

# “2007. 7. 6”飞机颠簸事件数值模拟与成因分析

刘 峰<sup>1</sup> 赵 琳<sup>2</sup> 田 军<sup>3</sup> 李银芳<sup>4</sup>

(1. 民航中南空管局气象中心, 广州 510406; 2. 南方航空股份有限公司运行指挥中心;  
3. 民航河南空管分局气象台; 4. 民航湖南空管分局气象台)

**提 要:** 利用 WRF 模式模拟了 2007 年 7 月 6 日发生在菲律宾南部海域上空的一次民航飞机颠簸事件。结果表明, 综合分析 WRF 模式计算得到的  $Ri$  和  $EI$  等预报指数, 能够确定飞机颠簸发生的区域、高度和强度。飞机遭遇颠簸的区域是位于涡旋云系外围的螺旋云带的上空, 飞机在飞越由重力波形成的螺旋云带时, 在强烈的垂直上升和下沉气流的转换区域产生了急速的上抛和下降运动。

**关键词:** 飞机颠簸 螺旋云带 重力波 数值模拟

## Simulation and Analysis of the 6 July 2007 Airplane Turbulence Accident

Liu Feng<sup>1</sup> Zhao Lin<sup>2</sup> Tian Jun<sup>3</sup> Li Yinfang<sup>4</sup>

(1. Meteorological Center of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guangzhou 510406;  
2. China Southern Airlines Company Limited, System Operations Control;  
3. Henan Sub-bureau of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC;  
4. Hunan Sub-bureau of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC)

**Abstract:** Based on WRF model outputs, one airplane turbulence accident happening on July 6, 2007 was analyzed. The results show that the accident took place in the gravity wave around a cyclone. The alternation of the ascending and descending flows between spiral clouds led to the airplane turbulence. Indices  $Ri$  and  $EI$  have a good instruction to the occurrence of airplane turbulence.

**Key Words:** airplane turbulence spiral cloud gravity wave numerical simulation

### 引 言

飞机在航路上遭遇的晴空颠簸是指发生在 6000m 高度以上与强对流活动无关的颠簸。晴空颠簸是影响航路飞行安全的主要危

险天气之一。晴空颠簸的发生没有明显的天气现象与之相伴, 且颠簸发生区与无颠簸区没有明显的边界, 故难以察觉, 对飞行威胁很大。2007 年 7 月 6 日 15:30, 由悉尼飞往广州的 CZ322 航班, 在菲律宾南部海域上空巡航高度上突遇晴空湍流, 飞机急速上抛后又

急速下降十几米,维持时间二十多秒。机上有人员飞离座位,头部撞上机舱顶,二十多名乘客及机组成员头部或颈部受伤。

目前预报晴空颠簸的方法,一是从大气扰动层生成的一般原理出发<sup>[1]</sup>,研究产生飞机颠簸的天气形势和环境条件,如高空槽、切变线、高空急流和高空脊处容易产生颠簸。另外根据飞行实践知道卫星云图上有许多特殊的卷云云型与飞机颠簸相联系。二是根据理论和经验<sup>[2]</sup>,用探测资料和数值预报产品计算理查森数和 Ellrod 颠簸指数等进行诊断分析和预报。

关于晴空湍流的形成原因,目前公认的是切变不稳定理论<sup>[3]</sup>。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,导致平均动能向湍能转化,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,就形成了晴空湍流。理查森数( $Ri$ )是一个将大气静力稳定度与风速垂直切变相结合的参数,理论上用  $Ri$  值来判断大气湍流是否发展。当风垂直切变增大或者大气稳定度减小时,有利于湍流的发展。 $Ri$  的计算公式为  $Ri = (g/\theta)(\partial\theta/\partial z)/|\partial v/\partial z|^2$ ,其中  $(g/\theta)(\partial\theta/\partial z)$  是该层大气静力稳定度,  $|\partial v/\partial z|^2$  是跨越该层大气的垂直风切变的平方。 $Ri$  值小则表明某区域风切变大,与之对应的静力稳定度相对较弱,可能有颠簸发生。根据计算公式知道,形成颠簸的  $Ri$  数值要求小于 1。但根据钟中等<sup>[4]</sup>的研究发现,临界  $Ri$  数应随波长、层界稳定度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。但在实际业务中,如果在数

值模式的水平和垂直分辨率相对较粗时,如现有的全球尺度模式诊断出与颠簸形成区域相对应的  $Ri$  值是 5 或略小些<sup>[5]</sup>。

飞行颠簸和大气湍流多发生在 6 个特性区域。一是风的垂直切变区,二是风的水平切变区,三是流场的辐合或辐散区,四是流场的水平变形区,五是流场变化的不连续区,六是强的水平温度梯度区。Ellrod 颠簸指数( $EI$ )即是描述颠簸与垂直风切变和水平形变之间的相关程度。计算公式为  $EI = VWS \times (DEF + DIV)$ ,其中  $VWS$  (vertical wind shear)是穿越某层大气时风矢量的变化, $DEF$ (deformation)是该层大气风场的总形变, $DIV$ (divergence)是该层的散度。 $EI$  值越大对应越强的飞行颠簸区,干全等<sup>[6]</sup>给出了指数与颠簸强度等级的经验对应关系。

根据中国民用航空总局的统一部署,从 2007 年 12 月 22 日零时起飞行高度层缩小垂直间隔,即 8400m 以上飞行的高度间隔由 600m 缩小到 300m,这对预报影响航空器保持飞行高度的飞机颠簸提出了更高的要求。建立高分辨率航空数值预报模式以及进一步完善晴空颠簸的客观算法是解决问题的有效途径。本文分析使用 WRF 模式的模拟结果,讨论中尺度模式对此次飞机颠簸事件的预报能力和飞机颠簸产生的原因。

## 1 资料和模拟方法

李耀东等<sup>[7]</sup>使用水平格距 80km、垂直 10 层的中尺度模式 MM4 模拟飞行颠簸,得到一些颠簸指数与颠簸强度等级的经验关系。本文采用 WRF v2. 2. 1 模式,水平分辨率为 20km,垂直 27 层,提高了水平和垂直分辨率。物理过程选用了 Betts-Miller 积云参数化方案、Lin 微物理过程方案、Rrtm 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Noah 陆面过程方案、Monin-Obukhov 近地面层方案和

YSU 边界层方案。此次事件发生在热带地区,根据经验<sup>[8]</sup>使用 Betts-Miller 积云参数化方案能够较好模拟对流天气,以求较好地反映颠簸区及其周边的对流情况。

初始场采用 NCEP 提供的  $1^\circ \times 1^\circ$  FNL 全球分析场资料。模式积分初始时间为 2007 年 7 月 5 日 08:00,积分 48 小时,每 6 小时更新一次侧边界条件。

## 2 热力和动力条件分析

### 2.1 飞机颠簸发生区域

CZ322 航班于 7 月 6 日 6:05(悉尼时间 8:05)从悉尼起飞,降落在广州白云机场的时间是 17:52,遭遇颠簸的时间是 15:30,从而判断发生颠簸的区域是图 1 中指示的方框内,即位于菲律宾西南部海域的上空。发生的高度是该航班的巡航高度 10700m。



图 1 CZ322 航班飞行航路示意图  
(粗实线为飞行航路,方框为飞机颠簸发生区域)

### 2.2 动力和热力条件

俞飞等<sup>[9]</sup>分析华北地区发生的晴空颠簸指出,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,飞机颠簸的发生由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。尝试使用最接近飞机颠簸发生时间的 7 月 6 日 14:00  $1^\circ \times 1^\circ$  FNL 全球分析场对此次事件进行类似分析。图 2 显示 250hPa 上颠簸区域的位势高度是 10960gpm,飞机的巡航高度 10700m,因而飞机颠簸高度就在 250hPa 附近。250hPa 上颠簸区域内  $Ri$  值是 3.0~5.0 的低值区,说明此种分辨率的数据需要使用  $Ri$  小于 5.0 来诊断颠簸发生区域。颠簸发生区域风速较小,只有  $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,达不到急流的标准,水平风切变也小,因而不具备与急流有关的颠簸形势。温度场上,等温度线也比较稀疏,并没有出现等温度线梯度较大的情况。颠簸区域也是微弱的负温度平流区。此次发生在热带地区的飞机颠簸事件与华北地区与急流相关颠簸的动力和热力条件不同。

分析 500hPa 形势发现(图 3a),表征副热带高压的 5880gpm 等高线控制中国华南沿海地区。由北部的副热带高压环流、南部的低压环流、西部上侧的气旋和西部下侧反气旋环流构成变形场,颠簸区域即位于变形场的东南方位。250hPa 的环流分布(图 2a)没有 500hPa 明显,但同样可分析出变形场的分布。此次颠簸的发生虽然不具备急流和较大温度梯度的动力和热力条件,但具有变形场的动力条件。

对比由 FNL 资料分析得到的红外云顶亮温与 FY-2C 红外云图实况发现,通过 FNL 数据可以诊断出低压东北方位的云团,但由于数据的分辨率不够,不能得到 FY-2C 红外云图上显示出的在颠簸区域围绕云团旋转的带状螺旋云系。

## 3 模式检验

2.2 节中诊断出此次事件主要是与动力

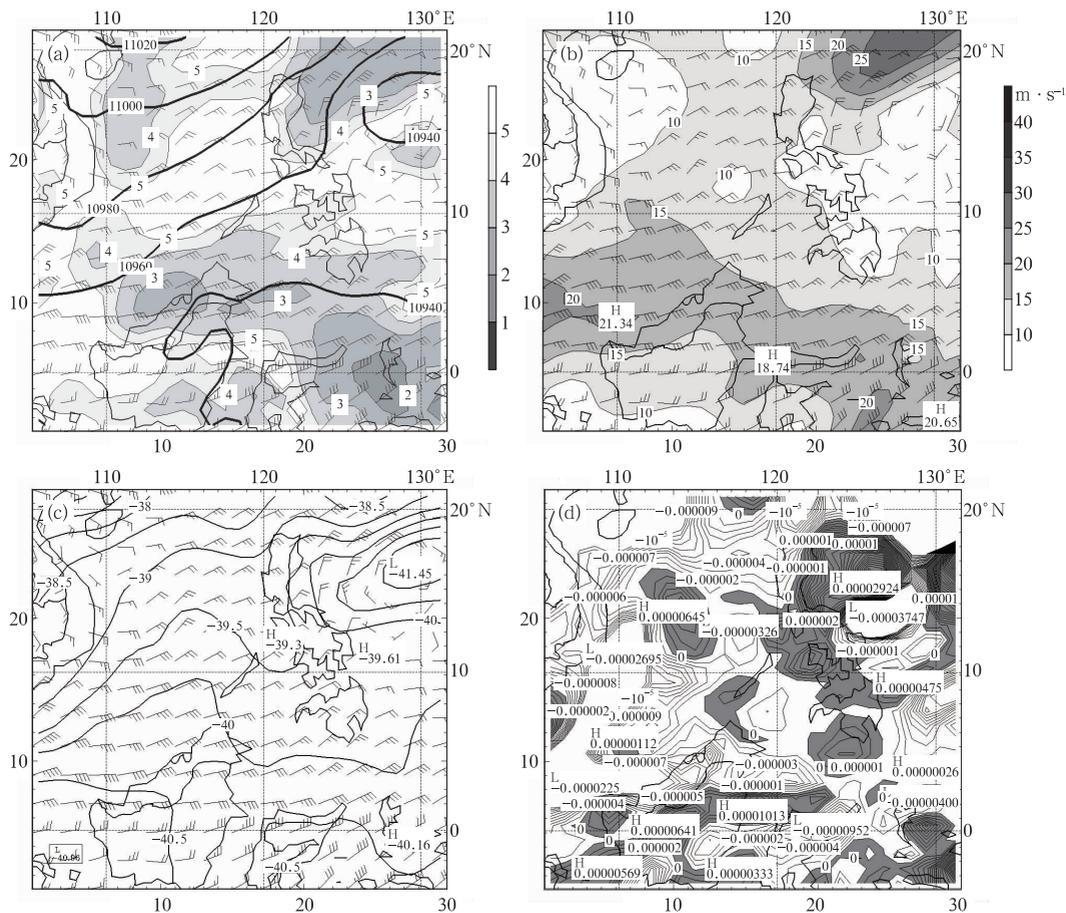


图 2 2007 年 7 月 6 日 14 时 250hPa 形势

(a) 等高线、风场、 $Ri$  值; (b) 风场和等风速线; (c) 风场、等温线; (d) 温度平流(阴影区为正温度平流区)

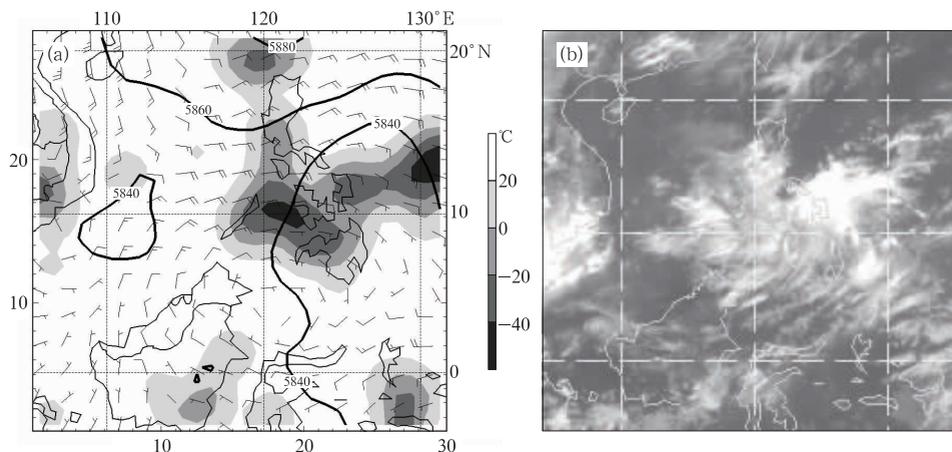


图 3 2007 年 7 月 6 日 14 时 FNL 资料分析和红外云图实况对比

(a) FNL 资料分析 500hPa 等高线、风场和红外云顶亮温; (b) FY-2C 红外云图实况

条件有关,因而重点检验理查森数和 Ellrod 颠簸指数对飞机颠簸的模拟能力。

### 3.1 理查森数

图 4 给出了 WRF 模式对 7 月 6 日 15:00  $Ri$  的模拟情况。颠簸区域的飞机巡航高度的上空 200hPa(12440gpm)上是大范围的  $Ri$  值小于 2.0 的区域,其中还出现了小于 1.0 的低值区,说明此处是易发生颠簸的区

域,并且强度强。代表巡航高度的 250hPa 的情况是,  $Ri$  值比其上层要大些,是小于 2.0 的低值区。而下层的 300hPa(9680gpm),  $Ri$  值进一步增大,说明颠簸强度减小。从沿航路的剖面图上可以确定颠簸所处的厚度。此次颠簸主要发生在 250~150hPa 之间的  $Ri$  值小于 2.0 的范围内,其中小于 1.0 低值区的强颠簸区位于 200hPa 附近。

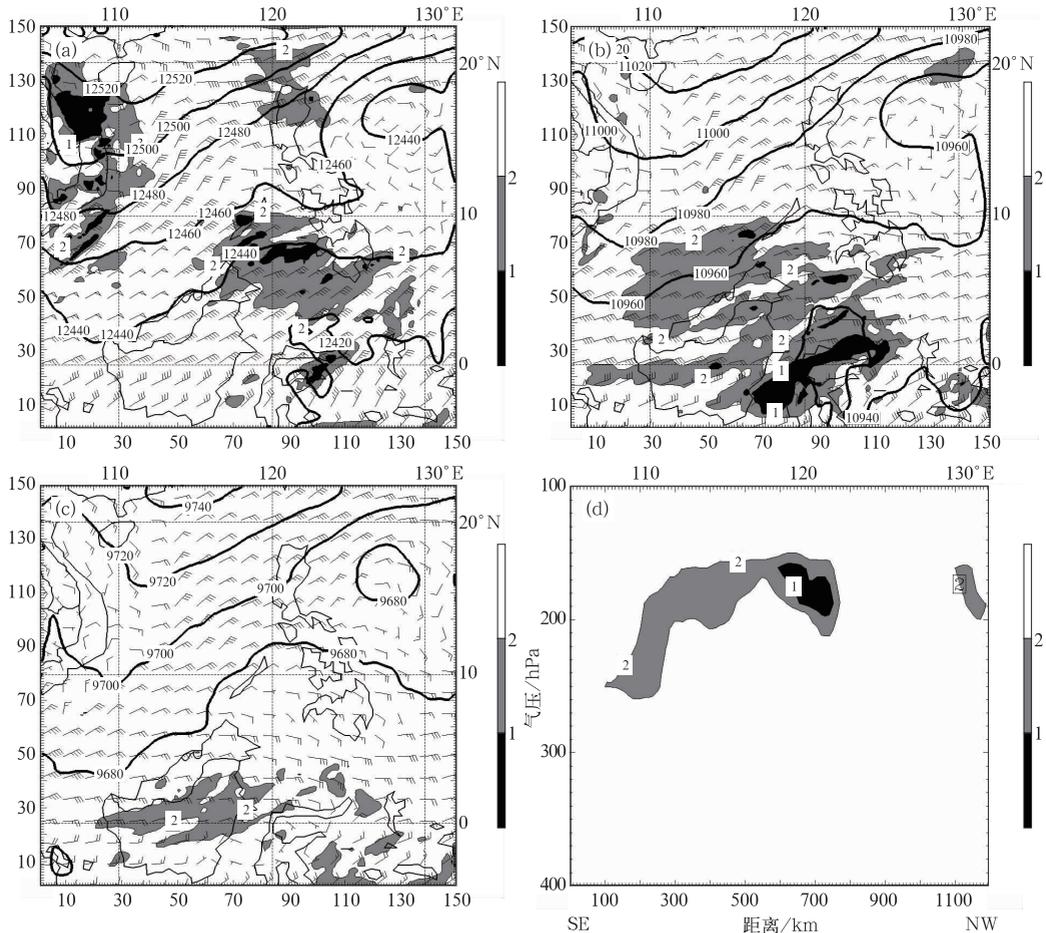


图 4 2007 年 7 月 6 日 15 时 200hPa(a)、250hPa(b)、300hPa(c)等高线、 $Ri$  值和沿航路(3°N、125°E~12°N、119°E) $Ri$  值剖面图(d)

分析表明,  $Ri$  值反映出此次颠簸发生的水平和垂直区域。由于中尺度数值模式水平和垂直分辨率的提高,可以使用  $Ri$  值小于 2.0 和 1.0 的数值做颠簸发生区域和强度的预报。

用  $Ri$  值作颠簸预报的范围常比实际发生的要大,为防止这种情况出现,还需要监测  $Ri$  值将会减小的区域。  $Ri$  值将要减小的区域,是会出现更加不稳定的区域。图 5 中在颠簸

区域,10°N 偏南、120°E 附近的部分区域是出现  $Ri$  值减小的区域。结合图 4 分析,对于飞机遭遇颠簸的区域,图 5 中阴影代表的不稳定区要比图 4 中的  $Ri$  低值区范围小,能够突出  $Ri$  低值区中的出现颠簸的区域。

### 3.2 Ellrod 颠簸指数

图 6 给出了 15:00 各层  $EI$  值和沿航路剖面图。从图中可以看到,3 个层次上的飞机发生颠簸的区域都是  $EI$  的大值区,其中数值达到 8~12。根据经验,此数值代表应有中等强度的颠簸。厚度也主要发生在 250~150hPa 之间。

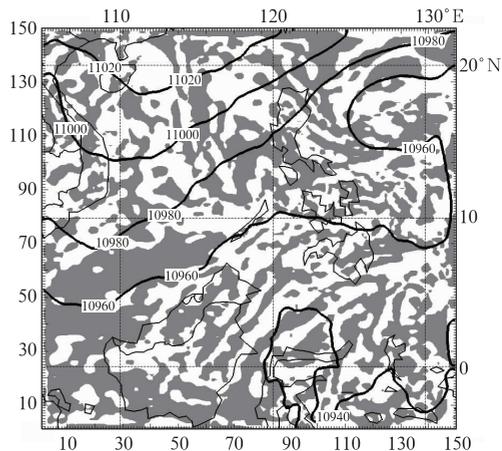


图 5 2007 年 7 月 6 日 15:00 与 14:00 两个时次 250hPa  $Ri$  值的差(阴影区为负值区)

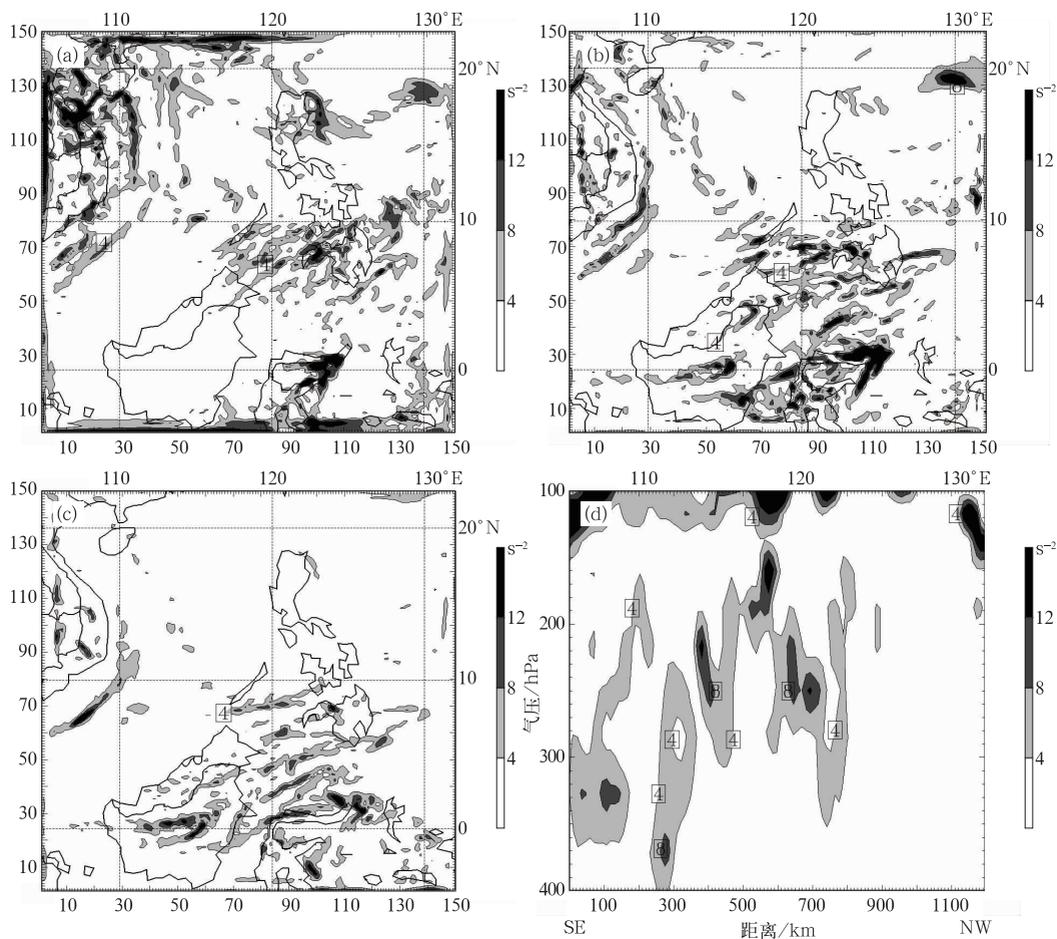


图 6 2007 年 7 月 6 日 15 时 200hPa(a)、250hPa(b)、300hPa(c)  $EI$  值和沿航路(3°N、125°E~12°N、119°E)  $EI$  值剖面图(d)

### 4 飞机颠簸产生的原因

#### 4.1 带状螺旋云系

模式能够模拟出涡旋云系外围的围绕中

心旋转的带状螺旋云系(图 7a)。FY-2C 水汽云图实况同样显示,颠簸区域的水汽呈带状明暗相间分布。灰白色的水汽带代表中高层存在一定的水汽,具有上升运动,而黑暗的带状是与下沉气流相联系的高层无水区。

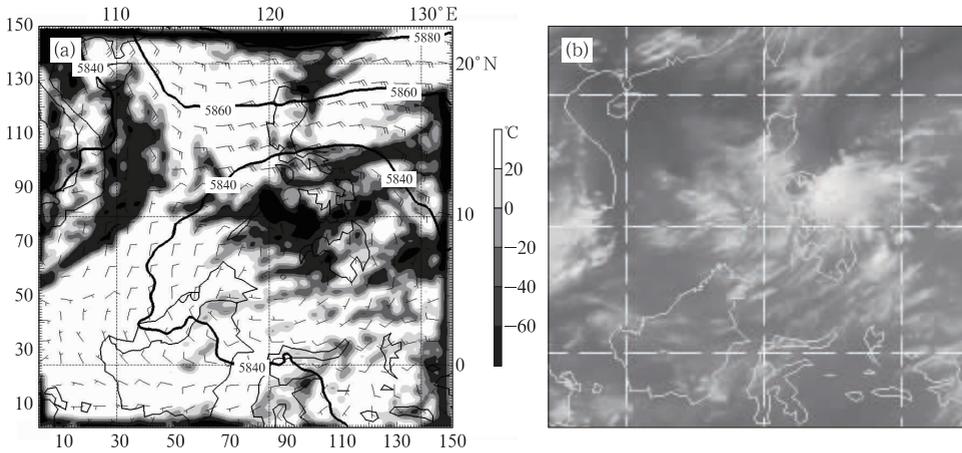


图 7 2007 年 7 月 6 日 15 时模拟的红外云顶亮温与水汽云图实况  
(a) 500hPa 等高线、风场和红外云顶亮温模拟; (b) FY-2C 水汽云图实况

#### 4.2 飞机剧烈上升和下降的原因

此次飞机出现了急速上抛后又猛烈下降的情况。湍流对飞机的作用是通过方向不定、强弱不一的阵风作用的,这种阵风又可分解成垂直阵风和水平阵风。当飞机在平飞

时,突然遇到向上的垂直阵风,飞机发生突然跃升。同样,当突然遇到向下的垂直阵风时,飞机就会突然下降。

250hPa 高度上的垂直速度值水平分布出现正负相间的情况(图略)。图 8 显示的沿航路的剖面图更加清楚地反映出飞机在飞越

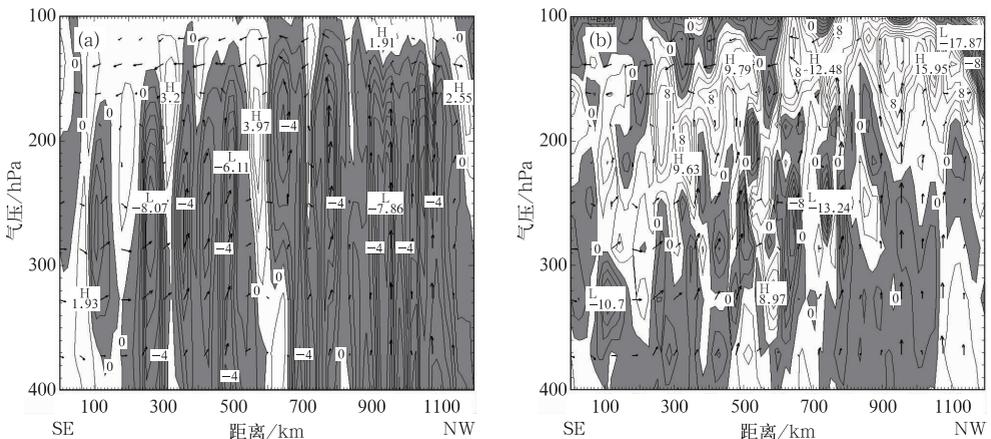


图 8 2007 年 7 月 6 日 15 时沿航路(3°N,125°E~12°N,119°E)垂直速度水平分布和垂直速度、散度的垂直分布  
(a)垂直速度、环流剖面图(阴影区为上升区);(b)散度、环流剖面图(阴影区为辐合区)

这个区域时,在遭受一个垂直速度中心值为  $-6.11\text{dPa} \cdot \text{s}^{-1}$  强上升运动后,立即转为受到中心值为  $3.97\text{dPa} \cdot \text{s}^{-1}$  的强下沉气流的影响。与航路上其他地区的下沉气流速度值相比,此处的强度最大。由强上升气流突然转为强下沉气流的情况,与飞机先急速上抛后紧接着急速下降的情况一致。分析沿航路的散度剖面图可以看到,气流上升区与低层辐合、高层辐散相配合,而下沉区与低层辐散、高层辐合相配合。根据剖面图分析,上升和下沉气流区域的水平尺度为  $100 \sim 200\text{km}$ ,是中尺度的范围。如果根据飞机飞行速度约  $800\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  和颠簸持续时间 20 多秒来计算,发生颠簸的水平距离才  $4 \sim 5\text{km}$ ,可以推断飞机颠簸是发生在相邻的强烈的上

升气流与下沉气流进行转换的狭窄区域内。

### 4.3 重力波的分析

对于热带气旋的螺旋雨带的形成,有一个主要的观点<sup>[10]</sup>,认为螺旋雨带实际上是一种重力波。此次事件中,飞机遭遇颠簸的区域位于涡旋云系外围的螺旋云带的上空, $100 \sim 200\text{km}$  大小相邻的垂直上升和下沉运动导致飞机剧烈的上抛和下降,因而此次的螺旋云带的形成也可能与重力波有关。

观测研究表明<sup>[11]</sup>,重力波经常出现在逆温层或稳定层存在以及有明显的风速垂直切变的天气背景下。选取了 15:00 颠簸区域中心附近的  $8^\circ\text{N}, 121^\circ\text{E}$  这一点作为研究对象。可以看到(图9),位温始终是随着高度的增

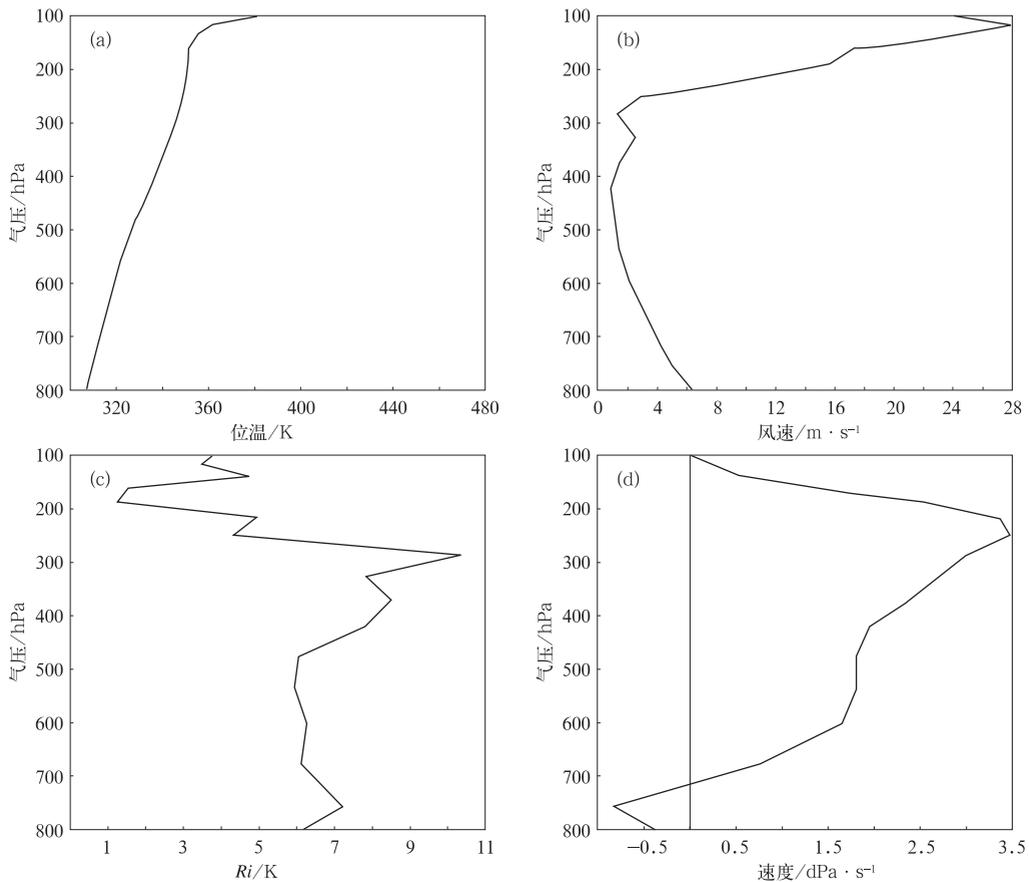


图 9 2007 年 7 月 6 日 15 时大气静力和动力条件  
 (a) 位温随高度变化; (b) 水平风速随高度变化; (c) 理查森数随高度变化; (d) 垂直速度随高度变化

高而增大,这样的静力稳定度分布反映了大气具有稳定的层结;而水平风速随高度变化表现为,300hPa 以上是一个急剧增加的过程,在 150hPa 附近风速值达到最大值  $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随后风速又迅速减小。在静力稳定的大气层结中,由明显风速垂直切变造成的扰动产生的气块上下振荡,在浮力和重力的共同作用下就会产生重力波。理论上<sup>[12]</sup>,重力波的形成还要求具有  $Ri < 0.5$  等条件。此次过程, $Ri$  值随高度的变化表现为在 250~150hPa 范围内  $Ri$  值急剧减到 2.0 以内,在 200hPa 附近达到最小值 0.9,垂直速度在 300~200hPa 也达到  $3.5 \text{ dPa} \cdot \text{s}^{-1}$  的极大垂直下降值。

#### 4.4 动量平流

研究表明<sup>[13]</sup>,急流附近的风切变是中尺度重力波产生的能源区。如果产生重力波的动力足够大,那么沿密度梯度构成的重力波将振幅增大,直到重力波到达某个位置破碎为止,而这里的动力源即来自动量平流。

图 10 显示颠簸区域存在三条平行的带状动量平流高值区。剖面图上显示出,在垂直风速度切变大的风速密集区具有动量平流高值区。带状动量平流高值区所在的位置与由螺旋云带相联系的颠簸区有很好的对应,说明可以结合使用动量平流来综合制作飞机颠簸预报。

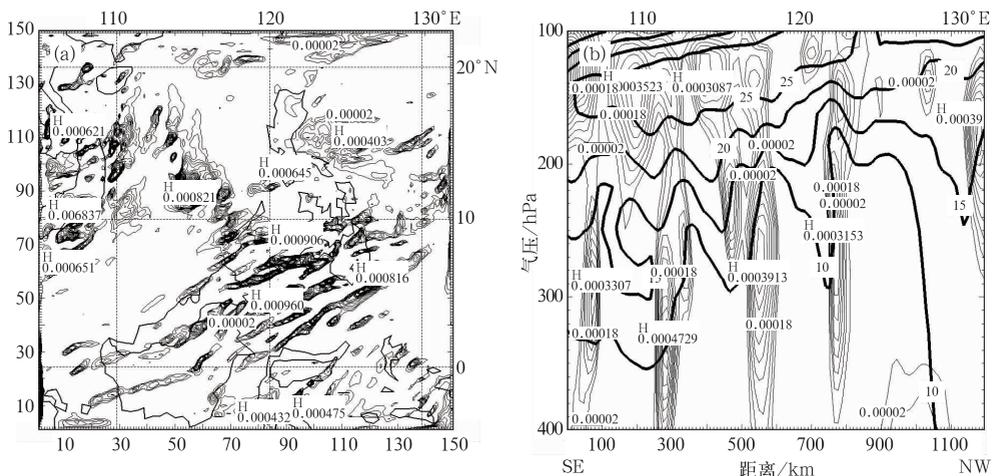


图 10 2007 年 7 月 6 日 15 时动量平流水平和垂直分布

(a) 250hPa 动量平流; (b) 沿航路( $3^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\text{E} \sim 12^{\circ}\text{N}, 119^{\circ}\text{E}$ )动量平流、水平风速剖面图

## 5 结语

(1) 此次飞机颠簸事件的热力条件不明显,主要是与变形场的动力条件有关,因而可使用理查森数和 Ellrod 颠簸指数进行分析。

(2) 使用 WRF 模式的输出结果,综合分析  $Ri$  小值区、 $Ri$  值减小区、 $EI$  大值区和动量平流大值区可以确定飞机颠簸发生的区

域、高度和强度。模式模拟出此次事件发生在中等强度的颠簸区域内。具体表现为,区域内  $Ri$  值小于 2.0,  $EI$  值达到 8~12,并且有  $Ri$  值减小和动量平流大值区的配合。

(3) 分析颠簸发生区域的红外和水汽云图分布特征,确定飞机遭遇颠簸的区域是位于涡旋云系外围的螺旋云带的上空。

(4) 分析大气稳定度、风速垂直速度、理查森数和动量平流证实螺旋云带是由重力波

产生的。在静力稳定的大气层结中,由明显风速垂直切变造成的扰动产生的气块上下振荡,在浮力和重力的共同作用下产生重力波。

(5) 此次飞机颠簸的产生原因,是由于飞机在飞越重力波内相邻的强烈的垂直上升和下沉气流转换区域时,飞机产生了剧烈上抛和下降运动。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 肇启锋, 刘鹏. 分析晴空湍流对飞行的影响[J]. 空中交通管理, 2006(2): 30-31.
- [4] 钟中, 张金善. 理查森数和晴空颠簸的关系[J]. 气象科学, 1996, 16(1): 56-62.
- [5] 中国民航总局空管局气象处. 数值天气预报产品在航空气象中的释用(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 43-48.
- [6] 干全, 李子良, 徐妮. 飞行颠簸的一种客观预报技术[J]. 四川气象, 2002(1): 40-41.
- [7] 李耀东, 金维明, 王炳仁, 等. 建立在数值预报系统上的航空气象要素预报试验[J]. 应用气象学报, 1997, 8(4): 485-489.
- [8] 刘峰. 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟[J]. 气象, 2008, 34(1): 18-24.
- [9] 俞飞, 王科, 梁爱民, 等. 华北地区晴空颠簸的分类特征及分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 16-21.
- [10] 梁必骐, 王安宇, 梁经萍, 等. 热带气象学[M]. 广州: 中山大学出版社, 1990: 237-239.
- [11] 段炼. 晴空颠簸及其预报方法[J]. 中国民航飞行学院学报, 2005, 16(6): 39-41.
- [12] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 55-56.
- [13] 张玉玲. 中尺度大气动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 38-41.