

登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究*

孙建华 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 对 9406 (Tim) 台风登陆北上并与西风带槽相互作用, 引发我国东部大暴雨的过程进行了诊断研究, 并与北美的个例进行了对比。发现 Tim 与北美的 Hazel, Agnes, Camile 飓风虽同属于低纬度系统北移被中纬度西风槽所“捕获”, 但上述北美飓风均转变为锋面气旋, 发展过程基本上与挪威学派经典的 A 类气旋及 Petterssen 定义的 B 类气旋相似, 而 Tim 不属于上述两类情况。对涡度方程的诊断表明, 此过程在低层除平流项外, 散度项也比垂直输送项和扭转项大一个量级。而高空散度项、垂直输送项和扭转项同量级, 此时扭转项的贡献也不可忽视。对水汽来源的诊断表明, 对华北和东北的降水而言, 尽管孟加拉湾有丰沛的水汽输送至东亚, 但是南海和西太平洋的水汽输送仍有重要贡献。

关键词: 台风; 暴雨; 中尺度对流系统

1 引言

人们已经注意到, 夏季发生在中纬度的大暴雨一般都有来自热带的天气系统的影响。东亚是世界上有名的季风区, 夏季热带系统活跃, 而西太平洋是世界上台风发生最频繁的地区, 常有台风在我国登陆。当条件有利时, 可与中纬度系统发生相互作用, 引发特大暴雨。

由于中低纬相互作用这一问题的重要性, 因而, 国内外学者对此已进行了一些研究。Palmen^[1], Chien 和 Smith^[2]及 DiMego 和 Bosart^[3,4]已分别对深入北美大陆的 Hazel 飓风、Camile 飓风、Agnes 飓风以及它们与中纬度系统的相互作用进行了研究。Zhao 和 Mills^[5]已对深入澳洲大陆与中纬度低槽相互作用并引发澳大利亚近 200 年来罕见特大暴雨的热带低压过程进行了诊断研究。另外, 我国的气象学者也对“75.8”特大暴雨过程进行了深入研究^[6~8]。这些研究对深入认识中低纬系统相互作用的机理提供了帮助。

关于中低纬系统相互作用的机理已提出了一些看法。Palmen^[1]认为, 冷空气下沉, 暖空气上升使有效位能转化为动能, 是能量的主要来源, 潜热也有一部分转化为动能, 从而部分地补偿了消耗的动能。Chien 和 Smith^[2]强调了潜热释放对气旋重新加深的作用, 认为边界层以上次网格尺度向大尺度的动能转换也是动能的重要来源。DiMego 和 Bosart^[3,4]则强调了高空非辐散风对动能制造的作用。Zhao 和 Mills^[5]对澳大利亚个例进行的研究, 认为冷暖平流和潜热对低压的发展都有很重要的作用。应当指出, 虽然对中纬度系统与低纬度系统的相互作用已进行了一些探讨, 但因这一问题本身的复杂性, 至

今仍未完全弄清,还有许多问题有待继续深入研究,如东亚地区与北美地区中低纬系统相互作用的过程有何重要异同;在相互作用过程中,不同尺度系统的结构特征及其相互的影响;相互作用过程中的能量和水份的来源何在;1994年夏季风异常与中低纬度相互作用有何联系等等。

为了回答上述问题,应当继续从个例分析入手。我们注意到,1994年热带和中纬度系统都比较活跃。因而本文选取1994年7月中旬的个例进行动力诊断研究。由于本文着眼于中低纬系统的作用,因此,将主要集中研究两系统合并前后华北地区的情况。为了加深对问题的理解,将东亚的相互作用过程与Palmen等^[1]研究的北美个例的情况作了对比,同时,还探讨了这种相互作用过程同东亚特有的季风环流的联系。

本文所用的资料,包括格点资料、测站地面和探空资料、卫星云图资料等。特别是为了分析对流云团的变化,还使用了日本GMS卫星每小时一次的云图资料。

2 9406 (Tim) 登陆台风引发暴雨之天气过程

1994年热带辐合带(ITCZ)很强,位置偏北,使西太平洋和南中国海的台风增多,中高纬西风带系统也较活跃,使中低纬系统相互作用较强。其中9406号台风登陆后北上,其倒槽与西风带槽相互作用,我国从南方到北方大片地区出现了大暴雨。1994年7月12日00时至13日00时,北京降水达138 mm,为近年来所罕见。在下面的分析中,为叙述方便,将TT代表世界时(图上所标出的时间亦为世界时),DD代表日期,记为TT/DD。

2.1 台风路径及降水过程

图1给出了9406号台风的路径,该台风于7月8日出现在菲律宾以东洋面,中心

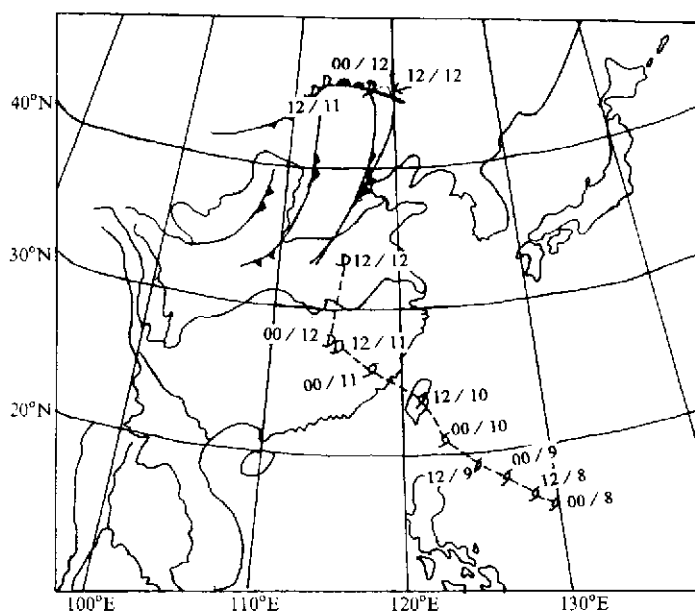


图1 1994年7月9406号台风与其相互作用的西风槽的路径

位于 (15.8°N , 129.7°E), 它生成后向西北移动, 7 月 10 日过台湾岛, 于 00/11 时在福建省晋江到泉州之间登陆, 以后该台风在北上过程中填塞, 00/12 冷锋进入台风低压西北部。到 13 日, 低压北上与蒙古附近的气旋合并成一个弱的锋面气旋。图 1 同时给出了 11、12 日 00 和 12 时的锋面位置。00/11 时河套北部有一锋面气旋向东移动, 12/11 时冷锋位于呼和浩特—太原—西安一线, 冷锋的尾部进入由 9406 号台风演变成的低压内, 12 日冷锋维持在北京—郑州附近。

图 2 为 00/11~00/12, 00/12~00/13 的 24 小时降水量。在这次过程中在中国东部的大部分地区都有降水。11 日福建、江西的雨量较大, 黄河流域和华北的降水较少。12 日一条雨带从东北一直延伸到华南, 降雨量比 11 日大, 在九江有 239 mm 的中心, 河南安阳有 225 mm 的中心, 特别要强调的是, 华北北部、东北南部出现了降雨量在 100 mm 以上的大范围的大暴雨区, 而这里不是登陆台风系统本身所在的区域, 而是台风北侧中低纬度系统相遇的区域。

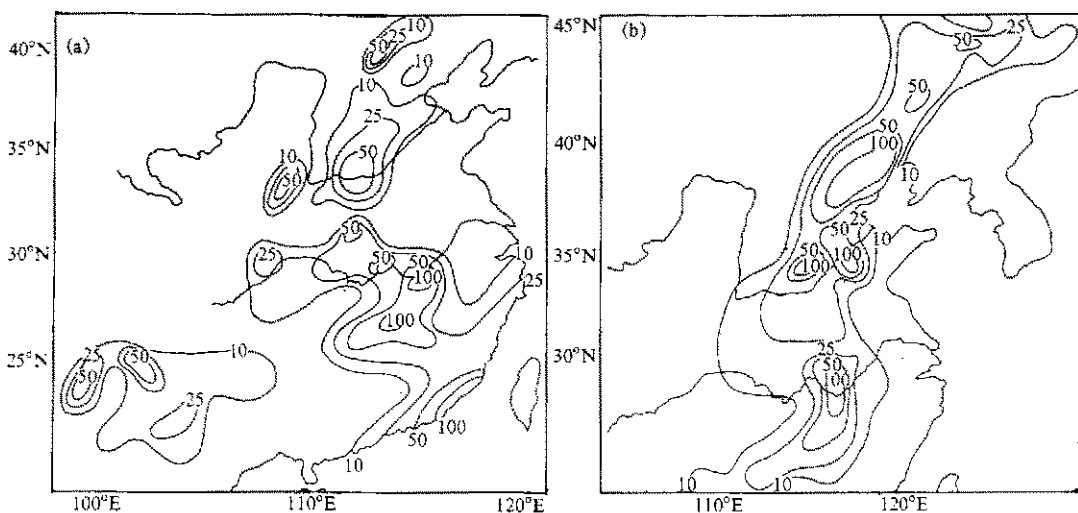


图 2 24 小时降水量

(a) 1994 年 7 月 11 日 00 时至 12 日 00 时; (b) 1994 年 7 月 12 日 00 时至 13 日 00 时

2.2 高空环流形势及演变过程

在 7 月 10 日前后的几天中, 500 hPa (图 3a) 上中高纬地区形势较稳定, 西西伯利亚及贝加尔湖附近有一阻塞高压, 有利于脊前偏北气流引导蒙古冷空气南下。脊前的低槽位于河套附近。台风在福建沿海登陆后, 西太平洋副高北抬, 副高西侧的偏南气流、西风槽前的西南气流有利于引导台风低压北上。在 500 hPa 上台风低压被西风带低槽吸收后 (00/12 时), 一个深槽从华北伸展到 30°N 以南, 但仍为暖心结构 (图 4a), 变性较缓慢, 具有热带系统的特征, 也表明此热带低压系统较强。另外, 河套附近虽是冷平流区, 但由于冷空气不是太强, 所以冷空气进入低压系统后, 它未迅速发展为强大的锋面气旋。

在低层, 00/11 时台风在福建沿海登陆时, 850 hPa 低压中心为 1346 位势米 (图

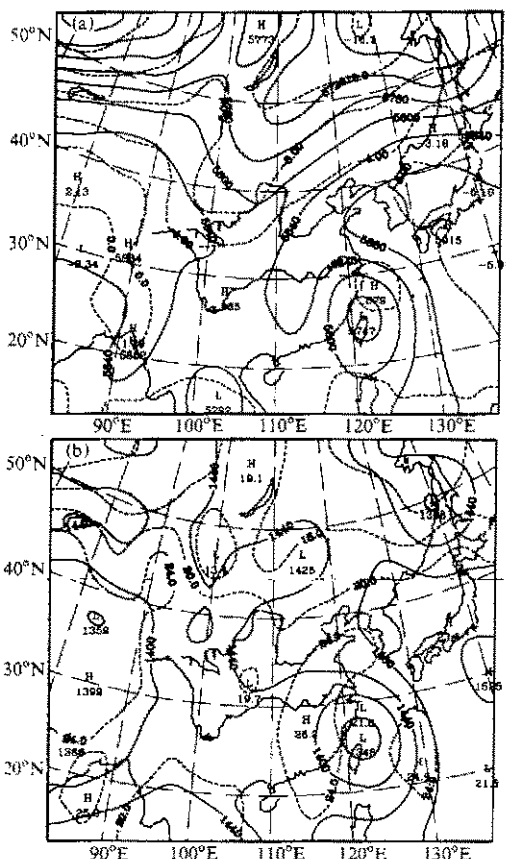


图3 1994年7月11日00时的高度场和温度场
(a) 500 hPa; (b) 850 hPa

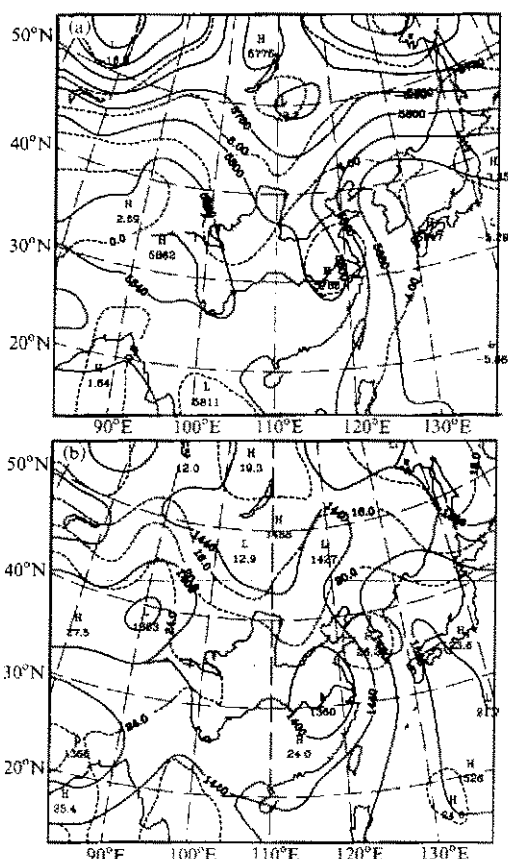


图4 1994年7月12日00时的高度场和温度场
(a) 500 hPa; (b) 850 hPa

3b), 00/12时中心位于湖南省, 低压中心为1360位势米(图4b), 强度有所减弱, 可以看到与西风槽结合后, 台风低压本身并未突然加深。而中低空重要的现象是台风具有非常明显的非对称结构, 其东侧及东北侧一直维持很强的东南急流。这支气流与台风倒槽中很强的辐合有关, 它一直存在于对流层的中低层, 并随台风倒槽的北移而向北推进。

2.3 中尺度云团特征

从卫星云图上, 可以很清楚地看到台风与中纬度冷锋的相互作用的过程。从实测资料看, 这次过程存在一系列的强降水中心, 与此相对应, 雨量分布具有明显的中尺度特征。我们用日本GMS卫星获得的每小时一次的TBB分布图, 较好地显示了这些中尺度对流系统的特征。图5和图6分别是11日我国东部较大范围和12日北方较小区域的TBB分布。从云图上可以清楚地看到热带云系和中纬度系统云系逐渐接近到相互合并的过程(图5), 以及更清晰地辨认出我们最关心区域云系发展、演变的较细微结构(图6)。在图上我们将云顶温度小于 -46°C 、 -59°C 和 -66°C 的区域分别以空白区、点

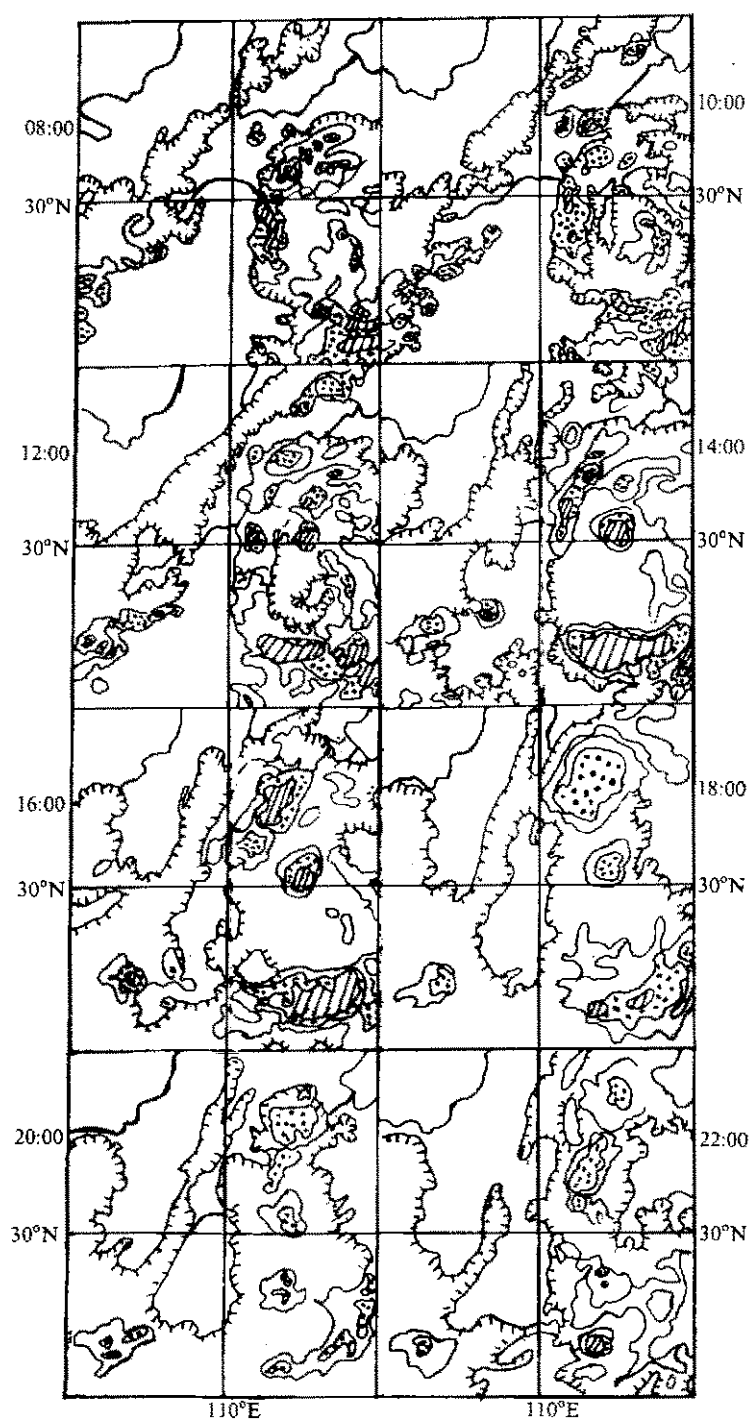


图5 1994年7月11日08时至22时我国东部云系演变图

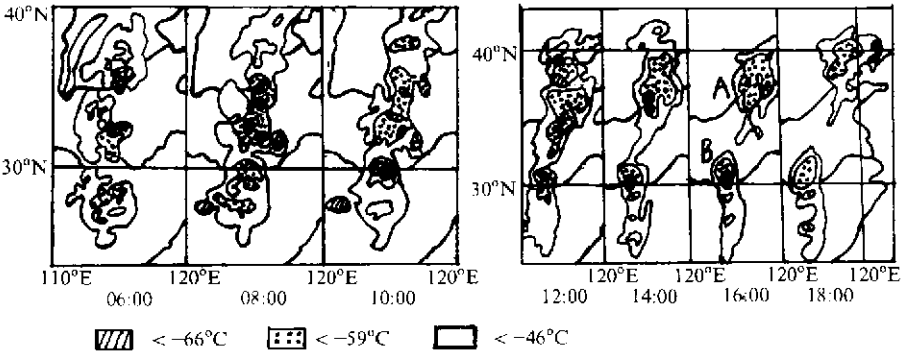


图 6 1994 年 7 月 12 日 06 时至 18 时我国北方地区云系演变图

影区和斜线区标出。图 5 给出了 11 日 08 时至 11 日 22 时大范围云系的演变情况，可以清楚地看到台风低压云系位于长江中下游至江南、华南一带，大约相当于 110°E 以东的区域。而中纬度云系位于山西、陕西等河套地区，即 110°E 以西的区域。两片云系之间，即黄河与长江中游为无云区。11 日 10 时两条云带开始接近，两个系统的接近区有许多小的对流中心。12 时两云区进一步移近并合并，云系合并后小的对流中心有合并的趋势，由 γ 中尺度对流系统发展为 β 中尺度对流系统。14 时在黄河南面，110°E 以东出现南北向强对流云带。16 时，在这片区域中出现大片云顶温度低于 -66°C 的区域，这片云区后来影响了华北、东北。

12 日北方的情况（图 6），由于冷锋与台风倒槽的相互连接，06 时南北向云系在黄淮一带加强，08 时云团在河南境内强烈发展，在长江以北至少有 5 个云顶小于 -66°C 的对流中心，其水平范围约为一个纬距，具有明显的 β 中尺度的特点，10 时云区向黄河以北移动。12 时在河北省境内已有云团发展，14 时，南方与台风低压有关的云系少动，北方的对流云系已移至黄河下游至渤海湾一带，南北两片雨区呈分裂状态。16 时，南北两云区已完全分开，18 时，北方云区移向河北北部和辽宁西部。从对流云系的演变可以看出，这次北方暴雨与冷锋和台风倒槽的相互作用有关，这种相互作用使得冷锋逐渐加强，新生的对流云团在冷锋附近沿高空引导气流自西南向东北方向移动，造成了近年来北方少有的大暴雨。

3 9406 (Tim) 登陆台风的动力学的诊断研究

本文对一些基本的物理量场作了分析。同时，也对相互作用过程中动能和水汽来源作了探讨。

3.1 散度场的诊断

为了清楚地揭示西风带槽和热带低压系统相互合并的过程，我们对散度作了分析。图 7 是 12/11、12/12 时的 850 hPa 散度分布（其他时次图略）。从图上看，辐合最大值不在低压中心的位置，而是位于台风低压的西北部，辐合在中层最强。虽然我们采用

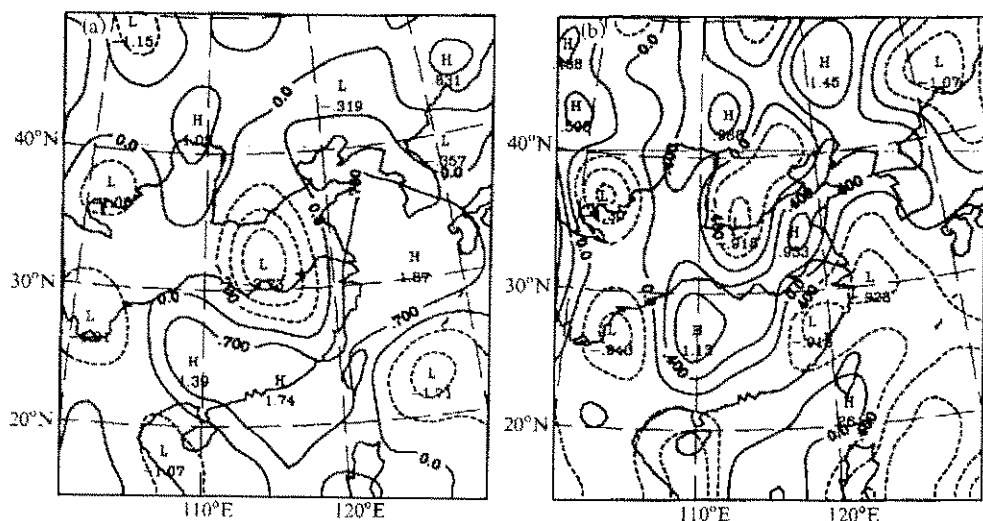


图7 1994年7月11、12日850 hPa散度场(单位: 10^{-5} s^{-1})

(a) 11日12时; (b) 12日12时

的资料的分辨率较低, 计算出的散度值可能比实际的散度值偏小, 但仍可以定性地说明问题。00/11时(图略)可以看到两个独立的辐合区, 分别与锋面和台风倒槽对应, 从某种意义上讲, 在东亚地区台风倒槽(而不是低压本身)可能对天气有更直接的影响^[9,10]。12/11时(图7a)这两个辐合区合并, 辐合增强。北美 Hazel 飓风, 也见到过辐合中心合并的类似情况(见文献[1]中的图20)。辐合中心的合并与 TBB(图5)描写的云系的合并时间是很相近的。合并前的 00/11, 850 hPa 上的辐合中心为 $-1.85 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略), 合并后的 12/11 时为 $-2.73 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图7a), 可见两个系统的合并使得辐合明显加强。12/11 时以后在华北有强的对流发展, 以后辐合区逐渐向北移动, 强度减弱, 12/12 时(图7b)位于华北北部地区。到 00/13 时(图略), 在华北、东北的大部分地区已转为整层辐散, 同时降水开始减弱。

3.2 涡度方程各项的计算

对涡度场的分析表明, 正涡度中心正好位于低压中心区, 正涡度从对流层低层随高度增加, 在对流层中层达到最大, 到高层(200 hPa)正涡度的范围和强度都减小。台风登陆后, 低压区的正涡度区逐渐缩小。12/11 时对应于台风低压和冷锋的正涡度区并未合并(图8a), 直到 00/12 时南北的正涡度区合并, 即辐合区的合并先于正涡度区的合并, 低压中心的正涡度稍有减弱。以后, 正涡度带北移减弱, 大值区主要见于低层, 850 hPa(图8b)、700 hPa 的正涡度还很强, 200 hPa(图略)转为负涡度区。00/13 时在华北、东北西部仍维持正涡度带, 而散度场上此时已经从辐合转为辐散, 而辐合区的合并也早于正涡度带的合并, 这说明散度场的变化早于涡度场的变化。散度场的这种变化, 也许是由于中尺度条件下, 由适应过程引起的对于质量场的调整比大尺度场容易完成。

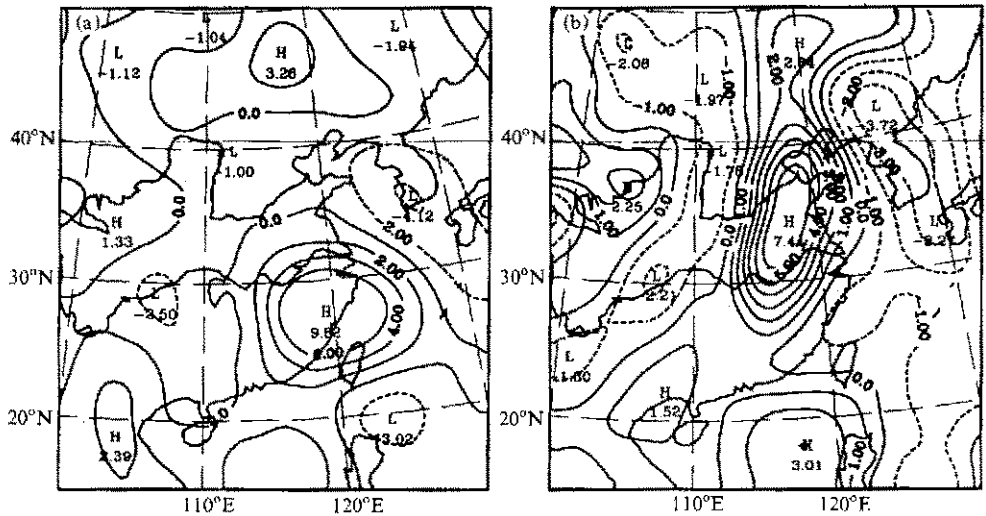


图8 1994年7月11、12日850 hPa 涡度场 (单位: 10^{-5} s^{-1})

(a) 11日12时; (b) 12日12时

为了对涡度场的演变过程作具体的分析, 对以下形式的涡度方程进行了计算:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left[u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \left(\beta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right] - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (f + \zeta) \nabla \cdot \mathbf{V} - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right),$$

上式中, 右边第一项为水平平流项, 第二项为垂直平流项, 第三项为辐散项, 第四项为扭转项。

计算结果表明, 在中低层水平平流项和辐散项比其他两项大一个量级 (图9), 12/11时850 hPa (图9a) 水平平流项最大值区从东海伸至长江口, 12/12时 (图略) 随台风低压移动, 已达黄海至渤海一带。另外, 辐合项最大值区12/11时 (图略) 在长江流域 (图9c), 12/12时 (图略) 已达黄河北岸。水平平流项的贡献是从低压中心的东侧和东北侧向低压的北部、西部输送正涡度, 这种输送一般在500 hPa达最大。台风登陆后, 这两项有所减小。在低压区内, 垂直平流项向上输送正涡度 (中低层), 高层向下输送正涡度。在中低层, 扭转项对雨区基本上是负的涡度贡献, 但比散度项、平流项小一个量级; 在高空 (200 hPa) 扭转项的量级和平流项、散度项的量级差不多, 而且对雨区的正涡度贡献较大。

总之, 从低空到高空, 都有明显的从低压东侧和东北侧向台风倒槽区输送正涡度。在低层以平流项、散度项的作用为主, 扭转项的贡献为负。到高层扭转项与平流、散度项相当, 这时扭转项对涡度的贡献也不能忽视。

与北美 Agnes 台风个例^[3,4]的涡度收支的计算比较看出, 北美个例低层以散度项贡献较大。而9406 (Tim) 台风低层涡度平流输送也很明显, 这种差异也许是因为东亚的副高位置较稳定及强度较强, 因而, 易于在台风前进方向右侧形成强的偏东气流, 使得平流输送加强。

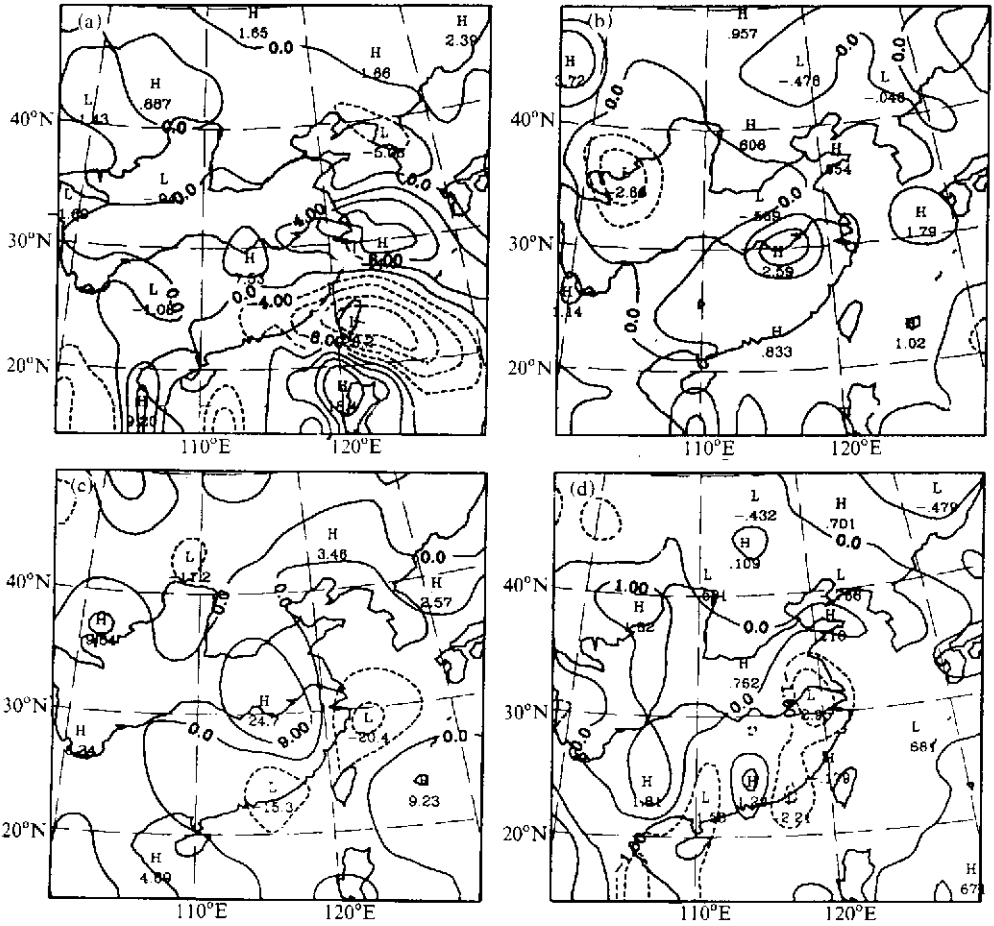


图9 1994年7月11日12时850 hPa上涡度方程四项的分布图(单位: 10^{-10} s^{-2})

(a) 水平平流项; (b) 垂直平流项; (c) 辐散项; (d) 扭转项

3.3 动能输送的计算

对动能的输送作了计算, 所采用的动能方程如下:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{H} + \frac{\partial}{\partial p}(k\omega) - \mathbf{V} \cdot \nabla \Phi + \mathbf{V} \cdot \mathbf{F},$$

上式中 $K = (u^2 + v^2)/2$, $\mathbf{H} = \mathbf{V}K$, 右边第一项为动能通量的水平散度项, 第二项为动能通量的垂直散度项, 第三项为动能产生项, 第四项是动能消耗项。第四项代表了由粘性引起的损耗以及网格尺度与次网格尺度之间动能的交换。由于计算精度所限, 此处未予讨论。只计算了第一至第三项, 同时, 为了讨论简单起见, 也未作垂直积分, 用850、500和200 hPa 分别代表低、中、高层的情况。

11、12日850 hPa 的动能分布(图10a、b), 中低层动能的大值区分布于台风倒槽的东部, 即东南急流所在倒槽东部的动能比西部大, 低压中心附近是动能的小值区。这

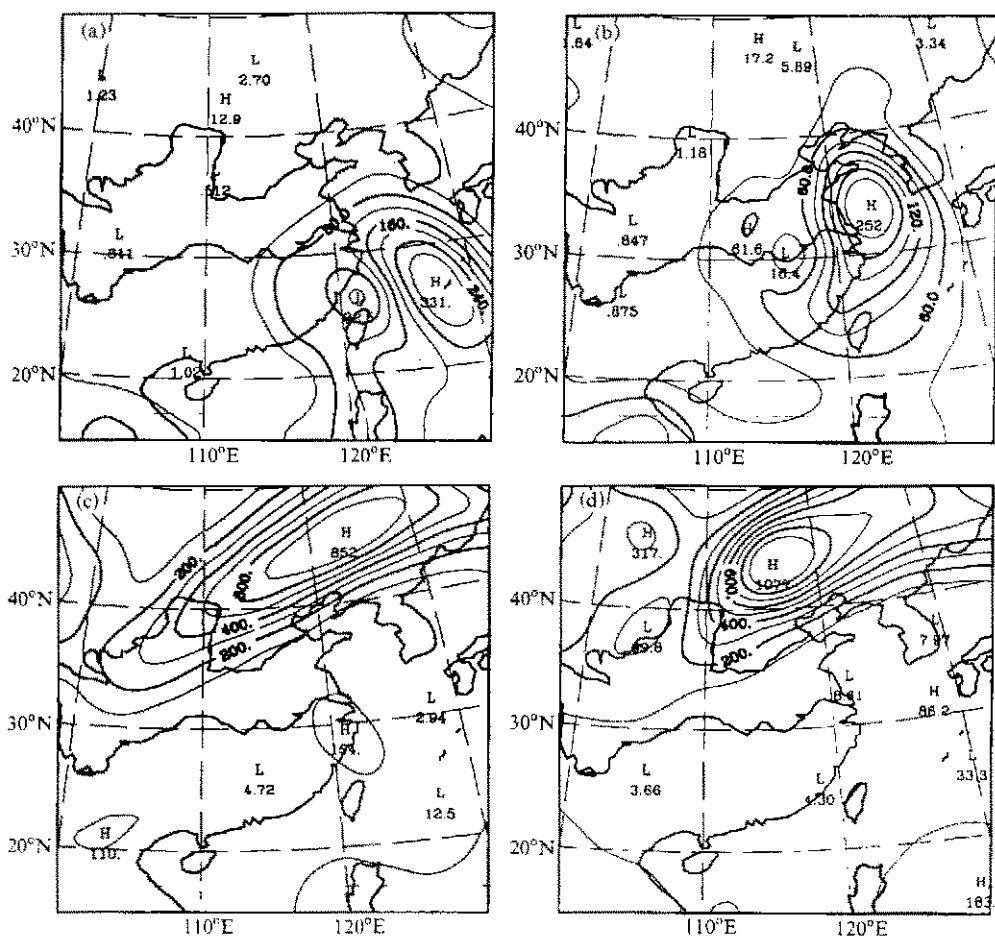


图 10 1994 年 7 月 11、12 日 12 时 850 hPa、200 hPa 上动能 (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

(a) 11 日 850 hPa; (b) 12 日 850 hPa; (c) 11 日 200 hPa; (d) 12 日 200 hPa

个动能大值区逐渐向北移动并减小, 反映出东南急流北移并减弱。200 hPa (图 10c、d) 动能的大值区, 位于东北到河套一带, 即高空槽前西南气流所在的位置。00/11 时 (图 10c) 有一大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流中心位于东北西部, 此中心很快北移减弱。12/11 时 (图略) 在河套的东北方有一大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流中心形成, 此中心形成后向东北移动, 00/12 时 (图 10d) 位于内蒙古东部、东北西部, 中心加强, 最大风速达 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以后此中心向东北移动, 强度减弱。在这个过程中, 急流入口区从河套移到了华北。12 日, 华北、东北南部处于高空急流入口区的右侧, 急流入口区的正环流加强了华北、东北地区的垂直运动。

对动能方程的计算表明, 动能制造项和水平通量散度项量级比垂直通量散度项大。水平通量散度项向台风倒槽的北部输送动能, 11 日在 500 hPa 输送最大, 12 日在 700 hPa 输送最大。就低层而言, 在倒槽的西部、北部动能制造项为正, 倒槽的东部动能制造项一直为负, 所以倒槽东部的动能是逐渐减小。从垂直输送项来看, 低层向上输送动

能, 高层向下输送动能, 中层是动能的汇。

从总的动能分布来看, 中低层在倒槽的北部、西部动能是增加的, 在急流所在的地方有很强损耗, 由于损耗大于制造, 所以急流减弱。对于高空槽前的西南急流, 这里非地转风穿越等压线, 有动能的制造, 但这几项的和是负的, 所以急流中心的维持和加强的动能可能不是来自于动能的产生项或动能的垂直输送, 而是有别的来源。因而, 我们可否认为, 在 9406 (Tim) 台风登陆后, 对大尺度而言, 动能的产生项和垂直平流项是能量汇, 而水平通量辐合项是能量源项。由于我们未对次网格尺度向网格尺度的动能转换作计算, 这一项在对流活跃时, 是否是能量源项, 尚需证实。

3.4 水汽来源的分析

DiMego 和 Bosart^[4]通过对飓风 Agnes 登陆后水汽方程的计算得知, 水平的水汽通量辐合对于降水有重要的贡献。丁一汇等^[7]对影响我国河南的台风低压的水汽供应亦作过分析, 这些水汽是通过偏东气流由大气低层输送而来。本研究对水汽输送问题亦作了较为仔细的分析。

关于夏季中国东部地区降水的水汽来源问题, 已进行了一些讨论。过去较长时期内, 一些研究者, 尤其是国外学者, 认为水汽主要来自孟加拉湾, 由印度西南季风所输送。西太平洋和南海的作用如何, 是否也很重要?

为了讨论这次台风登陆与西风带系统相互作用的过程的水汽来源, 我们对 7 月 10~12 日东半球范围内水汽水平通量及水汽通量散度进行了计算, 并进行了整层积分。10 日 (图略) 孟加拉湾向南海有水汽输送, 而南海本身又是水汽通量的辐散区, 它供给了 9406 号台风一部分水汽。11、12 日 (图略), 台风登陆后水汽有一部分来自南海、西太平洋。12 日, 辐合区位于中国东部, 此时, 南海和中国东部的近海为水汽的辐散区, 由这一区域向大陆上输送水汽。

图 11 为 11、12 日东亚地区 850 hPa 的水汽通量散度图。而水汽通量的大值区位于台风倒槽的两侧, 倒槽东部的水汽通量最大, 00/11 时达 $53.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。东南急流向北部、东部输送了大量水汽, 水汽的输送在低层大。随着倒槽的北移, 水汽通量逐渐减小, 但水汽通量的辐合并未减少, 12/11 时大的辐合中心还维持在沿海一带, 最大中心为 -36.1 (图 11b), 但从华南经东海、黄海至华北存在一水汽的输送带。00/12 时 (图 11c) 辐合中心 A 位于长江流域, 12/12 (图 11d) A 中心的范围扩大, 强度减弱; 而辐合中心 B, 12/11 时位于山东半岛以东的海上, 中心强度为 -22.9, 12/12 时 B 中心位于辽宁省, 中心强度为 -28.6。辐合中心 A 减弱时, B 在增强, 这与 12 日对流云系的发展是对应的。12/12 之前对流云系在华南、华中地区, 而 12/12 以后, 在华北、东北地区发展。

由上述分析可见, 在东亚夏季风期间, 南海和西太平洋地区为重要的水汽来源之一。在台风影响和登陆时, 这一地区的赤道辐合带对台风的水汽供应更是不可忽视, 并且水汽的辐合区似乎决定了对流的发展区域。

而,不同的是北美的这三个飓风在两系统合并后,都发展为强的或较强的锋面气旋,而 9406 (Tim) 台风与西风槽相互作用后,低压没有明显加深,两系统合并前的 12/11 时与合并后的 00/12 时低压强度相当。这可能是因为东亚中纬度的西风槽较弱,冷空气不是很强。12/12 时低压在 500 hPa 以上仍为暖心,而北美的三个例子,冷空气进入低压后,暖心很快消失,转为冷心,发展成为温带气旋。本例不象北美个例,在冷空气进入后未能使台风低压整体“转变”为温带气旋,而是更像澳大利亚季风低压^[5]个例,当低压被西风带斜压区所“捕获”时,在低压与冷锋结合处“激发”出新生的中尺度低压系统以及与中低压有关的云团,也许在东亚地区这种形式更常见到。由于高低空及中低纬的系统配置有利,特别是由于中低层的东南急流向大陆上输送了大量的水汽,使这次过程出现很大的降水。

(2) 本文对 9406 (Tim) 台风的能量计算结果表明,它与上述北美个例有较大的差异。对于系统发展的能量来源,Palmen^[1]认为飓风 Hazel 的能量释放过程是以典型的温带气旋模式出现,即冷空气下沉,暖空气上升,造成的涡旋有效位能释放,转化为供气旋发展的涡旋动能。DiMego 等^[3,4]认为,飓风 Agnes 转变而成的温带气旋与挪威学派典型的锋面气旋(即 A 类)不同,而是更接近 Petterssen 和 Smebye^[11]提出的气旋模式(即 B 类气旋),该类气旋的特点是发生发展的启动机制在高空,而不在低层。高空涡度平流量一开始就很强,而对流层低层可能有,也可能没有锋面存在,开始时斜压性较小,但随风暴加强而增加。但 Agnes 与典型 B 类气旋也有所不同,主要表现在当高空涡度平流大值区移近,在低层有与热带风暴相关的正涡度大值区同时移近并相互作用,此后,与 Hazel 飓风个例类似,动能制造项仍然是主要能量来源。

9406 (Tim) 台风低压显然不属于上述两类情况,虽然它与锋面系统合并,但整体看来比北美 Hazel 飓风和 Agnes 飓风要弱,能量过程也不尽相同。在本例中,动能产生项和垂直通量散度项对大尺度而言是能量汇,而水平通量辐合项是能量源。由于资料所限,本文对于次网格尺度向网格尺度的能量转换项未作计算,但据推测,这种次网格尺度向网格尺度的能量转换很可能与气旋区域内活跃的对流活动有关。由 GMS 的 TBB 图揭示,低压区的确存在强烈的对流活动,为这种设想提供了一定的支持,但为了确证,这个问题还需获取新的资料,进行深入的研究。这里姑且称它为“C”类气旋,以区别于上述 A、B 两类。北美的 Camile 飓风,可能与本例能量过程有某些相似。

(3) 我国对“75·8”特大暴雨的研究,强调从华北有一股冷空气从中低层明显地侵入,此外,也指出低空偏东急流在暴雨过程中起着非常重要的作用。本例中也见到了这些特点,这也许是东亚的特色,但是从大形势来看两者是很不相同的。“75·8”时,伴随着西风带大形势的调整,在我国东部大陆上建立了副热带高压单体,使台风不能转向东行,而在河南省境内停滞少动。这种大形势调整与台风北上在时间上正好相同,一般是不常见的。本例未出现上述情况,系统相对而言具有移动的特征,因而降水影响的范围较广。

5 结语

通过对 9406 (Tim) 台风登陆与西风带槽相互作用过程的诊断研究,发现它与北

美的个例既有相似之处, 又有很大差异。通过分析, 对本文引言中提出的科学问题获得如下看法:

(1) 这次 9406 (Tim) 台风登陆引发的降水过程, 除 11 日华南的降水主要由台风造成以外, 在华北和东北的强降水是由台风倒槽与西风槽相互作用造成的。这与其他个例有共同之处。

(2) 这次相互作用过程中, 高低空、中低纬系统的配置非常有利于降水, 特别是中低空的东南急流起了极其重要的作用, 在东亚地区这支偏东急流特别强烈, 它向北输送了水汽、涡度、动能等。高空急流入口区的垂直环流对华北、东北的降水起了重要的作用。此外, 中尺度对流云团 (MCS) 也起了不可忽视的作用, 强暴雨主要是由中尺度云团所造成。

(3) 对涡度方程各项的计算表明, 低层平流项和散度项比垂直输送项、扭转项大一个量级; 而高空扭转项与平流项、散度项同量级, 此时, 扭转项对涡度的输送也不容忽视。而北美个例低层散度项的作用更为明显。

(4) 对动能方程的计算表明, 在急流所在区域动能的消耗大于制造。200 hPa 的高空急流增强所需的动能并不是由非地转风穿越等压线的动能制造和输送。动能不完全来自有效位能的释放, 主要来自于动能的水平输送, 可能还有网格尺度与次网格尺度之间能量的交换。对于后一点, 今后需用新的观测资料作进一步定量证实。另外, 未见到有挪威学派经典的 A 类气旋及 Patterssen 等^[11]定义的 B 类气旋的生成。

(5) 对水汽来源的分析表明, 对华北和东北的降水, 南海和西太平洋的水汽输送也有重要的贡献。

(6) 本文讨论的中低纬系统相互作用的过程并不是每年夏季或每月均有发生的, 它随不同的年份和月份有很大差异, 这是因为东亚夏季风环流有明显的年际、月际变化。孙建华和赵思雄^[12]、陶诗言^[13]在对 1994 年东亚夏季风过程作了具体的分析后, 指出 1994 年是夏季风变异非常明显的一年。这一年长江流域出现了少有的空梅现象; 华南发生了罕见的特大暴雨; 西太平洋和南海台风数高达 33 个, 大大多于平均数, 尤其多于 1998 年的台风数。这是由于春末夏初冷空气异常活跃且偏南, 夏季副热带高压突然北跳, 以及赤道辐合带十分活跃、位置偏北所致。在这样的环境下可能有更多的机会出现中低纬系统的相互作用, 因此, 本例过程的发生不是偶然的。

(7) 很显然, 夏季风活跃对于中低纬度系统相互作用有重要影响。反之, 中低纬度系统的相互作用过程对于季风乃至大气环流的维持与演变起何种作用, 这是又一个值得深入探讨的问题。

参 考 文 献

- 1 Palmen, E., Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of hurricane hazel into an extratropical storm, *Tellus*, 1958, **10**, 1~23.
- 2 Chien, H. H. and P. J. Smith, Synoptic and kinetic energy analysis of hurricane Camile (1969) during Transit across the southeastern United States, *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**, 67~77.
- 3 DiMego, G. J. and L. F. Bosart, The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone, Part I: the observed fields and vertical motion computations, *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**, 385~411.

- 4 DiMego, G. J. and L. F. Bosart, The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone, Part II: moisture, vorticity and kinetic energy budgets, *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**, 412~433.
- 5 Zhao, S. X. and G. A. Mills, A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia, Part II: synoptic-diagnostic description, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**, 2074~2094.
- 6 陶诗言等, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 1~225.
- 7 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺, 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究, *大气科学*, 1978, **2**, 276~289.
- 8 赵思雄, 周晓平, 风场在预报暴雨发生中的作用——1975年8月特大暴雨的数值实验, *大气科学*, 1984, **8**, 1~6.
- 9 包澄澜, 陆胜元, 冷空气影响台风倒槽降水的个例分析, *大气科学*, 1977, **1**, 18~25.
- 10 蒋尚城等, 登陆北上减弱的台风倒槽降水的个例分析, *气象学报*, 1981, **39**(1), 18~27.
- 11 Petterssen, S., and S. J. Smebye, On the development of extratropical storms, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1971, **97**, 457~482.
- 12 孙建华, 赵思雄, A study of heavy rainfall events during East Asia monsoon in 1994, Annual Report, State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1995, 115~122.
- 13 陶诗言, 1994年东亚夏季风活动的异常与华南特大洪涝灾害 I. 大气环流的异常, 1994年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 1996, 1~5.
- 14 Lewis, J. M., Y. Ogura and L. Gidel, Large-scale influence upon the generation of a mesoscale disturbance, *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**(5), 535~550.

Diagnoses and Simulations of Typhoon (Tim) Landing and Producing Heavy Rainfall in China

Sun Jianhua and Zhao Sixiong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract In mid July 1994, a typhoon (Tim) landed, moved northward, then, interacted with the trough in middle latitudes and finally, produced heavy rainfalls in the eastern China. In this paper, a diagnostic study has been conducted and comparisons between this case and North American cases have been made. It is found that both Tim and North American cases are of lower latitude systems captured by the baroclinic zone when they move to the mid latitudes. The North American cases can be transferred into the extratropical cyclones; they can be thought as a near-classic examples of Norwegian school (type A) and Petterssen school (type B). But Tim is not similar to the above mentioned two types. Computations of the various terms of vorticity equation show that in this case, both the horizontal advection and convergence effects are one order larger than the vertical advection and twisting terms in the lower troposphere, and convergence term should be considered. However, the twisting term has about a same order as the horizontal advection and divergence terms in the upper troposphere. Different from the North American cases, the twisting term cannot be ignored. The analysis of the moisture source show that the Indian monsoon is an important moisture supply area, although the South China Sea and the West Pacific are still of important moisture sources.

Key words: typhoon; heavy rain; mesoscale convective system