张金霞,张云惠,于碧馨,等基于多源资料的乌鲁木齐市两次极端短时强降水对比分析 [J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):10-19. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于多源资料的乌鲁木齐市两次极端 短时强降水对比分析

张金霞<sup>1</sup>,张云惠<sup>2\*</sup>,于碧馨<sup>2</sup>,芒苏尔·艾热提<sup>2</sup> (1.兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000;2.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:利用常规观测、区域自动站、FY-2G 气象卫星、多普勒雷达、风廓线雷达及 NCEP 1°× 1°再分析等多源资料,分析乌鲁木齐2015年6月9日和27日(分别简称"6·09"和"6·27"过程)两 次极端短时强降水成因。结果表明:(1)"6·09"过程是在高压脊前西北气流下,由 700、850 hPa 双 低空急流耦合触发,配合强低层风切变,低层水汽快速聚集造成的局地性强对流天气,TBB 最低 为-52 ℃,雷达回波为典型的"列车效应",强回波达 55 dBZ。"6·27"过程是在中亚低涡背景下,西 南、偏西、偏东三条水汽路径使得整层增湿,配合持续时间较长的弱低层风切变,是系统性降水中 的强对流天气,TBB 最低为-44 ℃,雷达回波为混合性降水回波中分散的对流单体,强回波达 50 dBZ;此外,"6·09"过程热力不稳定条件较好。(2)风廓线雷达显示两次过程低层均存在垂直风切 变,折射率结构常数C2均在强降水时迅速增大并维持高值,随着降水减弱迅速减小;两次过程均 发生在中 B 尺度对流云团 TBB 梯度最大处。(3)雷达回波均属于低质心对流风暴,且地面均配合 有中γ尺度气旋性风场辐合或切变。

关键词:极端短时强降水;低空急流;中尺度系统;乌鲁木齐 中图分类号:P458.121.1 文献标识码:A

短时强降水是强对流天气的一类,具有突发性 强、降水强度大、降水时间短等特点,易导致城市内 涝、山洪、泥石流等次生灾害,给社会经济建设造成 严重损失,是主要的灾害性天气之一。早在20世纪, 国内许多专家针对我国暴雨及短时强降水进行了诸 多研究[1-3],认为暴雨是多种尺度系统相互作用的产 物,短时强降水具有中小尺度特性。近年来,随着气 象业务现代化进程加快,气象专家又对其进行了深

收稿日期:2020-08-30;修回日期:2020-09-18

文章编号:1002-0799(2021)03-0010-10

入探讨。孙继松等14、徐东蓓等54根据西北地区不同 强对流过程的不同主导因素进行分类,总结了西北 气流强迫类强对流天气的热力、动力机制。同时,高 分辨率探测资料的应用为中小尺度天气系统研究提 供了可能,大量研究利用高分辨率云图<sup>6-7</sup>、风廓线 雷达18-9、多普勒雷达10-11等资料对局地对流性天气 进行分析,提高了对局地灾害性天气的认识,但所取 得的研究结果主要针对 100°E 以东区域。

新疆气象专家针对不同区域短时强降水进行了 相关研究[12-16],指出中亚低值系统是造成新疆强降 水的主要影响系统,并归纳总结了新疆暴雨的典型 环流配置, 目在中亚低涡背景下 1 800~2 000 m 的 连续短时强降水站次最多;分析近 10 a 新疆短时强 降水环境参数特征发现<sup>III</sup>, T-InP 形态分为上下干而 中层湿、下湿上干、整层湿等三种类型。张超等[18]通 过分析 2012—2016 年暖季乌鲁木齐短时强降水环

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0102);国家重点研发计划重点专项(2018YFC1507103); 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所课题(Sqj2015003)

作者简介:张金霞(1993一),女,硕士研究生,主要从事新疆灾害性天 气研究。E-mail:1324661345@qq.com

通信作者:张云惠(1968—),女,正高级工程师,主要从事新疆暴雨 (雪)及中亚低涡研究。E-mail:715208285@qq.com

境条件,将 500 hPa 影响系统分为西西伯利亚低槽、中亚低涡和西北气流三类。杨莲梅等<sup>109</sup>对西北气流 下一次乌鲁木齐短时强降水进行分析表明,脊前西 北低空急流触发对流,对流单体以"列车效应"形式 造成乌鲁木齐短时强降水。刘晶等<sup>100</sup>利用多源资料 对乌鲁木齐一次短时强降水和冰雹的中小尺度特征 进行分析,表明低空急流触发产生短时降水,低空急 流向低层下传是触发冰雹的关键因子。阿不力米提· 阿布力克木等<sup>101</sup>研究发现风廓线雷达资料能够清楚 反映乌鲁木齐降水开始、结束及降水的强度。

上述研究成果丰富和提高了对新疆及乌鲁木齐短时强降水机制的认识,但利用多源高分辨资料对乌鲁木齐短时强降水中小尺度特征的研究仍较匮乏,为此,本文利用常规观测、区域自动站、FY-2G气象卫星、多普勒雷达、风廓线雷达及 NCEP 1°×1° 再分析等多源资料,对比分析近 10 a 乌鲁木齐两次极端短时强降水过程,即 2015 年 6 月 9 日和 2015 年 6 月 27 日两次天气过程(分别简称"6·09"和"6· 27"过程),在分析天气尺度背景、水汽、动热力条件 基础上,重点对比分析两者中小尺度系统特征,以期 为乌鲁木齐短时强降水的短期及短时临近预报提供 参考。

#### 1 短时强降水实况

"6·09"过程:2015年6月9日15时—10日05 时(北京时,下同)乌鲁木齐市出现以短时强降水为 主的强对流天气(图 1a),7站暴雨、1站大暴雨(新 疆暴雨、大暴雨标准分别为日降水量>24 mm、48 mm,下同),最大降水中心位于东部山区的柏杨乡独 山子村,为56.8 mm;乌鲁木齐站降水量为25.0 mm。 有5站雨强>10 mm/h(新疆短时强降水标准),其中 4站集中在乌鲁木齐站及以东30 km内的山区,且 都发生在18—20时,柏杨乡独山子村18—19时降 水量13.7 mm(图 1c);乌鲁木齐19—20时降水量为 14.7 mm,突破了该站有气象记录以来小时雨强极 值,并伴有雷电、对流性大风。暴雨引发了山洪、泥石 流、滑坡等地质灾害,造成城区内涝和多处路段积 水,给当地交通、电力、基础设施等带来严重影响。



(单位:mm,▲为乌鲁木齐站,■为柏杨乡独山子村,●为水西沟;a为6月9日15时—10日05时,b为6月27日08时— 28日08时,c为6月9日18时—10日04时,d为6月27日16时—28日05时)

"6·27"过程:2015年6月27日08时—28日 08时乌鲁木齐市出现明显暴雨天气(图1b),14站 暴雨、1站大暴雨,最大降水中心位于南部山区的水 西沟为58.5 mm;乌鲁木齐站降水量为28.2 mm。共 有9站雨强>10 mm/h,但时空分布较为分散,水西 沟强降水主要集中在27日16—18时,雨强分别为 15.0、19.3 mm/h(图1d),28日00—01时降水量为 18.9 mm;乌鲁木齐强降水时段为27日21时—28 日03时,其中27日23时—28日00时降水量为 10.1 mm,小时雨强居乌鲁木齐近10 a 来第二。

两次短时强降水均发生在下午至夜间,最大降 水中心均在山区。"6·09"过程具有突发性、局地性、 时段集中的特点,强降水落区主要在中东部,且伴有 对流性大风;而"6·27"过程特点是暴雨区范围大、时 段分散,强降水落区主要在南部和中东部。

## 2 天气尺度环流背景对比分析

2.1 高低空系统配置

"6·09"过程前的 6 月 7—8 日北疆受低槽影响 降水明显,低层空气湿度较大,9 日 08 时,塔城—克 拉玛依—天山北坡 850 hPa 比湿为 6~9 g/kg, 700 hPa 比湿为 4~5 g/kg。9 日 14 时,200 hPa 阿勒

泰地区东部—哈密市南部为西北急流,乌鲁木齐处 于急流入口处右侧,高空辐散明显;500 hPa 欧亚范 围中高纬为两槽一脊的经向环流(图 2a),乌拉尔山 附近和蒙古高原为低槽,乌拉尔山低槽配合有-20 ℃的冷中心,西伯利亚至新疆为高压脊,北疆中东部 受高压脊前西北气流控制;700~850 hPa 新疆为高 压脊并配合有温度脊,700 hPa 石河子—乌鲁木齐 为显著偏西气流,850 hPa 塔城地区北部—乌鲁木 齐西北风速由 8 m/s 增大至 16 m/s,700~850 hPa 双 低空急流在乌鲁木齐上空耦合,同时受天山地形强 迫抬升,对流快速发展(图 2c)。对应海平面气压场, 14 时乌鲁木齐受热低压控制,气压为 1 004 hPa,气 温为 29.5 ℃,随着冷空气快速侵入,18 时乌鲁木齐 地面气压升高 4 hPa、气温降低 5 ℃。

"6·27"过程前受中亚低值系统前偏西气流的 影响,乌鲁木齐上空维持较高的比湿,22—26日 850 hPa 比湿为 7~8 g/kg,700 hPa 比湿为 5~6 g/kg; 27 日乌鲁木齐出现微量降水补充了低层水汽, 850 hPa 比湿增至 10 g/kg,700 hPa 比湿增至 8 g/kg。 27 日 20 时,200 hPa 乌鲁木齐处于西南急流出口处 左侧;500 hPa 欧亚范围中低纬为两脊一槽(图 2b), 中亚南部和青藏高原东部为高压脊,新疆为低槽活



图 2 500 hPa 高度场(实线,单位:dagpm)、风场(风向杆,单位:m/s)、温度场(虚线,单位:℃,)(a,b)和 高低空天气系统配置(c,d) (a、c为6月9日14时;b、d为6月27日20时;▲为乌鲁木齐)

动区,乌鲁木齐受低槽前偏南气流影响;700 hPa 低 涡中心位于巴州北部,巴州北部至乌鲁木齐有偏南 风与偏北风的切变,700 hPa 东南暖气流及 850 hPa 西北冷气流在乌鲁木齐上空汇合,冷暖交汇增强了 对流不稳定(图 2d)。对应海平面气压场,27 日乌鲁 木齐受热低压控制,随着北疆西部地面冷高压东移, 20 时乌鲁木齐处于冷高压前沿,气压略升。

两次过程均为低层冷空气侵入,冷暖交汇,同时 受天山地形强迫抬升,产生强降水。不同的是"6·09" 过程 500 hPa 受高压脊前西北气流控制,700 hPa 偏 西急流与 850 hPa 西北急流耦合触发,上游及本地 水汽快速聚集产生局地性强降水;"6·27"过程是在 中亚低涡背景下,500 hPa 西南气流、700 hPa 东南 气流和 850 hPa 西北气流 3 支气流交汇,整层持续 增湿,风切变及辐合明显,造成强降水。

# 2.2 水汽条件

"6·09"过程:分析各时次各层水汽通量和水汽 通量散度表明,6月7—8日北疆受低槽影响自巴尔 喀什湖至北疆有明显的水汽输送,8日夜间低槽移 过乌鲁木齐,水汽通道断裂;随着乌拉尔山低槽发 展,6月9日14时,对流层低层从槽底快速建立了 一支向东输送的水汽通道,该水汽通道自塔城地区 进入新疆后在中天山北坡辐合,在乌鲁木齐附近形 成-25×10<sup>-7</sup>g/(cm<sup>2</sup>·hPa·s)的水汽通量散度辐合中 心(图 3a),在偏西急流的作用下,20时该中心水汽 通量散度达-40×10<sup>-7</sup>g/(cm<sup>2</sup>·hPa·s),为强降水提供 了有利的水汽条件;之后随着强水汽辐合中心东移, 强降水中心移至昌吉州东部山区。

"6·27"过程:27日,乌鲁木齐受低涡前偏南气 流影响,500~700 hPa 偏南气流将水汽输送至乌鲁 木齐附近,同时低层河西走廊东南气流将水汽输送 至乌鲁木齐,乌鲁木齐附近有-25×10<sup>-7</sup> g/(cm<sup>2</sup>·hPa·

s)的水汽通量散度辐合中心(图 3b),造成乌鲁木齐 站的弱降水和南部山区的强降水;20 时,随着西部 冷空气侵入,850 hPa 塔城地区至乌鲁木齐建立了 一支弱水汽输送通道;来自西南、偏西、偏东的 3 支 水汽通道在乌鲁木齐附近汇合,27 日 20 时—28 日 02 时乌鲁木齐附近维持-30×10<sup>-7</sup> g/(cm<sup>2</sup>·hPa·s)的 水汽辐合中心,为短时强降水提供了充足的水汽;之 后随着低涡东移北上,水汽输送通道断裂,降水减弱 停止。

### 2.3 探空分析

"6·09"过程:9 日 08 时,乌鲁木齐上空 700 hPa 以上为≥16 m/s 的西北风,0~3 km 垂直风切变达 18 m/s,且近地层有弱逆温,有利于不稳定能量积 累;14 时乌鲁木齐站订正探空温、湿廓线呈"X 型" 分布(图 4a),即上下干、中层湿;由于白天晴热,14 时地面气温升至 29.5 ℃, △T<sub>850-500</sub> 达 36 ℃,环境温 度递减率加大,有利于层结不稳定发展;订正后 CAPE 值 1 127 J/kg,K 指数 33 ℃,沙氏指数 SI 为-1.5 ℃,说明午后大气层结不稳定明显增强。

"6·27"过程:27 日 08 时,乌鲁木齐上空中高层 为一致的偏南风,低层为偏东风,0~3 km 垂直风切 变为 8 m/s,500 hPa 以下风随高度顺转有暖平流, 500~300 hPa 风随高度逆转有冷平流,有利于不 稳定层结发展;14 时乌鲁木齐站订正探空曲线 300 hPa 以下为深厚湿层(图 4b),水汽条件较好, △T<sub>850-500</sub> 达 29 ℃,订正后 CAPE 值为 676 J/kg,K 指 数为 36 ℃,沙氏指数 SI 为 0.3 ℃,不稳定条件有利 于对流天气发生。

#### 3 基于多源资料的中尺度特征分析

3.1 中尺度对流云团演变特征

"6·09"过程:FY-2G 逐小时 0.1°×0.1°分辨率云



图 3 700 hPa 水汽通量(单位:g/(cm·hPa·s)和水汽通量散度(填色区,单位:10<sup>-7</sup> g/(cm<sup>2</sup>·hPa·s)) (a 为 2015 年 6 月 9 日 14 时,b 为 6 月 27 日 08 时,▲为乌鲁木齐站)

顶亮温 TBB 动画显示,9 日 17 时石河子附近生成 3 个对流云团,位于西部的两个云团快速东移与东部 的云团合并加强为中β尺度对流云团A,18时 (图 5a)云团 A 发展成较规则的椭圆形, TBB 最低 达-52 ℃,同时在乌鲁木齐附近生成云团 B。在低空 急流及天山地形强迫抬升的作用下,19时(图 5b)云 团 B 快速发展为椭圆状中 β 尺度对流云团, TBB 最 低为-52 ℃,乌鲁木齐、柏杨乡独山子村位于该云团 西侧 TBB 梯度最大处,18—19 时两站分别出现 5.4、13.7 mm的强降水。云团 A 在偏西气流引导下, 20时(图 5c)与云团 B 合并,面积增大,强度加强, TBB<-48 ℃的面积达 6 000 km<sup>2</sup>,乌鲁木齐位于云团 西侧 TBB 梯度大值区,19—20 时乌鲁木齐、柏杨乡 独山子村站分别出现 14.7、13.6 mm 的强降水。上述 云团演变与前述偏西急流引导下,在乌鲁木齐附近 形成强水汽辐合中心相对应。

"6·27"过程:27日15时,乌鲁木齐南部山区有

40 \$2 70 60 50 40 30 20 10 0 10 20 30 40 **a b** 

一对流云团,在西南气流引导下向东北移动,16时 TBB 达-40 ℃,水西沟位于该云团南侧 TBB 梯度大 值区,16—17时、17—18时分别出现15.0、19.3 mm 的强降水,之后该云团减弱东移北上。20时在乌鲁 木齐西部牛成云团 A, 该云团东移发展,21 时(图 5d)TBB 最低为-40 ℃,乌鲁木齐位于云团南侧 TBB 梯度大值区,21-22时产生 4.5 mm 的降水,同时云 团 A 西南部生成新的云团 B; 云团 B 东移发展,22 时(图 5e) TBB 值达-44 ℃,22-23 时该云团在乌 鲁木齐上空缓慢移动,造成乌鲁木齐 3.5 mm 的降 水。22时在昌吉州西部生成的云团 C 发展东移,至 23 时(图 5f)与云团 B 合并,乌鲁木齐位于该云团东 南侧 TBB 梯度大值区, 对应 27 日 23 时—28 日 00 时产生 10.1 mm 的强降水;28 日 00 时,该云团分裂 为2个云团,东侧的云团快速减弱东移,西侧的云团 面积增大、强度增强、TBB达-44℃,水西沟位于云 团南侧 TBB 梯度大值区,该站 00—01 时产生 18.9 mm





图 4 6 月 9 日 14 时(a)和 6 月 27 日 14 时(b)乌鲁木齐站订正探空曲线

图 5 6月 FY-2G 卫星 0.1°×0.1°分辨率云顶亮温 TBB(单位:℃)

(a 为 9 日 18 时,b 为 9 日 19 时,c 为 9 日 20 时,d 为 27 日 21 时,e 为 27 日 22 时;f 27 日 23 时;▲代表乌鲁木齐)

的强降水,同时该云团在西南气流引导下向东北方向缓慢移动,造成乌鲁木齐 00—02 时 6.7 mm 的降水。

造成"6·09"过程强降水的中尺度对流云团在低 空偏西急流前方生成,在乌鲁木齐东部山区快速发 展,与上游东移减弱的云团合并,TBB 最低为-52 ℃, 生命史 3~4 h。造成"6·27"过程强降水的云团在 乌鲁木齐西南部生成,强度较弱,TBB 最低为-40~ -44 ℃,范围较小,生命史 2~3 h;但两者强降水时段 均对应对流云团 TBB 梯度最大处。

3.2 多普勒天气雷达特征

"6·09"过程:石河子多普勒天气雷达不同仰角 反射率因子及其剖面演变显示,6月9日18:04(图 6a),乌鲁木齐西北方向有西北一东南排列的多单体 风暴,与上文对流云团 B 对应。中γ尺度对流单体A 距乌鲁木齐 20 km,强回波 48 dBZ,中γ尺度对流 单体组成的雷暴群 B 距乌鲁木齐 40 km,最强回波 达 55 dBZ,强回波顶高为 4~5 km,在西北急流引导下 对流单体快速东南移。18:38(图 6b)单体 A 移至乌 鲁木齐,强度略有减弱,径向速度图上有明显气旋式 辐合区(图 6d),造成乌鲁木齐 20 min 内 5.4 mm 的降 水。雷暴群 B 东南移,19:07(图 6c)其中两个对流单 体合并为单体 C 快速移至乌鲁木齐,强度增强,面 积增大,强回波顶高为 6 km,并伴有对流性大风,乌 鲁木齐站极大风速达 16.4 m/s;单体 C 后向新生的 对流单体沿西北气流以"列车效应"形式继续影响乌 鲁木齐,造成乌鲁木齐 14.7 mm/h 的强降水。

"6·27"过程:乌鲁木齐多普勒天气雷达不同仰 角反射率因子及其剖面演变显示.6月27日16:05 乌鲁木齐南部是混合性降水回波,水西沟西南有 40 dBZ 的对流单体向东北移动,16:30 开始影响水 西沟,16:39强度最强达50 dBZ,强回波顶高为5 km,且有明显的倾斜结构,该单体缓慢移过水西沟 造成 16-17 时 15.0 mm 的强降水;17:18、17:41 混 合性降水回波中有2个对流单体移过水西沟,回波强 度为 40 dBZ,强回波顶高<4 km,造成该站 19.3 mm/h 的强降水。28日 00:09、00:26 两个对流单体移过水 西沟,造成 00-01 时 18.9 mm 的强降水。石河子多 普勒天气雷达不同仰角反射率因子及其剖面演变显 示,20:48 乌鲁木齐西南有 2 个回波强度<40 dBZ 的中 γ 尺度对流单体 A、B(图 7a),在西南气流引导 下缓慢向东北移动发展,21:40 单体 A、B 分别移过 乌鲁木齐西侧、东南侧(图 7b),单体没有直接经过 乌鲁木齐上空,因此 21-22 时乌鲁木齐降水仅 4.5 mm。 21:40 乌鲁木齐西南 25 km 处生成的对流单体 C 沿 西南气流向东北移动发展,23:06开始影响乌鲁木 齐,23:29(图 7c)单体 C 发展到最强且正好移过乌 鲁木齐上空,强回波及其顶高分别为 48 dBZ、4 km, 径向速度图上有明显的辐合区(图7d),造成乌鲁木 齐 27 日 23 时—28 日00 时 10.1 mm 的强降水。 综上所述,"6·09"过程是西北急流前端不断新



图 6 6月9日18:04(a)、18:36(b)、19:07(c)石河子站雷达 0.5°仰角基本反射率因子及其剖面 (白线为剖面处;单位:dBZ)和18:38 径向速度(d,单位:m/s) (●为乌鲁木齐位置)



图 7 6月27日20:48(a)、21:40(b)、23:29(c)石河子站雷达0.5°仰角基本反射率因子及其剖面 (白线为剖面处;单位:dBZ)和23:00径向速度(d,单位:m/s)

(●为乌鲁木齐位置)

生中 γ 尺度对流单体,以"列车效应"形式快速影响 乌鲁木齐,回波强度为 55 dBZ,强回波顶高为6 km, 乌鲁木齐产生极端强降水。"6·27"过程是在西南气 流引导下,混合性降水回波中发展的中 γ 尺度对流 单体缓慢移动,回波强度为 40~50 dBZ,强回波顶高 为 4~5 km。两次过程均属于低质心对流风暴,且对 应明显的风辐合区。

#### 3.3 地面加密风场特征

乌鲁木齐附近加密自动站间距<20 km,能有效 捕捉中γ尺度系统。分析地面风场表明,6月9日降 水前乌鲁木齐及其周边为弱西北风<4 m/s,18 时(图 8a)西北风增大至 8 m/s,乌鲁木齐附近出现中γ尺 度气旋性风场,与对流单体 A 的生成和移动相对应 (图 6a、6b);同时,东部山区的柏杨乡独山子村附近 存在西南风与偏东风的切变,对应 18—19 时 13.7 mm 的降水。19 时(图 8b)乌鲁木齐西侧气温下降 8~9℃, 中γ尺度气旋性风场维持,有偏东风与偏西风、西 北风与西南风两条切变线,对应雷暴群 B 移过乌鲁 木齐,造成雨强最强;20 时中γ尺度气旋性风场消 失,切变减弱,乌鲁木齐降水减弱。

6月27日,昌吉州西部至乌鲁木齐为一致的西 北风,随着低涡东移北上,受低槽前偏南气流影响, 15时水西沟附近出现西北风与偏南风的弱切变,该 切变维持至18时(图8c),对应水西沟16—18时连 续两小时的强降水;20时乌鲁木齐附近出现西南风 与偏东风的弱切变,并持续至23时,造成该站明显 降水;23时乌鲁木齐西北部转为西北风,风速增大 至6m/s,切变加强。28日00时(图8d)乌鲁木齐附 近出现中γ尺度气旋性风场,对应单体C发展加强 移过乌鲁木齐,其西侧气温下降4~6℃,雨强达最 大;同时,水西沟附近又出现西北风与偏南风的弱切 变,对应00—01时18.9mm的强降水;之后乌鲁木 齐中γ尺度气旋性风场减弱,水西沟站附近切变消 失,降水趋于减弱。

#### 3.4 垂直风切变特征

分析乌鲁木齐风廓线雷达逐 6 min 水平风场高度一时间剖面图可知:16:30 前(图 9a)整层为一致的西北风,2 000 m 以下折射率结构常数*C*<sup>2</sup><sub>n</sub>为-130 dB 左右,说明低层存在弱不稳定湿层,这是由地面热辐射引起的湍流不稳定造成的<sup>[23</sup>;16:30,2 000~4 000 m 为 20 m/s 的西北急流,且动量不断下传,垂直风速切变增大至 12~14 m/s,对应*C*<sup>2</sup><sub>n</sub>值跃增至-110 dB,这与急流、风切变引起的大气扰动有关<sup>[22]</sup>。17:50,500~3 000 m 出现明显偏西风与偏东风切变,最大风速切变达 20 m/s,强垂直切变导致大气层结动力不稳定发展,*C*<sup>2</sup><sub>n</sub>维持在-110 dB,动力不稳定有利于对流快速发展,与对流云团 B 的生成发展相对应(图 5a);同时,500~1 000 m 有 8~12 m/s 的偏西气流维



图 8 6月9日18时(a)、19时(b)、6月27日18时(c)、28日00时(d)
乌鲁木齐及周边区域自动站风场(单位:m/s)和温度场(单位:℃)
(▲为乌鲁木齐站,■为柏杨乡独山子村,●为水西沟)

持,有利于对流发展维持。18:30—19:20上升运动 强盛,雨强太大导致信号衰减数据缺失,期间*C*<sup>2</sup>一直 维持较大值,随着垂直风切变和*C*<sup>2</sup>减弱,降水逐渐减 小。

6月27日降水前1500m以下为弱偏北风, 1500m以上为偏南风。16:30,1000m以下出现 10~12m/s的西风急流,1500m以上偏南风增强, 3000m附近出现20m/s的偏南急流,强扰动造成 对流快速发展,*C*<sup>2</sup>。值从-140dB增至-115dB,且维 持至18:30,与造成水西沟站16—18时短时强降水 的云团相对应,之后1500m以下为弱偏北风,1500m 以上为偏南风。乌鲁木齐降水时段27日21:00— 28日01:30(图9b)。21:30低层偏北风增加至6~ 8m/s,1500m以上偏南风增强,2500m附近出现 20m/s的东南急流,强垂直风向切变导致大气层结 不稳定增强,21—22时出现4.5mm的降水。27日 22时—28日01时低层偏北风与中高层偏南风的垂



图 9 6月9日16:00—20:30(a)、6月27日 21:00—28日01:30(b)乌鲁木齐站风廓线雷达 逐 6 min 水平风场高度—时间剖面(单位:m/s)

直风向切变维持,尤其 27 日 23 时—28 日 00 时垂 直风向风速扰动明显,造成乌鲁木齐 10.1 mm/h 的 强降水。降水期间,中低层有明显风向垂直切变,风 向随高度顺转,有暖平流,有利于维持大气不稳定 性,使得较强降水持续了 4~5 h。20 时降水开始后*C<sup>2</sup>* 一直维持高值,随着*C<sup>2</sup>*的减小,降水趋于结束。28 日 01 时后风向随高度逆时针旋转,表明冷平流控制了 中低层,降水趋于减弱。

#### 4 结论与讨论

本文对比分析了乌鲁木齐市两次极端短时强降 水过程的环流背景、水汽、动热力条件,在此基础上, 基于多源资料重点分析了两次过程的中小尺度系统 特征,得出以下结论:

(1)"6·09"过程,北疆受高压脊前西北气流控制,700 hPa 偏西急流与 850 hPa 西北急流双低空急流耦合触发,受天山地形动力强迫抬升,使得水汽在短时间内快速聚集,属局地对流性强降水。"6·27"过程在中亚低涡背景下,500 hPa 西南气流、700 hPa 偏东气流和 850 hPa 偏西气流 3 支气流在乌鲁木齐上空交汇,使得整层增湿,为短时强降水提供了充足的水汽,属系统性降水中产生的短时强降水。两次过程前均有不稳定能量积累,但前者 CAPE 值明显大于后者,且大气层结更干,热力不稳定条件强于后者,更有利于强对流天气发生。

(2)造成"6·09"过程短时强降水的中β尺度对 流云团生成于天山北坡迎风坡西北急流的前端, TBB最低达-52℃,且面积较大,生命史为3~4h。 "6·27"过程产生短时强降水的云团生成于乌鲁木齐 南部山区,强度较弱,TBB最低为-44℃,生命史2~3 h。两次过程降水最强时段均对应对流云团 TBB 梯 度最大处。

(3)乌鲁木齐风廓线雷达分析表明,两次过程低 层均存在垂直风切变,为对流云团的发展及维持提 供动力条件,折射率结构常数C<sup>2</sup>均在强降水时迅速 增大并维持高值,随着降水减弱迅速减小。"6·09"过 程中低层西北急流及低层风切变较强;"6·27"过程 低层风切变持续时间长,且低层风向随高度顺转明 显,暖平流的维持也是强降水持续时间长的原因之 一。

(4) 雷达回波显示"6·09" 过程为典型的"列车效 应"形式, 强回波及其顶高分别达 55 dBZ、6 km, 且 移速较快。"6·27" 过程则表现为混合性降水回波中 发展起来的多个对流单体,强回波及其顶高分别为 40~50 dBZ、4~5 km。两次过程均属于低质心对流风 暴,且乌鲁木齐附近地面风场均伴有一中γ尺度气 旋性风场辐合或切变,前者气温变化较剧烈,为对流 触发提供热力不稳定条件。

"6•27"过程短时强降水发生在系统性降水背景 下,对降水时段、落区及强度的预报相对好把握,利 用多源监测资料可提高短时临近预报预警能力。"6• 09"过程突发性强、雨强大,精细化预报难度大,此类 天气通过午后探空订正、低空急流及风切变的强弱 变化,分析对流潜势落区预报显得非常关键,同时, 分析风廓线雷达风场及折射率结构常数*C*<sup>2</sup><sub>n</sub>的时空变 化、地面加密观测风、温、湿等要素变化特点,对强降 水预报预警有很好的指示意义。

参考文献:

- [1] 陶诗言,丁一汇,周晓平.暴雨和强对流天气的研究[J].大 气科学,1979,3(3):227-238.
- [2] 丁一汇.暴雨和中尺度气象学问题[J].气象学报,1994,52 (3):274-284.
- [3] 陶诗言. 有关暴雨分析预报的一些问题 [J]. 大气科学, 1977,1(1):66-74.
- [4] 孙继松,戴建华,何立富,等.强对流天气预报的基本原理 与技术方法[M].北京:气象出版社,2014:133-139.
- [5] 许东蓓,许爱华,肖玮,等.中国西北四省区强对流天气形势配置及特殊性综合分析 [J]. 高原气象,2015,34(4): 973-981.
- [6] 王啸华,吴海英,唐红昇,等.2009 年 7 月 7 日南京短时 暴雨的中尺度特征分析 [J]. 气象,2012,38 (9):1060-1069.
- [7] 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012年7月21日北京地区特 大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. 气象, 2012,38(10);1278-1287.
- [8] 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等.风廓线雷达和地基微波辐射 计在冰雹天气监测中的应用[J].高原气象,2015,34(1): 269-278.
- [9] 汪小康,王晓芳,崔春光,等.用新型探测资料分析武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统 [J]. 暴雨灾害, 2012,31(4):321-327.
- [10] 牛淑贞,张一平,梁俊平,等.郑州市两次短时强降水过 程的环境条件和中尺度特征对比[J].暴雨灾害,2016,35 (2):138-147.
- [11] 王丛梅,俞小鼎.2013 年 7 月 1 日河北宁晋极端短时强 降水成因研究[J].暴雨灾害,2015,34(2):105-116.
- [12] 张云惠,杨莲梅,肖开提·多莱特,等.1971-2010年中亚 低涡活动特征[J].应用气象学报,2012,23(3):312-321.
- [13] 杨莲梅.南亚高压突变引起的一次新疆暴雨天气研究[J].气象,2003,29(8):21-25.

- [14] 杨莲梅,李霞,张广兴.新疆夏季强降水研究若干进展及 问题[J].气候与环境研究,2011,16(2):188-198.
- [15] 杨莲梅,张云惠,汤浩.2007 年 7 月新疆三次暴雨过程 的水汽特征分析[J].高原气象,2012,31(4):963-973.
- [16] 曾勇,杨莲梅.中亚低涡背景下新疆连续短时强降水特 征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(4):67-73.
- [17] 毛列尼·阿依提看,玉素甫·木沙,郭品文.近 10a 新疆短时强降水湿度层结及大气能量结构特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(2):43-49.
- [18] 张超,贾健.乌鲁木齐市短时强降水分布特征及环境条件分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(3):41-47.
- [19] 杨莲梅,李建刚,刘晶,等.西北气流下乌鲁木齐短时强

降水中小尺度特征个例分析[J].暴雨灾害,2017,36(5): 389-396.

- [20] 刘晶,于碧馨,赵克明,等.乌鲁木齐"4.24"短时降水和 冰雹中小尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,2018,37(4): 347-355.
- [21] 阿不力米提江·阿布力克木,于碧馨,李海燕.乌鲁木齐 风廓线雷达资料在暴雨天气分析中的应用[J].沙漠与绿 洲气象,2014,8(3):42-47.
- [22] 孙刚,翁宁泉,肖黎明.合肥地区大气湍流随高度分布日 变化特性分析[J].大气与环境光学学报,2007,2(2):94-98.

# Comparative Analysis on the Two Extreme Short-time Heavy Precipitation in Urumqi Based on the Multi-sources Data

ZHANG Jinxia<sup>1</sup>, ZHANG Yunhui<sup>2</sup>, YU Bixin<sup>2</sup>, Mangsuer Aierti<sup>2</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract The causes of the two extreme short-time heavy precipitation in Urumgi on June 9th and June 27th, 2015 (" $6 \cdot 09$ " and " $6 \cdot 27$ " in short) were analyzed based on the data from conventional weather stations, regional automatic weather stations, FY-2G satellite, Doppler radar, wind profile radar, and NCEP1 °× 1 ° reanalysis data. The results indicated that: (1) The "6.09" ("6.27") event was local convective precipitation (convective precipitation in a synoptic process), which took place in the northwest airstream ahead a pressure ridge (Central Asian vortex), triggered by the coupling of 700 hPa and 850 hPa double low-level jets, combined with strong (weak and long duration) low-level wind shear, and rapid accumulation of low-level vapor (humidifying by three water vapor paths in the southwest, west, and east). Besides, the minimum of TBB was  $-52 \,^{\circ}{\rm C}$  (-44  $^{\circ}{\rm C}$ ), with the radar echo characterized as "train effect" (scattered convective cell developed in cumulus -stratus) and the maximal radar reflectivity factor of 55 dBZ (50 dBZ). The thermal instability of the "6.09" process was better. (2) The wind profiler radar showed that there was vertical wind shear in the lower layers of the two processes, and the refractive index structure constant  $C_n^2$  increased rapidly and maintained a high value during heavy precipitation, and decreased rapidly as the precipitation weakened; both two occurred where the TBB gradient of the meso- $\beta$ -scale convective cloud cluster is the largest. (3) Both were low-centroid convective storms, and concurrent with the convergence of wind shear line or the meso- $\gamma$ -scale cyclonic wind field.

Key words extreme short-time heavy precipitation; low-level jet; meso-scale systems; Urumqi