

甘肃省倒槽暴雨的个例分析*

陈 乾

(甘肃省气象局气象科学研究所)

提 要

1976年8月2日,甘肃省中部地区发生了一次暴雨。在热带东风带中,当西移的倒槽和高原北部东移的低涡相结合时,就会使倒槽强烈发展并伸入内陆。倒槽东侧深厚的东南气流,造成该区深厚的位势不稳定,并使水汽输入到西北区东部,它与冷锋后部的西北气流相遇后,产生大范围水汽通量的辐合,这是本次暴雨的大尺度条件。

次天气尺度的低涡是产生这次暴雨的直接影响系统。当对流层上部的扰动与低层扰动上下叠置,形成一个深厚的次天气尺度低涡时,易产生对流性暴雨。

次天气尺度的低涡,是雨团迅猛加强的背景,南移的低层切变线起触发作用,而该地早先存在的一个暖湿的地方性中低压,则是合适的局地环境场。当低层切变线移入此中低压时,往往造成中尺度雨团的合并,出现急骤加强,形成暴雨。

一、前 言

本文对1976年8月2日在甘肃中部地区发生的一次倒槽暴雨进行了分析。这次暴雨有二场:第一场发生在8月1日18时至2日5时,系局地暴雨。降雨中心在临夏自治州西北部和青海省民和县南部,最大雨量分别为85毫米和71毫米;第二场发生在8月2日15时至3日4时,是多中心的大范围暴雨,主要雨带呈东北西南走向——自青

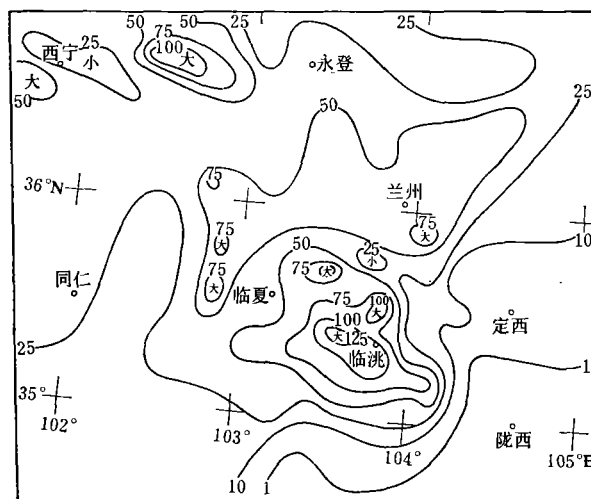


图1 1976年8月2日08时至4日08时过程雨量图

* 本文于1979年3月21日收到,1979年10月15日收到修改稿。

海省东部经甘肃省中部至银川平原。其中 100 毫米以上的中心有四个,除一个中心在青海省乐都县外,其余三个均集中在甘肃省中部,最强中心在康乐县白王公社,过程雨量为 144.1 毫米。临洮县气象站一小时最大降雨量为 44.4 毫米,破该站四十年以来的记录。第二场暴雨的过程雨量见图 1。本文主要分析第二场暴雨。

二、形成暴雨的大尺度环境场建立的条件

这次暴雨的大尺度环境场是副高西缘深厚的东南气流和在甘肃、青海两省交界处迅猛发展的低涡。东南气流的作用在于将沿海的水汽源源不断地输向暴雨区,并在低涡附近产生水汽通量的辐合和上升运动。我们对上述两个系统及与之相联系的成员进行了诊断分析,计算了 700 至 200 毫巴各层的涡度、散度、垂直速度和加热率(范围自 70°E — 115°E , 25°N — 50°N)。其中,垂直速度采用多种方案进行计算,加热率采用通常的倒算方案。由热力学第一定律得

$$Q = C_p \left(\frac{P}{1000} \right)^k \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

为求其 24 小时内平均加热量,引入算符

$$\bar{A} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} A dt$$

将(1)式中的 $\frac{d\theta}{dt}$ 展成局地微商和几何微商形式,则得

$$\bar{Q} = C_p \left(\frac{P}{1000} \right)^k \left[\frac{\theta_{t+\Delta t} - \theta_t}{\Delta t} + \overline{V \cdot \nabla \theta} + \overline{\frac{\partial}{\partial P}(\omega \theta)} - \theta \overline{\frac{\partial \omega}{\partial P}} \right] \quad (2)$$

其中的符号均为常用符号。水平风速采用实测风,并将各种方案的垂直速度的计算结果与云图对照,认为涡度法较好。文中所引的垂直速度值取涡度法。

通过大尺度环境场的分析,得到如下几点

1. 图 2 是暴雨盛期的 500 毫巴图。有一明显的倒槽自东向西移动,然后它与自西向东移动的高原低压系统结合。在倒槽东侧副高西缘形成一支深厚而强劲的东南气流。它自华南直到陕西除局部地区有弱上升运动外,基本上是下沉运动,进入甘肃定西地区后才出现上升运动。至低涡中心附近,上升运动最强。这支东南气流对远离海洋的甘肃中部产生暴雨是有利的。

2. 深厚的东南气流与低层切变线或冷锋后部西北气流相遇,造成大范围的水汽通量辐合是这次暴雨形成的重要条件。国内外的研究表明,大尺度水汽通量辐合区比暴雨区面积至少要大十倍以上,这样才能使暴雨区的外围不断有水汽积累,以供应暴雨区中的水汽^[1]。我们计算了东经 100 至 110 度,北纬 32.5 至 40 度区域内 2 日 08 时至 3 日 08 时三个时刻的水汽输送,计算方法与文献[2]相同。水汽通量按下式计算

$$\left. \begin{aligned} \hat{F}_u &= \frac{1}{g} \int_{P_0}^{250} u q d p \\ \hat{F}_v &= \frac{1}{g} \int_{P_0}^{250} v q d p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 \hat{F}_u 、 \hat{F}_v 分别为垂直于经、纬向剖面上自地面直到 250 毫巴气层内单位时间单位长

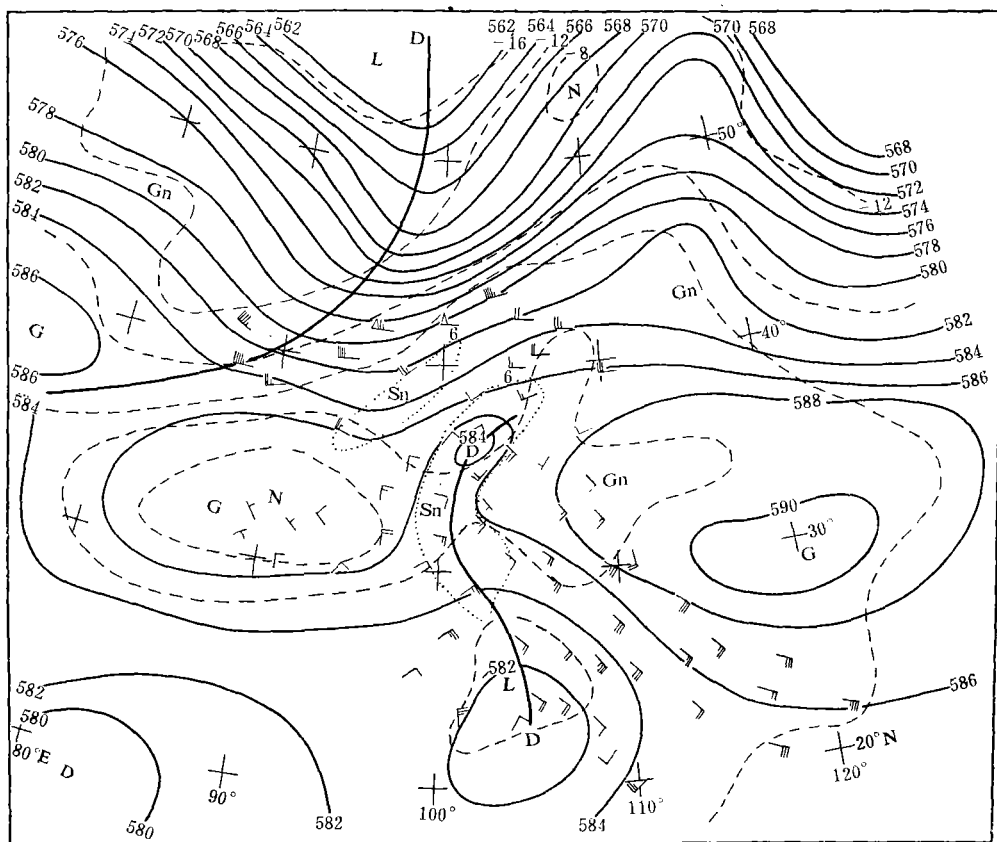


图 2 1976 年 8 月 2 日 20 时 500 mb 图
(实线为等高线, 虚线为等温线, 点线为等比湿线, 粗实线为槽线, G_n 为干中心, S_n 为湿中心。)

度面积上的水汽通量, 其它为常用符号。

闭合周界上水汽总输入(输出)量的计算采用下式

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_u &= \frac{1}{g} \int_L \int_{P_0}^{250} u q d p d L \\ \dot{F}_v &= \frac{1}{g} \int_L \int_{P_0}^{250} v q d p d L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 \dot{F}_u 、 \dot{F}_v 分别表示垂直于闭合周界的东、西两侧或南、北两侧剖面的水汽总输入(输出)量, 计算结果如表 1。只在 2 日 20 时水汽才是净输入的。根据线性内插, 在 2 日 12 时 30 分至 3 日 6 时期间, 水汽净输入量为正值, 它和计算区域内的暴雨时段基本对应。可见本例形成暴雨的大尺度水汽辐合没有明显的酝酿期。水汽净输入主要是由于南北两剖面输入量的迅增, 其次是东剖面输入量的增加。可见, 东南气流增强和偏北气流的辐合作用对水汽汇的贡献极为重要。

3. 在图 3 中主要的暖空气来自南海, 沿途以下沉为主, 进入暴雨区后猛烈上升到 300 毫巴, 在 $37^\circ N$ 以北与西风槽前的西南气流会合, 转成西南风流向银川平原和内蒙

表 1 各边界水汽输送量

(单位: 百吨/秒)

	输 入 量				输 出 量				四边净输入 (正)、输出 (负)量	净输入量符号 转变时间
	东	西	南	北	东	西	南	北		
2日08时	96.6	378.6	23.8	448.3	963.2	21.0	655.2	14.6	-706.7	2日12时30分 转正
2日20时	236.6	323.4	730.0	837.2	719.6	0	293.7	0	+1113.9	
3日08时	0	736.4	596.2	809.5	1966.2	28.0	347.8	0	-199.9	3日6时转负

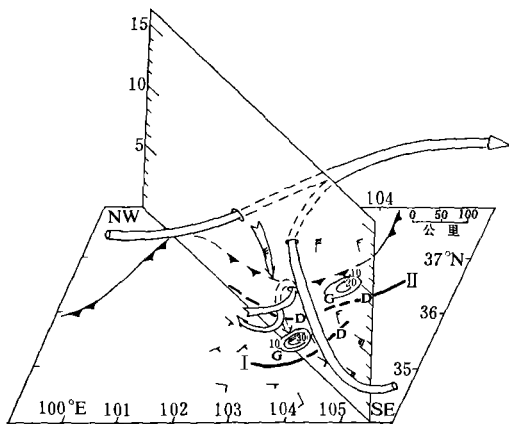


图 3 1976年8月2日20时暴雨盛期气流的三维结构图

(水平面上细线为19—20时雨量, 粗实线为地面切变线, 圆矢管为暖空气路径, 粗矢为冷空气路径。)

带和云带近乎垂直。故云带不起水汽输送作用。

综上所述, 这次倒槽暴雨的环境场, 是在暴雨产生前五小时左右建立的。因而, 它没有很好的先兆性。

三、暴雨的直接影响系统——次天气尺度扰动

这次暴雨的直接影响系统, 是来自柴达木盆地的次天气尺度扰动。这个系统1日08时位于盆地东部, 它是一个很弱的小槽; 2日08时, 槽线移过西宁后开始发展; 2日20时移到甘肃、青海两省的交界处发展为一个低涡, 并且强度达到最大, 3日08时又迅速填塞。我们分析了暴雨盛时的低涡结构, 发现有以下一些特点:

1. 低涡在风场上反映到400毫巴层, 在500毫巴层以下其轴线向西北倾斜, 以上准垂直(图4a)。低涡在近地面较强。从高度距平场看, 500毫巴层以下为负距平, 以上则为正距平。根据作者的经验, 当对流层上部的扰动与低层扰动上下叠置, 形成一个直达对流顶的深厚低压系统时, 易产生对流性暴雨。

2. 从暴雨区单站高空风的演变(图4b)看出, 暴雨前18小时在3公里处形成低空

古。冷空气有二股, 一股来自低涡后部的偏西气流在暴雨区内下沉由于降水蒸发而降温, 形成低层切变线后部的冷堆。另一股是冷锋后的强大冷气团, 它来自河西走廊, 向东南移动。

4. 从云图演变可看出, 2日10时38分暴雨的环境场已基本具备。在高原东北部出现一个由积云和层积云组成的同心圆式云团。它和热带对流层上层气旋西侧的云团有云带相联接, 这条云带位于倒槽西侧的上升运动区内。至21时暴雨盛期, 高原东北部的云团已移到兰州附近, 并发展为一个白亮密实的积雨云团。从云图可看出, 水汽输送

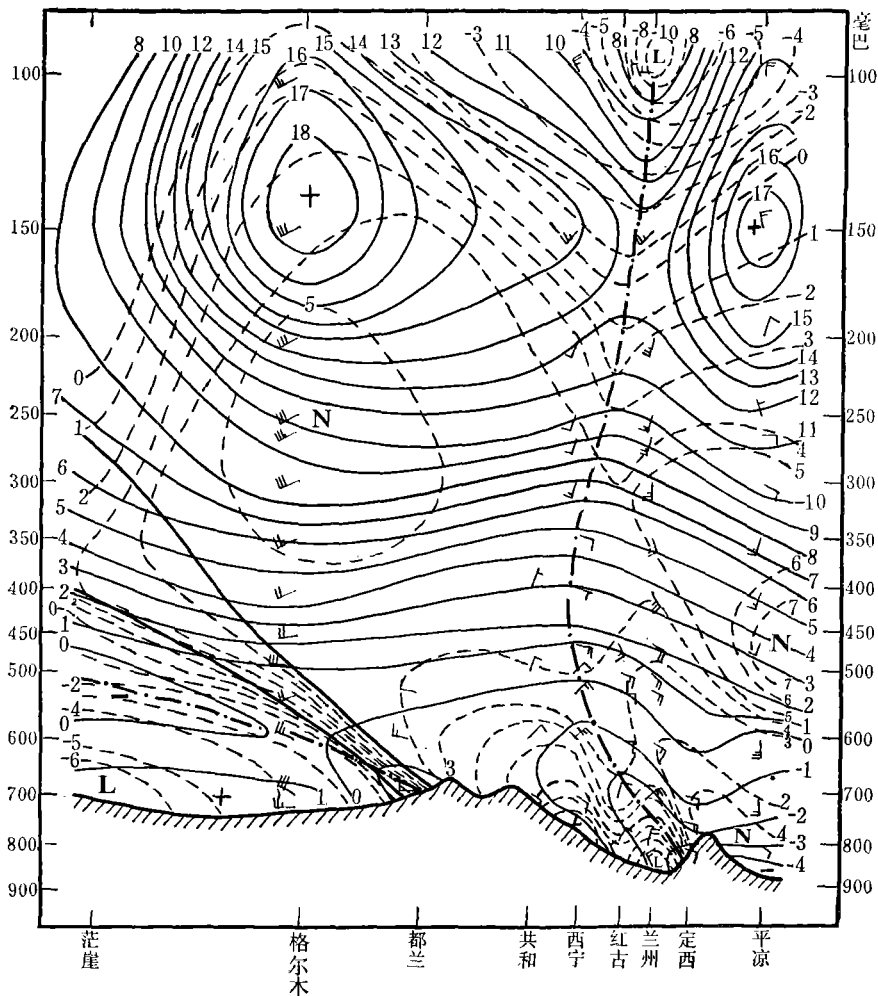


图 4a 1976 年 8 月 2 日 20 时高度和温度距平剖面图
(图中细实线为高度距平, 虚线为温度距平, 粗实线为锋面, 点划线为槽线)

南风急流, 这时由于高空处于副高脊线附近风速很小, 在 7 公里处, 风速仅为 1 米/秒。在暴雨即将出现前, 最大风速层抬高到 8—9 公里, 当暴雨降落时, 8 公里处南风最大。低空出现强东北风。

3. 从温度和露点距平剖面图(4a、c)看出, 在低涡区内地面(700 mb 层以下)和对流层上部(150 mb 层以上)温度为负距平, 各有一冷堆, 其中 100 毫巴冷堆最强, 中心在兰州上空附近, 距平达 -10.3°C , 对流层中部温度虽为正距平, 但涡区比四周略低。而梅雨锋上的次天气尺度扰动在对流层中部是一个暖中心, 而且, 其低压扰动仅存在于低层^[3], 可见这种扰动有其独特之处。涡区有几个高露点中心, 其正距平中心位于对流层中部, 以兰州的强度最大, 伸展最高。它正位于飚线上, 可能与中尺度积雨云团对应。然而, 此处位于大尺度上升速度中心的前缘, 600 毫巴上升速度仅 1.4 厘米/秒。可见, 侵入低涡内的飚线对暴雨生成有重要的贡献。

4. 暴雨出现时次天气尺度扰动的最显著特点是对流顶附近冷堆强度大, 100 毫巴

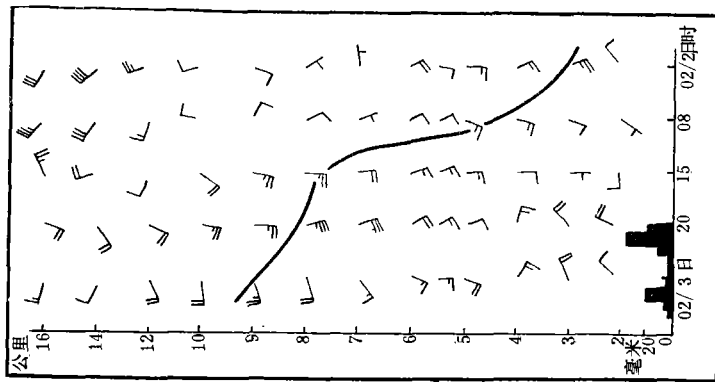


图 4b 1976年8月2日至3日
临洮和兰州高空风时间剖面图
(其中02、15时为临洮的纪录。粗
实线为南风急流轴线,黑色直方框为
临洮一小时雨量)

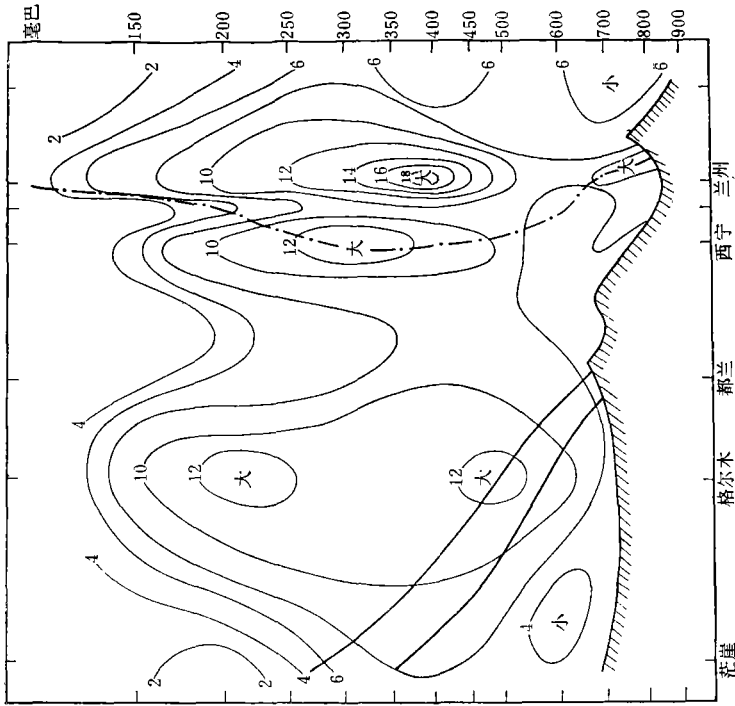


图 4c 1976年8月2日20时露点温度距剖面图
(细实线为露点距平,其他同图4a)

温度距平达 -8°C 以下，而且湿层厚，200毫巴露点距平达 9°C 以上。我们普查了兰州最近20年6—8月的探空资料，其中100毫巴温度低于 -76°C 的共27次。这些个例以兰州为中心300公里半径范围内，未来24小时均出现20毫米以上的降水中心，其中70%的降水量在40毫米以上。由此可见，100毫巴冷堆与大雨或暴雨的出现有密切联系。

5. 低涡位于高 θ_{se} 气柱内，在低涡中心的四周约500公里处，在对流层中层有一圈 θ_{se} 小值带， θ_{se} 分布与大尺度垂直运动场是对应的。最大不稳定区在低涡东侧的临洮，335毫巴以下都是对流不稳定，暴雨中心就在其附近。

低涡中心正涡度值自1日20时至2日20时增加近二倍。计算表明，低涡中心附近各层温度平流以及无辐散层上的正涡度平流均很小，而加热场上却有一个正中心与低涡对应。图5是8月1日至2日的平均加热场，可看出，加热场的正中心轴线和2日20时的正涡度中心轴线基本吻合，因此，可以认为低涡发展的主要原因，可能是加热场的作用，而这个加热中心的形成，看来和1日夜间至2日清晨局地暴雨的凝结热释放有关。

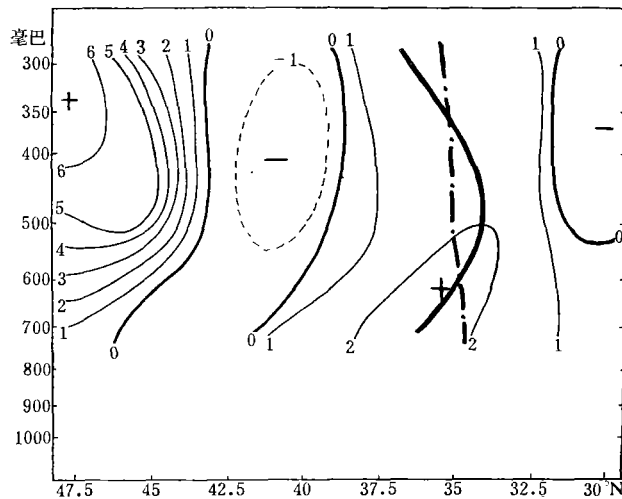


图5 沿 102.5°E 加热场剖面图

(粗实线为加热中心轴线，点划线为正涡度中心轴线，细实线为等加热率线，单位： 10^{-5} 卡/克·秒)

四、暴雨的中尺度分析

1. 中尺度雨团的活动特点。我们分析了8月1日13时至8月3日11时每小时雨量图，取5毫米/小时的等值线为暴雨中心外包线，并将该外包线所限定的降水单体称为中尺度雨团。这两次降水过程的雨团活动有下列特征：

(1) 雨团水平尺度都在60公里以内，平均直径为30公里，比我国东部地区的雨团直径为小。

(2) 雨团产生后，除部份地形迎风坡雨团呈准静止外，多数由西北向东南移动。它与3公里高度上的风向接近，其移速约为3公里风速的75—86%。

(3) 雨团的生命史为2—10小时。

(4) 在近地面低压中心附近，容易产生两个相向而行的雨团迎面合并，使之急骤增

强。

(5) 雨团增强时, 移速往往减慢, 这时上游如有小雨团以较快的速度移来与其合并, 将使主雨团急骤增强。如临洮附近的雨团在 21 时、1 时、3 时三次增强都是由于主雨团移到副高边缘后, 移速减慢甚至停滞倒退, 而从西北方有三个小雨团并入所造成。其中 I、III 两个雨团与北方飚线和冷锋南下对应。图 6 是从西北到东南沿临洮雨团移动方向上的一小时雨量时间剖面图, 可以看出, 临洮附近特大暴雨先是由于两个相向而行的雨团合并后急骤增强, 移速减慢, 然后上游的小雨团多次并入使之持续发展所造成。这种现象发生在北方有飚线或冷锋不断侵入地方性中低压时。

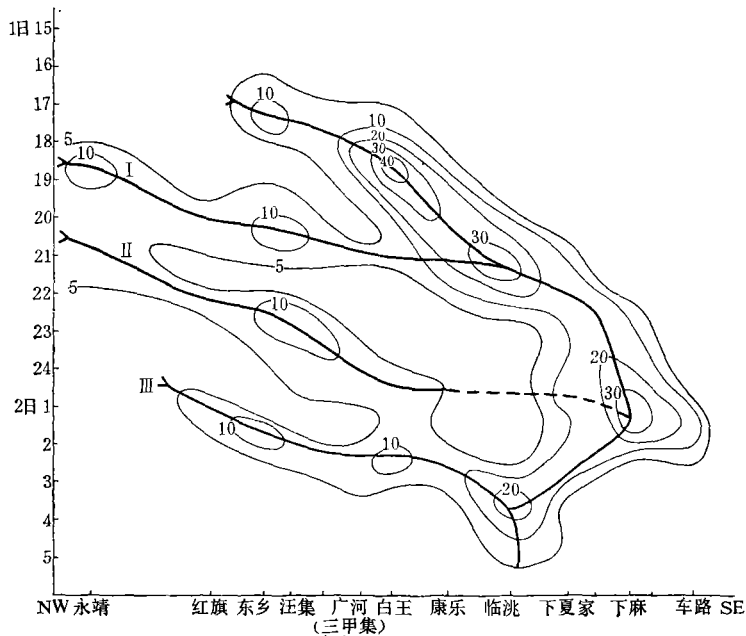


图 6 1976年8月2日至3日一小时雨量时间剖面图
(图中纵坐标1日, 2日应分别为2日, 3日)

(6) 雨团多数产生于山脉迎风坡, 本例雨团集中产生于下列三个地区, 即祁连山东南坡的庄浪河、大通河上游, 积石山、拉脊山东坡, 东乡县东南部, 这些地方都是东南气流在山前抬升的有利地形。

2. 中尺度雨团的触发条件。在本例分析中我们发现和雨团发生、加强有关的系统有如下三种:

(1) 8月1日08时至2日24时, 在每小时地面流线上, 自河西走廊东部至永登县北部, 近地面不断有切变线产生并向南移动。在下午这条切变线北侧产生雷雨后往往蜕变为飚线。在我们所分析的时段内, 冷锋前部有四条切变线自西北向东南移动。当它们移到副高边缘后逐渐减弱。这类切变线的厚度只达700毫巴, 是摩擦层内的扰动。当这种扰动移入大尺度上升运动区时, 都有不同程度的对流天气产生。可以认为, 这种切变线是中尺度雨团的一种触发系统。

(2) 临夏自治州西部的地面中低压。低空的东南气流遇到临夏自治州西南部“L”型

山脉后，容易在山前形成准定常的中尺度涡旋，这种涡旋如处于高热能和不稳定大气中将得到发展。如 2 日由于东南气流向北发展，上午在永靖县北部和东乡县南部产生两个中低压，这两个低压缓慢地向东南移动，午后在临洮县北部合并为一个低压并有所发展。15—16 时雨团即在此低压中心附近的临洮县新添铺产生，随着北方小切变侵入低压，在低压后部即东乡县南部，又产生一雨团。这两个雨团在 18—19 时在康乐县白王公社合并后急骤加强，出现大暴雨。因此地方性中低压是产生暴雨的一种“合适的局地环境场”。

(3) 次天气尺度扰动。由于青海低涡东移发展，使原来控制甘肃中部的小脊迅速东退。这个次天气尺度低涡的逼近是促发第一场局地暴雨的背景条件。第二场暴雨的中尺度雨团，一般产生于低层切变线和高空倒槽槽线的交点附近，大多数雨团发生在 700 毫巴槽线至 500 毫巴槽线之间。而在 700 毫巴低涡中心附近，由于中尺度雨团多次合并出现最强的暴雨中心，中尺度雨团加强的地区在距 700 毫巴低涡中心 80 公里半径范围内。由此可见，次天气尺度低涡是触发中尺度雨团的背景系统。

五、结 论

通过 1976 年 8 月 2 日甘肃省中部一次倒槽暴雨的个例分析，我们认为，当副高脊线偏北时，须要注意东风带中西移的倒槽，当它和高原北侧东移的低涡结合时，可使倒槽在高原东侧北伸。倒槽东侧深厚的东南气流不仅使东南沿海的水汽输入西北区东部，而且造成甘肃中部深厚的不稳定层结。

次天气尺度扰动是产生暴雨的直接影响系统，当对流层上部的扰动与低层扰动上下叠置形成一个深厚的次天气尺度低压系统时，易产生对流性暴雨。这种暴雨系统的最显著特点是对流顶附近冷堆强度大、湿层厚。

本文还讨论了三种中尺度雨团的触发系统，在这些系统叠置的地区，往往出现暴雨。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言，有关暴雨的分析预报的一些问题，大气科学，1977年，第一期，第68页。
- [2] 兰州中心气象台研究室等，盛夏西北区东部暴雨盛期的水汽输送及水份平衡问题个例分析，青藏高原气象论文集(1975—1976)，317—329。
- [3] 吉住禎夫，On the structure of intermediate-scale disturbances on the Bai-u Front, *J. M. S. J.*, Ser II, 55, №1, 107—120.

A CASE STUDY OF HEAVY RAIN IN GANSU PROVINCE

Chen Qian

(Meteorological Institute, Gansu Provincial Weather Bureau)

Abstract

In this paper the heavy rain on August 2, 1976 in the central part of Gansu has been analysed. It took place when a trough of tropical easterlies moved in and developed on encountering a small depression from the Tibetan plateau. Accompanying the deep humid south-eastern flow in the lower troposphere, cold upper tropospheric air moved to Gansu and a deep layer of potential instability was produced and met the cold north-western flow later on. The convergence of vapour flux was introduced

Analysis of hourly synoptic charts reveals that an intense subsynoptic depression is responsible for the heavy rain.

The structure and life history of subsynoptic depression and the accompanying shear line are also discussed. When the shear line of low layer moved to the subsynoptic depression, the heavy rain was formed.