

文章编号: 1006-4354 (2007) 06-0001-05

湿 Q 矢量在陕西大暴雨过程中的应用研究

慕建利¹, 赵琳娜², 杜继稳³

(1. 陕西省气象台, 西安 710014; 2. 国家气象中心, 北京 100081;
3. 陕西省气象局; 西安 710014)

摘 要: 利用非地转湿 Q 矢量, 结合 MM5 模式模拟输出结果, 诊断分析了 2002 年 6 月 8—9 日发生在陕西及四川北部的一次大暴雨过程。结果表明: 非地转湿 Q 矢量散度辐合区对应垂直上升运动, 辐散区对应下沉运动; 非地转湿 Q 矢量散度辐合区及辐合强度对暴雨的落区和强弱有很好的指示意义, 非地转湿 Q 矢量散度辐合中心基本上是强降水中心, 辐合愈强降水愈强。非地转湿 Q 矢量锋生函数场与暴雨的落区和强度也对应很好。

关键词: 大暴雨; 湿 Q 矢量; 锋生函数

中图分类号: P458.121.1 **文献标识码:** A

近年来, 人们对 Q 矢量理论研究和实际应用又逐步加深, 出现了半地转 Q 矢量、非地转 Q 矢量及其诊断^[1-2]。不过这些表述均在假设大气是在绝热条件下进行的, 但是实际大气并非如此, 尤其是对于造成强降水的中尺度系统, 非绝热效应起到了关键的作用, 因此人们又在分析 Q 矢量中考虑了非绝热效应, 以便更好地描述大气的真实变化, 许多气象学者对此做了不少工作^[3-5]。

2002 年 6 月 8—9 日, 发生在陕西及四川东北部的突发性大暴雨天气过程, 造成陕西 44 个县(市)暴雨, 其中, 陕南 4 个县站达大暴雨, 佛坪最大降水量达 206.5 mm。大暴雨主要发生在 8 日夜间到 9 日上午, 重灾区佛坪主要降水时段在 8 日 22 时—9 日 04 时, 9 日 01—02 时雨强最大, 1 h 雨量达 52.8 mm。此次强降水是由多个中— β 尺度对流系统造成的。本文对非地转湿 Q 矢量和非地转湿 Q 矢量锋生函数进行了诊断分析, 试图用以揭示中尺度降水系统的物理机制及其与暴雨的关系, 为暴雨预报提供一种有利的工具。

1 资料及计算公式

$$Q^* = (Q_x^*, Q_y^*) = \left\{ \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{LR\omega}{C_p \cdot P} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right], \right.$$

1.1 计算资料

由于实际观测资料时空分布少, 不能较好地显示中小尺度系统的空间结构和时间演变过程, 随着中尺度数值模式的不断发展, 中尺度数值模式输出的资料可以弥补常规观测资料对中尺度系统分析的不足, 所以, 本文利用 MM5V3.5 模式输出的高时空分辨的模式资料进行再诊断分析, 有利于跟踪分析系统的发展演变, 揭示暴雨的形成机制。模式模拟采用 MM5V3.5 模式双向三重嵌套网格进行模拟, 垂直方向分 24 层, 水平分辨率分别为: 45 km, 15 km, 5 km。初始场及侧边界采用国家气象中心的 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 的 T106 每隔 6 h 一次的实时分析场资料, 积分初始时间为 2002 年 6 月 8 日 08 时 (北京时, 下同), 积分长度 36 h, 1 h 输出一次结果。该模拟方案对这次暴雨有较好的预报能力^[6]。

1.2 计算公式^[3]

1.2.1 非地转湿 Q (Q^*) 矢量表达式 从考虑了大气中水汽凝结非绝热加热作用的原始方程组出发, 可以推导出 p 坐标系的 Q^* , 其表达式为:

$$\frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{LR\omega}{C_p \cdot P} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

其中, $h = \frac{R}{p} \left(\frac{p}{1000} \right)^{R/C_p}$, $\omega = -\rho g w$, $\rho = \frac{p}{RT}$, $\frac{\partial q_s}{\partial p} = \frac{(CRT_v - C_p) q_s}{(CLq_s + C_p) p}$, $q_s = 0.622e_s/p$,
 $e_s = 6.11 \exp \frac{a(T - 273.16)}{T - b}$, $T_v = T(1 + 0.61q_s)$, $a = 17.15$, $b = 36$, $C = \frac{a(273.16 - b)}{(T - b)^2}$.

1.2.2 非地转湿 \mathbf{Q} 矢量表示的 ω 方程 以 \mathbf{Q}^* 矢量散度为强迫项的非地转方程为:

$$\nabla^2 (\sigma \omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}^* \quad (2)$$

显然, 当 ω 具有波状特征时, 上式左边与 $-\omega$ 成正比 (与 w 成正比), 由此可知

$$\nabla \cdot \mathbf{Q}^* \propto \omega \quad (-w) \quad (3)$$

当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* < 0$ 时, $w > 0$, 上升运动; 当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* > 0$ 时, $w < 0$, 下沉运动。上式表明 \mathbf{Q}^* 矢量散度场实际是非地转上升运动的强迫机制, 它必然激发次级环流。

1.2.3 非地转湿 \mathbf{Q} 矢量与次级环流的关系

$$Q_x^* = \left(f^2 \frac{\partial u_a}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) / 2 \quad (4)$$

$$Q_y^* = \left(f^2 \frac{\partial u_a}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) / 2 \quad (5)$$

其中, u_a 和 v_a 为非地转风。以上两式表明纬向和经向的垂直环流分别由 Q_x^* 和 Q_y^* 决定, 因而任一方向垂直剖面上的次级环流完全由该方向的 Q_x^* (或 Q_y^*) 决定, Q_x^* 正值表示 \mathbf{Q}^* 的纬向分量指向东, 反之指向西; Q_y^* 的正值表示 \mathbf{Q}^* 的经向分量指向北, 反之指向南。 Q_x^* (或 Q_y^*) 矢量方向总是指向气流上升区, 背向气流的下沉区。

由于 \mathbf{Q}^* 矢量决定了流场和温度场热成风的个别变化, 也就决定了水平温度的个别变化, 因而可以用它来预报锋生或锋消。

1.2.4 湿 \mathbf{Q} 矢量与锋生函数的关系式 由于湿 \mathbf{Q} 矢量决定了流场和温度场热成风的个别变化, 也就决定了水平温度的个别变化, 因而可以用它来预报锋生或锋消。 \mathbf{Q}^* 矢量与锋生函数的关系式为:

$$\frac{Dg}{Dt} |\nabla T|^2 = \frac{2P}{R} \mathbf{Q}^* \cdot \nabla T \quad (6)$$

式左边是锋生函数。当 $\mathbf{Q}^* \cdot \nabla T > 0$ 时, 锋生函数大于 0, 即锋生; 当 $\mathbf{Q}^* \cdot \nabla T < 0$ 时, 锋生函数小于 0, 即锋消。

2 暴雨过程概况

2002 年 6 月 8—9 日暴雨过程是在有利的大环流形势下, 低值系统不断发展东移而产生的。500 hPa 图上, 乌拉尔山、东北到华北一带为高脊, 巴湖至贝加尔湖为低槽区, 有利于低槽区不断分裂小槽东南移, 引导冷空气南下, 与低空急流输送的暖湿气流交汇。700 hPa 图上, 河套西北部的中尺度低压环流, 四川西南部的西南涡缓慢东北移, 涡前有一支东西宽约为 2 个经度, 平均风速为 13 m/s 的强西南急流, 105°E, 30°N~40°N 间有 NNE—SSW 向的切变线, 该切变线 8 日 20 时分裂为南北两段, 形成西北与西南风及东北与西南风的“人”字型切变线, 低涡和切变线是本次暴雨形成的主要影响系统, 强降水主要发生在切变线前的西南急流的左前方。

强降水在陕西形成两条中尺度雨带, 1 条位于陕北, 1 条位于秦巴山区, 陕北雨带中有 2 个暴雨中心, 雨量中心分别达 110 mm、94.6 mm; 秦巴山区雨带中有 3 个暴雨中心, 降水量达 145.9 mm、212.8 mm、100.6 mm。MM5V3.5 中尺度非静力模式对本次区域性暴雨的预报是成功的 (见文献 [6])。

3 诊断结果分析

3.1 \mathbf{Q}^* 矢量散度与降水的对应关系

分析不同等压面上的 \mathbf{Q}^* 矢量散度场与降水量分布发现, 700~300 hPa 的 \mathbf{Q}^* 矢量散度负值区 (辐合区) 与降水落区有很好的对应关系, 降水区均出现在 \mathbf{Q}^* 矢量辐合区内, 并且降水强度随着 \mathbf{Q}^* 矢量辐合的增大而增大。例如, 600 hPa 等压面上, 8 日 16 时, 106°E~110°E、32°N~35°N 的范围内, 有 3 个小于 $-15 \times 10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$ 的 \mathbf{Q}^* 矢量辐合区, 且辐合区内均有降水产生, 辐合越大, 降水量越大 (图略); 19 时佛坪辐合突然加强, 其后降水也相应增大 (图略); 21 时佛坪 \mathbf{Q}^* 矢量辐合范围扩大, 强度达最强 (中心强度为

$-40 \times 10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$), 模拟降水此时达最强时期, 范围也达最大 (图 1), 南侧的 2 个辐合中心对应陕西南部与四川北部的降水区; 9 日 00 时佛坪辐合减弱, 中心东移; 01 时佛坪上空辐合已经很小。可见, Q^* 矢量辐合中心基本上是强降水中心, 降水大小与辐合强弱有关。

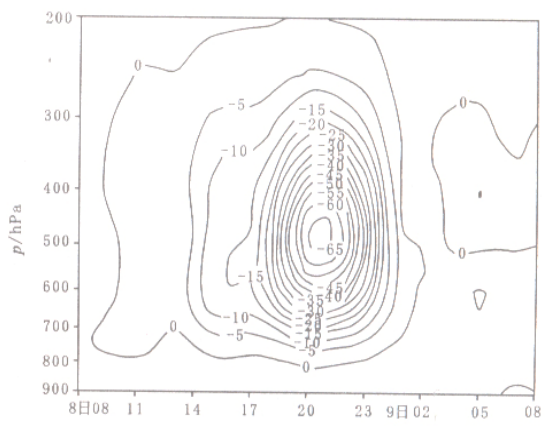
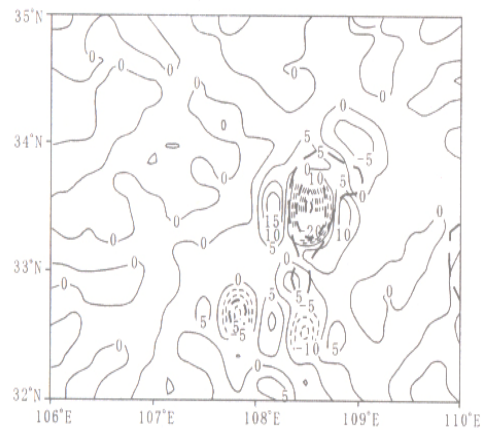


图 2 2002-06-08—09 过佛坪暴雨中心 Q^* 矢量散度时空分布图 (单位: $10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$)

展密切相关。从 Q_x^* 的垂直剖面可见, 8 日 16 时, 500 hPa 以下层暴雨区东侧 Q_x^* 为负值, 西侧为正值, 中心强度均为 $10 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 此时只有弱降水产生; 19 时, 东西两侧的正负 Q_x^* 突然发展加强并向高层伸展至 300 hPa, 中心强度达 $30 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 位于 600~400 hPa, 伴随强降水开始; 21 时达最强, 正负中心强度分别为 $40 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 和 $-50 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ (图 3a), 降水达强盛时期, 随后开始减弱; 23 时负值区消失, 9 日 00 时暴雨区上空 Q_x^* 几乎为 0。说明在 8 日 16 时, 正负 Q_x^* 中心在暴雨区西侧激发了逆时针的次级环流, 东侧形成顺时针的次级环流, 两个次级环流的上升支在暴雨区汇合, 使暴雨区上升运动加强, 并携带大量的暖湿气流, 为暴雨提供了丰富的水汽辐合条件, 从而使 Q_x^* 进一步发展加强; 21 时达到最强, 强降水的发生使得能量得以释放, 暴雨区东西两侧的正负 Q_x^* 开始减弱; 9 日 01 时降水结束。同样在 Q_y^* 的垂直剖面图 (图 3b) 上, 暴雨区的南北两侧形成了逆时针和顺时针的两个次级环流, 次级环流的上升支在暴雨区汇合, 在暴雨区形成了强的垂直上升运动。

由以上分析可知, 通过 Q^* 矢量散度来判断垂直上升运动, 由于 Q^* 矢量散度的存在, 必然使得大尺度的流场和温度场的热成风关系发生变化,



实线为正, 短虚线为负, 单位: $10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$;
长虚线为其后 1 h 降水量, 单位: mm

图 1 2002-06-08T21 500 hPa Q^* 矢量散度场

从过佛坪暴雨中心的 Q^* 矢量散度时间剖面图 (图 2) 上可以看出, 暴雨期间, 佛坪上空整个对流层几乎为 Q^* 矢量散度辐合区, 辐合中心位于 500~450 hPa。 Q^* 矢量散度辐合从 8 日 16 时发展, 18 时突然加强, 21 时达最强, 强度达 $-65 \times 10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$, 然后快速减弱, 9 日 01 时, 整层辐合基本为零。结合式 (3), 垂直上升运动呈波状结构时, Q^* 矢量散度辐合时为上升运动, 反之为下沉运动。可见, 本次暴雨过程, 暴雨区垂直上升运动非常强烈, 几乎在对流层整层为一致的上升气流。同时也看出, Q^* 矢量散度辐合从突然加强到减弱消亡大约 10 h 左右, 说明了本次暴雨具有典型的中尺度降水特征。

3.2 Q^* 矢量与次级环流的关系及其对暴雨的促进作用

由式 (4) — (5) 可见, 纬向和经向垂直环流分别由 Q^* 矢量在 x 和 y 方向的分量 Q_x^* 和 Q_y^* 决定, Q_x^* 和 Q_y^* 的垂直剖面图可以解释次级环流的分布状况, 次级环流的强弱又直接与系统的发

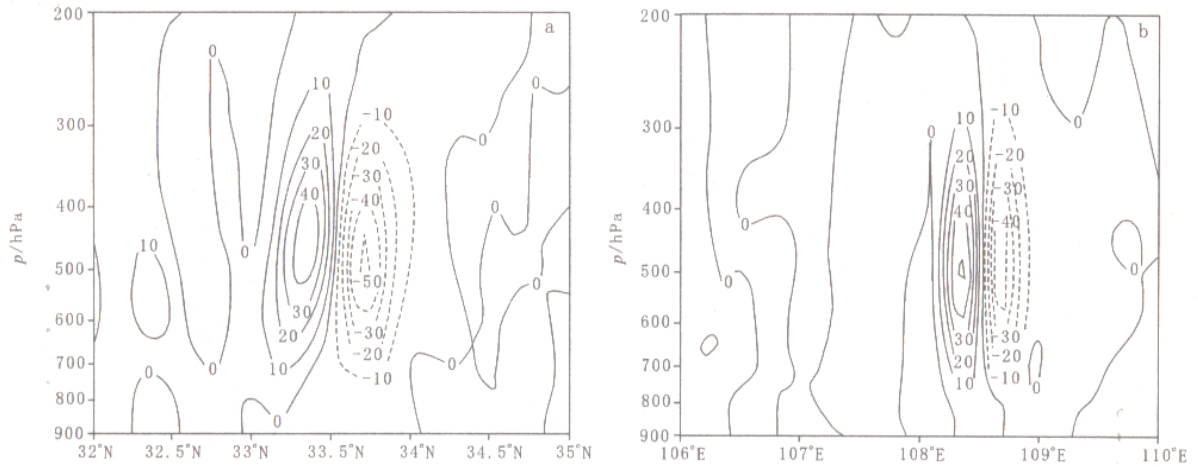


图3 2002-06-08T21 Q_x^* 过佛坪经向剖面图 (a) 和 Q_y^* 过佛坪纬向剖面图 (b) (单位: $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

破坏热成风的平衡作用,激发次级环流的产生,次级环流的产生又使得大尺度大气环流调整,使大气重新达到新的热成风平衡,天气系统在热成风平衡不断被破坏和重建的过程中发生发展。暴雨在有利的大尺度环流背景下,由次级环流的直接影响而产生。

3.3 Q^* 矢量锋生函数与暴雨的关系

分析暴雨过程中 Q^* 矢量锋生函数沿佛坪纬向垂直分布发现, Q^* 矢量锋生函数在 700~300 hPa 对暴雨的预报有着较好的指导意义。 Q^* 矢量锋生函数为正时,降水开始;突然增大时,强降水开始并随着 Q^* 矢量锋生函数减小而减小; Q^* 矢量锋生函数为负值时降水结束。8日14时,暴雨区附近 650 hPa 等压面上有范围较小的锋生函数;16时开始向高层伸展;19时正值区突然伸展至 350 hPa,且分裂为两个中心,分别位于暴雨区东西两侧;21时,正 Q^* 矢量锋生函数升至 300 hPa,强度也达到最强时刻,东西两个中心强度位于 650 hPa (图4) 分别达 $60 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $50 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;随后 Q^* 矢量锋生函数强核中心开始下移并逐渐减小,9日01时东侧已转为负值。

Q^* 矢量锋生函数与其后 1 h 模拟降水对比分析发现,强降水基本上落在正 Q^* 矢量锋生函数区。8日15时,佛坪正 Q^* 矢量锋生函数较小,降水量也很小;19时正 Q^* 矢量锋生函数范围和强

度突然增大,中心强度达 $40 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,相应降水范围扩大,强度增大后 1 h 出现 10 mm 以上降水;21时正 Q^* 矢量锋生函数达最大,且分为两个中心,位于佛坪的东西两侧,中心强度分别为 $65 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $40 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,此时模拟降水也最强 (图5);9日01

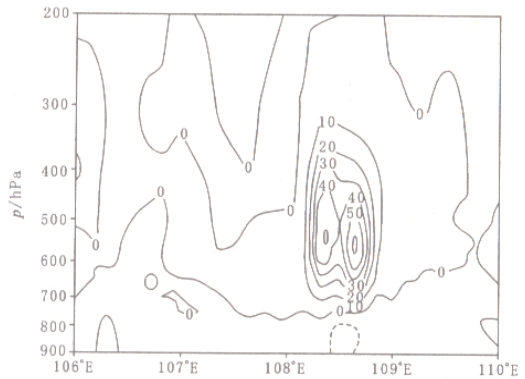
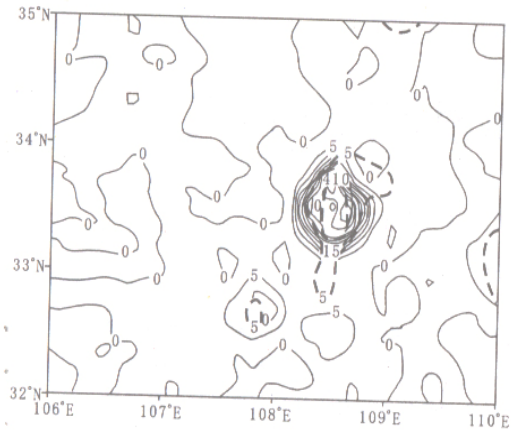


图4 2002-06-08T21 Q^* 矢量锋生函数沿佛坪纬向垂直剖面图 (单位: $10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

时佛坪附近 Q^* 矢量锋生函数变为负值,降水结束。结合高低空环流形势分析,正 Q^* 矢量锋生函数生成于地面倒槽内,高空槽和低空切变线的西南部,随着正 Q^* 矢量锋生函数增大,地面逐渐形成了“鞍型”场结构,加上高空槽后的西北气流引导冷空气东南下促使正 Q^* 矢量锋生函数突然加强,产生强降水。



实线，单位： $10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ；
虚线为其后 1 h 降水量，单位：mm

图 5 2002-06-08T21 500 hPa Q^* 矢量锋生函数

4 结 论

- 4.1 Q^* 矢量散度辐合区与降水落区有较好的对应关系，强降水基本上落在 Q^* 矢量散度辐合区，降水强度随着 Q^* 矢量辐合的增大而增大，并且强降水的发生发展和减弱与 Q^* 矢量散度辐合的向高层伸展和向低层减弱有较好的对应关系。
- 4.2 Q^* 矢量散度辐合对应垂直上升运动，辐散对应下沉运动。

- 4.3 Q^* 矢量散度对次级环流的发展加强起着重要作用，次级环流发展加强又对暴雨的发生发展起着直接的指示作用，暴雨发生在的次级环流的上升支。
- 4.4 Q^* 矢量锋生函数场与暴雨落区有着较好的对应关系，暴雨基本上落在 Q^* 矢量锋生函数正值中心，且随 Q^* 矢量锋生函数的增大而加强。

参考文献：

[1] 黄文根，邓北胜，熊廷南．一次台风暴雨的初步分析 [J]．应用气象学报，1997，8（2）：247-251.

[2] 岳彩军，寿绍文，姚秀萍．梅雨锋暴雨的 Q 矢量定性分析 [J]．气象科学，2003，23（1）：55-63.

[3] 寿绍文，励申申，姚秀萍．中尺度气象学 [M]．北京：气象出版社，2003：267-276.

[4] 张兴旺．湿 Q 矢量表达式及其应用 [J]．气象，1998，24（8）：3-7.

[5] 姚秀萍，于玉斌．非地转湿 Q 矢量及其在华北特大大台风暴雨中的应用 [J]．气象学报，2000，58（4）：436-446.

[6] 慕建利，杜继稳，梁生俊．一次 β 中尺度系统造成的大暴雨过程的数值模拟与诊断分析 [J]．气象，2006，24（8）：3-7.

欢迎订阅 2008 年《陕西气象》

《陕西气象》是陕西气象行业唯一的科技期刊，是以气象科学技术为主融学术性、知识性、实用性于一体的综合性刊物。重点刊载气象科学领域的最新研究成果，追踪国内外气象科技动态；交流和推介气象业务及服务新经验；介绍气象工作重点和热点问题的气象科学研究成果。2008 年将更加贴近部门和行业的实际，贴近读者和作者，努力成为广大气象科技工作者的益友、参谋和助手。

《陕西气象》为双月刊，A4 开本，48 页，每期 5.00 元，全年 30 元。

联系人：乔旭霞 程林仙 电 话：(029) 86255958

地 址：西安市北关正街 36 号 邮政编码：710014