质量控制后的两种颠簸参数的数据分布如图 3 中红线所示。由图可见原来中
179 度以上颠簸记录得到有效控制, 数据集中两种颠簸参数的概率密度分布均符合对数正态分
180 布的单峰特征。



181 图 3. 5000m 以上高空颠簸质量控制前后的概率密度分布. (a) DEVG (单位: $m \cdot s^{-1}$); (b)湍流等级.
182 Figure 3. The probability density of a)DEVG(Unit: $m \cdot s^{-1}$); and b) turbulence level above 5000m before
183 and after quality control.(black curves represent the probability density of the two indices before quality
184 control; red curves indicate that after quality control).
185
186

187 2.3 标准化处理

188 由于两套飞机观测资料的空间覆盖差异, 这里需要首先使用质量控制后的国家信息中
189 心的 AMDAR 数据集建立湍流等级与 DEVG 转换关系, 再使用两套数据集中的 EDR 与
190 DEVG 数据建立 EDR 与 DEVG 的转换关系, 最后将三者统一用 EDR 表示。

191 2.3.1 湍流等级与 DEVG 转换

在国家信息中心获取的 AMDAR 资料中，DEVG 与湍流等级在澳大利亚地区的部分记录来自于同一班次航班，可基于这些记录直接进行点对点的时空匹配，构建两种参数的转换关系。与 2.2.1 节中处理方法一样，这里也将湍流等级由原始的 0-15 个等级，压缩为 1-4 个等级。在相关分析的基础上，利用经过质量控制后一年的 DEVG 与湍流等级报告进行时空匹配，得到对应不同湍流等级的 DEVG 箱线图（图 4）。从每个等级的 DEVG 中位数分布来看，DEVG 随湍流等级增大而增大，两者具有显著的正相关关系，相关系数 R^2 为 0.9619。我们对数据进行多项式曲线拟合得到了 DEVG 与湍流等级的关系式如式 1 所示：

$$DEVG = 0.5613P^2 + 0.149P \tag{1}$$

式中 P 表示湍流等级强度。

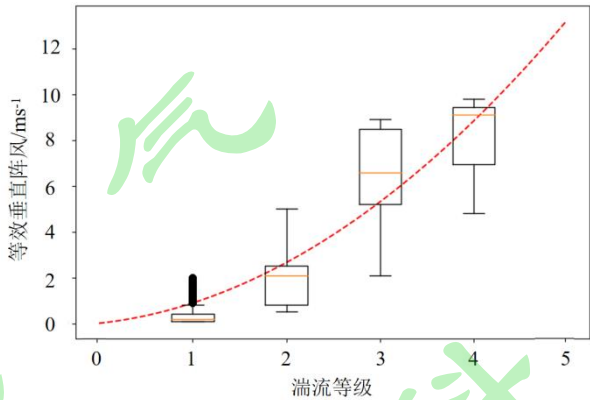


图 4 5000 米以上等效垂直阵风速（DEVG，单位 m s^{-1} ）与湍流等级报告箱线图

Figure 4. Box plot of DEVG and turbulence level above 5000m.

表 3 为由湍流等级反演的 DEVG*与原位观测的 DEVG 的均值与标准差，二者相差约 0.1，表明反演的 DEVG*与原位观测的 DEVG 两者具有相似的分布。

表 3 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日湍流等级反演 DEVG*与原位 DEVG 的平均值与标准差

Table 3 Mean and standard deviation of DEVG* derived from turbulence level and in situ DEVG during

Mar 1,2019-Feb 29, 2020

	均值 (m s^{-1})	标准差 (m s^{-1})
DEVG*	0.5017	0.3441
DEVG	0.4364	0.5505

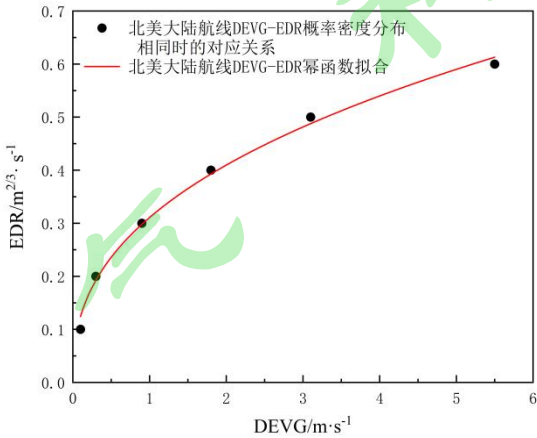
2.3.2 DEVG 与 EDR 转换

Sharman et al.(2014)曾指出 EDR 与 DEVG 之间建立的映射关系是有物理基础的，但由于这两种指标通常来源于不同飞机，而不同航班飞机在时空上无法完全重合，因此无法直接使用两套 AMDAR 数据集中的 EDR 和 DEVG 进行点对点的时空匹配。为此，本文基于同一区域高空航线上的 DEVG 与 EDR 具有相同累积概率分布的假设，来建立 DEVG

215 与 EDR 的转换关系。由于两种参数仅在北美、南太平洋、欧洲三个主要区域有较大的空
216 间重叠，因此，本文以北美大陆区域的观测作为训练样本构建 DEVG 与 EDR 的转换模型
217 （图 1a,b 中区域 a 所示），并以太平洋和欧洲区域观测为独立检验样本对模型进行验证
218 （图 1a,b 中区域 b 和 c 所示）。

219 首先计算 EDR 的累积概率分布，然后求出与 EDR 同一概率下的 DEVG 值（图 5），
220 最后通过幂函数拟合得到 DEVG-EDR 转换模型。得到 EDR 与 DEVG 的转换关系式如下所
221 示：

222
$$EDR^* = 0.2373 * DEVG^{0.5628} \quad (2)$$



223 图 5. EDR-DEVG 的累积概率分布最优拟合

224 Figure 5. Optimal fit of the cumulative density distribution of the EDR-DEVG

225 表 4 为太平洋和欧洲区域距地 5000m 以上由 DEVG 反演的 EDR*与原位观测的 EDR
226 的平均值与标准差。两个区域的平均值与标准差都较为接近，其中，太平洋上空的反演的
227 EDR*的平均值和标准差与原位 EDR 较欧洲区域更为接近。

228 表 4 2019 年至 2020 年太平洋航线与欧洲的反演 EDR*与原位 EDR 的平均值与标准差
229 Table 4 Mean and standard deviation of derived EDR* and in-situ EDR for Pacific routes and Europe from 2019 to 2020

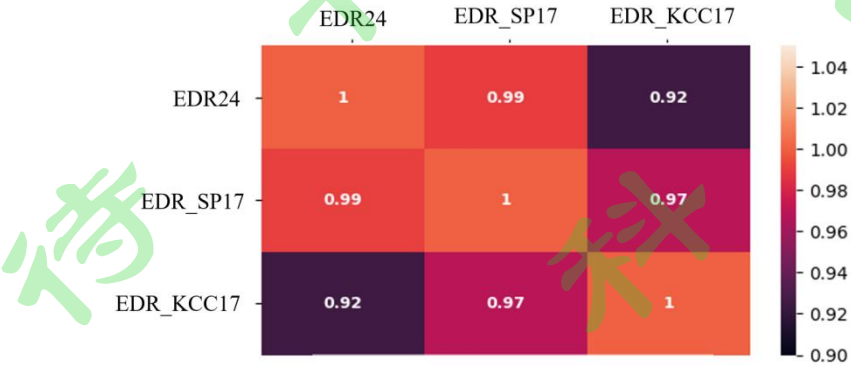
	太平洋 EDR*	太平洋原位 EDR	欧洲 EDR*	欧洲原位 EDR
均值 (m ^{2/3} s ⁻¹)	0.1432	0.1333	0.1742	0.1349
标准差 (m ^{2/3} s ⁻¹)	0.0821	0.0467	0.1127	0.0619

231 3. 结果和讨论

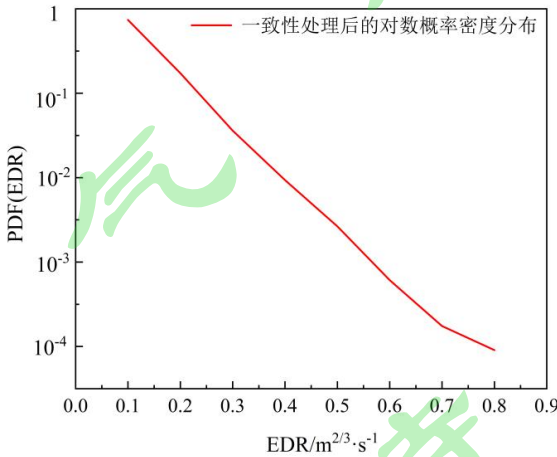
232 3.1 结果检验

233 对转换为 EDR 的两套 AMDAR 数据集进行合并，得到完整的全球 EDR 数据集。为
234 了验证数据集的可信度，我们将本文所提出的 EDR 反演模型记为 EDR24，并将该模型得
235 到的结果分别与采用 Sharman 和 Pearson（2017）以及 Kim et al.（2017）提出的 EDR-SP17
236 和 EDR-KCC17 反演模型计算得到的结果进行比较。图 6 所示为三种模型对 2019 年 3 月

237 -2020 年 2 月数据集反演结果的相关性检验。检验结果表明, EDR24 与 EDR_SP17 以及
238 EDR_KCC17 的相关系数均在 0.9 以上。EDR_SP17 采用的是目前使用最广泛的对数正态
239 拟合方法建立的, 而本文提出的 EDR24 得到的结果与该算法的相关性达 0.98, 较
240 EDR_KCC17 更高。



241
242 图 6. EDR24,EDR_SP17,以及 EDR_KCC17 三种 EDR 反演模型结果的相关性分布图
243 Figure 6. The correlation among the three EDR retrieval models: EDR24,EDR_SP17 and EDR_KCC17.
244 合并后的 2019 年 3 月-2020 年 2 月的全球颠簸数据集共有 467 万条颠簸记录, 其中
245 184 万个记录来自国家气象中心的 AMDAR 资料, 另外 283 万条来自 NCAR/EOL 的
246 AMDAR 资料。图 7 是合并后的 EDR 观测数据的概率密度分布, 数据呈现对数正态分布
247 特征, MOG 级颠簸占总样本 5.03%。从空间分布看, 数据集覆盖了全球各个大陆及海域,
248 其中 MOG 级颠簸主要集中在澳大利亚、北美大陆、太平洋以及中国中东部地区 (图 8c,
249 d)。以上结果表明, 本文构建的颠簸数据集中数据信息合理, 可以用于进一步的分析。



250
251 图 7. 标准化处理后数据集中的 EDR 对数概率密度分布
252 Figure 7. The probability density of the EDR records above 5000m in the uniform datasets.

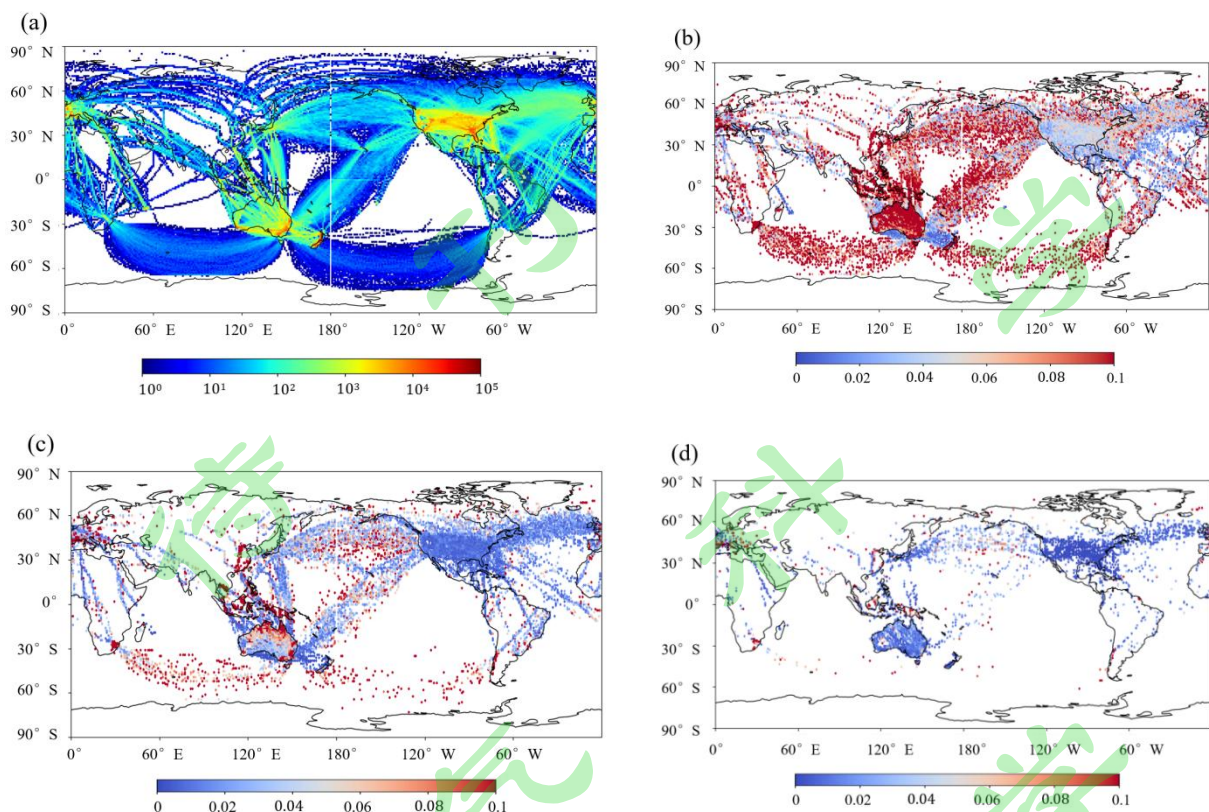


图 8. a) 统一为 EDR 后的全球 5000m 以上高空颠簸记录分布图; (b) 弱颠簸 ($0.1 \leq \text{EDR} < 0.22 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$); c) 中度颠簸 EDR ($0.22 \leq \text{EDR} < 0.38 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$); 以及 (d) 重度颠簸 ($\text{EDR} \geq 0.38 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$) 全球概率分布图。

Figure 8. a) Global distribution of uniformly processed EDR records in a $1^\circ \times 1^\circ$ grid at heights above 5000 m; and the global distribution of the occurrence probability for the (b) weak turbulence ($0.1 \leq \text{EDR} < 0.22 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$); (c) moderate turbulence ($0.22 \leq \text{EDR} < 0.38 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$); and (d) severe turbulence ($\text{EDR} \geq 0.38 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$).

3.2 中国及其周边区域颠簸分类特征分析

在本节中，我们利用上一节中建立的以 EDR 形式描述的全球颠簸数据集，结合 FY-4A 卫星资料对中国及周边区域 ($70^\circ\text{--}160^\circ\text{E}$, $0^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$) 晴空颠簸、近云颠簸以及对流诱导颠簸的来源和时空特征进行分析。

本文采用 FY-4A 卫星 $10.8 \mu\text{m}$ 亮温以及云顶高度和云顶温度产品对三类颠簸进行判别。前期颠簸观测研究发现，水平方向上，对流诱导颠簸和近云颠簸多出现在距云团 40-50km，云顶 2km 范围内，对流诱导颠簸与对流云相关 (Lane 和 Sharman, 2008; Lane et al., 2012; Meneguz et al., 2016)。2021 年，刘丽敏等 (2021) 利用 WRF 模拟分析了强对流云周边大气对飞行的影响，并指出在距强对流云水平方向 50km，垂直方向 1km 范围内，云团以及云顶上辐散外流的气流可使这些区域湍流增强，并引起惯性重力波的发展。因此考虑到对流诱导颠簸和近云颠簸可能的影响范围，本文中以颠簸记录点时间和位置为中心点，与卫星观测资料进行时空匹配，若在颠簸发生 $\pm 15 \text{ min}$,

水平方向 ± 50 km, 垂直方向 ± 2 km 范围内, 卫星观测均无云, 则将颠簸记录判定为晴空颠簸。反之, 若有云, 则考虑为近云或者对流诱导颠簸。基于卫星观测判识对流的方法很多, 例如 Maddox (1980) 提出的亮温阈值法, 以 $10.8\mu\text{m}$ 通道亮温 $<241\text{K}(<-32^\circ\text{C})$ 为对流判识阈值。后来陆续还有研究利用亮温差法 (陈国春 等 2011), 或者采用亮温结合形态学特征 (马瑞阳等, 2021) 等方法进行对流判识。近年一些研究表明, 云顶温度 (CTT) 对闪电和对流降水也具有一定的指示作用, 在对流发生的不同阶段具有明确的对应关系。它对云的微物理特征敏感, 和地面降水相态类型关系密切。为此, 本文在亮温阈值法的基础上, 引入云顶温度辅助对流云的判识。云顶温度的阈值选取参考宋琳等 (2023) 的统计结果, 以 230K 作为阈值, 若 $\text{CTT}<230\text{K}$ 且 $\text{TBB}_{10.8\mu\text{m}}<241\text{K}$ 则将云团判识为对流云。基于这个标准, 若在颠簸发生 $\pm 15\text{min}$, 水平方向 ± 50 km, 垂直方向 ± 2 km 内存在 1 个以上像元点满足对流云的标准, 则判定为对流诱导颠簸, 若不满足则判定为近云颠簸。

3.2.1 空间分布特征

图 9 给出了我国上空三类高空颠簸的地理分布。由图可见, 晴空和近云颠簸分布范围最广, 几乎在我国所有地区都有出现。其中晴空颠簸高发区主要集中在副热带高压北侧, 我国中东部至日本以东洋面 (图 9a)。近云颠簸的 4 个主要活跃区分别位于华北、华东、南海以及日本上空, 其中华东地区是我国大陆上空近云颠簸发生频次最高的区域, 全年发生频次近 40 次, 部分地区达 50 余次 (图 9b)。华北地区是次活跃区, 其中心位于河北、河南和山东三省交界处, 全年发生约 30 余次。除了以上两个活跃区以外, 青藏高原北坡至东坡是我国西部近云颠簸易发生区域, 最大中心出现在青海东部至四川西部。结合云的分布特征可以看到, 与其他近云颠簸发生区域不同, 高原北坡至东坡的近云颠簸发生区上云的空间分布呈现显著的不均匀性 (图 9d)。云的不均匀分布必然导致温度的水平分布不均匀, 这是引发大气湍流的关键热力因素。飞机在经过这些区域的时候, 如果高空风增大, 在热力和动力不稳定的条件下, 颠簸发生的概率就可能大大增加。

与前两种颠簸不同, 对流诱导颠簸在海上发生的概率远高于陆地上空, 华南地区是我国陆地上空对流诱导颠簸的高发区 (图 9c)。郑永光等 (2008) 以及陈国春等 (2011) 先后基于长时间序列卫星资料以及地基闪电观测对我国暖季深对流分布进行研究, 这

些研究均发现我国深对流云活跃区主要集中在低纬度地区，尤以 25°N 以南地区对流最为活跃。与陈国春等（2011）给出的我国暖季（3-10 月）深对流云频率分布比较来看，除了在高原中东部地区分布不一致以外，对流诱导颠簸与深对流云的活跃区总体一致，范围略小。导致这样的差异有多方面因素，最主要的是飞行活动相对于对流活动具有更多的主观人为因素。比如，飞行员在飞行过程中常常为了飞行安全，会根据前方天气情况，采取绕飞对流区尤其深对流区的策略。对于一些特殊地区，例如高原，由于其特殊的地形地貌，飞机会有意降低在该地区飞行频次，且飞行时间段也会尽量选择在对流不活跃时段。因此，实际观测到的对流诱导颠簸会远低于对流云出现频次。

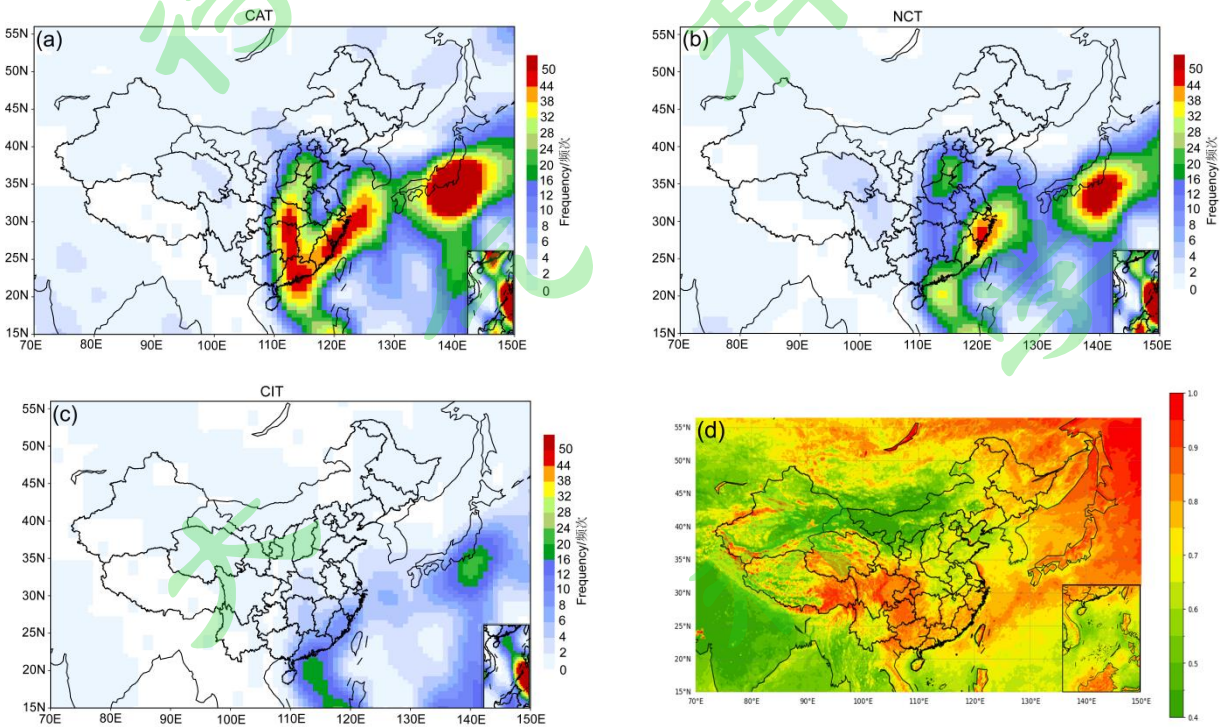


图 9. 2019 年 3 月-2020 年 2 月我国上空三类颠簸以及年平均云覆盖率地理分布（填色表示颠簸发生频次）。a)晴空颠簸；b) 近云颠簸；c)对流诱导颠簸；d) FY-4A 反演的年平均云覆盖率。

Figure 9. The geographic distribution of the three upper-level turbulence and yearly-averaged cloud cover fraction over China from March 1, 2019 to February 29, 2020. (color shadings indicate the turbulence frequency during the year). a) clear-air turbulence (CAT); b) near-cloud turbulence (NCT); c) convective-induced turbulence (CIT) and d) FY-4A retrieved yearly-averaged cloud cover fraction (dimensionless).

从垂直分布来看，我国上空三类高空颠簸活跃的高度层主要位于 9-12 km 之间，最大值出现在 11 km 附近（图 10a）。9-12 km 一般是飞机巡航飞行高度，同时也是对流层顶所在的高度。目前很多研究指出对流层顶区域几乎是所有类型高空颠簸产生的一个重要源区（Sharman 和 Trier 2019;Kaluza et al., 2022;Lee et al., 2023）。一方面，这

个高度层是高空急流和高空锋活跃区，高空急流/锋引起的切变不稳定是颠簸产生的重要动力因素。另一方面，对流层顶作为对流阻滞层，对云的发展起到抑制作用。大部分的云发展达到对流层顶后都向外平流，形成宽大的云砧，少部分深对流云，在其局部云顶附近会由云内强烈上升气流激发重力波的发展，产生风速、温度和气压振荡，这些波动可以从源区向外传播很远的距离，当飞机经过波动传播的区域时，无论是在云内还是在云外都会引起颠簸。

结合颠簸强度分析，晴空和对流诱导颠簸无论强弱，都易发生在对流层高层靠近对流层顶附近（图 10b,d）。而近云颠簸则有所不同，弱颠簸主要集中在对流层高层，中等以上强度的近云颠簸在对流层中层和高层的发生概率基本相当（图 10c）。其中位于对流层中层的活跃区与对流层中低层的湍流混合层接近。这个高度层是对流层中第二个对流阻滞层，在没有有组织的上升运动时，很多层云或雨层云发展到这个高度层就平铺开来。尽管在湍流混合层内气流流速相对较慢，但是运动具有无规则性，飞机在经过这些区域时也可能产生较大的颠簸。

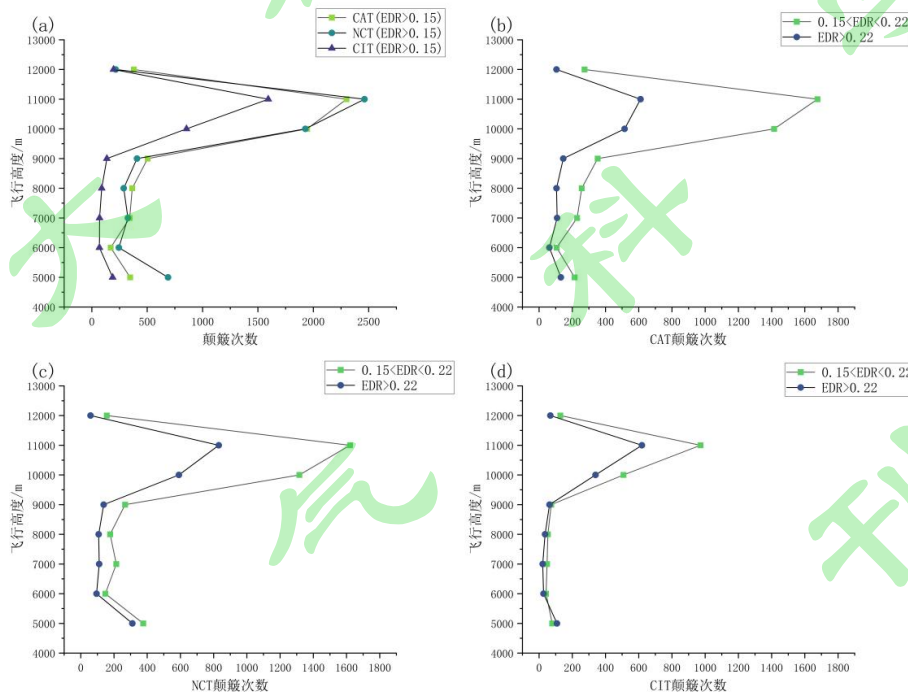


图 10. 2019 年 3 月-2020 年 2 月我国上空三类颠簸发生频次垂直分布. a)三类颠簸总体垂直分布；弱和 MOG 级 b) 晴空颠簸；c)近云颠簸以及 d) 对流诱导颠簸发生频次的垂直分布。

Figure 10. The vertical distribution of the occurrence frequencies of three types of turbulence over China from March 1, 2019 to February 29, 2020. a) the overall vertical distribution for the thee types of turbulence; and vertical distribution for the weak and MOG level of b) CAT; c) NCT; and d) CIT.

3.2.2 季节变化特征

图 11 给出了中国上空三种颠簸观测记录的月变化分布。由图可见，晴空颠簸的峰值主要出现在 1-4 月，即冬春季。次峰在 10-11 月，夏季出现概率最低。近云和对流诱导颠簸月变化分布呈现单峰结构，6-8 月是这两类颠簸的高发期，冬季出现概率最低。综上所述，我国高空颠簸有明显的季节变化特征，且不同类型的颠簸发生规律存在显著的季节差异。

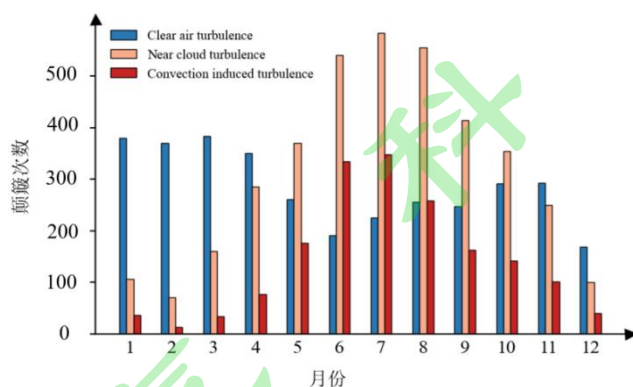


图 11. 2019 年 3 月-2020 年 2 月中国及其周边区域晴空颠簸、近云颠簸与对流诱导颠簸月变化
Fig. 11 Monthly variation of CAT, NCT and CIT in China during March, 2019-February, 2020.

为了对三类高空颠簸的时空特征作进一步分析，以夏季和冬季为典型季节，对三类颠簸在这两个季节的空间分布进行比较。图 12 给出了 2019 年 3 月-2020 年 2 月中国及其周边区域夏季和冬季晴空颠簸、近云颠簸与对流诱导颠簸分布。如图所示，夏季晴空颠簸在中国及其周边区域的发生频率和冬季相比普遍偏低，活跃区位置也较冬季偏北（图 12a,d）。夏季晴空颠簸主要集中出现在华北、黄海和日本上空，冬季则集中出现在华南到华东沿海一带。两个季节中，日本以东洋面上空的晴空颠簸高值区中心位置较为稳定，仅在范围上有所变化。近云颠簸和对流诱导颠簸的发生在夏季的频率显著高于冬季，特别是对流诱导颠簸在冬季几乎很少发生（图 12b,c,e,f）。在地理分布上，近云颠簸在夏季以华南到华东沿海一线为其高发区，冬季仅集中出现在浙江、上海及其以东洋面上空，河北南部也偶有近云颠簸发生（图 12b,e）。夏季对流诱导颠簸在中国大陆区域主要出现在华南沿海地区，海上则主要集中在西沙和东沙群岛以及日本以东洋面上空。冬季中国大陆上空几乎没有对流诱导颠簸发生，仅在东海上空出现（图 12c,f）。

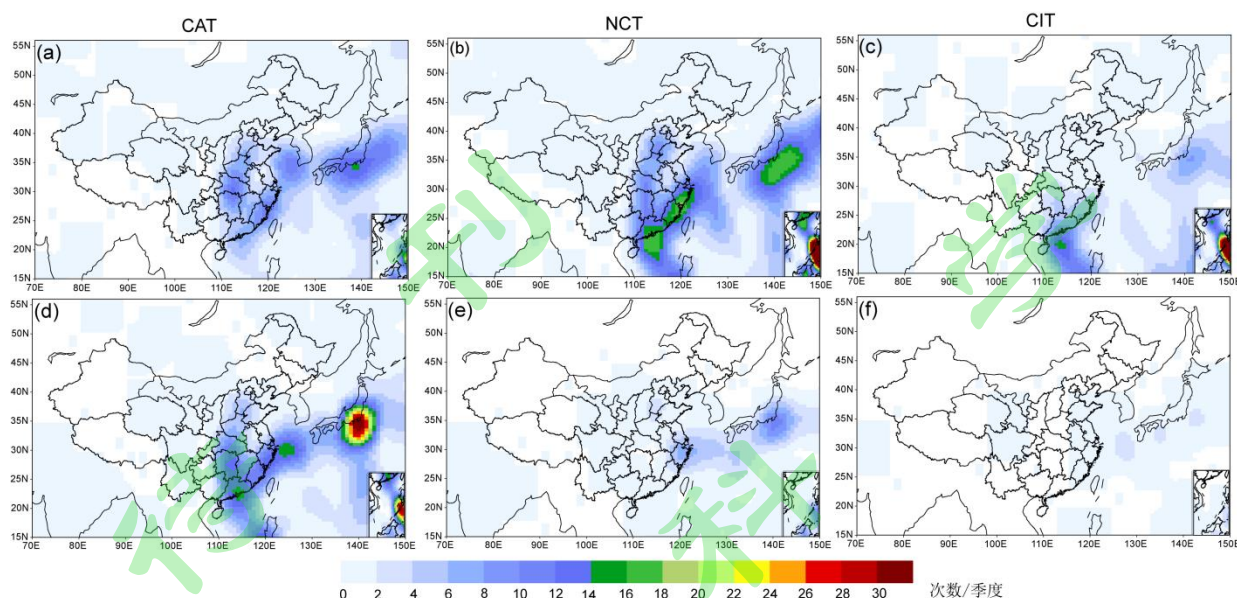


图 12. 2019 年 3 月-2020 年 2 月中国及其周边区域夏季 (a,b,c) 和冬季 (d,e,f) 晴空颠簸、近云颠簸与对流诱导颠簸分布

Figure 12. The geographic distribution of the upper-level CAT, NCT and CIT during summer (a,b,c) and winter seasons (d,e,f) in China and its surroundings during March, 2019-February, 2020.

结合大气环流背景来看，三类颠簸在副热带高压西进东退和西风急流南压北抬过程中，均有明显的响应，但响应特征不完全一样（图 13）。其中对流诱导和近云颠簸随着急流北抬减弱以及副热带高压西进，中等以上强颠簸的频次显著增加，在 6-8 月之间达到峰值。而中等以上强度的晴空颠簸则在此期间出现低谷（图 13b）。与此同时受两种天气系统影响，三类颠簸发生位置均表现出冬春季位置偏南偏东，夏秋季位置偏北偏西的特点。其中晴空颠簸与急流和副热带高压的位置变化的同步性更好（如图 13a,c）。很多研究表明，高空急流和副热带高压对东亚天气气候具有调制作用（李崇银等，2004；陆日宇等，2013），它们可以通过影响热带大气热力异常，对热带外大气环流产生强迫作用。当西风急流北移，热带强迫所激发的异常波列也会随之向北伸展，且强度加强。从以上分析来看，东亚高空西风急流和副热带高压与颠簸类型、发生位置和强度具有密切关系。

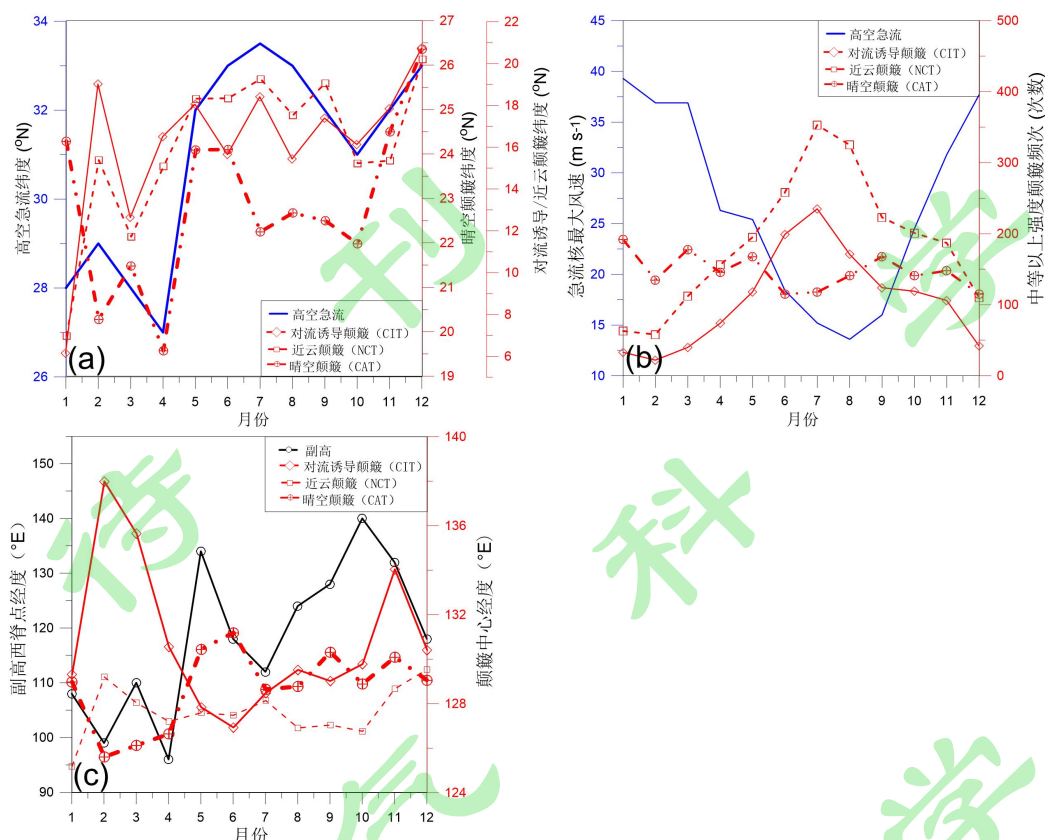


图 13. 2019 年高空急流和副热带高压及三类颠簸（晴空、对流诱导、近云颠簸）位置和强度月变化图。(a) 高空急流和三类颠簸中心纬度的月变化；(b) 高空急流核最大风速以及三类颠簸中等以上强度月频次变化图；(c) 副热带高压西脊点经度和三类颠簸中心经度的月变化（蓝色粗实线表示急流，黑色粗实线表示副热带高压，红色实线表示对流诱导颠簸，红色虚线和长短线分别表示近云颠簸和晴空颠簸）。

Figure 13. The monthly variations of the locations and strength for the upper-level jets, sub-tropical high and turbulence (clear-air turbulence, convective-induced turbulence and near-cloud turbulence) in China and its surroundings during March, 2019-February, 2020. (a) monthly variation of the center latitudes of upper-level jets and three turbulence; (b) monthly variation of the maximum wind speed of jet cores and frequencies of the moderate to great turbulence; (c) the monthly variation of the west most longitude of sub-tropical high and the center longitudes of three-types turbulence. (blue and black solids correspondingly indicate upper-level jets and sub-tropical high, while red solid, dash and dash dot lines represent convective-induced, near-cloud and clear-air turbulence respectively.)

3.2.3 日变化特征

本文中为了消除由于飞行高峰和低谷时段样本量不均衡对结果的客观性带来的影响，采用 2 小时为间隔计算三类高空颠簸发生频次相对于这期间总的飞行记录数的比，来评估颠簸的日变化特征。如图 14a 所示，三类颠簸都显示出多峰结构，且白天颠簸发生概率较夜间更高，呈现明显的日变化特征。颠簸发生的高频时段集中在上午（6-10 时，北京时）和午后（12-16 时）（图 14a）。晴空颠簸最易出现在午后，以 12:00 时前后为高峰。近云和对流颠簸在上午和午后两个时段出现概率基本相当，相比较而言，近云颠簸午后发生

399 概率略高，而对流颠簸上午发生概率略高。这个特征总体与 Kim 和 Chun（2011）基于 6
400 年的飞行员报告以及颠簸数值诊断产品统计得到的东亚地区高空颠簸日变化结果相一致。

401

402

403 图 14. 中国区域三类高空颠簸日变化特征：(a)晴空（蓝色虚线）、近云（绿色虚线）和对流诱导颠簸
404 （红色实线）总体日变化特征；弱和 MOG 级(b)晴空颠簸；(c)近云颠簸；以及(d)对流诱导颠簸日变化
405 特征（折线表示弱颠簸，红色柱表示 MOG 级颠簸）

406 Figure 14. Diurnal variation of turbulence above 5000m in China. (a) CAT(blue dash line), NCT(green dash
407 line) and CIT (red solid line) diurnal variation; the diurnal variation of the weak and MOG level (b) CAT; (c)
408 NCT; and (d) CIT(blue curves represent weak turbulence, red bars represent MOG turbulence).

409 从三类颠簸不同强度的日变化演变来看，晴空颠簸的强、弱颠簸的日变化规律基本一
410 致，即峰值出现在午后 12: 00-14: 00 时（北京时）期间，次峰在 6: 00-10: 00 期间（图
411 14b）。近云颠簸的弱颠簸在 14: 00-16: 00 期间出现概率最高，而中等以上强度的近云
412 颠簸主峰出现在 8: 00-10: 00 期间，次峰出现在午后 12: 00-14: 00 期间（图 14c）。对
413 流颠簸的日变化特征与近云颠簸非常类似，只不过中等以上强度的对流颠簸在 8: 00-10:
414 00 的峰值更加突出（图 14d）。由图 9c 我国区域对流诱导颠簸的地理分布可见，我国区
415 域上空对流诱导颠簸的活跃区主要集中在华南特别是广东、福建以及西沙和东沙群岛一
416 带。对流诱导颠簸与对流活动密切相关，目前很多研究中都发现华南地区对流活动具有显
417 著的日变化特征，但是不同地区的日变化特征表现不同。例如，Shou 等（2020）对珠江

三角洲地区 10 年短时强降水日变化特征进行分析后发现, 该地区的短时强降水第一个峰值出现在清晨 (04:00-09:00 北京时), 第二个出现在午后 (14:00-18:00 北京时), 两个峰值出现的概率基本相当。Li et al. (2016) 研究华南前汛期期间华南西部强降水日变化特征后发现, 该地区的强降水峰值出现在清晨, 并认为这与低空急流日变化关系密切。Zheng 等 (2016) 在研究中国降水日变化特征中发现, 广东省沿海地区强降水频率在白天出现峰值, 他们分析认为这可能与海风环流在上午加强有关。由此看来, 我国地区对流诱导颠簸的日变化规律与对流活动具有密切关系, 受不同地区对流活动的日变化影响, 整体表现出双峰结构日变化特征。

4. 结论

为了对中国及其周边地区高空颠簸进行客观分析, 本文基于 2019 年 3 月-2020 年 2 月由美国大气研究中心地球观测实验室和中国气象局国家气象信息中心接收整理的两套飞机观测资料, 提出了一种飞机颠簸观测资料的处理思路。即, 首先通过对两套资料颠簸记录进行极值检查、连续性检验以及孤立点剔除和交叉检验等质量控制; 然后通过建立湍流等级与 DEVG, 以及 EDR 与 DEVG 的 EDR24 反演模型, 将颠簸观测进行标准化处理, 进而构建得到一套覆盖中国及其周边区域飞机颠簸 EDR 数据集。从对比检验结果看, 本文提出的 EDR24 反演模型与目前使用最广泛的采用对数正态拟合方法建立的 EDR-SP17 反演模型精度相当, 两套模型得到的结果相关性达 0.98, 转换后的一年全球 EDR 颠簸观测数据集符合对数正态分布特征。

在该数据集的基础上, 本文进一步结合 FY-4 卫星观测和定量产品以及 ERA5 再分析资料对中国及其周边地区的三类高空颠簸: 晴空颠簸、近云颠簸以及对流诱导颠簸的空间分布、季节以及日变化特征进行了分析。其中一些主要结果简述如下:

1)我国上空三类高空颠簸中, 晴空颠簸高发区主要集中在副热带高压北侧, 我国中东部至日本以东洋面; 近云颠簸多集中出现在华北、华东、南海、以及青藏高原北坡至东坡。华东和华南地区分别是我国大陆上空近云颠簸和对流诱导颠簸的高发区。

2)三类高空颠簸活跃的高度层主要位于 9-12 km 之间, 在对流层高层靠近对流层顶附近。晴空颠簸的峰值主要出现冬春季, 夏季出现概率最低。近云和对流诱导颠簸夏季高发, 冬季大陆上空对流诱导颠簸几乎很少发生。夏季近云颠簸高发区主要集中在华南到华东沿海一线, 对流诱导颠簸则主要出现在华南沿海地区。

447 3)三类颠簸的日变化均显示出多峰结构特征, 颠簸发生的高频时段主要集中在上午
448 (6-10 时, 北京时) 和午后 (12-16 时)。晴空颠簸最易出现在午后, 近云和对流诱导颠
449 簸在上午和午后两个时段出现概率基本相当。

450 致谢

451 本研究由国家自然科学基金面上项目 41965001, 国家自然科学基金-中国民用航空局
452 联合研究基金重点项目(U2033207)以及中国气象局创新发展专项 CXFZ2025J061 联合资
453 助。

参考文献

- 陈国春, 郑永光, 肖天贵. 2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析[J]. 气象, 37 (1):75-84. Chen Guochun, Zheng Yongguang, and Xiao Tiangui. 2011. Distribution and spatiotemporal variations of deep convective clouds over China during the warm season[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37(1):75-84. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.1.009.
- Cornman L B. 2016. Airborne in situ measurements of turbulence[J], Aviation turbulence: Processes, detection, prediction, 97-120, doi:10.1007/978-3-319-23630-8_5.
- 崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等. 2020. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J]. 高原气象, 39(1):196-203. Cui Linli, Guo Wei, Ge Weiqiang, et al. 2020. Accuracy test of cloud top parameters of FY-4A satellite and research on typhoon application [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(1):196-203. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00065.
- Federal Aviation Administration. 2017. Turbulence: Staying safe. https://www.faa.gov/travelers/fly_safe/turbulence/. [2018-02-09]
- Hoblitt F M. 1988. Gust Loads on Aircraft: Concepts and Applications[J], AIAA Education Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 306 pp. doi:10.2514/4.861888.
- Kaluza T, Kunkel D, Hoor P. 2022. Analysis of turbulence reports and ERA5 turbulence diagnostics in a tropopause-based vertical framework[J]. Geophysical Research Letters, 49(20): e2022GL100036. doi:10.1029/2022GL100036.
- Kaplan M L, Huffman A W, Lux K M, et al. 2005. Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. Part I: A 44-case study synoptic observational analyses[J]. Meteor. Atmos. Phys., 88:129–152. doi:10.1007/s00703-004-0080-0.
- Kim, J H, and Chun H. Y. 2011. Evaluation of upper-level turbulence diagnostics performance using the graphical turbulence guidance (GTG) system and pilot reports (PIREPs) over East Asia[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 50(9). 50:1936-1951.
- Kim S H and Chun, H.-Y. 2016. Aviation turbulence encounters detected from aircraft observations: Spatiotemporal characteristics and application to Korean aviation

- turbulence guidance[J]. Meteorol. Appl., 23(4):594–604. doi:10.1002/met.1581.
- Kim S H, Chun H Y, Chan P W. 2017. Comparison of turbulence indicators obtained from in situ flight data[J]. Appl. Meteor. Climatol., 56(6): 1609 – 1623. doi:10.1175/JAMC-D-16-0291.1.
- Lane T. P. and Sharman R. D. 2008. Some influences of background flow conditions on the generation of turbulence due to gravity wave breaking above deep convection. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(11): 2777-2796. doi:10.1175/2008JAMC1787.1.
- Lane T P, Sharman R D, Trier S B, et al. 2012. Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4): 499-515. doi:org/10.1175/BAMS-D-11-00062.1
- Lee, Kim J H, Sharman R D, et al. 2023. Climatology of clear-air turbulence in upper troposphere and lower stratosphere in the northern hemisphere using ERA5 reanalysis data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128:e2022JD037679. doi:10.1029/2022JD037679.
- 廖捷,熊安元. 2010. 我国飞机观测气象资料概况及质量分析[J]. 应用气象学报, 21(2):206-213. Liao Jie, Xiong Anyuan. 2010. Overview and quality analysis of meteorological data observed by aircraft in China [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 21(2):206-213. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.02.010.
- 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究 [J]. 大气科学, 28: 641 – 658. Li Chongyin, Wang Jouqhtai, Lin Shizhei, et al. 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28: 641 – 658.
- Li X, Zhou W, Chen Y D. 2016. Detecting the origins of moisture over southeast China: seasonal variation and heavy rainfall[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33(3):319–329. doi:org/10.1007/s00376-015-4197-5.
- 刘丽敏,黄剑,石磊,等.2021. WRF模拟强对流云周边晴空大气对飞行的影响[J]. 黑龙江气象 38(1):34-38. Liu L M, Huang J, Shi L, et al. 2021. WRF simulation of the influence of clear air around strong convective clouds on flight [J]. Meteorology of Heilongjiang (in

- Chinese),38(1):34-38.doi:10.3969/j.issn.1002-252X.2021.01.011.
- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响 [J]. 大气科学, 37 (2): 331 - 340, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012. 12310. Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. 2013. Variability of the East Asian upper-tropospheric jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 331 - 340.
- 马瑞阳, 郑栋, 姚雯, 等. 2021.雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征[J]. 应用气象学报 ,32(3):358-369. Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. 2021. Thunderstorm cloud feature dataset and thunderstorm activity characteristics in China[J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese),32(3):358-369. doi:10.11898/1001-7313.20210308.
- MacCready , Paul B. 1964. Standardization of Gustiness Values from Aircraft[J]. Appl. Meteor. Climatol., 3(4):439-449. doi:10.1175/1520-0450(1964)003<0439:SOGVFA>2.0.CO;2.
- Maddox, R. A., 1980. Mesoscale convective complexes[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61(11):1374-1387.
- Meneguz, E., Wells, H. and Turp, D. 2016. An automated system to quantify aircraft encounters with convectively induced turbulence over Europe and the Northeast Atlantic. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(5):1077-1089. doi:10.1175/JAMC-D-15-0194.1.
- Pratt K G, Walker W G. 1955. A revised gust-load formula and re-evaluation of V-G data taken on civil transport airplanes from 1933-1950[R]. NACA Report 1206.
- Schwartz B. 1996. The Quantitative Use of PIREPs in developing aviation weather guidance products[J]. Weather & Forecasting, 11(3):372-384. doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0372:TQUOPI>2.0.CO;2.
- Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al. 2006. An Integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting[J]. Wea. Forecasting, 21(3):268-287. doi:10.1175/WAF924.1.
- Sharman R D, Cornman L B, Meymaris G, et al. 2014. Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence[J]. Appl. Meteor. Climatol., 53(6):1416-1432. doi:10.1175/jamc-d-13-0329.1.
- Sharman R D, Pearson J M. 2017. Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence.

- Part I: Forecasting nonconvective turbulence[J]. *Appl. Meteor. Climatol.*, 56(2): 317 – 337. doi:10.1175/JAMC-D-16-0205.1.
- Sharman R D, Trier S B. 2019. Influences of gravity waves on convectively induced turbulence (CIT): A review[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 176:1923–1958. doi:10.1007/s00024-018-1849-2.
- Shou Y X, Gao W H, Lu F. 2020. A statistical study of pre-summer hourly extreme rainfall over the Pearl River Delta metropolitan region during 2008–2017[J]. *Int J Climatol.*, 40(9):4242–4258. doi:10.1002/joc.6457.
- 宋琳, 张国平, 王曙东, 等. 2023. FY-4A闪电成像仪在干旱区应用评估及与多源数据对比[J]. *干旱气象*, 41(1): 25-33. Song Lin, Zhang Guoping, Wang Shudong, et al. 2023. Application evaluation of FY-4A lightning imager in arid region and comparison with multi-source data[J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 41(1): 25-33. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-01-0025.
- Stickland J J. 1998. An assessment of two algorithms for automatic measurement and reporting of turbulence from commercial public transport aircraft[J]. *Bureau of Meteorology Rep. to the ICAO METLINK Study Group*, 42:1.
- Storer L N, Williams P D, Gill P G. 2019. Aviation turbulence: dynamics, forecasting, and response to climate change. *Pure Appl. Geophys.* 176:2081-2095. doi:10.1007/s00024-018-1822-0.
- 王富, 赵宇. 2021. 风云四号静止气象卫星的云顶高度反演算法[J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 44(3):7. Wang Fu, Zhao Yu. 2021. Cloud top altitude inversion algorithm for Fengyun-4 geostationary meteorological satellite [J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science Edition (in Chinese)*, 44(3):7. doi:10.3969/j.issn.1001-8395.2021.03.016.
- Wolff J K, Sharman R D. 2008. Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States[J]. *Appl. Meteor. Climatol.*, 47(8):2198–2214. doi:10.1175/2008jamc1799.1
- World Meteorological Organization: Aircraft meteorological data relay (AMDAR) reference manual[M], WMO 958, 80 pp., 2003. [Available online https://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/ABO/AMDAR/publications/AMDAR_Reference_Manual_2003.pdf].[2003-12-30].

- 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 2008. 中国及其周边地区夏季中尺度对流系统的分布及其日变化特征[J]. 科学通报, 53(4):471-481. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Zhu Peijun. 2008. Distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its surrounding areas in summer [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53(4):471-481.doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2008.04.015.
- Zheng Y, Xue M, Li B, et al. 2016. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24-hour accumulation periods based on national-level hourly rain gauge data[J]. Adv. Atmos. Sci. 33:1218-1232. doi:10.1007/s00376-016-6128-5.