

2019年夏季三江源局地热对流云宏微观特征的初步分析

贾烁^{1,2} 杨洁帆¹ 韩辉邦³ 马学谦³ 雷恒池^{1,2} 王田田^{1,4}

(1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点试验室(LACS), 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810000; 4 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020)

摘要: 在中国气象局西北人影工程项目的支持下, 2019年8—9月在青海省三江源地区增设714XDP车载X波段双偏振多普勒雷达开展局地热对流云观测试验。主要基于雷达体扫观测数据分析研究某日高原局地热对流云的宏微观特征, 同时将FY-4A卫星反演对流云特征与雷达观测热对流云回波进行点对点对比。结果表明: 该日试验区具备局地热对流云形成的动力条件、热力条件和一定的水汽条件; 回波自西北向东南移动, 与地形的走向呈90°或150°夹角(顺时针方向), 与500 hPa流场方向一致, 多数移速大于35 km/h; 高原局地热对流云宏观特征表现为最大回波强度较小(30~48 dBz), 最大回波顶高4~5 km, 冷云过程为主, 垂直积分液水含量较小($<1 \text{ kg/m}^2$), 持续时间较短(30~90 min); 分析典型个例认为动力抬升对高原局地热对流云发展起主要作用, 其发展成熟阶段零度层以上粒子相态以冰晶、过冷水、霰或小雹为主; 对比FY-4A卫星反演对流云特征与热对流云回波的异同, 云粒子有效半径较大($>16 \mu\text{m}$)的像素点与回波强度大值对应较好。

关键词: 局地热对流云, X波段双偏振多普勒雷达, 宏微观特征, 卫星反演产品

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.018

Preliminary Analysis on Thermal Convective Clouds Generated Locally in Summer of 2019 in Sanjiangyuan Region

Jia Shuo^{1,2}, Yang Jiefan¹, Han Huibang³, Ma Xueqian³, Lei Hengchi^{1,2}, Wang Tiantian^{1,4}

(1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3 Office of Weather Modification in Qinghai Province, Xining 810000 4 Office of Weather Modification in Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: With the support of Northwest weather modification project, CMA, observational experiments of local thermal convective clouds were conducted in Sanjiangyuan Region in August and September 2019. Based on on-board X-band dual polarization doppler radar volume-scan data, this paper mainly makes analysis of macroscopic and microscopic characteristics of thermal convective clouds occurred on one day, and makes comparison in point-to-point between satellite observation and radar echoes of thermal convective clouds. The results show that: experimental area had requirements for formation of local thermal convective clouds; movement of thermal convective clouds was from northwest to southeast, whose direction formed a 90° or 150° with topography (clockwise direction) and accorded with wind fields of 500 hPa, and most speed of movement was more than 35 km/h; radar echoes of thermal convective clouds were weak (with 30 to 48 dBz of maximal radar echo reflectivity), which maximal echo top varied from 4 to 5 km; thermal convective clouds were formed by cold cloud mechanism, with less vertical integrated liquid water contents and shorter duration; thermal convective cloud within a typical example was mainly affected by dynamic lifting, and its types of hydrometeor higher than 0° layer consisted of ice crystal, supercooled liquid water and graupel or small hail in developing and mature stages; comparing retrieval Re from FY-4A satellite observation with radar echoes of thermal convective clouds, the two were in good consistency.

Keywords: local thermal convective cloud, X-band dual-polarization doppler radar, macroscopic and microscopic characteristics, retrieval products from satellite observation

收稿日期: 2021年2月9日; 修回日期: 2021年8月10日
第一作者: 贾烁, Email: jia91shuo@163.com
通信作者: 杨洁帆, Email: yjf@mail.iap.ac.cn
资助信息: 西北区域人工影响天气能力建设项目(ZQC-R18209), 甘肃省科技计划资助项目(20JR5RA111)

0 引言

三江源地区位于我国青海省南部, 是青藏高原的腹地, 平均海拔3500~4800 m, 为长江、黄河和澜沧江的源头汇水区, 行政区域涉及玉树、果洛、海南、

黄南四个藏族自治州的16个县和格尔木市的唐古拉乡。区内气候属青藏高原气候系统，具有干湿两季分明、雨热同期、日温差大、辐射强烈等气候特征。其独特的天气气候特点对当地生态环境^[1]及下游地区天气气候^[2-3]都有重要影响。

自20世纪70年代以来，国内外针对青藏高原独特的天气气候特点开展了大量外场科学试验，认为青藏高原大气热源对局地与下游区域云降水过程、水汽输送流型等均有显著影响^[4]。第三次青藏高原大气科学试验（TIPEX-III）对陆面一边界层过程、云—降水物理过程及对流层—平流层交换过程进行了系统的观测^[5]，Ka波段云雷达探测数据表明，青藏高原夏季云主要集中在6 km以上和4 km以下，初生的积云和层云常常出现在3 km高度上^[6]；利用C波段连续波雷达的特征参数可以将西藏那曲地区对流降水云分为深厚对流降水云和浅薄对流降水云，二者有明显的垂直结构特征差异^[7]；研究还表明青藏高原云—降水微物理过程不同于平原地区^[8]。

三江源地区具有同青藏高原相似的气候特征和地形分布，同时作为主要河流的源头汇水区，近年来相关研究已经从水汽输送、天气背景、云系宏微观结构及发展机制等方面对该地区各类云系开展了详细分析。如利用再分析资料研究三江源地区空中主要水汽来源^[9]；针对降水云系开展机载云物理观测^[10-11]和数值模拟^[12-13]，研究云系微物理特征及降水机制；分析研究黄河上游地区主要降水云系的雨滴谱特征^[14-15]等。但是，上述研究对象多是层状云或积层混合云，其中关于对流云的环境场特征分析^[16]、宏微观结构的观测及降水机制的研究^[17-19]则多是针对发展旺盛的强对流云或组织化的中尺度对流系统（MCS）。

已有研究表明青藏高原东部河曲地区6—9月白天出现积雨云频率较高（49%~61%），浓积云也达36%，积雨云降水次数与云出现次数比例为58%，且多数为弱对流云降水^[20]。另外，三江源地区河南县7—9月低云出现频率达80%以上，以对流云为主，且在地形热力和动力作用下易发展为浓积云^[21]。以上结果均表明有必要对三江源地区局地形成的弱对流云开展研究，分析其形成的天气背景场，地形热力、动力作用对其形成的影响，以及降水产生的物理机制。

由于三江源地区特殊的自然环境，常规气象观测站点稀疏，前述研究采用的常规气象资料、雷达卫星资料、再分析资料因其分辨率等原因很难满足局地热对流云的研究需要。在中国气象局西北人影工程项目的支持下，中国科学院大气物理研究所联合青海省人影办在三江源地区增设了X波段双偏振多普勒雷达，

针对高原局地热对流云开展观测。本文首先介绍了试验概况、观测设备及数据处理方法，然后利用X波段双偏振雷达体扫数据对某日局地生成高原热对流云的移动特点、宏微观特征进行分析，研究其物理机制，同时将卫星观测对流云特征与雷达回波进行对比，分析二者的时间空间一致性和差异。

1 试验地点、观测设备和数据

1.1 试验地点和设备

本试验的观测地点选择易出现局地热对流云的三江源地区泽库县，该地区平均海拔高度3600 m（图1），北部的杂玛日岗山海拔最高（4971 m）。试验区以X-波段双偏振多普勒雷达站（35°N，101.49°E，海拔3623 m）为中心，泽库国家级地面气象站（站号：

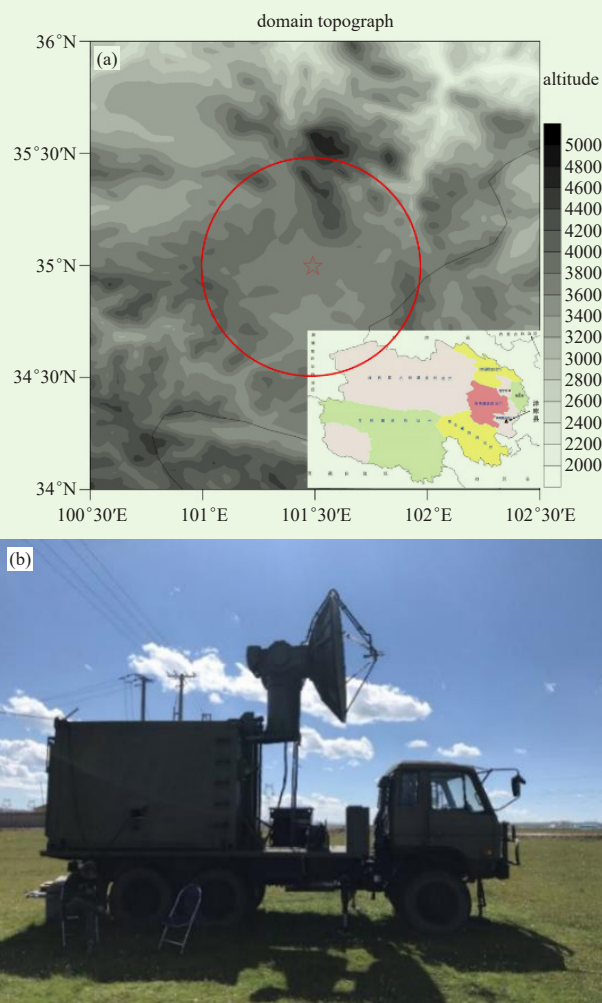


图1 (a) 试验区地形分布图（五角星代表雷达站位置，红圈为雷达半径50 km范围）；

(b) 714XDP车载X波段双偏振多普勒雷达

Fig. 1 (a) Topographic distribution in experimental area (star denoting radar station and red circle denoting a radius of 50 km);

(b) 714XDP on-board X-band dual-polarization doppler radar

52968) 位于其西北向4 km, 包括地面温度、压强、相对湿度、风向风速、降水量等常规气象要素的观测。试验区还分布了79个自动气象站, 观测常规地面气象要素。

利用714XDP车载X波段双偏振多普勒雷达(简称“714XDP雷达”)对三江源地区局地热对流云开展观测。该雷达波长较常规S、C波段业务雷达更短, 因此更易捕捉云系弱回波, 它的有效探测范围为100 km。714XDP雷达采用固态发射机, 具有同时发射和接收水平、垂直方向偏振波的能力, 可探测得到基本反射率(Z_H)、多普勒速度(V)、谱宽(S_w)、差分反射率(Z_{DR})、差分传播相移(Φ_{DP})、差分传播相移率(K_{DP})和零滞后互相关系数(ρ_{hv})等回波物理量, 用于分析云系宏微观特征。714XDP雷达具有平面-位置扫描(PPI)、距离-高度扫描(RHI)、体扫(VOL)和扇扫(SEC)四种扫描方式。具体性能参数见表1。

表1 714XDP车载X波段双偏振多普勒雷达主要性能参数
Table 1 Performance parameters of 714XDP on-board X-band dual-polarization doppler radar

项目	参数	项目	参数
天线直径	2.4 m	脉冲宽度	50 μ s
天线增益	44.1 dB	脉冲重复频率	500~1200 Hz
波束宽度	0.97° (水平) 0.98° (垂直)	脉冲重复频率比	4: 3: 3: 2: 5: 4
极化方式	双线性 (水平/垂直)极化	库数	16008
波长	3.2 cm	库长	1000 m
峰值功率	≥ 81 kW	测量参数	Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 V 、 S_w 、 Φ_{DP} 、 ρ_{hv}

1.2 观测数据和处理方法

2019年8月1日—9月8日利用714XDP雷达对以雷达站为中心半径100 km区域内出现的对流云进行连续体扫观测(垂直12层或14层), 记录对流云初始回波出现的时间、位置, 并进行编号。

基于714XDP雷达体扫基数据采用风暴单体识别与跟踪算法(SCIT)^[22], 首先根据选定的反射率阈值进行水平识别, 形成二维闭合单元, 然后沿垂直方向上进行识别, 形成三维单元体, 并进行标识; 根据特征相似、距离优先、最大速度限制等原则对连续体扫中识别的回波单元进行追踪, 用相对于雷达站的方位角和径向距离标记各时次回波位置, 记录对流云回波初生、发展、成熟、消散过程和移动路径。

回波识别标准如下: 强中心第一次出现大于15 dBz回波认为云体初生, 大于15 dBz的回波消失认为云体消散。成熟阶段强中心回波强度大于30 dBz认为

为是对流云^[23], 并利用体扫数据选择15 dBz作为阈值确定回波顶高。

利用714XDP雷达体扫基数据计算热对流云的回波顶高、最大回波强度、强回波所在高度、垂直积分液水含量; 对各热对流云持续时间、最大回波强度、最大回波顶高、强回波所在高度等发展演变特征进行统计分析; 另一方面利用各雷达回波物理量如基本反射率、差分反射率、相关系数、差分传播相移率等识别热对流云各高度层粒子相态。

同时, 收集雷达观测期间风云4A(简称“FY-4A”)卫星观测数据, 利用FY-4A多通道扫描成像辐射计(简称“AGRI”)L1数据计算可见光通道云反射率和云顶有效粒子半径^[24], 与714XDP雷达观测热对流云回波物理量进行对比。

2 初步分析结果

2.1 天气背景分析

8月9日14时(北京时, 下同)亚欧天气图上, 500 hPa中高纬为两槽两脊的天气形势, 588线位于青海省西南部, 青海东部受反气旋西北气流控制, 有冷平流沿西北气流下滑; 700 hPa青海省位于高温高压中心边缘, 试验区有暖平流(图2), 高低空配置为对流形成提供了一定的动力条件。结合8月9日08时西宁站探空(图3), 500~700 hPa温度和露点温度随高度升高而降低, 600 hPa以下相对湿度较大, 说明试验区具备对流形成的热力不稳定条件。

分析8月9日青海省各高度层相对湿度分布, 08—14时试验区500 hPa相对湿度由30%~40%增大至70%~80%, 试验区600 hPa相对湿度由50%~60%减小至30%~40%。说明午后试验区低层相对湿度减小, 中层相对湿度增加。

8月9日14时, 试验区700 hPa和600 hPa辐合, 500 hPa和400 hPa辐散, 700 hPa辐合较强, 500 hPa辐散较强。辐合层和辐散层间厚度较小, 可能导致垂直上升运动发展受限, 对流云厚度较小。

综合上述分析, 8月9日试验区具备对流形成的天气条件和局地不稳定条件, 但低层的水汽条件转差, 不利于对流性降水的维持, 且中尺度辐合辐散层间厚度较小, 不利于对流的垂直发展。

2.2 局地热对流云回波移动及宏微观特征研究

8月8日试验区有系统性降水过程, 区域内9个地面气象站平均日降水量为7.14 mm。9日上午太阳辐射较强, 结合天气背景分析和西宁站探空, 试验区具有对流形成的动力条件、热力不稳定条件、一定的水汽条件, 16:00起雷达站西面、北面的山地出现较明显

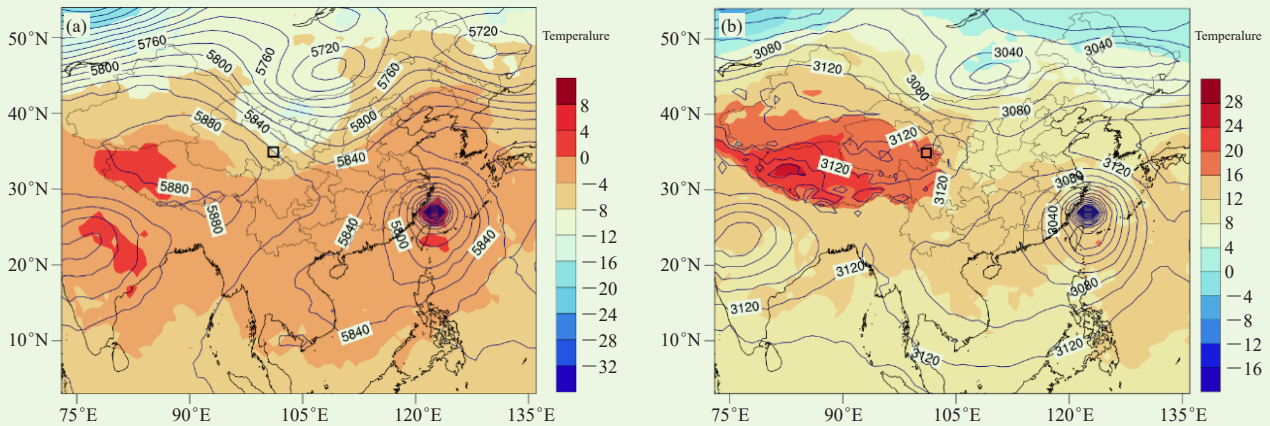


图2 2019年8月9日14时500 hPa (a) 和700 hPa (b) 亚欧天气图

(等值线: 位势高度/gpm, 填色: 温度/°C, 黑色矩形框: 关注区域)

Fig. 2 Asia-Europe synoptic situation of 500 hPa (a) and 700 hPa (b) (contour line: geopotential height, gpm, coloring: temperature, unit: °C, black rectangle: area of interest) at 14:00 BT on 9 August 2019

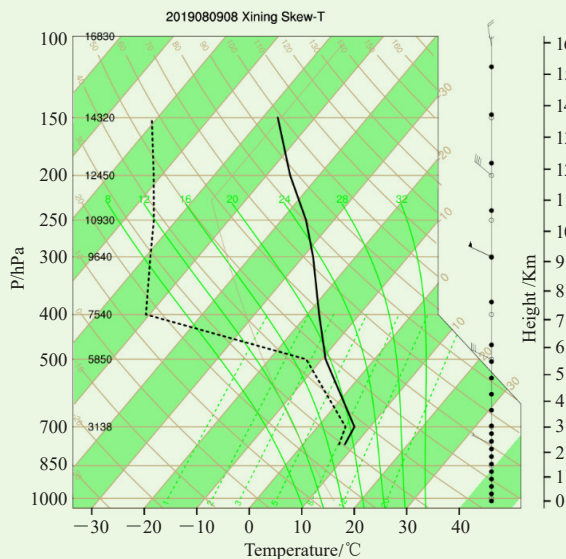


图3 2019年8月9日08时西宁站探空 (实线: 温度/°C, 虚线: 露点温度/°C)

Fig. 3 Radiosonde observation (solid line: temperature/°C, dashed line: dew point temperature/°C) at Xining station at 08:00 BT on 9 August 2019

的热对流云。

基于714XDP雷达体扫观测数据对8月9日热对流云回波进行人工识别追踪, 结合地形分布进行分析(图4), 回波生成源地海拔高度约3400~4400 m, 多数为山地迎风坡, 回波移动方向为自西北向东南, 与地形的走向呈90°或150°夹角(顺时针方向), 与试验区500 hPa流场方向基本一致。

8月9日16—20时共有9个热对流云回波生成, 从雷达回波组合反射率看, 热对流云回波直径<10 km。利用714XDP雷达体扫基数据计算回波物理量(表2), 最大回波强度在30~48dBz, 最大回波

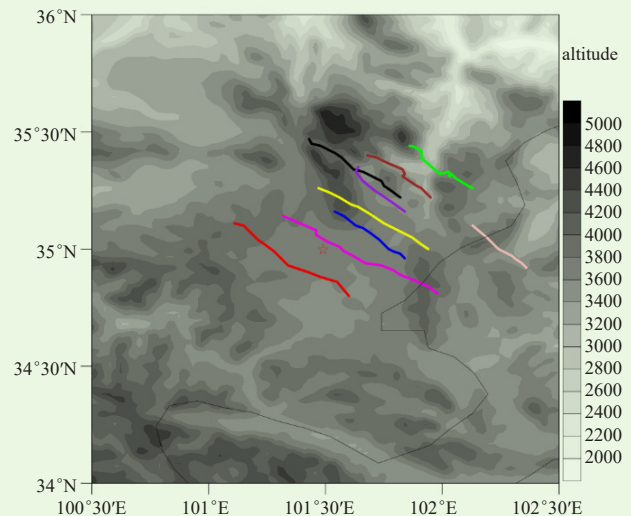


图4 2019年8月9日基于雷达观测的对流云回波移动轨迹

Fig. 4 Moving track of convective clouds based on radar observation on 9 August 2019

表2 2019年8月9日对流云回波移动演变特征统计表

Table 2 Moving and development characters of convective clouds radar echo on 9 August 2019

序号	回波起始位置		起始时间	持续时间/min	最大回波强度/dBz	移动速度/(km/h)
	方位角/°	径向距离/km				
1	24.27	16.80	16: 14	55	35.5	35.6
2	351.56	38.86	16: 14	73	37.5	43.4
3	48.62	17.80	16: 39	54	33.5	40.8
4	35.00	60.15	16: 39	66	30.5	28.7
5	353.73	52.26	16: 51	71	34.5	37.4
6	305.43	19.17	17: 33	88	47.5	45.0
7	79.72	58.90	18: 02	42	35.0	39.5
8	29.00	36.77	18: 09	64	39.0	47.1
9	18.43	41.78	19: 30	36	32.5	48.0

顶高4~5km(此处以及后面提到的高度均为距地面

的高度), 同利用C波段连续波雷达得到的“高原夏季浅薄对流回波顶平均高度为5 km”结论较一致^[7]; 强回波所在高度为2~4 km, 垂直积分液水含量小于1 kg/m²; 大部分回波移速较快(>35 km/h), 持续时间30~90 min。

结合2.1节天气背景分析9日局地热对流云回波的宏观特征, 回波垂直发展高度较小, 应是由前述“垂直上升运动受限”造成; 根据探空可知试验区零度层高度约1.2 km, 强回波所在高度说明冷云过程是高原热对流云的主要形成机制, 戴进等分析高原雷暴弱降水^[25]也得出相同结论; 前面分析认为14时试验区中层水汽条件转好, 低层水汽条件转差, 因此计算的回波垂直积分液水含量较小。由于存在上述不利条件, 导致热对流云水平尺度较小, 多数最大回波强度小于40 dBZ, 持续时间也相对较短。

选择8月9日较典型的山地迎风坡生成热对流云回波(表2中的2号回波)进行具体分析(图5)。

16: 14, 初始回波强度较小(16 dBZ), 所在高度约3 km, 与刘黎平等分析得出的那曲地区2014年夏季积云特征^[6]比较一致; 12 min后(16: 26)出现30 dBZ的回波中心, 回波顶高达到4 km, 强回波所在高度>3 km, 说明此时回波处于发展阶段; 16: 32回波强度继续增加, 表现为两个回波中心, 东侧回波顶高>西侧; 16: 39回波强度达到最大(>36 dBZ, 东侧稍>西侧), 强回波所在高度降至2~3 km, 回波顶高降至3~4 km; 16: 45表现为一个回波中心, 结合地形此时回波移至山地背风坡; 下一时刻回波强度明显减小(约30 dBZ), 强回波所在高度和回波顶高均减小, 说明热对流云进入减弱阶段; 之后回波持续减弱到17: 03, 与东侧局地生成回波相互影响, 回波强度稍有增加, 但持续时间较短; 17: 21回波减弱消散。综合上述分析, 该热对流云回波顶高和强回波所在高度先发展至最大, 然后回波强度增至最大值, 说明该热对流云发展过程动力抬升起主要作用, 不排除地形

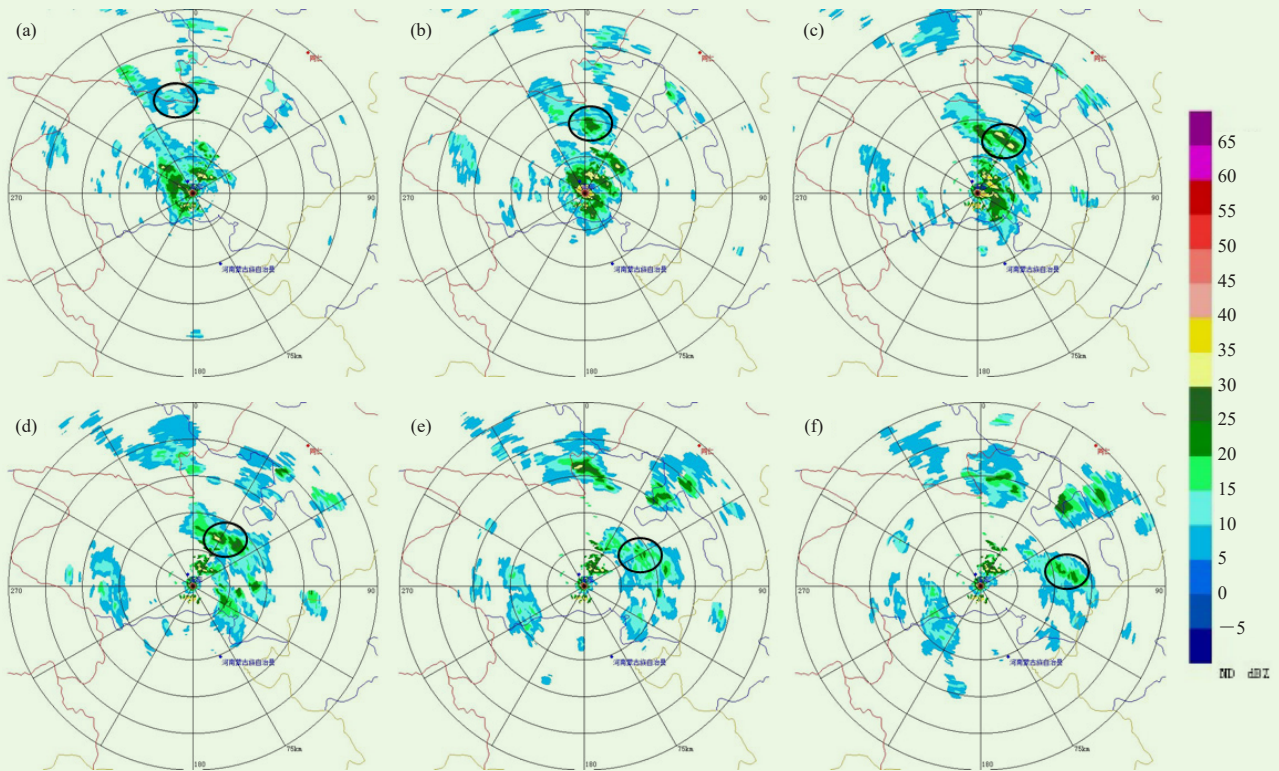


图5 2019年8月9日16: 14(a)、16: 26(b)、16: 39(c)、16: 51(d)、17: 03(e)、17: 15(f) 雷达回波组合反射率(黑圈内为2号热对流云回波)

Fig. 5 Composite reflectivity of radar echoes at 16:14 (a), 16:26 (b), 16:39 (c), 16:51 (d), 17:03 (e), and 17:15 (f) BT on 9 August 2019 (No.2 radar echoes within black circle)

抬升对其发展的促进作用。

基于 Z_H 、 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 和 K_{DP} 四个偏振物理量, 同时考虑粒子相态存在的温度条件, 利用模糊逻辑算法对热对流云发展阶段各高度层粒子相态进行识别^[26]。初

生阶段(16: 14—16: 20)回波所在高度约3 km, 对应层粒子相态以冰晶和霰或小雹为主, 少量为过冷水; 16: 26—16: 32回波处于发展阶段, 判断中上层(2.7~3.3 km)粒子相态为冰晶和过冷水, 以

及少量霰或小雹，说明此时具备冰相粒子形成和增长的条件；16:39中上层（6.4°仰角）识别粒子相态同前一时次（图6a），稍高于零度层（4°仰角层）识别粒子相态为霰或小雹、过冷水以及少量湿雪（图6b），零度层以下（2.4°仰角）识别粒子相态为湿雪、中雨和毛毛雨（图6c），说明开始形成降水粒子。16:45—16:51强回波所在高度层粒子相态识别为冰晶和过冷水，说明热对流云成熟阶段仍有一定过冷水；17:03零度层以上（1.5 km）回波粒子相态识

别为霰或小雹、冰晶，说明过冷水减少；到17:09，受附近回波影响，零度层以上（5.1°仰角）识别粒子相态为冰晶、干雪和过冷水（图6d），零度层以下（2.3°、1.8°仰角）识别粒子相态为湿雪、中雨、毛毛雨（图6e和6f），应该主要是由上层冰相粒子下落融化形成。通过上述各阶段粒子相态的识别分析，进一步验证了热对流云通过冷云冰相过程形成降水粒子，其发展成熟阶段有一定过冷水。

综上得出，9日局地生成热对流云回波移动方

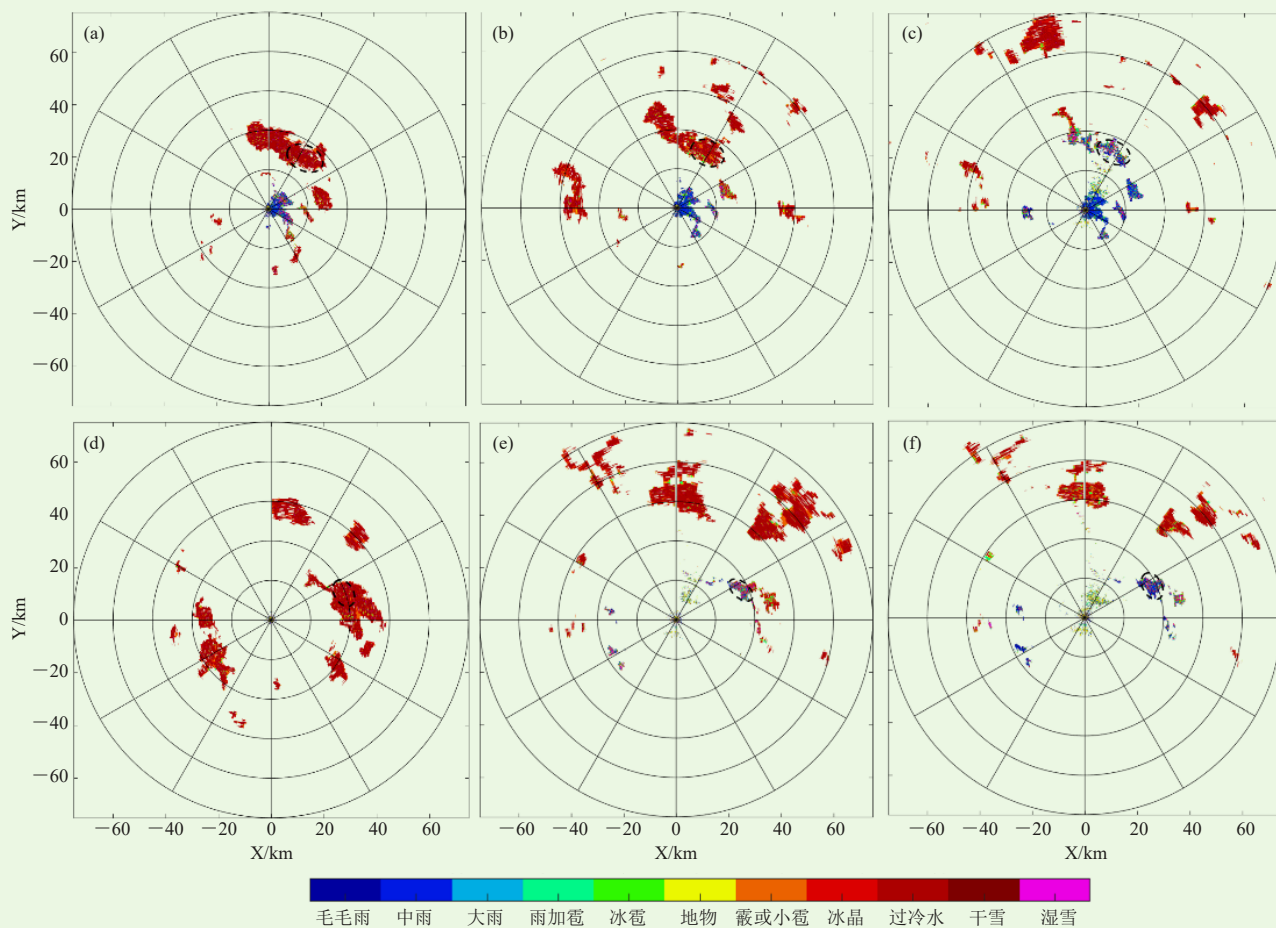


图6 基于雷达回波物理量的各高度层相态识别

(a) 16:39 6.4°仰角; (b) 16:39 4.0°仰角; (c) 16:39 2.4°仰角; (d) 17:09 5.0°仰角; (e) 17:09 2.3°仰角; (f) 17:09 1.8°仰角 (虚线圈内为较强回波区)

Fig. 6 Hydrometeor identification of PPI with different elevations based on radar physical parameters (a)16:39 BT elevation of 6.4°, (b) 16:39 BT elevation of 4.0°, (c) 16:39 BT elevation of 2.4°, (d) 17:09 BT elevation of 5.0°, (e) 17:09 BT elevation of 2.3°, (f) 17:09 BT elevation of 1.8° (stronger radar echoes in dotted line area)

向为自西北向东南，与地形的走向呈90°或150°夹角（顺时针方向），与试验区500 hPa流场方向基本一致；其宏观特征表现为水平尺度较小，回波强度多<40 dBz，最大回波顶高4~5 km，强回波所在高度2~4 km，垂直积分液水含量<1 kg/m²，与前述天气背景分析相呼应；大部分回波移速较快

(>35 km/h)，持续时间30~90 min。对典型局地热对流云个例的回波生消演变进行分析，热对流云回波顶高和强回波所在高度先发展至最大，然后回波强度增至最大值，说明该热对流云发展过程动力抬升起主要作用；通过其各阶段粒子相态的识别分析，进一步验证了局地热对流云通过冷云冰相过程形成降水粒

子，其发展成熟阶段有一定过冷水。

2.3 FY-4A 卫星观测反演产品与雷达回波对比

可见光反射率主要反映云的光学厚度（是指云系在整个路径上的消光总和），云光学厚度越大，反射率就越大^[25]。本文用可见光反射率（>0.4）为阈值判别对流单体。云粒子有效半径（ Re ）是指假设云层水平平均且较厚的条件下云顶粒子的有效半径，可用于进行云中平均粒子大小的判断^[27]，反映云发展旺盛的程度。对正在发展的对流云而言，云发展得越高， Re 越大，当达到一个阈值（14 μm ）时，云中可产生降水性粒子。

将FY-4A卫星观测反演对流云特征与前述714XDP雷达观测热对流云回波进行点对点对比研

究。由前述分析9日16:45编号为2的热对流云回波较前一时刻回波强度减小（回波强度为36 dBZ，所在高度为2.2 km），西侧同时有局地生成回波发展，其最大回波强度（38 dBZ）和强回波所在高度（3.2 km）均大于2号回波，之后西侧回波短暂加强，而2号回波持续减弱（图7a）。对应时刻的卫星可见光反射率图上（图7b），只在西侧回波对应位置有可见光反射率大于0.4的像素点。对于卫星反演 Re （图7c），同样只在西侧回波对应位置有大于18 μm 的像素点。

17:03编号为2的热对流云回波强度持续减小（图8a），最大回波强度和强回波所在高度均是东侧大于西侧。对应时刻卫星可见光反射率图（图8b），相应位置有可见光反射率大于0.6和0.7的像素点，且

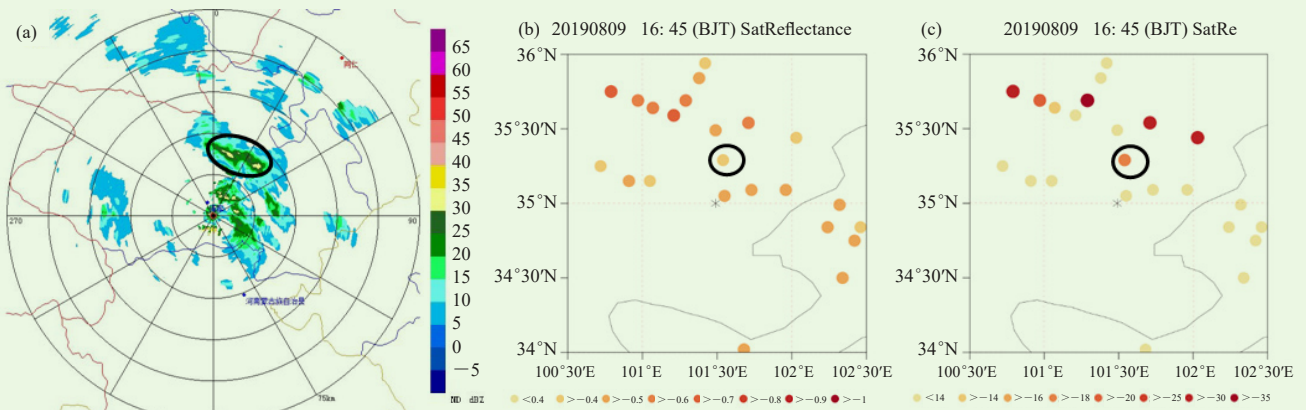


图7 2019年8月9日16:45 雷达回波组合反射率(a)、可见光通道反射率(b)和云粒子有效半径(c)

Fig. 7 Composite reflectivity of radar echoes (a), reflectivity of visible channel (b), and effective particle radius of cloud top (c) at 16:45 BT on 9 August 2019

东侧大于西侧。对于卫星反演 Re （图8c），相应位置出现大于14 μm 和小于16 μm 的像素点，且东侧大于西侧。

综合上述分析，卫星可见光反射率是自上而下

得到整层云的光学厚度，雷达是自下而上对云体的观测，此外对流云发展过程可能伴随垂直切变，云体存在倾斜，所以前述分析组合反射率的大值（较弱）中心对应的可见光反射率较小（较大），且位置可能存

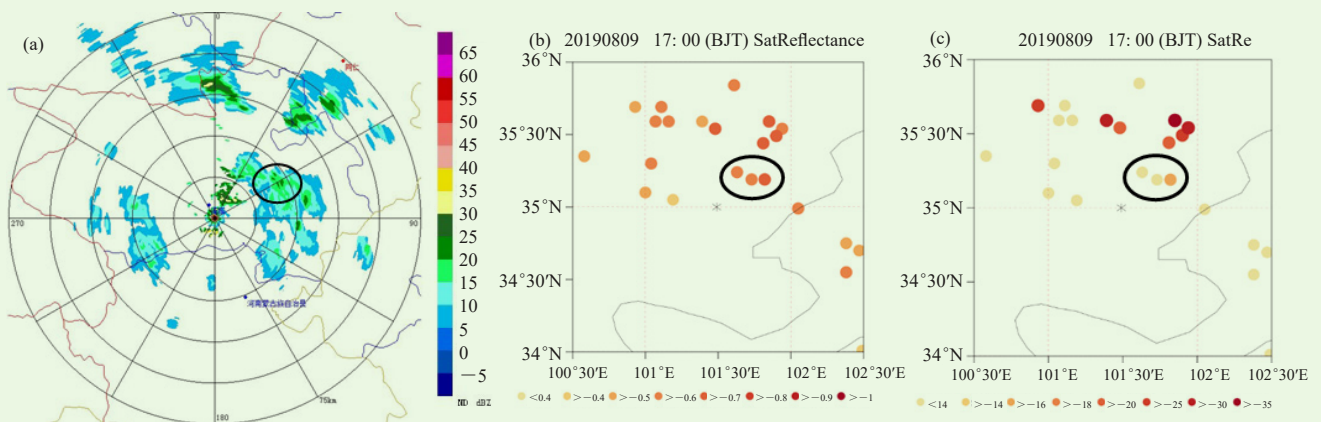


图8 2019年8月9日17:03 雷达回波组合反射率(a)、17:00可见光通道反射率(b)和云粒子有效半径(c)

Fig. 8 Composite reflectivity of radar echoes at 17:03 BT (a) and reflectivity of visible channel (b), effective particle radius of cloud top (c) at 17:00 BT on 9 August 2019

在偏差。卫星反演 Re 代表云发展的旺盛程度和云顶粒子的大小，所以当雷达回波较强或强回波所在高度较高时，对应像素点的 Re 也较大，二者比较一致。

此处只是对一个典型个例进行对比分析，后续可通过更多个例研究卫星可见光反射率对局地热对流云的预报指示作用，验证卫星反演 Re 与回波发展程度的一致性。

3 结论

本文基于青海三江源地区714XDP雷达体扫观测数据分析研究高原局地热对流云的宏微观特征，同时将观测期间FY-4A卫星反演产品与热对流云回波进行点对点对比，分析探讨两者的异同。主要结论如下：

1) 2019年8月9日试验区天气背景、相对湿度分布及温湿度层结为局地热对流云的形成提供了动力条件、热力条件和一定的水汽条件。

2) 局地热对流云回波的识别追踪显示，多数高原热对流云形成于山地迎风坡一侧，回波移动方向为自西北向东南，与地形的走向呈 90° 或 150° 夹角（顺时针方向），与试验区500 hPa流场方向基本一致，多数回波移速 >35 km/h。

3) 归纳总结高原局地热对流云的宏观物理特征，最大回波强度多为 $30\sim 40$ dBz，最大回波顶高 $4\sim 5$ km；强回波所在高度为 $2\sim 4$ km，主要为冷云过程，垂直积分液水含量 <1 kg/m²；由于天气背景存在不利条件，所以9日观测到的高原局地热对流云垂直发展不高，回波强度较小，持续时间较短。

4) 具体分析一个典型局地热对流云回波的发展演变，回波生成于山地迎风坡，发展阶段持续25 min，回波顶高和强回波所在高度先发展至最大，然后回波强度增至最大值，说明有利的动力、热力条件促进高原热对流云的形成。对各发展阶段进行粒子相态识别分析认为该热对流云发展成成熟阶段零度层以上以冰晶、过冷水、霰或小雹为主。

5) 由于卫星与雷达对云观测方式的差异，加上对流云发展过程云体可能存在倾斜，所以卫星反演可见光反射率较大的像素点对应的回波强度较小，且位置存在偏差；卫星反演 Re 较大（ >16 μm ）的像素点与回波强度较大或强回波所在高度较高的位置较一致。

致谢：三江源地区局地热对流云观测是西北区域

人工影响天气能力建设项目（ZQC-R18209）外场试验的组成部分，在此感谢项目组、青海省人影办对外场观测试验的支持、组织和配合。

参考文献

- [1] 李仑格, 孙安平. “三江源”空中大气水资源分析与利用. 青海科技, 2004, (5): 18-23.
- [2] 李纯彦, 姜学恭, 祁伏裕, 等. 青海低涡的统计分析及对内蒙古汛期降水影响研究. 内蒙古气象, 2004, (4): 13-15.
- [3] 刘子臣, 秦莹, 马鹤年, 等. 青海热低压变性过程的分析与统计研究. 陕西气象, 1983, (7): 32-43.
- [4] 徐祥德, 马耀明, 孙焯, 等. 青藏高原能量、水分循环影响效应. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1293-1305.
- [5] 赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验. 气象学报, 2018, 76(6): 833-860.
- [6] 刘黎平, 郑佳峰, 阮征, 等. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及特征初步分析结果. 气象学报, 2015, 73(4): 635-647.
- [7] 阮悦, 阮征, 魏鸣, 等. 基于C-FMCW雷达的高原夏季对流云垂直结构分析研究. 高原气象, 2018, 37(1): 93-105.
- [8] 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. NPP/VIIRS卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征. 气象学报, 2018, 76(6): 968-982.
- [9] 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征. 气象学报, 2009, 67(4): 591-598.
- [10] 李仑格, 德利格尔. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析. 高原气象, 2001, 20(2): 191-196.
- [11] 苏正军, 王广河, 刘卫国. 青海省春季降水云的微物理特征分析应用. 气象学报, 2003, 14(增刊): 36-40.
- [12] 房文, 郑国光, 何观芳. 青海秋季对流云降水及催化过程数值模拟研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 763-769.
- [13] 李艳伟, 郑国光, 杜秉玉, 等. 青海省秋季一次对流云人工增雨的数值模拟. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 328-335.
- [14] 李娟, 游来光, 胡志晋, 等. 黄河上游玛曲地区雨滴谱特征的观测研究. 高原气象, 2006, 25(5): 942-949.
- [15] 韩辉邦, 张博越, 马守存, 等. 黄河上游地区降水雨滴谱特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(06): 119-125.
- [16] 王敏, 李万志. 青海省短时强降水环境场特征和物理量诊断分析. 安徽农业科学, 2013, 41(32): 12658-12661.
- [17] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [18] 周万福, 张国庆, 肖红斌, 等. 2005年雨季“三江源”地区对流云的特征分析. 高原气象, 2008, 27(3): 695-700.
- [19] 王宏, 雷恒池, 德利格尔, 等. 黄河上游地区强对流云特征的模拟分析. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 397-408.
- [20] 赵仕雄, 德利格尔, 涂多彬. 黄河上游降水云层对流特性及降水微结构机制研究. 高原气象, 2003, 22(4): 385-392.
- [21] 王黎俊, 李仑格, 孙安平. 黄河上游人工增雨基地地区夏季云及降水特征分析. 青海气象, 2003(3): 34-38.
- [22] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2006: 187-192.
- [23] Dixon M., and G. Wiener. TITAN: Thunderstorm identification, tracking analysis and nowcasting—a radar-based methodology. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(6): 785.
- [24] 刘贵华, 余兴, 师春香, 等. FY-3A/VIRR反演云微物理特征及与TERRA/MODIS反演结果的比较. 高原气象, 2011, 30(2): 461-470.
- [25] 戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析. 高原气象, 2011, 30(2): 288-298.
- [26] Straka J M, Zrnić D S. An algorithm to deduce hydrometeor types and contents from multi-parameter radar data. Preprints 26th International Conference on Radar Meteorology. Norman: AMS, 1993: 513-515.
- [27] 周毓铨, 陈英英, 李娟, 等. 用FY-2C/D卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验. 气象, 2008, 34(12): 27-37.