

甘南高原一次突发性强对流天气的诊断分析

王建兵, 王振国, 李晓媛, 汪治桂, 张胜智

(甘肃省甘南州气象局, 甘肃 合作 747000)

摘要:对发生在甘南高原的一次突发性强对流天气的诊断分析发现:高原上对流云团发展东移与本地发展的对流云团合并加强是造成这次强对流天气的主要原因;强雷雨和冰雹出现的位置在对流云团的右前侧;600~700 hPa 上高原东部偏东气流的发展对这次强对流天气的发生、发展有重要作用;700 hPa 高能中心、 $\omega_{(500-700)}$ 不稳定区分布、700 hPa 螺旋度及 700 hPa 水汽通量散度的分布对这次强对流天气的落区有很好的指示意义。

关键词:强对流天气;成因;诊断分析

中图分类号: P458.1⁺21.1

文献标识码: A

引言

甘南高原地处青藏高原东北侧边缘,是青藏高原与黄土高原的过渡带。夏季对流性天气频繁,多以短历时降水为主,暴雨出现频次少,自有气象记录以来至 2005 年,甘南共出现暴雨 15 站(次),而在 2006 年汛期出现了 4 次暴雨天气过程,为历史罕见。其中 2006 年 8 月 30 日 20:00 至 31 日凌晨,甘南州境内普降强雷阵雨。临潭、迭部出现大雨;碌曲县全县范围内降暴雨,降水量达 84.4 mm,并伴有直径为 12 mm 的冰雹;卓尼县有 6 个乡镇出现了大到暴雨、冰雹天气。这次暴雨的降水量是甘南州有气象记录以来日降水的最大值。30 日 20:35~20:45,碌曲气象站 10 min 降水量达 30 mm,观测场内短时间积水达 60 cm,雨强之大为百年不遇。强降水引发的暴洪及泥石流,造成了人员伤亡及道路、桥梁、人畜饮水工程等基础设施的毁坏,造成了严重的损失。

由于突发性强对流天气具有来势猛、强度大、灾害重的特点,是预报的难点,也是气象科技工作者研究的重点^[1-4]。本文利用实况资料及 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ 6$ h 再分析资料,主要从水汽、动力、层结条件及 FY-2C 云图演变对这次强对流天气过程的成因进行分析,为以后的预报总结经验。

1 环流背景

8 月下旬前期欧亚中高纬环流形势为 2 脊 1 槽型,贝加尔湖到蒙古一带为一宽广槽区,副热带高压位置偏东。从 8 月 23 日开始副高开始加强西伸,29 日 08 时 588 线西伸到四川西部到甘肃南部,甘南东南部处于 588 线边缘,高原上西南气流发展,湿度明显上升,在高原东部形成一宽广的暖湿区 ($90 \sim 105^\circ \text{E}$, $30 \sim 37^\circ \text{N}$ 之间 $T - T_d < 5$),贝加尔湖附近有一冷低压,中纬以平直多波动气流为主,多短波槽活动。30 日 08 时 500 hPa 图上,副高继续西伸,588 线西伸到玉树、达日、合作一带,甘南西部处于 588 线边缘,副高西侧西南气流伸展到托托河、都兰、张掖一带,高湿区向西扩展,同时北抬到 40°N 一带,20 时环流形势调整明显,副高减弱略东退,北部冷空气南压,高原上西南气流减弱南退,在高原上沿 35°N 附近形成了一条偏北风与西南风之间的切变线,同时在 30 日 20 时 700 hPa 图上,榆中、合作、西宁为一致偏东风,榆中、合作的风速为 6 m/s,与偏南气流在甘南形成了一个辐合区。在分析中发现这支偏东气流对这次强对流天气的发生、发展有重要作用。

2 诊断分析

2.1 水汽条件

收稿日期: 2006 - 12 - 04; 改回日期: 2007 - 07 - 25

基金项目: 甘肃省气象局“西北地区防雷消雹技术在甘南州冰雹、雷暴短时临近预报预警中的应用推广研究(2007 - 07) 课题资助

作者简介: 王建兵(1968 -),男,甘肃甘谷人,工程师,主要从事天气预报、气候研究。

水汽是形成暴雨的最基本条件之一,也是强对流系统得以发生、发展和维持的主要能量来源。本文主要从水汽通量、水汽通量散度来分析这次暴雨、

冰雹过程的水汽条件。30日 08时水汽通量垂直剖面图上(图 1a),甘南上空在 450~550 hPa之间有 $6 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心,但低层水汽

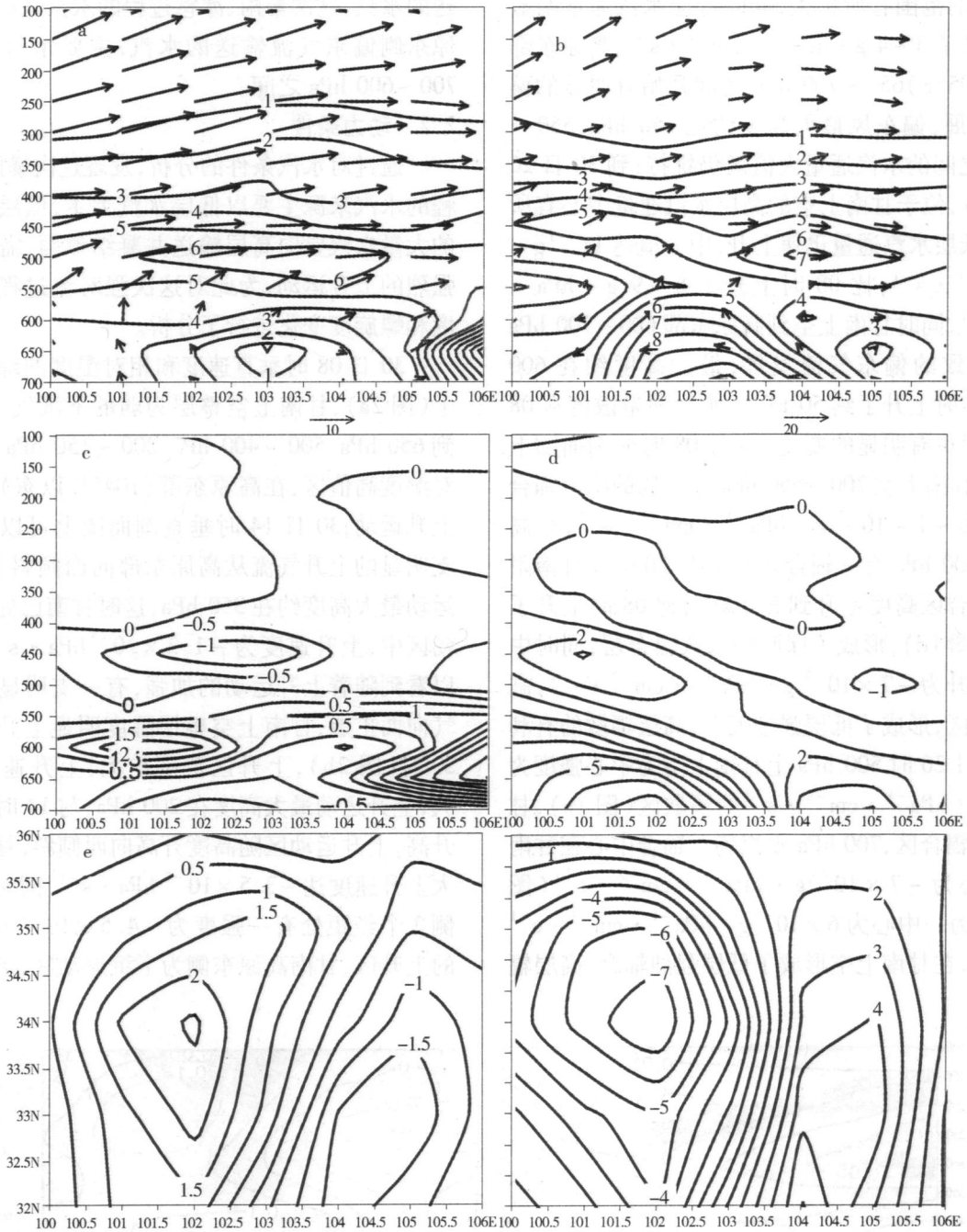


图 1 2006年 8月 30日水汽通量剖面图 (a: 08: 00, b: 20: 00)、水汽通量散度剖面图 (c: 08: 00, d: 20: 00) 及 20时 500 hPa (e)和 700 hPa (f)水汽通量散度场

Fig 1 The water vapor flux profiles at 08: 00 (a) and 20: 00 (b), the water vapor flux divergence profiles at 08: 00 (c) and 20: 00 (d), the water vapor flux divergence fields of 500 hPa (e) and 700 hPa (f) at 20: 00 on August 30, 2006

通量非常小,高原东侧有一中心达 $13 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心。这时甘南上空到高原东部 $600 \sim 700 \text{ hPa}$ 之间风向以偏西风为主;30日14时水汽通量垂直剖面图(图略)上,甘南上空水汽通量中心的范围有所扩大,同时低层水汽通量明显增加,上升了 $3 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,高原东部 ($103^\circ \sim 105^\circ \text{E}$) $650 \sim 700 \text{ hPa}$ 之间开始有明显的偏东气流发展,偏东风最大高度约在 650 hPa , $550 \sim 450 \text{ hPa}$ 之间的水汽通量大值区仍维持;到30日20时(图1b),位于甘南上空的高层水汽通量中心有所东移,但低层水汽通量迅速上升,中心值达 $11 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,比08时上升了 $8 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,同时甘南上空到高原东部 $600 \sim 700 \text{ hPa}$ 之间为一致的偏东气流发展,最大高度约在 600 hPa ,比14时上升了约 50 hPa 。水汽通量散度从08时到20时也有明显的变化,30日08时的剖面图上(图1c),甘南上空 $700 \sim 650 \text{ hPa}$ 为一弱的水汽辐合区,强度为 $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在高空 $450 \sim 400 \text{ hPa}$ 有一辐合区。30日20时在甘南附近低层辐合区高度上升到 550 hPa ,比08时上升了 100 hPa (图1d),形成了深厚的水汽辐合层,同时中心强度上升为 $-7 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,高层为辐散区,形成了低层强烈辐合,高层辐散的有利配置;30日20时 500 hPa 上甘南上空为中心强度为 $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐散区(图1e),甘南东侧为辐合区, 700 hPa 水汽场上辐合中心在甘南西部,中心为 $-7 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图1f),东侧为一中心为 $6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐散区,在甘南上空形成了低层强烈辐合、高层辐

散的有利配置,同时高原东侧偏东气流的发展及水汽通量和水汽通量散度的变化说明造成这次暴雨、冰雹过程的水汽来源有高层 $550 \sim 450 \text{ hPa}$ 副高西侧西南气流输送的水汽和低层高原东部偏东气流输送的水汽,这次暴雨、冰雹过程的水汽来源主要是高原东侧偏东气流输送的水汽,主要水汽辐合区在 $700 \sim 600 \text{ hPa}$ 之间。

2.2 动力条件

通过对水汽条件的分析,发现这次暴雨、冰雹过程的水汽来源主要以低层水汽为主,低层辐合汇集的大量水汽要向高层输送并凝结致雨,需要持续的强烈的上升运动,为此对这次强对流过程的垂直速度和螺旋度变化进行了分析。

30日08时垂直速度和相对湿度的综合剖面图上(图2a),甘南上空整层为弱的下沉气流,从地面到 650 hPa , $500 \sim 400 \text{ hPa}$, $200 \sim 150 \text{ hPa}$ 各有一相对湿度高值区,在高原东部 (104°E 以东) 有明显的上升运动;30日14时垂直剖面图上可以看到有一支明显的上升气流从高原东部向西倾斜上升,上升运动最大高度约在 350 hPa ,这时甘南已处于上升运动区中,上升速度为 $-1.2 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,同时可以看到随着上升运动的加强,有一支明显的暖湿空气向西扩展,甘南上空整层湿度明显上升;到30日20时(图2b),上升区范围扩大,上升速度明显增大,上升运动最大高度在 200 hPa ,与14时相比明显升高,上升运动区随高度升高向西倾斜,甘南上空最大上升速度达 $-3.5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,同时在甘南西侧2个经距处有一强度为 $-4.5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升区,甘南高原东侧为下沉运动区,形成了有利

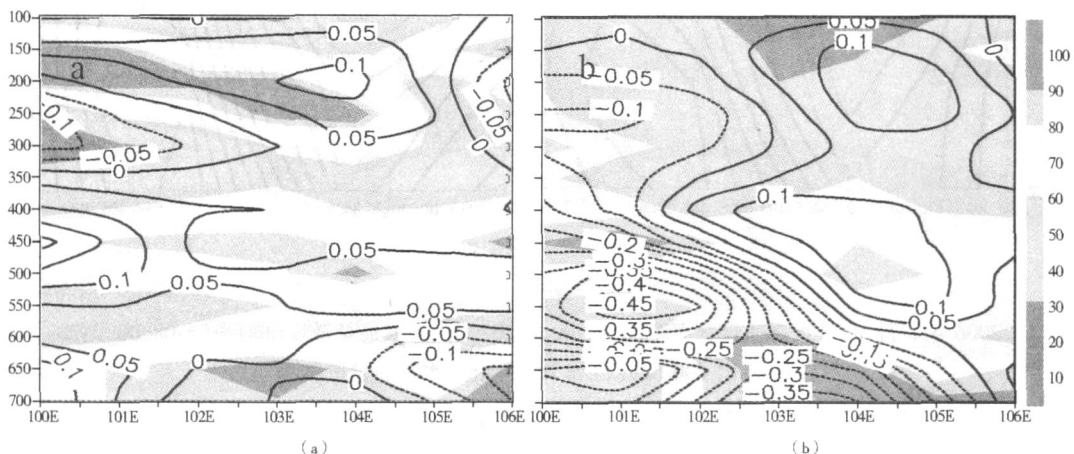


图2 2006年8月30日垂直速度(线条)和相对湿度(阴影)剖面图(a:08:00, b:20:00)

Fig 2 The sections of vertical velocity (contour) and relative humidity (shaded) at 08:00 (a) and 20:00 (b) on August 30, 2006

于对流发展的垂直环流;同时甘南上空相对湿度与 14 时相比也明显增加,高值区范围扩大,甘南上空 700 ~ 600 hPa 之间相对湿度 90%,接近饱和;这时 500 ~ 400 hPa 之间的相对湿度高值区仍维持。

从垂直速度和相对湿度的变化可以看到甘南上空的水汽含量是随着垂直速度的加大逐渐增加的,同时上升区随高度升高向西倾斜,上升运动的发展与低层高原东部偏东气流的发展密切相关,低层暖湿气流向西输送,由于地形抬升作用产生上升运动,造成低层的水汽不断向高层输送,并在甘南上空汇集,充沛的水汽输送使得暴雨区的上升气柱接近饱和(相对湿度 90%),对这次强对流天气的发生发展有重要作用;同时低层高原东部偏东气流的发展,对形成有利于强对流天气的垂直环流也有重要作用。

为了进一步对这次强对流天气进行分析,我们计算了这次强对流天气 p -坐标系的垂直螺旋度 (h_p)^[5-6]:

$$h_p = - \quad \times$$

由于在强对流区上空有深厚的上升运动 (< 0),所以若有正涡度 (> 0),则有正 h_p ,若有负涡度 (< 0),则有负 h_p ;为了突出强对流区的这一特点,计算时规定,若 > 0 ,则 $h_p = 0$,即只计算有上升运动时的 h_p 螺旋度。

通过分析发现 20 时 700 hPa 螺旋度中心与强对流区对应较好,其分布对这次强对流天气的落区有较好的指示意义。30 日 08 时 700 hPa 螺旋度分布图 (图 3a) 上,在甘南东部 (104 E 以东) 有一中心值为 $7 \times 10^{-8} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的高值区,气旋式涡度辐合区主要在甘南东部;30 日 14 时 700 hPa 螺旋度分布图上,高值区向西移动,中心位于甘南东南部;30 日 20 时 700 hPa 螺旋度分布图上 (图 3b),在甘南上空有一中心值为 $5 \times 10^{-8} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的高值区,同时在沿 103 E (图 3c) 和 35 N (图 3d) 的剖面图上,可以看到甘南上空 h_p 螺旋度的正值区主要在 700 ~ 600 hPa 之间,由于 h_p 螺旋度的正值区对应着正涡度区,说明在 30 日 20 时甘南上空 700 ~ 600 hPa 之间为气旋式涡度辐合区,存在较强的辐合上

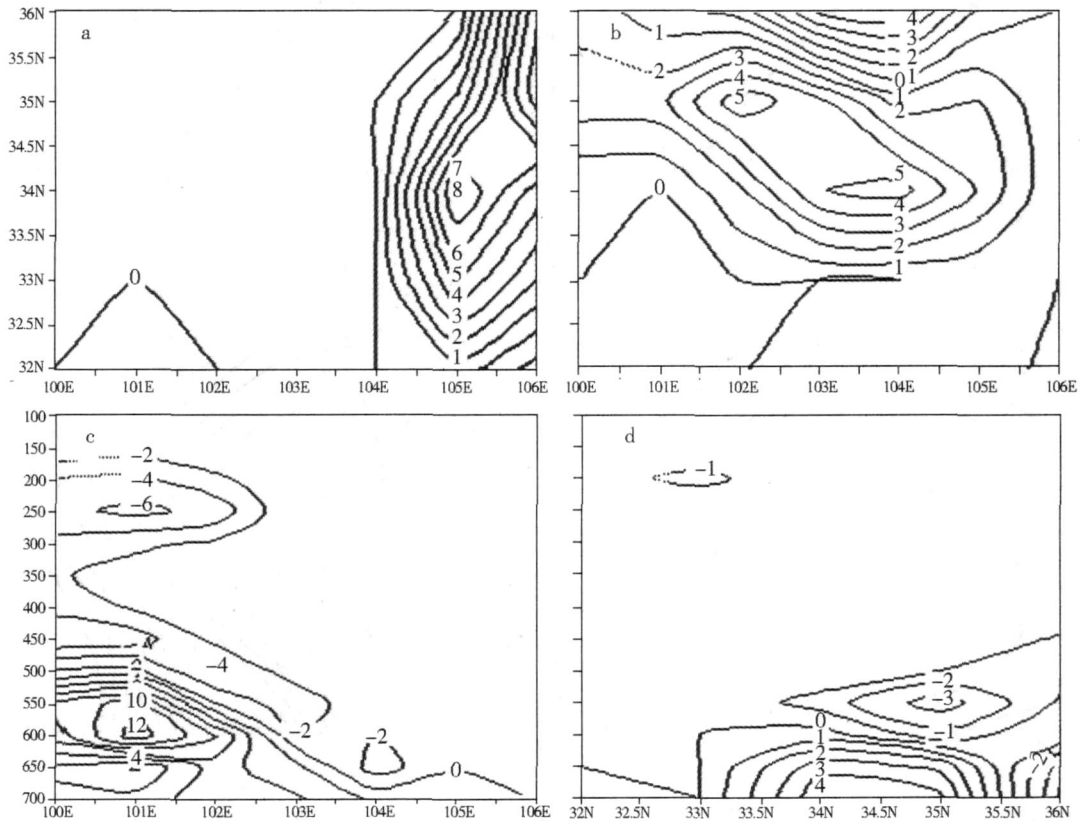


图 3 2006 年 8 月 30 日 700 hPa 螺旋度 (a: 08: 00, b: 20: 00) 及 20 时 700 ~ 100 hPa 螺旋度剖面图 (c: 沿 103 E, d: 沿 35 N)

Fig 3 The helicity fields of 700 hPa at 08: 00 (a) and 20: 00 (b) on August 30, 2006, the sections of helicity from 700 to 100 hPa along 103 E (c) and 35 N (d) on August 30, 2006

升区;与垂直速度相似, h_p 螺旋度也存在随高度升高向西倾斜的现象,大值中心在 600 ~ 550 hPa 之间,高层螺旋度正中心在强对流区西侧 2 ~ 3 个经距。

2.3 层结条件和能量条件

强对流天气的出现,要求在对流层中低层有明显的对流不稳定。同时要发展一个猛烈的强对流风暴,必须在对流层中低层积累大量的不稳定能量,对流不稳定的条件是假相当位温 (θ_{se}) 随高度减小。我们主要分析了层结特征和温度平流、 $\theta_{se}(500-700)$ 不稳定区分布及 700 hPa θ_{se} 的分布。

从合作 08 时 (图 4a) 和 20 时 (图 4b) 的 $T - \ln P$ 图上可以看到 08 时本地 700 hPa 上为偏南风, 500 hPa 以上为偏西风, 到 20 时地面和 700 hPa 上风向转为偏东风, 地面到 500 hPa 之间风向随高度强烈顺转, 300 ~ 200 hPa 之间风向随高度逆转, 形成低层暖平流、高层冷平流, 同时在 700 ~ 500 hPa 之间有强烈的风向切变, 形成了有利于强对流天气产生和

发展的层结条件。同时通过对 30 日 08 时到 20 时温度平流变化的分析, 发现从 08 时到 20 时低层暖平流有明显增强的趋势, 08 时到 14 时 700 hPa 上, 甘南附近为弱的暖平流, 强度为 $0 \sim 0.5 \times 10^{-6} / s$, 暖平流主要在 700 ~ 650 hPa 之间, 高层为冷平流; 在 20 时 700 hPa 上, 甘南附近的暖平流明显增强, 在甘南西北部暖平流强度达 $1 \times 10^{-6} / s$, 并出现了 $1.5 \times 10^{-6} / s$ 的暖平流中心, 同时暖平流的高度上升到 600 hPa, 根据前面的分析, 暖平流的加强与高原东部偏东气流的发展导致的强烈上升运动有密切关系, 同时低层暖平流造成 θ_{se} 增大, 形成位势不稳定。

为了分析这次强对流天气过程的位势不稳定特征, 计算了 500 hPa θ_{se} 和 700 hPa θ_{se} 的差值。从 $\theta_{se}(500-700)$ 不稳定区分布上, 发现这次强对流天气发生在强对流不稳定区域内。在 30 日 08 时的 $\theta_{se}(500-700)$ 图上, 不稳定区位于甘南西南部, 之后不稳定区向东扩展, 30 日 20 时的 $\theta_{se}(500-700)$ 图上, 甘南处

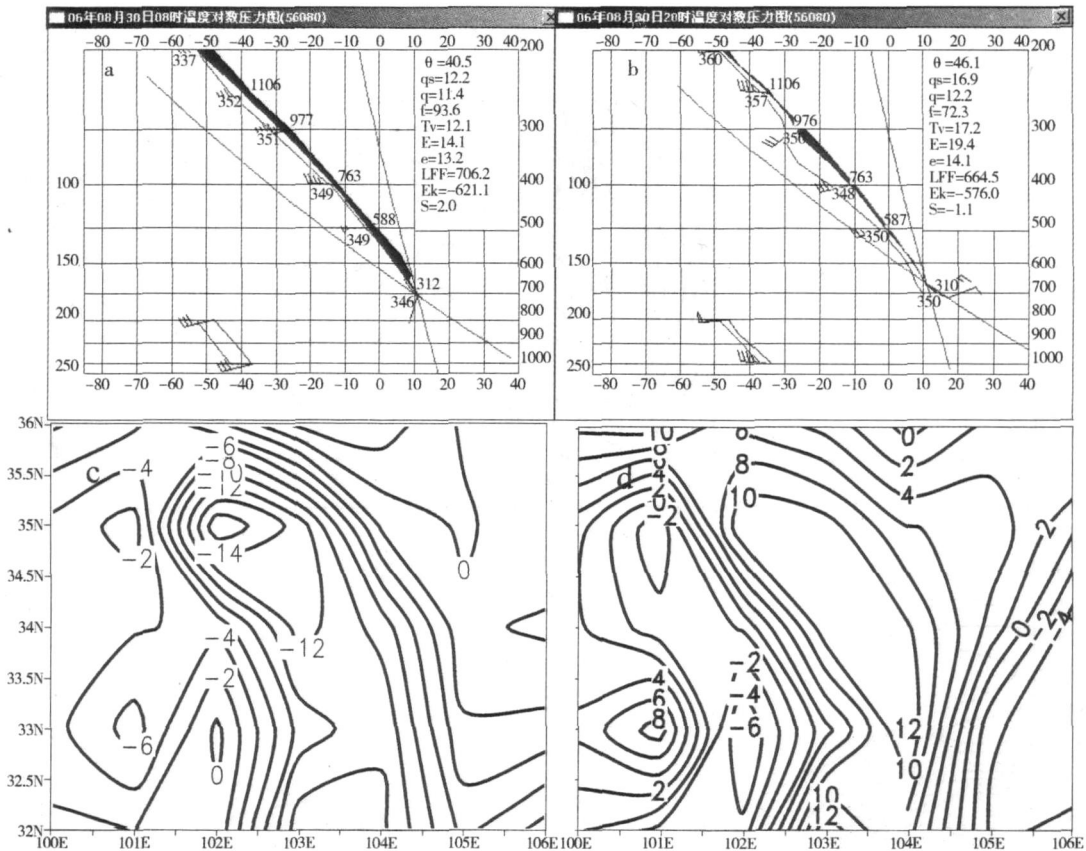


图 4 2006 年 8 月 30 日合作站 $T - \ln P$ 图 (a, 08: 00; b, 20: 00) 及 20 时 $\theta_{se}(500-700)$ 场 (c)、700 hPa $\theta_{se}(20:00-08:00)$ 场 (d)
 Fig 4 The diagrams of $T - \ln P$ at Heze station at 08: 00 (a) and 20: 00 (b), the departure of θ_{se} between 500 and 700 hPa at 20: 00 (c), the departure of θ_{se} on 700 hPa between 20: 00 and 08: 00 (d)

于强对流不稳定区中,中心值达 - 16 K(图 4c),位于甘南西北部;30日 20时 700 hPa ω 图上,甘南西北部和中部各有一个 364 K的高能中心,与 08时相比,甘南附近 700 hPa ω 上升了 10 K(图 4d),为强对流天气的发生和发展提供了充足的能量条件和不稳定条件。

2.4 云图演变

在 30日 14时以前,甘南上空为晴到少云区,高原中部(90~100 E, 32~35 N)有对流云团发展,从 15时开始高原上对流云团发展明显加强,范围向东扩大,并开始东移,这时在青海东南部玛多县附近有一对流云团发展,甘南西南部也有对流云团发展,之后玛多县附近的这块对流云团快速加强发展东移,到 19时移到甘南西北部,和碌曲附近的对流云团合并,形成一个中尺度对流云团,范围明显扩大,强度加强,之后缓慢向东移动,并向南压,造成甘南大范围的强对流天气。

江吉喜等^[7]通过对青藏高原及周边地区对流云和中尺度对流系统的分析,将青藏高原上对流云的强度按云顶 T_{BB} 值分为 4 级:即一般对流云(-32~-54),伴有雷暴的较强对流云(-54~-64),穿越对流层顶的强对流云(-64~-80)及

-80 的极强对流云。通过对造成这次强对流天气过程的对流云团云顶亮温变化的分析,发现 15 时之前高原上东移的云团仍是一般对流云,16时开始云团明显发展,云团中心云顶亮温 -54,17 时(图 5a)高原上对流云团继续东移并加强,形成穿越对流层顶的强对流云(云团中心云顶亮温 -64),同时甘南西南部的对流云团发展并移到碌曲南部,19时(图 5b)高原上对流云团移到甘南西北部和碌曲附近的对流云团合并,形成一个中尺度对流云团,形成极强对流云(云团中心云顶亮温 -80,并出现 -90 的闭合中心),20时(图 5c)对流云团进一步加强,逐渐东移南压,-80 范围进一步扩大,21时(图 5d)云团发展到最强阶段,-80 和 -90 范围明显扩大,碌曲出现强雷雨和冰雹,22时的云团强度与 21时相比变化不大,继续东移南压,卓尼、临潭、迭部相继出现大雨,之后此对流云团逐渐减弱并东移。

在分析中发现,这次强对流天气过程降水最强的区域并不是出现在云顶温度最低的合作、夏河一带,而是出现在位于云团东南部的碌曲、卓尼、临潭、迭部一带;对流云团移入位势不稳定区后,云团强烈发展,形成极强对流云:降水量最大的时段和冰雹出

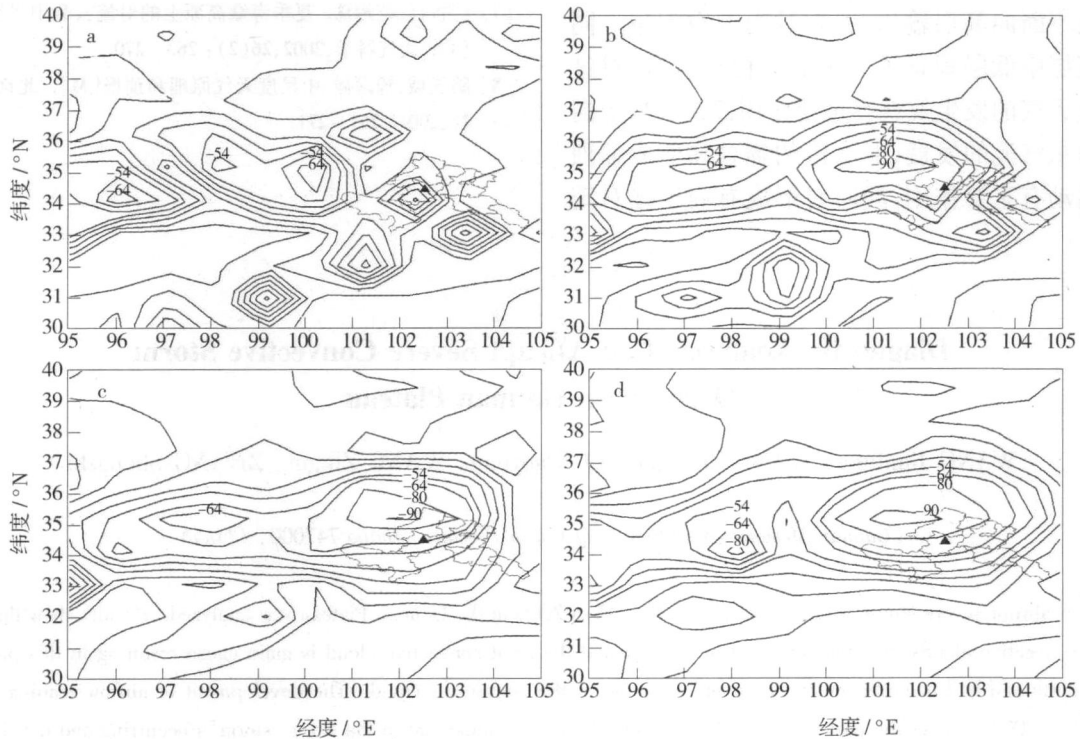


图 5 2006年 8月 30日 FY - 2C云顶亮温, 为碌曲县气象站所在位置 (a: 17: 00, b: 19: 00, c: 20: 00, d: 21: 00)
 Fig 5 The T_{BB} images of FY - 2C on August 30, 2006 (indicate the position of Luqu Weather Station, a for 17: 00, b for 19: 00, c for 20: 00, d for 21: 00, respectively)

现在强对流云团强烈发展的时期。碌曲县气象站雨量记录显示,这次强对流天气的主要降水出现在 30 日 20 时到 22 时,降水量最大的时段出现在 20 时到 21 时之间,冰雹出现在 20 时 26 分,说明这次强对流天气的形成与高原上对流云团和本地发展的对流云团合并后强烈发展有密切关系。对流云团的合并,使上升气流迅速增强,云体猛烈发展,对形成强对流和暴雨有重要作用。同时在合并过程中有大量的水汽和能量集中,造成对流云内浮力增加,从而推动了对流进一步发展^[8]。

3 小 结

(1)这次突发性强对流天气过程发生在副高东退过程中,由于北部冷空气南下与高原上西南气流在高原中部形成切变线,引导高原上对流云团东移与本地发展的对流云团合并加强造成这次强对流天气。

(2)从这次强对流天气过程中垂直速度和相对湿度度的变化可以看到甘南上空的水汽含量是随着垂直速度的加大逐渐增加的,上升运动的发展与低层高原东部偏东气流的发展密切相关,低层暖湿气流向西输送,由于地形抬升作用产生上升运动,造成低层的水汽不断向高层输送,并在甘南上空汇集。同时在对流层中低层积累了大量的不稳定能量,对这次强对流天气的发生发展有重要作用;700 hPa上高原东部偏东气流的发展,对水汽的辐合和形成强烈的上升运动有重要作用,同时对形成有利于强对流

天气的垂直环流也有重要作用。

(3)高原上对流云团和本地发展的对流云团合并后强烈发展,对流云团移入位势不稳定区后,形成极强对流云。强对流天气出现的区域并不是在云顶亮温最低的合作、夏河一带,而是出现在位于云团东南部的碌曲、卓尼、临潭、迭部一带;降水量最大的时段和冰雹出现在对流云团强烈发展的时期。

(4)700 hPa ω 高能中心、 $\omega_{(500-700)}$ 不稳定区、700 hPa h_p 螺旋度及 700 hPa 水汽通量散度的分布对这次强对流天气的落区有很好的指示意义。

参考文献:

- [1] 白肇辉,徐国昌,孙学筠,等.中国西北天气[M].北京:气象出版社,1991.202-357.
- [2] 《西北暴雨》编写组.西北暴雨[M].北京:气象出版社,1992.39-72.
- [3] 章东华.螺旋度-预报强风暴的风场参数[J].气象,1993,19(8):46-49.
- [4] 谢梦莉.江西“98.6”连续大暴雨过程的 ω 场特征[J].气象,1999,25(9):49-51.
- [5] 王淑静.螺旋度与区域暴雨落区[A].省地气象台短期预报岗位培训教材[M].北京:气象出版社,1998.121-123.
- [6] 刘健文,郭虎,李耀东,等.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社,2005.123-125.
- [7] 江吉喜,范梅珠.夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统[J].大气科学,2002,26(2):263-270.
- [8] 陆汉城,杨国祥.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社,2004.267-271.

Diagnostic Analysis of an Abrupt Severe Convective Storm Occured on Gannan Plateau

WANG Jianbing, WANG Zhenguo, LIXiaoyuan, WANG Zhigui, ZHANG Shengzhi

(Gannan Meteorological Bureau of Gansu Province, Hezuo 747000, China)

Abstract: An abrupt severe storm occurred on August 30 - 31 of 2006 in the Gannan Plateau was analyzed. Results show that the combination of convective clouds from the southeast of Qinghai and the local convective cloud is main cause resulting in this process, and the severe storm and hail occurred on the front of right side of the convective cloud. The development of airflow leaning east at the height of 600 - 700 hPa over the eastern part of Gannan plateau is very important to the severe storm's occurring and developing. The distributions of ω high energy center at 700 hPa level, ω departure between 500 hPa and 700 hPa, the helicity and vapor flux divergence fields at 700 hPa level are meaningful to estimate the occurring region of this severe storm.

Key words: severe storm; cause of formation; diagnostic analysis