刘欣, 王咏青, 胡志群, 等. 2019. 青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 611–625. LIU Xin, WANG Yongqing, HU Zhiqun, et al. 2019. Diagnostic Analysis and Radar Echo Features of a Hailstorm Severe Convective Weather Process over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research, XX(XX): 611–625. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18127

青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析

刘欣[1,2] 王咏青[1,2] 胡志群[3] 周玉淑[4,5]

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院，南京 210044
2 南京大气科学联合研究中心，南京 210009
3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081
4 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室，北京 100029
5 高原大气与环境四川省重点实验室，成都 610225

摘 要 利用青藏高原第三次科学实验的C波段双偏振雷达（C-POL）的观测资料、ERA-Interim 0.125°（纬度）×0.125°（经度）气象再分析资料、常规气象探空资料，对2014年7月30日午后发生在西藏那曲地区的冰雹强对流天气过程进行了天气诊断及雷达回波特征分析。结果表明：1）此次冰雹强对流过程发生在有切变线伴随的高原低涡东移过程中，低涡尾部前倾的切变线为这次冰雹的发生提供了动力、水汽条件。2）强对流天气的水汽输送主要来自从孟加拉湾、印度及尼泊尔翻越喜马拉雅山脉的水汽，强对流发生前水汽输送显著增加，低层水汽集中在400 hPa以下，有明显的辐合及垂直输送。3）那曲400 hPa以下为假相当位温随高度递减区，也是水平辐合及垂直上升运动的重合区，有明显的对流不稳定能量集聚及动力抬升条件。4）雷达回波图上可看到，此次强对流天气主要由局地新生的多个中γ尺度孤立对流单体造成，其移动路径与切变线前西南气流一致。大部分单体水平尺度不大，生命史短，但仍有部分单体强度大，生命史较长。局地气流辐合扰动会导致新的单体产生，单体的发生、发展及维持离不开低层气流辐合提供的动力条件。5）在距离高度显示图上表现出了弱单体雹云特征，雹云云顶伸展至16 km，高于夏季平原地区普遍对流云高度，但未突破对流层顶，0℃层远低于平原地区，为深厚强对流降水；强降水中心位于云团下部，即有降雹也有降水，降雹以霰粒为主；垂直方向存在强烈的入流和上升气流，悬挂回波出现在入流上升气流之上，中层辐合区的气流下沉区对应降雹区；中层辐合区与上层的高空辐散区配合导致对流风暴的垂直增长和强烈发展。

关键词 青藏高原 冰雹强对流天气 对流单体 雷达回波特征

文章编号 1006-9585(2019)05-0611-15 **中图分类号** P458.1+21.2 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18127

Diagnostic Analysis and Radar Echo Features of a Hailstorm Severe Convective Weather Process over the Tibetan Plateau

LIU Xin[1,2], WANG Yongqing[1,2], HU Zhiqun[3], and ZHOU Yushu[4,5]

收稿日期 2018-09-19；**网络预出版日期** 2019-05-09

作者简介 刘欣，女，1993年出生，硕士研究生，主要从事中小尺度气象学研究。E-mail: 406704355@qq.com

通讯作者 王咏青，E-mail: yongqing@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划2018YFC1505705，国家自然科学基金41530427、41875070、41575040、41375038、41661144024，北极阁开放研究基金—南京大气科学联合研究中心NJCAR2018MS02，云南省重点研发计划—社会发展项目2018BC007，高原大气与环境四川省重点实验室开放课题PAEKL-2017-K2

Funded by National Key Research and Development Project (Grant 2018YFC1505705), National Natural Science Foundation of China (Grants 41530427, 41875070, 41575040, 41375038, and 41661144024), the Beijige Open Research Fund for Nanjing Joint Center of Atmospheric Research (Grant NJCAR2018MS02), the Science and Technology Program of Yunnan (Grant 2018BC007), the Opening Project in Sichuan Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment (Grant PAEKL-2017-K2)

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education/ School of Atmospheric Sciences*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

2 *Nanjing Joint Center of Atmospheric Research*, *Nanjing* 210009

3 *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081

4 *Key Laboratory of Cloud–precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

5 *Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610225

Abstract Through the use of C-band dual-polarization radar datasets from the Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment, ERA-Interim 0.125° (latitude) ×0.125° (longitude) reanalysis data, and conventional meteorological radiosonde data, the diagnostic analysis and radar echo feature extraction of a hailstorm severe convective weather process in the Naqu area of Tibet on the afternoon of 30 Jul 2014 are conducted. Results show that: 1) The hailstorm severe convective weather process occurs during the eastward movement of a plateau vortex accompanied by shear lines. The forward-tilting shear lines at the rear of the vortex provide energy and water vapor for this process. 2) The water vapor provided for the severe convective weather mainly comes from the Bay of Bengal, India, and Nepal, which strengthens significantly before the severe convective weather. The water vapor in the lower layer concentrates below 400 hPa, with obvious convergence and upward transportation. 3) Under the obvious convective instability, energy accumulation, and dynamic uplift conditions below 400 hPa in Naqu, the overlap area of the pseudo-equivalent potential temperature decreases with the height, horizontal convergence, and upward movement. 4) The radar echo images show that the severe convective weather is obviously local and is mainly caused by multiple γ mesoscale isolated convection cells, the movement path of which is consistent with the southwest airflow in front of shear lines. Most of the cells have small horizontal scales and short life, whereas some cells have large horizontal scales and long life. Local airflow convergence may cause the production of new cells, and the occurrence, development, and maintenance of cells depend on the low-level airflow convergence to provide dynamic conditions. 5) The range height indicator shows the characteristics of a weak hail cloud, with the top reaching approximately 16 km but not breaking through the top of the troposphere, which is higher than the general convective clouds in plain areas, and the 0°C layer being lower than that in plain areas. The cloud indicates deep strong convective precipitation, and the precipitation center is located at the bottom of the cloud, including precipitation and hail dominated by radon particles. Strong inflows and updrafts occur in the vertical direction. The suspended echoes appear above the inflowing updrafts, with the airflow sinking zone below the middle-level convergence zone corresponding to the hail zone. The combination of the middle-level convergence and high-level divergence leads to the upward growth and strong development of convective storms.

Keywords the Tibetan Plateau, Hailstorm severe convective weather, Convection cell, Radar echo feature

1 引言

青藏高原素有“世界屋脊”之称，因其地形特殊，对大气环流有特殊的热力和动力的强迫作用（Wu et al., 2015；李锐等，2017）。乔明全和张雅高（1994）指出由于受到热力和动力作用，青藏高原是中国对流最旺盛的地区之一。局地的热力、动力特征配合高原特有的高原低涡、切变线以及高原低频振荡，在一定的大尺度环流背景下，使得高原对流活动十分活跃，并且一些冰雹等灾害性天气的发生频率远远高于同纬度的平原地区。Fu et al.（2006）运用TRMM卫星PR逐日逐轨资料揭示了高原降水云垂直结构的塔状特点，发现高原降水云团多呈孤立块状分布，且降雨事件多为对流活动；刘黎平等（2015）指出青藏高原上地面加热强烈，因此对流抑制因素在中午以后会迅速减小，积云对流更容易触发，出现频率比平原地区更高；而由于青藏高原水汽含量较低，因此对流有效位能（convective available potential energy, CAPE）通常较小，导致青藏高原上的对流云顶和强回波顶离地面都较低，对流系统的水平尺度也较小。因此，高原的对流天气及对流云有其独有特点，和平原地区

有所不同。

冰雹通常是在有利的大尺度天气形势背景下，由中小尺度系统直接产生的（程麟生和冯伍虎，2002；吕胜辉等，2005；田珊儒等，2015），其破坏力大、局地性强，往往造成巨大的经济和生命财产损失。但由于时空尺度小，突发性强，其预报和预警一直是天气业务中的难点。由于高原复杂的地形和恶劣的自然条件，高原地区的气象观测站一直比较稀疏，大多数对青藏高原的冰雹强对流天气的研究工作都是通过数值模拟、卫星遥感资料或气候统计进行，张杰等（2004a，2004b）分析了西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型并利用NOAA卫星云图分析了一次冰雹云演变过程，得到了一些降雹的云图特征。张核真和假拉（2007）通过统计得到西藏各地冰雹具有季节性强、随季节变化迅速、雹日高度集中、以小冰雹为主和降雹持续时间短等特点。同时还有一些学者利用数值模拟对冰雹云的微物理过程及形成机理进行研究（康凤琴等，2004a，2004b；胡朝霞等，2007）。目前，利用主动遥感的地基雷达观测数据对高原冰雹强对流天气的中小尺度特征进行的研究还较为缺乏。

在20世纪70年代和90年代，我国曾组织过两次对青藏高原的大型野外科学实验（陶诗言等，1984；陈联寿和徐祥德，1998），取得了非常重要的成果。对高原地区的环流特征、天气系统、热源性质、高原季风、南亚高压等进行了较为深入的研究，揭示了不少新的事实，为青藏高原进一步的天气气候研究奠定了重要的基础。第三次青藏科学实验项目组在2014年夏季于西藏那曲开展了加密综合观测，获得了非常有价值的外场实验第一手数据，其中双偏振雷达时空分辨率高，能直观准确地提供有关对流单体、飑线等中小尺度位置、强度、大小、结构以及风场等的信息。各地气象工作者也曾利用雷达回波特征分析和总结了多地冰雹天气的发生发展特点，取得了很好的效果（张腾飞等，2006；廖玉芳等，2006；胡金磊等，2014）。因此，本文将利用2014年夏季在青藏高原那曲开展的野外观测实验的C波段双偏振雷达数据、ERA-Interim气象再分析资料（Dee et al.，2011）及常规探空资料对2014年7月30日发生在那曲地区的冰雹强对流天气过程进行诊断分析和雷达回波特征分析，有利于加深对高原强对流天气的认识。

2 资料简介

那曲地区位于青藏高原中部，地处唐古拉山脉、念青唐古拉山脉和冈底斯山脉之间，整个地形呈西高东低倾斜，海拔高度均在4450 m以上，是气候条件最恶劣的地区之一。从C波段双偏振雷达（观测地点：31.37°N，91.90°E，如图1所示，以下称那曲）的观测记录可知，2014年夏季6月29日至8月10日，该地强对流天气频发，共发生了14次雷雨天气，其中包括9次冰雹天气。7月30日该

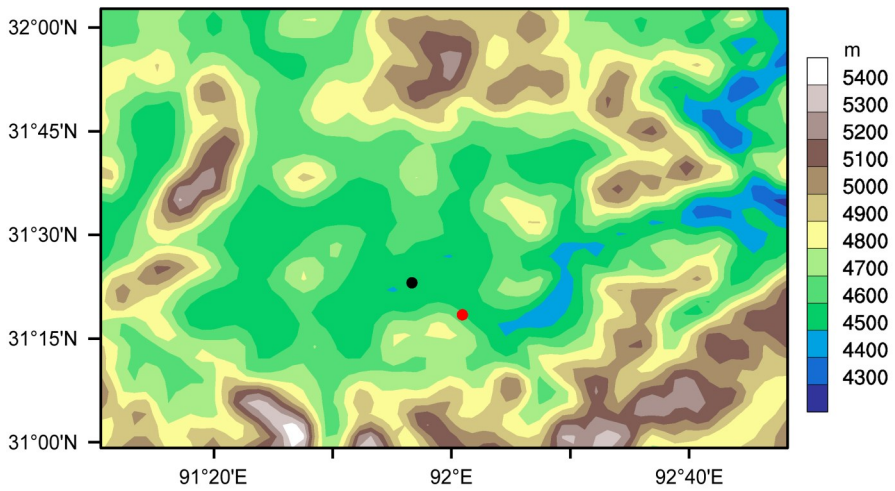

图1 C波段双偏振雷达的观测点（黑色实心点）及那曲地区气象局观测站（红色实心点）的位置（填色为高度）

Fig. 1 Locations of the C-band dual-polarization radar (black solid point) and Naqu Meteorological Bureau Observation Station (red solid point) (shadings are altitude)

地发生了一次明显的降水及降雹过程，降雹主要以霰粒为主。

本文中使用的数据每日4次（北京时间00:00、06:00、12:00、18:00，下同）水平分辨率为0.125°（纬度）×0.125°（经度）的EAR-Interim气象再分析资料、那曲地区气象局观测站（31.29°N，92.04°E，如图1所示）探空资料及参加第三次青藏高原科学考察试验的中国气象科学研究院的可移式C波段双偏振雷达（天线高度4509 m）的观测数据，雷达数据经过了衰减订正、去除地物杂波、速度退模糊等一系列质量控制（杜牧云等，2011，2013；胡志群等，2014）。

3 环流形势特征

从2014年7月30日500 hPa风场分布（图2a）可以看到，中心位置位于（34°N，94°E）的低涡不断东移，并且有明显的湿度与低涡系统相配合。在85°E附近存在一明显的切变线，但该系统并非影响那曲强对流天气的系统，因此对其不进行讨论。在高原低涡东移过程中，其尾部配合有切变线，呈现出典型的低涡、切变线伴随东移的形态（李国平等，2017）。切变线不断靠近那曲，那曲始

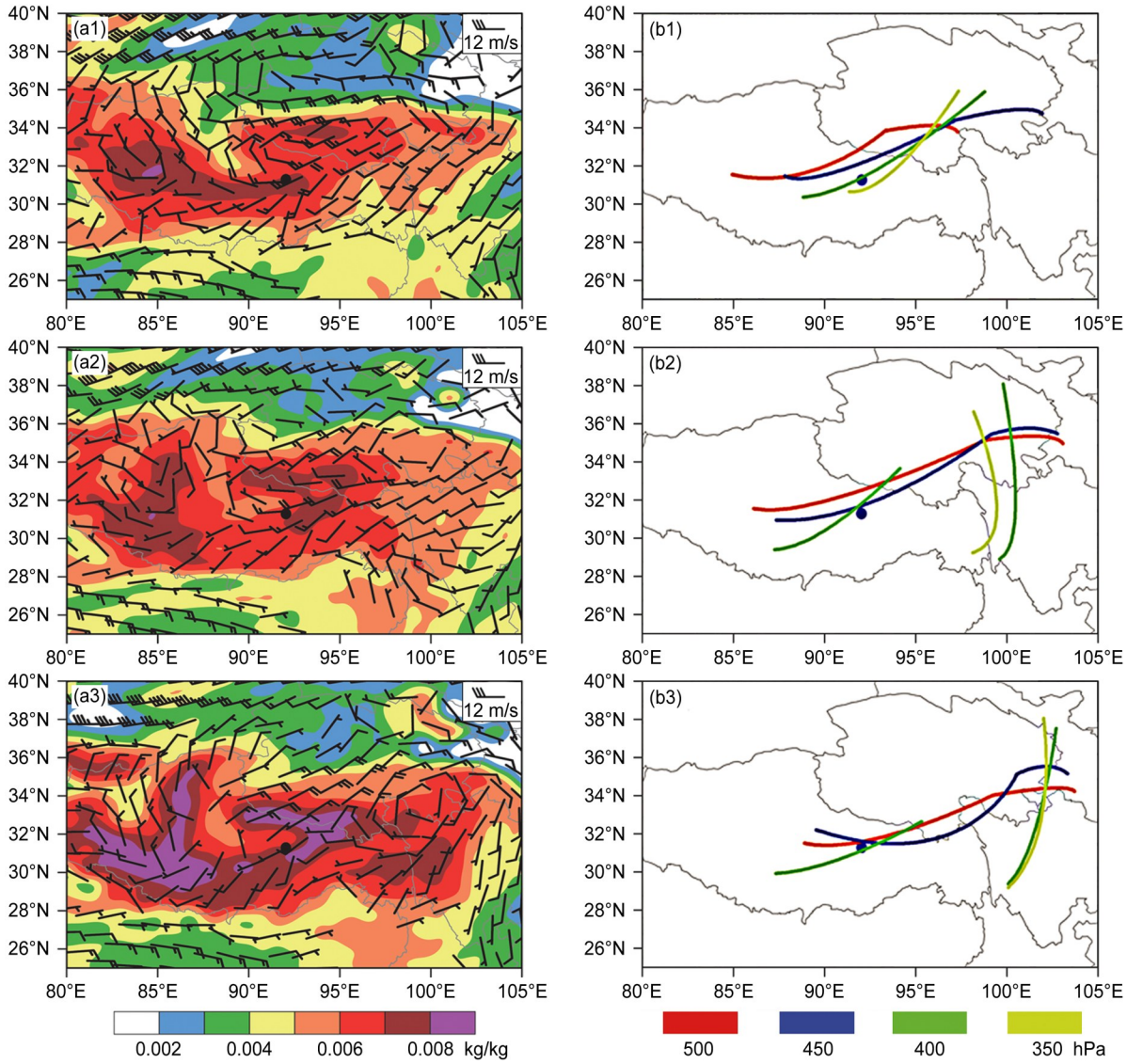

图2 2014年7月30日（a1、b1）08:00、（a2、b2）14:00、（a3、b3）20:00 500 hPa水平风场（风羽）及比湿（填色）（左列）与各层次切变线（右列）。黑色圆点代表那曲

Fig. 2 500-hPa horizontal wind (barbs) and specific humidity (shadings) (left panel) and shear lines on each level (right panel) at (a1, b1) 0800 LST, (a2, b2) 1400 LST, and (a3, b3) 2000 LST on 30 Jul 2014. The black solid dot represents Naqu

终处于高比湿区，有充足的水汽条件。

分析各层的环流形势可知：青藏高原上空300 hPa以上为反气旋性环流，受南亚高压控制，那曲位于高压南侧高空急流的右侧；300～400 hPa有明显的切变线系统，400 hPa以下有完整的中尺度气旋性涡旋（图略），涡旋在500 hPa上最为明显（图2a），符合叶笃正和高由禧（1979）、李国平（2007）描述的高原低涡特征。从高低空切变线配置图（图2b）可以看到，08:00那曲处于切变线前的西南暖湿气流中，其上空350 hPa至地面切变线前倾，切变线均呈东北—西南走向，400 hPa以下有完整的闭合气旋性环流；随后系统随西风带东移，14:00，350 hPa切变线移至99°E附近，400 hPa切变线断裂成两段，前一段移至100°E附近，后一段位置少动，450 hPa和500 hPa上低涡东移，切变线南压，那曲切变线前倾加剧；20:00，350 hPa和400 hPa切变线东移至103°E附近，低涡继续东移，以下各层次的切变线继续南压，在那曲附近各层次切变线接近重合。

根据当日观测记录可知，7月30日14:50左右，当地开始有小到中雨并伴有冰雹。由此可判断，此次冰雹强对流天气过程发生在典型的有切变线伴随的高原低涡东移过程中，低涡尾部的切变线呈现前倾且不断南压，使得高层切变线后的干冷空气置于低层切变线前的暖湿空气之上，垂直方向上的风切变加强，增加了那曲当地气柱的对流不稳定，有利于此次冰雹强对流天气的触发和发展。

4 物理量诊断分析

4.1 水汽输送

从7月30日的水汽输送（图3）来看，从孟加拉湾、印度及尼泊尔翻越喜马拉雅山脉向北输送到青藏高原的水汽为那曲冰雹天气的发生提供了所需的水汽条件。天气系统和水汽输送配合较好，高原低涡周围有较大的水汽通量，切变线处水汽通量相对较小，高原低涡内水汽通量几乎为0；但在低涡的切变线处及前进方向的东南侧有较强的水汽通量散度负中心，低涡处水汽通量散度接近0，而在低涡后部水汽通量散度为正，证明在切变线处和前进方向的东南侧才有水汽的辐合抬升，这与李山山和李国平（2017）的发现类似，水汽辐合带基本位于切变线，风场分布及切变线形成对水汽辐合作用尤为重要。

从整层大气水汽通量（图3a）上看，08:00孟加拉湾向青藏高原水汽的输送还较弱，那曲处于切变线前的水汽通量大值区，水汽通量为300～400 kg m^{-1} s^{-1}；14:00可以明显看到孟加拉湾向青藏高原的水汽输送增强，那曲依旧处于水汽通量大值区，区间仍在300～400 kg m^{-1} s^{-1}，且该水汽通量大值区面积较08:00明显增大，证明在强对流天气发生前，水汽输送明显增强；而20:00孟加拉湾西侧及印度向高原输送的水汽进一步增强，但主要集中在高原西南侧新生成的低涡处，那曲的水汽通量明显减小，水汽通量散度也趋近为0，无明显的水汽辐合，此时强对流天气也已结束。从水汽通量散度（图3b）来看，那曲全天都处于负值区，有水汽的辐合上升，但仅在有较大的水汽通量时才发生了强对流天气，这说明对强对流天气而言，较强的水汽输送和水汽辐合缺一不可。

为进一步研究发生冰雹强对流天气前水汽在垂直方向的分布及运动，沿图3a2 14:00过那曲且与水汽通量输送方向相垂直的黑实线做剖面（见图4），可以看到在切变线前（91.5°E以东）有明显的垂直速度负值区，结合14:00整层大气水平水汽通量及水汽通量散度（图3），可以判断在切变线前水汽由西北和东南两侧向中间辐合，沿黑实线方向辐合区约在91.5°E～93°E附近，在图4中可看到在低层400 hPa以下到近地面处集聚了充沛的水汽，相对湿度饱和，高层200 hPa附近也有湿度饱和，垂直方向有水汽上升，在水汽上升气柱两侧有水汽下沉区，则可判断在高层存在有水汽的辐散，即水汽在低层产生辐合上升后在高层辐散。而那曲（91.90°E）则正好处于水汽上升区，气柱中湿度很大。同时在93.6°E附近也存在一个明显的垂直速度负值区，垂直上升速度超过1.9×10^{-3} hPa s^{-1}，速度极值出现在平原与山脉交界处，即雅鲁藏布江—布拉马普特拉河河谷地区，这与较早前期一些学者分析得到的水汽输送通道相一致（徐淑英和殷延珍，1984），即水汽向青藏高原输送时翻越山坡有明显的垂直上升运动。

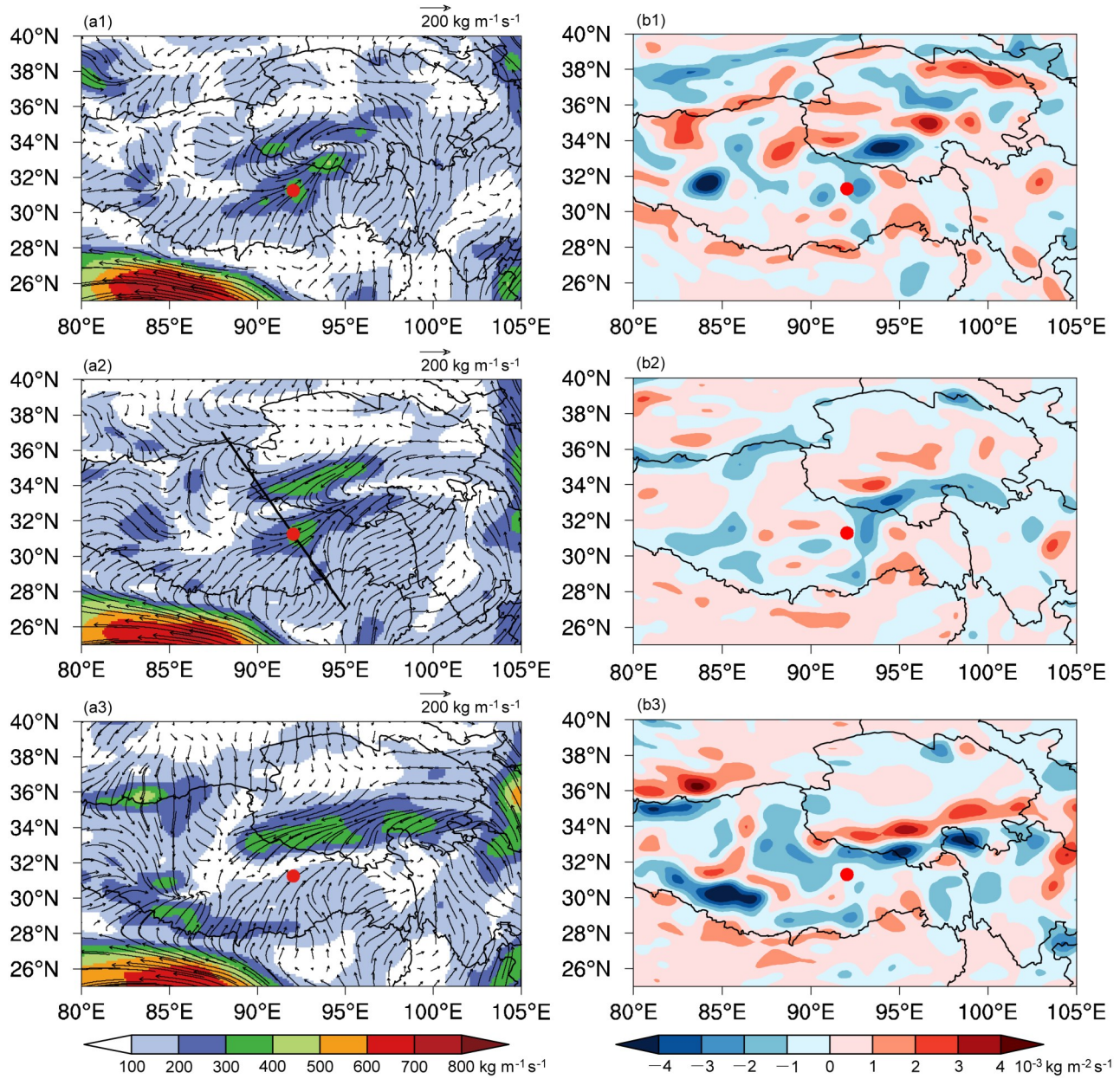

图3 2014年7月30日（a1、b1）08:00、（a2、b2）14:00、（a3、b3）20:00整层大气水汽通量（左列，阴影及矢量）与水汽通量散度（右列，阴影）。红色圆点代表那曲

Fig. 3 Integrated atmospheric moisture flux (left panel, shadings and vectors) and moisture flux divergence (right panel, shadings) at (a1, b1) 0800 LST, (a2, b2) 1400 LST, and (a3, b3) 2000 LST on 30 Jul 2014. The red solid dot represents Naqu

4.2 动力条件

30日14:00，沿31.25°N作垂直速度及散度剖面，从垂直速度剖面（图5a）上可见，在切变线前的91.5°E～94°E附近区域有明显的垂直速度负值区，垂直上升运动最大值位于500～400 hPa之间，垂直速度负值区一直伸展到对流层上层，在垂直速度负值区的东西两侧有明显的速度正值区，空气在此处下沉，形成了明显的垂直环流。那曲（91.90°E）位于上升运动区域内，速度负值区（上升区）一直伸展到400 hPa附近。

在散度剖面（图5b）上，在切变线前的低层有与上升区相对应的散度负值区（水平辐合区），那曲位于负值区内，存在水平风速的辐合，散度负值区伸展至400 hPa附近，400～300 hPa之间有明显的正值区，此为辐散层。速度负值区与散度负值区有良好的对应关系，那曲在

400 hPa 以下存在明显的辐合上升运动，这样低层辐合、高空辐散的配置有利于强对流天气的发生发展。

4.3　温湿参量分析

假相当位温 θ_{se} 作为综合表征温度和湿度的参数，其高低值一定程度代表了湿静力能量的高低能区，θ_{se} 场中等值线密集区又称为能力锋区（王茂书和张勇，2011）。从冰雹天气发生前 14:00 500 hPa 上的假相当位温分布图（图 6a）可以看出，那曲处于 θ_{se} 等值线的密集区，即高能舌中，其 θ_{se} 值达到 76 °C 以上。

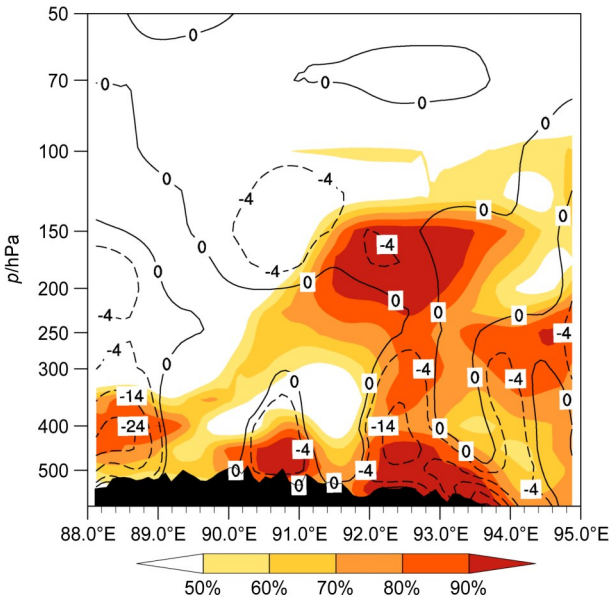

图 4　沿图 3a 中黑实线的相对湿度（灰色阴影）及垂直速度（等值线，单位：10^{-4} hPa s^{-1}）剖面（黑色阴影为地形）

Fig. 4　Cross sections of relative humidity (gray shadings) and vertical velocity (contours, units: 10^{-4} hPa s^{-1}) along the black solid line in Fig. 3a (black shadow represents the terrain)

强对流天气的发生、发展与大气稳定度密切相关，往往出现在对流不稳定的层结中，$\partial\theta_{se}/\partial p>0$，大气不稳定；$\partial\theta_{se}/\partial p<0$，大气稳定（张腾飞等，2006）。沿 31.25°N 作假相当位温（θ_{se}）的剖面，从其剖面图（图 6b）上可以看出，高空切变线附近 86.5°E～92.5°E 之间，90°E 上空 400 hPa 处存在一个明显的低值中心，400 hPa 以下，θ_{se} 随高度减小，$\partial\theta_{se}/\partial p>0$，代表该区域范围存在对流不稳定，在 400 hPa 以上，θ_{se} 随高度增加，高层存在对流稳定。那曲（91.90°E）处于高能舌中，其低层存在明显对流不稳定，有利于强对流天气的发生发展。

值得注意的是，综合垂直速度、散度剖面（图 5）和假相当位温剖面（图 6b）分析可知道，那曲（91.90°E）400 hPa 以下低层正好处于假相当位温随高度递减区，垂直速度负值及散度负值的重合区，因此低层有明显的对流不稳定层结、对流不稳定能量集聚及动力抬升条件，具备了发生强对流天气的层结特征。

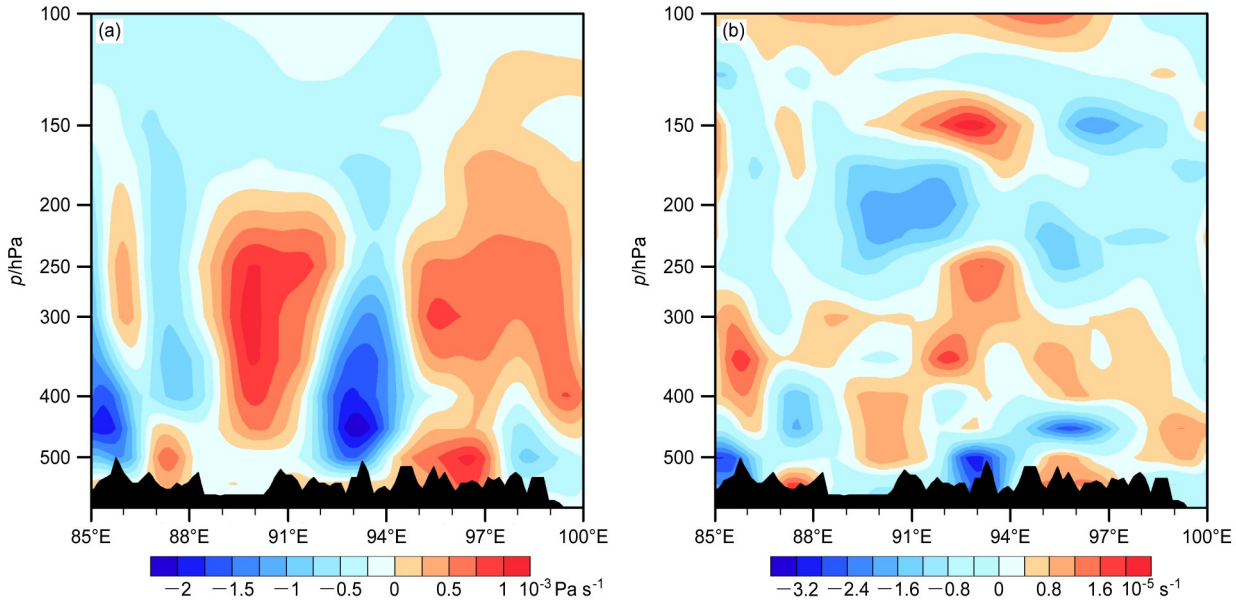

图 5　2014 年 7 月 30 日 14:00 沿 31.25°N 的（a）垂直速度和（b）散度剖面（黑色阴影代表地形）

Fig. 5　Cross sections of (a) vertical velocity and (b) divergence at 1400 LST on 30 Jul 2014 (black shadow represents the terrain)

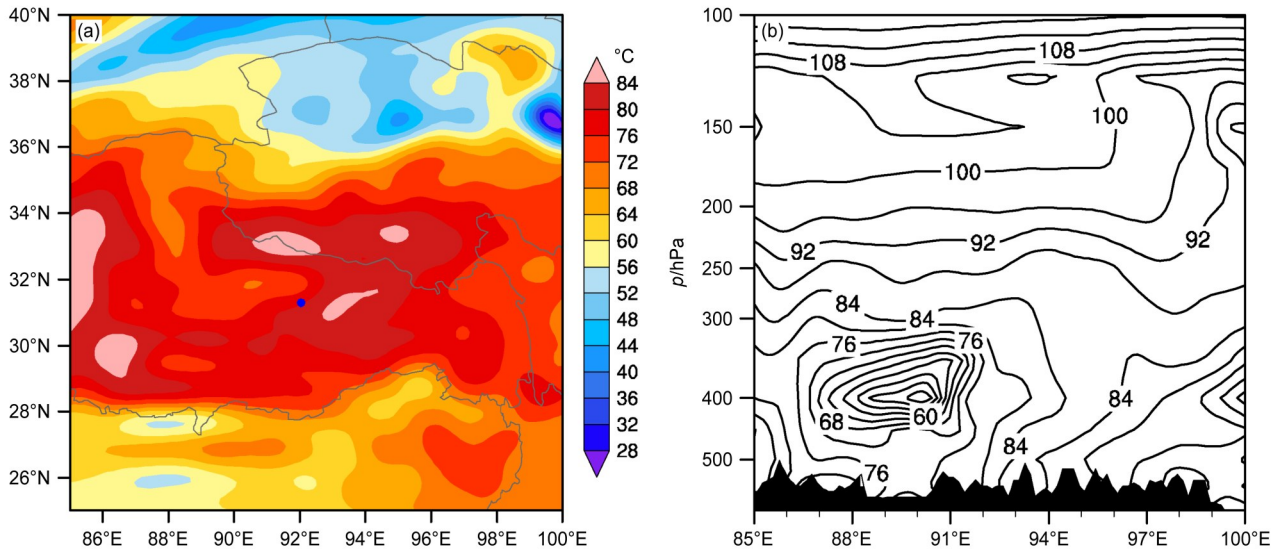

图6 2014年7月30日14:00（a）500 hPa假相当位温分布（蓝色圆点代表那曲）及（b）沿31.25°N的假相当位温剖面（单位：°C）

Fig. 6 (a) Pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}) distribution at 500 hPa (blue solid dot represents Naqu) and (b) cross section of θ_{se} along 31.25°N θ_{se} at 1400 LST on 30 Jul 2014 (units: °C)

5 冰雹的雷达回波特征

以上分析可知，强对流天气的发生具备了有利的环流背景和有利的温湿及不稳定能量条件。雷达产品可以直观地反映雹云发展演变以及雹云中气流的水平和垂直结构，便于对中小尺度对流系统的组织结构特征进行分析（尉英华等，2018）。因此，本小节将利用雷达资料进一步对强对流冰雹天气的一些中小尺度特征进行分析。

5.1 整体回波强度的演变特征

由图1可知，观测点周围有众多地形阻挡，因此雷达仰角为0.5°的整体回波强度（PPI）资料存在许多地物回波（图7a）。从7月30日14:31至17:29的雷达回波图像（图7）上可以看到有众多强度超过45 dB*Z*的强回波，回波主要从西南向东北方向移动，证明此时整个雷达观测区域位于切变线前，受切变线前西南气流影响，回波移动方向与环境风场有关。14:31（图7b）雷达的东南方向10 km处有回波A发展加强，在西侧有一处强回波B，回波强度超过60 dB*Z*；西北45 km处有一强回波C，强度超过45 dB*Z*；西南方向分别有强回波D和初生的回波E。由观测记录可知，雷达观测点于14:50降落冰雹，即雷达西侧的强回波B移至本站正上方，因此在14:59（图7c），由于雷达观测角度限制，强回波B并未显示；而此时，A回波发展旺盛，强度超55 dB*Z*；强回波C和D已明显减弱；回波E强度明显增强，面积扩大，向东北方向移动；15:27（图7d），回波A和B均已明显减弱向东北方向移动，强回波从发展到消亡持续时间小于1 h，水平半径仅为几公里，为中γ尺度对流单体；同时回波C几乎消亡殆尽，在其南侧，不到0.5 h的时间内新生了回波F，且强度超55 dB*Z*，依旧为中γ尺度对流单体；回波D强度明显减弱，演变为降水回波；回波E在向东北移动过程中不断发展加强，回波面积扩大，中心强度达55 dB*Z*，同时在其东北侧10 km左右又新生了回波G，并且加强发展。16:00（图7e）回波F已经明显减弱，其发展到减弱持续时间也小于1 h；而后又有众多的回波H、I、J、K在短时间内不断新生并减弱消亡，但单体E维持时间较长，直至17:29（图7h）强对流天气过程基本结束。

此次过程由局地新生的众多中γ尺度孤立对流系统造成，雷达回波图像清晰地再现了此次强对流冰雹天气过程。各个雷暴单体水平尺度仅几公里至十几公里，对流单体受环境气流影响，主要从西南向东北移动，大部分在原地新生后移动较短距离便很快消亡。单体强度普遍大于45 dB*Z*，最强的可达到60 dB*Z*。单体强度发展较强，范围较大时，则生命史相对较长，可＞1 h；单体强度相对较弱，范围较小时，则生命史＜1 h。

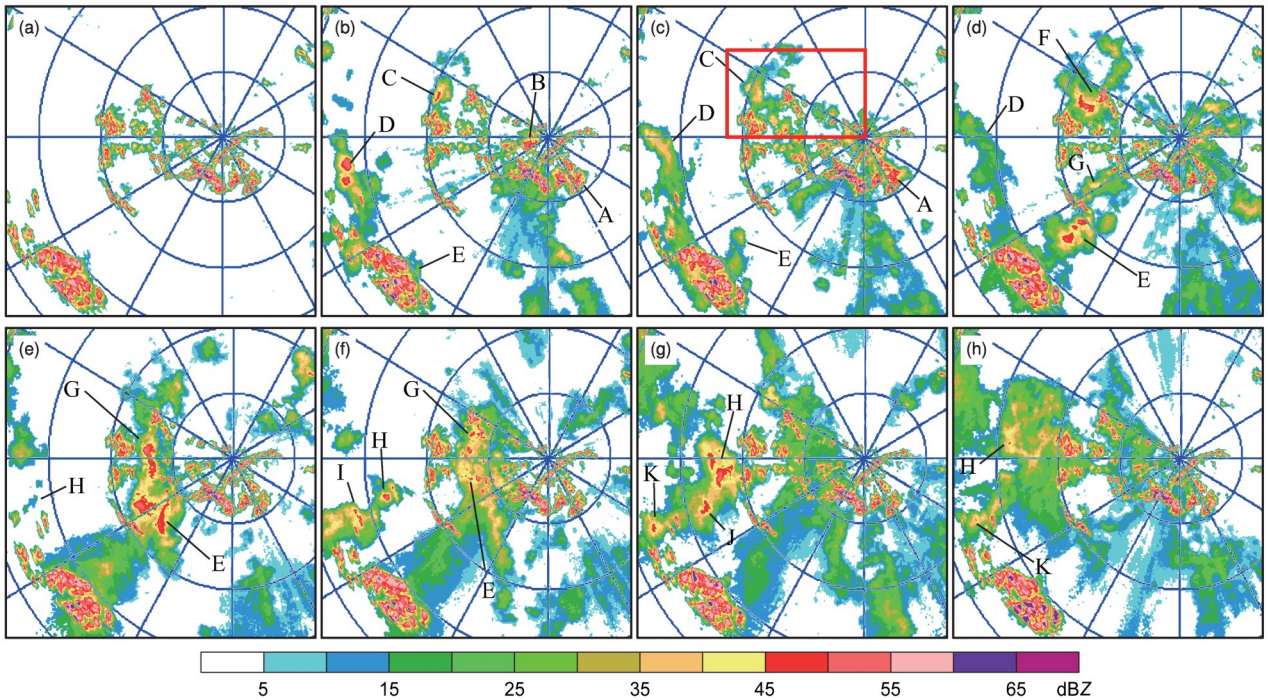

图7　C波段双偏振雷达0.5°仰角（a）地物回波及（b）14:31、（c）14:59、（d）15:27、（e）16:00、（f）16:29、（g）17:01、（h）17:29反射率因子。距离圈为15 km（下同）

Fig. 7　(a) Ground clutter and reflectivity factor at (b) 1431 LST, (c) 1459 LST, (d) 1527 LST, (e) 1600 LST, (f) 1629 LST, (e) 1701 LST, and (f) 1729 LST at the 0.5° elevation angle from the C-band dual-polarization radar. The interval between circles is 15 km (similarly hereinafter)

此次过程具有前人（郄秀书和Toumi，2003；唐佳芳，2005；张翠华等，2005；金晓中和贡觉顿珠，2007）指出的高原冰雹天气特征：即出现在夏季，又出现在午后，以局地性冰雹为主，并非大范围系统性冰雹过程，冰雹以小雹为主，直径一般＜5 mm，每次降雹持续时间大多在10 min以内，但也发现此次过程中部分强雷暴云生命史是较长的，超过1 h，但其在速度图上并未呈现持久深厚的中气旋特征，未达到超级单体强度。

5.2　对流单体的演变特征分析

为进一步研究此次强对流天气过程中孤立对流单体的生消特点，选取图7c中红色矩形框，对14:59至16:00期间强回波C和F的生消过程进行分析。图8展示了该区域内0.5°度仰角下的回波强度及径向速度，并单独展示了矩形框中的地物回波（图8a）以便于区分其和气象回波。对于回波C，在14:59（图8b），其有较强的中心点，中心强度超过45 dB*Z*，其在相应的速度径向图（图8b1）上表现为绿色区域，无明显的辐合或辐散，因此低层没有动力作用支持，回波将不断减弱；15:10（图8c），回波C整体减弱。对于回波F，14:59其为一个较弱回波，在相应的速度场上，回波F靠近雷达一侧有一个绿色和红色的交接（图中黑圈），有速度辐合，回波F将发展；15:10，回波F明显加强，范围扩大，中心强度超过55 dB*Z*，回波发展迅速，在10 min由降水回波发展为强回波，径向速度图上可以看到此时速度辐合带明显增大，辐合加强，有弱的气旋性涡旋存在（没有到中气旋标准），回波还将不断发展；15:20（图8d），回波F范围进一步扩大，发展旺盛，但对应的径向速度辐合较之前减弱，回波将继续维持，但强度将有所减弱；同时，在径向速度图上新生了一条速度辐合带，因此在强度图上可以看到在回波F的东北侧生成了弱回波F’，即速度的扰动导致了该对流云的产生；随后在15:27（图8e），强回波F相对减弱，范围减小，速度图上可以看到速度辐合也明显减弱，因此回波F还将继续减弱；F’进一步增强，速度图上其速度辐合增强，回波F’还将进一步发展；15:40（图8f），回波F已经明显减弱，速度辐合带也已经消失，F还将持续减弱；F’明显增强，相应的速度辐合也增强，F’将进一步增强；16:00（图8g），强回波F已经彻底消亡，减弱为降水回波；但F’也减

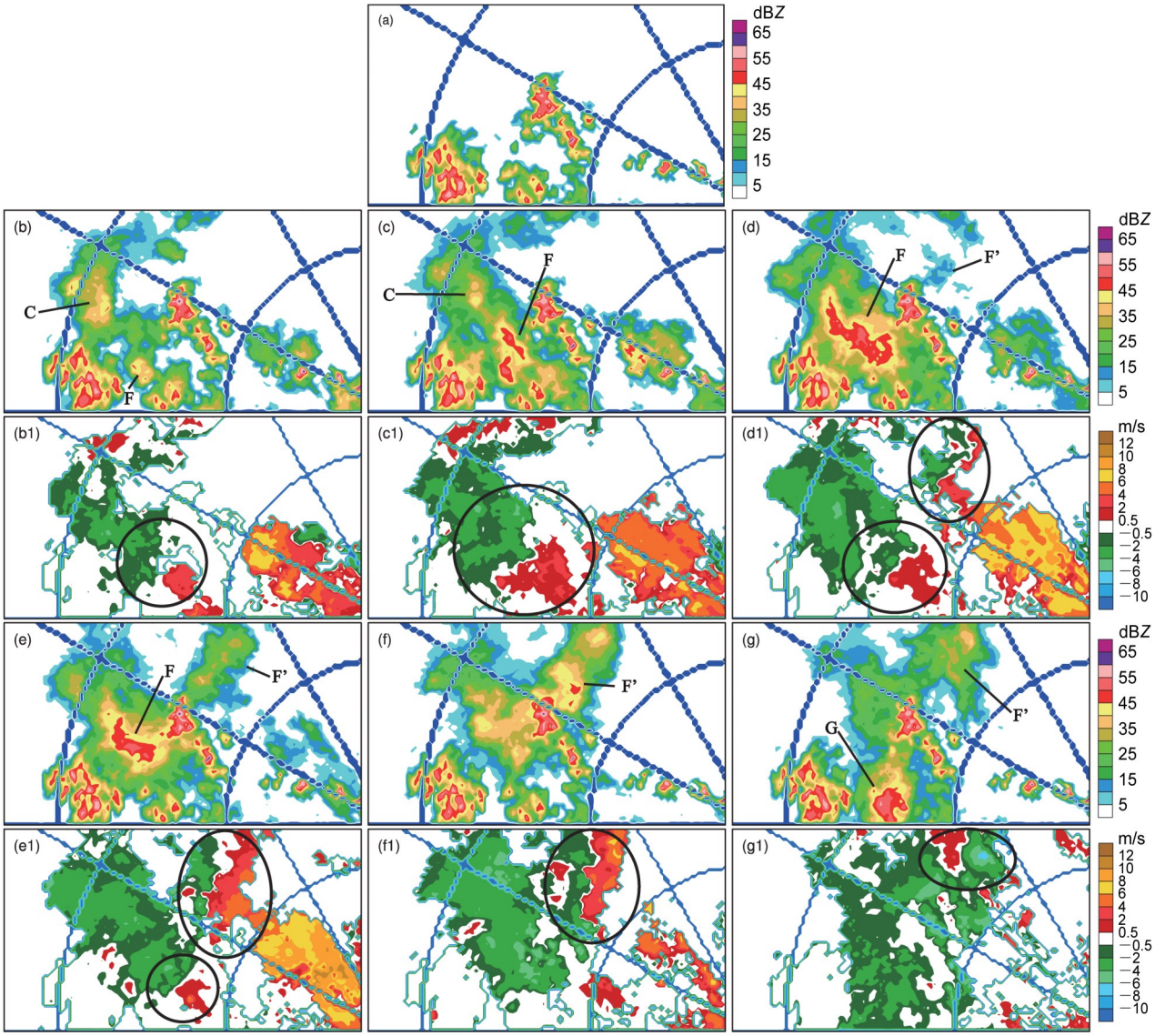

图8 图7c中红色矩形框内（a）地物回波及（b、b1）14:59、（c、c1）15:10、（d、d1）15:20、（e、e1）15:27、（f、f1）15:40、（g、g1）16:00回波强度（第二行和第四行）与径向速度（第三行和第五行）。雷达仰角为0.5°

Fig. 8 (a) Ground clutter and (b, b1) 1459 LST, (c, c1) 1510 LST, (d, d1) 1520 LST, (e, e1) 1527 LST, (f, f1) 1540 LST, and (g, g1) 1600 LST echo intensity (the second and fourth rows) and radial velocity (the third and fifth rows) within the red rectangle in Fig. 7c. Radar elevation angle is 0.5°

弱，其径向图上也已经由明显的速度辐合演变为速度的辐散，可以推测在20 min时间由于速度由辐合转变为辐散，F'经历了增强并迅速减弱的过程。

由单体的生消过程可知，单体的发生发展及维持离不开低层气流的辐合辐散提供的动力条件，低层气流辐合增强，则单体将进一步发展；反之，若低层气流辐合一旦减弱，单体也将难以维持。在有利的环流形势和温湿环境条件下，局地气流辐合扰动会导致新的单体产生。王丽荣等（2007，2010）也曾多次指出低层径向辐合有利于回波维持或加强，径向辐合中心值的变化对未来回波强度变化有一定的指示意义，对于强对流回波的指示意义更为明显。

5.3 距离高度显示（RHI）特征分析

本次过程中对回波A（图7）进行了垂直扫描，获得了冰雹云的垂直特征，从14:44在方位151.96°（图9a）和14:53在方位142.69°（图9b）的强度距离高度显示（RHI）图可见，回波A对应的冰雹云顶高接近16 km（以下无特殊说明均指距海拔高度），高于平原地区夏季普遍对流云高度（李玉林等，2003），超过40 dB*Z*的强回波区高达

11 km，垂直尺度近7 km，最强回波超过55 dB*Z*处于近地面，证明强降水（霰和雨）已经降落至地面；在14:53时回波顶超过16 km，较14:44升高，大于40 dB*Z*的强回波区也超过12 km，单体迅速发展增强。雹云在垂直方向上出现了回波墙、穹隆（弱回波区）和悬挂回波等特征，高层出现了向东南伸展的云砧，显示出了冰雹云单体特征，但其水平尺度只有8 km，垂直尺度为12 km左右，生命期较短，且超过55 dB*Z*的强回波区域主要靠近地面，区域较小，并未呈现处明显的强回波悬垂特征，为弱单体雹云（周德平等，2007）。根据高原降水分类（潘晓和傅云飞，2015；傅云飞等，2016），其为深厚强对流降水，该单体垂直结构不同于与傅云飞等（2007）发现的“蘑菇”状强对流云团，但其二者强降水（雨、霰）中心均位于对流云团下部。

值得注意的是，利用当日那曲地区气象站探空资料，根据对流层顶“温度最低点（CPT）”定义（王鑫和吕达仁，2007），可判断当日对流层顶约在18 km左右，气压＜150 hPa，可判断雹云云顶位于100 hPa附近，并未突破对流层顶。受到太阳辐射增温影响，当日0 ℃层高度（08:00约为5.7 km，20:00约为6 km）总体呈上升趋势，午后0 ℃层距离地面小于1.5 km，远低于平原地区（李玉林等，2003），在0 ℃层上下方均出现了最大反射率因子，

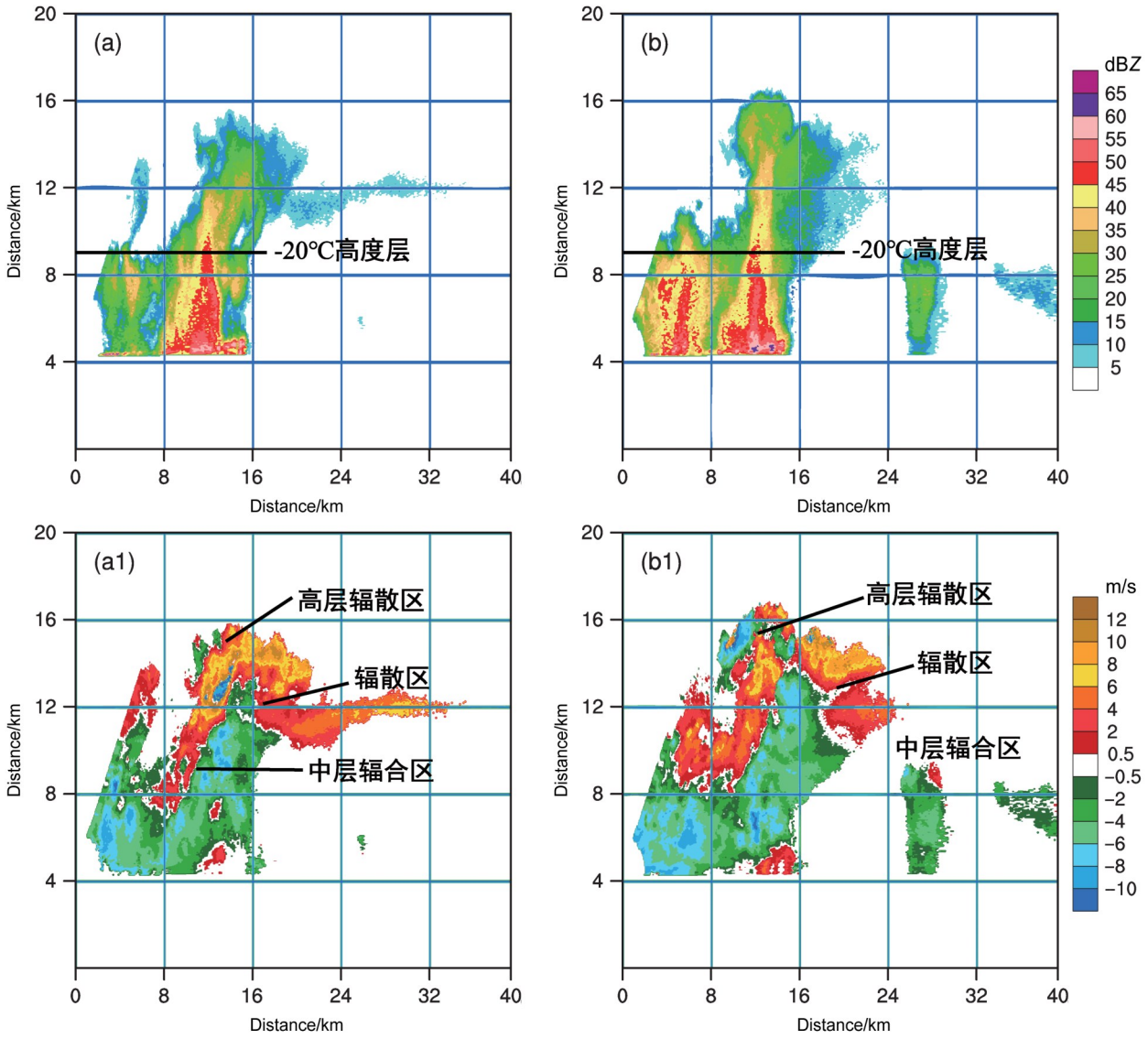

图9　2014年7月30日14:44（左列）和14:53（右列）雹云A的RHI（方位分别为151.96°和142.69°）：（a、b）回波强度；（a1、b1）径向速度

Fig. 9　Range Height Indicator (RHI) of hail cloud A at 1444 LST (left panel) and 1453 LST (right panel) on 30 Jul 2014 (azimuths are 151.96° and 142.69°, respectively): (a, b) Echo intensity; (a1, b1) radial velocity

单体中即有降雹也有降水，且最大反射率因子并未伸展到－20 ℃层（约为9.1 km）以上，形成强冰雹的可能较小（Witt et al.，1998），因此降雹较弱。

在速度RHI图（图9a1、9b1）上，可以看到雹云内部流场，高层和低层有明显的风向切变，近地面有速度为0的区域，主要为地物回波；在距离雷达13 km处对应的上层10～13 km高度之间，正负速度有明显的交界，其左侧靠近雷达一侧速度为负，远离雷达一侧为正，有一明显的辐散区，辐散的强烈抽吸作用有利于上升运动发展，而在13 km处低层速度为正，有从东向西的入流，因此此处对应有强烈的入流上升气流，悬挂回波出现在入流上升气流之上，穹隆区位置与之相对应；13 km处对应的上层的左侧，正负速度也有交界，远离雷达一侧速度为负，靠近雷达一侧速度为正，存在中层辐合区，其低层对应下沉运动，下沉区域正好与强度大于40 dBZ的强回波区相对应，强降水均发生在这里，其上层（约14～15 km左右）有高层辐散区，中层辐合区和高层辐散区在一定程度上促进了风暴内上升运动和风暴低层暖湿入流的强度，有利于低层较丰富的水汽向风暴内输送并导致对流风暴的垂直增长和强烈发展（吴海英等，2017）。

6 结论与讨论

（1）此次强对流天气主要发生于典型的有切变线伴随的高原低涡东移过程中，切变线呈现前倾且前倾形势加剧使得高层切变线后的干冷空气置于低层切变线前的暖湿空气之上，垂直方向上的风切变加强，增加了那曲上空气柱的对流不稳定，有利于此次冰雹强对流天气的触发和发展。

（2）此次强对流天气的水汽通道为高原夏季水汽的主要输送通道：水汽输送从孟加拉湾、印度及尼泊尔翻越喜马拉雅山脉向北至高原；在强对流发生前水汽输送有明显的增加；那曲低层水汽集中在400 hPa以下，有明显的水汽辐合及垂直向上输送。

（3）综合垂直速度、散度、假相当位温剖面图可知那曲400 hPa以下低层处于假相当位温随高度递减区，垂直速度负值及散度负值的重合区，有明显的对流不稳定层结、对流不稳定能量及动力条件。

（4）从雷达回波图上可知：此次过程具有典型的高原冰雹天气特征，由局地新生的多个中γ尺度孤立对流单体造成，其移动路径与切变线前西南气流方向一致；大部分单体水平尺度不大，发展的时间短、生消快，但仍有部分单体生命史较长，但未达到超级单体强度；局地气流辐合扰动会导致新的单体产生，单体的发生、发展及维持离不开低层气流辐合提供动力条件，一旦辐合减弱或消失，单体也将难以维持。

（5）在RHI图上表现出了弱单体雹云特征，由于地形高度差异，雹云云顶约在16 km，高于夏季平原地区普遍对流云高度，但未突破对流层顶，0 ℃层距离地面小于1.5 km，远低于平原地区；为深厚强对流降水，强降水中心位于对流云团下部，即有降雹也有降水，降雹以霰粒为主；垂直方向存在强烈的入流和上升气流，悬挂回波出现在入流上升气流之上，中层辐合区下方气流下沉区对应降雹区，其与上层高空辐散区配合导致对流风暴的垂直增长和强烈发展。

本文对青藏高原的冰雹强对流天气进行了初步的诊断分析以及雷达回波特征分析，由于资料精度限制，对于此次强对流天气的触发机制还未进一步解释，还将进一步将数值模拟与雷达观测有机结合以研究其触发机制、精细化的结构特征、热力及地形等对强对流天气的影响。此次冰雹过程是在外场加密观测实验中观测到的，常规的那曲地区气象局观测站并未能观测到这次冰雹过程，外场加密观测弥补了高原地区测站稀疏的缺点，为高原局地强对流天气的研究提供了宝贵的观测资料，对高原天气的研究具有重要的意义。

参考文献（References）

陈联寿, 徐祥德. 1998. 1998年青藏高原第二次大气科学试验(TIPEX)陆气过程、边界层观测预研究进展 [J]. 中国气象科学研究院年报, 20−21. Chen Lianshou, Xu Xiangde. 1998. Advances in pre-research on land−atmosphere process and boundary layer observations in TIPEX II in 1998 [J]. Annual Report of CAMS (in Chinese), 20−21.

程麟生, 冯伍虎. 2002. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展 [J]. 高原气象, 21(4): 337−347. Cheng Linsheng, Feng Wuhu. 2002. A number of advances of the research on midlatitude mesoscale convective systems [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21(4): 337−347. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.04.001

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(656): 553−597. doi:10.

1002/qj.828

杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 2011. C波段双线偏振多普勒雷达资料质量分析 [J]. 暴雨灾害, 30(4): 328−334. Du Muyun, Liu Liping, Hu Zhiqun, et al. 2011. Data quality analysis of C-band dual linear polarimetric radar [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 30 (4): 328−334. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2011.04.007

杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 2013. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析 [J]. 气象学报, 71(1): 146−158. Du Muyun, Liu Liping, Hu Zhiqun, et al. 2013. An analysis of dual-linear polarimetric Doppler radar data quality [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(1): 146−158. doi:10.11676/qxxb2013.012

Fu Y F, Liu G S, Wu G X, et al. 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer [J]. Geophys. Res. Lett., 33(5): L05802. doi:10.1029/2005GL024713

傅云飞, 李宏图, 自勇. 2007. TRMM卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析 [J]. 高原气象, 26(1): 98−106. Fu Yunfei, Li Hongtu, Zi Yong. 2007. Case study of precipitation cloud structure viewed by TRMM satellite in a valley of the Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(1): 98−106. doi:10.3321/j.issn: 1000-0534.2007.01.012

傅云飞, 潘晓, 刘国胜, 等. 2016. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究 [J]. 大气科学, 40(1): 102−120. Fu Yunfei, Pan Xiao, Liu Guosheng, et al. 2016. Characteristics of precipitation based on cloud brightness temperatures and storm tops in summer Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 102−120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1507.15165

胡朝霞, 齐彦斌, 郭学良, 等. 2007. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 12(1): 37−48. Hu Zhaoxia, Qi Yanbin, GuoXueliang, et al. 2007. Numerical simulation of hail formation mechanism in East of the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(1): 37−48. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9585.2007.01.05

胡金磊, 郭学良, 侯灵. 2014. 下垫面对雹云形成发展的影响 [J]. 气候与环境研究, 19(4): 407−418. Hu Jinlei, Guo Xueliang, Hou Ling. 2014. Effect of underlying surface on the formation and evolution of hail cloud [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(4): 407−418. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12026

胡志群, 刘黎平, 吴林林. 2014. C波段偏振雷达几种系统误差标定方法对比分析 [J]. 高原气象, 33(1): 221−231. Hu Zhiqun, Liu Liping, Wu Linlin. 2014. Comparison among several system biases calibration methods on C-band polarimetric radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(1): 221−231. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00134

金晓中, 贡觉顿珠. 2007. 那曲冰雹天气的气候特征分析 [J]. 西藏科技, (3): 61−63. Jin Xiaozhong, GongJue Dunzhu. 2007. Hail climate characteristic analysis in Naqu County [J]. Tibet Science and Technology (in Chinese), (3): 61−63. doi:10.3969/j.issn.1004-3403. 2007.03.021

康凤琴, 张强, 马胜萍, 等. 2004a. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理 [J]. 高原气象, 23(6): 749−757. Kang Fengqin, Zhang Qiang, Ma Shengping, et al. 2004a. Mechanism of hail formation on the northeast border of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 749−757. doi:10.3321/j. issn:1000-0534.2004.06.003

康凤琴, 张强, 渠永兴, 等. 2004b. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究 [J]. 高原气象, 23(6): 735−742. Kang Fengqin, Zhang Qiang, Qu Yongxing, et al. 2004b. simulating study on hail microphysical process on the northeastern side of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 735−742. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.001

李国平. 2007. 青藏高原动力气象学(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 1−271. Li Guoping. 2007. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (2nd ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1−271.

李国平, 李山山, 黄楚惠. 2017. 高原切变线与高原低涡相互作用的研究现状与展望 [J]. 地球科学进展, 32(9): 919−925. Li Guoping, Li Shanshan, Huang Chuhui. 2017. Research status and prospect of the interaction between Tibetan Plateau shear line and Tibetan Plateau vortex [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 32(9): 919−925. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.09.0919

李锐, 李文卓, 傅云飞, 等. 2017. 青藏高原ERA40和NCEP大气非绝热加热的不确定性 [J]. 科学通报, 62(5): 420−431. Li Rui, Li Wenzhuo, Fu Yunfei, et al. 2017. The uncertainties of residual diagnosis of atmospheric diabatic heating from ERA40 and NCEP reanalysis over Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 62(5): 420−431. doi:10.1360/N972016-00583

李山山, 李国平. 2017. 一次高原低涡与高原切变线演变过程与机理分析 [J]. 大气科学, 41(4): 713−726. Li Shanshan, Li Guoping. 2017. Evolution and mechanism analysis of a plateau vortex and plateau shear line [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 713−726. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16179

李玉林, 杨梅, 曾光平, 等. 2003. 南方夏季对流云降水回波特征分析 [J]. 应用气象学报, 14(S1): 126−134. Li Yulin, Yang Mei, Zeng Guangping, et al. 2003. Characteristics of summer convective cloud precipitation echoes in south China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14(S1): 126−134. doi:10.3969/ j.issn.1001-7313.2003.z1.015

廖玉芳, 潘志祥, 郭庆. 2006. 基于单多普勒天气雷达产品的强对流天气预报预警方法 [J]. 气象科学, 26(5): 564−571. Liao Yufang, Pan Zhixiang, Guo Qing. 2006. Technique for forecasting and warning of severe convective weather based on single Doppler weather radar products [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26(5): 564−571. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2006.05.015

刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等. 2015. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果 [J]. 气象学报, 73(4): 635−647. Liu Liping, Zheng Jiafeng, Ruan Zheng, et al. 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(4): 635−647. doi:10.11676/qxxb2015.041

吕胜辉, 高艳红, 刘伟. 2005. 华北平原一次中尺度对流系统分析 [J].

高原气象, 24(2): 268−274. Lü Shenghui, Gao Hongyan, Liu Wei. 2005. Analysis on a mesoscale convective system in North China Plain [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(2): 268−274. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.02.020

潘晓, 傅云飞. 2015. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析 [J]. 高原气象, 34(5): 1191−1203. Pan Xiao, Fu Yunfei. 2015. Analysis on climatological characteristics of deep and shallow precipitation cloud in summer over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(5): 1191−1203. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00112

乔明全, 张雅高. 1994. 青藏高原天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 45−46. Qiao Mingquan, Zhang Yagao. 1994. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 45−46.

唐佳芳. 2005. 昌都冰雹的气候变化分析 [J]. 西藏科技, (4): 39−40. Tang Jiafang. 2005. Climate change analysis of hail disaster in Changdu [J]. Tibet Science and Technology (in Chinese), (4): 39−40.

陶诗言, 罗四维, 张鸿材. 1984. 1979年5—8月青藏高原气象科学实验及其观测系统 [J]. 气象, (7): 2−5. Tao Shiyan, Luo Siwei, Zhang Hongcai. 1984. Meteorological science experiment and observation system of the Qinghai-Tibet Plateau from May to August in 1979 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), (7): 2−5.

田珊儒, 段安民, 王子谦, 等. 2015. 地面加热与高原低涡和对流系统相互作用的一次个例研究 [J]. 大气科学, 39(1): 125−136. Tian Shanru, Duan Anmin, Wang Ziqian, et al. 2015. Interaction of surface heating, the Tibetan Plateau vortex, and a convective system: A case study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(1): 125−136. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.1404.13311

王丽荣, 胡志群, 汤达章, 等. 2007. 多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用 [J]. 气象科学, 27(6): 695−701. Wang Lirong, Hu Zhiqun, Tang Dazhang, et al. 2007. An application of Doppler radar radial velocities to convectional weather forecast [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27(6): 695−701. doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2007.06.017

王丽荣, 王立荣, 牛朝阳, 等. 2010. 多普勒雷达径向散度在迎风坡降水中的应用 [J]. 气象科学, 30(2): 228−233. Wang Lirong, Wang Lirong, Niu Zhaoyang, et al. 2010. An application of Doppler radar radial divergence to precipitation of windward slope [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(2): 228−233. doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2010.02.013

王茂书, 张勇. 2011. 2010年7月16～18日巴中市持续性暴雨天气诊断分析 [J]. 高原山地气象研究, 31(3): 43−48. Wang Maoshu, Zhang Yong. 2011. Diagnostic analysis on continual rainstorm from July 16 to July 18, 2010 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 31(3): 43−48. doi: 10.3969/j. issn. 1674-2184.2011.03.009

王鑫, 吕达仁. 2007. 利用GPS掩星数据分析青藏高原对流层顶结构变化 [J]. 自然科学进展, 17(7): 913−919. Wang Xin, Lü Daren. 2007. Using GPS occultation data for analyzing tropopause structure variation in Tibetan Plateau [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 17(7): 913−919. doi: 10.3321/j. issn: 1002-008X. 2007.07.010

尉英华, 陈宏, 张楠, 等. 2018. 冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制 [J]. 干旱气象, 36(1): 27−33. Wei Yinghua, Chen Hong, Zhang Nan, et al. 2018. Analysis on meso-scale characteristics and cause of a severe convective hailstorm weather under cold vortex background [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 36(1): 27−33. doi: 10.11755/j. issn. 1006-7639(2018) -01-0027

Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D [J]. Wea. Forecasting, 13(2): 286−303. doi:10.1175/1520-0434(1998)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2

Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook [J]. Natl. Sci. Rev., 2(1): 100−116. doi:10.1093/nsr/nwu045

吴海英, 陈海山, 刘梅, 等. 2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制 [J]. 气象, 43(2): 141−150. Wu Haiying, Chen Haishan, Liu Mei, et al. 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(2): 141−150. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.002

徐淑英, 殷延珍. 1984. 1979年夏季季风活动时期水汽输送的变化 [C]//青藏高原科学实验文集(三). 北京: 科学出版社, 73−85. Xu Shuying, Yin Yanzhen. 1984. Changes in Water Vapor Transport of Monsoon during the Summer in 1979 [C]// Collection (III) of Qinghai-Tibet Plateau Meteorological Science Experiment (in Chinese). Beijing: Science Press, 73−85.

叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 122−126. Ye Duzheng, GaoYouxi. 1979. Meteorology of Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 122−126.

张翠华, 言穆弘, 董万胜, 等. 2005. 青藏高原雷暴天气层结特征分析 [J]. 高原气象, 24(5): 741−747. Zhang Cuihua, Yan Muhong, Dong Wansheng, et al. 2005. Analyses on atmospheric stratification characteristics of thunderstorms over Qinghai−Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(5): 741−747. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2005.05.013

张核真, 假拉. 2007. 西藏冰雹的时空分布特征及危险性区划 [J]. 气象科技, 35(1): 53−56. Zhang Hezhen, Jia La. 2007. Temporal−spatial characteristics and hazard regionalization of hail events in Tibet [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35(1): 53−56. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.01.011

张杰, 张强, 康凤琴, 等. 2004a. 西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型 [J]. 高原气象, 23(6): 743−748. Zhang Jie, Zhang Qiang, Kang Fengqin, et al. 2004a. Satellite spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in East of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 743−748. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.002

张杰, 李文莉, 康凤琴, 等. 2004b. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析 [J]. 高原气象, 23(6): 758−763. Zhang Jie, Li Wenli, Kang Fengqin, et al. 2004b. Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud [J]. Plateau Meteorology (in

Chinese), 23(6): 758−763. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.004

张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 等. 2006. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析 [J]. 高原气象, 25(3): 531−538. Zhang Tengfei, DuanXu, Lu Yabin, et al. 2006. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its Dopplar radar echo features [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(3): 531−538. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.022

周德平, 杨洋, 王吉宏, 等. 2007. 冰雹云雷达识别方法及防雹作业经验 [J]. 气象科技, 35(2): 258−263. Zhou Deping, Yang Yang, Wang Jihong, et al. 2007. Hail cloud identification method by radar echoes and experiences from hail suppression operation in Liaoning Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35(2): 258−263. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.02.021

郄秀书, Toumi R. 2003. 卫星观测到的青藏高原雷电活动特征 [J]. 高原气象, 22(3): 288−294. Qie Xiushu, Toumi R. 2003. Lightning activities on Qinghai-Xizang Plateau as observed by satellite-based lightning imaging sensor [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (3): 288−294. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.03.013