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.

文章编号: 1004-4965(2016)04-0570-07

一次南海高空晴空颠簸事件的形成机制研究

周林1,黄超凡1,2,钟中1,曾仕华3,王明琨4

(1. 解放军理工大学气象海洋学院,江苏南京 211101; 2. 海军东海舰队海洋水文气象中心,浙江 宁波 315122;
3. 空军 95021 部队气象台,湖北 当阳 444101; 4. 空军 93420 部队气象台,河北 石家庄 050000)

摘 要:采用 WRF 模式及其三维变分同化系统,对一次发生于南海高空越洋航线上的晴空颠簸(CAT)事件 开展同化 AMDAR 资料的高分辨率数值模拟研究,探讨副热带高空急流与本次 CAT 的发生关系。通过对飞机航 线上 CAT 发生时刻附近水平和垂直风场、气压场、温度场的模拟与分析,得出以下结论:(1)此次南海高空越洋 航线上的 CAT 位置及周边区域存在明显的大气重力波活动;(2)影响此次 CAT 的大气重力波主要来源于副热 带高空急流及非地转平衡;(3)急流区以及非地转平衡激发的大气重力波经过水平传播或垂直传播,通过扰动 局地大气环境达到 Kelvin-Helmholtz 不稳定和急流南侧反气旋气流的惯性不稳定的两种机制使波形破碎,从而形 成 CAT。

关 键 词:晴空颠簸; WRF 模式;高空急流; Kelvin-Helmholtz 不稳定;惯性不稳定
 中图分类号: P458
 文献标识码: A
 Doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.04.014

1 引 言

航空气象学中常把出现在 6 000 m 以上高空 且与对流云无关的湍流称为晴空湍流(Clear Air Turbulence,简称 CAT)^[1],它不包括与对流性不稳 定边界层及深厚对流有关的湍流,但不排除非对 流云(多指卷云)中存在的湍流。飞机在 CAT 区 飞行时发生的颠簸称为晴空颠簸,也记作 CAT。 最新的研究指出随着气候不断变暖,CAT 的强度 和频率将显著增加^[2]。CAT 常常没有目视征兆且 难以探测,使得飞行员无法事先发现,严重威胁飞 行安全。此外,CAT 影响对流层与平流层大气的 物质和能量交换,对大尺度环流的动力过程起着 重要作用^[3]。因此研究 CAT 的分布特征、变化规 律和预报方法有着重要的理论和实践应用意义。

由于 CAT 时空尺度小,实况资料少,形成机 制复杂,到目前为止还有许多问题没有解决^[4]。 为了提高 CAT 数值预报技巧和能力,通过高分辨 率的数值模拟,更深入理解和研究 CAT 的发生机 制,是十分必要的。Clark 等^[5]通过对 1992 年科 罗拉多州的 CAT 事例的数值模拟与输出结果分 析,得到此次 CAT 主要源于重力波的破碎; Koch 等^[6]利用数值模式输出结果分析得出高空急流区 气旋切变侧的重力波破坏了局地稳定性,从而形 成 CAT; Sharman 等^[7] 对发生于格陵兰岛的一个重 度 CAT 事例进行数值模拟,结果发现该 CAT 的形 成与格陵兰高原造成的山地背风波相关。许多研 究表明大部分尤其中高纬发生的 CAT 事件是由 K-H 不稳定 (Kelvin-Helmholtz Instability, 简称 KHI)引起的^[8-9], KHI 主要取决于 Richardson 数 的大小,通常 Richardson 数小于 0.25 是 KHI 发生 的必要条件^[10]。KHI 激发的重力波(也称 K-H 波)可以解释强风速切变区(往往也是高空急流区 附近)的 CAT, 而许多远离切变区的 CAT 的发现, 揭示了重力惯性波在 CAT 形成中扮演的多种重 要角色^[11]。

收稿日期: 2015-02-14;修订日期: 2015-12-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目"西北太平洋热带气旋活动对东亚气候平均态的反馈作用机制及其效应(41430426)"资助 通讯作者:周林,男,江苏省人,教授,主要从事海气相互作用与航空气象保障研究。E-mail:zhou_lin4458@163.com

和中高纬地区 CAT 研究相比,低纬或热带地 区上空 CAT 的研究相对较少。吴炎成等^[12]基于 10年的航空器气象资料下传(Aircraft Meteorological Data Relay,简称 AMDAR)资料揭示了南海飞 机颠簸发生频率要高于中国东海,但南海的飞机 颠簸除由 CAT 引起的外,更多的是由南海旺盛的 对流云团造成的热力湍流引起的。在低纬地区, 对流凝结加热造成的热力学不稳定十分重要,但 对于大尺度和中 α 尺度,风切变有利于不稳定的 发展,风切变造成的动力学不稳定则是最主要 的^[13]。那么南海上空与对流云无关的 CAT 是否 就是风切变产生的? 高精度的数值模拟能否刻画 这一机制?

本文利用 WRF 模式及其三维变分同化系统 (WRF-3DVAR)对 2011 年 1 月 23 日在南海高空 越洋航线上发生的两个重度 CAT 事例开展同化 AMDAR 资料的高分辨率数值模拟试验,通过对南 海北部副热带高空急流区附近重力波特征的分 析,探究此次两个 CAT 的形成机制。

2 试验方案及模拟效果检验

2.1 颠簸事例来源

从 2002 年开始,国际民航组织(ICAO)和世 界气象组织(WMO)在国际航班上 AMDAR 资料 中增加了对飞机颠簸的监测。其中,垂直阵风峰 值(PEAK Vertical Gust,记作 PEAKVG)是一个由 实测的飞机垂直加速度为基础,考虑了飞机的质 量、飞行速度以及机型参数等因素影响的导出量, 是较准确表征颠簸强度的物理量^[13]。PEAKVG 与飞机颠簸程度的对应关系如表1所示。

表1 PEAKVG 与飞机颠簸程度的对应关系^[14]

PEAKEG	<2.0	2.0~4.5	4.5~9.0	>9.0
飞机颠簸强度	无	轻度	中度	重度

通过对照表 1,分析 AMDAR 资料中的 PEAKVG 资料,获取到 2011 年1月23日08时27 分(世界时,下同)与08时48分发生南海高空越 洋航线上的两个重度 CAT 事例,颠簸事例详情如 表 2 所示。

	表2	CAT(201	1年1月	[23日)	事例详情	
颠簸	时刻	高度	经度	纬度	PEAKVG	颠簸
编号		/ m	∕°E	∕°N		强度
颠簸 I	08:27	11 582.4	117.57	15.75	15.4	重度
颠簸Ⅱ	08:48	11 582.4	116.17	18.37	14.8	重度

2.2 模拟方案设计

WRF(the Weather Research and Forecast)模式 是由美国国家大气研究中心(NCAR)等多单位联 合发展起来的新一代非静力平衡、高分辨率、科研 和业务预报统一的中尺度预报和资料同化系统。 WRF-3DVAR 模块可以综合指定时间段(时间窗) 内所有的大气状态信息,并得出一段时间(分析时 间)对真实大气的最佳估计值。其中大气状态的 信息来源包括观测资料、先前的预报结果(即背景 值或初猜值)等,再以此分析值作为数值模式的初 始场与边界场,使其更接近于实际大气状态,从 而提升数值天气预报的准确度。

本文利用 WRF V3.5 模式及其 WRF-3DVAR 模块对两个 CAT 事例开展同化 AMDAR 资料的高 分辨率 WRF 模拟试验。模拟试验采用三重双向 嵌套网格,水平分辨率分别为 30 km、10 km 和 3.3 km,水平格点数分别为母区域 D1 (100×100)、第 一子区域 D2 (180×180)、第二子区域 D3 (250× 400),母区域中心位置为 117.5°E,15°N,第一子 区域中心位置为 116.6°E,15.8°N,第二子区域 中心位置为 117.0°E,15.3°N。如图 1 所示为 WRF 模式设置的三重嵌套区域,图中虚线表示本 文研究的飞机航线段,D3 网格将其全部包含。自 08 时 27 分起,飞机在 11 582.4 m 的巡航高度上 从东南角向西北方向飞行,至 08 时 48 分止。图 中实心黑点表示航程中遭遇并记录的两个重度颠 簸事例的发生位置。

在垂直方向取 σ 坐标系并分为40层,模式层 顶为150 hPa,其中低层15个等 σ 层的 σ 差为 0.04,高层25个等 σ 层的 σ 差为0.016,形成在 10000 m高空分层高度差约300 m的高层加密。 D1、D2和D3网格的积分步长分别为90 s、30 s和 10 s,模拟结果输出时间间隔设为30 min。母区域 采用的物理方案如下:云微物理过程采用 WSM6class 方案,长波辐射为 RRTM 方案,短波辐射为 Dudhia 方案, 近地层过程为基于 Monin-Obukhov 的 ETA 类似方案, 陆面过程为 Noah 方案, 行星边 界层过程为 M-Y-J 方案, 积云对流过程为 Kain-Fritsch 方案。子区域除不进行积云参数化外, 其 他物理方案与母区域相同。



模式初始场采用全球预报模式(GFS)水平分 辨率为1°×1°的6h间隔的分析场及其3h预报 场,在此基础上开展 AMDAR 资料的三维变分同 化,自2011年1月23日00时冷启动,之后以3h 为循环同化周期进行热启动,同化时间窗为1h, 至2011年1月23日12时停止积分。因此,数值 计算过程中在00时以冷启动同化一次,在03时、 06时、09时分别以热启动各同化一次。试验中通 过共四次三维变分同化过程,将22日23时—23 日01时、23日02—04时、23日05—07时、23日 08—10时的研究区域内的 AMDAR 观测资料同化 利用并改进模式初始场与边界场。

2.3 模拟效果检验

与其他观测资料相比,AMDAR 数据的优势在 于飞机航线可以进入其他探测手段难以探测甚至 无法到达的区域,并以实际位置的测量保证 AM-DAR 数据的准确性。特别是本文开展对 CAT 的 数值模拟,AMDAR 资料本身是飞机航线上的气象 观测数据,同化利用 AMDAR 资料有利于航线上 及航线周边的物理量场的模拟,对 CAT 的模拟产 生积极影响。

对 D1 的模式输出结果进行分析,统计模拟气 温、模拟纬向风速与经向风速三个变量,并与 06— 12 时的研究区域内 731 个 AMDAR 实测资料进行 比较,模拟结果与实测数据之间的误差及相关系 数如表 3 所示。

表 3 WRF 模拟结果与 AMDAR 实测数据比较

物理量	平均	平均绝	平均相	相关
	误差	对误差	对误差	系数
气温/K	-0.984 7	1.602 5	0.60%	0.9976
纬向风速/(m/s)	0.0769	1.9929	10.04%	0.9867
经向风速/(m/s)	0.035 4	0.9784	19.49%	0.8277

由表 3 可知,模式输出的气温与实测气温的 平均相对误差仅 0.60%,相关系数达到 0.99 以 上;模式输出的纬向风速与实测的纬向风速平均 相对误差为 10.04%,相关系数达到 0.98 以上;对 于经向风速的模拟,相关系数较高,但平均相对误 差较大,效果一般。根据相关性检验标准,气温、 纬向风速和经向风速的模拟值与实测值的相关系 数都通过了 0.001 的信度检验,可见数值模拟与 实测资料的相关性显著。从整体上看,同化 AM-DAR 资料的 WRF 模拟试验表现出对于南海及周 边海域上空的物理量场良好的模拟能力。

3 模拟结果分析

综合考虑 CAT 发生时刻与模式输出间隔,选 取 2011 年 1 月 23 日 08 时 30 分的模式输出数据 展开分析。

3.1 重力波特征分析

Sharman 等^[15]指出近年来的观测与研究结果 已经表明重力波与 CAT 具有密切的联系。因此,将 先对 CAT 位置周边区域的重力波特征进行分析。

图 2 是根据 WRF 模式 D3 网格输出结果绘制的 11 600 m 高度层上的垂直风水平分布,图中包含垂直风速(阴影区,深色为正值,浅色为负值)和水平风矢量(箭头)。11 600 m 高度层与飞机巡航高度 11 582.4 m 最接近的模式垂直分层。从图 2 可看出,此刻的飞机航线(图中虚线)正处在水平风速为南风和西南风的反气旋西北部中,而航线

和其附近的垂直风速在水平方向上呈正负交替分 布特征,即气流的上升运动与下沉运动交替分布, 呈现出明显的波动特征。



11 600 m 水平和垂直风速分布 阴影区为垂直风速,箭头为水平风矢量,单位:m/s。



图 3 是根据 WRF 模式 D3 网格输出结果绘制 的垂直风沿飞机航线的铅直剖面图,图中包含垂 直风速(阴影区)和位温(等值线)。从图 3 可看 出,在 11~12 km 高度上,等位温线稀疏,位温的 垂直梯度明显小于其下层和上层;垂直风速沿着 航线呈正负交替分布并且变化频繁,即气流的上 升运动与下沉运动快速交替变换,同样呈现出明 显的快速波动特征,并且波动使得该层位温变得 相对均匀,层结稳定度降低。

因此,通过图 2 和图 3,即 11 600 m 高度上的 垂直风水平分布图与沿飞机航线的垂直风铅直剖 面图的分析,表明在此次 CAT 事例发生的时刻与 位置附近,存在明显的大气重力波活动。

3.2 重力波来源分析

图 4 是根据 WRF 模式 D1 网格输出结果绘制 的区域环流形势,图中包含风速场(阴影区)、风矢 量(箭头)和气压场(等值线)。从图4中可发现, 在飞机航线(图示虚线)及颠簸记录位置(图中黑 点)的北面,即图中的阴影区域,风矢量一致指向 东偏北,即西南风,并且风速均超过 30 m/s,最高 风速达到60 m/s:阴影区域等位势高度线一致呈 东-西走向,南边位势高北边位势低,显然阴影区 域内风速与等位势线有较大夹角,呈现强烈的非 地转平衡特征。实际上该阴影区即为副热带急流 轴南侧的高空急流区,急流区附近的非地转运动 可以激发出惯性重力波,通过惯性重力波的能量 频散作用,使大气恢复地转平衡。Koch 等^[6]也指 出高空急流是大气重力波的重要来源之一。因 此,冬季南海北部位于20~30°N的副热带高空 急流区与副热带地区的非地转平衡应该是南海海 域上空大气重力波活动的主要来源。



图 4 模式模拟的 D1 区域 08 时 30 分 11 600 m 环流形势

3.3 重力波引发湍流机制分析

在层结稳定的大气中,具有风速垂直风切变

环境的重力波被称为 Kelvin-Helmholtz(K-H)波,因此垂直风切变(Vertical Wind Shear,记作 VWS, 见式(1))在与高空急流相关 CAT 中十分重要。

$$VWS = \left(\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$
(1)

其中 u 是纬向风速, v 是经向风速。

图 5 是根据 WRF 模式 D3 网格输出结果绘制 的垂直风切变的水平分布,图中阴影区表示垂直 风切变的大小,颠簸位置很好地对应着垂直风切 变的大值区。结合图 3,在 11~12 km 高度上的等 位温线变得稀疏,说明重力波的扰动使得大气层 结稳定度减弱,加之垂直风切变的增大,就使得理 查森数急剧减小,导致 KHI,使 K-H 波发生破碎产 生湍流。因此,重力波通过传播并扰动局地大气环 境达到 KHI,使重力波破碎形成 CAT,可能是此次 CAT 的形成机制之一。



此外,惯性不稳定也是此次 CAT 的形成机制 之一。惯性不稳定是水平面上的横向扰动被气流 加速而偏离原始位置并无法恢复的现象,式(2)为 惯性稳定度参数(记作 *l*²)。

$$I^{2} = f_{0}\left(f_{0} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{2}$$

图 6 是根据 WRF 模式 D3 网格输出结果绘制 的惯性稳定度参数的水平分布,图中阴影表示惯 性稳定度参数的大小,高空急流区南侧存在大范 围的惯性不稳定区域,颠簸位置正处于惯性不稳 定的区域。可见,因高空急流南侧气流呈反气旋 式切变,加上高空急流的强风切变特征,高空急流 南侧区域容易发生惯性不稳定的现象。李子良 等^[16]指出在急流南侧反气旋环流中,由于惯性不 稳定的作用,重力波不稳定发展破碎为湍流,可能 是急流南侧反气旋气流中 CAT 产生和发展的一 种机制。因此,重力波由高空急流区及非地转平 衡等激发,通过水平传播或垂直传播,在远离波源 处由于惯性不稳定而发生波形破碎形成 CAT,可 能也是此次 CAT 的形成机制之一。



4 结 论

本文基于 AMDAR 资料获取 2011 年 1 月 23 日发生南海高空越洋航线上的两个重度 CAT 事 例,采用 WRF 模式及其三维变分同化系统,开展 同化 AMDAR 资料的高分辨率数值模拟试验,通 过对重力波特征、重力波来源和重力波引发湍流 机制的分析,得出以下结论。

(1) 此次南海上空越洋航线上的 CAT 与大气 重力波活动密切相关,颠簸位置及周边区域存在 明显的大气重力波活动。

(2) 影响此次 CAT 的大气重力波主要来源于 副热带高空急流及非地转平衡。 (3)急流区以及非地转平衡激发的大气重力 波经过水平传播或垂直传播,通过扰动局地大气 环境达到 K-H 不稳定的条件、急流南侧反气旋气 流的惯性不稳定作用的两种机制使波形破碎,从 而形成此次 CAT。

参考文献:

- [1] 赵树海. 航空气象学[M]. 北京: 气象出版社,1994: 356.
- [2] WILLIAMS D, JOSHI M. Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change [J]. Nature Climate Change, 2013, 3:644-648
- [3] KELLER J L. Clear air turbulence as a response to mesoscale and synoptic-scale dynamic processes [J]. Mon Wea Rev, 1990, 118(10):
 2 228-2 242.
- [4] TRAUB M, LELIEVELD J. Cross-tropopause transport over the eastern mediterranean [J]. J Geophys Res, 2003, 108 (D23), 4712, doi: 10.1029/2003 JD003754.
- [5] CLARK T L, HALL W D, KERR R M, et al. Origins of aircraft-damaging clear-air turbulence during the 9 december 1992 colorado downslope windstorm; Numerical simulations and comparison with observations [J]. J Atmos Sci, 2000, 57(4); 1 105-1 131.
- [6] KOCH S E, JAMISON B D, LU C, et al. Turbulence and gravity waves within an upper-Level front [J]. J Atmos Sci, 2005, 62(11): 3 885-3 908
- [7] 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]. J Appl Meteo Climat, 2012, 51(1): 42-53.
- [8] ATLAS D, METCALF J I, RICHTER J, et al. Birth of 'CAT' and microscale turbulence[J]. J Atmos Sci, 1970, 27(6): 903-913.
- [9] ELLROD G P, KNAPP D I. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use[J]. Wea Forecasting, 1992, 7(2): 150-165.
- [10] 钟中,张金善. 理查逊数和晴空颠簸的关系[J]. 气象科学,1996,16(1):56-62.
- [11] 周林,黄超凡. 近10年晴空湍流的研究进展[J]. 气象科技,2015,43(1):91-96.
- [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] 安洁,张铭,齐琳琳. 凝结加热条件下垂直切变基本流中的混合波不稳定研究? [J]. 热带气象学报,2013,29(4): 616-624.
- [14] TRUSCOTT B. Eumetnet AMDAR, AAA AMDAR software developments-amdar ii technical specification, version 4[M]. The UK Meteorological Office, Berkshire. 2002.
- [15] SHARMAN R D, TRIER S B, LANE T P, et al. Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review [J]. Geophys Res Lett, 2012, 39: L12803.
- [16] 李子良,黄仪方.重力惯性波及其不稳定一急流附近飞机颠簸产生的可能机制[J].高原气象,2008,27(4):859-865.

RESEARCH ON FORMATION MECHANISM OF A CLEAR-AIR TURBULENCE ABOVE SOUTH CHINA SEA

ZHOU Lin¹, HUANG Chao-fan^{1, 2}, ZHONG Zhong¹, ZENG Shi-hua³, WANG Ming-kun⁴

(1. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Navy's East China Sea Fleet Oceanography and Meteorology Center, Ningbo 315122, China;

3. Meteorological Observatory of the Air Force Unit 95021, Dangyang 444101, China;

4. Meteorological Observatory of the Air Force Unit 93420, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Based on the WRF model and its three-dimensional variational assimilation system, this paper did a high-resolution numerical simulation study with assimilated AMDAR data on a clear-air turbulence (CAT) on an overseas route above the South China Sea in order to explore the relationship between subtropical jet streams and the CAT. Through the simulation and analysis on the horizontal and vertical fields of wind, pressure and temperature, our work comes to the following conclusions: (1) There were obvious atmospheric gravity wave activities on the spot of incidence and the surrounding area of the South China Sea CAT; (2) The atmospheric gravity waves affecting this CAT mainly came from a subtropical jet stream and ageostrophic flow; (3) The atmospheric gravity waves produced from the jet area and ageostrophic flow are transmitting horizontally or vertically to form the CAT through disturbing local atmospheric environment to the level of Kelvin Helmholtz instability and inertial instability in anticyclonic flow at the south side of jet streams, thus breaking waveform.

Key words: clear air turbulence; WRF model; jet stream; Kelvin-Helmholtz Instability; inertial instability