

乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究

许皓琳¹ 郑佳锋^{1,2*} 姜涛³ 黎倩⁴ 曾正茂⁵ 张杰¹ 朱克云¹

(1. 高原大气与环境四川省重点实验室, 大气科学学院, 成都信息工程大学, 成都 610225)

(2. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 中国气象局, 南京 210008)

(3. 黑龙江陆军预备役步兵师, 牡丹江 157011)

(4. 甘肃省兰州中心气象台, 甘肃省气象局, 兰州 730020)

(5. 福建省气象信息中心, 福建省气象局, 福州 360001)

摘要: 地基微波辐射计高时间分辨率的水汽密度、积分水汽含量 (water vapor content, V) 和液态水路径 (liquid water path, L) 等资料在强对流降水预警预报和研究中具有重要应用潜力和价值。本文利用这些资料研究了乌鲁木齐和成都两地机场的两次雷暴降水前后不同阶段的水汽分布、水汽演变和汽-液转化等: 乌鲁木齐“7.4”雷暴过程中, 在水汽输送和垂直运动的作用下, 低层水汽密度在降水前显著升高, 于降水后迅速恢复。成都“7.15”雷暴降水前, 整层水汽经历了先增加后减小的演变过程, 水汽积累过程中, 最大增量达 4.99 g m^{-3} ; 水汽转化过程中, 整层水汽迅速减小, 其中水汽密度在云层高度上减小量更大。云中水汽含量 (cloud water vapor content, $IWVc$) 对降水起止的指示效果优于 V 和 L 。乌鲁木齐“7.4”降水前, $IWVc$ 分别增大 1.8 倍和 2.2 倍, 降水结束后, $IWVc$ 迅速减小; 成都“7.15”降水前, $IWVc$ 分别增大 1.3 倍和 1.5 倍, 强降水期间, 云中水汽增长的速度低于水汽转化速度。此外, $IWVc$ 的增减对两地降水强度也有较好指示。乌鲁木齐“7.4”稳定性降水中: $IWVc$ 增加时, 地面降水强度随之增大, 且云中水汽的增量越大, 地面降水强度越大; $IWVc$ 减小时段, 降水量均低于 0.1 mm 。成都“7.15”阵性降水中: $IWVc$ 的积累提前于地面降水的发生, $IWVc$ 积累的越多, 之后地面降水越强。后期逐渐转为稳定性降水时, $IWVc$ 和地面降水又恢复到同增减的关系, $IWVc$ 增减量的减小也预示了降水的减弱和结束。

关键词: 微波辐射计, 雷暴降水, 液态水, 云中水汽含量

中图分类号: P446

文献标识码: A

DOI:

Analysis of Water Vapor Variation and Transformation during the Two Airport Thunderstorms in Urumqi and Chengdu

XU Haolin¹ ZHENG Jiafeng^{1,2} Jiang Tao³ LI Qian⁴ Zeng Zhengmao⁵ ZHANG Jie¹ ZHU Keyun¹

1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008

3 Infantry Division of Heilongjiang Army Reserve, Mudanjiang 157011

*国家自然科学基金(41705008)、江苏省气象科学研究所北极阁基金(BJG201901)和成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201724)共同资助。

第一作者: 许皓琳, 主要从事? 研究, E-mail: 407300799@qq.com。

通信作者: 郑佳锋, 主要从事雷达气象学和灾害性天气探测等研究, E-mail: zjf1988@cuit.edu.cn。

Abstract: The high-temporal-resolution water vapor density, integral water vapor content (V) and liquid water path (L) measured by ground-based microwave radiometer have important application potential and value in the prediction and research of severe convective precipitation. The paper uses these data to study the water vapor distribution, evolution and vapor-liquid conversion in different stages before and after the two thunderstorms that happened in Urumqi and Chengdu airports, respectively. During the July 4 thunderstorm in Urumqi, under the action of water vapor transport and vertical motion, the low-level water vapor density significantly increased before precipitation and recovered rapidly after precipitation. Before the July 15 thunderstorm precipitation in Chengdu, the whole-layer water vapor experienced the evolution process of increasing first and then decreasing. During the process of water vapor accumulation, the maximum increment was 4.99 g m^{-3} . During the process of water vapor conversion, the whole-layer water vapor decreased rapidly, of which the water vapor density decreased more significantly at the height of clouds. The cloud water vapor content ($IWVc$) inversion in the text is better than V and L in indicating the onset and end of precipitation. Before the Urumqi July 4 precipitation, $IWVc$ increased by 1.8 times and 2.2 times, respectively. After the end of precipitation, $IWVc$ decreased rapidly. Before the precipitation in Chengdu on July 15, $IWVc$ increased by 1.3 times and 1.5 times, respectively. During the severe precipitation, the growth rate of water vapor in the cloud was lower than that of water vapor conversion. In addition, the increase or decrease of $IWVc$ can also be good indicators for the precipitation intensity of the two thunderstorm processes. For the stable precipitation of the Urumqi July 4 thunderstorm, as the $IWVc$ increased, the surface precipitation intensity increased. Moreover, the greater the increment of water vapor in clouds, the higher the surface precipitation intensity. In the period when the $IWVc$ decreased, the precipitation amount was less than 0.01 mm. For the showery precipitation during the Chengdu July 15 thunderstorm, the accumulation of $IWVc$ was ahead of the occurrence of surface precipitation. The more the $IWVc$ accumulated, the severer the surface precipitation happened. After turning into stable precipitation, the relationship between $IWVc$ and surface precipitation returned to the corresponding increase or decrease, and the decline of $IWVc$ increment or decrement also indicated the weakening and end of the precipitation.

Keywords: microwave radiometer, thunderstorm precipitation, liquid water, water vapor content in the cloud

引言

水汽是水循环中最活跃的成分,水汽和液态水的增减变化对云雾生成和降水发生发展有重要的影响(王秀荣等, 2003)。过去,许多学者对各地区降水的水汽特征开展了大量研究(韩军彩等, 2012; 田红瑛等, 2014; Wang et al, 2015; 谢欣汝等, 2018),但主要采用探空和再分析等资料,这些资料虽然提供了大范围区域内水汽收支、汇聚、输送等情况,但在局地短时强降水的天气业务应用和研究中适用性有限。为更精确描述短时强降水期间大气水汽的时空变化特征,需要利用时空分辨率更高和精度更好的探测资料(郑祚芳等, 2009;

张文龙等, 2014)。

随着大气遥感技术的发展,近年来,微波辐射计的发展十分迅速。它利用了水汽在 23.87 GHz 附近的强吸收带来遥感大气水汽(王健等, 2011; Pushpa et al, 2016)。微波辐射计具有时空分辨率高的特点,时间分辨率为 2~3 min,垂直分辨率在 1200 m 内为 50 m。对于其观测数据质量,刘红燕等(2009)对比得出地基微波辐射计的水汽探测效果比 GPS 更好。Chan(2009)、王志诚等(2018)等人比对了微波辐射计与气球探空数据,得到两者相关性较好的结果。基于微波辐射计高时空分辨率观测资料,国内外学者也对不同阶段降水过程的水汽、液态水演变进行了相关研究。如陈添宇等(2007)、李铁林等(2007)均利用辐射计水汽资料,观测到降水前水汽的显著增大过程。Zelinka and Hartmann(2009)、Holloway and Neelin(2010)得出水汽含量的大小对降水的强度和时间均有影响,进一步提出初始较高的水汽含量会导致更高的降水概率。李军霞等(2017)指出液态水和水汽的迅速增大可作为降水发生的指示因子。丁虹鑫等(2018)结合云雷达和辐射计资料反演得到大气湿度垂直廓线,牟艳彬等(2018)研究表明辐射计水汽资料会在对流性天气发生前出现明显跃升反应。Calheiros and Machado(2014)提出,不同地区间的云、降水特征差异较大,为了研究这一差异,张文刚等(2015)利用同一型号的辐射计资料比对了多区域间水汽、液态水的演变特征,发现各地区降水前水汽累积的量明显不同。这些研究证明,微波辐射计具有监测多地区降水和大气水汽连续变化的能力。

当前的研究主要集中在辐射计数据在强对流天气中的应用效果上,而对雷暴、雷暴降水期间水汽的演变特征及其与降水的定量关系研究还比较有限。乌鲁木齐地窝堡机场和成都双流机场均处于平原,地势平坦,海拔相近(500~600 m),但由于处于不同气候带,导致其气候和降水存在巨大差异(冉心, 2001; 姚俊强等, 2013)。因此,文中利用分别安装在两机场的 HTG-4 型微波辐射计,对发生在乌鲁木齐地窝堡机场和成都双流机场的两次夏季雷暴降水过程中不同阶段的水汽、液态水特征和演变进行研究,旨在为微波辐射计资料于不同区域强对流天气预警预报和机场航空安全保障方面提供一定参考。

1 资料与方法

本文采用资料为乌鲁木齐地窝堡机场和成都双流机场两部 HTG-4 型地基微波辐射计资料和机场地面观测降水资料。其中,HTG-4 型地基微波辐射计由北京爱尔达电子设备有限公司生产,可以提供 0-10 km 的温度、相对湿度、水汽密度、积分水汽含量(V)和积分液

态水路径 (L), V 和 L 的反演公式如下:

$$V = \int_0^{z_0} \rho_v(z) dz \quad (1)$$

$$L = \int_0^{z_0} dm_L \quad (2)$$

式中: $z_0=10$ km, ρ_v 为水汽密度, z 为垂直高度, m_L 为液态水质量。

由于观测的 V 同时包含了探测体积所有水汽的含量, 为了进一步了解云内的水汽情况, 本文进一步定义了云内水汽含量 IWV_C , 云内水汽含量是指探测方向上云层内水汽的总含量, IWV_C 计算需要先确认出云底和云顶的高度, 本文对云底和云顶位置的计算采用李绍辉等 (2017) 提出的方法, 即以温度露点差阈值法来判断云底高度, 以相对湿度阈值法来判断云顶高度。由于乌鲁木齐和成都两地湿度分布差异大, 成云致雨的水汽条件不同, 需要分别选取适用的阈值。结合两地机场云高记录, 乌鲁木齐地窝堡机场地区取温度露点差阈值为 4°C , 相对湿度阈值为 75%; 成都双流机场地区取温度露点差阈值为 3°C , 相对湿度阈值为 80%。计算得到云层高度后, IWV_C 可由以下公式进一步反演:

$$IWV_C = \int_{CBH}^{CTH} \rho_v(z) dz \quad (3)$$

式中: CBH 为云底高度, CTH 为云顶高度, ρ_v 为各层水汽密度值。

2 实况介绍

2018 年 7 月 4-5 日, 乌鲁木齐地窝堡机场发生一次在高空槽线影响下生成的雷暴降水过程。此次雷暴降水过程 (以下简称为乌鲁木齐“7.4”雷暴过程) 主要分为两个时段, 22:25-22:35 为第一降水时段, 降水量为 0.4 mm; 23:52-次日 01:35 为第二降水时段, 降水量为 5.6 mm, 该个例为地窝堡机场当年夏季雷暴降水过程中降水量最大的个例。2018 年 7 月 15 日-16 日, 成都双流机场在低空切变线影响下出现一次雷暴降水过程 (以下简称为成都“7.15”雷暴过程), 此次降水也分为两时段, 22:56-23:42 为第一时段降水, 降水量 0.2 mm, 次日 00:47-04:27 为第二时段降水, 降水量为 35 mm。

由于两机场距离当地的气象站均超过 40 km, 空间差异较大, 且气球探空数据的时间精度有限, 测站资料均不能准确反应雷暴降水前的温湿分布和水汽特征, 因此, 利用两地机场微波辐射计的高时间分辨率资料对这两次雷暴降水过程的水汽分布演变及“气-液”相互转化等方面进行对比和研究。对比分析前, 对文中两次雷暴过程中微波辐射计温度、水汽资料质量进行初步评估, 结果如表 1。可见, 该微波辐射计测量的温度和水汽资料具有较好的可

靠性，与气球探空结果的相关系数都达到了 0.9217 以上。

表 1 微波辐射计和测站气球探空数据相关系数

Table 1 Correlation coefficients between microwave radiometer data and station balloon sounding data

地点		相关系数	
		温度	水汽密度
乌鲁木齐地窝堡机场	4 日 08:00	0.9995	0.9909
	4 日 20:00	0.9977	0.9217
成都双流机场	15 日 08:00	0.9869	0.9683
	15 日 20:00	0.9988	0.9987

注：表中气球探空水汽密度数据由实际水汽压换算得到。

Note: The balloon sounding water vapor density data is converted from the actual water vapor pressure.

3 两次雷暴过程的水汽分布和演变特征分析

图 1 为乌鲁木齐“7.4”和成都“7.15”两次雷暴过程中微波辐射计探测的水汽密度垂直分布。两地水汽密度分布的较大差异，体现了两个地区的气候差异。乌鲁木齐位于干旱区，水汽资源匮乏，地表水汽密度为 12~14 g m⁻³，水汽密度在 1 km 之上均低于 5 g m⁻³，空气中水汽基本存在于 0~7 km。而成都气候湿润，地表水汽密度达 20~22 g m⁻³，低层 0~3 km 水汽密度均大于 10 g m⁻³，水汽含量远高于乌鲁木齐。高空到 9 km 处仍存在少量水汽。

对于两个过程的降水（降水时段如图 1 中虚线位置），乌鲁木齐“7.4”降水发生时，低层水汽密度迅速升高（图 1a）。在第一时段降水发生前，低空 1 km 以下的水汽密度从 7~9 g m⁻³ 增加到 10~12 g m⁻³，降水结束后恢复正常。第二时段降水中，0~2 km 水汽密度在降水开始时迅速跃升，地表水汽密度达 16.5 g m⁻³，降水期间，低层水汽密度呈双峰型变化，水汽密度在 13~15.5 g m⁻³ 之间波动，降水减弱后水汽密度迅速减小到 11 g m⁻³ 以下。对于成都“7.15”雷暴过程，微波辐射计的水汽密度变化对第二时段强降水更为敏感（图 1b）。由于第一时段降水量仅为 0.2 mm，且当地水汽含量较大，降水前低层水汽无明显增加。第二时段降水前一小时，低层水汽密度升高，高层水汽密度减小，水汽迅速向低层积聚，地表水汽密度从 21.6 g m⁻³ 增加到 28.5 g m⁻³。待整层水汽密度迅速减小到一极低值时，降水开始。降水期间，高低层水汽密度不断波动变化，降水结束后，地表水汽密度仍维持在 24 g m⁻³ 之上。

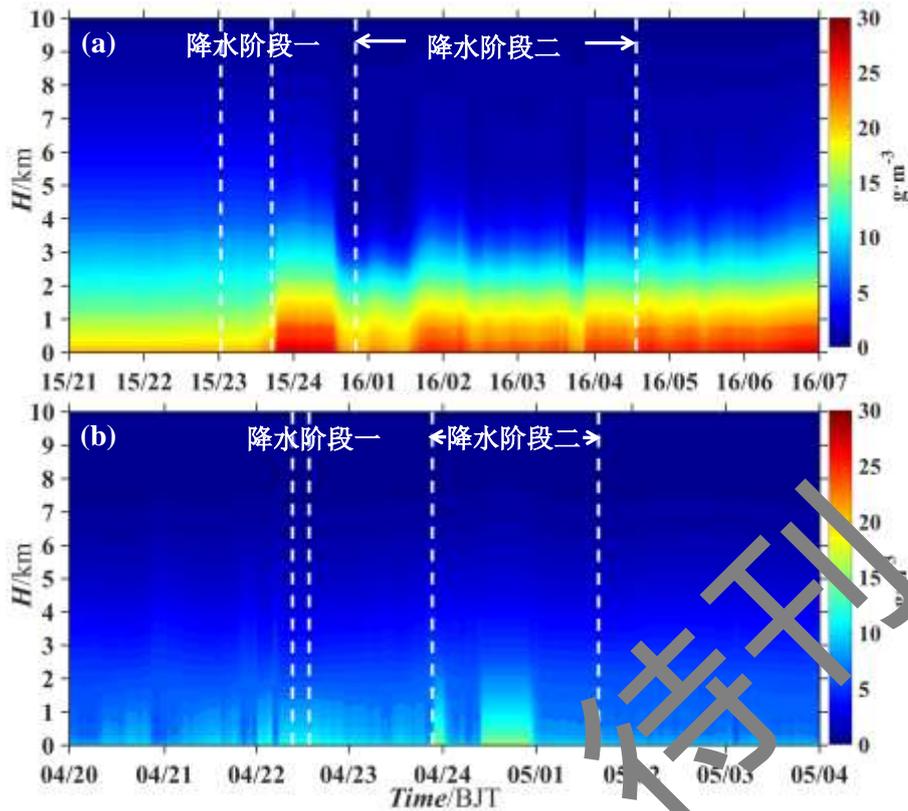


图1 2018年7月4日20:00-5日04:00地窝堡机场(a)以及7月15日21:00-16日06:00成都双流机场(b) 0~10 km的水汽密度垂直分布, 图中虚线划分了降水的两个时段, 横坐标为北京时间(斜线左侧为日期, 右侧为小时)

Fig.1 Vertical distribution of 0-10 km water vapor density at Diwopu Airport from 20:00 BT 4 to 04:00 BT 5 July 2018 (a) and at Chengdu Shuangliu Airport from 21:00 BT 15 to 06:00 BT 16 July 2018 (b) (The dashed line divides the two periods of precipitation)

图2和图3分别给出了乌鲁木齐“7.4”和成都“7.15”雷暴过程两个时段降水前的水汽密度高度廓线, 图中选取的相邻观测时次为降水前高低层水汽密度发生显著变化的前后时刻, 代表降水发生前高低层水汽条件的变化情况。乌鲁木齐“7.4”过程降水前, 以100 m为界, 上下层水汽直减率存在显著差异。第一时段降水前, 如图2a, 22:10, 0~100 m水汽密度从 14.1 g m^{-3} 骤减为 8.6 g m^{-3} , 此后10 min, 水汽密度在0~1 km迅速增大, 1 km以上均匀减小, 水汽密度最大增量达 2.7 g m^{-3} 。第二时段降水前, 如图2b, 23:47, 0~100 m水汽密度从 15.1 g m^{-3} 骤减为 8.7 g m^{-3} , 23:47-23:57, 水汽密度在0~3 km增大, 水汽密度最大增量达 6.4 g m^{-3} 。两个阶段水汽密度随高度变化表明, 在临近降水时, 0~100 m的水汽得到补充, 使得整层水汽均匀分布。其中, 第一时段降水前, 雨水从高层凝结降落, 受到温度的影响, 液态水下降到低层时经历蒸发过程, 导致水汽在高层减少、低层增加。而第二时段降水强度较大, 雨水下落时夹带了大量水汽使得高层水汽无显著减小, 低层水汽在强水汽辐合作用下迅速增大。

成都“7.15”雷暴过程的第一时段降水量仅为 0.2 mm，微波辐射计测量的水汽密度在空间上并没有反应出明显变化，文中仅对第二时段降水进行分析。如图可见，第二时段降水前，整层水汽经历了先增加后减小的变化过程，在图 3a 中，23:41-23:51，水汽密度在 0~4.3 km 增大，在 4.3~9 km 略有减小，水汽密度最大增量达 4.99 g m^{-3} 。相较于乌鲁木齐“7.4”降水过程，成都“7.15”过程降水前水汽增长的高度更高，周围水汽输送更强，导致降水量更大。至 7 月 16 日 00:31-00:41，如图 3b，整层水汽密度迅速减小，水汽开始凝结转化，0.5 km、3.3 km 处的水汽密度减小最快，10 min 内减小 5.3 g m^{-3} 左右，在此高度上下，出现水汽凝结成云现象。

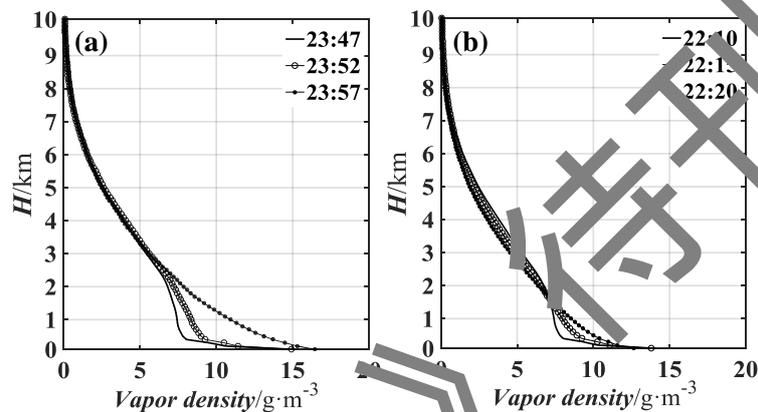


图 2 乌鲁木齐“7.4”雷暴过程第一时段降水前 (a) 第二时段降水前 (b) 水汽变化曲线

Fig.2 Variation curves of water vapor before the first period of the thunderstorm process (a) and before the second period of precipitation (b) during the July 4th thunderstorm in Urumqi

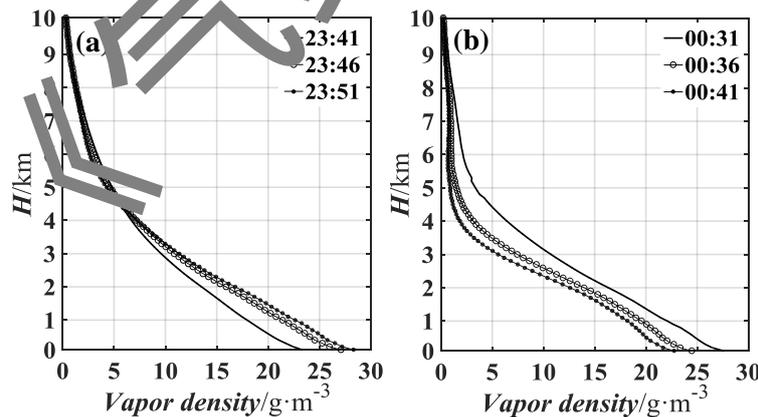


图 3 成都“7.15”雷暴过程第二时段降水前 15 日 (a)、16 日 (b) 水汽变化曲线

Fig. 3 Variation curves of water vapor on the 15th (a) and 16th (b) before the precipitation during the second period of the July 15th thunderstorm in Chengdu

V 和 L 能反应测站上空 0~10 km 垂直柱内总体的水汽和液态水含量，由图 4 可见，降水时 V 和 L 总的变化趋势较为一致，都对峰值。乌鲁木齐“7.4”雷暴过程如图 4a 所示，第

一阶段降水发生前, V 、 L 在 21:42-22:15 迅速增长, 分别达到峰值 36.1 kg m^{-2} 和 1.3 kg m^{-2} 。第二时段降水发生在 V 和 L 的峰值期, 但在降水前, 两值也有提前的突增现象, V 于降水前 3 min 开始增大, 达到 45.5 kg m^{-2} 时降水开始, L 于降水前 15 min 显著增大, 增长到 2.7 kg m^{-2} 时降水开始。降水期间, V 和 L 随着降水强度的变化, 呈显著的双峰型增减变化, 两值均在降水减弱后迅速减小。

成都“7.15”雷暴降水过程如图 4b, 第一时段降水前 10 min, V 、 L 分别达到峰值为 70.3 kg m^{-2} 和 2.7 kg m^{-2} ; 降水发生在其低值区域, 降水期间, V 低值与 L 高值对应, 反应了降水时的“汽-液”的水相态变化。第二时段降水前, L 于 16 日 0:05 增大到 3.5 kg m^{-2} , V 于 00:18 达到 87.5 kg m^{-2} 。降水开始后, V 、 L 均维持峰值, 无明显增减变化。说明降水强度较大时, 会影响 V 和 L 一直处于高值状态, 难以预示降水的减弱结束阶段。

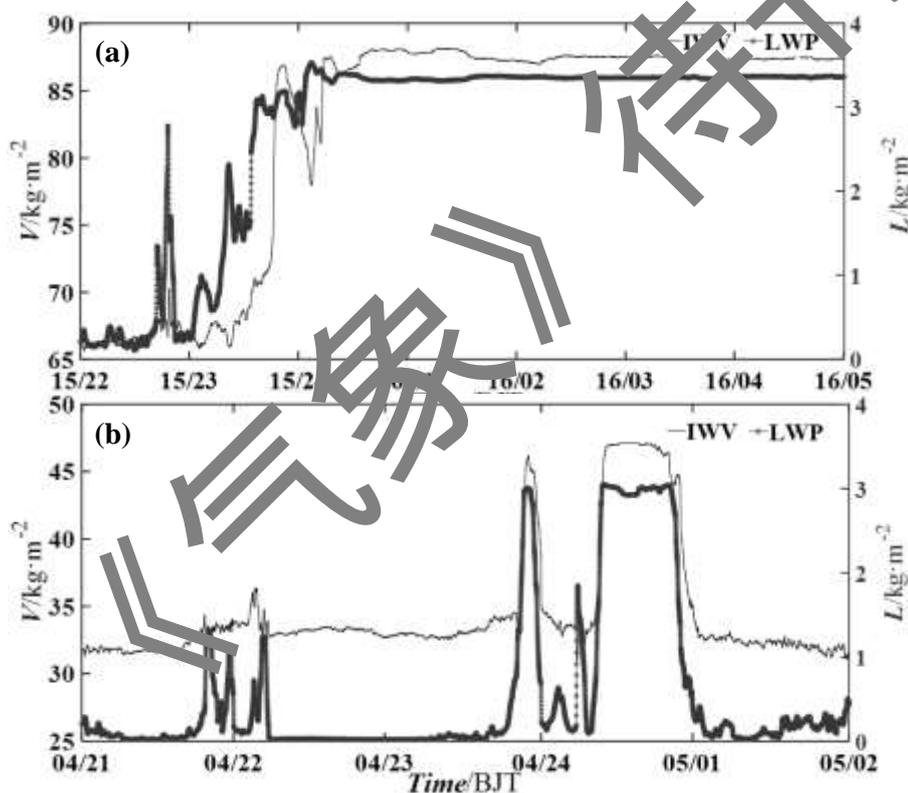


图 4 2018 年 7 月 4 日 20:00-5 日 04:00 (a) 及 7 月 15 日 22:00-16 日 05:00 (b) 的 V 和 L 演变, 图中横坐标为北京时 (斜线左侧为日期, 右侧为小时)

Fig.4 The evolution of V and L from 20:00 BT 4 to 04:00 BT 5 July 2018 (a) and from 22:00 BT 15 to 05:00 BT 16 July 2018 (b)

4 云中水汽演变特征和地面降水关系分析

云中水汽含量作为地面降水的主要来源之一 (孙旭映等, 2013), 其发展演变与地面降

水有密切联系。按照本文方法，将云底至云顶范围内云体的水汽含量进行反演得到 IWV_C 。两次雷暴过程的 IWV_C 变化如图 5 所示。对于乌鲁木齐“7.4”雷暴过程，低层 2~2.4 km 的温度露点差低于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ ，6.9 km 以下相对湿度高于 75%，云层主要分布在 2~7 km 之间。从图 5a 可见，两个时段降水前， IWV_C 均出现突然增大的现象：第一时段降水前， IWV_C 呈双峰型波动增大，最大值为 20.2 kg m^{-2} ，为降水前的 1.8 倍。第二时段降水发生在 IWV_C 跃升期间，降水开始时， IWV_C 达到 24.4 kg m^{-2} ，为降水前的 2.2 倍，降水期间， IWV_C 随着降水强度的变化呈双峰型波动，最高增长到 36.2 kg m^{-2} ，为降水前的 3.3 倍。降水结束后， IWV_C 迅速减小到 20 kg m^{-2} 以下。

成都“7.15”雷暴过程如图 5b，当日大气整层湿度较大，降水前，低层 300 m 以上温度露点差均低于 $2.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，9 km 以下相对湿度均大于 80%，即低云在 300 m 左右出现，高空云层一直延续到 9 km 处。该个例两时段的降水均发生在 IWV_C 低值区： IWV_C 于第一时段降水前 1 h 起开始增大，在降水前半小时达到峰值 65.6 kg m^{-2} ，为降水前的 1.3 倍。第一时段降水结束后， IWV_C 再次增长，于 16 日 00:21 达到峰值 74.3 kg m^{-2} ，为降水前的 1.5 倍。当 IWV_C 迅速减小到一极低值时，降水开始。此后， IWV_C 不断波动变化，但始终低于 65 kg m^{-2} ，说明强降水期间云中水汽增长的速度低于水汽转化速度。

对比两次降水过程发现，成都“7.15”降水前 IWV_C 的峰值远高于乌鲁木齐“7.4”降水，但后者降水时 IWV_C 的增长倍数却更大。这意味着，由于乌鲁木齐地窝堡机场平时云量较少，水汽匮乏，降水时当地的强水汽输送过程导致迅速成云致雨，降水后空中云层很快散去，水汽恢复常态。而成都双流机场日常云量较大，降水时水汽输送和本地水汽含量均较大，降水后，当地依旧存在云层，水汽维持在高值。结合第 3 节中分析的内容可得到：当降水量较小时， IWV 、 LWP 和 IWV_C 均能良好指示降水的开始和结束，尤其是乌鲁木齐“7.4”过程和成都“7.15”过程的第一时段降水。而当降水强度较大时， IWV_C 比 IWV 和 LWP 更加敏感，云中水汽的徒增（减）依然能有效反映出强降水的发生（结束）以及地面降水强度的变化，如成都“7.15”过程的第二时段降水（张恒等，2017）。

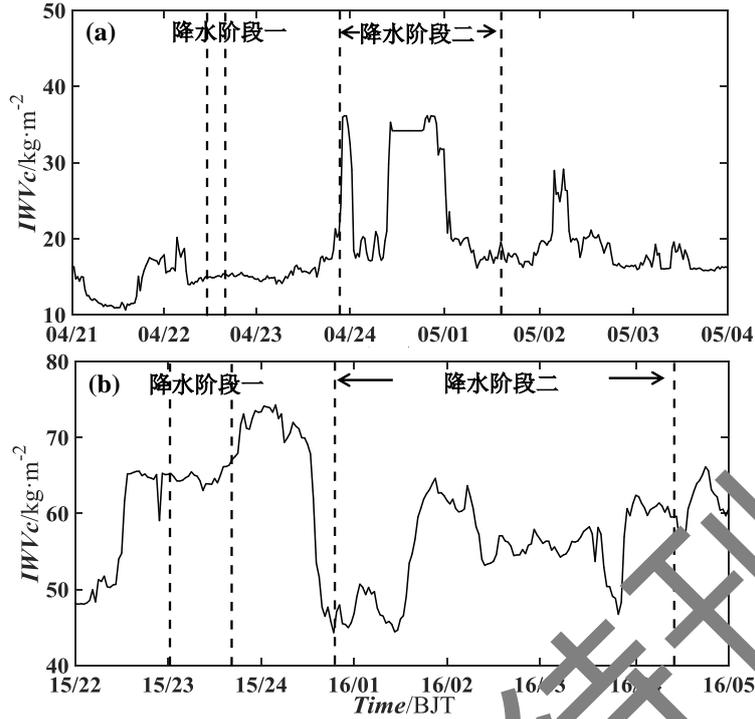


图 5 2018 年 7 月 4 日 21:00-5 日 04:00 (a) 及 7 月 15 日 22:00-16 日 05:00 (b) 的 IWV_c 演变, 图中虚线划分了降水的两个阶段, 图中横坐标为北京时间 (斜线左侧为日期, 右侧为小时)

Fig.5 The evolution of IWV_c from 21:00 BT 4 to 04:00 BT 5 July 2018 (a) and from 22:00 BT 15 to 05:00 BT 16 July 2018 (b) (The dashed line divides the two stages of precipitation)

为了研究云中水汽含量与地面降水强度之间的关系, 选择两次雷暴降水过程中雨量较为明显的第二时段进行分析。图 6 给出了云中积分含水量 IWV_c 和地面雨量的曲线图。对于乌鲁木齐“7.4”过程第二降水阶段(图 6a), 在 23:40-00:00 和 00:10-00:50 期间, IWV_c 分别增加 12.2 kg m^{-2} 和 15.2 kg m^{-2} , 对应时段累积降水量达 0.31 mm 和 7.8 mm ; 而 00:00-00:10 和 00:50-01:30 期间, IWV_c 持续减小, 对应时段降水量均低于 0.01 mm 。说明当 IWV_c 迅速增加时, 地面降水强度也随之增大, 即云中水汽的增量越大, 地面降水强度越大。对于成都“7.15”过程第二降水阶段(图 6b), 云中水汽的积累提前于地面降水的发生, IWV_c 在降水开始前已达到 73.9 kg m^{-2} , 地面降水发生在 IWV_c 减小的阶段。在 7 月 16 日 00:00-00:50 期间, IWV_c 共减小 27.3 kg m^{-2} , 该时段内地面降水逐渐增大, 累积降水量达 7.76 mm 。01:20-02:00, 云中水汽开始积聚, IWV_c 共增大 17.8 kg m^{-2} , 对应地面降水迅速减小, 最低降到 0.1 mm 。待 IWV_c 又转为下降趋势后, 地面降水又呈增大趋势。在 02:40 后, IWV_c 在 55 kg m^{-2} 上下波动, 无显著增减, 地面降水逐渐减弱结束。整个降水过程中, 前期 IWV_c 积累的越高,

地面降水越强， IWV_C 呈减小趋势或增量较小时，由于水汽的缺乏，地面降水呈减弱趋势。

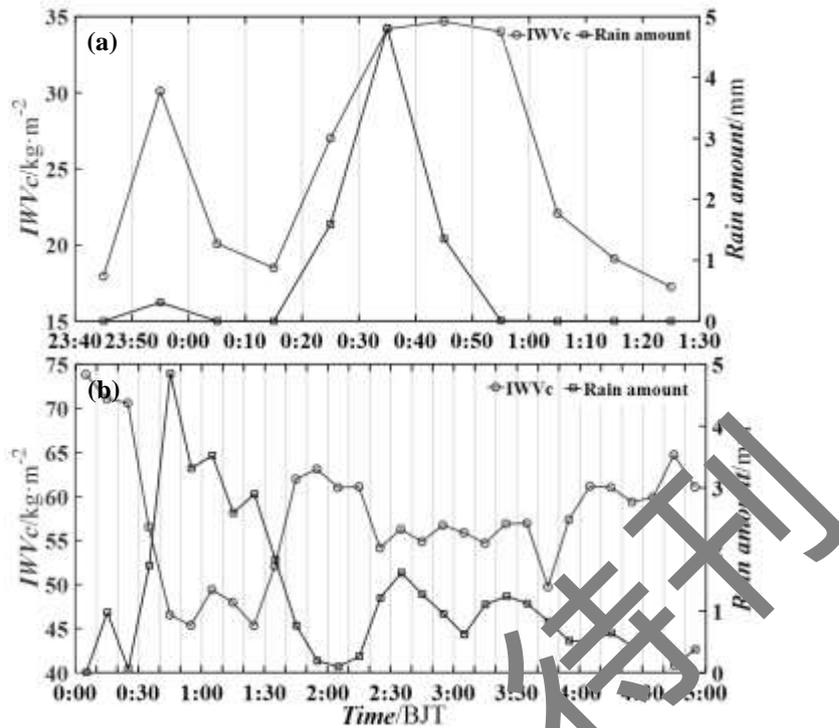


图 6 2018 年 7 月 4 日 23:40-5 日 01:30 (a) 和 2018 年 7 月 16 日 0:00-05:00 (b) 辐射计传感器实时降水量、 IWV_C 的 10 min 累积量

Fig.6 Evolutions of radiometer sensor real-time precipitation and 10 min accumulation value of IWV_C from 23:40 BT 4 to 01:30 BT 5 July 2018 (a) and from 0:00 BT 4 to 05:00 BT 5 16 July 2018 (b)

由此可见，乌鲁木齐“7.4”雷暴过程中，单位时间降水量较小，水汽的凝结降落对 IWV_C 值无明显影响，地面降水与 IWV_C 的增减保持一致。而成都“7.15”雷暴降水过程为短时强降水，降水发生时，大量云中水汽迅速凝结为液态水降落，造成了 IWV_C 在降水时刻迅速减小，地面累积降水量增大， IWV_C 和地面降水呈反向变化关系。由于液态水在降落过程中部分液滴会被蒸发，降水总量一般低于 IWV_C 增量，而乌鲁木齐“7.4”降水中 IWV_C 虽与降水量同增同减，但实际降水量远低于 IWV_C 增量，推测为降水转化率较低或液态水降落的过程中蒸发量较大的缘故。这进一步反映了，降水的发生与强度除了水汽条件的限制外，还受到当地大气环流背景以及动力和热力条件的影响（赵玲等，2010）。

综合得到，乌鲁木齐“7.4”降水过程和成都“7.15”过程在水汽的分布和变化上存在较大差异，这些水汽参数的差异初步反映了两地雷暴降水发生时水汽条件上的差异，下表给出了此两次降水过程中，辐射计探测得到的各水汽参数的对比结论。

表 2 乌鲁木齐和成都两地雷暴过程水汽条件对比结果

Table 2 Comparison results of water vapor conditions during the thunderstorms in Urumqi and Chengdu

水汽参数	乌鲁木齐“7.4”过程	成都“7.15”过程
水汽密度垂直分布	0~7/km	0~9/km
地表水汽密度含量	12~14/g·m ⁻³	20~22/g·m ⁻³

雷暴降水期间地表水汽密度峰值	16.5/g·m ⁻³	28.5/g·m ⁻³
雷暴降水期间 <i>IWV</i> 峰值	45.5/kg·m ⁻²	87.5/kg·m ⁻²
雷暴降水期间 <i>LWP</i> 峰值	2.7/kg·m ⁻²	3.5/kg·m ⁻²
雷暴降水期间 <i>IWVc</i> 峰值	36.2/kg·m ⁻²	74.3/kg·m ⁻²

5 结论

地基微波辐射计能够提供高时间分辨率的温度、相对湿度、水汽密度、积分水汽含量和液态水路径等,对强对流天气的业务预警和研究有重要意义。本文利用微波辐射计资料对乌鲁木齐地窝堡和成都双流机场两个地区两次雷暴降水过程不同阶段的水汽分布、水汽演变和汽-液转化等进行了研究。主要结论包括:

(1) 由于气候差异,乌鲁木齐地窝堡和成都双流机场水汽垂直分布存在明显差异,前者水汽分布在 0~7 km,而后者水汽分布在 0~9 km,且低空的水汽前者高出 6~8 g m⁻³。乌鲁木齐“7.4”过程降水前,在水汽输送和垂直运动的作用下,低层 0.1 km 处水汽密度迅速达到 10 g m⁻³ 以上,降水后高低层水汽密度迅速恢复。成都“7.15”降水前,整层水汽经历了先增加后减小的演变过程,水汽积累过程中,水汽密度在 0~4.3 km 增长,最大增量达 4.99 g m⁻³;水汽转化过程中,整层水汽密度迅速减小,其中云层高度上(0.5 km、3.3 km)水汽密度的减小量达 5.3 g m⁻³,高于其他降水过程。

(2) 文中定义的云中水汽含量 (*IWVc*) 对不同强度降水起止的指示效果优于积分水汽含量 (*V*) 和积分液态水路径 (*L*)。乌鲁木齐“7.4”过程降水前,*IWVc* 分别增大 1.8 倍和 2.2 倍,降水结束后,*IWVc* 迅速减小到 20 kg m⁻² 以下;成都过程 7.15 降水前,*IWVc* 分别增大 1.3 倍和 1.5 倍,降水结束后,*IWVc* 的 10 min 变化量低于 10 kg m⁻²。

(3) *IWVc* 的增减与两地地面降水量指示效果较好。对两次过程的第二时段降水进行分析,乌鲁木齐“7.4”过程中,*IWVc* 增加,地面降水强度随之增大,且 *IWVc* 增量越大,地面降水强度越大;*IWVc* 减小时段,降水量很小,均低于 0.01 mm。成都“7.15”过程中,降水前期,*IWVc* 与地面降水呈反向变化,降水前 *IWVc* 累积的越多,之后地面降水越强;降水后期,*IWVc* 的 10 min 变化量低于 10 kg m⁻²,此时 *IWVc* 和地面降水呈同增减的关系,预示了地面降水的减弱和结束。

综合来看,微波辐射计水汽资料能够展现不同地区大气水汽的分布特征,以及降水过程中各层水汽的演变情况 *IWVc* 对雷暴降水的预警和识别效果要优于 *V* 和 *L*。根据 *IWVc* 随降

水量的不同变化,能对降水强度进行区分。

参考文献

- 陈添宇, 陈乾, 丁瑞津, 2007. 地基微波辐射计监测的张掖大气水汽含量与雨强的关系[J]. 干旱区地理, 30(4): 501-506. Chen T Y, Chen Q, Ding R J, 2007. Relationship between atmospheric vapor content monitored by ground-based microwave radiometer and rain intensity in Zhangye Prefecture[J]. Arid Land Geogr, 30(4): 501-506 (in Chinese).
- 丁虹鑫, 马舒庆, 杨玲, 等, 2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J]. 气象, 44(12): 1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12): 1604-1611 (in Chinese).
- 韩军彩, 周顺武, 吴萍, 等, 2012. 青藏高原上空夏季水汽含量的时空分布特征[J]. 干旱区研究, 29(3): 457-463. Han J C, Zhou S W, Wu P, et al, 2012. Spatial distribution of water vapor content over the Qinghai-Tibet Plateau in Summer[J]. Arid Zone Res, 29(3): 457-463 (in Chinese).
- 李军霞, 李培仁, 晋立军, 等, 2017. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J]. 干旱气象, 35(5): 767-775. Li J X, Li P R, Jin L J, et al, 2017. Remote sensing of precipitable water vapor features and application in precipitation analysis by using ground-based microwave radiometer[J]. J Arid Meteor, 35(5): 767-775 (in Chinese).
- 李绍辉, 孙学金, 张日伟, 等, 2017. 探空资料云检测及其统计研究[J]. 气象科学, 37(3): 401-408. Li S H, Sun X J, Zhang R W, et al, 2017. Cloud determination of radiosonde data and its statistical study[J]. J Meteor Sci, 37(3): 401-408 (in Chinese).
- 李铁林, 刘金华, 刘艳华, 等, 2007. 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析[J]. 气象, 33(12): 62-68. Li T L, Liu J H, Liu Y H, et al, 2007. Case analysis of precipitable water and cloud liquid water measured by dual frequency microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 33(12): 62-68 (in Chinese).
- 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等, 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学, 33(2): 388-396. Liu H Y, Wang Y C, Wang J L, et al, 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-Channel Microwave Radiometer in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 33(2): 388-396 (in Chinese).
- 牟艳彬, 宋静, 傅文伶, 等, 2018. HTG-4 型微波辐射计的航空气象预报应用研究[J]. 高原山地气象研究, 38(1): 35-41. Mou Y B, Song J, Fu W L, et al, 2018. Study on meteorological application for civil aviation with HTG-4 microwave radiometer[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 38(1): 35-41 (in Chinese).
- 冉心, 2001. 双流机场雷暴的气候特征分析及预报初探[J]. 高原山地气象研究, 21(4): 27-30, 42. Ran X, 2001. Analysis and brief discussion on forecast of thunderstorms at Shuangliu Airport[J]. J Sichuan Meteor, 21(4): 27-30, 42 (in Chinese).
- 孙旭映, 李耀辉, 邓祖琴, 2013. 一次层状云降水过程中液态水含量的演变特征[J]. 干旱区资源与环境, 27(10): 81-86. Sun X Y, Li Y H, Deng Z Q, 2013. The liquid water evolution in a stratiform cloud-precipitation process[J]. J Arid Land Res Environ, 27(10): 81-86 (in Chinese).
- 田红瑛, 田文寿, 雒佳丽, 等, 2014. 青藏高原地区上对流层-下平流层区域水汽分布和变化特征[J]. 高原气象, 33(1): 1-13. Tian H Y, Tian W S, Luo J L, et al, 2014. Characteristics of water vapor distribution and variation in upper troposphere and lower stratosphere over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 33(1): 1-13 (in Chinese).
- 王健, 崔彩霞, 刘惠云, 2011. 基于微波辐射计的乌鲁木齐水汽日变化初步分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 5(6): 22-26. Wang J, Cui C X, Liu H Y, 2011. Preliminary analysis of the precipitable water vapor daily variation by the ground-based 35-channel microwave radiometer in Urumqi[J]. Desert Oasis Meteor, 5(6): 22-26 (in Chinese).
- 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊, 2003. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J]. 气候与环境研究, 8(1): 35-42. Wang X R, Xu X D, Miao Q J, 2003. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China[J]. Climatic Environ Res, 8(1): 35-42 (in Chinese).
- 王志诚, 张雪芬, 茆佳佳, 等, 2018. 不同天气条件下地基微波辐射计探测性能比对[J]. 应用气象学报, 29(3): 282-295. Wang Z C, Zhang X F, Mao J J, et al, 2018. Comparison analysis on detection performance of ground-based microwave radiometers under different weather conditions[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3): 282-295 (in Chinese).
- 谢欣汝, 游庆龙, 保云涛, 等, 2018. 基于多源数据的青藏高原夏季降水与水汽输送的联系[J]. 高原气象, 37(1): 78-92. Xie X R,

- You Q L, Bao Y T, et al, 2018. The connection between the precipitation and water vapor transport over Qinghai-Tibetan Plateau in summer based on the multiple datasets[J]. *Plateau Meteor*, 37(1): 78-92 (in Chinese).
- 姚俊强, 杨青, 韩雪云, 等, 2013. 乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系[J]. *干旱区研究*, 30(1): 67-73. Yao J Q, Yang Q, Han X Y, et al, 2013. Analysis on daily variation of water vapor and its relationship with rainfall in Urumqi in Summer[J]. *Arid Zone Res*, 30(1): 67-73 (in Chinese).
- 张恒, 范思睿, 冯禹文, 等, 2017. 2017年川东北首场暴雨过程水汽条件分析[J]. *高原山地气象研究*, 37(4): 15-20, 77. Zhang H, Fan S R, Feng Y W, et al, 2017. Analysis of the water vapor condition during the first rainstorm in 2017 in Northeast Sichuan[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 37(4): 15-20, 77 (in Chinese).
- 张文刚, 徐桂荣, 万蓉, 等, 2015. 基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析[J]. *暴雨灾害*, 34(4): 367-374. Zhang W G, Xu G R, Wan R, et al, 2015. Analysis of the characteristic of liquid water and water vapor detected by ground-based microwave radiometer[J]. *Torr Rain Dis*, 34(4): 367-374 (in Chinese).
- 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 2014. 复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究[J]. *大气科学*, 38(5): 825-837. Zhang W L, Cui X P, Huang R, 2014. Intensive observational study on evolution of formation location of thunder storms in Beijing under complex topographical conditions[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(5): 825-837 (in Chinese).
- 赵玲, 安沙舟, 杨莲梅, 等, 2010. 1976-2007年乌鲁木齐可降水量及其降水转化率[J]. *干旱区研究*, 27(3): 433-437. Zhao L, An S Z, Yang L M, et al, 2010. Study on precipitable water and precipitation conversion efficiency in Urumqi during the period of 1976-2007[J]. *Arid Zone Res*, 27(3): 433-437 (in Chinese).
- 郑祚芳, 刘红燕, 张秀丽, 2009. 局地强对流天气分析中非常规探测资料应用[J]. *气象科技*, 37(2): 243-247. Zheng Z F, Liu H Y, Zhang X L, 2009. Application of non-conventional observational data to local heavy rain analysis[J]. *Meteor Sci Technol*, 37(2): 243-247 (in Chinese).
- Calheiros A J P, Machado L A T, 2014. Cloud and rain liquid water statistics on the CHUVA campaign[J]. *Atmos Res*, 144: 126-140.
- Chan P W, 2009. Performance and application of a millimeter-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. *Meteor Z*, 18(3): 253-265.
- Holloway C E, Neelin J D, 2010. Temporal relations of column water vapor and tropical precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 67(4): 1091-1105.
- Pushpa S R, Rajasekhar M, Papay G, et al., 2016. Assessment of forecast indices over Sriharikota using ground-based microwave radiometer[C]//Proceedings Volume 987, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation VI. New Delhi, India: SPIE.
- Wang M, Fang X, Hu S X, et al, 2015. Variation characteristics of water vapor distribution during 2000-2008 over Hefei (31.9° N, 117.2° E) observed by L6.5 radar[J]. *Atmos Res*, 164-165: 1-8.
- Zelinka M D, Hartmann D L, 2008. Response of humidity and clouds to tropical deep convection[J]. *J Climate*, 22(9): 2389-2404.