

几种物理量在陇南暴雨预报中的初步应用

樊明^{1,2}, 周军¹, 冯军²

(1. 南京信息工程大学大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 甘肃省陇南市气象局, 甘肃 武都 746000)

摘要: 针对陇南出现暴雨最多的环流形势^[1], 对8次暴雨过程的数值预报产品资料进行合成平均, 求出平均场, 分析了 Q 矢量散度、螺旋度、假相当位温、 Q 矢量地转锋生函数、湿位涡和锋生函数等物理量场, 这些物理量场不仅能很好揭示陇南暴雨形成的机制, 同时对暴雨落区预报也有很好的指示意义。

关键词: 物理量; 暴雨; 预报

中图分类号: P458

文献标识码: A

引言

陇南市位于甘肃省东南部, 地处 $32^{\circ}35'43'' \sim 34^{\circ}32'00''N$ 和 $104^{\circ}0'19'' \sim 106^{\circ}34'20''E$ 之间, 暴雨是陇南最多发的自然灾害之一, 并且由于特殊的地质条件等原因几乎所有的暴雨都伴有局地洪水或泥石流, 造成的灾害危害极大, 因此研究分析陇南暴雨形成原因和预报方法非常有必要。由于过去基层台站缺乏资料, 对暴雨形成机制研究是通过分析个例进行的, 预报暴雨资料也大多局限于常规资料, 现在“9210”工程提供了大量的气象信息资料, 特别是数值预报产品资料(T106, T213), 使得我们能够较深入地开展针对不同地区天气特征的研究分析工作。多年来, 陇南许多预报员总结了许多暴雨预报经验, 对陇南出现暴雨的环流形势进行了天气学分型, 其中西南气流型下出现暴雨最多, 1971~2000年陇南107个暴雨个例中, 西南气流型共出现暴雨78次, 占72.9%^[1]。近年来, 虽然数值预报产品资料已改进为T213, 但时间短, 同时暴雨过程也相对较少。1995~2000年, 陇南出现暴雨较多, 共有13次, 其中西南气流型暴雨出现了8次, 这8次暴雨过程的大尺度环流背景基本一致, 暴雨发生时间也基本在夜间, 所以用8次暴雨过程的平均物理量场来分析陇南出现暴雨最多环流形势下的暴雨机制, 以及这

些物理量在暴雨落区预报中的指示意义, 为以后基层台站暴雨落区预报打下一定的基础。

1 资料来源

所用资料为1995~2000年的T106数值预报产品0时次分析场资料, 网格为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 层次为850~200 hPa, 由国家气象中心提供。

2 西南气流型暴雨概念模型

由500 hPa高度平均场(参照文献1中图1)可知, 西南气流型暴雨形势主要特征是西太平洋副热带高压西伸或东撤时, 588 gpdm等值线到达 $105^{\circ}E$ 、脊线位于 $28^{\circ}N$ 附近, 青藏高原基本为长波槽控制, 陇南处于西太平洋副热带西北侧暖湿区。这种形势下, 主要的影响系统是位于青藏高原西风带上的槽, 是暴雨过程的冷源, 引导冷空气东移, 与南来的暖湿气流在我区相交绥, 并且出现强烈的水汽和不稳定能量的输入, 以及持续的上升运动, 形成暴雨。

3 物理量场分析

涡度、垂直速度、散度、水汽通量等比较传统的物理量虽然能较好地描述大气的运动情况, 但对暴雨落区指示意义并不十分好, 因此, 本文诊断分析 Q 矢量散度、螺旋度、 Q 矢量地转锋生函数、以及湿位

涡(MPV)等物理量,来研究陇南暴雨形成机制和这些物理量对暴雨落区的指示作用。

3.1 Q 矢量散度

$$\text{准地转 } Q \text{ 矢量为 } Q_x = -R \frac{\partial V_g}{\partial x} \quad Q_y = -R \frac{\partial V_g}{\partial y} \quad (1)$$

用准地转 Q 矢量表示的 ω 方程形式^[2]为:

$$\left(\nabla^2 + \frac{f_0^2 \sigma^2}{\sigma \partial p^2} \right) \omega = -\frac{2}{R^2 p} \nabla \cdot Q \quad (2)$$

由上式可知 Q 矢量散度与上升速度 ω 有较好的对应关系, $\nabla \cdot Q < 0$ 时 $\omega < 0$, 对应上升运动, 有利降水, 反之, 为下沉运动, 不利降水。

分析西南气流型 500 hPa Q 矢量散度平均场分布(图1)发现, 在陇南上空存在 $-150 \times 10^{-11} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的负值中心, 暴雨区上空存在很强的上升运动, 有利于降水, 在陇南西侧存在大片的正值区, 下沉运动强烈, 在其东侧则为弱的正值区。这说明暴雨区上空 500 hPa Q 矢量散度对应着较强的负值散度区, 暴雨中心与 Q 矢量散度负强值中心匹配较好, 当大的环流形势有利暴雨产生时, 参考 500 hPa Q 矢量散度, 当其为负值并且达到某一限定值时, 则可以初步确定暴雨区, 当然限定值的确定需要分析大量的暴雨个例, 同时对暴雨区的确定仍需利用其它因子。

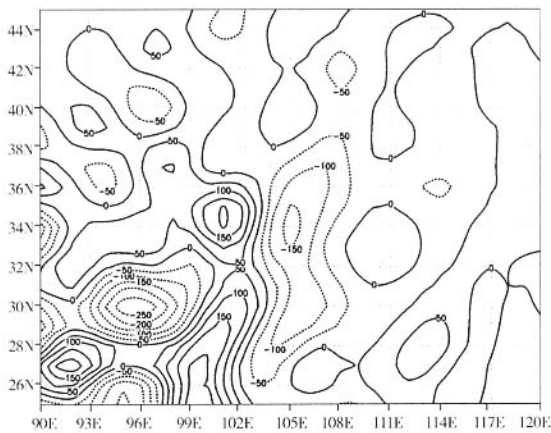


图1 500 hPa Q 矢量散度($10^{-11} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)平均场

Fig. 1 Divergence mean field of Q - Vector at the level of 500 hPa

3.2 螺旋度

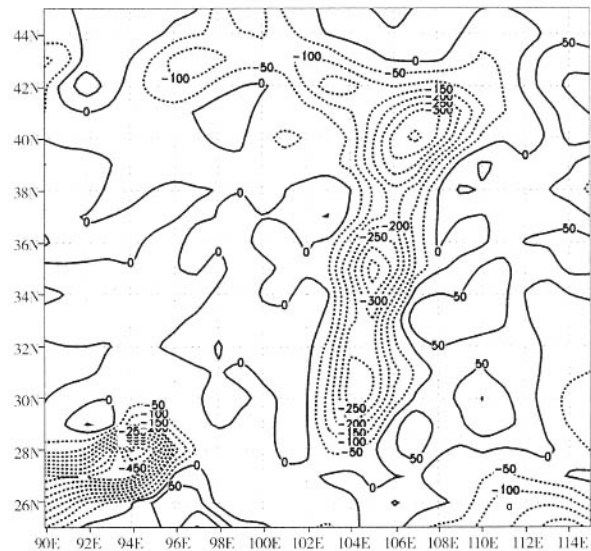
参照 Woodll 的观点, 定义 P 坐标系中的局地螺

旋度 H 为^[3]:

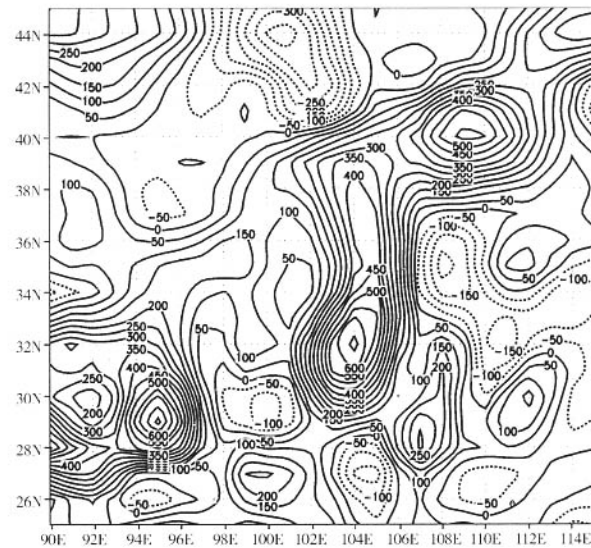
$$H = V \cdot (\nabla \times V) = \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega \quad (3)$$

令 h 螺旋度为:

$$h = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega \quad (4)$$



(a)



(b)

图2 700 hPa(a)、200 hPa(b)螺旋度 ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}$)平均场

Fig. 2 Helicity mean fields of 700 hPa(a) and 200 hPa(b)

本文只讨论 h 螺旋度,并简称为螺旋度。由上式可知螺旋度的大小和正负号决定于涡度和垂直速度的乘积。一般较强的降水系统中低层为正涡度发展,高层有负涡度配合,上升运动愈强则表现为中低层螺旋度负值愈大,高层螺旋度正值愈大。这种上下耦合的配置,表示低层为正涡度的辐合上升区,高层为较深厚的辐散、负涡度区,对产生大降水是十分有利的。由图 2a 可看出,低层 700 hPa 上,从四川盆地到甘肃东南部、内蒙为一负螺旋度带,中心值为 $-300 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}$,正好位于陇南,表明这是低层上升运动的中心,500、400 hPa(图略)上螺旋度的分布大体与 700 hPa 一致,仍为负值,但绝对值减小,300 hPa(图略)上在四川西北部到陇南螺旋度为很大的正值,中心值为 $500 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}$,而在 200 hPa 上(图 2b)螺旋度更大,中心值高达 $600 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}$,高值分布带和 700 hPa 低值带基本一致。这说明螺旋度能很好地反映暴雨发生时大气的动力场特征,暴雨区上空低层负螺旋度与高层正螺旋度相对应,高层负涡度辐散与低层正涡度辐合相配合,是触发暴雨的动力机制,并且对暴雨的落区也有很好的指示意义。

3.3 假相当位温

700 hPa 假相当位温平均图上(图 3),从四川和青藏高原南部到甘肃中部有从西南向西北方向的 θ_{se} 高值区,其中心位于四川盆地北部,陇南处于 $360 \sim 365 \text{ K}$ 的高能舌区,说明陇南处于高温湿不稳定区,只要有冷空气入侵则极易储存和释放对流不稳定能量造成强降水,而在新疆到青藏高原中部和我国东部为 θ_{se} 低值区。850 hPa θ_{se} 图上(图略) θ_{se} 的分布与 700 hPa 基本一致,只是高值区略偏东,这样,在 θ_{se} 高低

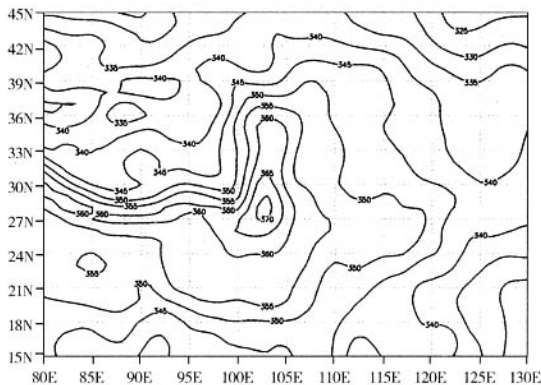


图 3 700 hPa 假相当位温平均场(单位:K)

Fig. 3 The 700 hPa θ_{se} mean field

值区之间特别是 $100^\circ \sim 110^\circ \text{ E}$ 之间为一强的能量锋区,这个能量锋区的形成既与西南和东南暖湿气流的水汽输送有关,主要是低空急流沿着西太平洋副热带高压边缘向暴雨区输送了大量具有热带气团性质的空气,也与北方南下的干冷空气活动有关,从而为暴雨区提供了大量的不稳定能量。

3.4 Q 矢量地转锋生函数(GFF)^[4]

Q 矢量地转锋生函数 F 的表达式为:

$$F = \frac{D}{R} [\partial Q \cdot \nabla T + \partial \nabla \cdot (\sigma \omega) \cdot \nabla T] \quad (5)$$

当 $F > 0$ 时,锋生; $F < 0$ 时,锋消。

分析 850 hPa Q 矢量地转锋生函数平均场(图 4)发现,从四川到陇南为锋生函数的正值区,正值中心达到 $10 \times 10^{-14} \text{ K} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{hPa} \cdot \text{m}^{-1}$,甘肃中部到内蒙为负值区,中心值为 $-11 \times 10^{-14} \text{ K} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{hPa} \cdot \text{m}^{-1}$,这表明西南气流型形势下随着东移低槽带来的北方干冷空气和副高边缘北涌的南方暖湿气流的交绥,地转锋生使大量的暖湿气流被抬升到高层,促使上升运动发展,同时进一步加剧能量锋区的强度,使得暴雨区前期堆积的不稳定能量爆发,出现暴雨,反映了锋生对降水的增强作用。暴雨区出现在锋生函数的正值区。

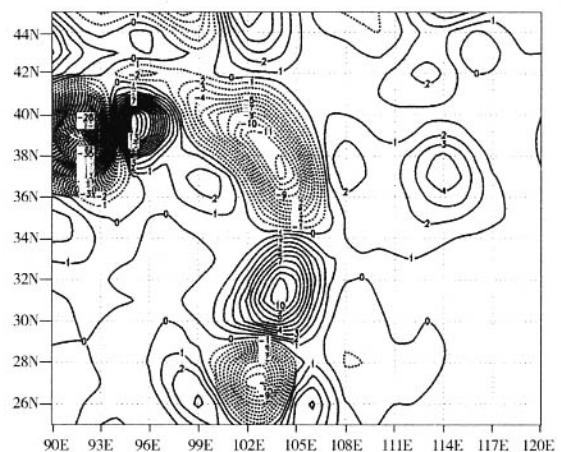


图 4 850 hPa Q 矢量地转锋生函数
(单位: $10^{-14} \text{ K} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{hPa} \cdot \text{m}^{-1}$) 平均场

Fig. 4 The 850 hPa frontogenetical function mean field

3.5 湿位涡(MPV)

根据文献^[5],湿位涡计算公式为:

$$MPV = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$MPV1 = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (7)$$

$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (8)$$

其中, $MPV1$ 是湿位涡的第 1 分量, 为垂直分量, 其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与假相当位温的垂直梯度的乘积, 为湿正压项 ξ 是垂直涡度分量 f 为地转涡度, 表示惯性不稳定和对流稳定性的作用, 因为绝对涡度是正值, 当大气是对流不稳定时, $MPV1 < 0$, 反之, 若大气是对流稳定的, $MPV1 > 0$; $MPV2$ 是湿位涡的第 2 分量, 它的数值由风的垂直切变(水平涡度)和 θ_{se} 的水平梯度决定, 包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献, 所以 $MPV2$ 为湿斜压项。

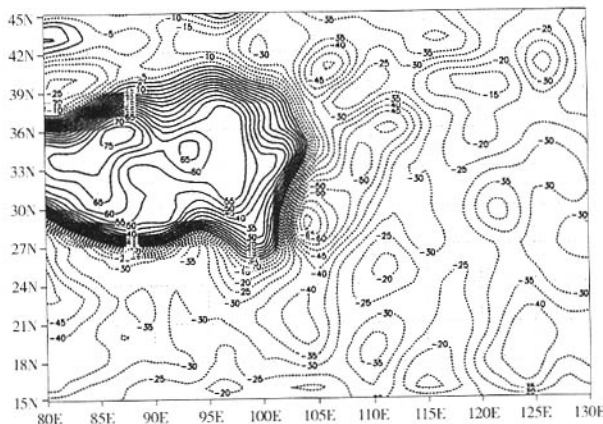


图 5 700 hPa $MPV1$ ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$) 平均场
Fig. 5 The 700 hPa $MPV1$ mean field

现在来分析 700 hPa $MPV1$ 平均场(图 5), 从图上可看出, 青藏高原上为 $MPV1$ 正值区, 有 $65 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$ 正值中心, 表示了中高纬低槽和冷空气的活动, $MPV1$ 零线位于中高纬 104°E 附近, 表明了这种环流形势下南下冷空气活动还是比较强的, 在 $104^\circ \sim 115^\circ\text{E}$ 之间, 在四川盆地有一中心值为 $-70 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$ 的 $MPV1$ 负值带伸向甘肃中部、陕西、内蒙一带, 并且在零线附近有一条 $MPV1$ 大梯度带, 陇南处于中心北侧, 表明这些地区低层大气是很强的暖湿对流不稳定性空气, 也就是说这些地区是湿对流不稳定区, 有利暴雨形成。而在我国约 115°E 以东地区是 $MPV1$ 较小的负值区, 反映了反气旋环流情况, 从 500 hPa $MPV1$ 平均场(图 6)可看出, 青藏高原上同样为 $MPV1$ 正值区, 在云南、四川到甘肃中部, $MPV1$ 为负值区, 四川和陇南东北方的甘南分别有负 $MPV1$ 中心, 中心值分别为 $-40 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$ 和 $-30 \times 10^{-7} \text{ m}^2$

$\cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$, 同样说明这些区域有深厚的对流不稳定发展, 从 700 ~ 500 hPa $MPV1$ 的绝对值随高度减小, 也就是说湿正压项 $MPV1$ 对湿位涡的贡献随高度减小, 这样就容易储存和释放不稳定能量, 有利于暴雨发生。

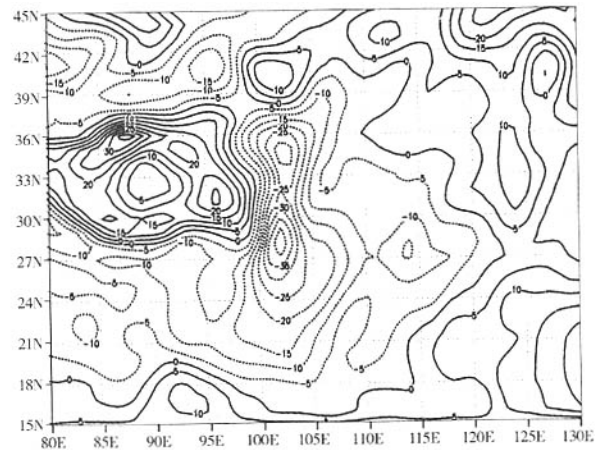


图 6 500 hPa $MPV1$ ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$) 平均场
Fig. 6 The 500 hPa $MPV1$ mean field

在 700 hPa $MPV2$ 平均场(图 7)上, $MPV2$ 在四川北部和陇南为正值区, 中心值为 $15 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$, 青藏高原上为弱的正值区, 正负值交接的零线同样位于 103°E 附近, 108°E 以东的我国地区基本为负值区, 这说明在暴雨区四川北部和陇南低层气旋环流发展较强, 500 hPa $MPV2$ 平均场(图 8)上, $MPV2$ 在青藏高原到内蒙为大片负值区, 四川北部和陇南为较小的负值区, $MPV2$ 值从低层向高层绝对值增大, 说明湿斜压项 $MPV2$ 对湿位涡的

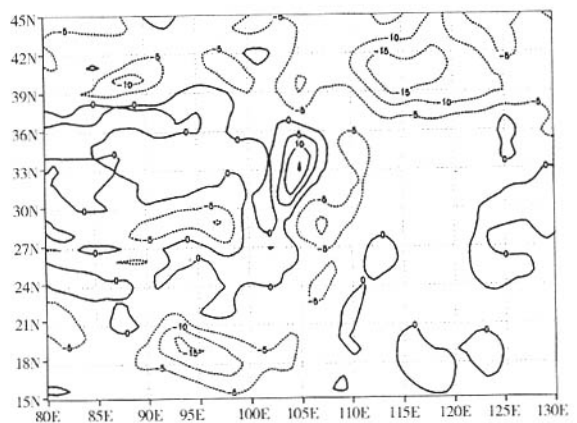


图 7 700 hPa $MPV2$ ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}$) 平均场
Fig. 7 The 700 hPa $MPV2$ mean field

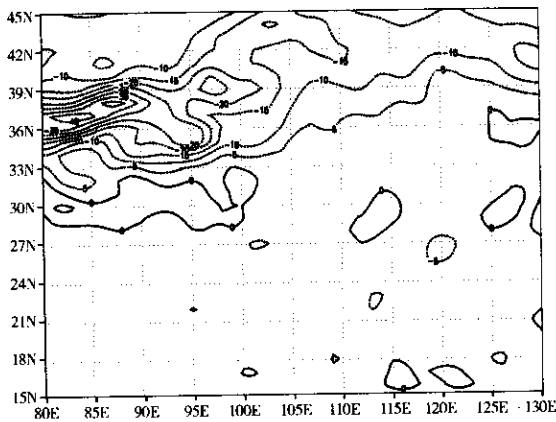


图8 500 hPa $MPV2(10^{-7} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg)$ 平均场
Fig. 8 The 500 hPa $MPV2$ mean field

贡献随高度增大。

对比分析500 hPa和700 hPa $MPV1$ 与 $MPV2$ 的分布特征发现,湿正压项 $MPV1$ 对湿位涡的贡献随高度减小,湿斜压项 $MPV2$ 对湿位涡的贡献随高度增大,低层 $MPV1$ 比 $MPV2$ 对湿位涡的贡献大,随着高度上升这同量级下的贡献差别逐渐减小,500 hPa绝对值基本接近。这反映了暴雨过程中涡旋的正压发展和斜压发展都很重要,对流层中下层 $MPV1$ 负值区和 $MPV2$ 的正值区的分布和暴雨中心有较好的对应关系,暴雨通常出现在对流层中下部 $MPV1 < 0$ 和低层 $MPV2 > 0$ 的围区内。

4 结 论

(1)暴雨区上空低层负螺旋度与高层正螺旋度

相对应,高层负涡度辐散与低层正涡度辐合相配合,500 hPa上 Q 矢量强负散度区与暴雨中心相匹配,对暴雨的落区预报有指示意义。

(2)陇南出现暴雨,在其附近存在很强的假相当位温高值区和能量锋区,表明有大量的不稳定能量在暴雨区堆积。随着东移低槽带来的北方干冷空气进一步加剧能量锋区的强度,使得暴雨区前期堆积的不稳定能量爆发。

(3)湿位涡对暴雨的形成和发展有促进作用,暴雨过程中涡旋的正压发展和斜压发展都很重要,对流层中下层 $MPV1$ 负值区和 $MPV2$ 的正值区的分布与暴雨中心有较好的对应关系,暴雨通常出现在对流层中下部 $MPV1 < 0$ 和低层 $MPV2 > 0$ 的围区内。

(4)上述物理量应用在基层台站预报暴雨有很好的前景,目前由于缺乏细网格资料,只能初步分析应用,今后还需利用高分辨率数值预报产品资料做进一步的研究应用。

参考文献:

- [1] 宋连春. 干旱地区气象研究[M]. 北京:气象出版社,2003.57.
- [2] 王鹏祥,孙兰东,王宝鉴,等. 湿位涡和 Q 矢量与西北东部暴雨关系的分析[J]. 甘肃气象,1999,17(3):21-24.
- [3] 吴宝俊,许晨海,刘延英,等. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J]. 应用气象学报,1997,7(1):108-111.
- [4] 白乐生. 准地转 Q 矢量分析在短期天气预报的应用[J]. 气象,1998,14(8):28-29.
- [5] 王建中,马淑芬,丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用[J]. 应用气象学报,1997,7(1):19-26.

The Application of Several Physical Quantities to Rainstorm Forecast in Longnan Region of Gansu Province

FAN Ming^{1,2}, ZHOU Jun¹, FENG Jun²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Longnan Meteorological Bureau of Gansu Province, Wudu 746000, China)

Abstract Based on the circulation pattern occurring rainstorms most frequently in Longnan region of Gansu province, the mean fields of numerical prediction products of eight rainstorm cases were calculated, and the physical quantity fields were analyzed such as the divergence of Q vector, helicity, pseudo-equivalent potential temperature, frontogenesis function of Q vector, and moist potential vorticity (MPV), etc. Results show these physical quantity fields can not only reveal the rainstorm formation causes well, but also have some indications to rainstorm area forecast.

Key words: physical quantities; rainstorm; forecast