

文章编号: 2096-1618(2018)06-0704-09

中国地区飞机颠簸的定量诊断及分布特征研究

徐佳男¹, 王东海², 巩远发¹, 段月¹

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 中山大学大气科学学院, 广东 广州 510275)

摘要:为了探寻适用于中国地区的颠簸定量诊断方法以及分析颠簸的特征,利用飞机观测资料和 ERA-Interim 再分析资料,结合多种评估指标对比分析了7种飞机颠簸指数在中国地区的诊断效果。根据对比结果选取诊断效果较好的3种指数,利用 ERA-Interim 资料统计分析了1981–2015年中国地区发生中度及以上(MOG)飞机颠簸的时空分布特征。结果表明:(1)指数评估指标对不同指数的阈值变化的敏感程度不同;(2)不同颠簸指数的诊断效果之间存在较大的差异,布朗指数在中国地区的诊断效果最好;(3)中国地区飞机颠簸主要发生在400–200hPa;(4)中国中东部地区是颠簸高发区,且高发区位置、范围和中心频率均有明显的季节变化;(5)中国地区飞机颠簸具有一定的年际变化特征。

关键词:气象学;航空气象;飞机颠簸;颠簸指数;对比分析;分布特征

中图分类号:P465

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.016

0 引言

飞机飞行过程中突然出现的忽上忽下,左右摇晃及机身震颤等现象,称为颠簸。当飞机产生颠簸时,对于飞机结构、操纵、仪表指示和旅客安全都有很大的影响。剧烈的颠簸,特别是难以探测的晴空颠簸会造成严重的飞行事故。如2017年6月18日,一架东航的飞机在俄罗斯境内遭遇严重晴空颠簸,造成了机上50多名乘客受伤。据统计,与天气相关的飞行事故中,飞机颠簸所造成的飞机事故占了65%^[1]。

由于飞机颠簸对飞行安全的影响甚大,国内外学者对此展开了大量的研究。飞机颠簸由大气湍流引发,可分为晴空颠簸和对流性颠簸。研究表明惯性重力波是造成晴空颠簸的主要原因,包括了由 Kelvin-Helmholtz 不稳定所激发的重力波、山地背风波以及涡旋流产生的惯性重力波等^[2-7]。由于高空急流区附近存在着很强的风切变,因此急流区附近会产生较多的颠簸^[8-10]。航空气象学的特殊性一方面就在于其观测资料的特殊性,其中最常用的资料包括 PIREPs 资料和 AMDAR 资料。阿利曼等^[11]利用中国地区的 PIREPs 资料统计了中国东部高空颠簸的时空分布,并探究了颠簸与高空急流和海温异常的关系。吴炎成等^[12]基于 AMDAR 资料统计了中国周边海域的飞机颠簸特征。此外,还有研究运用 QAR 数据分析了中国高原飞机颠簸的分布规律^[13]。

随着数值天气预报的发展,数值模式在航空气象业务和研究中的运用愈加广泛。民航相关部门基于 WRF 模式发展了民航京沪穗数值预报系统,田开文等^[14]针对该系统在广州地区的预报效果进行了模拟试验。卞双双等^[15]研究了 WRF 模式中不同参数化方案对飞机积冰的预报能力。樊琦等^[16]利用 MM5 模式模拟分析了一次大雾过程。在飞机颠簸方面,利用模式输出和颠簸指数对飞机颠簸进行定量诊断已成为预报颠簸的重要手段。Sharman 等^[17]利用权重法综合了多种颠簸指数,形成了一个诊断飞机颠簸的综合指数,并发展为图形颠簸指导(graphical turbulence guidance, GTG)系统。Kim 等^[18]曾评估过该系统在东亚地区的预报能力。中国对飞机颠簸指数的研究相对较少,沈强等^[19]参考 GTG 系统,发展了一个新的颠簸综合指数;黄超凡等^[20]对南海地区的颠簸个例进行数值模拟,并对比了多种颠簸指数的诊断效果。

利用飞机观测资料和 ERA-Interim 再分析资料,对7种飞机颠簸指数在中国地区的诊断效果进行对比分析,并结合对比结果,选取较好的颠簸指数统计中国地区飞机颠簸的时空分布特征。

1 资料与方法

1.1 资料

所用的飞机观测资料包括了2011–2015年中国地区的航空器空中报告和《全球飞机观测定时值基础数据集》。其中,航空器空中报告是飞行员通过语音

的方式向地面空中交通管制人员传递飞机信息的报告,包括了飞机飞行过程中的飞行参数、位置和所遭遇的天气现象等信息。当飞机遭遇颠簸时,飞行员会向地面传递报告,若颠簸的剧烈程度致行走困难,影响机舱服务,则为中度颠簸;若颠簸致客舱服务无法进行且固定物体左摇右摆、抛起,则为重度颠簸;《全球飞机观测定时值基础数据集》由国家气象信息中心整编,包含了基于全球 AMDAR 计划和中国 AMDAR 计划收集的全球和中国飞机观测气象要素,具体包括温度、风向、风速以及颠簸相关指数等。

采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 再分析资料进行颠簸指数的计算。资料的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直分层共 37 层,每天提供 4 个时次的资料,分别在 00 时、06 时、12 时、18 时(UTC)。

1.2 颠簸指数的计算方法

随着航空气象学的发展,诸多学者提出了包含不同物理量的颠簸指数。文中选取运用相对广泛的 7 个颠簸指数,进行诊断效果的对比。

(1) 布朗指数

布朗指数^[21]简化了 R_i 倾向方程^[22],包括利用热成风关系,把梯度风作为水平风的近似等,考虑了垂直风切变引起的 K-H 不稳定对颠簸的影响。

$$Brown = \frac{1}{24} \Phi S_V^2$$

其中, $S_V = \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right| = \left(\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2}$ 表示风垂直切变, $\Phi = (0.3\xi_a + DSH^2 + DST^2)^{1/2}$, $DSH = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 为切变形变, $DST = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ 为拉伸形变, ξ_a 为绝对涡度。

(2) MOS CAT 概率预报因子

MOS CAT 概率预报因子^[23]运用于 NCEP 的 NGM 模式输出统计(MOS)的概率预报,表示为

$$MOS = |V| DEF$$

其中, $DEF = (DSH^2 + DST^2)^{1/2}$ 是该层大气风场的总形变。

(3) 杜顿指数

Dutton 指数^[24]是基于湍流报告与各种天气尺度的湍流指数的线性回归分析所得到的经验指数,同时考虑了水平风切变和垂直风切变。

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

其中, $S_H = \left(\frac{u}{s} \right) \frac{\partial s}{\partial x} - \left(\frac{v}{s} \right) \frac{\partial s}{\partial y}$ 表示每百千米的水平风切变, s 为合成风速, S_V 为每千米的垂直风切变。

(4) 埃尔罗德指数 1(TI1) 和埃尔罗德指数 2(TI2)

埃尔罗德指数 $TI1$ ^[25]简化了锋生函数,考虑了风场的总形变 DEF 和风垂直切变 VWS 之间的联系:

$$TI1 = VWS \times DEF$$

同时, Ellrod 发现散度虽然小于 DEF ,但对晴空颠簸的影响十分重要,因此在 $TI1$ 的基础上加上了散度项 CVG ,得到湍流指数 $TI2$:

$$TI2 = VWS \times (DEF + CVG)$$

$$\text{其中, } CVG = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

(5) 水平温度梯度指数

根据热成风关系,水平温度梯度是判断风场形变和垂直风切变的一个指标,因此可作为飞机颠簸诊断指数。

$$HTG = | \nabla_H T | = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(6) CCAT 指数

CCAT 指数^[26](Clark's CAT Index)考虑了垂直稳定度平流和绝对涡度,表示为

$$CCAT = \left(\frac{g}{T} \right) \left(\frac{\xi_a}{f} \right) \left(V \cdot \nabla \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| \right)$$

其中, T 代表绝对温度。

2.3 评估方法

选取的飞机观测样本包括发生中度及以上(moderate or greater, MOG)颠簸个例和无颠簸个例。将发生 MOG 颠簸视为正类事件,无颠簸视为负类事件,因此,将飞机颠簸事件视为发生和不发生的二分类事件,同时可以将颠簸指数诊断结果和飞机观测结果分为 4 种情况,见表 1。

表 1 飞机观测与指数诊断情况分类表

观测结果	指数诊断结果	
	发生 MOG 颠簸	无颠簸
发生 MOG 颠簸	YY	NY
无颠簸	YN	NN

根据以上 4 种分类,选取 PODY(发生 MOG 颠簸的诊断准确率)、PODN(无颠簸的诊断准确率)、TSS(true skill statistic)、ETS 评分以及 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)下面积 AUC(area under curve)等作为对颠簸指数诊断效果的评估指标。

对于发生 MOG 颠簸的诊断准确率 $PODY$ ^[27],表示为

$$PODY = \frac{YY}{YY + NY}$$

对于无颠簸的诊断准确率 $PODN$,表示为

$$PODN = \frac{NN}{YN+NN}$$

$PODY$ 和 $PODN$ 的取值范围为 $[0, 1]$, $PODY$ 越大则漏报率越低, $PODN$ 越大则空报率越低。

$TSS^{[28]}$ 和 ETS 评分均是衡量指数阈值对发生 MOG 颠簸和无颠簸的综合诊断能力的指标, 分别表示为

$$TSS = PODY + PODN - 1$$

$$ETS = \frac{YY - e}{YY + YN + NY - e}$$

其中, $e = \left[\frac{(YY + NY) \cdot (YY + YN)}{YY + YN + NY + NN} \right]$ 。TSS 和 ETS 评

分的取值范围分别为 $[-1, 1]$ 和 $[-1/3, 1]$, TSS 可以理解为诊断准确率与诊断错误率之差, TSS 和 ETS 评分越高, 说明指数的阈值对颠簸的综合诊断能力越好。

对于二分类事件, ROC 曲线和曲线下面积 ACU^[29] 是衡量分类器(指数)整体性能的综合指标, 其物理意义可以表达为任取一组异类样本(一个正类和一个负类), 指数诊断结果能正确地将正类排在负类前面的概率。AUC 的取值范围为 $[0, 1]$, AUC 越大说

明指数的综合诊断能力越好。

2 飞机颠簸指数的对比分析

选取 2011–2015 年中国地区高空 6000 m(含)以上, 且强度为中度及以上(MOG)的飞机颠簸报告共 649 份, 其中中度颠簸报告 343 份, 重度颠簸报告 306 份; 同时选取与颠簸报告日期相同, 时间为再分析资料时次 ± 1 h 时间窗内的无颠簸报告共 756 条, 组成飞机观测样本。针对样本中的 1405 个个例, 利用 ERA-Interim 再分析资料分别计算上述 7 种颠簸指数, 再对每个指数设置不同的阈值, 得到每个阈值所对应的 $PODY$ 、 $PODN$ 、TSS 和 ETS 评分。

2.1 颠簸指数的诊断效果分析

选取每个指数在其阈值范围内的 $PODY$ 、 $PODN$ 、TSS 和 ETS 评分, 绘制 4 种指标随指数阈值的变化曲线图(图 1), 分析指标与指数阈值的关系, 评估指数的诊断效果。

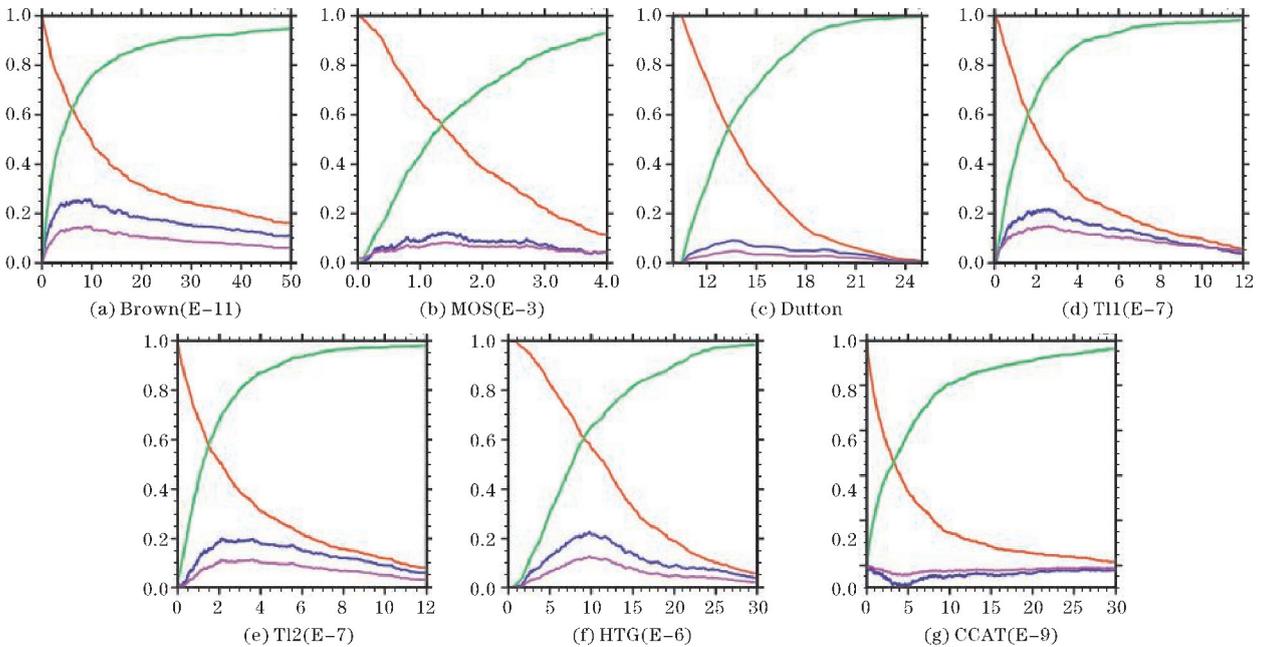


图 1 评估指标随指数阈值的变化曲线

(横坐标为指数的阈值, 纵坐标为各指标的数值, 红色为 $PODY$ 、绿色为 $PODN$ 、蓝色为 TSS、紫色为 ETS 评分)

由图 1 可以看出, $PODY$ 和 $PODN$ 对指数阈值的变化较敏感, 且两者具有相反的变化特征; 而 TSS 与 ETS 评分具有相同的变化趋势, 除 CCAT 指数外, 其他 6 个指数的 TSS 与 ETS 评分均随指数阈值的增大, 呈现先增大后减小的变化趋势; 不同的指数阈值可得到相同的 TSS 和 ETS 评分, 因此在选取指数阈值用于判断颠簸时, 需同时考虑各项指标。

分析单个指数的指标变化曲线可以得到, 布朗指数、埃尔罗德指数 1 和水平温度梯度指数的 TSS 和 ETS 评分曲线的变化较大, 说明指标对这 3 种指数阈值的变化较为敏感。其中, 布朗指数在指数阈值范围为 $2.7 \times 10^{-11} \sim 1.72 \times 10^{-10}$ 具有较大的 TSS 和 ETS 评分, 说明该阈值范围内对颠簸有较好的综合诊断能力; 埃尔罗德指数 1 的 TSS 和 ETS 评分的变化曲线与布

朗指数较为相似,在阈值为 $1.56 \times 10^{-7} \sim 3.02 \times 10^{-7}$,指数对有无颠簸发生具有较好的综合诊断能力;水平温度梯度指数在阈值为 $7.8 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-5}$,TSS 和 ETS 评分均具有较大值,说明在该阈值范围内对颠簸的有无具有较好的综合诊断能力。相对于以上 3 种指数,埃尔罗德指数 2、杜顿指数和 MOS 概率预报因子的 TSS 和 ETS 评分曲线变化较小,说明 2 个指标对这 3 个指数的阈值变化不敏感,同时 TSS 和 ETS 评分较小,说明指数的综合诊断能力较差。CCAT 指数的 TSS 和 ETS 评分整体小于 0,其对颠簸的诊断能力为负。

2.2 不同颠簸指数的综合对比

选取指数在其阈值范围内的 PODY 和 PODN,根据 PODY 和 1-PODN 的对应关系,绘制 ROC 曲线(图 2),同时计算曲线下面积 AUC。

由图 2 可以看出,不同颠簸指数的诊断能力具有较大的差异。布朗指数的 ROC 曲线偏离 0 诊断能力线最多,整体诊断效果优于其他颠簸指数,其 AUC 达到了 0.665;埃尔罗德指数 1 和水平温度梯度指数也有较好的诊断表现,AUC 均在 0.62 以上;埃尔罗德指数 2 的 AUC 达到了 0.597,整体的诊断效果较一般;MOS 概率预报因子和杜顿指数的 ROC 曲线与 0 诊断能力

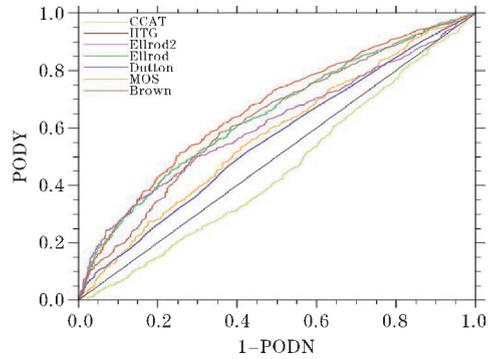


图 2 不同颠簸指数的 PODY 与 1-PODN(黑色直线代表诊断能力为 0)

线较为接近,其所对应的 AUC 也较小,说明指数的整体诊断效果较差;CCAT 指数的 ROC 曲线在 0 诊断能力线以下,其对应的 AUC 仅为 0.455,说明 CCAT 指数的诊断能力为负。

2.3 指数最优阈值的选取

针对图 2 中诊断能力为正(即 AUC 大于 0.5)的 6 种指数,取各指数的 ROC 曲线上距离(0,1)点最近的点,该点所对应的阈值,即为指数的最优阈值。同时计算最优阈值所对应的 PODY、PODN、TSS、ETS 评分和对样本的整体诊断准确率 PODY(ALL),得到结果如表 2 所示。

表 2 不同颠簸指数的最优阈值及其对应的评估指标

指数	阈值	PODY(ALL)	PODY(MOG)	PODN	ETS	TSS	AUC
布朗指数	6.3×10^{-11}	0.626	0.616	0.635	0.143	0.251	0.665
MOS 概率预报因子	1.345×10^{-3}	0.562	0.559	0.563	0.065	0.123	0.572
杜顿指数	13.5	0.547	0.522	0.569	0.048	0.091	0.557
埃尔罗德指数 1	1.6×10^{-7}	0.604	0.609	0.599	0.115	0.208	0.643
埃尔罗德指数 2	2.07×10^{-7}	0.606	0.506	0.693	0.111	0.199	0.597
水平温度梯度指数	9.8×10^{-6}	0.616	0.584	0.643	0.128	0.227	0.629

由表 2 可以看出,在各个指数的最优阈值上,指数对飞机颠簸的诊断能力也有较大的差异。其中,布朗指数对颠簸的综合诊断能力以及对 MOG 颠簸和无颠簸的独立诊断能力均较好;埃尔罗德指数 1 对飞机颠簸的综合诊断能力和独立诊断能力较好且较为平衡;水平温度梯度指数在其最优阈值上对无颠簸的诊断能力优于对 MOG 颠簸的诊断能力;埃尔罗德指数 2 对无颠簸的诊断能力较好,但是对 MOG 颠簸的诊断能力较差,不适合用于诊断 MOG 颠簸;MOS 概率预报因子和杜顿指数的各项诊断能力均较差。

3 中国地区飞机颠簸的分布特征

根据颠簸指数的对比结果,选取诊断效果较好的

布朗指数、埃尔罗德指数 1 和水平温度梯度指数以及对应的最优阈值作为对 MOG 颠簸的综合诊断指标,利用 1981–2015 年共 35 年欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料,计算 MOG 颠簸的发生频率,并统计中国地区 MOG 飞机颠簸的时空分布特征。

3.1 垂直分布及季节变化

图 3 给出了中国地区 35 年 MOG 颠簸发生频率纬度平均的高度-经度分布。由全年(图 3a)分布图可以看出,250 hPa 以下 MOG 颠簸的发生频率较高,发生频率大值中心位于 400 ~ 300 hPa,其中心值在 30% 以上。对比各个季节的 MOG 颠簸发生频率垂直分布(图 3b ~ 3e)可以看出,冬季 MOG 颠簸发生频率明显大于其他季节,高发区垂直分布范围较广,从 225 hPa

一直延伸至500 hPa以下,高频中心平均高度大约在350 hPa左右,中心值达到了40%以上;春、秋两季MOG 颠簸发生频率垂直分布与全年相似,高发中心大约在400~300 hPa;夏季 MOG 颠簸发生频率最小,频

率大值区位于300~250 hPa。从春季到冬季,MOG 颠簸高发区平均高度有先上升后下降的变化趋势,这可能与对流层顶高度随季节的变化有关。

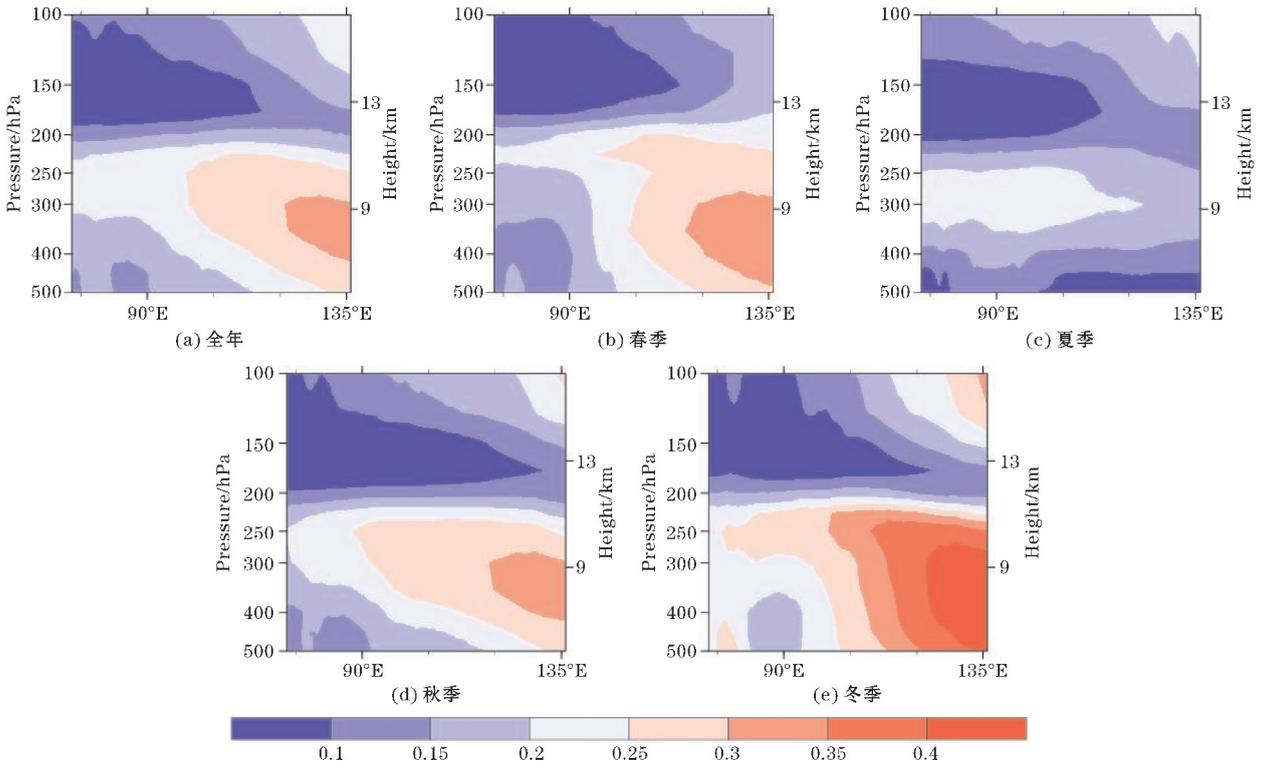


图3 MOG 颠簸发生频率纬度平均的经向垂直分布(30°N ~ 45°N)

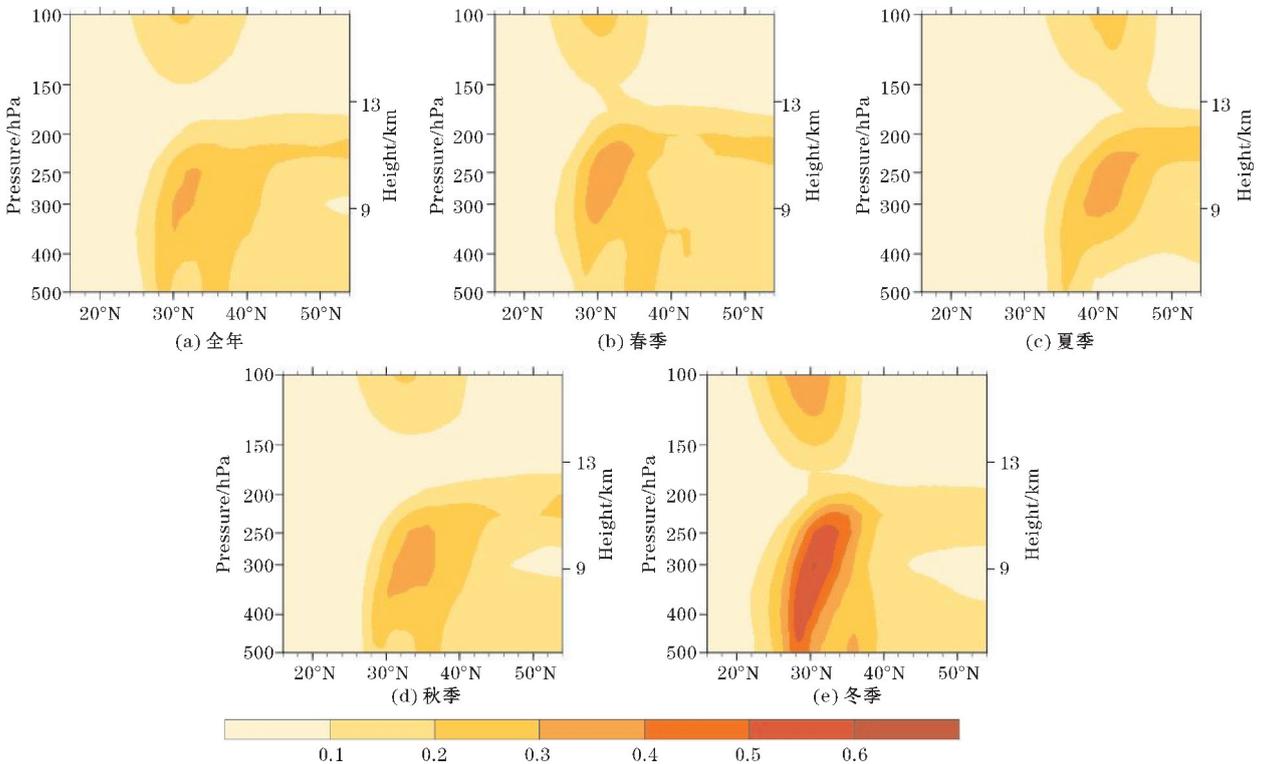


图4 MOG 颠簸发生频率经度平均的纬向垂直分布(75°E ~ 120°E)

图 4 给出了中国地区 35 年 MOG 颠簸发生频率经度平均的高度-纬度分布。由图中可以看出,全年及各季均有明显的 MOG 颠簸发生频率大值中心,MOG 颠簸发生频率的高值区基本位于 300 ~ 250 hPa。从全年(图 4a)分布来看,MOG 颠簸发生高频中心的范围小于各季,其平均高度大约位于 300 hPa 高度上,中心值在 30% 以上;冬季(图 4e) MOG 颠簸发生频率仍是最高且高发区范围分布最广,其大于 40% 的高发区范围从 225 hPa 延伸至 500 hPa,在 300 hPa 高度上出现了发生频率超过 60% 的高频中心;春、夏、秋三季(图 4b ~ 4d) MOG 颠簸发生频率的垂直分布与全年相似,中心值均达到了 30% 以上,其中,春、夏两季 MOG 颠簸发生高频中心平均高度为 250 hPa,秋季的高频中心高

度略有下降,大约在 300 hPa。从夏季到冬季,MOG 颠簸发生频率高值中心的高度略有下降,但较纬度平均图而言,颠簸高频中心的高度变化不明显。

针对(75°E ~ 120°E, 30°N ~ 45°N)区域,计算各层 MOG 颠簸发生频率的区域平均,得到如表 3 的结果;200 hPa 以下各层的 MOG 颠簸发生频率明显大于 200 hPa 以上;以全年平均和各季来看,MOG 颠簸发生频率最大值基本都出现在 250 hPa 或 300 hPa 高度上。

3.2 水平分布及季节变化

基于对 MOG 颠簸垂直分布的分析结果,选取发生频率相对较高的 250 hPa 和 300 hPa 高度的平均值,对中国地区高空 MOG 颠簸的水平分布特征进行分析。

表 3 各层 MOG 颠簸发生频率的区域平均(75°E ~ 120°E, 30°N ~ 45°N)

%

高度/hPa	频率				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季
100	13.8	10.6	16.5	14.7	13.4
150	7.0	6.4	7.8	5.8	8.2
200	15.2	22.1	9.9	12.5	16.2
250	24.8	22.2	20.3	25.9	30.8
300	24.5	21.8	22.0	26.2	28.2
350	22.8	21.5	19.2	24.1	26.6
400	20.1	20.1	14.6	20.5	25.2
500	17.3	18.8	10.2	16.3	24.1

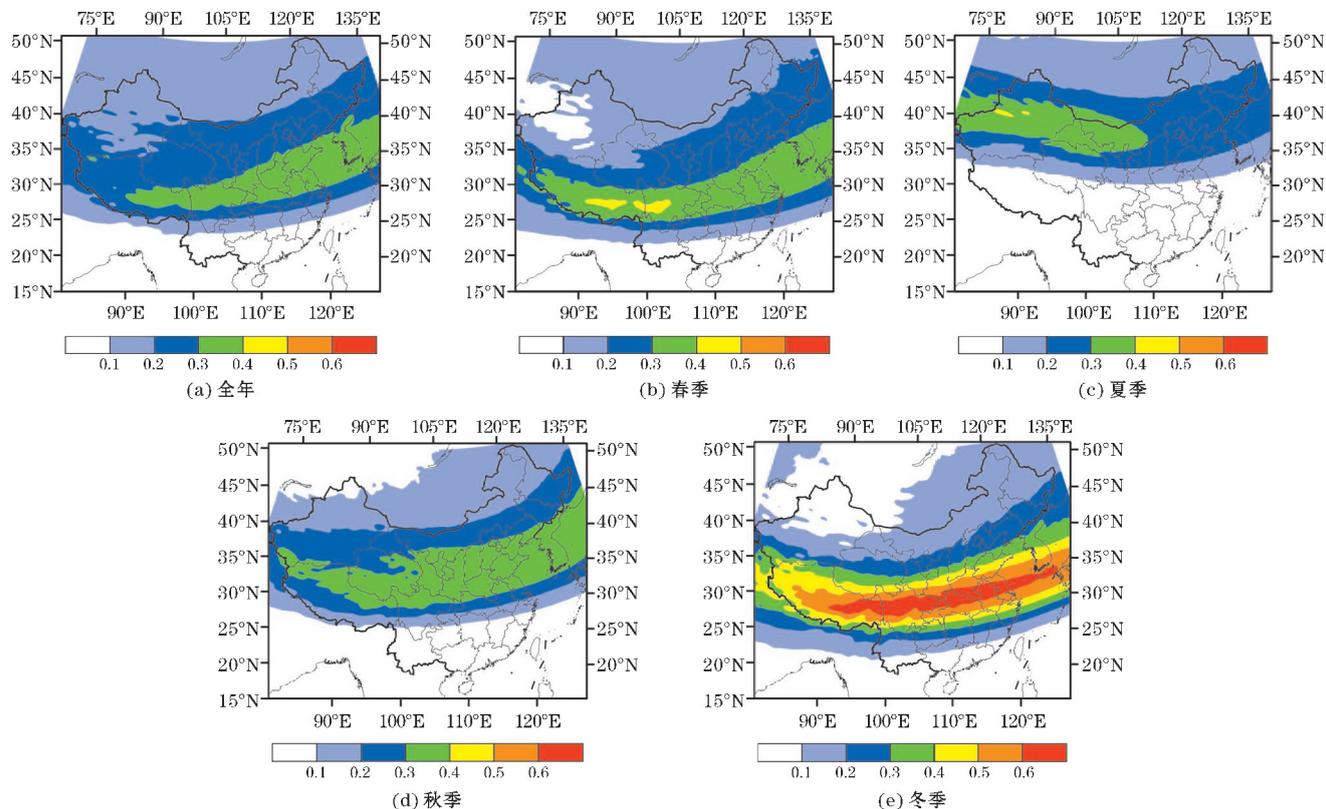


图 5 中国高空 MOG 颠簸发生频率的水平分布

图5为中国地区高空MOG颠簸的水平分布。由全年分布图(图5a)中可以看出,中国大部分地区的MOG颠簸发生频率均在20%以上,在中国中东部地区($110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$)、四川省北部以及西藏东部有一个发生频率超过30%的颠簸高发区; 26°N 以南的华南地区、云南、江西南部、湖南南部以及贵州南部等地颠簸发生频率较小,均在10%以下。对比各季MOG颠簸发生频率水平分布图(图5b~5e)可以看出,中国地区MOG颠簸具有明显的季节变化。首先,MOG颠簸发生频率大于30%的高发区的位置随季节有明显的南北移动,夏季高发区位置最为偏北,平均纬度大约在 42°N ,冬、春两季高发区位置偏南,平均纬度大约位于 32°N 附近。其次,MOG颠簸高发区的范围大小和中心频率大小也有明显的季节差异,冬季MOG颠簸发生频率大于30%的颠簸高发区范围明显大于其他季节,并且在西藏东部、四川北部、贵州北部、湖北北部、河南中部、安徽北部和江苏中部等地区有一个颠簸高频中心,其中心值超过了60%;春、秋两季的颠簸高发区范围略大于全年,春季位置较为偏南,且在西藏和四川小范围地区有一个中心值超过40%的颠簸高频中心;夏季颠簸高发区的范围最小且位置偏西,主要位于新疆中部、内蒙古西部和甘肃西北部。由于高空急流附近产生的颠簸较多,所以飞机颠簸高发区的季节变化与高空急流区的季节变化一致。

3.3 高影响区颠簸的年际变化

根据对中国地区MOG颠簸空间分布的分析结果,选取颠簸发生频率较高的水平区域($90^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$)和高度范围(400~200 hPa)作为颠簸高影响区,分析MOG颠簸的年际变化(图6)。

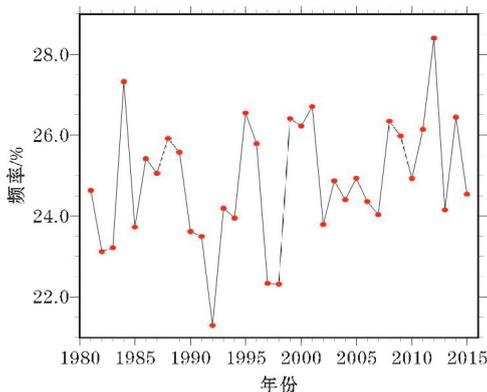


图6 高影响区中MOG颠簸发生频率的年际变化

图6给出了近35年中国颠簸高影响区中MOG颠簸发生频率的年际变化,可以看出,20世纪80年代至90年代初,中国地区飞机颠簸的发生频率呈现出先增大后减小的变化趋势,在1990年之前基本是增加的变

化趋势,在1984年有一个极大值,而在90年代初则呈现出减小的变化趋势,在1992年达到了35年中的最小值。自21世纪初开始,中国地区飞机颠簸发生频率基本表现为增大的变化趋势,并在2012年达到了35年中的最大值,其发生频率接近30%。

4 结论

基于2011-2015年中国地区的航空器空中报告和《全球飞机观测定时值基础数据集》资料和ERA-Interim再分析资料,对比了7种颠簸指数在中国地区的诊断效果。基于指数的评估结果,利用资料计算了1981-2015(共35)年中国地区MOG飞机颠簸的时空分布特征,得出以下结论。

(1)指数评估指标PODY和PODN具有相反的变化趋势且对阈值的变化敏感;TSS和ETS评分具有相同的变化趋势,对布朗指数、埃尔罗德指数1和水平温度梯度指数的阈值变化敏感。

(2)不同颠簸指数的诊断效果具有较大的差异,布朗指数在中国地区的诊断效果最好,其最优阈值为 6.3×10^{-11} ,埃尔罗德指数1和水平温度梯度指数也有较好的诊断效果,埃尔罗德指数2、杜顿指数和MOS概率预报因子的诊断效果较差,CCAT指数的诊断能力为负。

(3)中国地区飞机颠簸主要发生在400~200 hPa高度上,从夏季到冬季,颠簸高发区的高度略有下降,这与对流层顶随季节的变化有关。

(4)中国中东部地区($90^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$)是飞机颠簸的高发区,发生频率达到30%以上,此外,西藏东部和四川北部也有较大的发生频率;华南地区和云南地区颠簸发生频率较小,均在10%以下。高发区的位置有明显的季节变化,冬、春两季偏南,夏季偏西北,这与高空急流区随季节的南北移动相关;同时,颠簸高发区的范围和中心频率大小也有季节变化,冬季范围较大且中心频率较高,夏季范围较小。

(5)中国地区的飞机颠簸具有一定的年际变化特征,20世纪90年代初期之前基本呈现出先增大后减少的趋势,21世纪初开始则表现为增加的趋势。

参考文献:

- [1] Sharman R, Brown B G, Dettling S. Preliminary Results Of The NCAR Integrated Turbulence Forecasting Algorithm(ITFA) To Forecast Cat[C]. Preprints, Ninth Conference on Aviation, Range, and

- Aerospace Meteorology, American Meteorological Society, 2000, 7(3):460-465.
- [2] 李子良,黄仪方.重力惯性波及其不稳定——急流附近飞机颠簸产生的可能机制[J].高原气象,2008(4):859-865.
- [3] Kim J H, Chun H Y. A numerical study of clear-air turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(9):1936-1951.
- [4] 李艺苑,王东海,王斌.中小尺度过山气流的动力问题研究[J].自然科学进展,2009,19(3):310-324.
- [5] 王洪芳,金维明,王炳仁,等.飞机颠簸及预报方法研究[J].气象科技,1997(1):30-35.
- [6] Sharman R D, Doyle J D, Shapiro M A. An investigation of a Commercial Aircraft Encounter with Severe Clear-Air Turbulence over Western Greenland [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(1):42-53.
- [7] Ford R. Gravity Wave Radiation from Vortex Trains in Rotating Shallow Water [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 281:81-118.
- [8] 周林,黄超凡,钟中,等.一次南海高空晴空颠簸事件的形成机制研究[J].热带气象学报,2016, 32(4):570-576.
- [9] 俞飞,王科,梁爱民.华北地区晴空颠簸的分类特征及分析[J].气象,2008(8):15-21.
- [10] 申燕玲,王东海,巩远发.中国冬季飞机颠簸的统计分析[J].成都信息工程大学学报,2017, 32(4):426-432.
- [11] 阿利曼,王君,冯锦明,等.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,2016,40(5):1073-1088.
- [12] 吴炎成,周林,刘科峰,等.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,2014,34(1):17-24.
- [13] 黄仪方,孙智博,肖焕权.我国高原重要航线飞机颠簸分布规律分析[J].中国民航飞行学院学报,2011,22(1):5-9.
- [14] 田开文,王东海,李国平.民航京沪穗数值预报系统在广州的本地化试验[J].成都信息工程大学学报,2013,28(4):379-395.
- [15] 卞双双,何宏让,张云,等.飞机积冰形势场数值模拟试验的参数化方案效果评估[J].干旱气象,2016,34(1):106-112.
- [16] 樊琦,王东海,黄聪敏,等.一次广东省大雾过程的数值模拟分析[J].热带气象学报,2009, 25(5):589-595.
- [17] Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al. An Integrated Approach to Mid-and Upper-Level Turbulence Forecasting [J]. Weather and Forecasting, 2006, 21(3):268-287.
- [18] Kim J H, Chun H Y, Sharman R D, et al. Evaluations 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, 2011, 50(9):1936-1951.
- [19] 沈强,沈文武.一种新的预报晴空湍流综合算法[J].气象与减灾研究,2009,32(2):44-49.
- [20] 黄超凡,周林,宋帅,等.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, 2015, 35(3):317-322.
- [21] Brown R. New indices to locate clear-air turbulence [J]. Meteor. Mag., 1973, 102:347-360.
- [22] Roach W T. On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence [J]. Quart J. R. Met. Soc. 1970, 96:413-429.
- [23] Reap R M. Probability forecasts of clear-air turbulence for the contiguous U. S. National Weather Service Office of Meteorology Tech [M]. Procedures Bull. 1996.
- [24] Dutton M J O. Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output [J]. Meteorological Magazine. 1980, 109:293-310.
- [25] Gary P Ellrod, David I. Knapp. An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use [J]. Weather and Forecasting. 1992(5):150-165.
- [26] Vogel G N, Sampson C R. Clear air turbulence indices derived from U. S. Navy numerical model data: A verification study [J]. NRL/MR/7543-96-7223, Naval Research Laboratory, Monterey, CA, 1996, 30.
- [27] Brown B G, Thompson G, Brintjes R T, et al. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part II: Statistical verification results [J]. Weather and Forecasting, 1997, 12:890-914.
- [28] Brown B G, Mahoney J L, Henderson J, et al. The turbulence algorithm intercomparison exercise:

Statistical verification results [C]. Preprints, 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, FL, 11–15 Sept. , American Meteorological Society(Boston) ,2000:466–471.

[29] Mason I. A model for assessment of weather forecasts [J]. Australian Meteorological Magazine, 1982,30:291–303.

Quantitative Diagnostic and Distribution Characteristics of Aircraft Turbulence in China

XU Jia-nan¹, WANG Dong-hai², GONG Yuan-fa¹, DUAN Yue¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. School of Atmospheric Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on aircraft reports and ERA-Interim reanalysis data, a comparative analysis of the diagnostic effect of 7 turbulence indexes is conducted by using multiple evaluation indicators in order to explore the effective quantitative diagnosis methods of turbulence in China. According to the comparative results, three indexes with better performances are selected to make a statistical analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of moderate and greater (MOG) aircraft turbulence in China during 1981–2015 by using the ERA-Interim data. The results indicate that: (1) The assessment indicators have different sensitivity to the changes of thresholds of different indexes; (2) The diagnostic effects of different turbulence indexes have obvious differences, and Brown Index has the best diagnostic effect in China; (3) Turbulence in China mainly occurs between 400–200 hPa; (4) Mid-eastern China is a high incidence area of turbulence, the position, range and frequency of high incidence area have obviously seasonal changes; (5) The aircraft turbulence in China has interannual characteristics.

Keywords: meteorology; aviation meteorology; aircraft turbulence; turbulence index; comparative analysis; distribution characteristics