

华北地区晴空颠簸的分类特征及分析

俞 飞^{1,2} 王 科³ 梁爱民³ 申红喜³

(1. 北京大学物理学院大气科学系,北京 100871;
2. 中国民航飞行学院洛阳分院气象台; 3. 民航北京气象中心)

提 要: 以 2005—2008 年发生在北京飞行管制区范围内的 18 例晴空颠簸为样本,在普查颠簸发生时天气形势的基础上,对造成华北地区晴空颠簸的天气形势进行分类,分为高空急流型、高空槽线型、切变线型和高空脊型。并结合卫星云图,归纳总结了每类晴空颠簸的特点和预报着眼点。通过对 2006 年 1 月 2 日发生在华北地区的一次飞机颠簸过程进行诊断分析,结果表明:在高空急流区边缘风切变较大及与高空急流相联系的等温线密集区边缘温度梯度较大的区域易产生颠簸。飞机颠簸的发生,是温度平流通过在高空急流附近的等温线密集区边缘所激发出的垂直运动引起。

关键词: 晴空颠簸 大气环流 分类

Synoptic Classification and Analysis of Clear Air Turbulence in Beijing Flight Region

Yu Fei^{1,2} Wang Ke³ Liang Aimin³ Shen Hongxi³

(1. Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;
2. Luoyang Branch Meteorological Observatory of CAFUC; 3. Beijing Weather Center of CAAC)

Abstract: Based on the investigation of 18 Clear Air Turbulences (CAT) reported by the aircrafts in the area of Beijing Air Traffic Control Center during 2005 to 2008, 4 sorts of CAT were classified according the atmosphere circulation. They were JET, trough, ridge and shear line. Combining the satellite images analysis, the features of each sort of CAT and the method of CAT forecast were concluded. At last, a case of CAT was studied and the results showed that the edge of the upper jet stream, the wind shear and large temperature gradient were easier to produce CAT.

Key Words: clear air turbulence atmosphere circulation classification

引 言

晴空颠簸(Clear Air Turbulence)一般是指发生在大气 6000m 高度以上和强对流活动无关的颠簸。它不包括与对流性不稳定边界及深厚对流有关的颠簸,但不排除非对流云(多指卷云)中存在的颠簸^[1]。

晴空颠簸的发生没有明显的天气现象与之相伴,出现颠簸区与无颠簸区没有明显的边界,故难以察觉,因而对飞行威胁很大,飞机一旦进入湍流区,往往突然产生中度到强烈颠簸。David Membery^[2]曾对 1979 年以来造成人员伤亡的飞行事故进行了统计,统计表明:晴空颠簸是影响飞行安全的主要航路危险天气之一,约占 10%。我国航空界最近发生的晴空颠簸案例为,中国南方航空公司 CZ322 航班(机型 A330)于 2007 年 7 月 6 日 07 时 30 分(世界时),在印尼上空巡航高度上突遇晴空湍流,飞机高度陡然下降十几米,维持时间 10 多秒,共造成了四名旅客轻伤,两名乘务员伤势严重,20 余人不适,但机载气象雷达之前没有探测到任何颠簸迹象。根据民航总局的统一部署,我国已从 2007 年 12 月 22 日零时起高度层缩小垂直间隔(Reduce Vertical Separation Minimum,简称 RVSM),即 8400m 以上的飞行高度间隔将从现在的 600m,缩小到目前的 300m。这样,对影响航空器高度保持性能的中度以上颠簸的预报提出了更高的要求。因此,对晴空颠簸的预报将是航空气象预报越来越重要的内容之一。

关于晴空湍流的形成原因,目前公认的是切变不稳定理论。这种理论认为,在层结稳定的大气中,当风速存在垂直切变时,便产生重力波,这种具有风速垂直切变环境的重力波被称为 Kelvin-Helmholtz 波(K-H 波)。当风速足够大且切变的振幅随时间增大到某

一临界值时,K-H 波发生切变不稳定,致使波的振幅随时间增长,当振幅增加到一定程度,完整的波形受到破坏,波形破碎,导致平均运动动能向湍能转化,从破碎的波形中不断分裂出各种尺度的湍涡,气流由层流状态转化为湍流状态,这就形成了所谓的晴空湍流。将流体运动不稳定判据的理论推广到大气中,得到大气中 Ri 数小于 0.25 是重力内波不稳定的必要条件^[3],但根据钟中等^[4]的研究发现,临界 Ri 数应随波长、层界稳定性和基本气流切变强度的不同而有所变化,在波长小于 100km 时,临界 Ri 数都小于 0.25,用通常重力内波不稳定的必要条件作为晴空颠簸的预报指标在业务上易出现空报。

李子良等^[5]研究了产生飞机颠簸的天气形势和环境条件,指出高空槽、切变线和高空急流处易产生颠簸。另外,根据飞行实践,卫星云图上有很多特殊的卷云云型都与飞机颠簸相联系,对它们的识别对保障飞行安全有重要意义。黄仪方^[6]在借鉴国外文献的基础上,讨论了五种与晴空乱流有关的卫星云图上卷云的特殊云型。

根据以上介绍,不难发现,目前晴空颠簸尚未有客观、比较准确的预报方法。本文根据 2005—2008 年发生在北京管制区范围内的 18 例晴空颠簸为样本,在普查颠簸发生时天气形势的基础上,对造成华北地区晴空颠簸的天气形势进行分类,并结合卫星云图,归纳总结了每类晴空颠簸的特点和预报着眼点。最后对 2006 年 1 月 2 日,发生在河北南城子至魏县一带的晴空颠簸个例进行初步诊断分析,以研究产生此次颠簸的气象条件。

1 资料与方法

颠簸个例来源为 2005—2008 年北京飞行管制区域内发生的,高度在 6600m 以上的晴空中度及以上颠簸飞行机组报告(已根据

卫星云图,排除因对流云引起的颠簸)。

晴空颠簸分类时,所用的资料为 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 每 6 小时一次的再分析资料。该资料每日 4 个时次,分别为 00Z(世界时,下同)、06Z、12Z 和 18Z。资料时间取晴空颠簸发生时最接近的时间。

进行个例分析时,所使用的资料为常规高空探测资料。其中客观分析方法采用 Cressman 逐步订正法,分析范围以 40°N 、 116°E 为中心,x、y 方向格点数取 71×71 ,格距取 45km。

卫星云图资料为 FY-2C 静止气象卫星云图,每小时接收一次,图像种类为红外卫星云图。

2 晴空颠簸发生的几种天气形势

本文通过对北京附近的 2005—2008 年间出现的 18 个晴空颠簸个例(见表 1)进行研究,选择和晴空颠簸出现的时间及高度层最接近的资料进行分析。根据天气形势的不同特征将晴空颠簸分为以下几类:高空急流型、高空槽线型、切变线型和高空脊型。其中高空急流型又结合卫星云图特征,分为急流 A 型和 B 型,两者的主要区别在于后者卫星云图伴随明显的横向波动云系特征,而 A 型则无此特征。

表 1 2005—2008 年北京飞行管制区域内发生的晴空颠簸个例

序号	日期	时间 (世界时)	颠簸区域	高度/m	强度	类型
1	20050406	00:10	丰宁	9000	严重	高空槽
2	20050409	00:30	石各庄	9000	中度到严重	高空槽
3	20050412	04:20	正定	8900~10800	中度	高空槽
4	20050515	01:00	正定	10800	中度	高压脊
5	20050603	04:43	正定	10800	中度	高压脊
6	20050710	05:00	石各庄	9000	中度	切变线
7	20060102	00:45	南城子	8400~9600	中度	急流 A 型
8	20060102	11:30	魏县	10000	中度以上	急流 A 型
9	20060122	00:30	本场上空	8400~9600	严重	急流 A 型
10	20060222	00:40	魏县	9000	中度到严重	高空槽
11	20060226	09:30	魏县以北	8100~9000	严重	急流 B 型
12	20060312	12:16	青白口	9600	中度	切变线
13	20070106	00:50	管区内	9600	中度	急流 A 型
14	20070607	01:20	京津地区	11400	严重	切变线
15	20070724	05:40	石家庄以南	8400	严重	高空槽
16	20070725	00:10	青白口—南城子—石家庄	8400	严重	高空槽
17	20071002	11:58	怀来	8100~9000	中度到严重	急流 A 型
18	20080210	08:00	魏县以南	9800	严重	急流 B 型

2.1 急流型

高空急流是位于对流层上层或平流层中的一股强而窄的气流。航空气象中将风速大于 $40 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的气流定义为急流。

2.1.1 急流 A 型

急流中除了风速很大以外,而且还有很

强的风切变,风水平切变量级为每 100km $5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直切变量级为每千米 $5 \sim 10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1a)。飞机穿越或靠近急流时常遇到晴空颠簸,且多发生于靠近极地的一侧。有研究表明,机组报告的晴空颠簸有 60% 发生在急流附近。

急流区有时有卷云、卷层云或卷积云,这

些云多出现在急流轴的高压一侧(图 1b)。在北半球,卫星云图上急流云系的北部边界一般呈反气旋性弯曲或准直线状,边界整齐光滑,位置与急流轴大体吻合。飞机在离急流轴不远的地区飞行往往会碰到中度到强烈的颠簸,特别是在急流经过槽线或高压脊而转弯的地方,湍流更强。

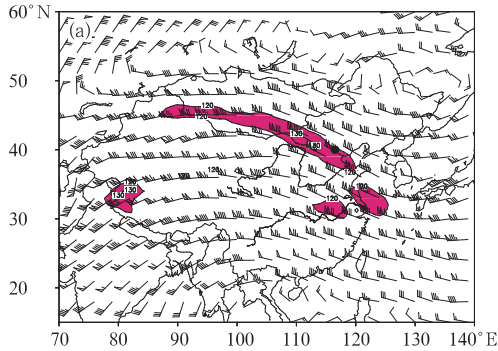


图 1a 2006 年 1 月 2 日 00Z 300hPa 风速图
填色区内风速大于 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

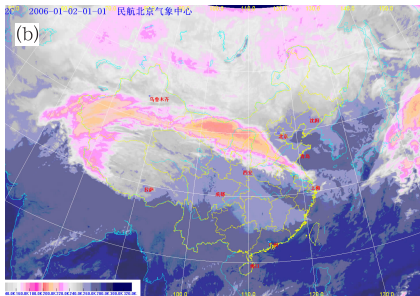


图 1b 2006 年 1 月 2 日 01Z 红外卫星云图

2.1.2 急流 B 型

当高空急流中的风速很大时,在北半球卫星云图上高空急流云系左界附近,时常可见到一条条与急流轴相垂直的波状云线,使得急流轴的左界呈现锯齿形,这种云系称横向波动云系。

横向波动云线是风的水平切变的结果。由于风速的水平切变,使得卷云在云区内离开急流轴,最远的一些云线末端朝上风方向旋转,当有横向波动出现时,急流中风速的水平切变较大,因此横向波动云系中的飞机颠簸都很强。

图 2a 中显示了位于我国内蒙古经渤海到朝鲜半岛的高空急流,对应卫星云图(图 2b)上其左界有明显的横向波动云系,在急流轴附近飞行有强颠簸。

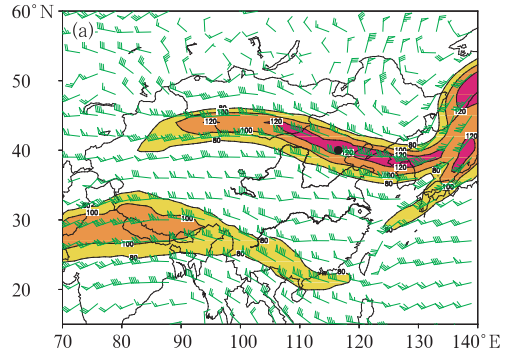


图 2a 2006 年 2 月 26 日 06Z 300hPa 风速图
填色区为等风速线,单位:海里/小时

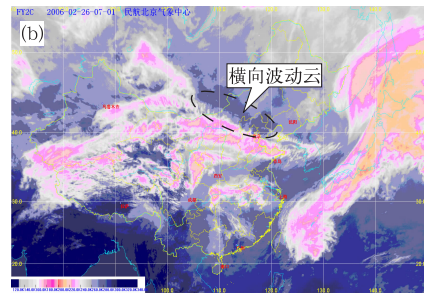


图 2b 2006 年 2 月 26 日 01Z 红外卫星云图

2.2 高空槽型

高空槽是大型的不稳定区,槽区风速一般没有急流的风速大,但是高空槽前后风向切变大,风速辐合较强,并伴随着冷暖平流,一般高空槽前附近低层有锋生现象。明显的风切变和温度切变就在槽前附近,因此飞机飞近高空槽区时,易产生较强颠簸。

冬半年常可在垂直剖面图上看到槽前锋区处是对流层顶坡度较大,甚至断裂的地方,飞机在下方附近飞行可出现强烈颠簸。因此,在高空槽前可产生中度以上颠簸,如果紧贴槽前附近飞行,可引起长时间的颠簸。2005 年 4 月 6 日即为该类型(图 3)。从图 3 可以清楚看出,北京以西有一明显的高空槽。

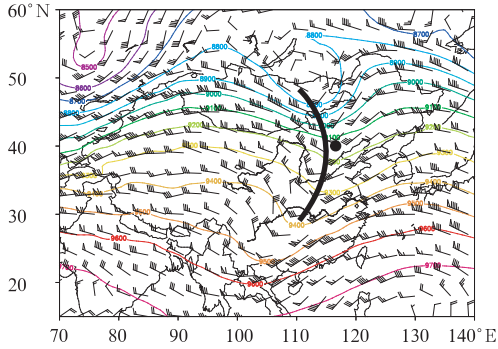


图 3 2005 年 4 月 6 日 00Z 300hPa 风速和等高线图

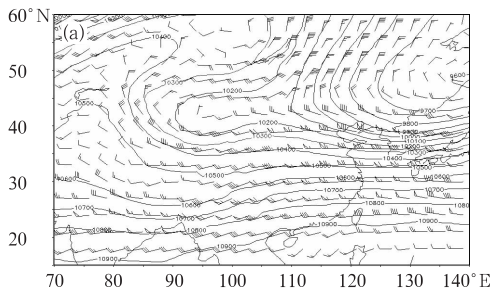


图 4a 2006 年 3 月 12 日 00Z 300hPa 风速图和等高线图

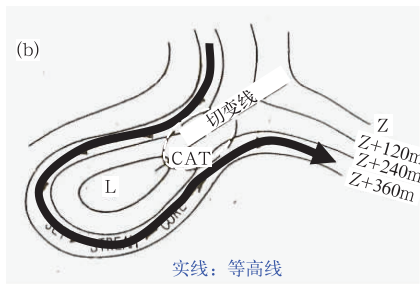


图 4b 切断低涡“喉”型颠簸区域示意图
引自 WMO 技术手册 NO155(1977)
CAT:晴空颠簸区

2.3 切变线(又称为切断低涡“喉”型)型

飞机穿越高空低涡中产生颠簸。高空风虽小,但风向打转,飞机上下抛动很厉害。在高空低压形成初期,往往在气流辐散及辐合处出现很少超过中等强度的颠簸。随着切断低压的发展,在闭合低压与主要西风之间,两

股反向的反气旋性环流形成的切变线附近往往产生飞行颠簸。在低纬地区,即使此种切变线两侧的风速相当小,也会出现中度以上的颠簸。2006 年 3 月 11 日发生管区西部青白口附近的颠簸即为该类型(图 4)。

2.4 高空脊型

高空脊区风速一般较小,通常达不到急流标准。但其风向切变大,而且地面多配合有发展的涡旋,飞机穿越高压脊或者横穿等高线的区域和等温线密集带,可产生飞机颠簸。2005 年 5 月 15 日即为该类型(图 5)。

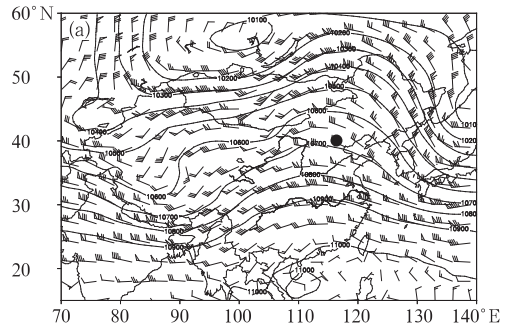


图 5a 2005 年 5 月 15 日 00Z 300hPa 风速图

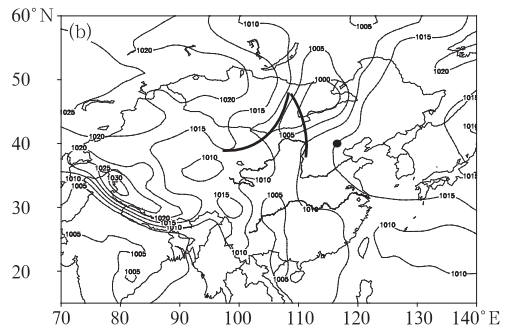


图 5b 2005 年 5 月 15 日 00Z 地面形势图

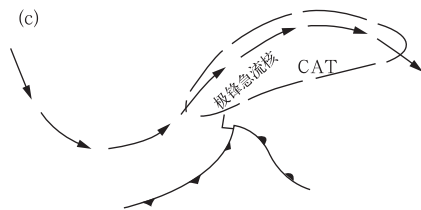


图 5c 高压脊型颠簸区域示意图
引自 WMO 技术手册 NO155(1977)
CAT:晴空颠簸区

3 个例分析

2006 年 1 月 2 日 00:45Z 飞机报告:位于北京管制区西南方向的南城子(高度 9600m)和魏县一带(高度 8400m),有中度以上强度的晴空颠簸。下面对造成飞机颠簸的影响因子进行初步诊断分析,以研究探讨产生此次颠簸的气象条件,为颠簸的预报提供一定的参考。

3.1 高空急流的影响

分析 2006 年 1 月 2 日 00Z 时 300hPa 流场及全风速场可知(图 6),有一主高空急流自我国新疆北部经蒙古、华北地区至东部沿海,急流轴呈西北—东南向,平均风速达 $60\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,并有 3 个急流中心分别位于新疆北部、华北及江苏,其中强急流中心位于河北附近(39°N 、 113°E),中心风速达 $70\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,另一支次高空急流(平均风速达 $50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)呈东西向由陕西经长江中游地区,并与主高空急流相交于东部沿海。另外,从垂直方向来看,在该强风速中心处也存在较大的风速

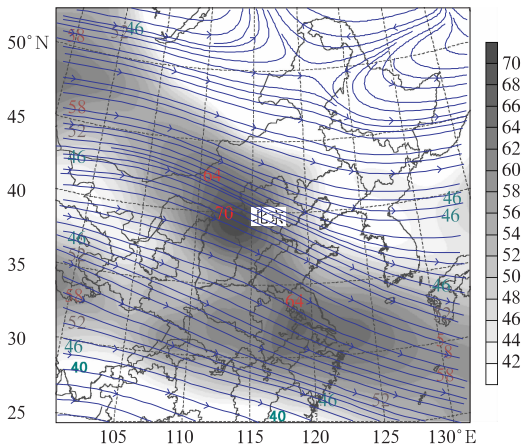


图 6 2006 年 1 月 2 日 00Z 300hPa 高空流场及全风速场
填充区为急流区,仅填充 $\geq 40\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速区,等值线间隔为 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实线为流线

垂直切变(图略)。从以上分析可知,此次颠簸发生在两支高空急流的交汇区,靠近主急流区边缘附近,且出现在急流强中心的南侧。由此可见,高空急流中心至急流边缘较大的风速水平切变及垂直风速切变所激发的空气垂直运动,可能是产生颠簸的原因之一。

3.2 温度场的影响

从 00Z 时 300 hPa 温度平流及温度场的分布来看(图 7),在高空主急流区的南侧,存在着一高空锋区贯穿我国中部地区,并对应着较大的温度水平梯度,其等温线走向与次急流走向基本一致,等温线的分布中间密集、均匀,并逐渐向两侧稀疏。在主急流轴的高度上,温度水平梯度很小,且在主、次急流区中交替存在着冷暖温度平流区,魏县及南城子位于冷暖平流交汇区靠近暖平流区一侧。由此可知,此次颠簸发生在高空锋区边缘温度水平梯度较大以及冷暖温度平流的交汇区附近。这可能是因为等温线密集区边缘由温度平流激发出的交替出现的升降气流,会引起垂直的气流切变且产生绕水平轴旋转的湍流涡旋。

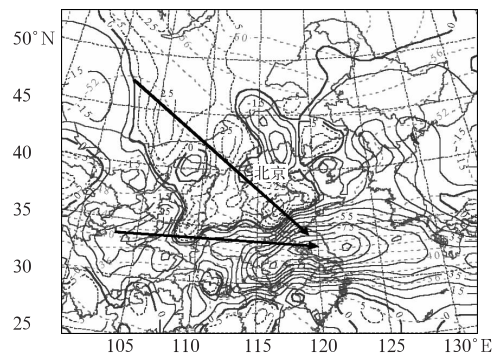


图 7 2006 年 1 月 2 日 00Z 时 300 hPa 温度场和温度平流分布
细实线为负温度平流,点虚线为正温度平流区,零线加粗,间隔: $10^{-5} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,长断线为等温线,间隔为 4C ,带箭头的粗实线为急流轴

3.3 垂直运动条件

由飞机空气动力学原理知道^[7],飞机以一定速度进入垂直气流和湍流区飞行是引起飞机颠簸的原因之一。垂直气流和乱流往往是联系在一起的,因而可认为,高空急流区飞机颠簸与急流区激发出的空气垂直运动有关^[8]。

图8给出了1月2日00Z时沿36.37°N所做的垂直速度剖面图。由图中可知,在114°E以西为范围较小的弱下沉气流区,以东为范围较大、强度相对较强的上升气流区。此次颠簸发生在上升气流和下沉气流的交汇区,也即易出现湍流的区域。

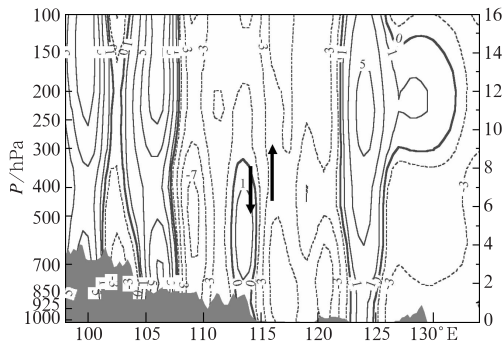


图8 2006年1月2日00Z时(沿37°N)垂直P速度剖面图

实线 ≥ 0 的区域,正值表示下降,负值用虚线表示上升,单位: $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,间隔为 $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 结论与讨论

(1) 晴空颠簸可按天气形势分为高空急流型、高空槽线型、切变线型和高空脊型等类型。利用天气形势和卫星云图,对于晴空颠

簸预报有较好的指示作用。

(2) 通过对2006年1月2日晴空颠簸个例分析表明,此次过程属于高空急流型,颠簸发生在高空锋区边缘温度水平梯度较大以及冷暖温度平流的交汇区附近。这可能是因为在等温线密集区边缘由温度平流激发出的交替出现的升降气流,会引起垂直的气流切变且产生绕水平轴旋转的湍流涡旋。

当然由于收集的样本数量有限,仅从18例晴空颠簸样本得到的结论有可能不甚全面,待积累更多的颠簸样本后本工作可继续完善。目前基于经验公式得到的航空颠簸指导产品的准确性还不是很很高,空报率也较高,不能完全满足航空业务发展需要,需要尽快建立新一代的高分辨率航空数值预报模式,并进一步完善晴空颠簸的客观算法。

参考文献

- [1] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:198-202.
- [2] David Membery. Meteorological conditions that lead to fatal accidents[M]. 2004:33-35.
- [3] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:63-69.
- [4] 钟中,张金善. 理查孙数与晴空颠簸的关系[J]. 气象科学,1996,16(1):56-62.
- [5] 李子良,陈会芝. 飞机颠簸的气象条件分析[J]. 四川气象,1999,19(2):22-23.
- [6] 黄仪方. 卫星云图上的卷云云型与晴空颠簸[J]. 四川气象,2002,22(1):42-45.
- [7] 赵树海. 航空气象学[M]. 北京:气象出版社,1994:138-158.
- [8] 朱志愚. 高空急流区飞机颠簸的一种形成机制的探讨[J]. 成都气象学院学报,1997,12(4):298-303.