

AMEX期间一个热带风暴发展的动能

收支及环流特征*

王作述 张若军 彭正义

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

利用中、美、澳联合进行的澳大利亚季风试验(AMEX)第二阶段观测资料,对南半球热带风暴Irma的发展,进行了环流背景和动能收支的分析。

Irma发生于南半球的ITCZ上,生成时的环流条件是ITCZ两侧偏东信风、偏西季风都在加强,尤其是对流层上部气流散开区移近,辐散强烈增加。同时,对流层下半部的R₁数出现最小值。

Irma迅速增加时,总动能增加主要来自制造项,说明这时有很强的非地转加速。而对制造的最大贡献者,是有效位能的释放。由此表明了内源和积云对流总体影响的重要性。

而Irma迅速增强时涡动能的增加,最重要的源是较小尺度运动或次网格尺度动能,主要贡献在对流层上部。少量的贡献来自区域平均气流动能的转换。因此,扰动的发展,从较大、较小两种尺度运动中都取得能量,但后者重要得多。制造项也有重要作用,但主要贡献在对流层下部。此外,扰动还向周围大气输出涡动能,因此起着涡动能制造并输出的作用。

一、引 言

在1987年1至2月澳大利亚季风试验(AMEX)第二阶段,我国曾派出考察船向阳红五号参加工作。中美澳三国的科学工作者,在船上合作进行了大量的海洋和气象观测。除了航行途中外,从1月13日到2月14日的一个月期间,向阳红五号停泊在澳大利亚北部的卡奔塔利亚湾中约11.5°S, 139.0°E处从事固定观测。在此期间,遭遇到一些有意义的南半球天气系统。利用船上的观测及其他资料,我们对这些系统进行了研究,本文就是对其中一个系统,热带风暴Irma发展的分析结果。

Irma是一个不强的热带风暴,最大风速仅约20 m/s,1月19日在卡奔塔利亚湾生成,当

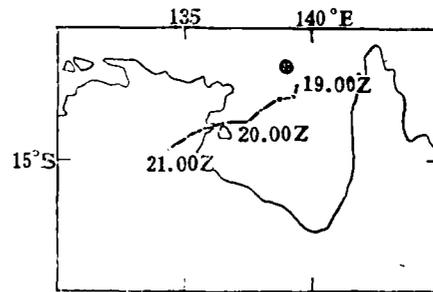


图1 热带风暴Irma的路径图
(旁注数字为日、时。⊕是向阳红五号的停泊位置)

* 本文于1988年3月10日收到,1988年12月21日收到修改稿。

日在向阳红五号处造成150.7mm的日雨量。图 1 给出它的路径。本文对它生成时期的动能收支和环流条件进行了分析。

二、热带风暴Irma生成的大尺度环流条件

根据欧州中期预报中心 (ECMWF) 和美国国家气象中心 (NMC) 每日1200GMT 5×5 经纬度格距的热带客观分析资料, 参考考察船的观测及日常天气报告, 我们分析了各标准等压面的环流形势, 图 2 是 1 月 19 日 1200GMT 850 和 200hPa 流线图。可见 Irma 生成于南半球的 ITCZ 上。它从 16 日以来一直在发展, 其两侧大范围内偏东风和偏西风速都在增加(图 3), 增强了切变涡度, 为风暴发展提供了有利条件。这一情况同澳大利亚地区

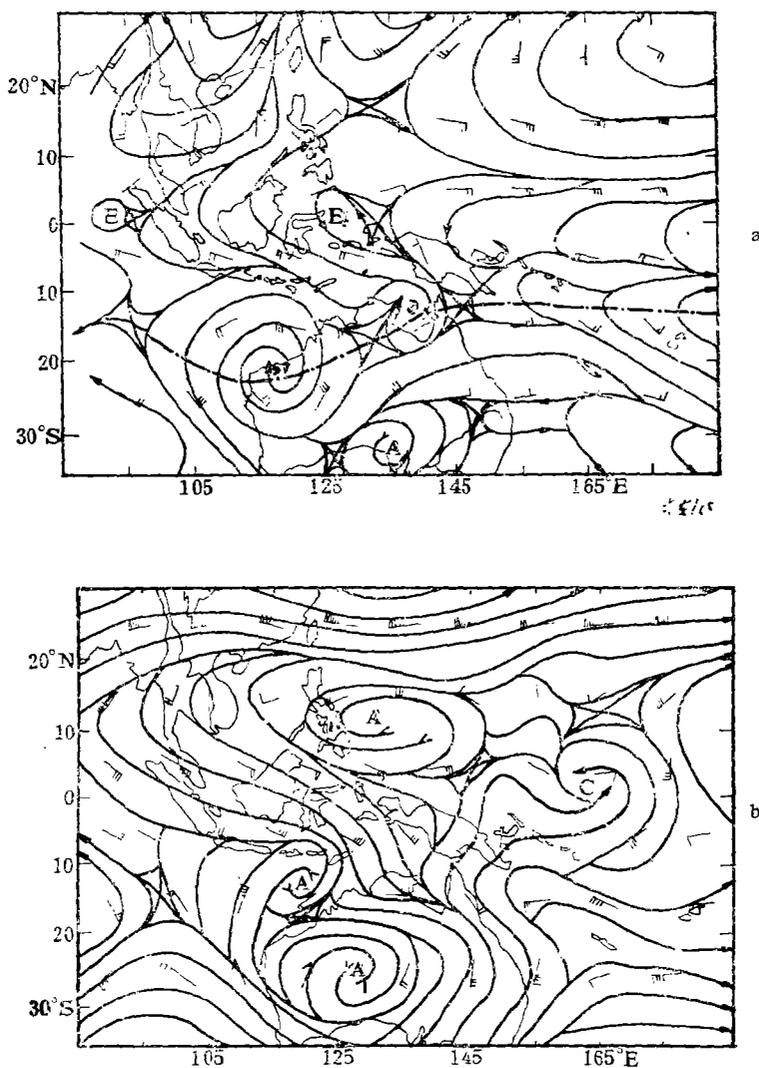


图 2 1987年1月19日12Z热带流线分析
(点划线是ITCZ, a 850hPa, b 200hPa)

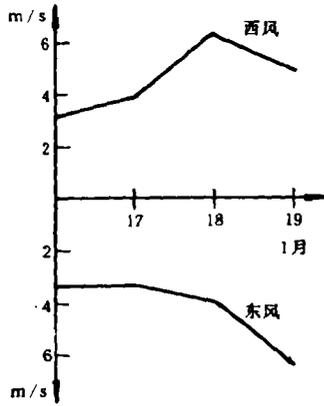


图3 ITCZ两侧135—170°E范围内的平均风速变化
(由每日12Z ITCZ两侧各8个格点风速平均而得)

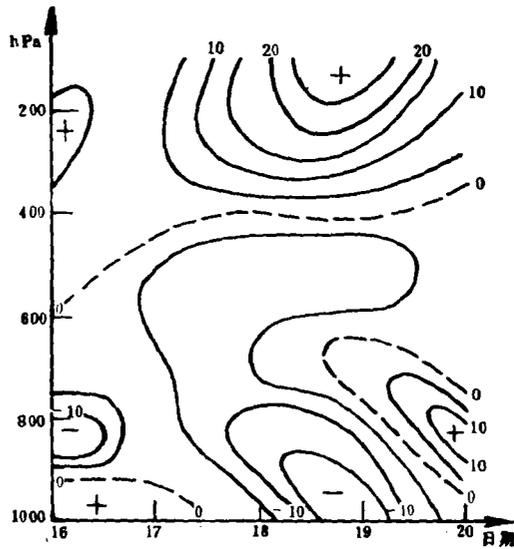


图4 卡奔塔利亚湾区域平均散度时间剖面图
(单位: $10^{-5} s^{-1}$)

热带风暴加强条件的研究结果是一致的^[1,2]。

但对风暴生成更有意义的变化发生在对流层高层。几天以来,100及200 hPa上位于150°E以东的气流散开区一直向西移动。19日到达卡奔塔利亚湾上空(如图2b所示),为风暴形成提供了有利的高空流出条件。卡奔塔利亚湾区域平均的各层散度时间剖面(图4)反映了这种高层辐散急剧增加的变化。而19日以前,低层辐合一直增加,这与图3所示的ITCZ两侧东西风速都在加强是一致的。

卡奔塔利亚湾地区被陆地或岛屿环绕,并非一个开阔的海域。但由气候统计,那里却是南太平洋热带风暴、飓风生成、活动的主要地区之一^[1,2]。作者以为这是因为在南半球的热带风暴季节,该地区或位于平均图上副热带高压的中心^[3],或处于两个副高之间的气流出口区,高空流出条件较为有利,而在低空,南半球ITCZ的平均位置^[4]又正通过这里之故。

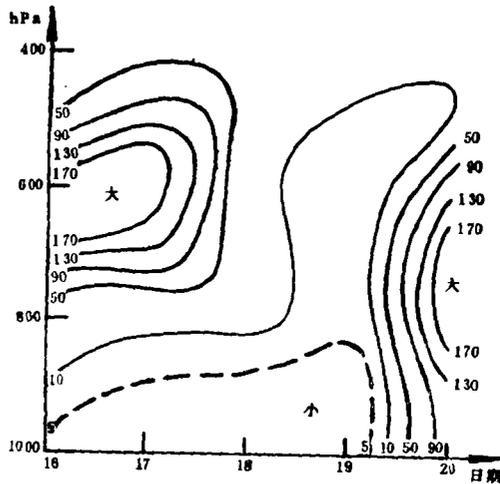


图5 R_i 的时间剖面图

应用向阳红五号的探空记录,计算了对流层的理查孙数 R_i ,图5是 R_i 的时间剖面图,可见在Irma生成前, R_i 数的小区只限于低层,但在发展最快,风暴生成的19日(这天暴雨也最强), R_i 的小值区扩展到整个中下对流层,这一深厚的 R_i 小值区提供了对流活动极力有利的层结条件。

三、Irma生成时的动能收支

应用前述网格点资料,我们计算了19日前后卡奔塔利亚湾地区 $135^{\circ}-145^{\circ}\text{E}$, $10-20^{\circ}\text{S}$ 的 10×10 经纬度范围内的动能收支。

ENMWF的网格点资料,是采用多变量最佳插值方法,对非标准记录每六小时同化一次得到的。这是当前先进的客观分析方法,可靠性较高,因此这种格点资料被国内外广泛采用。在计算以前,我们又在各层格点值图上填上了考察船的记录,进行对比,发现二者相当吻合。

我们所使用的动能方程和Kung^[5]使用的相似,区域平均总动能方程为:

$$\left[\frac{\partial K}{\partial t}\right] = -[\nabla \cdot \mathbf{V}K] - \left[\frac{\partial \omega K}{\partial p}\right] - [\mathbf{V} \cdot \nabla \phi] - [E] \quad (1)$$

区域平均的涡动动能方程为:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial K_e}{\partial t}\right] = & -[\nabla \cdot \mathbf{V}K_e] - \left[\frac{\partial \omega K_e}{\partial p}\right] - \left\{ [u'\omega'] - \frac{\partial [u]}{\partial p} \right. \\ & \left. + [v'\omega'] - \frac{\partial [v]}{\partial p} \right\} - [\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi'] - [E'] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $[X]$ 表示任意变量 X 在某一等压面上的区域平均值, X' 是 X 与区域平均值 $[X]$ 的偏差,表示涡动量。 K 和 K_e 是单位质量的总动能和涡动动能。

$$K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad K_e = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$$

耗散项 $[E]$ 和 $[E']$,表示了摩擦影响和网格尺度和次网格尺度间的能量转换,动能制造项又可写为:

$$-[\mathbf{V} \cdot \nabla \phi] = -[\omega \alpha] - [\nabla \cdot \mathbf{V} \phi] - \left[\frac{\partial \omega \phi}{\partial p}\right] \quad (3)$$

$$-[\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi'] = -[\omega' \alpha'] - [\nabla \cdot \mathbf{V}' \phi'] - \left[\frac{\partial \omega' \alpha'}{\partial p}\right] \quad (4)$$

C 是区域平均气流 $[\mathbf{V}]$ 的动能向涡动动能的转换:

$$C = -[u'\omega'] - \frac{\partial [u]}{\partial p} - [v'\omega'] - \frac{\partial [v]}{\partial p}$$

ω 是气压坐标中的铅直速度,采用运动学方法计算。然后假定在计算的顶层(本文取为100 hPa)为0,用O'Brien方案^[6]对它及散度进行了订正。 ϕ 是位势高度,其余都是常用符号。

方程(1)–(4)的每一项从1月17–21日的值都进行了计算。 $[E]$ 、 $[E']$ 、 $-\left[\frac{\partial \omega \phi}{\partial p}\right]$ 、 $-\left[\frac{\partial \omega' \alpha'}{\partial p}\right]$ 诸项则是作为方程中其余各项的余项得到的。

表1给出卡奔塔利亚湾地区各等压面间区域平均的总动能和涡动动能值,可见Irma的最强发展时期在18至19日。

这里我们只给出18日至19日动能收支各项(表2)。表2中的时间变化项,是由19日12Z及18日12Z之差得出,其余的项则是由19日12Z与18日12Z格点值的平均算出,我们把

表 1 Irma上空各日1200GMT各层区域平均的总动能和涡动动能(单位: 10^5J/m^2)

| 层次(hPa) | | 日期 (1987年1月) | | | | |
|---------|----------|-----------------|------|------|------|------|
| | | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| [K] | 200—100 | 0.58 | 0.59 | 1.00 | 1.11 | 0.91 |
| | 500—200 | 1.19 | 0.74 | 1.58 | 1.50 | 1.51 |
| | 700—500 | 0.33 | 0.45 | 1.12 | 0.88 | 1.00 |
| | 850—700 | 0.27 | 0.37 | 0.72 | 0.85 | 0.95 |
| | 1000—850 | 0.15 | 0.23 | 0.41 | 0.66 | 0.87 |
| | 总 和 | 2.52 | 2.38 | 4.83 | 5.01 | 5.23 |
| [Kc] | 200—100 | 0.15 | 0.16 | 0.25 | 0.27 | 0.21 |
| | 500—200 | 0.38 | 0.47 | 0.97 | 0.78 | 0.84 |
| | 700—500 | 0.31 | 0.41 | 0.90 | 0.75 | 0.77 |
| | 850—700 | 0.25 | 0.36 | 0.65 | 0.73 | 0.59 |
| | 1000—850 | 0.12 | 0.21 | 0.38 | 0.54 | 0.47 |
| | 总 和 | 1.20 | 1.61 | 3.14 | 3.07 | 2.88 |

表 2 Irma生成时(19日00GMT)区域平均的动能平衡

(单位: 动能 10^4J/m^2 , 其余各项 W/m^2)

| 项 分层 (hPa) | [K] | $[\frac{\partial K}{\partial t}]$ | $[-\nabla \cdot \mathbf{VK}]$ | $-\left[\frac{\partial \omega K}{\partial p}\right]$ | $[-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi]$ | $-\left[\omega \alpha\right]$ | $[-\mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \phi]$ | $-\left[\frac{\partial \omega \phi}{\partial p}\right]$ | $[-E]$ | |
|--------------------|------|------------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------|--|---|---------|------|
| 对流层上部 (500—100) | 1.63 | 1.44 | 0.21 | 0.12 | 202.81 | 278.99 | -457.16 | 380.99 | -201.71 | |
| 对流层下部 (850—500) | 1.16 | 1.19 | -0.29 | -0.07 | -28.17 | 154.99 | 66.61 | -249.77 | 29.72 | |
| 边界层 (1000—850) | 0.29 | 0.20 | 0.13 | -0.05 | 1.79 | 17.69 | 20.40 | -36.30 | -1.87 | |
| 总 计 | 3.08 | 2.84 | 0.05 | 0.00 | 176.44 | 451.66 | -370.15 | 94.92 | -173.66 | |
| | [Kc] | $[\frac{\partial Kc}{\partial t}]$ | $[-\nabla \cdot \mathbf{VKc}]$ | $-\left[\frac{\partial \omega Kc}{\partial p}\right]$ | $[-\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi']$ | $-\left[\omega' \alpha'\right]$ | $[-\mathbf{V}' \cdot \mathbf{V}' \phi']$ | $-\left[\frac{\partial \omega' \phi'}{\partial p}\right]$ | $[-E']$ | C |
| 对流层上部 (500—100) | 0.70 | 0.69 | -0.09 | 0.15 | -0.83 | -0.63 | -0.28 | 0.08 | 1.39 | 0.08 |
| 对流层下部 (850—500) | 1.03 | 0.90 | -0.23 | -0.08 | 0.49 | -0.06 | -0.06 | 0.61 | 0.70 | 0.04 |
| 边界层 (1000—850) | 0.27 | 0.19 | 0.13 | -0.06 | 0.19 | -0.19 | 0.04 | 0.35 | -0.08 | 0.01 |
| 总 计 | 1.99 | 1.77 | -0.19 | 0.00 | -0.15 | -0.89 | -0.30 | 1.04 | 2.01 | 0.13 |

它们当作19日00Z的值。由于资料时空分布不够稠密,计算结果会有一些不确定性,但从结果看来,相当合理,这表明计算至少在定性方面是可信的。

表1表明在这几天,涡动动能与总能量级一样,只是数值略小一点,而一般前者应比后者小一个量级(例如文献[7]),这反映了热带风暴这种较强的天气扰动的特点。

表2上半部给出了热带风暴Irma生成时的总动能收支。同一般情况一样,主要项是动能制造项 $[-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi]$ 和耗散项 $[-E]$ 。对Irma生成整层动能增加最大的贡献者是 $[-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi]$ 项,而且主要在对流层上部。除19日外,其余几日,这一项都是负值,说明在风暴生成时

对流层上部由非地转减速变成了有强的非地转加速。而对 $-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi'$ 的贡献,又主要来自有效位能的释放 $-\omega \alpha$ 。其最大也是在对流层上部。这表明与积云对流有关的增暖和强上升运动的总体影响的重要性。然而,制造的动能绝大部分又通过 $-\mathbf{E}$ 项耗散为其他尺度动能。比起这两项,水平和铅直通量辐散项都小得多。因此 Irma 的生成,能量主要来自内源而非外源。

以下着重讨论涡动动能 $[\text{Ke}]$ 的收支情况。表 2 下半部给出了 Irma 生成时(19 日 00 GMT)区域平均涡动动能平衡情况,表 3 则给出涡动动能平衡各项的逐日变化。

表 3 Irma 上空区域平均涡动动能收支各项的逐日变化(单位: W/m^2)

| 项 | 日期 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|--|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 分层 (hPa) | | | | | |
| $-\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi'$ | 对流层上部 (500—100) | 0.73 | 0.39 | -2.07 | -1.49 | -1.12 |
| | 对流层下部 (850—500) | 0.21 | 0.21 | 0.65 | 0.80 | 0.89 |
| | 边界层 (1000—850) | -0.11 | 0.15 | 0.21 | 0.54 | 0.38 |
| | 总 计 | 0.84 | 0.76 | -1.21 | -0.15 | 0.15 |
| $-\mathbf{V} \cdot \nabla \text{Ke}$ | 对流层上部 (850—100) | 0.05 | -0.09 | -0.32 | -1.07 | -0.28 |
| | 对流层下部 (850—500) | 0.16 | -0.12 | -0.56 | 0.75 | -0.80 |
| | 边界层 (1000—850) | 0.02 | 0.09 | 0.20 | 0.67 | -0.09 |
| | 总 计 | 0.24 | -0.13 | -0.68 | 0.35 | -1.16 |
| $-\left[\frac{\partial \omega \text{Ke}}{\partial p}\right]$ | 对流层上部 (500—100) | 0.07 | 0.07 | 0.35 | 0.27 | 0.25 |
| | 对流层下部 (850—500) | -0.03 | -0.07 | -0.17 | -0.07 | -0.09 |
| | 边界层 (1000—850) | -0.04 | -0.01 | -0.18 | -0.20 | -0.16 |
| | 总 计 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| C | 对流层上部 (500—100) | -0.02 | 0.03 | 0.17 | 0.15 | 0.00 |
| | 对流层下部 (850—500) | -0.03 | 0.00 | 0.09 | 0.06 | -0.11 |
| | 边界层 (1000—850) | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| | 总 计 | -0.05 | 0.04 | 0.27 | 0.21 | -0.11 |

因为 Irma 生成时其闭合环流区域的直径约有 1000 km, 因此以 $5^\circ \times 5^\circ$ 格距的格点值对 $10^\circ \times 10^\circ$ 区域平均值的偏差, 来表示涡动动能, 对描述 Irma 这一扰动的发展, 还是较合适的。从表 2 可见, 在 Irma 生成时, 整个对流层 Ke 也都是增加的, 其值与 K 的增加同量级, 只略小一点, 这也是与一般情况不同的^[7]。

从表 2 表 3 看来, $[\text{Ke}]$ 收支各项, 除 C 差不多小一个量级以外, 其余各项量级相同, 较大的两项是涡动动能制造项 $-\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi'$ 和耗散项 $-\mathbf{E}'$ 。

由表 3 可见这几天对流层下部和边界层中, 制造项 $-\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi'$ 大体都是正值且不断增

加,说明对流层下部有较强的非地转加速,从而制造涡动动能,这与 Irma 的扰动在对流层下半部较强是一致的。但在对流层上部,这一项的正值却不断减小,在 19 日负值最强,表明 Irma 生成时对流层上部是非地转减速和涡动动能的破坏区。而且上下层总和为负,即上层的破坏超过了低层的制造。

$-[E']$ 是特别值得注意的一项,图 6 给出了各层 $-[E']$ 的逐日变化,除边界层外, $-[E']$ 项在 19 日以前不断增加,在 Irma 发展最快的 18 至 19 日, $-[E']$ 在对流层下部和上部都达到了高峰,尤其在对流层上部更大即它们供给了大量涡动动能。而在 19 日以后,对流层下部的 $-[E']$ 变为负值,即消耗动能,而上部却仍维持较大的正值。看来,这都是在 Irma 生成和活动时期,对流活动旺盛,次网格尺度扰动能量大量向网格尺度转变的结果。这样, Irma 17 至 18 日的发展,是制造项和次网格尺度动能转换共同作了贡献,而在 Irma 发展最快的 18 至 19 日,由于整层制造项的作用是破坏涡动动能,因而次网格尺度动能的转换,成了唯一重要涡动动能源。这些充分说明了热带风暴过程中积云对流作用的重要。至于在边界层内, $-[E']$ 项的负值则无疑是摩擦消耗的结果。

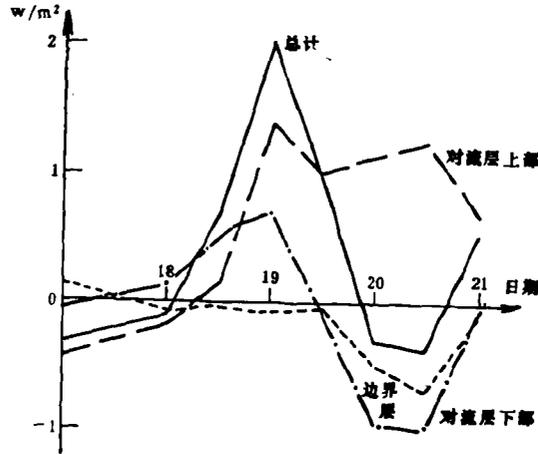


图 6 Irma 上空区域平均涡动动能平衡中,耗散项 $-[E']$ 的演变

水平通量散度项 $-\nabla \cdot \mathbf{V}K_e$ 在 Irma 生成时,达到最小且为负(表 3),说明它发展时不仅自身涡动动能增加,还向区域外输送。而铅直通量散度项 $-\left[\frac{\partial \omega K_e}{\partial p}\right]$ 则表现出对流活动影响,将动能向上输送。看来这些是热带扰动的共同特征,因为一些长期平均结果也是这样^[5,6]。

区域平均气流的动能向涡动动能的转换项 C,对 Irma 的发展,也是一个能源,虽然数值不大,但随 Irma 的发展,它是增加的。在 Irma 发展最快的 18-19 日,它也达到最大。这样, Irma 的生成,从较大、较小两个尺度都获得能量,虽然,后者重要得多。

五、结 论

现在将对 Irma 生成的主要分析结果归纳如下:

1. 南半球热带风暴 Irma 形成于南半球的 ITCZ 上,ITCZ 两侧的偏东信风和偏西季风同时加强,尤其是高空气流散开区移近,辐散急剧增加,提供了风暴生成的有利条件。
2. 在 Irma 发展最迅速及降水相应最大时的 Richardson 数,比起以前和以后,在对流层下半部达到最小。
3. 在 Irma 生成时,区域平均涡动动能和它的时间变化,达到与总动能、总动能时间变

化同样量级。发展最迅速时总动能增加的主要贡献来自对流层上部的动能制造。这时它由其余几日的负值突变为较大的正值,说明发展迅速时,对流层上部有很强的非地转加速。而在制造项中,最大的贡献又来自有效位能转换项 $[\omega\alpha]$ 。这些都表明在动能平衡中,内源及积云对流总体作用的重要性。

4. 在涡动动能收支中,主要的项是制造项和次网格尺度向网格尺度能量的转换。对 Irma 起初的发展,制造项的贡献较大,尤其在扰动较强的对流层下部,制造项一直为正值且不断增加。但在 Irma 发展最迅速时,整个对流层制造项总和变为负值,这时来自次网格尺度的涡动动能转换成了最重要的能源。这样,从动能收支的角度,也表明在热带风暴发展过程中,积云对流活动十分重要。来自区域平均风动能的能量转换,对涡动动能增加也有贡献。这样,扰动在发展过程中,由较大,较小两个尺度都取得能量,虽然后者重要得多。但另一方面,它也向周围输出涡动动能。

参 考 文 献

- [1] McBride, J. L., and T. D. Keenan, Climatology of tropical cyclone genesis in the Australian region, *J. Climat.*, 2, 13-33, 1982.
- [2] Holland, G. J., Tropical cyclones in the Australian/Southwest Pacific region, *Atmos. Sci. Pap.* 363, CSU, 1983.
- [3] Sadler, J. C., The upper tropospheric circulation over the global tropics, UHMET 75-05, Univ. of Hawaii, 1985.
- [4] Atkinson G. D., and J. C. Sadler, Mean cloudiness and gradient-level wind charts over the tropics, AWS Tech. Rep. 215, 1970.
- [5] Kung, E. C., Balance of kinetic energy in the tropical circulation over the Western Pacific, *Quart. J. R. M. S.*, 101, 293-312, 1975.
- [6] O'Brien, J. J., Alternative solution to the classical vertical velocity problem, *J. Appl. Met.*, 9, 197-203, 1970.
- [7] Tsui, T. L., and E. C. Kung, Subsynoptic scale energy transformation in various severe storm situation, *J. Atmos. Sci.*, 34, 98-110, 1977.
- [8] Ding, Y., and E. R. Reiter, The kinetic energy budget over the West Pacific during dominant wind and active monsoon regimes, *Arch. Met. Geoph. Biocl.*, Ser. A, 32, 201-229, 1983.

THE KINETIC ENERGY BUDGET AND CIRCULATION BACKGROUND OF TROPICAL STORM IRMA DURING AMEX PHASE II

Wang Zuoshu Zhang Ruojun Peng Zhengyi

(Academy of Meteorological Science, SMA)

Abstract

Using the data from observation on Chinese research vessel Xiang Yang Hong No. 5 and other sources during AMEX Phase II, the kinetic energy budget and circulation background of tropical storm Irma was analyzed.

Irma was formed on the ITCZ of the Southern Hemisphere. That the easterlies trade and westerlies monsoon on both sides of the ITCZ strengthened, the

strong divergent flow in upper troposphere emerged, and the Richardson number (Ri) in middle and lower troposphere decreased to a minimum, contributed much to the formation of Irma.

The largest contribution to increasing kinetic energy in the general flow was generation term $-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi$. As to the generation term, the conversion of available potential energy to kinetic energy $-\omega \alpha$ was the largest contribution. It suggested that strong ageostrophic acceleration was existed, and the internal sources and the ensemble effect of cumulus convection played an important role in increasing kinetic energy of Irma.

To the increasing of eddy kinetic energy during the period of Irma rapidly intensifying, the most important source was dissipation term and the minor source was the energy conversion from the kinetic energy of area-mean flow to eddy kinetic energy. Therefore, the eddy kinetic energy of developing tropical disturbance is extracted both from smaller and larger scale motion. On the other hand, the disturbance generates and exports eddy kinetic energy to environmental atmosphere acting as a generator and exporter of eddy kinetic energy.