

1998年7月长江流域特大洪水期间 暴雨特征的分析研究^{*}

赵思雄 孙建华 陈 红 张 凤

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 对1998年7月下旬发生于长江中下游的暴雨, 即“二度梅”, 进行了初步的分析研究, 认为: (1) 在这一时期由于副热带高压的向南撤退并稳定在偏南位置, 为长江流域降水提供了重要的条件; (2) 中纬度系统维持两脊一槽的形势有利于冷空气的南下, 而夏季风在这一期间偏弱, 前沿停留于长江流域, 同时与中纬度的偏北气流形成一条沿长江流域东西走向的切变线; (3) 在这条切变线附近不断有中尺度系统发生发展, 其中一部分中尺度系统达到很强烈的程度, 甚至引发了88.4 mm/h的强降水; (4) 对流层上层, 如200 hPa上的高压, 其东侧的强烈的辐散区正好位于长江中下游地区, 上下层系统的有利配合, 对这次暴雨的发生十分有利。

关键词 长江流域 暴雨

1 引言

1998年夏季(6~8月), 中国长江流域出现了1954年以来全流域性的特大洪水, 东北的嫩江和松花江流域也出现了百年不遇的大洪水。特大的洪涝灾害对国家和人民的生命财产构成了严重威胁。为了弄清特大暴雨和洪水的成因, 有大量工作要做。因为暴雨的发生涉及到多种尺度的系统以及它们之间的相互作用, 是一个比较复杂的问题。从预报的时间尺度上讲, 涉及到长期、中期和短期; 而从空间尺度上讲, 涉及到行星尺度、天气尺度和中小尺度系统。

对于东亚的梅雨(尤其是长江流域的暴雨), 过去已有过一些研究^[1~11]。但是, 1998年的暴雨和洪水具有一些与过去不同的特点, 首先是第1阶段梅雨结束, 副热带高压北跳大约17天后, 又南退引发第2阶段梅雨, 即“二度梅”。在“二度梅”期间, 有一系列中尺度低压发生发展, 并且几乎在同一地区重复出现, 而且带有某种突发性, 因此有必要开展深入研究。初步分析表明, 1998年中国夏季的降水大体可分为4个阶段, 即: (1) 从6月12日至7月3日左右, 为长江流域第1阶段的梅雨; (2) 7月3日前后副高提前北跳, 7月3日至7月19日, 雨带移至黄淮和长江上游, 为过渡阶段; (3) 7月20日至7月31日, 随着副热带高压的撤退, 雨带也南退到长江流域, 从而引发了长江流域第2阶段的梅雨, 通称为“二度梅”; (4) 8月1日以后, 至8月30日, 副热带高压再次北移并西伸, 致使主要雨区又出现在中国华北和东北地区, 为第4阶段。需要

1998-11-25 收到

^{*} 本研究获得国家自然科学基金重点项目和中国科学院基金重点项目的资助

强调指出，第 4 阶段降水虽然不是特别强烈，但是由于前一阶段水位较高，暴雨与下游洪水遭遇，在 8 月份仍然产生了 5 次洪峰。

要对上述 4 个阶段的暴雨做全面的深入的讨论，大量的工作要做，这需要时间。本文作为第一步，先对上述第 3 阶段，即“二度梅”暴雨做一初步分析，因为“二度梅”对 1998 年长江流域特大洪涝灾害的发生，有很重要的作用。通过分析，我们将剖析“二度梅”期间大尺度环流的变化，中尺度系统的特征，水汽供应以及它们与暴雨的关系等。

2 降雨过程的特征

在“二度梅”期间，降水区基本上沿长江流域呈带状分布。图 1 给出了 1998 年 7 月 23 日至 24 日的 24 小时降水量分布图，可以作为这一阶段降水量分布的代表。其雨区的分布主要侧重于长江以南的广大地区。由于分析时采用的降水资料密度较高，因此所分析的图上的数字也较为密集。7 月下旬，长江流域的大部分地区降水量一般有 90 ~ 300 mm，局部地区超过 800 mm，一般比常年同期偏多 1 ~ 5 倍，其中江西婺源最

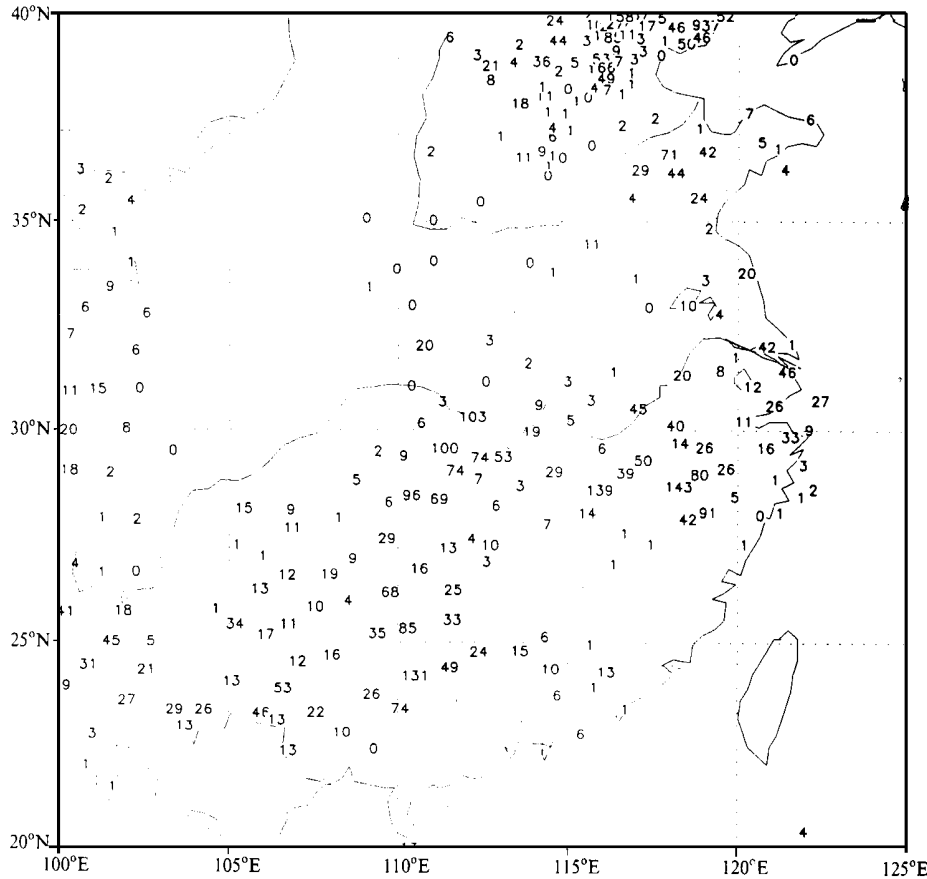


图 1 1998 年 7 月 23 日 00 时 (UTC) 至 24 日 00 时 (UTC) 的降水分布图
单位: mm

大, 为 911 mm, 鄂东大部 and 赣北部分地区的旬降雨量创 1949 年以来同期的最大值, 且最强的降雨带位置与 6 月中下旬的暴雨带位置基本一致。由于长江中下游干流在前期一直维持高水位, 且普遍超警戒水位 0.31 ~ 2.27 m, 因此, “二度梅”期间的持续降雨, 使形势变得更加严峻, 尤其造成了洞庭湖水系和鄱阳湖水系的水位迅速上涨, 加之上游来水, 长江干流第 3 次洪峰于 7 月 25 日 02 时通过湖北宜昌, 与下游洪水遭遇, 使沙市以下水位全线上涨。27 日 06 时, 洞庭湖城陵矶水位涨至 35.47 m, 超过历史最高水位 (35.31 m) 0.16 m。29 日 04 时汉口站洪峰水位 28.96 m, 为 1865 年建站以来的第 2 位 (最高水位为 29.73 m)。

值得注意的是, “二度梅”开始的第 1 天, 当副热带高压南退时, 从 21 日凌晨起, 武汉市遭遇了百年罕见的特大暴雨, 降雨量达 280 mm, 汉阳地区降水达 438 mm, 降水强度为有历史记录以来最大的一次, 造成严重的内涝, 武汉三镇成为“泽国”, 有的地方积水深达腰部, 严重影响了人民的正常生活, 这样强烈的突发性暴雨实属罕见。

3 “二度梅”期间天气形势及中尺度系统的特征

3.1 天气形势

我们知道, 大尺度环流的演变与暴雨的发生有很密切的关系。在梅雨的第 1 阶段, 中纬度槽脊的分布为两脊一槽型, 即乌拉尔山为一脊, 鄂霍茨克海地区为一脊, 在贝加尔湖附近地区为一槽。在这种形势分布下, 中国正处于贝加尔湖槽的槽前东南方的位置。冷空气不断南下, 为冷暖空气的相互作用提供了十分有利的条件, 属我国夏季梅雨期典型的多雨环流型之一。7 月 3 日前后, 乌拉尔阻塞高压崩溃, 这种环流型得以破坏, 成为了典型的两槽一脊的分布型, 其形势的分布几乎与第 1 阶段反相。这时, 贝加尔湖地区基本为脊区控制, 加上副高的北抬与西伸, 有利于我国北方和长江上游, 即四川盆地的降水, 而长江中下游降水结束, 甚至出现高温闷热天气。在副高北跳 17 天之后, 7 月 20 日, 环流形势又转为两脊一槽的分布, 我们以 1998 年 7 月 22 日 00 时 (UTC) 500 hPa 高度场和温度场 (图 2) 为代表, 可以看出这一时期的环流特征。中高纬属典型的两脊一槽型分布, 即使在长江流域, 108°E 附近, 也有一较深的槽区, 这在通常的梅雨季节并不多见^[4]。这种形势再次有利于长江流域持续降水的发生。至 8 月 1 日后, 转为两槽一脊, 雨带主要移至东北和长江上游。这一时期, 长江上游的降水量虽然不是很大, 但由于长江干流前一阶段降水偏多, 水位高, 因此, 一旦有较强降水出现, 极易形成洪峰。这就是 1998 年长江特大洪涝中 8 次洪峰, 有 5 次出现于 8 月份的原因。

本文主要讨论“二度梅”期间的暴雨和洪水问题。我们已经知道, 中纬度的两脊一槽有利于冷空气的南下, 而副热带高压南退后, 其轴线维持在江南, 很有利于长江流域的降水, 此外, 在 7 月下旬这样的盛夏季节, 除了东亚季风外, 由孟加拉湾来的西南季风, 即印度季风, 也输送大量水汽至中国大陆, 由于 1998 年的夏季风相对较弱, 因此, 季风的主体推进并停滞于长江流域的附近, 使得长江流域成了有利于降水的地区。这样, 上述诸种有利条件的结合, 形成了“二度梅”持久且强烈的重要背景。

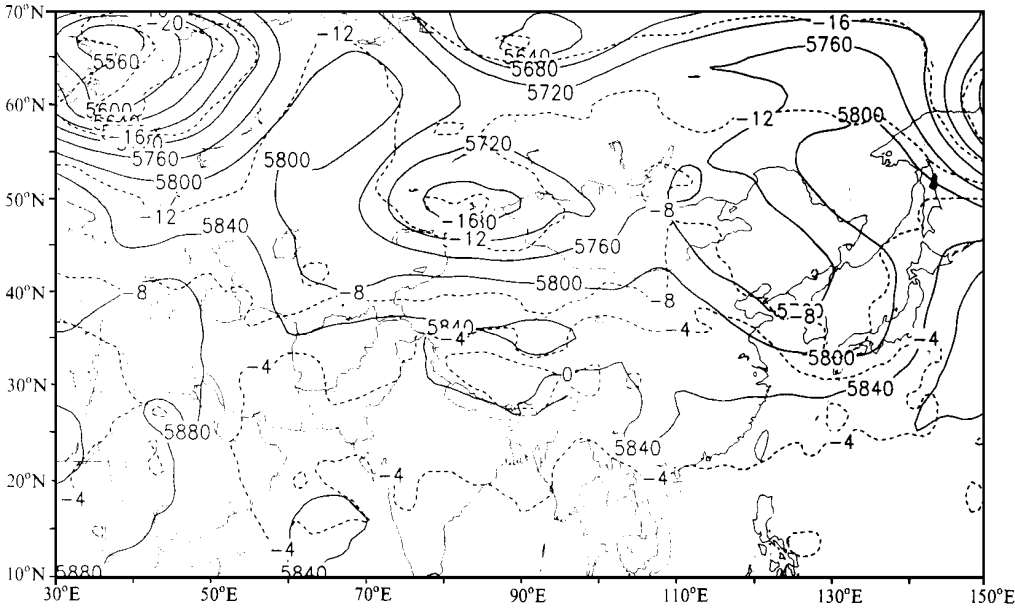


图2 1998 年 7 月 22 日 00 时 (UTC) 500 hPa 高度场与温度场分布
实线：高度场；虚线：温度场

3.2 切变线与中尺度低压系统的演变

仅有有利的大尺度环境条件是很不够的，为了揭示这次暴雨过程的成因，我们应对“二度梅”期间的天气尺度系统和中小尺度系统进行必要的探讨。

通过研究和分析，我们发现，在“二度梅”期间，与暴雨直接有关的天气系统是一条沿长江流域东西走向分布的切变线，还有在这条切变线上发生发展的中尺度低压（扰动）系统。图 3 给出了 1998 年 7 月 20 至 25 日这条切变线的分布及其上的中尺度低压系统。从图 3a 上可以发现，700 hPa 长江中上游四川盆地附近有一低槽区，其东侧由长江中游向北至河套为一狭长的脊区，对于上述低槽区未来的动向值得注意。由图 3b 可以清楚地看到，一个闭合的 3060 m 的闭合低压中心已经形成，而且东侧的脊区已经开始东移，并变得平缓。至 7 月 22 日 00 时 (UTC) (图 3c)，700 hPa 的低压基本维持少动，仅缓慢东移，其东侧为一切变线区域，长江中下游的降水即由此切变线所引发。上述的中尺度低压从 7 月 21 日至 26 日内一直维持，并缓慢移动。从图 3d 上，7 月 25 日的 700 hPa 图上，可以很明显地看到，在一个东西向的倒槽内仍然有一个中尺度低压，其水平尺度约为 300 ~ 500 km。为了讨论流场的情况，我们又对这一时期的流场结构做了分析。可以发现沿长江流域有一条东西走向的风场切变线，沿此切变线上有中尺度的涡旋 (图 4a)，切变线南侧有很强的西南气流，这支西南气流的源地，可以追溯到南海、中印半岛直到孟加拉湾。表明在盛夏季节，已不仅是南海地区提供水汽，孟加拉湾甚至印度洋也成了重要的水汽供应源地。值得注意的是，这次与低纬夏季风有关的西南气流，其前沿正好抵达长江中下流，并停留于长江干流沿线。切变线的北侧是偏东北的

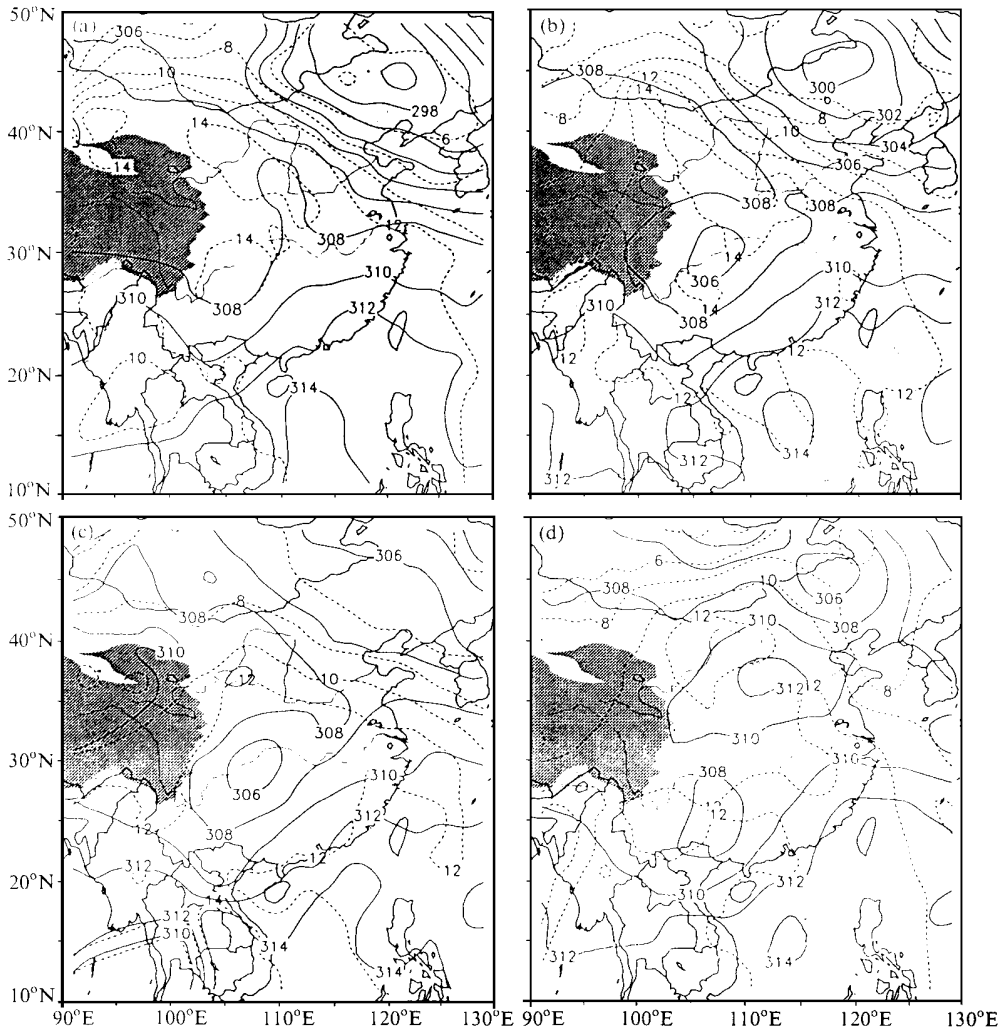


图3 700 hPa 高度场(实线)和温度场(虚线)分布图

(a) 1998 - 07 - 20T00: 00UTC; (b) 1998 - 07 - 21T00: 00UTC;
(c) 1998 - 07 - 22T00: 00UTC; (d) 1998 - 07 - 25T00: 00UTC

气流。在河套附近有一个反气旋存在，源于反气旋的偏东北气流，将北方冷空气向南输送，两支气流直指洞庭湖水系，这里有一强的中尺度气旋，其东侧为很强的切变辐合区，维持于鄱阳湖一带。

为了弄清较高层的情况，我们对于这一段时期内对流层上层的情况作了分析（图4b）。可以发现，在200 hPa上，有一个闭合的反气旋环流系统维持在高原附近，在25日，此高压东侧的辐散区域，正好停留于长江中下游的上空，而不像某些个例那样，强辐散区位于长江下游及东海海域上空。这种高低空形势的有利配合，对这一地区暴雨系统的增强和发展提供了非常有利的环境条件。

水汽的输送和集中的情况是与此相一致的。图5给出了1998年7月25日00时整

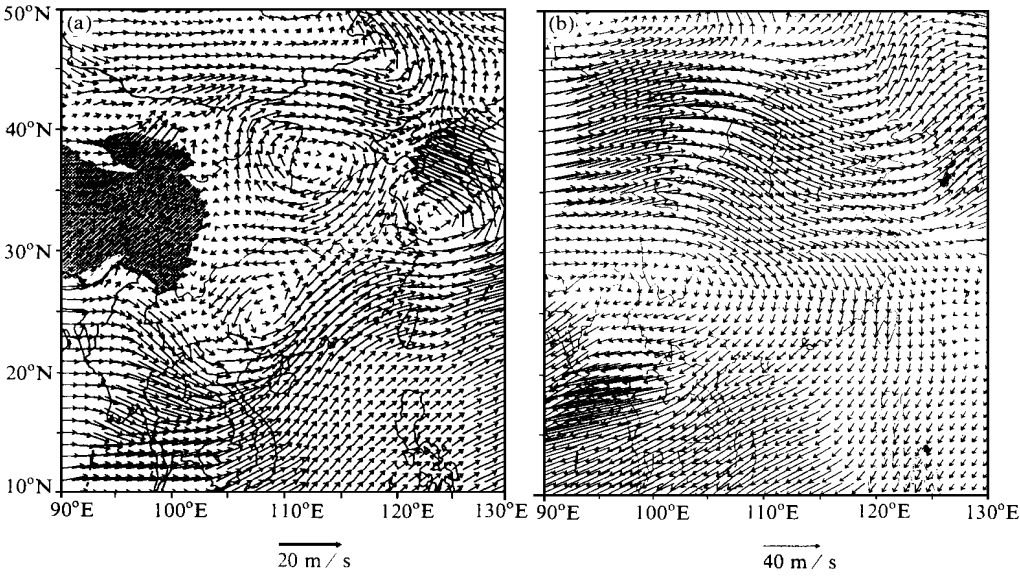


图4 1998 年 7 月 25 日 00 时 (UTC) 流场分布
(a) 700 hPa; (b) 200 hPa

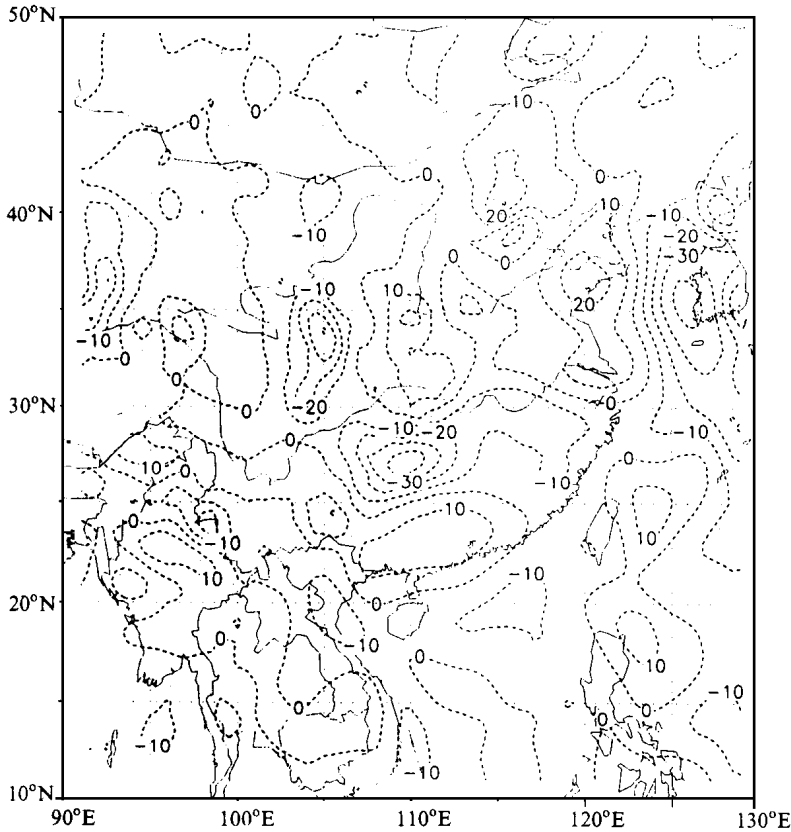


图5 1998 年 7 月 25 日 00 时 (UTC) 整层水汽通量散度分布
单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

层的水汽通量辐合值的分布。可以看到图上有两个水汽通量辐合的大值区,一个在我国东部的黄海海域,另一个则位于长江中游干流以南的洞庭湖水系。这个辐合区一直向东扩展至江西和浙江等省,呈东西走向分布。1998年7月25日00时(UTC)700 hPa的垂直运动分布(图略),垂直速度的零线,基本上沿长江干流东西走向,从川鄂交界

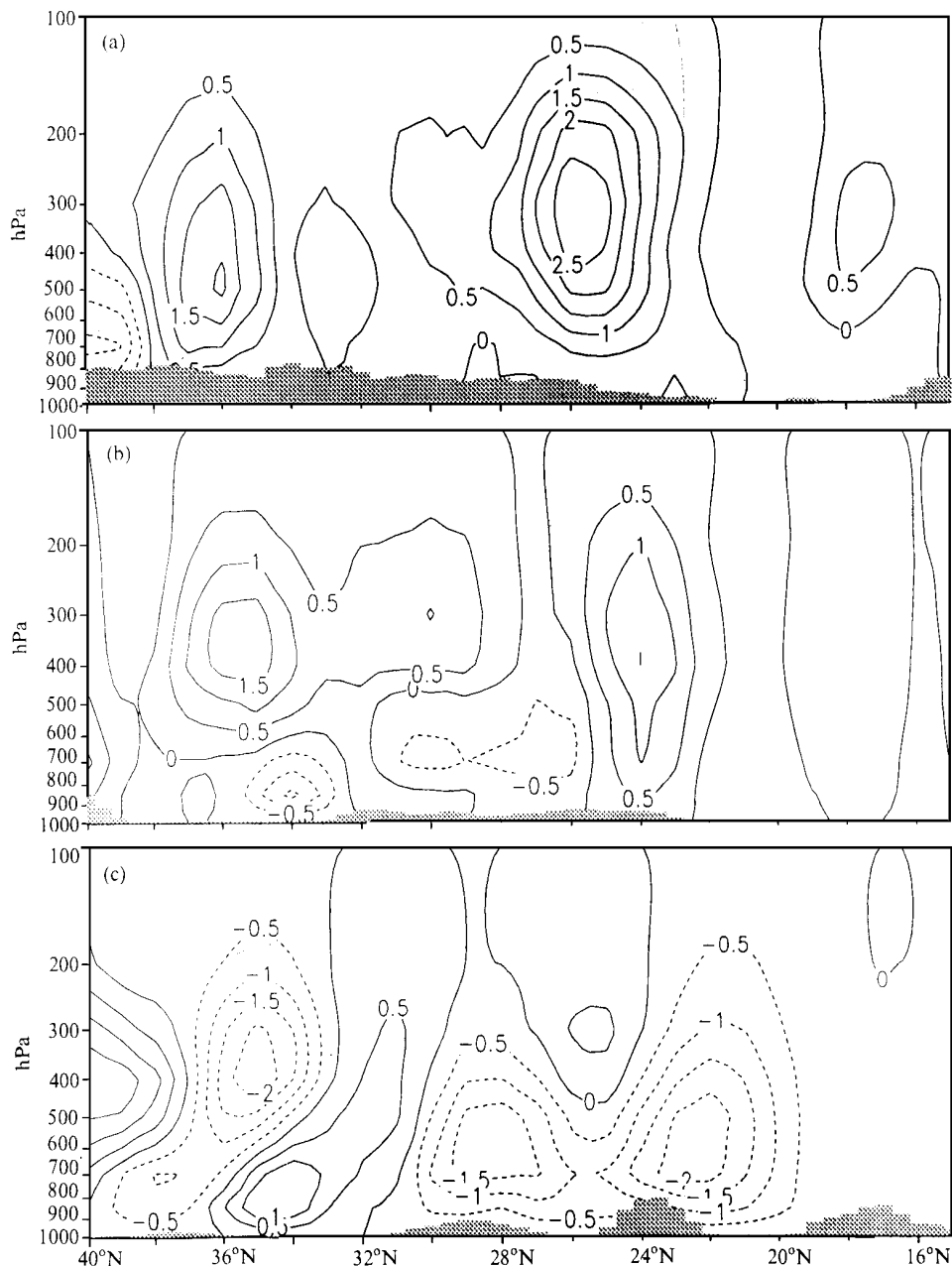


图6 1998年7月20日00时(UTC)垂直速度的垂直剖面
(a) 沿108°E; (b) 沿115°E; (c) 沿120°E。单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$

处一直伸向长江入海处，复盖了湖南、江西和江南北部，其最大值区也有两个，一个在海上，与海上的强中尺度涡旋有关系，而另一个则在长江干流中游地段的洞庭湖水系。因此，洞庭湖水系，尤其是澧水发生了超历史的洪水。7 月 27 日 06 时，洞庭湖城陵矶出现了 1904 年建站以来最高水位，达到 35.48 m，超过历史纪录 0.17 m。

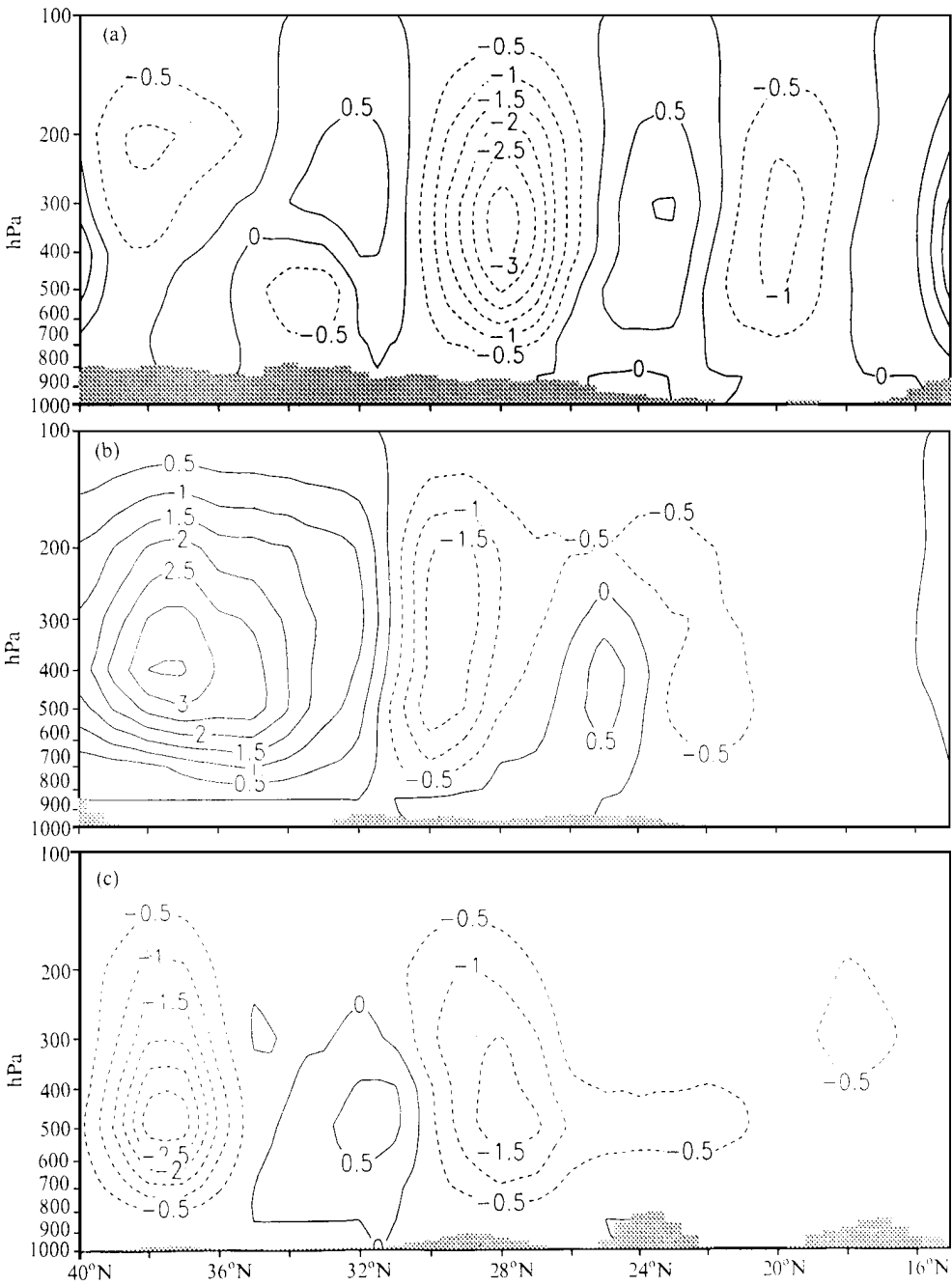


图 7 1998 年 7 月 21 日 00 时 (UTC) 垂直速度的垂直剖面
(a) 沿 108°E; (b) 沿 115°E; (c) 沿 120°E. 单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$

3.3 切变线和中尺度低压的垂直剖面分析

应该看到, 沿着切变线上中尺度扰动的分布是很不均匀的。为了仔细分析这方面的结果, 我们对于这条切变线, 沿南北方向, 按不同经度, 分别做了剖面。3 个经度分别是 108°E 、 115°E 和 120°E , 大体可代表长江流域不同区段, 即上、中、下游各段的情

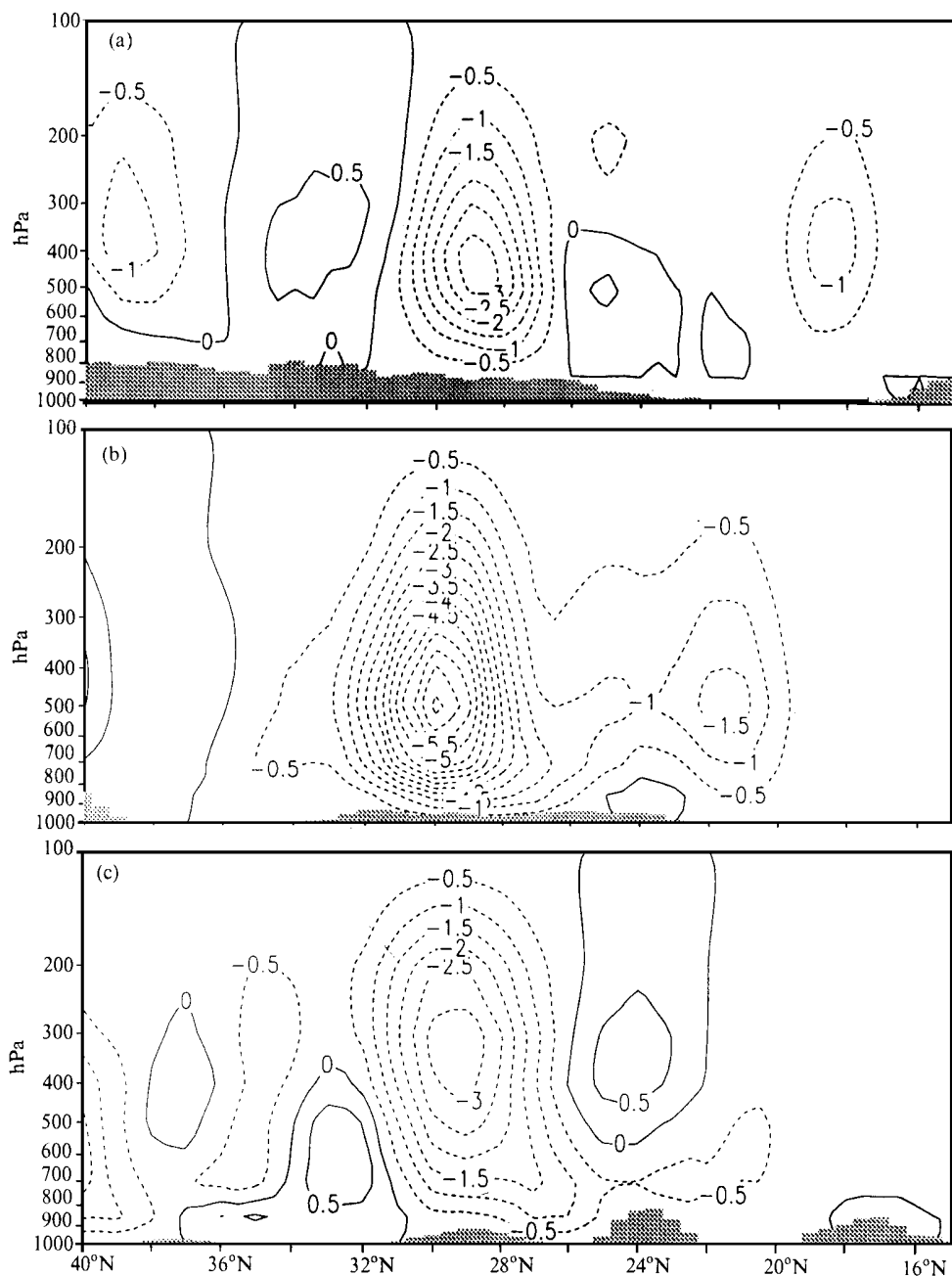


图 8 1998 年 7 月 22 日 00 时 (UTC) 垂直速度的垂直剖面

(a) 沿 108°E ; (b) 沿 115°E ; (c) 沿 120°E 。单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$

况。从图 6a 上可以看到，在 7 月 20 日 00 时 (UTC)，在 108°E 的剖面上，在长江流域 (30°N 以南) 基本为下沉区，只在 28°N 附近，在低层 (700 hPa) 以下为上升区。在 115°E ，即长江中游的剖面上，在长江流域附近有一片上升区域，但也仅限于对流层中低层，即 500 hPa 以下的层次中，其中心最大值约为 $0.8 \times 10^{-3} \text{ hPa}$ ，并不太强烈。而主要的上升区见于长江下游的 120°E 的垂直剖面上。到了 7 月 21 日 00 时 (UTC)，这种垂直运动的分布发生了重大变化 (图 7)。首先，我们可以发现，沿 108°E 、 115°E 和 120°E 三个经度的剖面的垂直运动均显著加强。尤其是上游的剖面，发生了十分重大的变化，在长江流域所在的经度上，几乎整个对流层均转为上升运动区，达到 $4.0 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ ，比前一天增大了 5 倍。而 115°E 和 120°E 的剖面上，在长江流域所在区域的上升运动区也已向上扩展，达到很深厚的程度。尽管，由于我们采用的是 NCEP 的格点资料，计算出的垂直运动的数值一般可能偏小。但是，通过其间相对大小的比较，仍可看出这条东西向的切变线在一天之内，全流域显著加强，以及在其上游中小尺度系统有明显的发生发展的特征。同时还可以注意到，这个中尺度系统东移的特征也是十分清楚的。从图 7 的剖面上可清楚地揭示出这一事实。在 7 月 22 日 00 时 (UTC) 的图上 (图 8)，可看到在整个长江流域均为上升区，其最大值为 $7.0 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ ，最强的上升运动区已由长江上游移至长江中游。

为了深入地讨论沿长江流域切变线的演变和结构，我们又对沿 108°E 、 115°E 和 120°E 三个经向剖面上的 v 场的分布，进行了分析。由 1998 年 7 月 22 日 00 时 (UTC) 沿 108°E 、 115°E 和 120°E 的 v 分量的垂直剖面图可见，在长江中上游尤其是低层南北方向风的交汇很明显 (图略)。在 115°E 附近的剖面 (图 9) 上，500 hPa 以下的对流层低层，偏南风分量较为强劲，迅速向北推进，其最大值在低层可达南风 10 m/s。而南北风的分界线在 31°N 附近，偏北风随纬度增大和高度增加而增强。在 28°N 至 31°N 的区域中，不但有南北风的风向辐合区，也存在偏南风的风速辐合区，南风风速的等值线在 30°N 附近呈垂直向上分布，风速水平梯度的大值区，向上一直可伸展达到大约 700 hPa 的高度。这一深厚的辐合区的存在，对降水的发展十分有利。

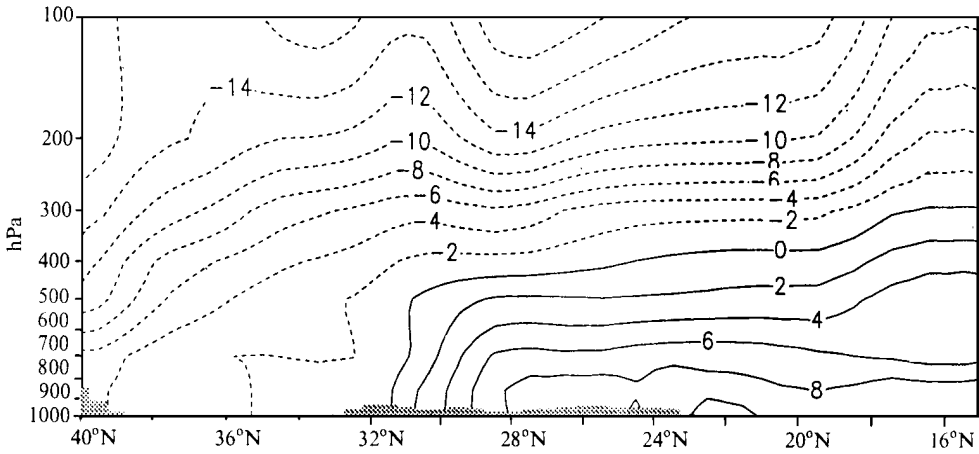


图 9 1998 年 7 月 22 日 00 时 (UTC) 115°E v 分量的垂直剖面图
单位: m/s

4 “二度梅”结束与黄海气旋的发展

至 7 月下旬末, 随着副热带高压的北移, 首先是切变线的东段向北推进移至了渤海和朝鲜半岛附近, 在我国东北和朝鲜半岛引发了大暴雨。其具体过程是, 在我国华北北部至渤海沿岸有低压发生发展, 中心气压不断降低。850 hPa 图上 (图略), 7 月 29 日 00 时 (UTC), 中心位于 (117°E , 31°N), 数值为 1450 位势米, 至 30 日 00 时 (UTC), 850 hPa 上闭合低压中心向东北方向移动, 中心位置为 (119°E , 30°N), 其中中心值为 1420 位势米。31 日 00 时 (UTC), 850 hPa 上闭合低压中心移至 (120°E , 35°N), 中心值下降, 1420 位势米等值线的范围扩大。至 8 月 1 日 00 时 (UTC), 中心移至 (124°E , 39°N), 数值进一步下降, 最内一层闭合等值为 1400 位势米, 8 月 2 日 00 时 (UTC), 此低压进一步向北移动并减弱, 与原维持于 (112°E , 45°N) 的北方的低槽系统合并, 而成一个宽广的低压区。这个蒙古低压区的持续、稳定, 使 8 月上中旬东北地区处于有利于降水的环境之中, 使嫩江和松花江流域持续降水。同时, 进入 8 月份以后, 由于副热带高压西伸, 长江上游多次出现暴雨, 致使川江水涨, 8 月份之内长江形成 5 次洪峰。

图 10 是 1998 年 7 月 31 日 00 时 (UTC) 的流线图, 可以看见一个发展较为完整的气旋式的环流, 其中心位于山东半岛附近, 这个涡旋的尺度已发展达 $600 \sim 700 \text{ km}$ 。还可以清楚地看到, 此时西太平洋的副高脊线已达 27°N 以北, 而在副高西侧一支强劲

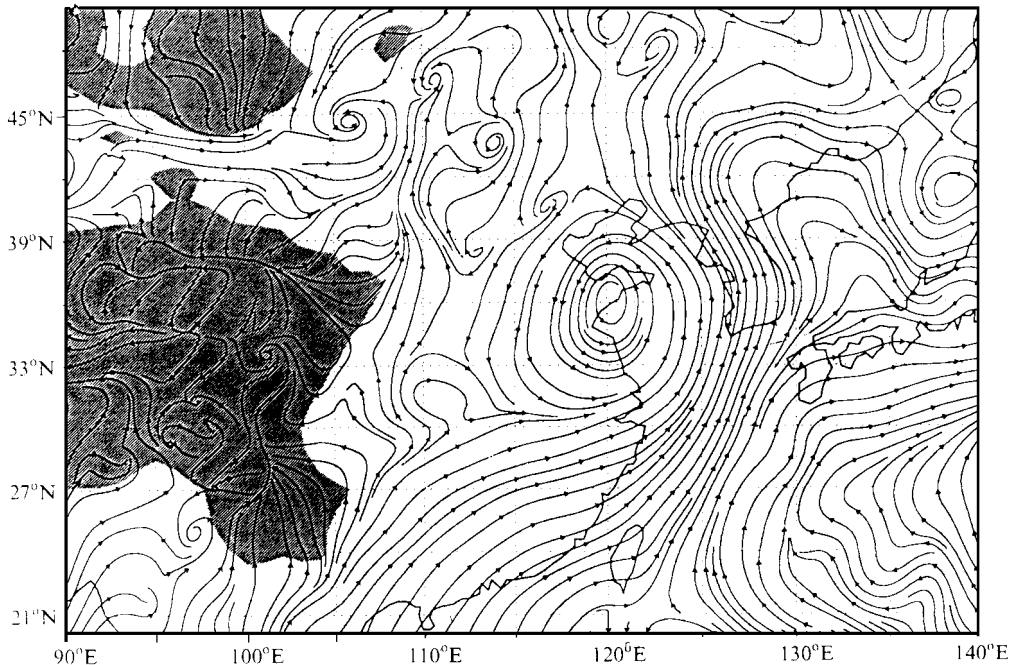


图 10 1998 年 7 月 31 日 00 时 (UTC) 850 hPa 流线图

的西南气流从南海、中南半岛等热带地区一直伸向华北，甚至向北推进达 45°N 以北的地区。正是这支西南气流向气旋性涡旋区输送了大量的水汽。而在日本海和俄罗斯远东地区为高压脊区，这种经向型的分布，尤其有利于我国东北地区的降水。事实证明，这一看法是有根据的，图 11 给出了 1998 年 7 月 31 日 00 时 (UTC) 整层水汽通量散度的分布，其中负值区代表辐合区，即水汽集中的区域。沿黄海、渤海及朝鲜半岛等地区是水汽通量辐合区，此时这片水汽供应区不在长江流域，随着夏季风的推进已到达了中高纬度区域，它造成了东北地区的强烈降水，标志长江中下游“二度梅”的结束。

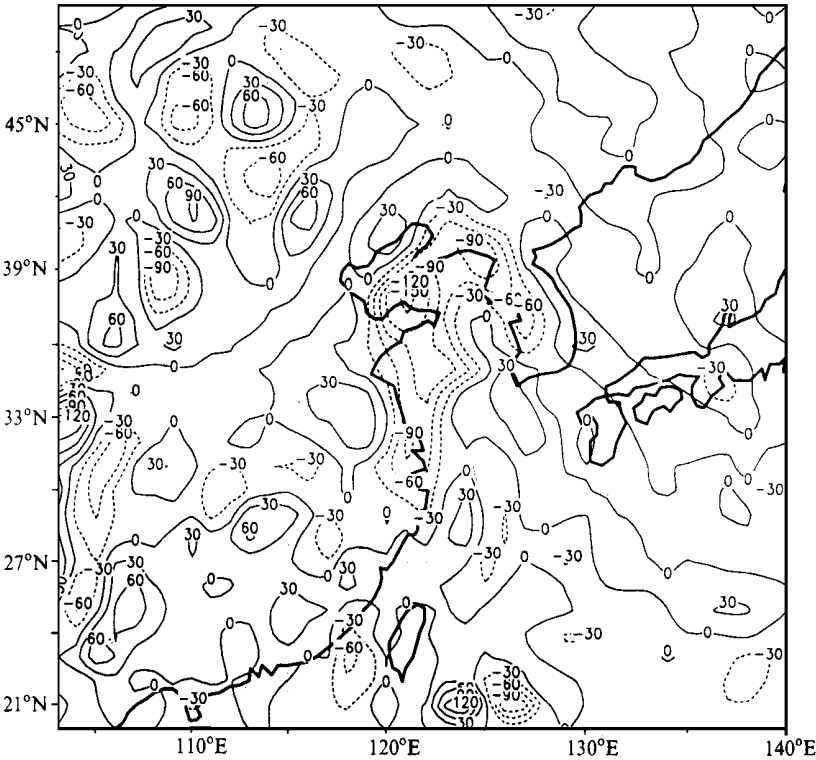


图 11 1998 年 7 月 31 日 00 时 (UTC) 整层水汽通量散度图
单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

5 结语

通过对 1998 年 7 月下旬发生于长江中下游的暴雨的分析，我们可以获得如下初步的认识：

- (1) 在 1998 年 7 月 20 日前后，由于大尺度的大气环流出现明显的调整，其中很重要的是副热带高压明显的向南撤退并稳定在偏南位置，致使降水区有可能在整个 7 月下旬始终维持在长江流域一带。
- (2) 中高纬度的槽脊系统始终稳定维持在有利位置之下，不断有冷空气南下至长江

流域,同时,由于夏季风比平均值偏弱,其推进过程中,其前沿抵达并停滞于长江流域,使这一阶段在长江流域有一条东西向的切变线得以维持。

(3) 在对流层上层,约 200 hPa 的层次上,可明显地看到有一闭合的高压系统维持在高原附近。在 7 月下旬,在此高压东侧的辐散区域,正好停留于长江中游的上空,而不像其它个例那样,强辐散区位于长江下游及沿海地区。这种高空形势的有利配合,为这一地区的垂直运动的发展提供了有力的帮助。

(4) 自 7 月 20 日始,首先在三峡地区至江汉平原有中尺度低压生成,以后一直不断在长江中游地区发生发展,引发大量的降水,降水区广及到湖北、湖南和江西等省的广大区域。

(5) 在这些中尺度系统发生发展的过程中,我们注意到除了存在中尺度系统外,武汉地区 7 月 21 日凌晨 1 小时内降水达 88.4 mm,可能是由强烈发展的中尺度系统所造成。黄石市在 2 天内降水达 500 mm 以上,可能也是强烈的中尺度对流系统的影响所致。对于这样强烈发展的对流系统,应该进行更深入的研究。

(6) 7 月下旬长江中下游暴雨(“二度梅”)的结束,亦是受到大尺度环流背景调整的影响。这时,副热带高压北抬并向西伸展,季风也在长期停滞于长江流域之后,向北推进,导致了长江中上游和东北地区较强的降水。

参 考 文 献

- 1 陶诗言, 1998, 中国之暴雨, 北京: 气象出版社, 1~225.
- 2 王作述, 1963, 一次江淮流域切变线过程的研究, 气象学报, **33** (2), 189~203.
- 3 谢安、肖文俊、陈受钧, 1980, 梅雨期间次天气尺度扰动的能量平衡, 气象学报, **38** (4), 351~359.
- 4 施曙、赵思雄, 1994, 梅雨锋上与强暴雨有关的中低压及其三维环境流场的诊断研究, 大气科学, **18**, 476~484.
- 5 许秦、周晓平, 1982, 非静力平衡大气中的斜压不稳定, 大气科学, **6**, 335~367.
- 6 刘建、张可苏, 1988, 梅雨锋对流活动的一种可能触发机制—关于非均匀层结、复杂环境风场下对称不稳定的研究, 大气科学(特刊), 202~216.
- 7 Chen, G. T. J. and C. P. Chang, 1980, The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough (Meiyu) over southeastern China and Japan, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 942~953.
- 8 Kato, K., 1985, On the abrupt change in the structure of the Baiu front over the China continent in the late of May 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 20~36.
- 9 Ninomiya, K. and H. Muraki, 1986, Large scale circulation over East Asia during Baiu period of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 409~429.
- 10 Akiyama, T., 1984, A medium scale cloud cluster in a Baiu front, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 485~504.
- 11 Matsumoto, S., K. Ninomiya and S. Yoshizumi, 1971, Characteristic features of “Baiu” front associated with heavy rainfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 267~281.

Study of Heavy Rainfall in the Changjiang River during July 1998

Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong and Zhang Feng

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, the heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 has been studied. The

main conclusions have been made as follows: (1) Subtropical high associated with the rainband position, retreated southward and maintained in South China. The large scale systems were very favorable to the occurrence of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998. (2) Troughs in the middle latitude was located in North China and Mongolia and cold air came from the trough invaded southward to the Changjiang River. (3) Summer monsoon weakened in 1998, it advanced just to the Changjiang River rather than North China, and transported a very rich moisture and warm air to the Changjiang River area. (4) A shear line formed between cold air from North China and warm air from tropical ocean, and maintained along the Changjiang River. (5) Some severe mesoscale systems occurred and developed in the shear line in the middle reaches of the Changjiang River. It was the mesoscale systems that produced the severe heavy rainfall in the Changjiang River, in July 1998.

Key words Changjiang River valley heavy rainfall