

2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨 系统的中尺度分析^{*}

毕宝贵^{1,2)} 刘月巍²⁾ 李泽椿²⁾

1) (南京气象学院大气科学系, 南京 210044)

2) (中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘 要 采用实测资料对 2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨过程进行分析后认为: 除了有利的大尺度条件之外, β 中尺度天气系统的发生发展是造成本次强暴雨的最直接原因, 这类系统的发生发展具有很强的局地性和突发性。分析表明, 对流层中低层水汽的大量集中以及对流不稳定条件的存在可能对此类系统发展提供了有利环境, 对其启动的机制作了初步的讨论, 认为地形的动力强迫和地面冷锋以及低空急流扰动可能对此类系统的发生发展起了触发作用。

关键词: 暴雨; 对流不稳定; β 中尺度; 地形

文章编号 1006-9895 (2004) 05-0747-15 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

1 引言

近年来, 气象工作者广泛研究了长江流域的暴雨^[1~6], 尤其对 98.7 暴雨研究较多^[4~6], 取得许多新成果和观测事实。同时, 科研人员还对华南地区^[7]和青藏高原的暴雨进行了试验, 也取得了较大的进展, 但对西北地区东部的暴雨研究较少^[8,9]。西北地区暴雨与长江、华南暴雨有何差异, 目前还不甚清楚。

2002 年 6 月 8~9 日, 西北地区东部(甘肃东部、青海东部、宁夏、陕西)出现了一次历史同期罕见的大范围降雨天气过程, 尤其是陕南地区的大暴雨造成了山洪爆发和河水猛涨, 引发了部分山体滑坡、泥石流等多种自然灾害, 死亡失踪 450 余人, 给灾区群众生命财产和社会经济发展带来了严重损失。因此, 本文除了使用常规高空和地面资料外, 还使用了陕西省区域测站每小时一次的地面降水和卫星提供的每小时 TBB ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 资料来分析这次突发性暴雨发生、发展过程及其相伴的中尺度天气系统活动。

从西北地区东部地形分布(图 1)可以看出, 陕西省位于青藏高原东侧, 南北长、东西短, 中间受东西走向的秦岭山脉阻挡, 同时其南部受到大巴山脉的影响, 气候差异较大。陕南一带地形更是复杂, 地势高差大, 波状起伏, 沟谷深切, 谷坡陡峻, 汉中的佛坪、宁强和安康西部的宁陕、石泉等地在气候背景上是暴雨和大暴雨的多发地带。本次暴雨过程的东风和南风急流不仅将水汽输送到陕西, 同时, 东风急流在青藏

高原东侧的地形抬升和南风急流在秦岭南坡的抬升可能对此次强暴雨系统的发生发展起了加强作用（地形作用及其他数值试验将另文讨论）。

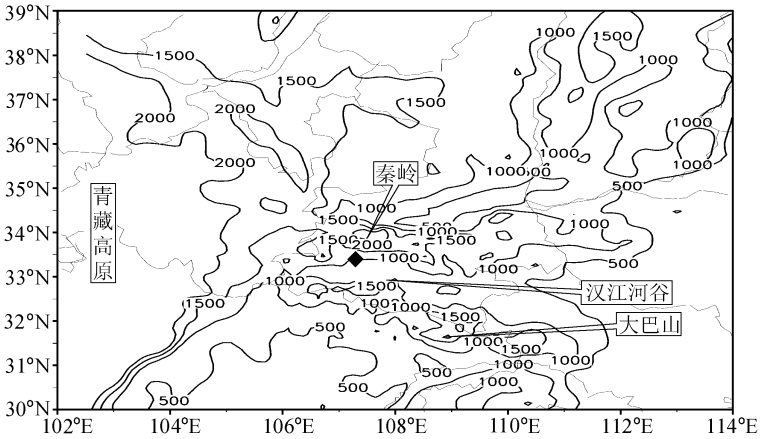


图 1 西北地区东部地形高度（单位：m），（“◆”为佛坪大暴雨中心所在地）

2 降水过程及大尺度环流背景

2.1 强降水系统及其其中尺度特征

2002 年 6 月 8~9 日，青藏高原东侧的陕西省及四川省东北部遭遇一次暴雨~特大暴雨过程，陕西省全省 99 个气象站都降了大雨，其中 44 站达到暴雨强度，5 站达到大暴雨标准，其强降水范围之广，强度之大，为陕西省历史同期所罕见。本次暴雨有两条明显雨带，一条位于陕北的长城沿线，24 h 雨量为 60~90 mm，另一条位于陕西西南部的汉中至四川东北部，24 h 雨量为 80~200 mm（图 2）。这两条雨带处于陕西的两条多暴雨带：长城沿线和汉江河谷。

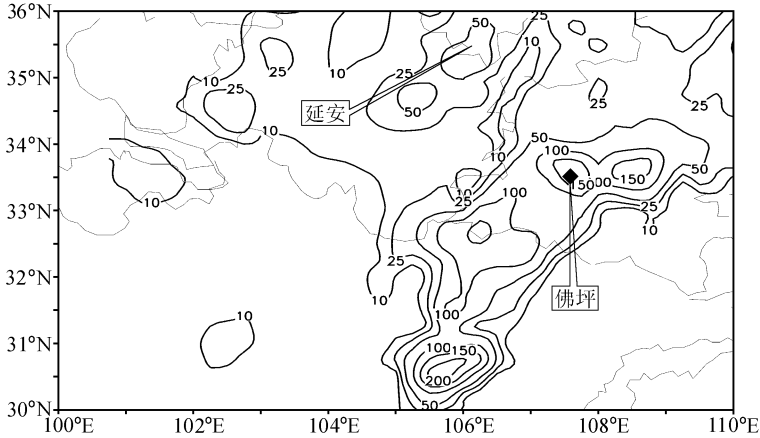


图 2 2002 年 6 月 8 日 08 时~9 日 08 时西北地区东部降水量（单位：mm）

从 6 h 雨量可以看出（图略），上述两条暴雨带特征不同，其中长城沿线暴雨集中在 6 月 8 日 08~20 时（北京时，下同），6 h 最大降水中心分别为 67 mm 和 35 mm，随

后雨带东移与汉江河谷雨带合并为一条, 呈东北—西南走向。汉江河谷雨带 6 月 8 日 08 时~9 日 08 时稳定少动, 8 月 20 时前降水强度均匀, 20 时后降水迅速增大。可以看到汉江河谷雨带最明显的特点是沿汉江河谷的切变线上降水分布是不均匀的(图 2、图 5a), 主要有两片雨区。一片位于佛坪东部和宁陕西部, 有两个 190 mm 的中心存在, 另一片位于宁强县附近, 中心达 150 mm 左右。这两片主要降水区的降水中心相距约 100 km, 它们与切变线上的扰动相对应。4 个大降水中心分别位于宁强、佛坪、宁陕及重庆北部, 位于秦岭和大巴山的迎风坡。佛坪是陕西省降雨量最大的气象站, 其降雨集中在 8 日 20 时到 9 日 10 时, 1 h 最大降雨量达 52.8 mm, 而且发生在夜间 00~01 时, 24 h 降雨量达到了 206.5 mm, 为大暴雨, 突破了本站同期历史最高记录, 而位于佛坪东部的四亩地、新场、宁陕皇冠等水文站也分别出现了 221.5 mm、218.9 mm 和 211.2 mm 的强降水, 也是灾害最严重的地区所在地。

本文的目的是集中讨论汉江河谷雨带的陕南降水, 三个陕南大暴雨中心(大于 100 mm)的水平尺度均小于 200 km, 其宽度约 50~100 km, 而其长度约 100~200 km, 三个大暴雨中心从时间上看还是先后形成, 主要降水发生在夜间, 最大降雨中心位于佛坪东部 50 km 处(33.44°N, 107.59°E)四亩地镇(降水总量 221.5 mm), 其中 8 日 23 时~9 日 11 时 12 小时降水量达 218.5 mm, 因而, 是属于很典型的 β 中尺度系统。为了揭示上述三个大暴雨中心是如何随时间而演变的具体过程, 我们分析了三个大暴雨中心附近 6 个水文测站以及佛坪和宁陕气象站逐时降水变化情况(图 3)。

我们的雨量资料除了陕西省所有气象站点(含气候站)的 24 h 降水量之外, 还获得了陕南地区的所有水文站点雨量资料。其中一些是逐时雨量, 有些是 3h、6h、12 h 和不定时的雨量资料, 这些资料对分析强降雨的发生发展及其中尺度特征非常重要。

从这些站的降水记录变化(图 3)可知, 暴雨是在 8 日夜至 9 日凌晨突然发生的。佛坪东部的四亩地、新场、宁陕皇冠的强降水出现在 9 日凌晨至 8~9 时, 而佛坪及其西部二郎坝站的降水发生在 8 日 21 时~9 日 03 时, 其中佛坪的 1 h 最大降水量为 52.8 mm。宁陕降水呈双峰分布, 峰值分别出现在 04~05 时和 07~09 时, 而其余站点的降水都是单峰分布, 峰值一般在 00~05 时出现。这些站所在区域的水平尺度为 50~100 km, 这说明在整个降水过程中存在造成强降雨的 β 中尺度天气系统的活动。

以上分析表明, 本次大暴雨具有突发性和局地性特点, 强降水从生成到结束只有十几个小时, 同时, 降水分布不均匀, 具有 β 中尺度天气系统活动的特征。4 个大暴雨中心都位于山脉迎风坡, 与多年气候统计结果相符。

2.2 大尺度环流背景

2.2.1 东高西低形势场的建立

从 500 hPa 环流场上[图 4a(见图版 I)]可以看到, 7 日亚洲中高纬度上空维持着两槽一脊型环流, 受台湾东部热带风暴的影响, 副高位置偏东; 位于中西伯利亚上空的高空冷涡不断分裂出冷空气, 影响我国华北、东北地区。另外, 在乌拉尔山上空的高空冷涡也不断有小槽分裂出来东移影响我国中低纬度地区。上述两股冷空气东移过程中汇合后与南支槽同位相叠加, 于 8 日白天在 100°E 附近[图 4b(见图版 I)], 即甘肃、青海、四川、云南上空叠加成一深槽, 东亚地区大气环流经向度加大, 该深槽逐渐东移导致陕南大暴雨的出现。

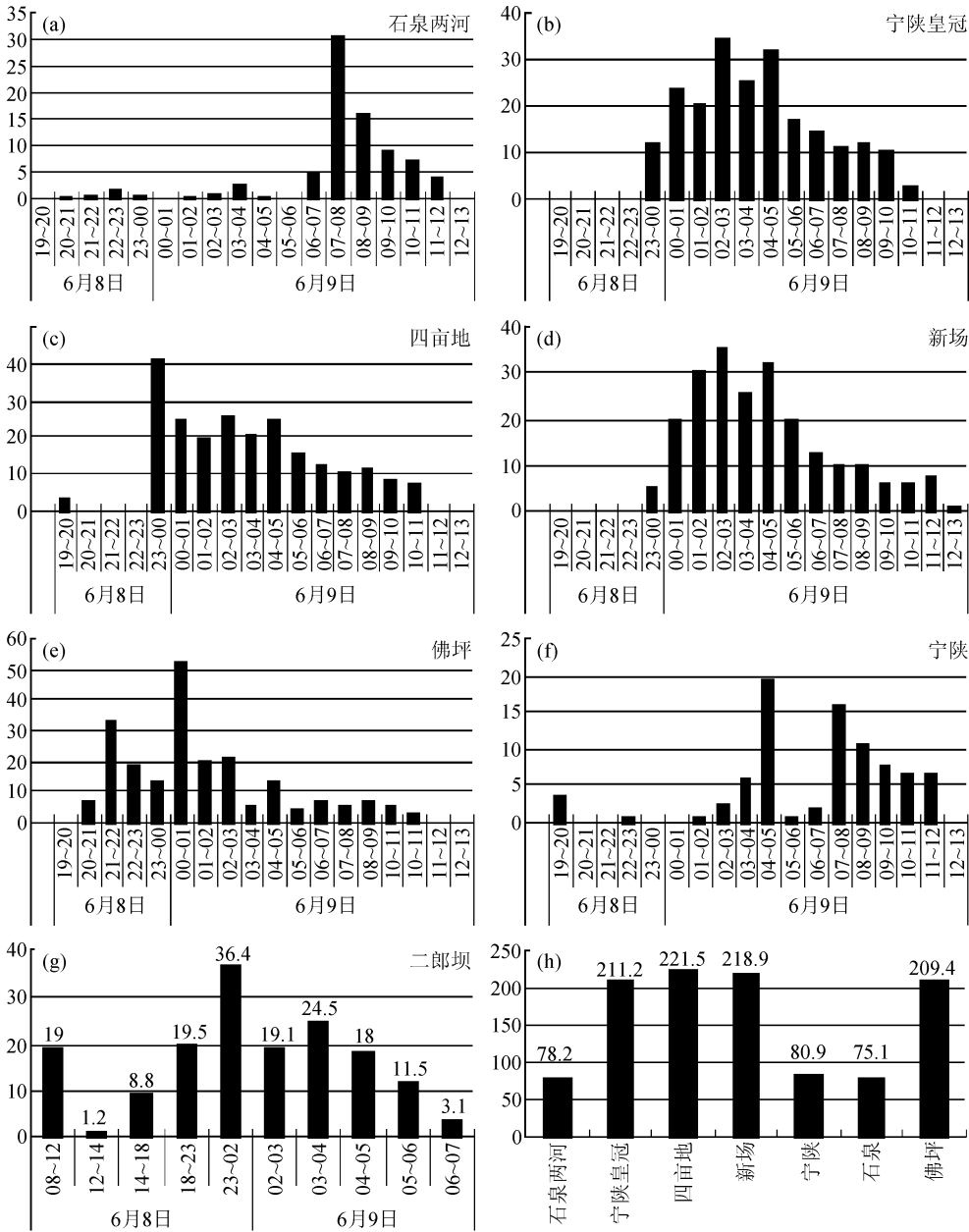


图3 2002年6月8~9日陕南地区大暴雨中心附近气象、水文站的降水量演变(a~g)和过程总降水量(h)图(单位:mm)

2.2.2 低空急流的建立

在低层 700 hPa 图上, 6 日 08 时(图略)高原东部西宁至昌都有低涡生成, 同时在银川至东胜间有一中尺度河套高压环流存在, 并有 12℃暖中心配合。7 日 08 时(图略)河套小高压环流向偏东南方向移至延安至太原间, 与来自朝鲜半岛西进的高压接近; 7 日 20 时 40°N 附近的东风急流有明显增强, 同时在低涡北侧有温度小槽出现, 锋区变得密集, 冷平流明显。从风速场上分析, 东风风速突增。8 日 08 时冷槽南压, 低

槽转为南北向 [图 5a (见图版 I)], 槽区在 105°E 附近; 而在 110°E 以东河套小高压东移与连日来位于朝鲜半岛附近的高压打通, 导致高压西伸北抬, 在高压后部形成了一支强的东南风急流, 北京至青岛形成闭合高压中心, 形势场突变。与此同时, 南风气流风速持续加大。在四川东南部经陕南至陕北一线的西南暖湿气流形成通畅的水汽通道。同一时次 850 hPa 上沿南海至陕西也有一明显的水汽输送通道, 而由水汽通量场分析 (图略), 东风急流对这次暴雨水汽的输送则不明显。

2.2.3 地面为鞍形场

冷锋进入鞍形场后加强, 移速减缓, 与华北高压底部的冷空气相遇形成锢囚锋, 致使降水量加大。蒙古国冷空气南下补充至华北高压, 使得东路高压的中心强度增强, 且向西伸形成阻挡; 西路冷空气东移速度减缓, 两股地面冷空气相遇, 在关中西部形成明显的锢囚锋 [图 5b (见图版 I)], 锢囚锋北段两侧均有雨区出现。8 日 20 时在关中一带有中尺度辐合, 锋面移动较慢, 倒槽南撤, 锢囚锋移动到陕南一带, 锢囚锋翻越秦岭得到明显发展, 这可能与地形的激发有关, 对应陕南一带强降水开始, 佛坪等地遭受大暴雨袭击。一些气象工作者^[11~15]讨论过地形对锋面的作用, 得到一些有意义的结果, 吕克利等^[16]利用半地转模式模拟了地形对冷锋、暖锋和锢囚锋发展的影响。本文所得结果与前人的结论相符, 山脉对锋面下层的影响, 特别是对近地面锋区的影响最大, 山脉对高空锋区影响不大 (图 14); 锢囚锋过山时 (8 日 23 时), 在锋面和地形的共同作用下, 在山的下游 (秦岭南坡) 中下层激发出水平范围为 100~200 km 的强上升运动区 (图 10), 地形对锢囚锋的上升运动增幅作用机理有待进一步研究。

2.2.4 高低空形势配置

从图 6 可发现, 850 hPa 主支来自西西南方向, 从孟加拉湾经中南半岛流向我国西北地区东部, 低空急流将孟加拉湾、南海的水汽源源不断的输送到西北地区东部, 为暴雨的发生提供了水汽条件; 另一支是来自华北冷高压南部的偏东气流; 第三支是来自高原的西北气流, 三支气流交汇于西北地区东部, 交汇中心位于陕西南部地区; 同时 200 hPa 副热带西风急流从 6 月 7 日开始加强 (图 6a), 8 日东东北—西西南走向的高空急流带形成 (图 6b), 西北地区东部位于 200 hPa 高空急流入口处的左前方; 6 月 7 日 500 hPa 在我国东部有高压脊形成 (图 6a), 8 日高压脊向北伸展 (图 6b), 建立东

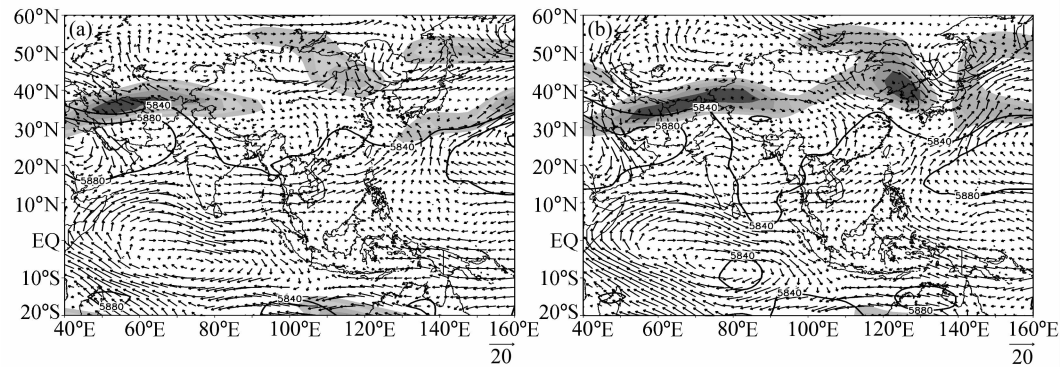


图 6 高低空形势配置, 粗实线为 500 hPa 大于 584 位势什米等值线, 矢量箭头为 850 hPa 合成风场, 阴影为 200 hPa 大于 30 m s⁻¹ 全风速
(a) 2002 年 6 月 7 日; (b) 2002 年 6 月 8 日

高西低形势使得东移至河套地区的高压北伸对冷空气形成阻挡，新疆低槽东移南下与高原低槽区叠加后，形成明显加深的南支槽，槽前出现较宽的西南气流带，形成了有利于暴雨发生的高空形势场。

以上大尺度形势分析表明，东高西低形势场、低空急流的建立和高低空形势的配置决定了这场降雨出现在西北地区东部（此时常年平均是南方雨季时间，而非西北雨季），又由于地形的作用，使陕南地区成为这次强降雨过程的降水中心。同时，低空急流的扰动可能是暴雨的触发条件，而地面锢囚锋翻越秦岭加强可能是产生陕南大暴雨的直接原因，这其中地形的动力和热力作用可能很重要。

3 β 中尺度系统的发生、发展分析

暴雨前后逐时红外云图的演变表明 [图 7（见图版 II）]，产生暴雨的云团具有 MCC 的特征。它们形成于大巴山与秦岭南麓一带，在高原东部低槽东移作用下，对流单体在副高西北侧低层暖切变中合并发展，低空急流和准北向湿舌在此区域十分清楚。

3.1 初生阶段

8 日 19 时在佛坪地区有弱的对流云团（A）生成（TBB 小于 230 K；图略），20 时该云团有所加强（TBB 小于 220 K），21 时在宁强一带有两个弱对流云团（B、C）生成（TBB 小于 240 K），另外，在四川东北部一带有一南北向花生状对流云团（D）发展（TBB 小于 210 K）（图 8）。

3.2 发展阶段

8 日 22 时，A、B、C 云顶冷云砧扩大，A 云的西南象限最冷云 TBB 小于 210 K，并位于佛坪东北部上空；D 云团发展成细胞状，TBB 小于 210 K 等温线变成光滑圆形，该云团在以后几个时刻最冷云顶 TBB 变化不大。之后这几个云团迅速发展，向东北方向移动。A、B、C 云团迅速发展增强，云顶温度快速降低，到 9 日 01 时，冷云砧扩大并汇合，但各自的强冷云顶保持独立，D 云团东北象限云顶发展，并逐步移入 A、B 云团，对流单体发展达到最强。

3.3 成熟阶段

分析发现，这次 MCC 的成熟阶段是成熟减弱再发展再减弱的过程。9 日 02 时，A、B、C 云团的冷云砧完全合并（以后称 A 云团），MCC 到了 Maddox 规定的成熟阶段条件^[10]，佛坪的第一次强降水时段结束。A 云团 220 K 等温线呈相对光滑的环形，冷云顶发展到最高，云顶温度达到最低，并有两个 TBB 小于 210 K 的强冷中心，一个在佛坪东部上空，另一个在西安上空。此时为云团上冲最强时刻，云团发展成细胞状，TBB 小于 220 K 面积达到最大。在 B、C 云团合并到 A 云团的同时，从 D 云团分裂出两个对流云团（E、F 云团）。03~05 时 A 云团逐渐减弱，降水也随之减弱；E、F 云团发展东移造成佛坪东部宁陕县的持续强降水。05 时 E 云团云顶发展，TBB 小于 210K 的面积明显扩大；F 云团逐渐减弱，于 06 时并入 E 云团，使 E 云团面积扩展，发展出两个小于 210 K 的强冷中心，偏南中心在宁强一带，偏北中心在佛坪和宁陕一带，导致佛坪和宁陕的第二次强降水过程产生，这时 A 云团已开始东移散开，且已移

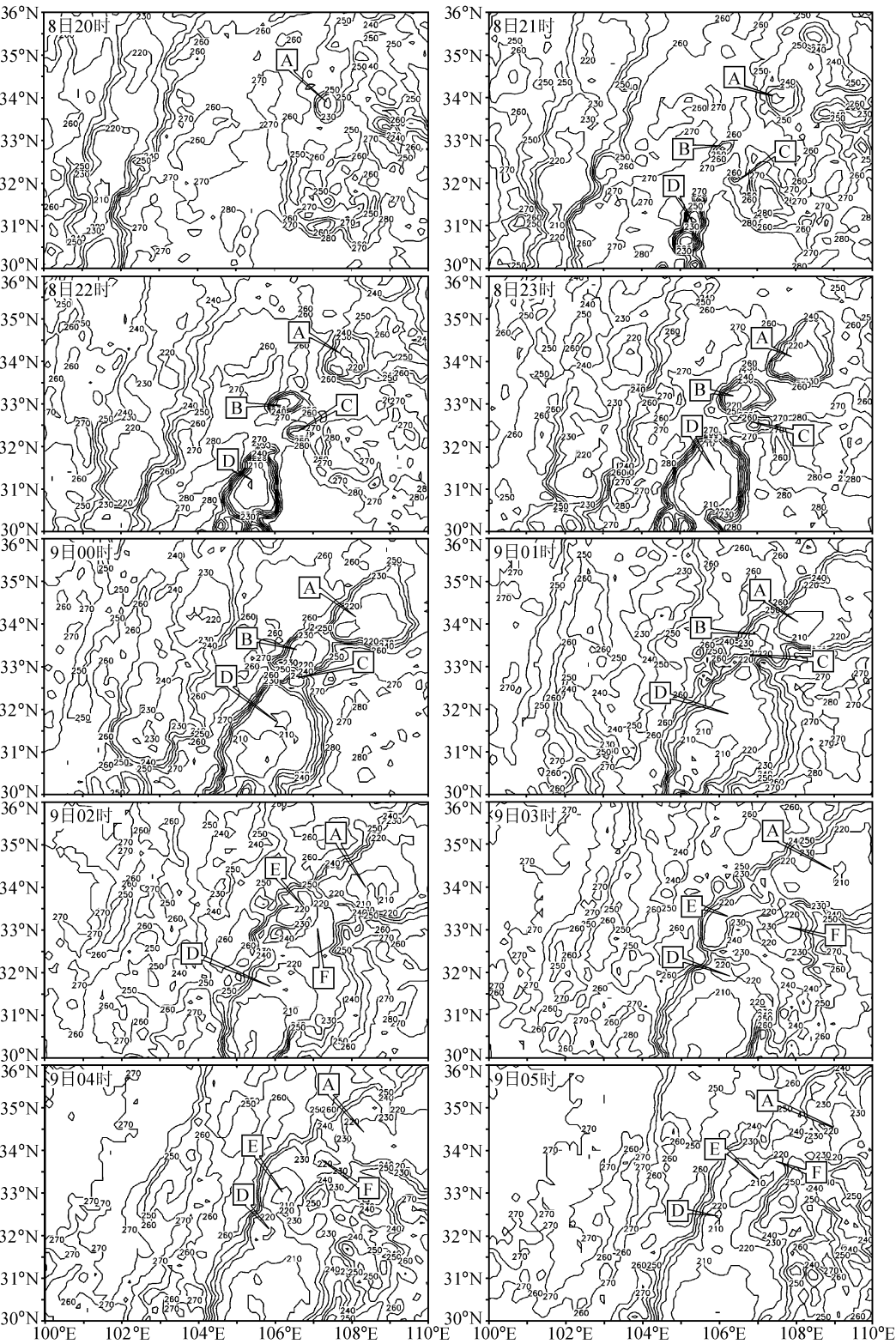


图8 2002年6月8日20时~9日05时逐时TBB(单位:K)演变图

出西安地区。07 时整个云系明显减弱, A 云团已基本移出陕西。E 云团向东北伸展, E 云团的两个强冷中心稳定少动, 08 时云系减弱, E 云团已移至西安一带, 导致西安地区第二场较强降水时段开始, 不过这时云顶 TBB 大于 210 K。

3.4 减弱、消亡阶段

9 日 09 时以后各云团开始分离, 并迅速减弱东移或就地消亡, 各种降水逐渐转为层状云降水。到 14 时除了陕南东部个别地方有弱降水外, 陕西这次强降水过程基本结束。另外, 从仅有的两张西安雷达回波图片 [图 9 (见图版 I), 此次降水过程陕西省只有西安单部雷达开机 2 次] 可清楚看到, 云团 A 19 时位于西安西南方 150 km 的佛坪县境内, 与 19 时的红外云图和 TBB 相对应, 强度只有 25 dBZ, 云团直径 20 km 左右; 而 23 时云团迅速加强扩大, 强度大于 35 dBZ, 直径接近 150 km。由于雷达时次和半径的限制, 除云团 A 外, 其他云团无法看到。即使从仅有的雷达图片也可以发现, 佛坪第一时段强降水是由云团 A 造成的, 进一步证实了上述利用 GMS 红外云图和 TBB 得出的结论。

张小玲等^[6]认为引起强降水的 MCC, 大多数是多对流单体的对流系统 (MCS), 在有些 MCS 中, 对流单体的生成区位于 MCS 的前部边界处, 有些则位于后部边界处, 本次个例的 MCS 是属于前者。在这次 β 中尺度系统发展过程中, A、D 云团生命史较长 (大于 10 h), 其余云团生命史都小于 6 h。并且一个突出的特点是: A、D 云团移动缓慢, D 云团东北象限不断有对流单体生成, 这些单体生成后从 D 云团分裂出来随环境风向东北方向移动, 并补充到 A 云团使其长时间维持对流旺盛状态。从云图和 TBB 的演变情况 (图 6、7) 看, 佛坪出现最大降水量的一个很重要的原因是该地区上空累计长达 7 h 受 TBB 小于 210 K 的强对流云团影响。另外, 值得注意的是 00~02 时突发性暴雨发生以后, β 中尺度 A 云团的冷云顶面积明显扩大, 于 03 时达到最大面积, 这说明强降水过程发生后, 大量潜热的释放对强对流系统的发展有正的反馈增长过程, 但其雨强与系统的大小没有明显关系。

4 中尺度暴雨系统的结构分析

由于本文重点关注发生在陕西南部地区的大暴雨, 其中佛坪与宁陕交界之处降水量最大, 因此, 接下来主要对陕南降雨中心进行中尺度暴雨系统的结构分析。以下分析除了使用常规高空和地面资料外, 还使用了陕西省区域所有测站 (98 站) 每 3 小时的地面资料。

4.1 水平结构

由于西北地区东部的地形复杂, 有海拔几千米的山峰, 也有海拔几百米的平原和谷地, 因此很难选择某一等压面来分析地面流场。为了解决这一问题, 我们利用 NCEP 再分析资料作为背景, 并利用 NCAR-PENN 的 MM5V3 中尺度模式将获得的精细地面资料 (水平分辨率大约 30~50 km) 分析到 $\sigma=1$ 的模式最低层 (模式所用地形分辨率为 $5''$, 基本能够反映地形的真实情况), 这样得到的地面分析场是能够真实反映地表面气流相对于山脉的分布情况, 以下将以此来分析地面流场的演变。由于华北高压的发展, 在地面流场上东南气流非常强盛, 6 日 11 时, 东南风从我国东南沿海一直

伸展到陕北地区（图略），与来自贝加尔湖的东路冷空气交汇于陕北地区，在高原的迎风坡上出现了中到大雨，从地面以及 850 hPa 和 700 hPa 流场图上可以发现，冷空气是先沿高原北侧向东移动，然后沿高原东坡向西南倒灌，主要降水发生在风向与山脉交角较大的地区，降水开始时发生在陕北的迎风坡上，随着冷空气的向西南扩散，可以看到降水先向东南移动，然后向西南倒退，但主要降水仍发生在山脉迎风坡上 [图 10（见图版 I）]，同时还可以发现雨带呈东北—西南走向，与山脉的交角很小，而与气流基本呈垂直分布。从地面流场、地形高度和实况降水的演变，可以推测地面东南风和地形在这次大暴雨过程可能起主要作用。

从 700 hPa 和 850 hPa 流场（图 11）上可以发现，本次暴雨是由三支气流共同作用的结果，第一支是来自华北高压南侧的东风急流，第二支是来自于孟加拉湾的南风急流，另一支是来自高原东侧的西北气流，三支气流于 6 月 8 日 20 时交汇于陕南地区。从温度场的演变也证明上面所说的低层冷空气是倒灌的这一说法，700 hPa 上鼻状温度槽伸展到华北西部后呈倒钩向西南扩散，并形成切断的冷中心。而 850 hPa 温度分布与 700 hPa 相似，但温度槽比较宽平，东路冷空气的温度槽与西路冷空气相连，由此可以推测东路冷空气主要是通过低层来侵入陕南地区的，并与地面冷式锢囚锋的形成密不可分。

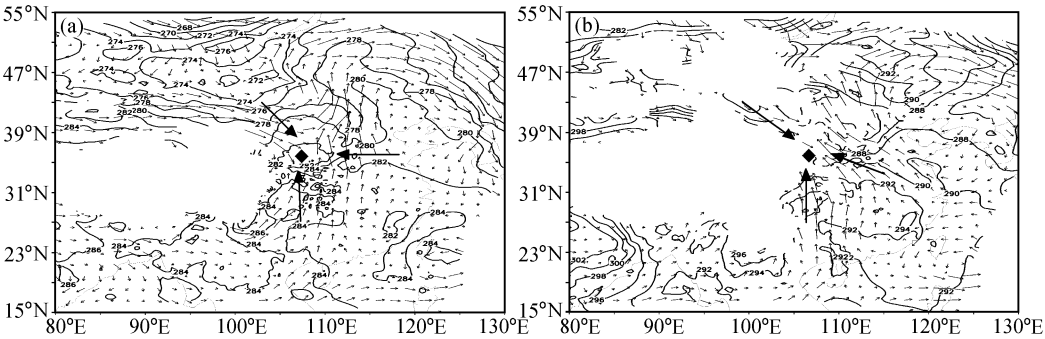


图 11 2002 年 6 月 8 日 20 时风场（单位： m s^{-1} ）和温度（单位：K）分析
带黑色箭头的实线代表三支气流，（a）700 hPa；（b）850 hPa

4.2 垂直结构

最大降雨中心位于佛坪东部 50 km 处（33.44°N, 107.59°E），以此为中心作垂直结构分析。

从图 1 所给地面海拔高度看出，佛坪地区位于秦岭南坡，同时在其南部还有一条近东西走向的大巴山；另外佛坪东部地势比西部地势低，汉江河谷地形呈类似喇叭口形。从合成风场纬度—高度剖面图可以看到，迎风坡的抬升作用非常明显，从 8 日 08 时陕南地区就存在上升运动区，14 时上升运动首先在山顶突然加强，17~20 时上升运动有所减弱（以上各时次图略），但在夜里 23 时（图 12a），垂直运动再一次加强，但大值中心位于半山腰，到次日凌晨 02 时（图 12b），整个山谷都存在强烈的上升运动，同时偏北气流也在向南扩展。垂直速度的这种变化可能与地形热力作用产生的热力环流密不可分，白天山顶加热大于山谷，产生强烈上升运动，而夜里正好相反，山谷风可能在这次降雨中起到一定作用。9 日 08 时以后，冷空气侵入陕南地区，垂直速度减

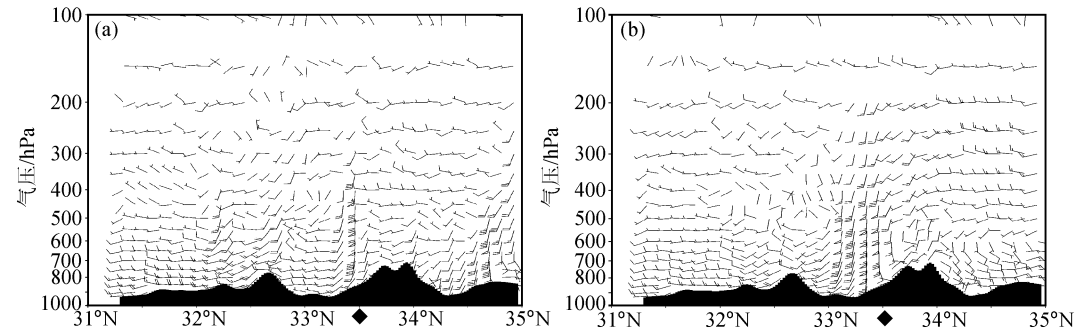


图 12 过暴雨中心沿 107.59°E 水平速度 v 和垂直速度 w 放大 25 倍合成流场纬度—高度垂直剖面图
(a) 8 日 23 时; (b) 9 日 02 时 (模式分析内插所得)

小, 降水减弱。

从合成流场经度—高度剖面图可以看到, 8 日 11 时 (图略) 形成了比较完整垂直环流圈, 在 106.5~107.5°E 上升, 到达 600 hPa 高度向东运动, 在 110°E 左右下沉, 然后从 110°E 向西运动, 这个环流圈的建立可能在本次暴雨中起主要作用, 该环流圈将低层水汽输送到陕西, 同时, 在该地区产生了持续的上升运动。8 日 14 时以后, 在原环流圈之上叠加几个尺度较小的垂直环流圈 (下称次级环流), 叠加次级环流随时间加强, 尺度也在减小, 可以看出, 白天在山顶上升, 山谷下沉, 夜间情况正好相反, 并且垂直环流明显加强, 在 8 日 23 时 (图 13a) 和 9 日 02 时 (图 13b) 在佛坪和宁陕西部存在两支强烈发展的垂直环流, 对应两个暴雨中心。9 日 08 时以后 (图略), 次级环流减弱, 降雨也逐渐减弱。夜间垂直次级环流发展加强可能有两个原因, 一个是由于地形山谷风的作用, 另一个可能是降水的潜热释放激发了上升运动, 详细情况将另文作深入研究。

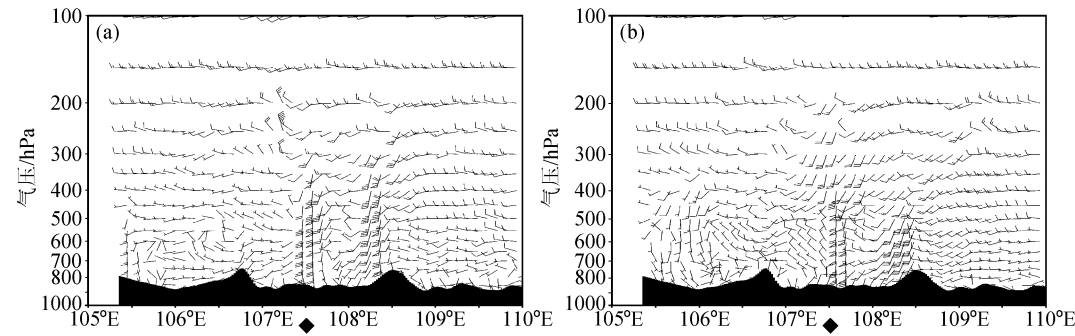


图 13 过暴雨中心沿 33.44°N 水平速度 u 和垂直速度 w 放大 25 倍合成流场经度—高度垂直剖面图
(a) 8 日 23 时; (b) 9 日 02 时 (模式分析内插所得)

4.3 动力条件分析

从涡度场 (图 14) 来看, 700 hPa 在佛坪和宁陕西部为正涡度大值区, 佛坪正涡度区从 8 日 14 时开始加强, 到 9 日凌晨达到最大 ($15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), 尔后开始减弱。而宁陕西部的大值区加强时间略早于佛坪, 其峰值出现在 8 日 19~20 时和 23 时左右, 强度分别为 $9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 500 hPa 正涡度 (图略) 大值区仍在上述两地区,

但峰值出现时间主要在夜间，相对 700 hPa 略有滞后。而 200 hPa（图略）在对应的时次为强反气旋性涡度区，有利于低层正涡度的维持和加强。

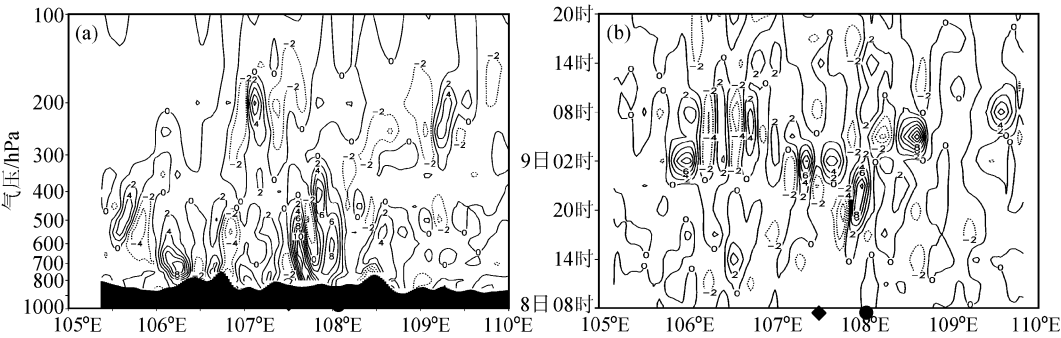


图 14 过暴雨中心 33.44°N 的涡度剖面图（单位： 10^{-4} s^{-1} ，◆为佛坪所在地，●为宁陕所在地）
(a) 6 月 9 日 02 时经度—高度剖面图 (b) 700 hPa 经度—时间剖面图

700 hPa 辐合大值区仍在佛坪和宁陕地区，出现时间与涡度场相对应。500 hPa 佛坪为辐散，而宁陕为辐合区，出现时间与涡度场相对应，而 200 hPa 上辐散在各时次佛坪大于宁陕，有利于低层辐合的加强（图 15）。

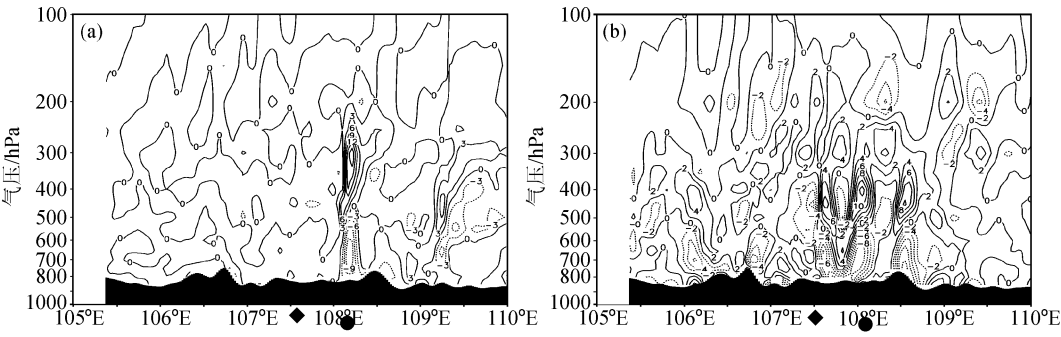


图 15 过暴雨中心沿 33.44°N 散度的经度—高度剖面图（单位： 10^{-4} s^{-1} ）
(a) 6 月 8 日 20 时；(b) 6 月 9 日 02 时

4.4 热力条件及稳定度分析

从 850 hPa θ_{se} 场（图略）可以看到，8 日 08 时形势呈“Ω”型，平凉、汉中之间为高能舌区域，汉中 θ_{se} 为 77℃；到 8 日 20 时随着低槽东移，高能中心向东南移动，安康增至 80.9℃。从 θ_{se} 的纬度—高度分布可知，8 日 11 时陕南地区处于强位势不稳定层结之中，中性层结位于 600 hPa 左右， $\Delta\theta_{se}$ （850~600 hPa）大于 12℃，此潜在位势不稳定形势一直维持到 20 时（图 16a），积累了大量的不稳定能量，8 日 23 时，对流抑制能量减小，可能受地面冷锋和地形抬升的触发，不稳定能量开始释放（图 16b）。从图 16 中可以看出对流主要发生在秦岭迎风坡，地形的动力抬升使气块达到自由对流高度从而促进强对流的发展。同时，这次过程位势不稳定层结的形成与低层暖湿平流的发展有很好的对应关系。大降水之前，层结不稳定不明显。700 hPa 上 7 日 08 时~8 日 20 时，西安温度仅在 11~12℃内变化，而露点温度却从 2℃上升到 8.9℃，温度露点差从 10℃下降到 2.1℃，在 9 日 08 时达到 0.3℃，空气已近饱和。汉中和安康的温度

也变化不大，不稳定性却有较大的增加，可见位势不稳定层结的形成不是局地能量的积累，而是水汽增加所致。低空偏南风急流将暖湿空气从孟加拉湾输送至四川盆地直至陕西省内，促使不稳定层结的形成，为暴雨的发生提供了必要热力条件。

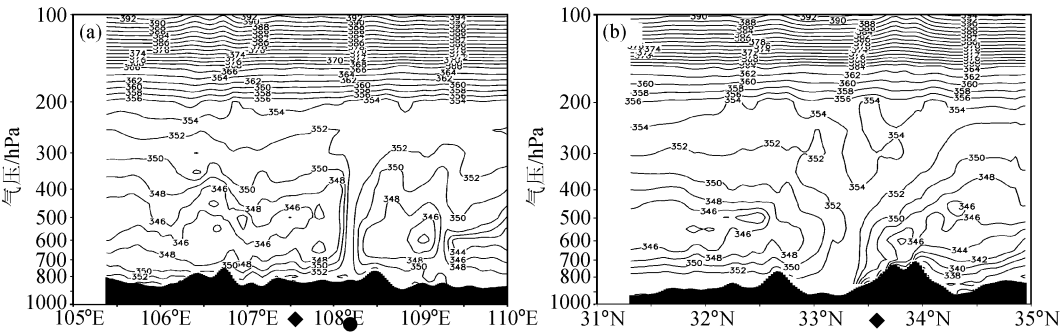


图 16 过暴雨中心 (33.44°N, 107.59°E) θ_{se} 剖面图 (单位: K)
(a) 6 月 8 日 20 时经度—高度剖面; (b) 6 月 9 日 02 时纬度—高度剖面

4.5 水汽条件分析

从水汽通量图 (图略) 可以看到, 850 hPa 主要有两条水汽通道, 一条是东风急流携带的水汽, 另一条是南风急流携带的水汽, 两者量级相当, 南风输送略强; 但 700 hPa 以南风输送占明显优势, 而 500 hPa 主要以西南暖湿气流为主。综合各层考虑, 本次暴雨的水汽主要靠偏南风急流将孟加拉湾和中国南海的水汽输送至西北地区东部。而水汽通量散度的变化也非常有利于暴雨的产生, 在 8 日 20 时 (图 17a), 首先在宁陕县 500 hPa 以下出现明显的水汽通量辐合 ($-0.12 \times 10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$), 500~300 hPa 之间辐散明显 ($0.02 \times 10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)。这种高低空配置有利于水汽的辐合、抬升和凝结, 9 日 02 时 500 hPa 以下水汽辐合范围扩大, 500 hPa 以上高层辐散强度加大 (图 17b), 并呈 “W” 形状, 与地面两降水中心对应较好。9 日 08 时以后, 水汽在陕南的输送和辐合都有所减弱 (图略)。

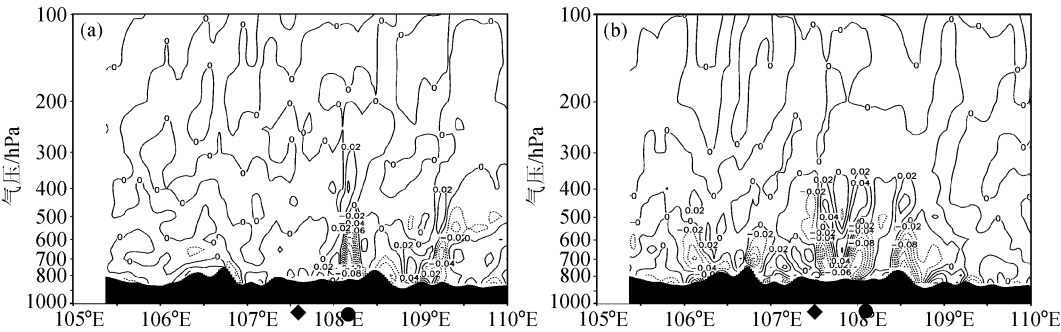


图 17 过暴雨中心沿 33.44°N 的水汽通量散度经度—高度垂直剖面图 (单位: $10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
(a) 8 日 20 时; (b) 9 日 02 时

4.6 佛坪暴雨中心动力条件时间演变特征

下面重点分析一下佛坪地区各物理量垂直各层的时间变化情况。垂直速度突变主要发生在 20 时~05 时, 最强在 23 时~02 时, 最大上升速度达到了 1.4 m s^{-1} (图

18a), 最大上升速度出现在 650 hPa。而其余时间为弱上升运动, 下沉运动不明显。涡度场大值中心比垂直速度晚出现 2 小时, 鼎盛时期为 23 时~05 时, 最强在 02 时左右 (图 18b), 0 涡度层平均在 400 hPa 左右。而散度场的变化主要发生在 21 时~03 时 (图略), 0 散度层在 550 hPa 左右, 而高层辐散非常强烈, 500~200 hPa 为深厚的辐散层, 最大辐散层出现在 400 hPa, 强烈的高层辐散与低层辐合耦合, 有利于对流的维持和发展。

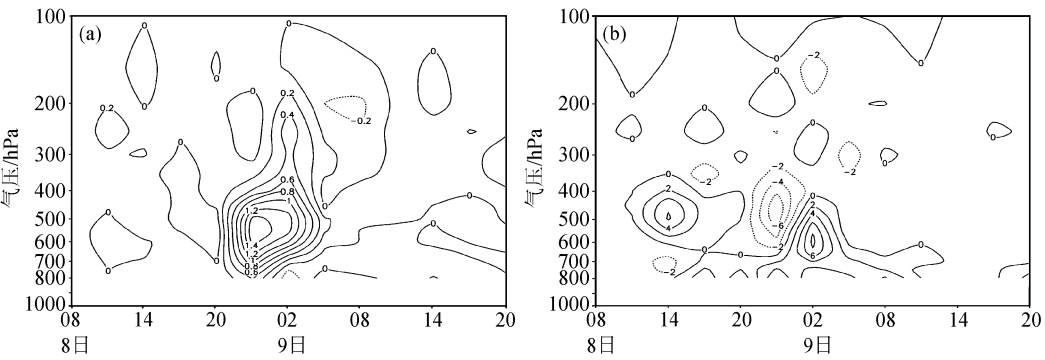


图 18 沿暴雨中心 (33.44°N、107.59°E) 时间—高度剖面图
(a) 垂直速度 (单位: m s^{-1}); (b) 涡度 (单位: 10^4 s^{-1})

从以上中尺度结构分析表明, 本次暴雨具有明显的中尺度特征, 是由三支气流共同作用的结果, 可以推测: (1) 地面东南风和地形在这次大暴雨过程可能起主要作用。(2) 东路冷空气主要是通过低层来侵入陕南地区的, 并与地面冷式锢囚锋的形成密不可分。(3) 夜间垂直次级环流发展加强可能有两个原因, 一个是由于地形山谷风的作用, 另一个可能是降水的潜热释放激发了上升运动。(4) 位势不稳定层结的形成与低层暖湿平流的发展有很好的对应关系。(5) 本次暴雨的水汽主要靠偏南风急流将孟加拉湾和中国南海的水汽输送至西北地区东部, 为暴雨的发生提供了必要热力条件。

5 结论与讨论

通过采用多种常规和非常规资料, 对 6 月 8~9 日期间陕南突发强暴雨进行了诊断分析, 结果表明, 除了有利的大尺度背景场 (风的水平切变、对流不稳定和水汽条件等) 外, β 中尺度的天气系统的发生发展是直接造成强降水的原因。这种系统的发生发展具有很强的局地性和突发性, 主要取决于当地的地形条件及大尺度背景场, 其中, 地形和对流不稳定可能是重要的原因之一。

通过对 6 月 8~9 日期间大尺度三维流场、水汽条件、不稳定条件、地形等做的分析, 得到如下结论:

- (1) 陕西、四川北部一直是水汽通量辐合的大值区, 其中水汽的主要源地可能是南海和孟加拉湾。
- (2) 地形的动力和热力作用在这次强降水中可能起主要作用。
- (3) 对 TBB 资料的分析表明, 6 月 8~9 日, 陕南地区的对流云团非常活跃, 尤其

是 8 日 22 时~9 日 02 时是 β 中尺度天气系统发展最强的时间,因而造成了强降水。

(4) 对不稳定条件的分析表明,陕南地区对流层中低层一直是对流不稳定区,不稳定层最高达 550 hPa,如此深厚的不稳定层是中尺度系统发生发展的重要条件之一,有几种可能的机制能使这种不稳定得以触发:(i) 地面冷锋;(ii) 地形动力抬升;(iii) 低空急流中的扰动。具体到底属于哪种,还需要作进一步的研究。

致谢: 国家卫星气象中心马兰处长、覃丹宇博士和陕西省气象局杜继稳研究员、李润强先生提供有关资料,吴宝俊教授提出许多指导意见,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 翟国庆、高坤、俞樟孝等,暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验,大气科学,1995, **19** (4), 475~480.
- 2 吴国雄、蔡雅萍、唐晓青,湿位涡和倾斜涡度发展,气象学报,1995, **53** (4), 387~404.
- 3 赵思雄、孙建华、陈红等,1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究,气候与环境研究,1998, **3** (4), 368~381.
- 4 胡伯威、崔春光、房春花,1998 年 7 月 21—22 日鄂东沿江连日特大暴雨成因探讨,大气科学,2001, **25** (4), 479~491.
- 5 贝耐芳、赵思雄,1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析,大气科学,2002, **26** (4), 526~540.
- 6 张小玲、陶诗言、张庆云,1998 年 7 月 20—21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析,应用气象学报,2002, **13** (4), 385~397.
- 7 孙健、赵平、周秀骥,一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响,气象学报,2002, **60** (3), 333~342.
- 8 吴宇华、段昌辉,陕西 2002—06—08 区域性暴雨天气过程分析,陕西气象,2003, (1), 4~7.
- 9 王川,青藏高原东侧一次区域性暴雨天气过程分析,陕西气象,2003, (1), 11~13.
- 10 Maddox, R. A., Mesoscale convective complexes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1980, **61**, 1374~1387.
- 11 Bannon, P. R., Quasi-geostrophic frontogenesis over topography. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **20**, 2266~2277.
- 12 Bannon P. R., A Semi-geostrophic model of frontogenesis over topography, *Cont. Atmos. Phys.*, 1984, **57**, 393~408.
- 13 Davies, H. C., On the orographic retardation of a cold front. *Cont. Atmos. Phys.*, 1984, **57**, 409~418.
- 14 Blumen, W., and B. Gross, Semigeostrophic disturbances in a stratified shear flow over a finite-amplitude ridge, *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43, 3077~3088.
- 15 Zehnder, J. A., and P. R. Bannon, Frontogenesis over a mountain ridge. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **45**, 628~644.
- 16 吕克利、农尚尧,地形与锋生,气象学报,1995, **53** (增刊), 513~528.

Mesoscale System Analysis of Extremely Heavy Rainfall in the Southern Part of Shaanxi Province during 8 and 9 June 2002

Bi Baogui^{1,2)}, Liu Yuewei²⁾, and Li Zechun²⁾

1) (*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

2) (*National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

Abstract By using observational data, weather system causing severe heavy rain in the southern part of Shaanxi Province during 8—9 June 2002 is analyzed. It is found that meso- β scale weather systems with highly local and explosive features occurred and developed in the southern part of Shaanxi Province which is the direct reason for severe heavy rainfall in this area apart from favorable large-scale conditons. Results show that existence from strong convergence of water vapor and the conditional convective instability in the middle and low troposphere probably provided the suitable environment for heavy rainfall. In addition, the triggering mechanism of mesoscale systems is discussed and results imply that the dynamical forcing of terrain, surface cold front and mesoscale disturbance of low-level jet may play important triggering role.

Key words: severe heavy precipitation; convective instability; mesoscale systems; terrain effect

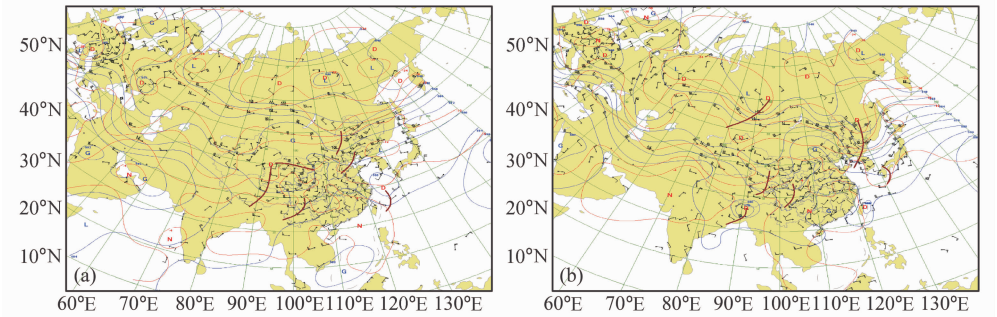


图 4 500 hPa 形势场
(a) 7 日 08 时；(b) 8 日 08 时

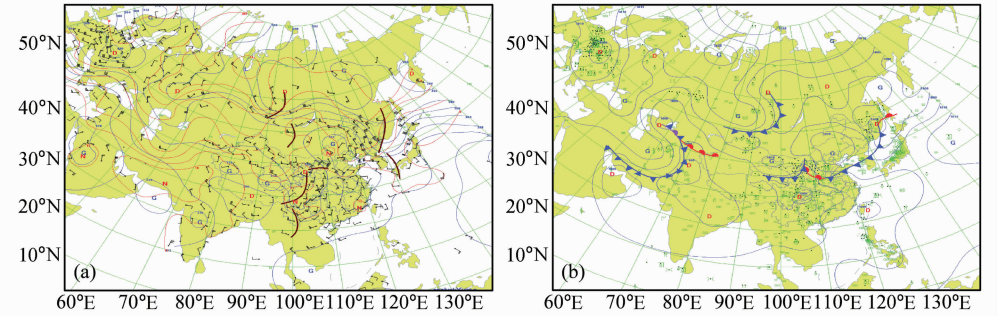


图 5 2002 年 6 月 8 日 08 时
(a) 700 hPa 实况图；(b) 地面实况图

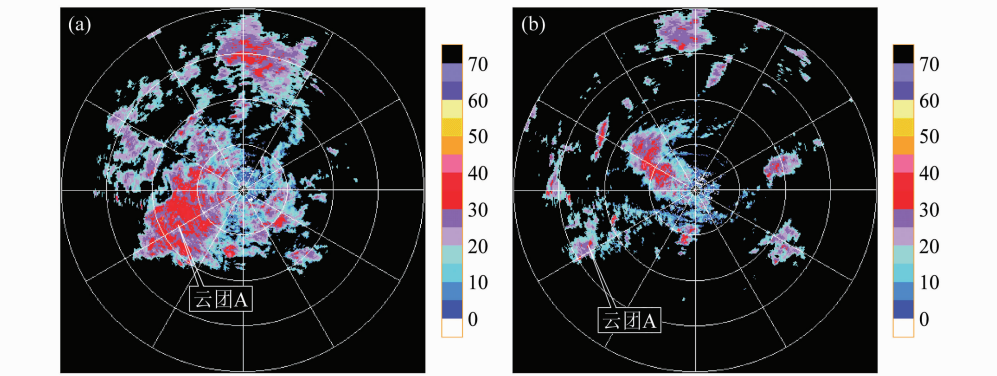


图 9 2002 年 6 月 8 日西安 714 雷达回波图
(a) 8 日 19 时；(b) 8 日 23 时 (单位：dBZ)

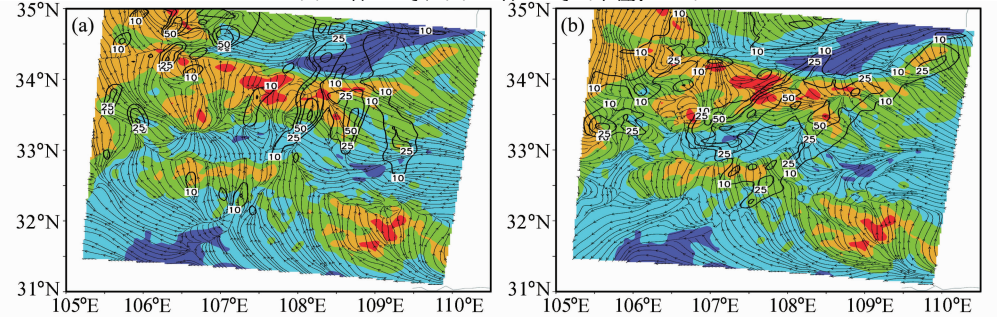


图 10 地面中尺度流场演变：(a) 2002 年 6 月 8 日 20 时；(b) 9 日 02 时
带箭头实线为地面流线，彩色色块为地形等值线（单位：m），黑色实线为 3 h 降水量

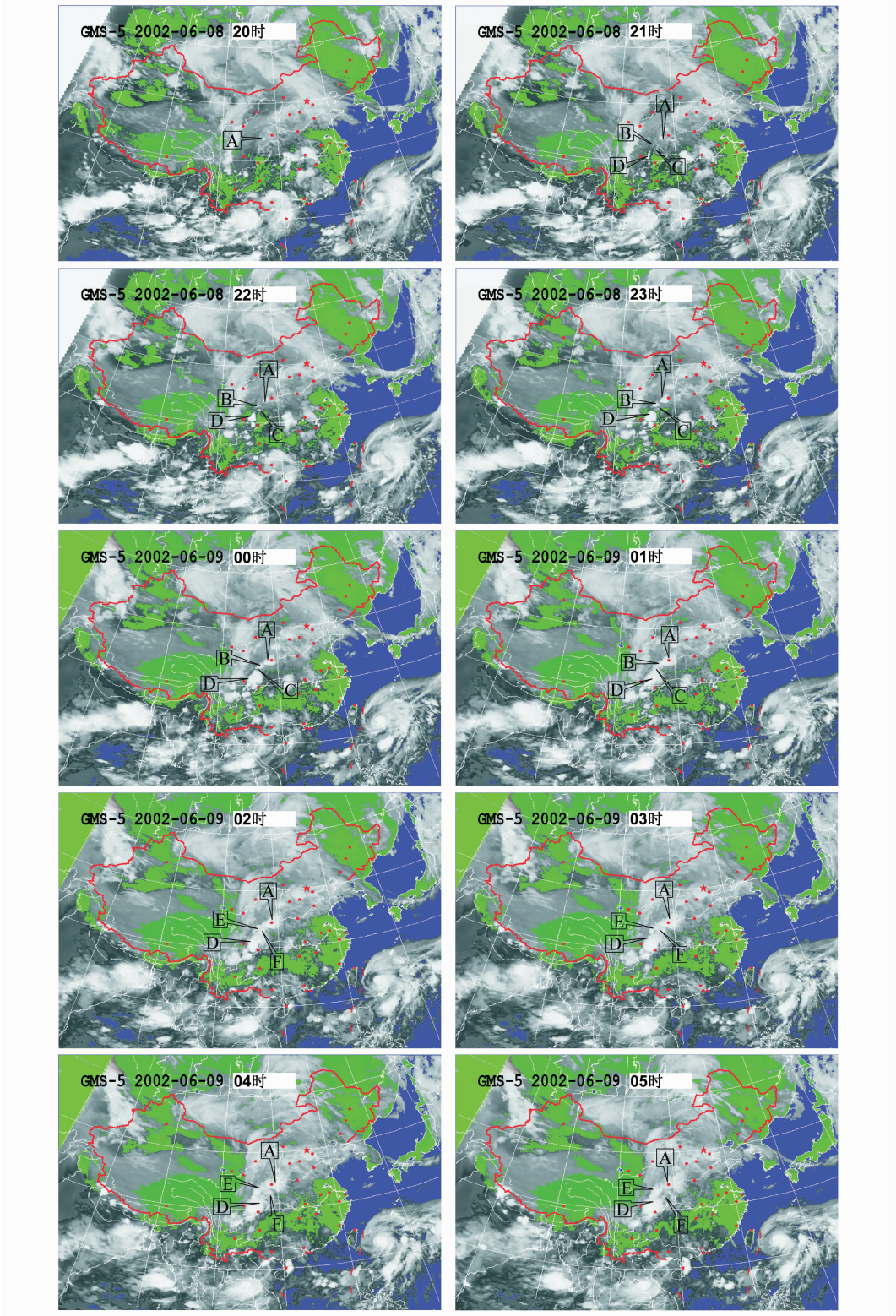


图 7 2002 年 6 月 8 日 20 时~9 日 05 时逐时红外云图 (●为省会城市所在地, ★为北京所在地)