大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

基于湍能耗散率的航空颠簸集成预报方法

蔡雪薇 万子为 吴文辉 杨波 蚁志鸿

An Ensemble Prediction Method of Aviation Turbulence Based on the Energy Dissipation Rate

CAI Xuewei WAN Ziwei WU Wenhui YANG Bo YI Zhihong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21147

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征
Characteristics of Initial Perturbation Growth Rate in the Regional Ensemble Prediction System of GRAPES
大气科学. 2018, 42(2): 367 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17141

改进的超级集成预报方法在长江三角洲地区O_3预报中的应用
Application of Improved Super Ensemble Forecast Method for O_3 and Its Performance Evaluation over the Yangtze River Delta Region
大气科学. 2018, 42(6): 1273 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17167

一种基于数值模式诊断自适应的北京地区对流性降水临近集合预报新方法
A New Method of Adaptive Convective Precipitation Ensemble Nowcasting Based on the Numerical Model Diagnosis Over Beijing
大气科学. 2019, 43(4): 895 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18177

基于智能计算的广西冷湿极端天气定性和定量组合预报方法研究
A Combined Qualitative and Quantitative Prediction Scheme for Cold-Wet Extreme Weather in Guangxi Based on Intelligent Computing
大气科学. 2019, 43(6): 1424 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1908.18248

基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法及初步评估
A Return Radiosonde Trajectory Forecast Method and Its Preliminary Evaluation Based on High Resolution Numerical Weather Prediction Model
大气科学. 2021, 45(3): 651 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2012.20186

台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用
Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application
大气科学. 2021, 45(1): 195 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡雪薇, 万子为, 吴文辉, 等. 2023. 基于湍能耗散率的航空颠簸集成预报方法 [J]. 大气科学, 47(4): 1085−1098. CAI Xuewei, WAN Ziwei, WU Wenhui, et al. 2023. An Ensemble Prediction Method of Aviation Turbulence Based on the Energy Dissipation Rate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(4): 1085−1098. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21147

基于湍能耗散率的航空颠簸集成预报方法

蔡雪薇[1] 万子为[2] 吴文辉[3] 杨波[1] 蚁志鸿[3]

1 国家气象中心, 北京 100081
2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081
3 厦门航空有限公司, 厦门 361006

摘 要 为提升对飞机颠簸的客观预报能力，设计一种新的基于湍能耗散率（Energy Dissipation Rate，简称 EDR）的航空颠簸集成预报算法，预报结果可实现与机载探测到的新型颠簸实况直接对比验证，且预报强度不受机型差异的影响。该算法利用中国气象局中尺度天气数值预报系统（CMA-MESO）的基本气象要素计算多个代表晴空颠簸（Clear Air Turbulence，简称 CAT）和山地波（Mountain Wave Turbulence，简称 MWT）的预报指数，在各预报指数和颠簸实况 EDR 的概率密度函数均基本符合正态分布的假设条件下，利用前期各指数和实况之间的概率密度匹配关系，将原预报指数在实时数值预报中转换为以 EDR 为单位的预报值；再将其根据预报评分给予不同权重，集成为包含晴空颠簸和山地波的 EDR 颠簸预报产品。主客观检验结果均显示这种颠簸预报产品能够大致反映不同区域和类型的颠簸情况，多种算法的集成预报效果总体好于单一指数预报；相对作用特征检验（ROC）表明轻度以上颠簸的预报结果可以提高命中率并降低空报率，具有较高的预报正技巧。

关键词 颠簸 湍能耗散率 (EDR) 权重集成
文章编号 1006-9895(2023)04-1085-14 **中图分类号** P456 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21147

An Ensemble Prediction Method of Aviation Turbulence Based on the Energy Dissipation Rate

CAI Xuewei[1], WAN Ziwei[2], WU Wenhui[3], YANG Bo[1], and YI Zhihong[3]

1 *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081
2 *CMA Earth System Modeling and Prediction Centre*, *Beijing* 100081
3 *Xiamen Airlines*, *Xiamen* 361006

Abstract To improve the objective prediction of aircraft turbulence, a new aviation turbulence ensemble prediction algorithm based on the energy dissipation rate (referred to as EDR) is designed. The forecast value can be directly compared and verified with the new turbulence data (EDR) obtained by airborne detection, and the forecast intensity is unaffected by the difference in aircraft type. The algorithm calculates multiple forecast indices representing clear air turbulence (CAT) and mountain wave turbulence (MWT) using the basic meteorological elements of the Mesoscale Weather Numerical Forecast System of CMA (CMA-MESO). Under the assumption that the EDR observations and predicted turbulence diagnostics both approximately follow a normal distribution. According to the probability density matching relationship between previous forecast indices and EDR observations, the original forecast index is converted

收稿日期 2021-12-15；**网络预出版日期** 2022-01-05
作者简介 蔡雪薇，女，1988 年出生，硕士，主要从事强对流和航空气象预报研究。E-mail: snow_rose88229@aliyun.com
资助项目 中国工业和信息化部项目 MJ-2014-J-70
Funded by Project of Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China (Grant MJ-2014-J-70)

into the forecast value with EDR in the real-time numerical forecast. Multiple forecast indices are given different weights according to the forecast scores, and they are integrated into EDR turbulence forecast products, including CAT and MWT. The subjective and objective verification results show that this turbulence forecast product can roughly reflect the turbulence in different regions and types. The integration prediction of multiple algorithms is generally better than that of a single index forecast. The resulting relative operating characteristics curves show that the forecast results of light-or-greater intensity turbulence increase the hit rate and reduce the false alarm rate, and the aviation turbulence ensemble prediction algorithm has high forecasting capability.

Keywords Turbulence, Energy dissipation rate (EDR), Ensemble forecast

1 引言

高空航路上的危险天气会影响飞行器的飞行安全，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，主要分为晴空颠簸（Clear Air Turbulence，简称 CAT）、山地波（Mountain Wave Turbulence，简称 MWT）和对流性颠簸（Convectively Induced Turbulence，简称 CIT）。飞机遇到颠簸产生的机体摇晃可影响飞机的安全运行，甚至可能导致人员受伤，因此颠簸是飞行员和空中管制员重点关注的航路危险天气，对颠簸现象的监测与预报具有重要的实际意义与应用价值。

目前颠簸监测主要依靠飞行员话音报（PIREPs）和机载探测设备获取。话音报作为最早的颠簸实况沿用至今，但数据量较少且易受飞行员主观因素影响。机载探测获取的客观颠簸实况主要为等效垂直阵风（Derived Equivalent Vertical Gust，简称 DEVG；Gill and Buchanan, 2014）和湍能耗散率（Energy Dissipation Rate，简称 EDR；Sharman et al., 2014）。湍能耗散率（EDR）最初由 MacCready（1962）提出，使用湍动能转化为热量的速率来度量湍流强度，并证明 EDR 与垂直过载的均方根成线性关系，已被国际民航组织（ICAO）认定为衡量颠簸的标准（Kim et al.，2018）。由于 EDR 可能与飞机负载有关（Cornman, 2016），这使得用户可以根据其特定的飞机响应来校准，并可利用 EDR 实况验证基于该单位的预报产品，实现预报与实况数据单位的统一。美国联合航空公司和达美航空公司最早在部分机型上部署探测设备，2012 年两家公司提供的 EDR 报告总和是 PIREPs 报告的 30 倍之多（王占海等, 2020）。国内的厦门航空有限公司（以下简称厦门航空）在 2015 年率先利用机载数据计算湍能耗散率 EDR，到 2020 年机队部署规模达到 114 架，2018～2020 年每月平均收集颠簸实况超过 2 万份，改变了国内对颠簸的监测以主观性强且数量少的飞行员话音报信息为主的状况（胡壮等, 2019）。

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，早期民航部门主要通过计算 Ellord 指数、Dutton 指数、Brown 指数和理查森数等表征大气不稳定的指数作为颠簸预报结果，并根据不同阈值划分为等级预报（Dutton, 1980; Ellrod and Knapp, 1992; Ellrod and Knox, 2010），世界航空气象中心采用 Ellord 指数作为每日定时下发的颠簸预报产品（Gill, 2012）。由于不同的预报指数是基于大气湍流不同的形成机制，它们之间基本相互独立，因此，美国 NCAR 在 2006 年将多种颠簸预报算法集成，得到预报效果更好的颠簸集合预报产品（Sharman et al., 2006）。随着机载探测设备的发展，EDR 实况数据样本增多，其作为颠簸实况时与飞机机型无关，所以，基于 EDR 的预报产品也能够更为真实地直接表征大气的湍流或者颠簸状态，并直接评估预报效果，减少原有预报指数受机型差异和主观实况等因素带来的影响；Sharman and Pearson（2017）通过计算多个预报指数并利用统计关系得到基于 EDR 单位量级的颠簸集合预报产品。

2020 年世界民航组织气象信息服务发展工作组第 16 次会议对相关部门和机构发布航空气象预报产品的格式和性能都提出了新的要求，其中，对于航空气象服务，颠簸预报产品应以 EDR 形式提供，并区分晴空颠簸和山地波。目前国内的相关研究和业务预报产品仍以单一指数的等级预报为主，无法描述不同气象条件产生的颠簸情况，并多采用飞行员话音报作为实况进行个例验证（段炼, 2005; 黄超凡等, 2015; 苏腾和王永忠, 2016; 徐佳男等, 2018），无法满足航空气象服务的需求。为了更真实地体现大气颠簸状况同时减少颠簸实测主观性强

的影响，本研究利用中国气象局自主研发的中尺度天气数值预报系统（CMA-MESO）的预报结果，计算多个颠簸指数并融合客观的 EDR 探测数据，通过概率密度匹配关系形成基于湍能耗散率（EDR）的三维颠簸危险天气客观指导预报产品。这种新的集成预报算法在基于 Kim et al.（2018）的算法基础上，利用更高时空分辨率的中尺度数值模式预报产品和更长时间序列的实况进行回算和概率匹配，并根据预报效果给予各指数不同权重系数，优选预报效果更好的指数进行集成，计算加权平均确定性颠簸预报和轻度以上颠簸概率预报。该预报结果不仅考虑了不同预报指数的不确定性，包含了晴空颠簸与山地波的特征，而且与新型颠簸探测数据的单位匹配，能够客观比较预报效果并满足 ICAO 提出的服务需求。

2　资料和算法

2.1　资料

本文算法选取的数值预报模式为中国气象局自主研发的中尺度天气数值预报系统（CMA-MESO），水平空间分辨率为 0.03°×0.03°，垂直高层为 20 层，分别为 1000 hPa、975 hPa 以及 950～100 hPa 逐 50 hPa 间隔的等压面，时间分辨率 1 h，预报时效 36 h。高时空分辨率的数值模式预报既可以提供精细化的预报结果，又能够保障实时预报结果的稳定性与安全性；实况资料为厦门航空提供的 2018～2020 年逐秒级机载探测 EDR 数据，主要包括时间、经度、纬度、高度、EDR 峰值、EDR 中值和置信区间等信息，EDR 数据的阈值在 0～1 之间，单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$，当 EDR≥0.02 $m^{2/3}\ s^{-1}$ 时机载设备自动探测，平均日均颠簸实况量约 600～1000 个。

2.2　算法介绍

由于湍能耗散率主要根据飞机探测参数计算且只能反映湍能的单一影响，因此，本文采用将其他多种颠簸预报指数转换为 EDR 单位的方法，以增加颠簸预报涵盖的类型。构建基于 EDR 的航路颠簸预报算法的主要流程（图 1）为历史数据可用性分析、回算数据、实时预报和业务化运行与检验四个步骤。主要技术路线为基于 EDR 实况数据满足样本数足够多、覆盖范围广且数值符合正态分布等条件时，通过数值模式预报输出的各高度层上的水平风、温度、位温、位势高度和地形高度等基本物理量分别计算 8 个晴空颠簸与 8 个山地波指数（详见表 1），在山地波预报中，mws 表示地形系数，其数值与地形高度和风速有关；在 16 个预报指数数值分布也均基本符合正态分布的情况下，将其分别与历史同期实况 EDR 进行概率密度函数匹配的统计分析，得到各预报指数与 EDR 的参数转换关系，经过转换后的多组 EDR 预报值根据历史评分给予不同权重集成，计算颠簸加权平均确定性预报与概率预报。

3　颠簸预报算法诊断

3.1　历史颠簸实况可用性统计分析

基于厦门航空提供的 EDR 颠簸实况数据对历

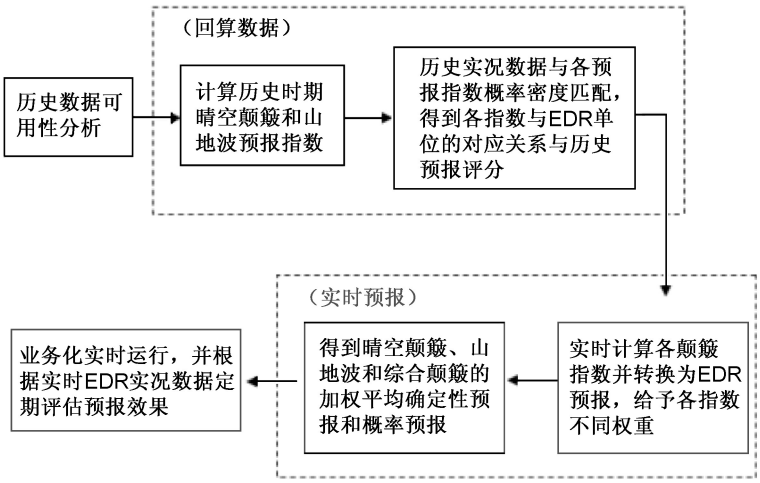

图 1　构建颠簸预报算法流程图（EDR：湍能耗散率）

Fig. 1　Flowchart of the turbulence prediction algorithm (EDR: energy dissipation rate)

表 1 晴空颠簸和山地波预报指数简介

Table 1 Definitions of CAT (Clear Air Turbulence) and MWT (Mountain Wave Turbulence) diagnostics

	预报指数	描述	单位
晴空颠簸	$\lvert\nabla\cdot T\rvert/Ri$（Kim et al., 2018）	水平温度梯度的绝对值/理查森数 $\dfrac{\left\lvert\frac{\partial t}{\partial x}+\frac{\partial t}{\partial y}\right\rvert}{\frac{g\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)}{\theta}\Big/\left(\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right)}$	$\mathrm{K\ m^{-1}}$
	Ellrod_TI2（Ellrod and Knox, 2010）	(拉伸形变+切变形变)×垂直风切变	$\mathrm{s^{-2}}$
	NGM1（Reap, 1996）	风速×总形变	$\mathrm{m\ s^{-2}}$
	IAWIND（McCann, 2001）	惯性平流风	$\mathrm{m\ s^{-2}}$
	F3D（Sharman and Pearson, 2017）	简化的锋生函数	$\mathrm{K\ m^{-1}\ s^{-1}}$
	|DIV|（Ellrod and Knox, 2010）	水平散度的绝对值	$\mathrm{s^{-1}}$
	DEFSQ（Ellrod and Knox, 2010）	总形变的平方	$\mathrm{s^{-2}}$
	DBZ（Ellrod and Knox, 2010）	组合反射率	dB*Z*
山地波	MWT1（Kim et al., 2018）	mws·*V*（*V*表示风速）	$\mathrm{m^2\ s^{-2}}$
	MWT2（Kim et al., 2018）	mws·NGM1	$\mathrm{m^2\ s^{-3}}$
	MWT3（Kim et al., 2018）	mws·IAWIND	$\mathrm{m^2\ s^{-3}}$
	MWT4（Kim et al., 2018）	mws·$\lvert\nabla\cdot T\rvert$	$\mathrm{K\ s^{-2}}$
	MWT5（Kim et al., 2018）	mws·w^2/Ri（w表示垂直速度）	$\mathrm{m^3\ s^{-3}}$
	MWT6（Kim et al., 2018）	mws·F3D	$\mathrm{K\ s^{-2}}$
	MWT7（Kim et al., 2018）	mws·DIV	$\mathrm{m\ s^{-2}}$
	MWT8（Kim et al., 2018）	mws·DEFSQ	$\mathrm{m\ s^{-3}}$

注：mws表示地形系数，当地形高度低于200 m时为0，地形高度大于200 m时，mws为1500 m以下最大风速和位势高度的乘积。

史数据进行整理和统计分析，测试这种新类型数据的准确性和可用性，评估历史数据是否可用作预报产品的开发和测试。

由于国内 EDR 数据使用时间相对较短，因此根据 Sharman et al.（2014）对机载 EDR 资料与话音报颠簸实况相互验证的统计研究来说明大气湍流与飞机颠簸的关系，具体为：EDR 在 0.15～0.21 $\mathrm{m^{2/3}\ s^{-1}}$ 之间为轻度颠簸，EDR 在 0.22～0.34 $\mathrm{m^{2/3}\ s^{-1}}$ 之间为中度颠簸，EDR≥0.34 $\mathrm{m^{2/3}\ s^{-1}}$ 为重度颠簸，本文也依据此分类标准对实况数据进行简单统计。

2018～2020 年时段内总样本和轻度以上颠簸样本累计分别超过 320 万份和 46 万份，样本数量较大能够基本反映其分布特征并弥补资料年限相对较短的不足。对实况的初步统计结果（图 2a）显示，尽管受航班计划调整和天气季节性变化等影响，各月的实况总样本数有一定差距，但各阈值所占比例差别不大，因此可针对各月的相对阈值比例分析来替代绝对数量的对比，其中，轻度以上的颠簸约占总样本的 10%～15%，因此平均每月数据中可用有效颠簸样本约为 15000～30000 份之间；此外，轻度以上颠簸所占比例相对较稳定，夏半年（4～9 月）颠簸数量较冬半年（10 月至次年 3 月）略有增加。

如图 2b 所示，轻度以上颠簸实况在各高层上的分布具有季节性变化，冬半年 5 km 以上中高层的颠簸样本占总样本数的比例较夏半年有所增加：冬季中高层占比约 40%～50%，夏季中高层颠簸占总数为 20%～30%。冬季高空急流增强产生的风切变与中高层晴空颠簸数量增加有关；夏季低层温湿条件转好使热对流增强，因此 1～3 km 高度的颠簸比例明显增强，与热力不稳定和强对流等天气有关；此外，近地面高度层（500 m 以下）的冬半年颠簸样本占比较夏半年更高，可能是受到冷空气大风在边界层内形成明显风切变的影响。

颠簸空间分布的季节性变化可能受航班量调整等影响，但统计分析显示不同高度和季节的颠簸空间分布特征也具备一定规律，可进一步评估新数据的可用性。如图 3 所示，飞机颠簸主要分布在我国中东部（102°E 以东地区）、南海和东南亚上空的航线，我国西北地区和西南地区分布较少。本文统计时将空中分为 0～3 km、3～5 km、5～8 km 和

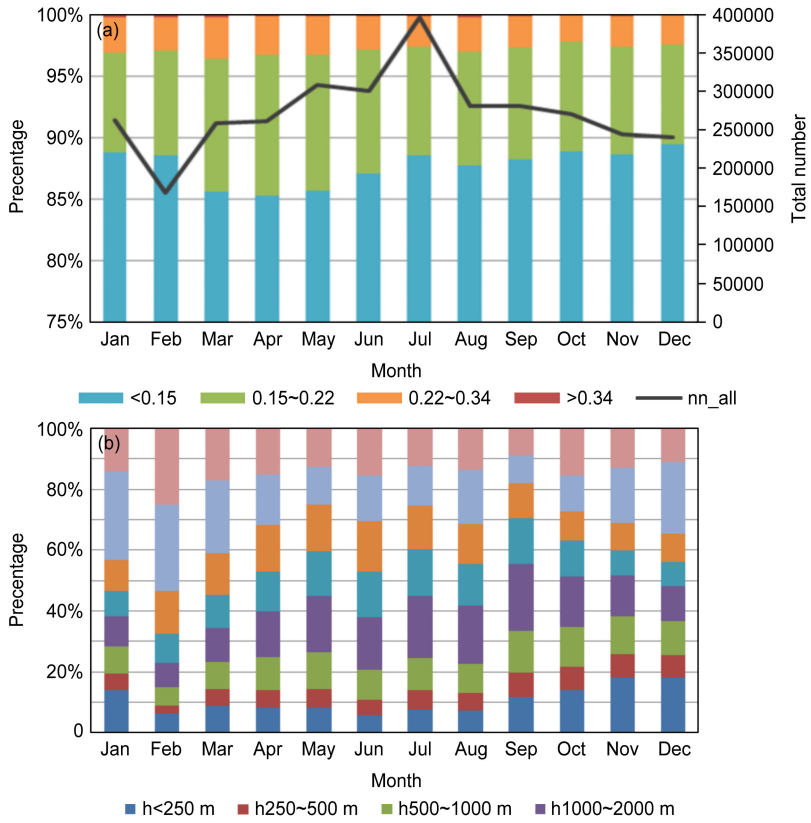

图 2　2018～2020 年（a）湍能耗散率 EDR 实况样本统计特征（黑线：总样本数，柱状图：不同强度样本百分比），和（b）轻度以上颠簸样本高度分布统计特征（柱状图：不同高度样本百分比）。

Fig. 2　(a) Statistical characteristics of energy dissipation rate (EDR) observations (black line: total number of samples, bar chart: percentage of samples with different intensities) and (b) statistical characteristics of the height distribution of light-or-greater (LOG) intensity of turbulence from 2018 to 2020. Bar chart: percentage of samples with different heights

8～13 km 高度层分析，其中，0～3 km 和 3～5 km 高度的颠簸（图略）主要集中在机场周边，与飞机起降时受边界层内湍流影响有关，此处无需展开讨论。5～8 km 高度间的颠簸主要分布在我国中东部地区（图 3a, c）：冬季 12 月中到重度颠簸区域主要集中在黄淮、江淮和江汉等地，夏季 7 月则分布在华北、西北地区东部和江南东部等地。8～13 km 高度间的颠簸沿航线分布（图 3b, d），且颠簸强度较 5～8 km 略偏弱，冬季强颠簸区主要分布在黄淮和江淮等地，夏季高层颠簸较冬季明显偏弱，且强颠簸多分布在我国华北和东北地区。

综合来看，EDR 探测数据的样本数较飞行员话音报样本明显增加，各层高度分布具有季节性变化特征，这与使用话音报统计颠簸信息的其他研究结果基本一致（吴炎成等, 2014; 阿利曼等, 2016; 申燕玲等, 2017），评估结果显示该数据可用于颠簸预报产品的开发和测试。

不同季节 EDR 实况数据的概率密度函数曲线分布具有相似的特征，如图 4，以 2019 年 7 月和 12 月为例，均符合准正态分布（最小值为数据探测的起始阈值，其附近的奇异点主要由于受到数据样本量和探测灵敏度的影响，该问题对本方法的构建和预报效果没有本质影响），总体基本满足颠簸预报算法构建所需的假设条件。此外，各月的期望在−2.74～−2.64 之间，标准差为 0.72～0.78 之间，综合对比结果显示实况 EDR 的季节性差异不明显，表明实况数据基本满足假设条件且稳定性较好。

3.2　历史数据回算

回算数据部分主要包括回算各颠簸预报指数、验证预报指数的概率密度曲线分布特征、通过概率匹配得到转换统计关系和计算转换后的各预报指数历史评分四个步骤。

根据 2.2 节中的表 1 在每个网格点上计算得到 16 个预报指数后，将原颠簸指数通过线性关系转

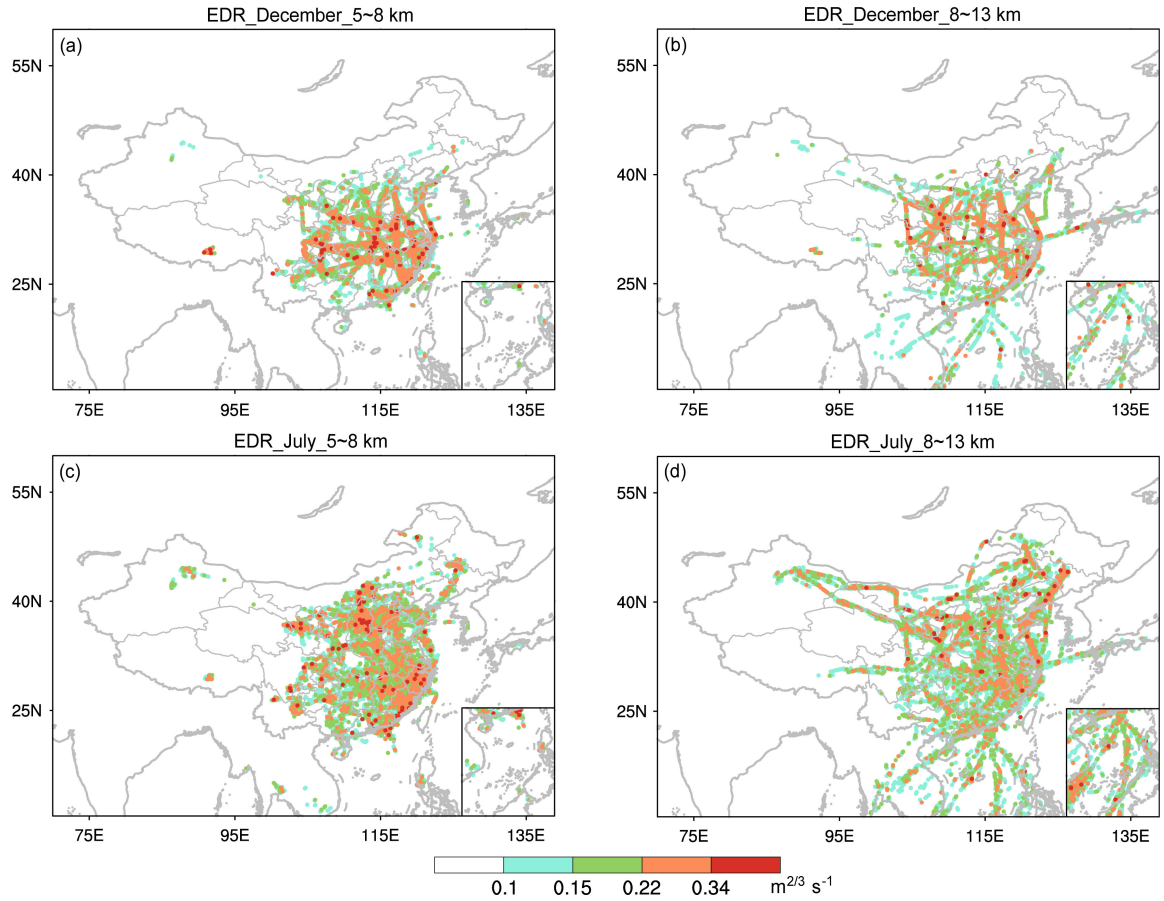

图 3 2018～2020 年（a、b）12 月、（c、d）7 月 5～8 km（左列）和 8～13 km（右列）中高空湍能耗散率 EDR 分布，单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$

Fig. 3 Distributions of mid-to-high altitude EDR between 5 km and 8 km (left column), between 8 km and 13 km (right column) in (a, b) December and (c, d) July 2018–2020, units: $m^{2/3}\ s^{-1}$

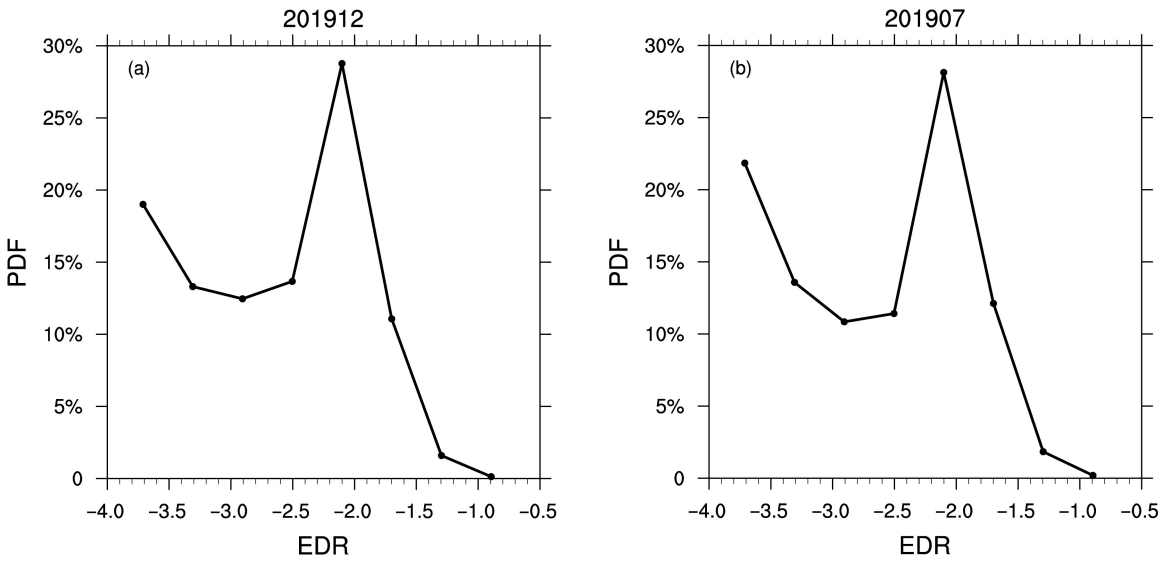

图 4 2019 年（a）12 月和（b）7 月 EDR 实况概率密度函数分布特征

Fig. 4 Distributions characteristics of the probability density function (PDF) of EDR observations in (a) December and (b) July 2019

换为 EDR 单位量级的新预报 ln$D$*（Sharman and Pearson, 2017）：

$$\ln D^* = a + b \cdot \ln D, \tag{1}$$

其中，D 为原颠簸预报指数，D*为原颠簸指数转换后的 EDR 预报指数，a 和 b 为线性关系的参数，由公式（2）和（3）计算得到，与实况和预报的期望与标准差有关：

$$b = \sigma(\ln O_{\mathrm{edr}})/\sigma(\ln D), \tag{2}$$

$$a = <\ln O_{\mathrm{edr}}> b(\ln D), \tag{3}$$

式中，O_{edr} 为实况探测数据，⟨⟩为数学期望，σ 为标准差。经过概率匹配映射转换后的新预报值与原有预报结果具有相同的空间分布特征，能够表征多种颠簸情况的同时，实现了各预报算法单位量级之间的统一。

由于本文主要研究晴空颠簸与山地波的预报产品，为避免对流性颠簸的影响，因此选择冬半年的历史数据和预报数据进行算法构建和检验。本章节以 2020 年 10 月为例说明回算数据模块的算法流程，受篇幅限制，仅选取 DEFSQ 和 MWT8 分别代表晴空颠簸与山地波预报指数验证原预报的转换结果。如图 5，两个预报指数的概率密度函数均基本符合正态分布特征的假设条件，由于实况各月的标准差和期望值季节变化小，因此不同时期实况的期望和标准差的偏差较小，实际计算中可使用固定参数以获得较稳定的转换关系。

经过转换后的 16 个颠簸预报值的单位与颠簸实况一致，可直接对比检验各指数的预报效果。命中率和空报率形成的相对作用特征检验（Relative Operating Characteristic，简称 ROC）曲线围成的曲线下面积 AUC（Area Under Curve）可表征预报效果（Jolliffe and Stephenson, 2016）（具体方法详见 4.1.1 节）。以 2020 年 10 月为例作为历史数据，被用于晴空颠簸和山地波实时预报的权重系数分别由相应的曲线下面积 AUC 归一化后得到（表 2 和表 3），晴空颠簸预报和山地波的权重差异均较明显，晴空颠簸权重前两位为 DEFSQ 和|▽ T|/Ri，山地波权重前两位为 MWT8 和 MWT3；此外，DBZ 作为一个反映对流性颠簸的预报指数，预报效果不佳，可能与冬季对流活动偏弱和飞机通常会绕飞对流区因此无实况验证有关，给予较低权重不影响整体预报效果。

3.3　颠簸实时预报

在实时预报中，将原预报指数根据历史概率匹配统计关系转换为基于 EDR 单位量级的新颠簸预报。本章节以 2020 年 11 月的实时预报为例，如图 6，2020 年 11 月 5 日 08:00（北京时，下同）起报的 12 h 时效预报结果显示，晴空颠簸指数 DEFSQ 和山地波指数 MWT8 的 EDR 预报范围与强度均与原预报能够较好对应，300 hPa 高度上晴空颠簸主要出现在新疆北部、川西高原、内蒙西部、俄罗斯东部、我国南海和菲律宾以东海域，山地波主要分布在新疆北部、川西高原、内蒙西部和俄罗斯东部，与晴空颠簸覆盖的区域相比，山地波预报

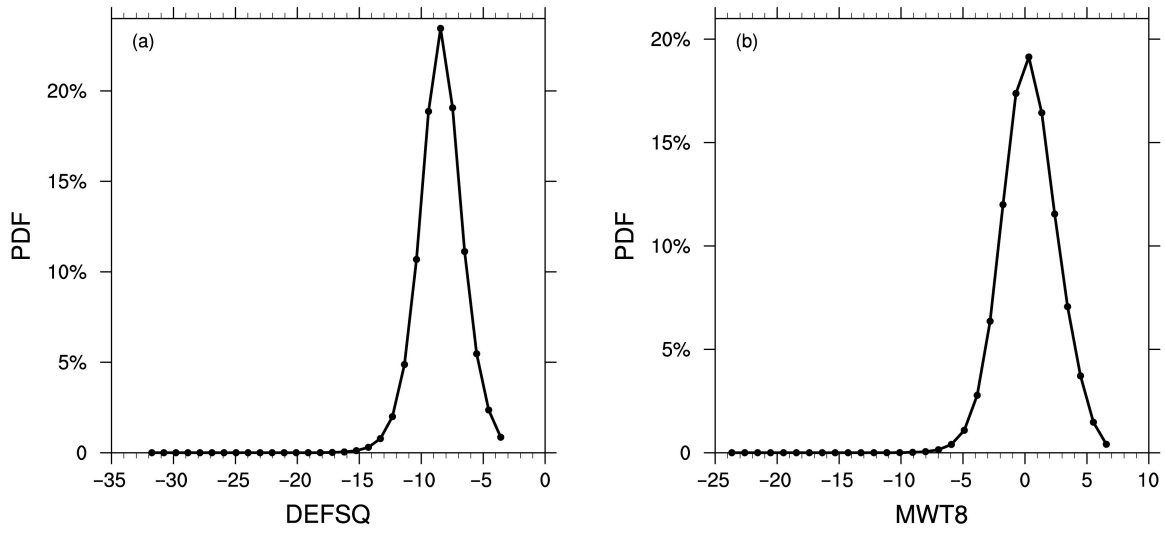

图 5　2020 年 10 月（a）DEFSQ 与（b）MWT8 预报指数的概率密度函数分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of the probability density function of the forecast indices (a) DEFSQ and (b) MWT8 in October 2020

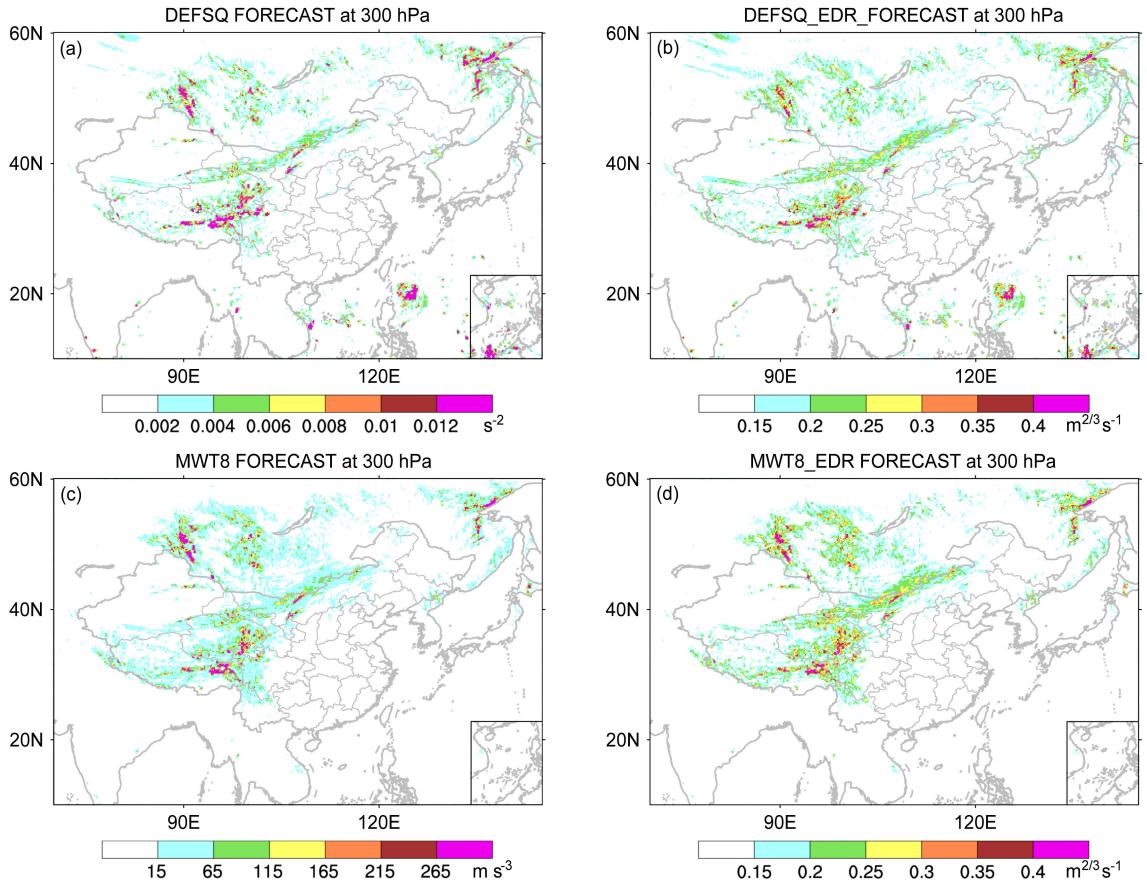

图 6 2020 年 11 月 5 日 20:00 300 hPa 的预报指数（a、b）DEFSQ（单位：s^{-2}）与（c、d）MWT8（单位：$m\ s^{-3}$）原预报值（左列）空间分布与转换为 EDR 预报值（右列，单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$）的空间分布

Fig. 6 Distributions of original forecast values (left column) and forecast values converted into EDR (right column, units: $m^{2/3}\ s^{-1}$) of the forecast indices (a, b) DEFSQ (units: s^{-2}) and (c, d) MWT8 (units: $m\ s^{-3}$) at 300 hPa at 2000 BJT (Beijing time) on November 5, 2020

表 2 2020 年 10 月晴空颠簸预报指数权重系数

Table 2 Weight coefficient of CAT forecast index in October 2020

晴空颠簸	$\lvert\nabla\cdot T\rvert/Ri$	Ellrod_TI2	NGM1	IAWIND	F3D	DBZ	|DIV|	DEFSQ
权重	0.182	0.055	0.096	0.173	0.031	0	0.169	0.294

表 3 2020 年 10 月各山地波预报指数权重系数

Table 3 Weight coefficient of MWT forecast index in October 2020

山地波	MWT1	MWT2	MWT3	MWT4	MWT5	MWT6	MWT7	MWT8
权重	0.02	0.15	0.165	0.11	0.088	0.05	0.16	0.257

值更高；EDR 预报范围在 0～0.5 $m^{2/3}\ s^{-1}$ 之间，重度颠簸中心值超过 0.3 $m^{2/3}\ s^{-1}$，与 EDR 实况量级的统计分布特征较一致。

各预报指数代表大气湍流不同的形成机制，因此多个指数集成能够指征可能存在的不确定性并提供更好的效果。由于等权重平均预报无法筛选出预报效果更优的成员，因此有多种权重分布的集成算法被研究（陈桂英和艾孖兑秀, 2000; 段明铿和王盘兴, 2006; 陈圣劼等, 2019）。本文使用历史评分作为权重系数，将 8 个晴空颠簸和 8 个山地波预报指数分别集成计算得到晴空颠簸和山地波加权平均确定性预报，以两者最大值作为最终的 EDR 颠簸的加权平均确定性预报，以出现轻度以上颠簸的成员比例作为概率预报产品（如图 7），通过该算法得到的 EDR 颠簸预报可同时包含山地波与晴空颠簸的分布特征。结合当日高空形势场实况（图略），

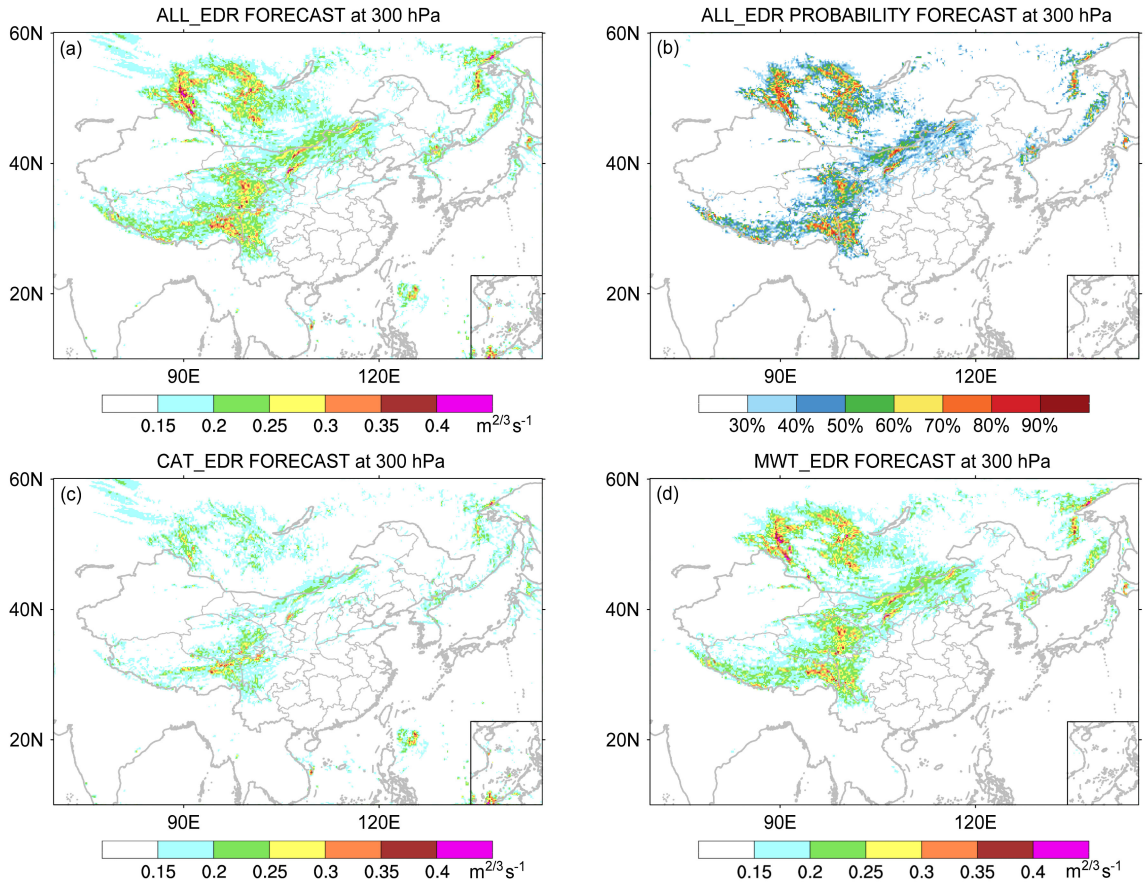

图 7　2020 年 11 月 5 日 20:00 300 hPa 的 EDR 预报产品的空间分布：（a）EDR 颠簸确定性预报（单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$）；（b）轻等强度以上 EDR 颠簸概率预报；（c）晴空颠簸预报（单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$）；（d）山地波预报（单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$）

Fig. 7　Distributions of turbulence prediction:(a)deterministic EDR forecast (units: $m^{2/3}\ s^{-1}$); (b) probabilistic EDR forecast for the LOG (light-or-greater) level, (c) clear air turbulence (CAT; units: $m^{2/3}\ s^{-1}$), and (d) mountain wave turbulence (MWT; units: $m^{2/3}\ s^{-1}$) at 300 hPa at 2000 BJT on November 5, 2020

2020 年 11 月 5 日 08:00 起报的 20:00 300 hPa 高度的颠簸预报较好地反映了新疆北部至蒙古的高空槽、川西高原附近的中纬度西风带急流和西太平洋台风等主要天气系统。

4　颠簸预报产品检验与应用效果评估

目前，该颠簸实时业务预报产品发布在国家气象中心航空气象技术支持平台，并推送至厦门航空的民航运行气象风险管控系统，为民航航路颠簸预报、重大节假日和社会活动的航空气象预报保障服务提供技术支持，因此对预报产品的检验与应用效果评估十分重要。

由于机载探测颠簸实况数据通常仅出现在航线和机场进近区附近，当区域内未出现颠簸记录时仅代表没有探测但不能代表未发生颠簸，不能验证这些无记录区域的预报效果。因此以往对航空气象预报的检验研究中（Brown and Young, 2000），对颠簸等预报产品作主观与客观检验时的具体检验标准为：对于某一点出现大于一定阈值的颠簸记录时认定为发生颠簸；出现小于一定阈值的颠簸记录时被认定为该站点未发生颠簸。

4.1　预报产品的客观检验评估

4.1.1　客观检验方法

本节利用厦门航空公司提供的 EDR 监测实况数据对三维 EDR 颠簸集成预报进行客观检验，以对比和评估预报产品的预报性能。

颠簸事件可看作是简单的二元事件，对这类事件的预报结果为是否发生，一个事件有 2×2 种可能的结果，可以通过命中率（YY）、空报率（YN）、漏报率（NY）和正确否定（NN）来检验预报的性能（Jolliffe and Stephenson, 2016）。客观检验方法为相对作用特征曲线（ROC）检验，即当预报阈值

变化时，通过命中率与空报率来构建 ROC 曲线，得到相对空报率（FAR，FAR＝1−POD_n）的命中率（POD_y）变化（表 4），当空报率与命中率围成的 AUC 曲线面积超过 0.5，则认为检验的预报产品具有一定预报技巧。

在对航空气象产品检验时，多篇文献的研究结果（Ellrod and Knox, 2010; Sharman and Pearson, 2017）均采用将格点预报插值到实况站点附近，对实况站点进行检验的方法；未出现实况的区域，无论是否预报出颠簸均不作检验。考虑到实况数据的探测偏差和数值预报偏差，因此将出现颠簸位置周围最近的 4 个格点预报值的平均值作为该点预报值与其前后 1 小时的实况进行点对点比较，计算轻度以上颠簸预报（EDR≥0.15）的命中率和评分。

4.1.2 客观检验结果分析

2020 年 11 月，所有高度层颠簸的 24 小时时效预报的检验结果显示轻度以上的晴空颠簸与山地波的各预报指数的 ROC 曲线所围成的 AUC 面积均大于 0.5（图 8a, b），具有一定的预报技巧；晴空颠簸的 AUC 面积评分总体高于山地波，可能与山地波实况样本数量较少有关。晴空颠簸各预报指数的离散度相对较大，预报结果不确定性大，AUC 面积评分在 0.5～0.65 之间，等权平均预报评分（橙色曲线）与预报效果最好的单一成员持平，加权平均预报结果（绿色曲线）优化了各成员占比，预报评分最高。山地波各指数预报评分相差较小，两种平均预报评分均与评分最好的单一成员持平，当权重随季节变化调整时，采用加权平均预报效果能够提供预报效果更稳定的预报产品。

综合了晴空颠簸与山地波的 EDR 颠簸加权平均预报效果较好，具有相对较高的命中率和较低的空报率，轻度以上颠簸的命中率 POD 达到 0.74，技巧评分（true skill statistic）评分（POD_y+POD_n−1）超过 0.253。如图 8c 所示，单一预报指数 Ellord_TI2 的 AUC 面积为 0.59，多指数集成的等权重平均颠簸预报较单一指数预报提高 0.05，加权平均颠簸预报效果最好，AUC 面积超过 0.68。此外，可能由于山地波实况较少因而对计算评分的贡

表 4 检验方法及公式

Table 4 Evaluation methods and formulas

指标名称	定义	描述	范围
POD_y	YY/(YY+NY)	预报事件发生的命中率	0～1，1为最好
POD_n	NN/(YN+NN)	预报事件未发生的命中率	0～1，1为最好
FAR	YN/(YN+NN)	空报率	0～1，0为最好

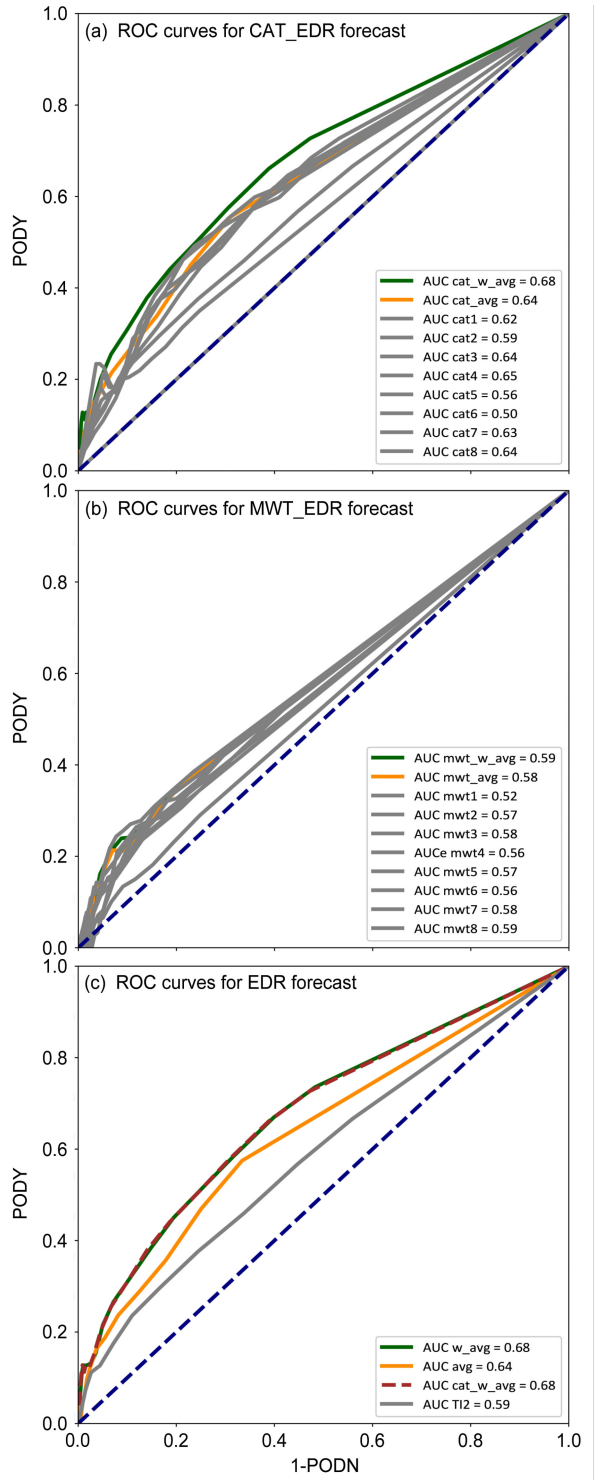

图 8 2020 年 11 月轻度以上（a）晴空颠簸、（b）山地波和（c）颠簸确定性预报相对作用特征曲线检验

Fig. 8 Verification of the relative action characteristic curve of the deterministic forecast (EDR≥0.15) for (a) CAT, (b) MWT, and (c) EDR turbulence of the LOG level in November 2020

献有限，加入山地波的集成预报对预报总体效果无明显提升，但在实际预报中仍应考虑山地波作用以提示其对飞机安全运行的影响。

此外，对不同高度范围内的实况样本检验，预报评分不同。对 0～5 km 的 EDR 实况（样本数占总数的 60%～70%）作 ROC 检验，显示 AUC 面积超过 0.72，高于所有高度的总样本实况评分（图略）。由于实况样本的空间和时间分布不均匀，低层样本分布相对集中，高层样本分布较为分散，因此，检验评分的高低与实况样本选取也有一定关系。

4.2 个例主观检验与应用效果评估

厦门航空公司已实时接收到颠簸预报产品，可实时进行颠簸预报验证与应用效果评估。由于颠簸实况数据主要集中在我国中东部地区，因此本文从厦门航空反馈的出现较强颠簸的个例中选取江南东部和西南地区东部的个例，检验多种算法集成的颠簸加权平均预报产品的预报效果及预报不同类型颠簸的能力。

多种算法集成的加权平均预报对比单一指数预报效果更好。2020 年 3 月 12 日 08:00 前后，福建中北部、江西东北部和浙江南部在 300 hPa 高度附近出现多个颠簸记录，福建中北部的颠簸以轻至中度为主，局地 EDR 中值和峰值分别为 0.2 $m^{2/3}$ s^{-1} 和 0.36 $m^{2/3}$ s^{-1}，3 月 11 日 20:00 起报的 12 h 预报结果显示，单一预报指数 Ellord_TI2（图 9a）对极值以外大部分实况的强度和位置预报均较好，但在部分地区存在空报；晴空颠簸加权平均预报能够修正这一问题（图 9b），保留 Ellrod_TI2 指数对福建西北部的准确预报并降低福建东部沿海和浙江西南部等地的预报强度，使预报效果得到提升。

EDR 颠簸预报产品可预报不同类型的颠簸情况。2020 年 3 月 12 日福建西北部山区的山地波预报（图 9c）结果显示此处最大预报值为 0.24 $m^{2/3}$ s^{-1}，大于晴空颠簸预报值，综合山地波的 EDR 颠簸预报结果（图 9d）与该区域内多个大于 0.22 $m^{2/3}$ s^{-1} 的颠簸实况记录更匹配。2020 年 1 月 21 日 14 时前后在贵州中部探测到较强颠簸，750 hPa 高度附近多个 EDR 实况超过 0.15 $m^{2/3}$ s^{-1}，最大中值和峰值分别为 0.22 $m^{2/3}$ s^{-1} 和 0.38 $m^{2/3}s^{-1}$，达到中度至严重颠簸等级（图 9e）。1 月 21 日 08 时起报的 14 时预报显示在贵州中部有超过 0.29 $m^{2/3}$ s^{-1} 的中度以上晴空颠簸和 EDR 颠簸，预报强度与实况较一致；此外，贵州西部更高海拔地区（2000 m 以上）的 EDR 颠簸预报较晴空颠簸预报明显增强，说明考虑地形影响的山地波预报具有一定正贡献；尽管部分地区由于飞机航线原因未出现颠簸探测记录，但在实际预报中我们仍然需要考虑到山地波效应对空中湍流分布的影响。

总体来看，多种算法集成的加权平均预报的预报结果可以弥补单一算法的局限性，预报效果总体好于单一指数预报；融合山地波和晴空颠簸预报的 EDR 颠簸预报对山区上空的预报强度明显增强，对不同类型颠簸的预报均适用。

5 结论与讨论

本文介绍了一种新的航空颠簸集成预报算法，该算法利用中国气象局中尺度天气数值预报预报系统（CMA-MESO）计算多个预报指数，并通过集成不同类型的颠簸预报指数形成基于湍能耗散率（EDR）单位量级的预报产品，这种新的预报结果可用于与客观的机载颠簸实况直接对比，避免了原有主观等级预报存在对不同飞机类型和配置差异的局限性，能够满足 ICAO 对航空气象服务的要求。

对历史数据的统计分析结果显示这种新的基于湍能耗散率的颠簸实况资料大致能够反映颠簸特征，可用于预报产品的开发和测试。颠簸实况样本数量较多且主要分布在我国中东部地区，其季节性变化等特征与天气系统基本相对应：冬季高空急流强盛使高层颠簸较多，夏季热对流增加使中低层颠簸明显增强。概率密度函数分布特征随季节性差异不明显，因此利用不同时期的实况数据回算对新算法预报结果的影响相对较小。

颠簸预报算法主要分为数据回算和实时预报两部分。在满足 EDR 实况和预报指数的概率密度函数均基本符合正态分布的条件下，数据回算部分主要利用历史实况数据和模式计算的多个晴空颠簸和山地波预报指数，回算得出各指数与 EDR 单位的概率匹配转换关系和历史评分；颠簸实时预报部分将多种原预报指数转换为 EDR 预报值，预报结果根据历史评分给予的不等权重进行集成，输出晴空颠簸、山地波和 EDR 颠簸的加权平均确定性预报与轻度以上颠簸的概率预报产品。

主观与客观检验结果显示多指数集成的预报效果总体好于单一指数预报，加入的算法越多，包含的不确定性越强，可弥补单一算法的局限性。颠簸预报能够反映不同区域和类型的颠簸情况，长时间

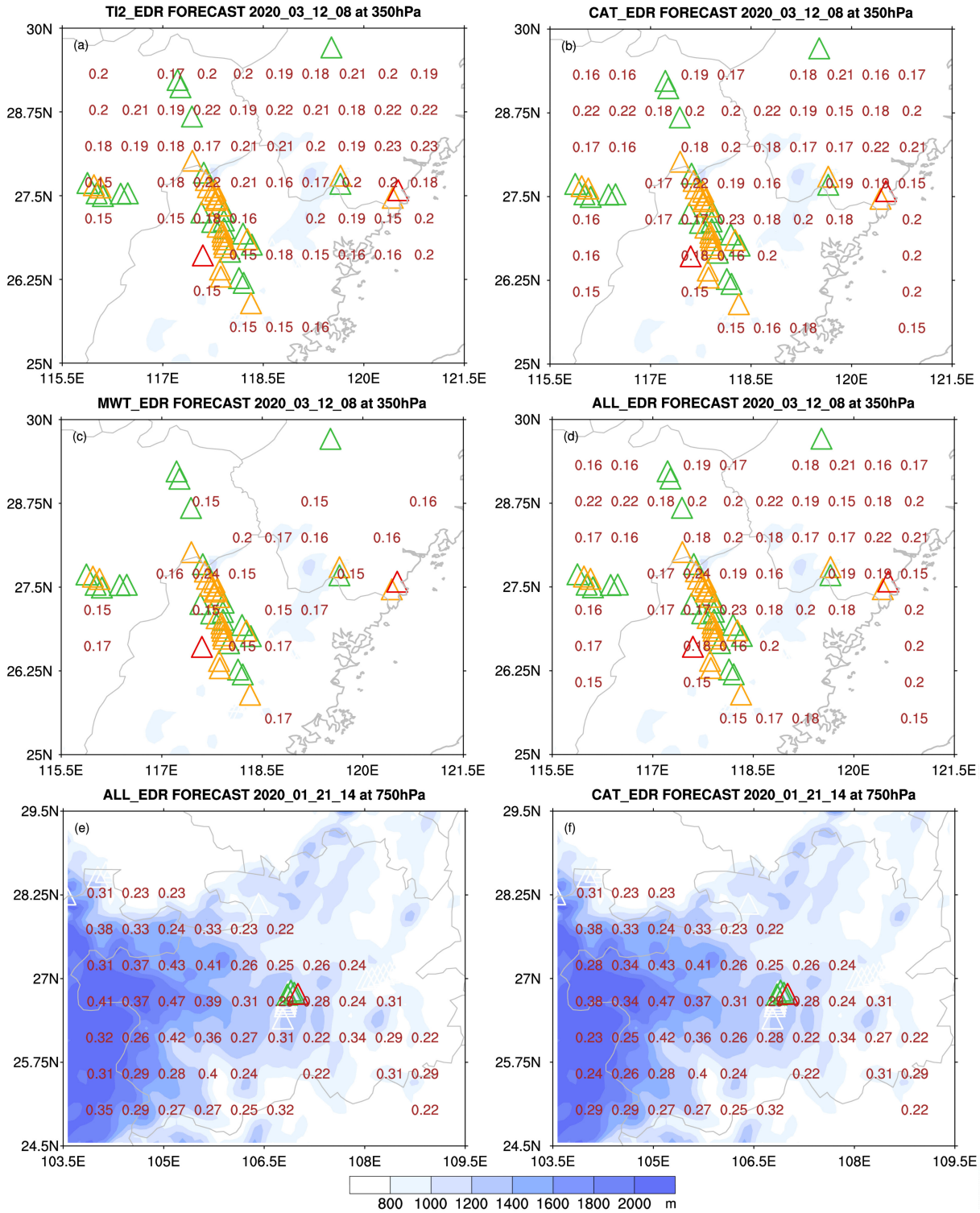

图 9 2020 年 3 月 12 日 08:00 福建省（a）轻度以上 Ellrod_TI2 预报、（b）晴空颠簸、（c）山地波和（d）颠簸预报检验以及 1 月 21 日 14:00 贵州（e）中度以上颠簸和（f）晴空颠簸预报检验的空间分布（填色：地形高度，单位：m）。棕色数值为 EDR 预报数值；不同颜色三角形为 EDR 实况峰值，其中白色＜0.15，绿色≥0.15，黄色≥0.22，红色≥0.34，单位：$m^{2/3}\ s^{-1}$

Fig. 9 Verification of the LOG level forecast of (a) Ellrod_TI2, (b) CAT, (c) MWT, and (d) EDR turbulence in Fujian Province at 0800 BJT on March 12, 2020, and verification of the moderate-or-greater (MOG) level forecast of (e) EDR turbulence and (f) CAT in Guizhou Province at 1400 BJT on January 21, 2020. Brown fill value: EDR forecast; triangle: EDR observation peak value, white＜0.15, green≥0.15, yellow≥0.22, red≥0.34; units: $m^{2/3}\ s^{-1}$; shaded color: terrain height, units: m

序列数据的客观检验结果也表明这种颠簸算法提高了命中率并降低空报率，具有一定的预报正技巧。

在我国，由于对以 EDR 为单位的机载实况数据的应用与研究较少，因此，基于 EDR 研发的颠簸预报算法尚在起步阶段，目前该预报的准确率可达到预期，但受到探测资料和数据算法的局限，仍存在一定提升空间。受实况资料年限较短的影响，季节变化特征的表现有一定不足，湍能耗散率与飞机颠簸的关系主要依靠国外的统计研究结果，国内飞机实测数据较少，相关统计研究尚待进一步推进；目前选用的晴空颠簸和山地波参数对非对流性颠簸预报效果相对较好，但未包含强对流天气引起的局地颠簸算法。未来将考虑增加反映热力不稳定的预报算法，并将多种预报算法根据快速更新的实况进行动态权重集成。

参考文献（References）

阿利曼, 王君, 冯锦明, 等. 2016. 中国东部高空颠簸时空分布特征及其与热带中东太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 40(5): 1073−1088. A Liman, Wang Jun, Feng Jinming, et al. 2016. Spatiotemporal characteristics of high altitude turbulence over eastern China and their relationship with the equatorial central and eastern Pacific sea surface temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(5): 1073−1088. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16136

Brown B G, Young G S. 2000. Verification of icing and turbulence forecasts: Why some verification statistics can't be computed using PIREPs [C]//Preprints, Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Orlando, FL: American Meteorological Society, 393–398.

陈桂英, 艾万兑秀 2000. 权重分布法集成预报试验 [J]. 应用气象学报, 11(S1): 51−57. Chen Guiying, Ai Wanxiu. 2000. Ensemble forecast experiments using weighting distribution method [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11(S1): 51−57. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2000.z1.006

陈圣劼, 刘梅, 张涵斌, 等. 2019. 集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估 [J]. 气象, 45(7): 893−907. Chen Shengjie, Liu Mei, Zhang Hanbin, et al. 2019. Evaluation on forecasting heavy rainfall over Jiangsu region using ensemble forecast techniques and products [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(7): 893−907. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.001

Cornman L B. 2016. Airborne in situ measurements of turbulence [M]//Sharman R, Lane T. Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction. Cham: Springer, 97–120. doi:10.1007/978-3-319-23630-8_5

段炼. 2005. 晴空颠簸及其预报方法 [J]. 中国民航飞行学院学报, 16(6): 39−41. Duan Lian. 2005. Clear-air turbulence and its forecasting methods [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China (in Chinese), 16(6): 39−41. doi:10.3969/j.issn.1009-4288.2005.06.019

段明铿, 王盘兴. 2006. 一种新的集合预报权重平均方法 [J]. 应用气象学报, 17(4): 488−493. Duan Mingkeng, Wang Panxing. 2006. A new weighted average method on ensemble mean forecasting [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(4): 488−493. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.04.015

Dutton M J O. 1980. Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical–model output [J]. Meteor. Mag., 109(1299): 293−310.

Ellrod G P, Knapp D I. 1992. An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use [J]. Wea. Forecasting, 7(1): 150−165. doi:10.1175/1520-0434(1992)007<0150:AOCATF>2.0.CO;2

Ellrod G P, Knox J A. 2010. Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term [J]. Wea. Forecasting, 25(2): 789−798. doi:10.1175/2009WAF2222290.1

Gill P G. 2012. Objective verification of World Area Forecast Centre clear air turbulence forecasts [J]. Meteor. Appl., 21(1): 3−11. doi:10.1002/met.1288

Gill P G, Buchanan P. 2014. An ensemble based turbulence forecasting system [J]. Meteor. Appl., 21(1): 12−19. doi:10.1002/met.1373

胡壮, 阿利曼, 朱思礼, 等. 2019. 中国航空器颠簸报告分析 [J]. 中国民航飞行学院学报, 30(3): 23−27. Hu Zhang, A Liman, Zhu Sili, et al. 2019. Analysis of turbulence report of Chinese aircraft [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China (in Chinese), 30(3): 23−27. doi:10.3969/j.issn.1009-4288.2019.03.005

黄超凡, 周林, 宋帅, 等. 2015. 南海周边海域越洋航线晴空颠簸的数值预报研究 [J]. 气象科学, 35(3): 317−322. Huang Chaofan, Zhou Lin, Song Shuai, et al. 2015. Numerical prediction on clear air turbulence of transoceanic airlines over surrounding waters of South China Sea [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(3): 317−322. doi:10.3969/2014jms.0024

Jolliffe I T, Stephenson D B. 2016. 预报检验—大气科学从业者指南 [M]. 李应林, 译. 2 版. 北京: 气象出版社, 31–41 Jolliffe I T, Stephenson D B. 2016. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science [M]. Li Yinglin, trans. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 31–41.

Kim J H, Sharman R, Strahan M, et al. 2018. Improvements in nonconvective aviation turbulence prediction for the world area forecast system [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 99(11): 2295−2311. doi:10.1175/BAMS-D-17-0117.1

MacCready Jr P B. 1962. The inertial subrange of atmospheric turbulence [J]. J. Geophys. Res., 67(3): 1051−1059. doi:10.1029/JZ067i003p01051

McCann D W. 2001. Gravity waves, unbalanced flow, and aircraft clear air turbulence [J]. Natl. Wea. Dig. , 25(1–2): 3–14.

Reap R M. 1996. Probability forecasts of clear-air-turbulence for the contiguous U. S. [R]. National Weather Service Office of Meteorology Tech. Procedures Bull, 430.

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]. 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]. J. Appl. Meteor. Climatol., 56(2): 317−337. doi:10.1175/JAMC-D-16-0205.1

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

苏腾, 王永忠. 2016. 利用 NCEP/NCAR 数据探寻高空颠簸高发区的方法研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 38(4): 557−562. Su Teng, Wang Yongzhong. 2016. A research of measures on exploring the high-incidence areas of turbulence based on NCEP /NCAR Data [J]. Journal of Yunnan University (in Chinese), 38(4): 557−562. doi:10.7540/j.ynu.20150334

王占海, 陈奇, 冯天美, 等. 2020. 基于 ATG 实报的空中颠簸预防管理系统设计 [J]. 工业安全与环保, 46(3): 45−48,71. Wang Zhanhai, Chen Qi, Feng Tianmei, et al. 2020. Design of aircraft–bumpiness prevention management system based on ATG real–time report [J]. Industrial Safety and Environmental Protection (in Chinese), 46(3): 45−48,71. doi:10.3969/j.issn.1001-425X.2020.03.012

吴炎成, 周林, 刘科峰, 等. 2014. 基于 AMDAR 资料应用于中国周边海域飞机颠簸的统计分析 [J]. 气象科学, 34(1): 17−24. Wu Yancheng, Zhou Lin, Liu Kefeng, et al. 2014. AMDAR based statistical analysis on the features of cross–ocean airplane turbulence over China's surrounding sea areas [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34(1): 17−24. doi:10.3969/2012jms.0157

徐佳男, 王东海, 巩远发, 等. 2018. 中国地区飞机颠簸的定量诊断及分布特征研究 [J]. 成都信息工程大学学报, 33(6): 704−712. Xu Jia'nan, Wang Donghai, Gong Yuanfa, et al. 2018. Quantitative diagnostic and distribution characteristics of aircraft turbulence in China [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 33(6): 704−712. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.016