

地闪与对流性天气系统中降水关系的分析*

周筠君 郗秀书 张义军 葛正谟 楚荣忠
张鸿发 张广庶 王怀斌 贾伟

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000)

摘 要

利用 1997 年夏季在中国科学院兰州高原大气物理所平凉雷电与暴雷实验站设置的 3 站闪电定位系统所取得的地闪资料与雷达、降水及探空等资料进行了对比分析, 发现地闪与对流性天气中的降水有较好的相关性, 这种相关性用来对一般性对流天气中降水进行估测是可行的。通过非线性回归近似拟合得到平均雨强与对应时段内的地闪数回归方程为 $R = 1.692 \ln F - 0.273$, 相关系数 r 为 0.8641。同时地闪频数与层结最大不稳定能量一样能够指示对流性天气的发生和发展。

关键词: 地闪, 对流性天气, 降水。

1 引 言

在对流天气观测中, 发展有效的探测手段并加以完善是十分必要的。近些年来, 国内外利用闪电定位系统和多种雷达对对流天气过程进行了大量的观测, 取得了许多有意义的结果。通过研究发现地闪与雷达回波强度有一定的正相关性, 地闪频数对于遥测降水是有利的, 另外也发现利用闪电资料可以对洪涝进行预报^[1]。雷暴中的强烈的电活动与强降水也有很好的对应关系, 而与一般性的降雨对应关系较差^[2,3]。中尺度对流系统中的闪电资料可以用来确定对流过程以及其发展趋势和强度, 而且闪电资料可以用来预报对流活动的发生和发展^[4]。

在国内外气象工作者研究的基础上, 应用闪电定位系统的地闪、雷达、探空、地面降水以及一些天气背景资料着重分析地闪在对流天气观测中与主要观测要素层结最大不稳定能量、雷达反射率及降水量等参量之间的关系, 从而揭示了地闪在对流性天气降水观测中的作用及其地位。

2 主要观测仪器及观测实验

1997 年 6~8 月间, 在陇东地区以平凉雷电与暴雷实验站为中心对对流性天气过程进行了综合观测, 观测仪器主要有 JM-130 型 3 cm 雷达, 中国科学院兰州高原大气物理

* 初稿时间: 1997 年 12 月 10 日; 修改稿时间: 1998 年 4 月 27 日。

资助课题: 中国科学院“西部之光”计划及甘肃省优秀青年基金、国家自然科学基金(49575244)与中国科学院重大项目 KZ 951-B1-405。

研究所由国产 713 雷达改装的双线偏振雷达与此同时使用了 3 站闪电定位系统(LLS), 3 个闪电定向仪(DF)分别设在六盘山, 彭阳和平凉雷电与暴雨实验站, 3 个点基本上位于一个等腰三角形上, 它们之间的距离分别为 40 km, 40 km 和 30 km。这些仪器的有效探测范围是在以平凉雷电与暴雨实验站为圆心, 半径为 200 km 的圆周内。文中所涉及到的对流天气主要是 1997 年 7 月 25 日到 1997 年 7 月 31 日 7 d 时间内的两次锋面天气过程经过陇东地区时, 产生的一系列的对流性降水天气。就这两次锋面过程中的对流性天气进行了重点观测。

3 对流性天气中地闪与降水的关系

3.1 天气背景

观测时段 1997 年 7 月 25 日到 1997 年 7 月 31 日中, 有两次冷锋锋面过程经过陇东地区。其中 1997 年 7 月 25 日到 1997 年 7 月 28 日为第一次过程, 1997 年 7 月 29 日到 1997 年 7 月 31 日为第二次过程。

第一次过程, 7 月 25 日冷锋在酒泉、白银、吴忠 3 点连线处。25 日该地区为晴转多云的天气, 整个地区没有降水。从地形形势图上可以得知 7 月 26 日冷锋移至兰州、固原和环县 3 点连线处, 此时锋面已到达该地区前缘, 该地区整个处于低压控制范围内。700 hPa 的高空形势上有冷平流向该地区输送。26 日的天气实况为局部有雷阵雨, 主要雨区尚在锋后, 有降水的站为隆德和彭阳(位置见图 1), 雨量分别为 6.6 mm 和 6.8 mm, 降水时段为 14:00~20:00。7 月 27 日, 锋面移动不明显, 已移至该地区, 位置在临洮和固原两点连线处, 700 hPa 和 500 hPa 的高空上该地区处于低压槽内, 并有冷平流输送, 主要雨区在锋前。整个陇东地区基本上都有降水记录。其中有 14 个测站的降水记录在 2.0 mm 以上。华亭降水最大为 49.8 mm, 镇原其次为 36.2 mm。主要降水时段为 14:00~20:00。7 月 28

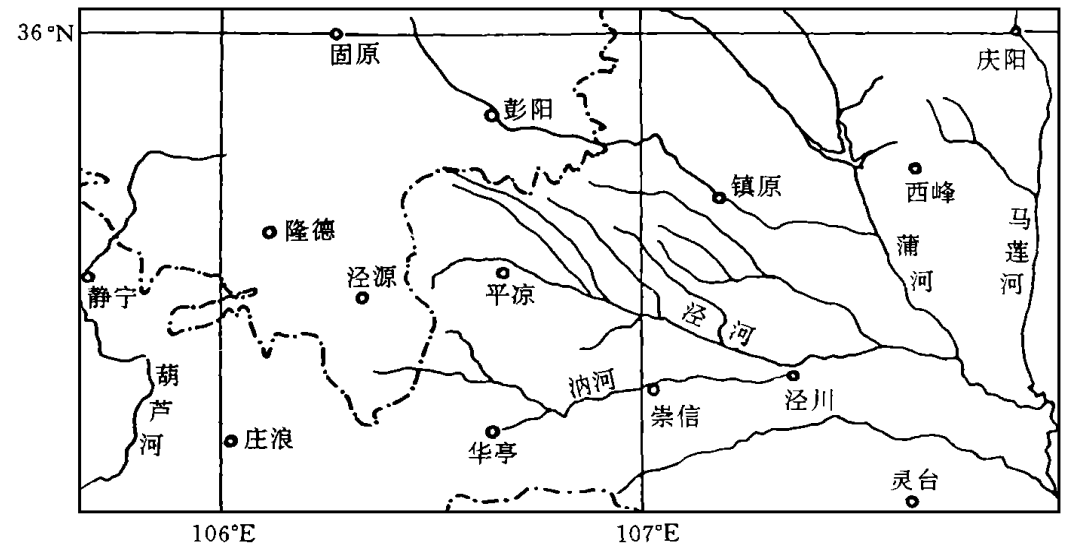


图 1 陇东地区主要降水量观测站分布示意

日冷锋基本上已移出该地区, 其位置在陇县与长武两点连线处, 700 hPa 与 500 hPa 高空均有暖平流向该地区输送, 天气实况为小到中雨, 锋后仍是雨区, 但降水时段较为分散, 各站基本上全天都是零星的连续性降水, 其中泾川最大为 40.1 mm。

第二次过程是 7 月 29 日又一个冷锋移来, 其位置沿祁连山脉在吴忠北拐与贺兰山平行, 700 hPa 高空形势上低压在该地区附近前缘, 500 hPa 高空低压槽已移至该地区附近, 天气实况为多云天气, 全区均无降水。7 月 30 日冷锋移至固原和宁县二点连线处, 700 hPa 和 500 hPa 上的高空上均配合有冷平流和低压, 天气为多云局部有雷阵雨, 彭阳降水量最大为 24.1 mm。7 月 31 日冷锋移出该地区, 其位置在西安和汉中两点连线处, 主要雨区在锋后。700 hPa 和 500 hPa 高空形势上均有低压和冷平流配合, 天气实况为连续性的小到中雨, 各站全天基本上都有降水记录。庄浪降水量最大为 18.1 mm。

3.2 地闪与层结最大不稳定能量的关系

由上节天气形势分析可知 1997 年 7 月 25 日到 7 月 31 日虽为两次冷锋天气过程, 但由于陇东地区六盘山的局地抬升作用, 在两次锋面过程中产生了一系列的对流性天气。在这些对流性天气中伴有大量闪电产生。

由图 2a 的 7 月 25 日到 7 月 31 日陇东地区地闪每日总数与每日 07:00 时层结最大不稳定能量的时间变化序列(实线为每日 07:00 时层结最大不稳定能量, 虚线为每日地闪总数)中可以看到在这 7 d 时间内, 地闪在 7 月 27 日与 7 月 30 日出现两个日闪电总数极大值, 分别为 1861 与 3212。而在 7 月 26 日与 7 月 28 日出现两个极小值, 其值均为 0。而通过对 7 d 天气过程中的 07:00 时与 19:00 时的层结最大不稳定能量平均和对 7 d 天气过程中每 5 min 地闪频数分段平均, 并对二者各自的极大值归一后得到的归一层结最大不稳定能量与每 5 min 地闪频数日循环的关系图 2b(折线为归一层结最大不稳定能量, 曲线为归一化每 5 min 地闪频数)可知, 在一天时间内地闪的极大值出现在 15:20

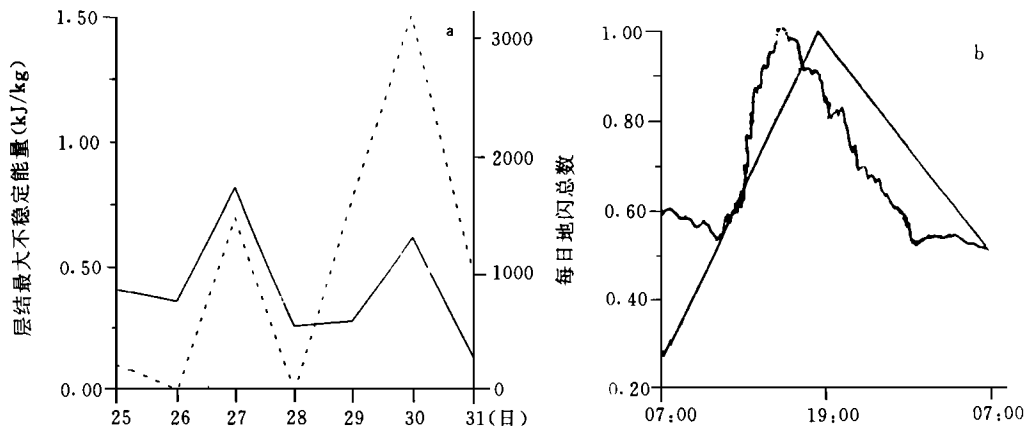


图 2 7 月 25 ~ 31 日陇东地区每日地闪总数与每日 07:00 时层结最大不稳定能量时间变化序列(a)和归一化的层结最大不稳定能量与每 5 min 地闪频数日循环关系(b)

(a. 实线为 07:00 时层结最大不稳定能量, 虚线为每日地闪总数; b. 折线为归一化的层结最大不稳定能量, 曲线为归一化的每 5 min 地闪频数)

左右,而在 12:00 与 24:00 左右出现两个极小值,分别是极大值的 48% 与 45%。

另外,同样由图 2a 可知,层结最大不稳定能量 27 与 30 日出现两个极大值,其值分别为 0.84 kJ/kg 与 0.63 kJ/kg,而在 26 日与 28 日出现两个极小值,其值分别为 0.38 kJ/kg 与 0.24 kJ/kg。而在图 2b 中虽然探空资料较少(每日 07:00 时与 19:00 时两次),但在只是为了得到层结最大不稳定能量的变化趋势时,这样作也是可行的。可以看到,一天中在 19:00 时左右层结最大不稳定能量较大。

由以上分析可知,在 7 月 25 日到 7 月 31 日 7 d 时间中陇东地区日地闪总数与 07:00 时层结最大不稳定能量在 27 与 30 日同时出现极大值,而在 26 与 28 日同时出现极小值,这样日地闪总数与 07:00 时层结最大不稳定能量也可以分为两个过程。7 月 25 日到 7 月 28 日为第一个过程,7 月 29 日到 7 月 31 日为第二个过程,这恰与两次冷锋天气过程严格对应。也就是说,在锋面移至该地区之日,由于这种大的强不稳定天气背景使得层结最大不稳定能量达到整个锋面天气过程中的极大值,从而使得这时该地区强对流盛行,对流性起电机制加强,导致大量闪电发生。

为了得到更加全面的层结最大不稳定能量与地闪的关系,由图 2b 可以知道在一天时间内层结最大不稳定能量较大的值的出现时间可能比每 5 min 地闪频数极大值出现时间略有滞后。由于探空资料较少,这一现象尚有其不确定性。但是从对流天气发展过程来看,潜在的层结最大不稳定能量释放与否,是与下垫面的触发机制紧密相关的。另外,尽管强不稳定天气背景可导致强对流天气的发生,但在强对流天气出现时的起电并不完全由对流性天气引起,因而层结最大不稳定能量较大的值也就不一定与每 5 min 地闪频数极大值出现的时间相对应。而在强对流发生时,随着对流的发展,下垫面触发机制的减退或消失,往往可能使得用每 5 min 地闪频数极大值比用层结最大不稳定能量较大的值来指示对流性天气的发生和发展更方便。

3.3 地闪与降水的关系

在两次冷锋过程中,由于锋前大的天气系统尚未移至该地区,而且局地对流也几乎没有,所以地闪和降水在该地区都几乎不存在,而在锋后,由于锋面已移出,强不稳定因素减弱,降水则是连续性的,地闪发生甚少。但是在冷锋移至该地区时,由于强不稳定因素的存在,地闪发生强烈,地面降水为阵性强降水,二者之间有较好的对应性。本文先选取 7 月 27 日与 7 月 30 日两次冷锋移至该地区时的地闪和降水进行分析。这两天都是对流云系和层状云系混合性的降水。选取该地区降水较为集中的 180 min 作为分析时段,分别对该地区 7 月 27 日和 7 月 30 日两天地闪和降水资料逐站进行平均得到陇东地区每 5 min 地闪频数,降水量及雷达回波顶高的关系图 3a 和 3b(两个图中的高度均为海拔高度),同时在两个图中标出了 0 层和-10 层高度。首先由两个图可以看出,7 月 27 日和 7 月 30 日两天主要降水时段 180 min 内每 5 min 地闪频数和降水量随时间的变化趋势较为一致,其中 7 月 27 日在 90 min 时地闪频数和降水量同时出现极大值,分别为 5.2 和 4.2 mm,7 月 30 日地闪频数极大值在 60 min 时出现比 90 min 时出现的降水量极大值有所提前,地闪频数与降水量的极大值分别为 2.8 与 1.8 mm。其次 7 月 27 日与 7 月 30 日随着时间的推移 45 dBz, 35 dBz, 25 dBz, 15 dBz 和 1 dBz 云高的变化与每 5 min 地闪频数随时间的变化基本一致。再次可以注意到 7 月 27 日的 25 dBz 的反射率的云高超过-10 层

高度(大约为 7.1 km)持续 80 min。7 月 30 日的 25 dBz 的反射率的云高尚未达到 -10 层高度(大约 7.7 km)。就这两日相比较而言, 7 月 27 日的 25 dBz 的反射率的云高比 30 日的高, 但 0 层(约为 5.2 km)高度及 -10 层高度均比 30 日的 0 层(约为 5.6 km)和 -10 层高度低, 而 27 日降水比 30 日量大范围广, 另外 27 日地闪(主要在 60 到 120 min 内)比 30 日(主要在 30 到 150 min 内)的时间集中, 每 5 min 地闪频数极大值也比 30 日的大。这就是说, 当雷达强回波(25 dBz)高度超过 -10 层高度越大时, 每 5 min 地闪频数越大, 相应地降水量也越大。这些是符合对流发展的机理的, 在强对流发展旺盛时, 由于云中电荷的迅速积累, 使得地闪频频发生, 云中核化生成的水滴在云中不断碰并增长, 最后

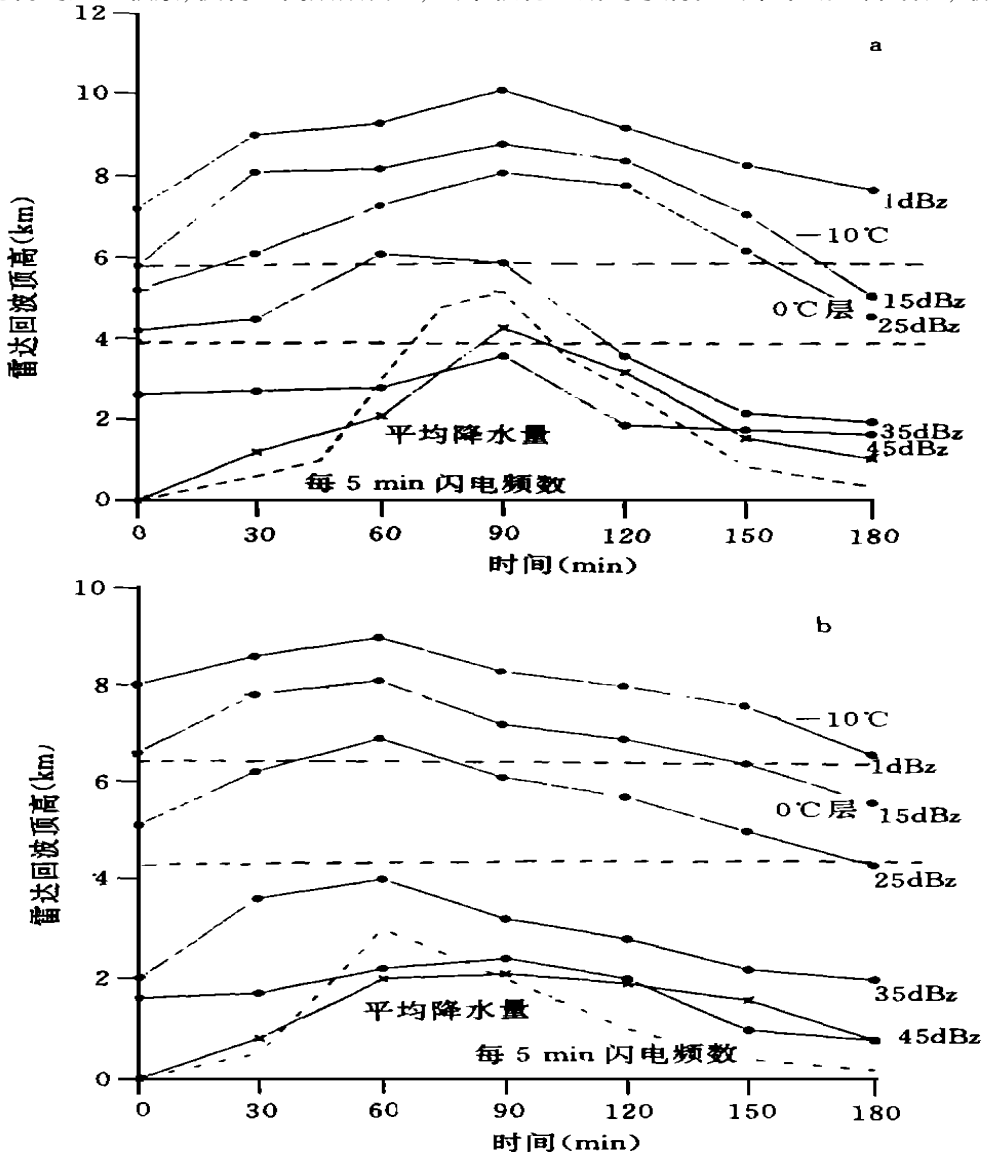


图3 7月27日和7月30日陇东地区每5 min地闪频数、降水量及雷达回波顶高的关系

(a. 7月27日; b. 7月30日。降水量单位: mm)

落下形成降水量大而且集中。

在 7 月 25 日到 7 月 28 日的第一个冷锋天气过程中, 锋前 26 日降水量及范围都较小, 同时闪电几乎没有。锋后 28 日虽然有降水, 但为层状云降水, 地闪同样较少。在 7 月 29 日到 7 月 31 日的第二个冷锋过程中, 锋前 29 日为多云天气没有什么降水, 地闪也较少, 锋后 31 日为层状云降水, 闪电活动不强, 而且较为分散。

由此可知, 在锋面移至该地区的背景下, 由于该地区的特有地形, 使得该地区的对流天气发生频繁, 在这些对流天气中降水及地闪有较好的相关性。而在锋面前后对流活动较少, 因而降水和闪电的相关性也就较差。

3.4 用地闪资料反演估测降水

诚然, 反演估测降水的方法很多, 尤其是利用常规雷达的 $Z-R$ 关系或双线偏振雷达的 Z_H (反射率因子), Z_{DR} (差分反射率) 与 R 的关系估测降水的技术较为成熟, 另外卫星遥感测量降水的技术亦日臻完善, 但是研究多种反演估测降水的方法也是气象界努力追求的目标。

本文将分析陇东地区地闪及与之对应的对流性天气中实测降水资料通过研究其相关性来探求使用闪电资料估测降水的可能性。将 7 月 27 日与 7 月 30 日陇东地区各主要降水时段平均雨强分布等值线及该地区与降水时段相对应各时段内的地闪数的分布等值线分别叠加绘于图 4a 与 4b 上, 其中实线表示主要降水时段平均雨强, 虚线表示主要降水时段内的地闪数, 图中坐标 (0, 0) 为平凉雷电和暴雨实验站。由图 4a 可以知道, 7 月 27 日在华亭和镇原两处分别出现两个强的雨强中心, 中心值分别为 8.3 与 $6.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 而与之对应时段内的地闪数也在这两处出现了极大值中心, 其值分别为 64 与 65。由图 4b 可以知道, 7 月 30 日在草峰与泾源两处也出现强的雨强中心, 中心值分别为 $3.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $4.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 与之对应时段内的地闪数同时也在这两处出现极大值中心, 其值分别为 22 与 26。

利用 7 月 27 日与 7 月 30 日两天 16 个测站的降水及地闪资料, 以每个测站为中心, 取各测站主要降水时段内的平均雨强 (平均雨强大于 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (14:00~20:00 的 6 h 内)), 64 km^2 范围内, 与主要降水时段相对应时段的地闪数, 共 64 个独立的样本数, 通过非线性回归近似拟合可以得到陇东地区对流性天气中平均雨强与对应时段内地闪数的回归方程如下:

$$R = 1.692 \ln F - 0.273 \quad F \geq 2 \quad r = 0.8641 \quad (1)$$

式中 R 为平均雨强, F 为地闪数, r 为相关系数。显然由回归方程得到的平均雨强与地面实测的平均雨强的相关性较好。利用张鸿发^[5]得到的方程 $R = AZ_H Z_{DR}^B$, 将该地区 7 月 27 日与 7 月 30 日双线偏振雷达测量到的主要降水时段内的 Z_H 与 Z_{DR} 代入方程, 得到的雨强与实测雨强的相关系数平均为 0.9413。尽管利用地闪资料进行降水量估测的精度不及双线偏振雷达, 但由于地闪探测的简便宜行, 且可以实现无人值守的长期监测, 因此用地闪资料进行对流性降水估测仍不失为一种可行的方法。

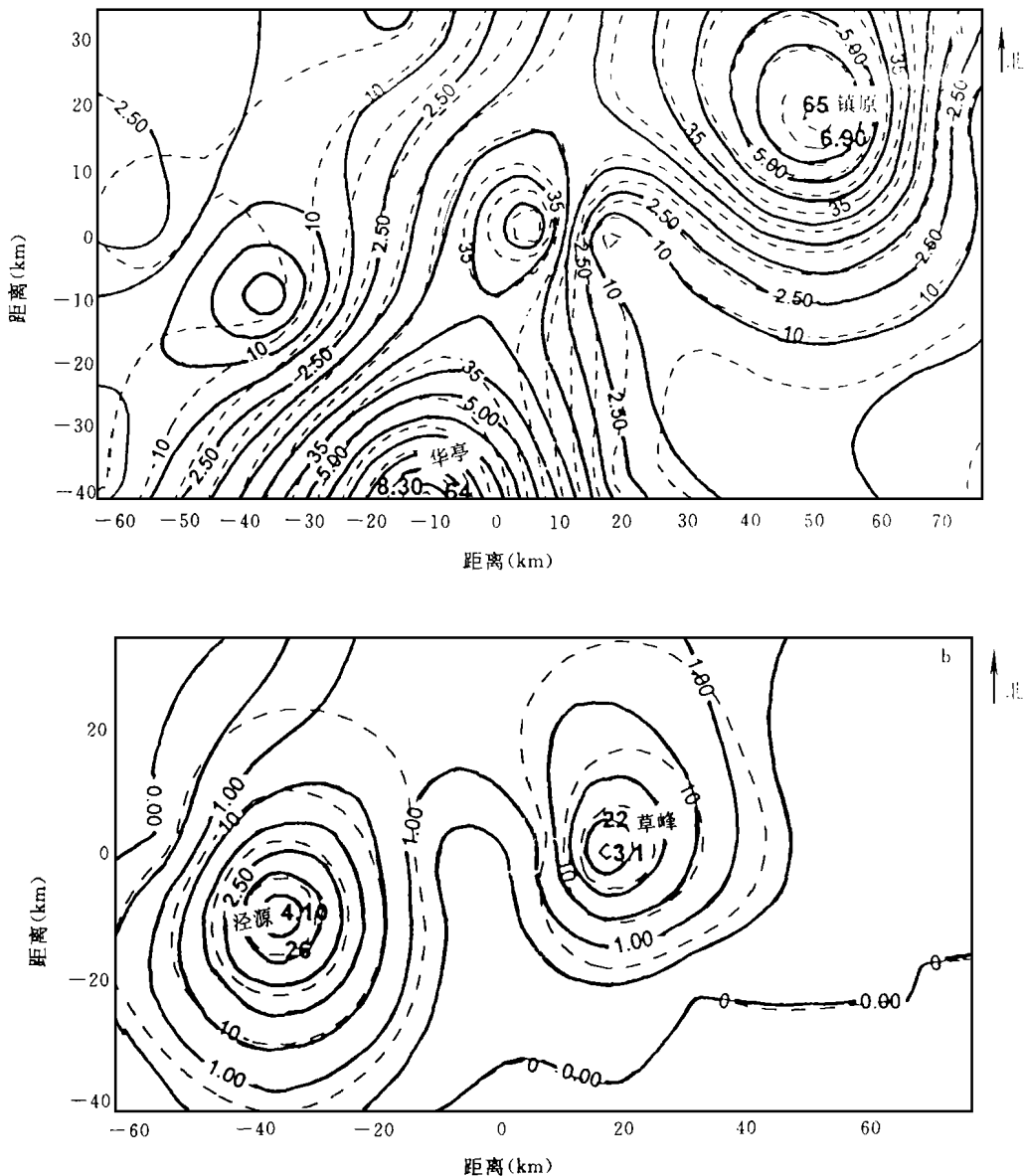


图 4 7月27日和7月30日陇东地区主要降水时段(14:00~2:00)平均雨强与地闪数等值线分布
(a.7月27日;b.7月30日。实线为平均雨强,虚线为地闪数)

4 结 论

陇东地区在锋面天气背景下,加之该地区特有地形的抬升作用,使得这一地区经常发生对流性天气,通过关于地闪与对流性降水关系的分析,初步可以得到以下的结论:

(1) 当锋面移至该地区时,最大不稳定能量与日地闪总数同时出现极大值,此时降水和闪电有较好的相关性,而在锋面前后降水和闪电相关性较差;

(2) 每 5 min 地闪频数的日循环极大值与层结最大不稳定能量的日循环较大的值一样都可作为指示对流性天气发生发展的指标, 地闪频数比层结最大不稳定能量可能会更方便些;

(3) 在对流性天气中, 每 5 min 地闪频数和降水量及各层云高(反射率为 45 dBz, 35 dBz, 25 dBz, 15 dBz 和 1 dBz) 随时间的变化趋势基本一致;

(4) 当闪电时间越集中, 每 5 min 地闪频数越大, 雷达强回波(25 dBz) 高度超过 -10 层高度越大, 相应地对流性天气的降水量也越大。每 5 min 地闪频数与降水量正相关;

(5) 利用地闪数反演估测对流性天气中的降水, 进行一般性估测降水仍不失为一种可行的方法。由非线性回归近似拟合得到平均雨强与对应时段内的地闪数回归方程为 $R = 1.692 \ln F - 0.273$, 相关系数 r 为 0.8641。

由于资料较少, 方程尚不够完善, 还需作进一步的改进。

参考文献

- 1 Holle R L and Bennett S P. Lightning ground flashes associated with summer 1990 flash floods and streamflow in Tucson, Arizona, an exploratory study. *Mon Wea Rev.* 1997, 125: 1526- 1536
- 2 Petersen W A and Rutledge S A. Cloud-to-ground lightning observations from TOGA COARE: selected results and lightning location algorithms. *Mon Wea Rev.* 1996, 124: 602- 620
- 3 张义军, 华贵义, 言穆弘, 安学敏. 对流和层状云系电活动, 对流及降水特性的相关分析. *高原气象*, 1995, 14(4): 396 ~ 405
- 4 Qie Xiushu, Yan Muhong, et al. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting. *Acta Meteor Sinica*, 1993, 7(2): 224- 256
- 5 张鸿发, 徐宝祥, 王致君, 蔡启铭. 用双线偏振雷达的差分反射率 Z_{DR} 技术测量降雨和雨滴谱的研究. *气象学报*, 1996, 54(2): 154 ~ 165

THE RELATIONSHIP BETWEEN CLOUD TO GROUND LIGHTNING AND PRECIPITATION IN THE CONVECTIVE WEATHER

Zhou Yunjun Qie Xiushu Zhang Yijun Ge Zhengmo Chu Rongzhong
Zhang Hongfa Zhang Guangshu Wang Huaibin Jia Wei

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract

Based on the observation data of the lightning location system (three direction finders are set at Liupan mountain, Penyang and Pingliang lightning and thunderstorm experiment station respectively), radar, sounding and other weather background at Pingliang lightning and thunderstorm experiment station of Chinese Academy of Science between June and August in 1997, compared their applications in convective weather observation, it is found that cloud to ground lightning is an important index. The correlation coefficient between cloud to ground lightning and the precipitation in convective weather is so high that cloud to ground lightning can estimate precipitation. The regression equation between the precipitation intensity (R) and the frequency of cloud to ground lightning (F) is $R = 1.692 \ln F - 0.273$, and the correlation coefficient r is 0.8641. The frequency of cloud to ground lightning is just like the convective available potential energy, it can show the formation and development of the convective system.

Key words: Cloud to ground lightning, Precipitation in convective weather observation, Rainfall.