

晴空湍流(CAT)对大尺度和中尺度动力强迫过程的响应

田俊杰 庄春毅*

(空军气象学院二系, 南京 211101)

提 要

该文利用中尺度客观分析资料, 对 θ 坐标系下 R_i 数倾向方程中的非湍流变形强迫场进行了诊断分析, 以揭示晴空湍流(CAT)对大尺度和中尺度动力强迫过程的响应关系. 计算结果表明: 晴空湍流往往出现在对流层高层或高空急流附近. 在层结稳定的高层大气薄层中, R_i 数较小的空气微团遇有较强的非湍流变形强迫场时, 由于动力强迫和 R_i 的耦合作用, 往往导致晴空湍流的发生.

关键词: 晴空湍流(CAT); R_i 数倾向; 变形强迫; 等熵分析.

引 言

人们通常把与强对流活动无关的出现在 6000 m 高度以上的湍流称为晴空湍流(Clear Air Turbulence 简称 CAT). 飞机在晴空湍流区飞行时发生的颠簸称之为晴空颠簸. 晴空湍流属大气中的中小尺度现象, 比较难以探测和预报, 因此 CAT 对飞行活动的危害很大. 飞机在飞行中若遇上 CAT, 轻者飞机会上下升降, 乘客感到不适; 重则飞机发生强烈颠簸, 乘客受伤, 甚至造成飞行事故. 近年来, 国内外学者对 CAT 作了大量的研究^[1~11]. 如 Reed^[1](1972)和 Kennedy^[2](1975)为了解 CAT 与大中尺度动力过程间的关系, 对 CAT 作了一系列观测研究. Smith^[3](1980)还认为: 自由大气中的大尺度动能耗散率常和 CAT 的发生有关. Lindzen^[4](1976)和 Lalas^[5](1980)认为: CAT 的发生往往和对流层高层重力波的 Kelvin-Helmholtz 不稳定有关. 张颖和张铭^[6]通过分析中尺度重力波的不稳定, 推断 CAT 发生的区域及位置. 赵树海^[7]利用中尺度资料诊断认为: 一定强度的中尺度重力波是产生 CAT 的一种机制.

本文利用“华东中尺度试验”资料, 在原始资料客观分析的基础上, 对 θ 坐标系中 CAT 对大尺度和中尺度动力强迫过程的响应进行了诊断. 计算表明: 在具有稳定层结的空气薄层中, R_i 数较小的空气微团遇有较强的变形强迫场时, 由于动力耦合作用, 就有可能导致 CAT 的发生.

* 现广西南宁空军场站气象台工作.
1994-04-04 收到, 1995-09-26 收到修改稿.

1 资料的处理

计算资料采用“华东中尺度试验”加密探空资料,时次为1983年4月27日19时和28日07时;资料范围为 $30^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$;要素场为高度场、温度场、风速 u 场、 v 场;共有11个等压面,包括1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150和100 hPa.

原始资料的客观分析采用逐步订正法^[8].取格距为50 km的正方形网格,得到 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 经纬距区域内网格点资料.通过分析各等压面上网格点区域的诸要素场并和实际的观测资料场相比较,其结果是比较吻合的;限于篇幅,各要素的等值线分析和比较的结果略去.

2 大尺度及中尺度变形强迫场的诊断

为了探讨CAT发生的物理机制,人们从不同角度对CAT进行诊断研究, Keller^[9](1984)为更好地计算CAT发生的区域,给出了 P 坐标系的 Ri 数倾向方程:

$$\Phi = -\frac{d}{dt}\ln Ri = (2Ri - 1) \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \cdot \nabla_p p + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_p \quad (1)$$

最近, Keller^[10](1990)假定空气具有粘性,空气非绝热上升;同时存在湍流通量和非绝热加热的条件下,利用等熵坐标系原始方程组,得到了诊断 Ri 数的倾向方程:

$$r = -\left(\frac{d}{dt}\right)_\theta \ln Ri = -\Phi - \xi \quad (2)$$

式中, $\left(\frac{d}{dt}\right)_\theta = \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_\theta + \vec{V} \cdot \nabla_\theta + H \frac{\partial}{\partial \theta}$, $H = \theta$ 为湍流非绝热加热; Φ 是和天气尺度及中尺度扰动有关的变形强迫项; ξ 为不可分辨的次网格尺度的湍流强迫项.由于非湍流变形强迫项 Φ 对 Ri 数倾向贡献的大小主要取决于网格尺度的变形强迫(即:同时包含大尺度和中尺度变形强迫作用),故Keller认为:只要通过诊断大、中尺度的非湍流强迫项 Φ ,就基本上能判断出CAT发生的潜在区域,并在理论上可以揭示出 Ri 数倾向和大、中尺度变形强迫场之间的响应关系.

2.1 计算方案

根据客观分析所得到的 p 坐标系的格点资料,我们进行了4个方面的计算.

2.1.1 u, v, T, p 场插值到等熵面

首先将11层等压面格点上的温度场换算为位温(θ)场,得到各等压面上的位温分布.由计算结果综合考虑,取308, 314, 318, 323, 330, 338, 344, 353, 383 K共9个等熵面来诊断大气上层的变形场.同时假定:在非常浅薄的气层中, u, v, T, p 各要素在垂直方向浅层中呈线性分布.这样,根据垂直方向上的位温分布,将各要素场插值到规定的9个等熵面上,插值方案如图1所示.

$$\text{位温插值: } \theta = w_1\theta_1 + w_2\theta_2 \text{ 其中: 权重 } w_1 = \frac{\Delta\theta_1}{\theta_1 - \theta_2}, w_2 = \frac{\Delta\theta_2}{\theta_1 - \theta_2}$$

且有: $\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta$, $\Delta\theta_2 = \theta - \theta_2$.

其它要素场(A)的等熵面权重插值与位温类似:

$$(A)_\theta = w_1 A_{\theta_1} + w_2 A_{\theta_2}$$

2.1.2 垂直剖面上的风速及位温分布

文献[6]和[7]曾用同样的资料发现 200 hPa 等压面上存在着明显的中尺度重力波,并判断此个例中存在着 CAT. 为弄清 CAT 发生区域的风速、位温的垂直分布特征,我们沿着格点(34.5°N、120°E)到格点(30.5°N、116°E)作一个穿越该区域的垂直剖面,以得到 u 和 θ 随高度的垂直分布(剖面见图 3).

2.1.3 $\ln Ri$ 场的计算

为了判明可能发生 CAT 区域及其所在等熵面,为此计算各等熵面上的 $\ln Ri$ 数,以确定 Ri 数所在区域,并分析和动力变形强迫之间的响应关系.

等熵坐标系中的 Ri 数为:

$$Ri = \frac{1}{\rho\theta} \left(-\frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \right|^{-2} \quad (3)$$

计算 Ri 数时采用垂直方向上的中央差分,间隔为 $\Delta\theta = 6$ K.

2.1.4 变形强迫场的诊断计算

Keller(1990)推导的 Ri 数倾向方程为:

$$r = \frac{d}{dt} \ln Ri = -\Phi - \xi \quad (4)$$

其中:

$$\Phi = -2f \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \right|^{-1} \left| \frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \theta} \right| \cos \beta + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \cos 2\alpha - \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \sin 2\alpha \quad (5)$$

$$\xi = 2 \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \right|^{-2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \vec{F}}{\partial \theta} - \frac{\partial H}{\partial \theta} \quad (6)$$

式中, α 为 $\frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta}$ 和正北方向沿顺时针方向的夹角, β 为 $\frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta}$ 和 $\nabla_\theta T$ 间的夹角; \vec{F} 为湍流动量通量应力; $H = \theta$ 为湍流非绝热加热; \vec{V}_g 为地转风; 那么式(5)中的 $\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \theta}$ 即为热成风, 其表达式为:

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \theta} = \frac{c_p}{f\theta} \nabla_\theta T \times \vec{k} \quad (7)$$

由于中尺度资料无法计算次网格尺度的湍流通量应力 \vec{F} 和非绝热加热 H , 因此计算时认为气团是沿着等熵面运动的, 仅考虑非湍流变形强迫项 Φ 场, 它是对流层上层与天气尺度扰动和中- α 尺度扰动相关的变形强迫项. 根据式(6)的物理意义, 将 Φ 写成: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$, 且有,

$$\Phi_1 = -2f \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \right|^{-1} \left| \frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \theta} \right| \cos \beta \quad (8)$$

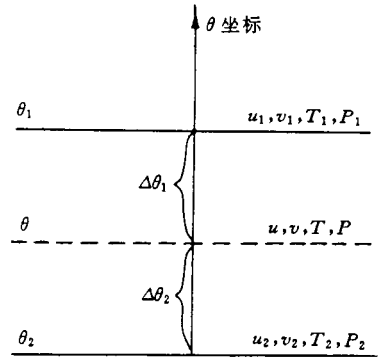


图 1 等熵面插值方法

Fig. 1 The scheme of isentropic interpolation

$$\Phi_2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \cos 2\alpha \quad (9)$$

$$\Phi_3 = - \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \sin 2\alpha \quad (10)$$

那么： Φ_1 所表示的意义是由于锋生所致的变形强迫对 Ri 数倾向的贡献，简称锋生变形项； Φ_2 和 Φ_3 则分别代表伸展变形和切变变形强迫对 Ri 数倾向的贡献。

2.2 计算结果与讨论

首先，通过分析 u 场和 θ 场的垂直剖面图来分析 CAT 可能发生的层次和区域；然后，再诊断不同等熵面上的变形强迫场；最后，结合 Ri 数场的分布，进而分析 CAT 对大中尺度动力强迫过程的响应关系。

2.2.1 垂直剖面图

图 2 给出了位于泗阳和南京之间的 NE—SW 向的 u 场和 θ 场的垂直剖面图。图中可以看出：在 340 K 到 360 K 等熵面(约 250~150 hPa)之间存在着一支高空急流，对应 u 的高值区，最大 u 值为 54.4 m/s，且等熵面 344 K 恰恰位于急流轴的下方。由图 2 同时看出：所诊断的各等熵面之间 $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$ ，故空气薄层具有稳定的大气层结；此外，340 K 和 350 K 等熵面之间的空气层在急流轴的右下方，其坡度较其它层次为大。反映在等压面上即为温度梯度较大，有可能是锋生变形的强迫作用更为明显。

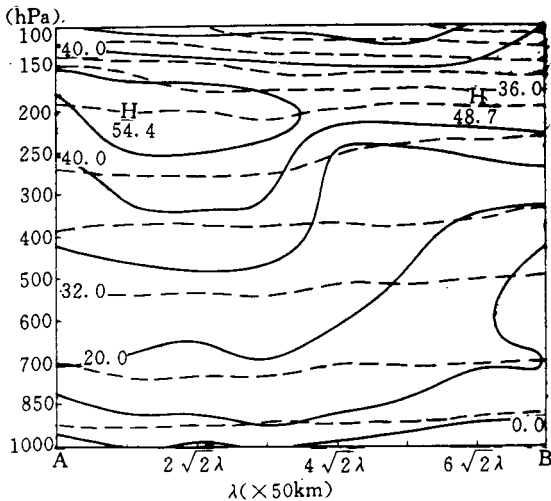


图 2 u, θ 垂直剖面图(实线为 u 间隔 10.0 m/s, 虚线为 θ 间隔 10 K)

Fig. 2 Vertical cross-section of wind (solid line; u , interval: 10.0 m/s; dashed line; θ , interval: 10 K)

2.2.2 变形强迫场的诊断

根据以上对 u, θ 垂直剖面图的分析，首先计算 1983 年 4 月 27 日 19 时 5 个等熵面上的变形强迫场 Φ ；这些等熵面分别是 330 K, 338 K, 344 K, 353 K 和 383 K。计算结果表明：各等熵面上的变形强迫场 Φ 的高值区以 344 K 等熵面为最大，且等熵面的平均高度位于 250~200 hPa 之间，这与文献[6]和[7]的结论基本吻合。

由图 3 可以看出，变形强迫场 Φ 值高值区位于泗阳与南京之间；垂直剖面的剖线恰恰穿越该区，中心最大 Φ 值为 $136 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。根据 Ri 数倾向方程式(4)可知，变形强迫项 $\Phi > 0$ 较大，使得 Ri 数加速变小的趋势更为明显，从而有利于 CAT 的发生。

进一步计算锋生变形项(Φ_1)、伸展变形项(Φ_2)和切变变形项(Φ_3)分别对 Ri 数倾向的贡献(图 4(a, b, c))。可以发现：锋生变形强迫项(Φ_1)在同样的区域最大，其高值中心为 $145 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，甚至超过 Φ 总值(图 4a)；而伸展变形强迫场(Φ_2)在该区域反而为负值或零值区(图 4b)；同时，切变变形强迫

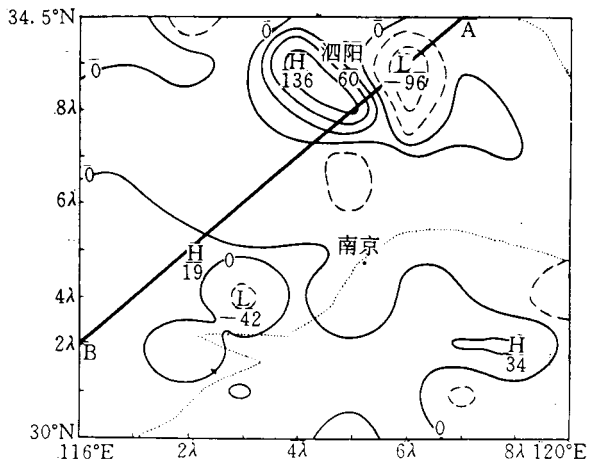


图3 1983年4月27日19时344 K等熵面上的变形强迫场 Φ (等值线间隔: $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 3 The deformation forcing field Φ on 344 K isentropic surface at 19:00

April 27, 1983 (contour interval: $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

场(Φ_3)在此区域也较弱,基本上处在零值区(图4c).诊断的结果说明,气团沿等熵面所经过的强迫环境场中锋生变形强迫最强,切变变形强迫次之,而伸展变形强迫最小,甚至起着使 Ri 数倾向增大的作用.然而,从图3可知,4月27日08时344 K等熵面上的总强迫变形 Φ 仍是比较大的,从而有利于CAT的发生.另一方面,也有作者(Hopkins^[11])认为:CAT的发生常常和急流以及活跃的温带气旋相联系的内锋面(internal fronts)有关.因此,该个例中诊断出的由锋生变形所致的强迫作用,也许正是CAT产生机制的另一物理学解释.

此外,还对4月28日07时344 K等熵面上的变形强迫场 Φ 进行计算(图略).可以发现,总的变形强迫场很弱,几乎全部为零值区,说明天气尺度和中尺度环境场对CAT的动力强迫已基本消失.查阅天气图发现,在28日08时的850~700 hPa上,华东实验区处于槽前较强SW气流控制之下,500 hPa也已转SW风,14时有阵性降水.因此,可以推断4月28日07时,天气尺度和中尺度变形强迫作用对CAT的影响已经消失.

2.2.3 $\ln Ri$ 场的分布

在层结大气中,湍流的发生和维持往往需要足够强的风切变提供能量以维持浮力阻力所消耗的能量. Ri 数正是反映了这种能量关系.以上所做的等熵面上的变形强迫场的诊断分析只能说明大中尺度环境场对 Ri 数倾向的贡献,而CAT能否发生以及强度如何,最终还是取决于气团本身 Ri 数的大小.

图5为1983年4月27日19时位于344 K等熵面上的 $\ln Ri$ 场的分布.可以发现:在泗阳和南京之间存在着 $\ln Ri$ 的低值区(最低值为0.253),而这个相对较小的 Ri 数低值区域恰恰对应于变形强迫 Φ 场的高值区(见图3);这种较好的对应关系说明了 Ri 数倾向和变形强迫场之间的动力耦合是CAT发生的重要机制之一.因此,根据Keller(1990)的 Ri 数倾向方程(4),我们有理由认为:1983年4月27日19时,位于344 K等熵面附近具有较小 Ri 数的气团,在较强的变形强迫环境场的作用下, Ri 数倾向趋势越来越小,最

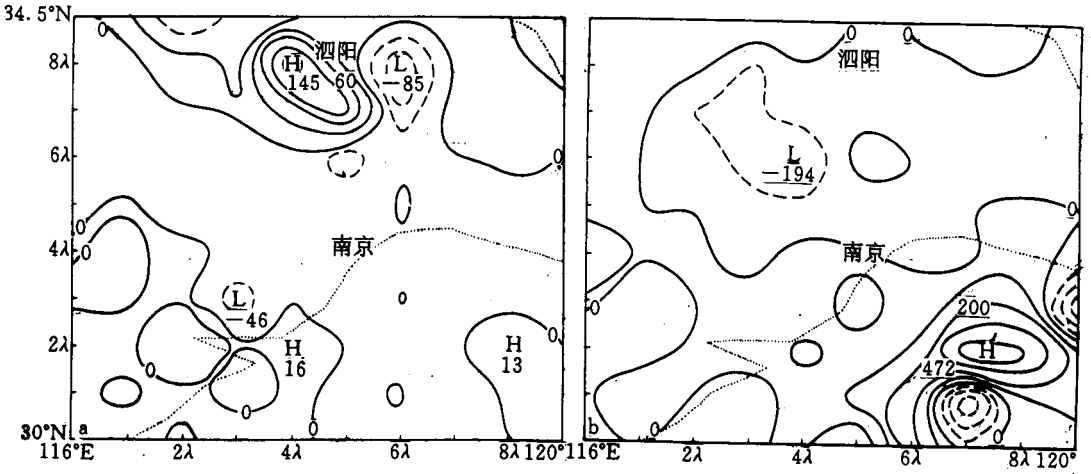


图4 1983年4月27日19时344 K等面上的变形强迫分项
(a) Φ_1 (单位: $30 \times 10^{-5} s^{-1}$) (b) Φ_2 (单位: $100 \times 10^{-6} s^{-1}$) (c) Φ_3 (单位: $80 \times 10^{-6} s^{-1}$)

Fig. 4 As in Fig. 3, but for three components of Φ , (a) Φ_1 (unit, $30 \times 10^{-5} s^{-1}$) (b), Φ_2 ($100 \times 10^{-6} s^{-1}$) (c), Φ_3 , ($80 \times 10^{-6} s^{-1}$)

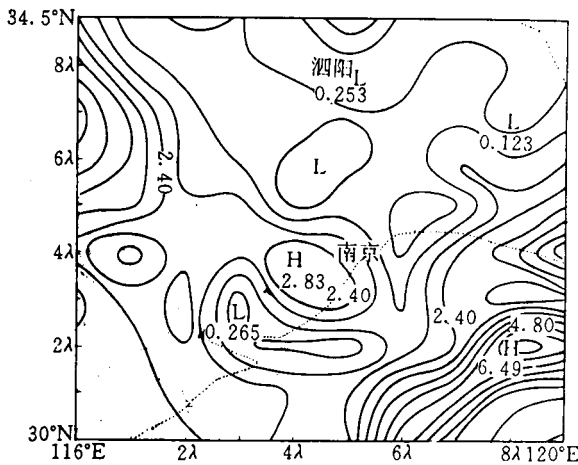
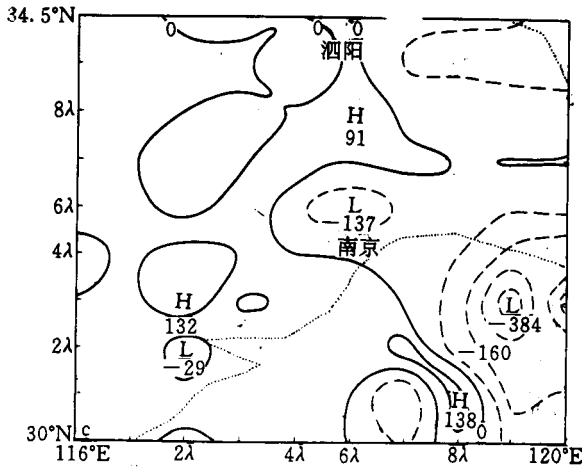


图5 1983年4月27日19时344 K等面上的 $\ln Ri$ 场的分布

Fig. 5 As in Fig. 3, but for $\ln Ri$ field (interval: 0.6)

终导致了 CAT 的发生.

3 结 语

本文利用“华东中尺度天气试验”的加密资料,在对原始资料进行客观分析得到的格点资料基础上,对大尺度和中尺度的变形强迫对 Ri 数倾向的贡献进行了诊断计算,并分析了 Ri 数和变形强迫场之间的动力耦合关系.结果表明:(1)1983年4月27日19时,华东中尺度天气试验区内,位于南京和泗阳之间约 344 K 等熵面附近的稳定气层内,具有较小的 Ri 数的气团,由于受到大尺度和中尺度变形强迫场的作用而导致晴空湍流的产生.(2)晴空湍流的发生不仅仅和较强的风切变有关,而且,在高层大气的内波中,CAT 的发生也常常和温度梯度导致的内锋面的锋生变形有关.(3)晴空湍流(CAT)往往出现在对流层高层或急流轴附近的稳定气层中.晴空湍流的尺度与大气中的中尺度结构有关.综上分析可揭示出这样一种 CAT 发生的动力耦合关系,即:在层结稳定的高层大气薄层中, Ri 数较小的空气微团遇到较强的非湍流变形强迫场时,由于这种动力耦合作用,往往导致 CAT 的发生.

参 考 文 献

- 1 Reed R J and Hardy K R. A case study of persistent intense clear-air turbulence in an upper level frontal zone. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 541~549.
- 2 Kennedy P J and Shapiro M A. The energy budget in a clear-air turbulence zone as observed by aircraft. *Mon. Wea. Rev.*, 1975, **103**: 650~654.
- 3 Smith P J. The energetics of extratropical cyclones. *Rev. Geophys.*, 1980, **18**: 378~386.
- 4 Lindzen R S and Rosenthal A J. On the instability of Helmholtz velocity profiles in stably stratified fluids when a lower boundary is present. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**: 1561~1571.
- 5 Lalas D P and Einaudi F. Tropospheric gravity waves: their detection by and influence on rawinsonde balloon data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 855~864.
- 6 张颖,张铭.一个高空尺度重力惯性波的个例分析.空军气象学院学报,1989, **10**(3): 54~60.
- 7 赵树海.晴空颠簸的一种机制分析.航空气象科技,1989, **6**: 11~14.
- 8 郑良杰.中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟.北京:气象出版社,1989. 13~19.
- 9 Keller J L. Performance of a quantitative jet stream turbulence forecasting technique: The specific CAT risk (SCATR) index. AIAA, 1984, 84~0274.
- 10 Keller J L. Clear-air turbulence as a response to meso-and synoptic-scale dynamic processes. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 2228~2241.
- 11 Hopkins R H. Forecasting techniques of clear-air turbulence including that associated with mountain waves. WMO. Tech. Note, 1977, **155**: 31~35.

THE RESPONSE OF CLEAR-AIR TURBULENCE TO MESO-AND SYNOPTIC-SCALE DYNAMIC FORCING PROCESSES

Tian Junjie Zhuang Chunyi

(*Institute of Meteorology, P. L. A. Air Force, Nanjing 211101*)

Abstract

By using the meso-scale objective analysis data, the forcing field of the nonturbulent deformation in Richardson number tendency equation of θ coordinates is diagnosed in order to study the response relation between clear-air turbulence (CAT) and synoptic-scale and meso-scale dynamic forcing processes.

The calculating results show that CAT is often encountered in the upper troposphere or near upper air jet flows. In the stable shallow layer of upper atmosphere, when micro air mass with small Ri number encounters the strong forcing field of nonturbulent deformation, because of the coupling function of dynamic forcing with Ri number, CAT would occur frequently.

Key words: Clear-air turbulence; Richardson number tendency; Deformation forcing; Isentropic analysis.

第一届 WMO 国际季风会议 (IWM-1) 将在印度尼西亚召开

第一届世界气象组织(WMO)国际季风会议(IWM-1)将于1997年2月24~28日在印度尼西亚的巴厘岛登巴萨港召开。东亚季风研究计划(MI)委员会的主席丁一汇教授被任命为本次会议的主席。

会议重点交流的内容将包括:行星尺度和大尺度季风特性;季风的天气系统;季风的对流和降水;季风的尺度变化;季风模拟、理论和可预报性;季风与重大的气象和海洋事件及过程的关系;季风预报;季风的社会和经济影响;季风外场试验的结果和有关季风外场试验的新计划等9个方面。

准备参加会议的科学家请将英文论文摘要(打印在A₄纸,不超过2页,可包括1张图或表)于1996年10月31日前寄给丁一汇教授(由巢清尘转收)。

地址:北京海淀区白石桥路46号 国家气候中心。

邮编 100081

(国家气候中心提供)