

庄晓翠,张云惠,周雪英,等,2021.新疆短时强降水天气雷达回波特征[J].气象,47(11):1402-1415. Zhuang X C,Zhang Y H,Zhou X Y,et al,2021. Radar echo characteristics of short-time severe precipitation in Xinjiang[J]. Meteor Mon,47(11):1402-1415(in Chinese).

新疆短时强降水天气雷达回波特征*

庄晓翠^{1,2} 张云惠³ 周雪英⁴ 杨莲梅¹ 祝小梅⁵ 黄艳⁶ 罗继⁷

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

2 新疆阿勒泰地区气象局,阿勒泰 836500

3 新疆气象台,乌鲁木齐 830002

4 新疆巴音郭楞蒙古自治州气象局,库尔勒 841000

5 新疆伊犁哈萨克自治州气象局,伊犁 835000

6 新疆和田地区气象局,和田 848000

7 新疆阿克苏地区气象局,阿克苏 843000

提 要: 利用新疆 8 部多普勒天气雷达资料,对其有效探测范围内 2010—2018 年暖季出现的 229 次不伴有冰雹的短时强降水雷达主要回波参数特征进行统计分析,并与中国中东部地区对比。结果表明,影响新疆短时强降水的对流风暴主要有合并加强型、列车效应型和本地发展型三类,合并加强型最多(占 45%),列车效应型最少(占 20%),且因天山地形作用主要发生在天山北坡。凝练出各区域各类型雷达主要回波参数阈值,总体而言:南疆短时强降水阈值小于北疆,伊犁河谷最大,阿克苏地区最小;伊犁河谷短时强降水以低质心回波为主;北疆和巴州北部短时暴雨的最大回波强度大于 50 dBz,南疆西部和阿克苏地区分别大于 45 dBz、40 dBz;径向速度图上大多数个例能够监测到强辐合,受特殊地形影响,南疆西部和天山北坡监测到的强辐合较多;由超级单体造成的短时强降水在阿克苏地区发生相对较多,在其他区域为小概率事件。新疆伴有冰雹的短时强降水为小概率事件。新疆短时强水和短时暴雨最大回波强度阈值总体上高于中国中东部地区。

关键词: 新疆,短时强降水,回波参数,阈值

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.11.009

Radar Echo Characteristics of Short-Time Severe Precipitation in Xinjiang

ZHUANG Xiaocui^{1,2} ZHANG Yunhui³ ZHOU Xueying⁴
YANG Lianmei¹ ZHU Xiaomei⁵ HUANG Yan⁶ LUO Ji⁷

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 Altay Meteorological Office of Xinjiang, Altay 836500

3 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

4 Meteorological Office of Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture of Xinjiang, Korla 841000

5 Meteorological Office of Ili Kazak Autonomous Prefecture of Xinjiang, Ili 835000

6 Hotan Meteorological Office of Xinjiang, Hotan 848000

7 Aksu Meteorological Office of Xinjiang, Aksu 843000

Abstract: Using the data of 8 Doppler weather radars in Xinjiang, this paper statistically analyzes the main radar echo parameters of 229 short-time severe precipitations without hail in the warm season from 2010 to

* 国家重点研发计划(2018YFC1507102和2018YFC1507103)、国家自然科学基金项目(41965002)、中亚大气科学研究基金(CAAS201921)共同资助

2020年2月6日收稿; 2021年6月6日收修定稿

第一作者:庄晓翠,主要从事天气预报及灾害性天气机理研究. E-mail: zxcxjalt@163.com

2018 in the effective detection range, and compares the results with those in central and eastern parts of China. The results show that the convective storms affecting Xinjiang's short-time severe precipitation mainly include three types: merged-enhanced, train-effect, and locally developing. The merged-enhanced type is the most (45%), and the train-effect type is the least (20%). Because of the topography of the Tianshan Mountains, it mainly occurs on the northern slope of the Tianshan Mountains. Besides, the main echo parameter thresholds of various types of radars in various regions are summarized. In general, the short-time severe precipitation threshold in southern Xinjiang is smaller than that in northern Xinjiang, the largest in the Ili Valley, and the smallest in the Aksu area. The short-time severe precipitation in the Ili Valley is dominated by low-centroid echo. The maximum echo intensity of the short-time rainstorm is more than 50 dBz in northern Xinjiang and northern Bazhou, more than 45 dBz and 40 dBz in the western part of southern Xinjiang and Aksu Region, respectively. In most cases, strong convergence can be found on the radial velocity chart, but the western part of southern Xinjiang and the northern slope of Tianshan Mountain have more strong convergence due to the influence of special topography. Short-time severe precipitation caused by supercells occurs relatively frequently in Aksu Region, not often seen in other regions. In Xinjiang, the probability of short-time severe precipitation accompanied by hail is small. The maximum echo intensity threshold of short-time severe precipitation and rainstorm in Xinjiang is generally higher than that in central and eastern China.

Key words: Xinjiang, short-time severe precipitation, echo parameter, threshold

引 言

短时强降水是强对流天气的一种,多发生在有利的大尺度环流背景下,由中小尺度天气系统直接造成,具有持续时间短,雨强大,来势迅猛,局地性强等特点,极易导致山洪、泥石流等地质灾害和次生灾害,且常伴有冰雹、强风等灾害性天气,使农牧业生产损失严重。如 2018 年 7 月 31 日哈密市局地特大暴雨过程主要集中在 2~3 h,暴雨中心附近突破历史极值;短时强降水引发局地洪水,造成水库溃坝和人员伤亡等,损失惨重(庄晓翠等,2020);2016 年 9 月 1—6 日南疆 5 地(州)59 站次先后发生了短时暴雨,造成直接经济损失近 7 亿元(黄艳等,2018)。因此,对短时强降水准确的预报预警是地方政府防灾减灾救灾主要的决策依据。由于受诸多因素影响,目前对短时强降水的预报预警是业务工作中的难点,引起了国内外许多学者广泛关注(Doswell III, 1994; Doswell III et al, 1996; 俞小鼎等, 2006; 俞小鼎, 2012; 孙继松, 2005; 孙继松等, 2014; 刘璐等, 2015; 杨波等, 2016; 李彦霖等, 2018; 杨莲梅等, 2017; 庄晓翠等, 2014; 2017; 2018; 黄艳等, 2018; 曾勇和杨莲梅, 2018; 曾勇等, 2019; 张家宝和邓子凤, 1987)。冯晋勤等(2014)、谢玉华等(2018)指出,福建短时暴雨的雷达回波按降水类型可分为大陆型和热带海洋型强降水,当低层反射率因子在 50~

55 dBz 时两类雨强相当,55~60 dBz 时热带海洋型雨强较大,大于 40 dBz 时,热带海洋型降水的雨强即能达到暴雨($50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)级别。张崇莉等(2011)、何钰等(2021)指出,滇西高原短时强降水反射率因子为大于 35 dBz 的低质心回波,径向速度图上出现强辐合区,垂直累积液态水含量 $>3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。苏俐敏等(2014)分析表明,宜春短时强降水主要有带状、块状、絮状回波和短带回波 4 种类型,是由大于 45 dBz 的回波单体造成。吴建秋等(2014)研究表明,常州短时强降水反射率因子强度大于 45 dBz,回波顶高大于 8 km。吴杞平等(2012)研究指出,大连短时暴雨多由大于 35 dBz 的 β 中尺度回波造成。雷蕾等(2020)对北京一次特大暴雨研究指出,大于 50 dBz 的带状和线状雷达回波及列车效应是造成北京短时强降水的主要原因。这些成果为中国中东部地区短时强降水短时临近预警提供了参考依据。

近年来,新疆气象工作者也对短时强降水开展了较多研究(孙颖姝等,2019;刘晶等,2019)。对南疆西部短时强降水研究表明,雷达回波具有高质心和低质心特征,具有中低层辐合、高层辐散、旋转等特征(张云惠等,2013;曾勇和杨莲梅,2017a; 2017b)。曾勇和杨莲梅(2020)对新疆西部一次短时强降水研究表明,孤立对流单体组合反射率因子(combined reflectivity factors, CR)最大为 40 dBz,在暴雨区维持少动,是造成暴雨中心的主要原因;呈

准南北向的线状多单体 CR 达 50 dBz, 在向东移动过程中造成多站依次出现短时强降水。杨莲梅等(2017)对乌鲁木齐一次短时强降水研究指出, 沿西北低空急流出现多个 γ 中尺度对流单体以列车效应形式依次影响乌鲁木齐造成短时强降水, 对流单体 CR 最强达 45~50 dBz。赵俊荣(2012)、赵俊荣等(2009)研究指出, 多个 γ 中尺度对流单体在天山北坡合并加强是局地强降水天气落区形成的主要原因; 强降水区发生在回波强度大于 50 dBz、回波顶高度大于 5 km 和垂直累积液态水含量大于 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以及中气旋的重合区域内。上述研究对新疆不同地区短时强降水个例进行了较详细的研究, 但缺乏系统的雷达回波特征研究。那么新疆雷达回波参数与短时强降水有何关系? 各参数在短时强降水预警中是否存在阈值? 其在南、北疆有何不同? 以及与中国中东部有何不同? 这些研究有利于新疆短时临近预警业务的发展, 也是亟待解决的问题。因此, 本文采用新疆 8 部多普勒天气雷达回波资料, 运用数理统计分析方法, 针对上述问题进行较详细的研究, 为提高新疆短时临近预警水平提供参考依据, 为提高防灾减灾救灾决策服务提供科技支撑。

1 研究区概况、资料及方法

1.1 研究区概况

新疆位于欧亚大陆腹地, 中国西北部。其南部

是有名的阿尔金山和帕米尔高原, 北部是阿尔泰山脉, 最具代表性的当属天山山脉, 它横亘新疆中部, 将新疆分为南北两大部分, 形成了有名的塔里木盆地和准格尔盆地(图 1)。新疆面积占中国总面积的六分之一, 仅有 8 部多普勒天气雷达(图 1), 雷达站稀疏。

1.2 资料及方法

目前, 中央气象台和中国中东部地区气象部门均将 1 h 降水量 $\geq 20 \text{ mm}$ 的降水记为短时强降水。根据多年的预报服务实践、暴雨洪水成灾事实和干旱半干旱地区暴雨特点, 结合新疆预报业务, 新疆气象部门将该标准调整为 1 h 降水量 $\geq 10 \text{ mm}$ (黄艳等, 2018; 庄晓翠等, 2018)。本研究采用经过新疆气象信息中心筛选、整理、检测, 并剔除不完整及错误资料, 严格实现数据质量控制的 2010—2018 年 5—9 月(暖季)国家站和区域自动站逐时降水资料, 筛选出满足上述条件的短时强降水天气。由于新疆雷达站稀疏, 地形复杂, 因此, 在选取短时强降水个例时, 要求在雷达站有效探测范围内具有完整的雷达基数据。也就是说, 剔除由于山地的遮挡作用使某些个例的雷达回波失真及强降水位于雷达探测有效范围外的资料, 选用能够真实、完整地反映短时强降水天气发生发展的雷达资料, 共筛选出 233 个短时强降水天气。根据冰雹个例及灾情直报系统中有关冰雹灾情, 筛选出短时强降水中伴有冰雹的共 4 例, 不伴有冰雹的共 229 个短时强降水天气, 本文主要

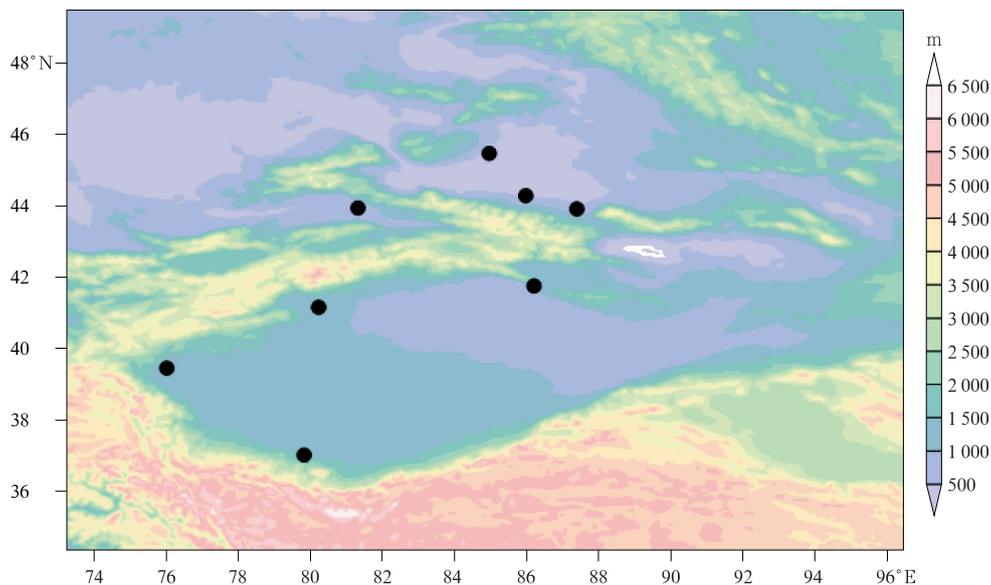


图 1 新疆地形(填色)及雷达站(圆点)分布

Fig. 1 Distribution map of Xinjiang topography (colored) and radar stations (dot)

对后者进行研究(没有特殊说明的均为此类)。造成短时强降水风暴中最大反射率因子强度(最大回波强度)、强回波中心顶高(≥ 40 dBz 的强回波顶所能到达的最大高度)、回波顶高(ET, > 18 dBz 的回波所能到达的最大高度)、垂直累积液体水含量(VIL)等参数的值均来源于 SCIT 算法输出的风暴结构属性。

本文对伊犁河谷(伊犁雷达站)、天山北坡(克拉玛依、石河子和乌鲁木齐雷达站)、南疆西部(喀什、和田雷达站)和阿克苏地区(阿克苏雷达站)及巴音郭楞蒙古自治州(简称巴州)北部(库尔勒雷达站)等地短时强降水天气的雷达回波特征,运用箱形图进行统计分析,确定雷达探测参数阈值。用伊犁、天山北坡、南疆西部、阿克苏、巴州分别代表相应区域短时强降水风暴类型的总和,如伊犁表示伊犁河谷 3 种类型的合计,依次类推。

2 结果分析

利用 2010—2018 年暖季新疆 8 部多普勒雷达产品,通过对 229 个短时强降水天气发生前及过程中反射率因子回波形态和演变方式的分析,表明新疆短时强降水事件的雷达回波反射率因子基本为强单体或多单体风暴合并加强的带状、片状积云、积层混合云回波。因此,按影响方式可分为:①合并加强型(图 2a),表现为从多方向(至少 2 个方向)移入的多个对流单体进入影响地区后,受中尺度系统辐合

等影响,多个回波(或与本地块状回波)聚合加强,特点是回波强度较强,雨强较大,范围较小;②列车效应型(图 2b),相对独立的多个对流单体沿着高空引导气流或低空急流方向传播,在移动过程中相继影响同一地区造成短时强降水;③本地发展型(图 2c),表现为受环境流场辐合影响,局地或层状云降水回波中迅速生成对流云团,点状回波在短时间内扩大为块状回波。此类回波生成发展速度快,一般短时强降水范围较小,持续时间较短,但由于其突发性和局地性强,预警的提前时间短,因此常给降水地区造成较大影响。

由表 1 可知,近 9 年满足上述要求的短时强降水个例中阿克苏地区最多(73 个),巴州北部最少(17 个),其他区域大于 40 个(表 1)。除巴州北部外,本文统计所得各区域回波阈值都具有气候统计意义,在新疆短时临近预警中具有一定参考价值。新疆合并加强型出现最多为 103 次(占 45%),其次是本地发展型,出现 81 次(占 35%),列车效应最少,只有 45 次(占 20%)。就各区域而言,天山北坡列车效应最多(占该型的 51%),伊犁河谷和南疆西部及巴州北部合并加强型最多,阿克苏地区本地发展型最多(表 1)。天山北坡由于其特殊的地形,使得大多数短时强降水的高低空都呈“后倾槽”结构,即冷空气从低层先进入北疆,850~700 hPa 塔城—克拉玛依—天山北坡出现西北低空急流(气流),急流(气流)不断增强并维持,其携带湿冷空气东南下,天山北坡位于低空西北急流(气流)出口区,由于天

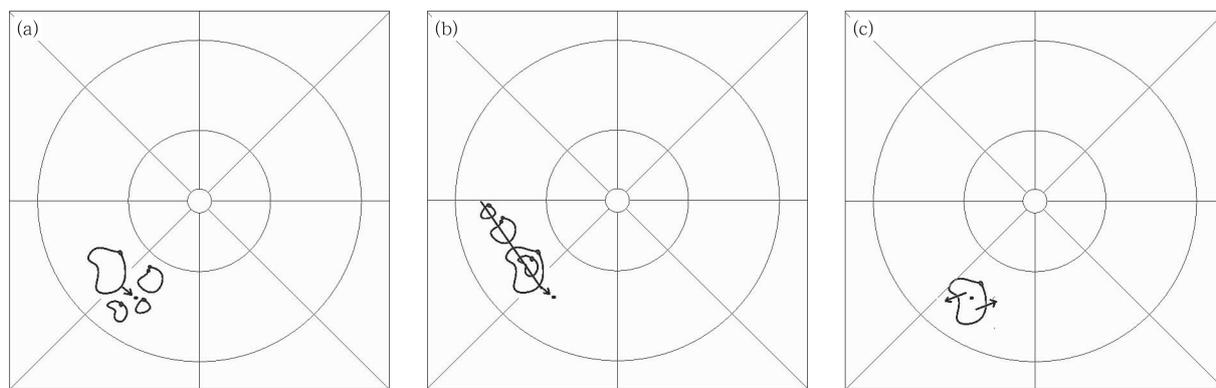


图 2 2010—2018 年新疆短时强降水对流风暴雷达回波分类
(a)合并加强型,(b)列车效应型,(c)本地发展型
(小点表示短时强降水落区)

Fig. 2 Classification of radar echoes of convective storms of short-time severe precipitation in Xinjiang from 2010 to 2018
(a) merged-enhanced type, (b) train-effect type, (c) locally developing type
(Small dots represent the area with the short-term severe precipitation)

山地形阻挡,使得多个回波单体沿西北低空急流,以列车效应形式影响该区域。因此,新疆多数列车效应型发生在天山北坡。

在各区域各类型样本中,只有阿克苏地区本地发展型个例满足气候统计要求(表 1),但为了进一步了解各区域各类型雷达回波特征,本文对 ≥ 10 次及以上的类型和相应区域风暴类型总和进行箱形图分析。

表 1 新疆各区域对流风暴雷达回波分类(单位:次)

区域	合并加强型	列车效应	本地发展性	合计
伊犁河谷	24	9	7	40
天山北坡	20	23	16	59
新疆西部	25	10	5	40
阿克苏	22	1	50	73
巴州北部	12	2	3	17
合计	103	45	81	229

2.1 最大回波强度

图 3 为新疆各区域短时强降水对流风暴最大回波强度箱形图,图中线段的最高点为统计最大值,最低点为统计最小值,箱形的上部框线为上四分位值,下部框线为下四分位值,箱内线为中位线,“×”为平均值(下同)。中位线(该线不一定位于箱形正中间)表示包含样本总数 50% 个例的样本数值,从最小值到上四分位值、下四分位值分别表示包含样本总数的 75% 和 25% (下同)。图中空心圆点为异常值(李京校等,2017)。

2.1.1 伊犁河谷

由图 3a 可知,伊犁最大回波强度箱体略宽于合并加强型,说明最大回波强度值较分散;除 2 个异常极小值外,伊犁、合并加强型回波值域分别在 40~60 dBz、49~60 dBz,25%~75% 四分位值分别为 49~55 dBz、51~56 dBz,中位数为 53 dBz、54 dBz,平均值为 52 dBz、53 dBz。近 9 年伊犁河谷极值回波强度为 60 dBz,造成 3 个县共 14 个站出现雨强超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水,最大雨强为 $22.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。雨强超过 $24 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时暴雨(新疆暴雨标准)最大回波强度均超过 50 dBz,而 $> 49 \text{ dBz}$ 的强回波占 80%,因此可以将伊犁最大回波强度 25% 四分位值 49 dBz 作为伊犁河谷短时强降水阈值,该阈值强于中国中东部地区(冯晋勤等,2014;苏俐敏

等,2014;吴建秋等,2014;谢玉华等,2018;张崇莉等,2011;吴杞平等,2012)。

2.1.2 天山北坡

由图 3b 可知,天山北坡、合并加强型、列车效应型短时强降水箱体较窄,最大回波强度值分布比较集中,本地发展型箱体宽于其他两型及天山北坡,强回波值较分散。天山北坡、合并加强型、列车效应型和本地发展型的最大回波强度中位数依次为 52、51、52 和 47 dBz,平均值分别为 50、51、52 和 47 dBz,最小到最大值分别为 35~63、39~63、40~62 和 35~62 dBz;25%~75% 四分位值分别为 47~55、48~56、49~55 和 37~54 dBz,本地发展型 25% 四分位值明显小于其他两类,而合并加强型 75% 四分位值和列车效应型相当,本地发展型略偏小。统计发现,和伊犁河谷相同该区域短时暴雨最大回波强度也超过 50 dBz。因此,除本地发展型阈值较小外,其他两类相差不大。

2.1.3 新疆西部

由图 3c 可知,短时强降水最大回波强度新疆西部和列车效应型所对应的箱体宽于合并加强型,最大回波强度值较分散。新疆西部及合并加强型、列车效应型的最大回波强度平均值分别为 50、51、50 dBz,中位数依次为 50、50、52 dBz;25%~75% 四分位值分别为 45~56、48~56、45~56 dBz,最小到最大值范围分别为 35~61、35~61、40~57 dBz,因此,新疆西部短时强降水的最大回波强度阈值为 $\geq 45 \text{ dBz}$,和宜春相似(苏俐敏等,2014),但高于中国中东部的其他地区(冯晋勤等,2014;苏俐敏等,2014;吴建秋等,2014;谢玉华等,2018;张崇莉等,2011;吴杞平等,2012)。而短时暴雨最大回波强度均超过 45 dBz,小于北疆。

2.1.4 阿克苏地区

由图 3d 可知,阿克苏地区短时强降水最大回波强度合并加强型比较集中,阿克苏及本地发展型箱体略宽,值较分散。阿克苏及合并加强型、本地发展型最大回波强度的中位数依次为 45、47 和 43 dBz,平均值分别为 43、46 和 42 dBz,本地发展型最小,回波强度明显小于合并加强型。除异常极值外,阿克苏及合并加强型、本地发展型最大回波强度的值域分布分别为 30~54、36~52、25~54 dBz;25%~75% 四分位值分别为 40~48、44~50 和 37~47 dBz,本地发展型 25% 四分位值明显偏小,75% 四分位值合并加强型略高。有 79% 的短时暴雨最大反射率因子强

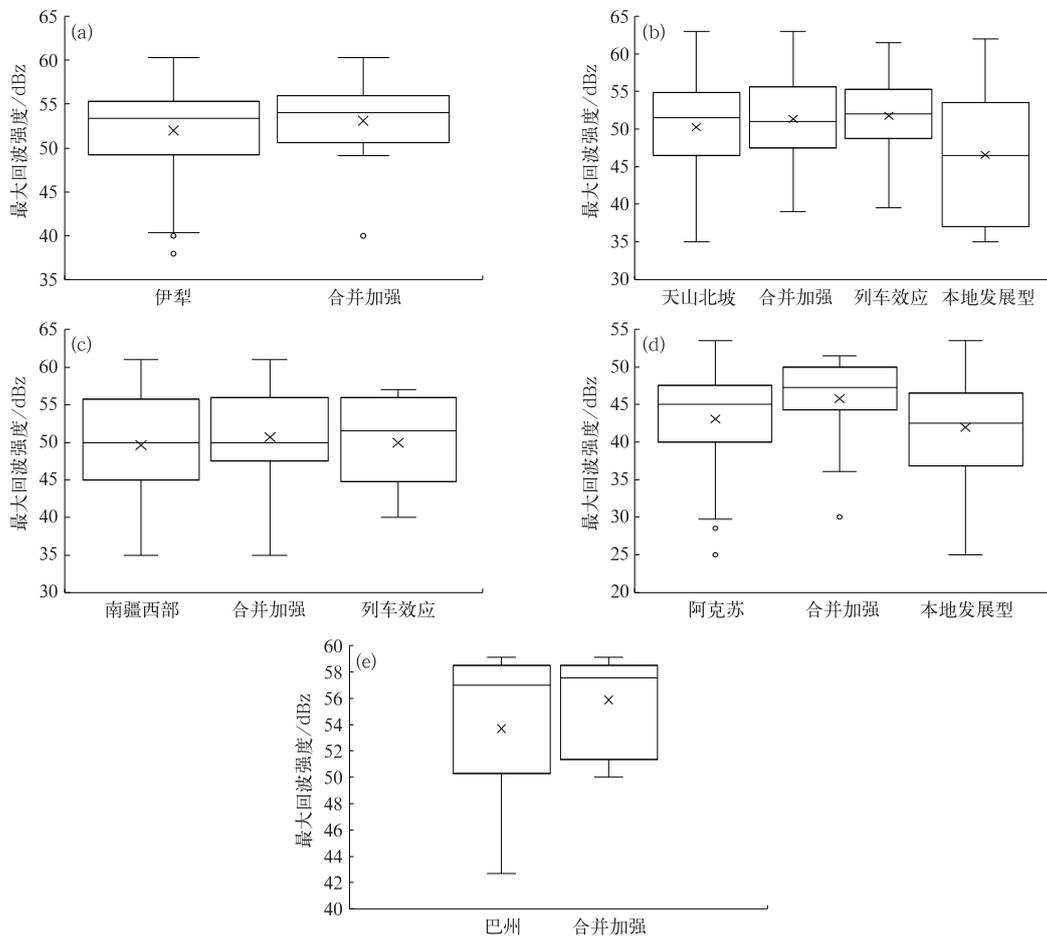


图 3 2010—2018 年新疆(a)伊犁河谷,(b)天山北坡,(c)南疆西部,(d)阿克苏,(e)巴州北部短时强降水最大回波强度箱形分布

Fig. 3 Box distribution map of maximum echo intensity of short-term severe precipitation in (a) Ili Valley, (b) the north slope of Tianshan Mountain, (c) the west of southern Xinjiang, (d) Aksu, and (e) northern Bazhou of Xinjiang from 2010 to 2018

度 > 40 dBz, 小于北疆和南疆西部。由于阿克苏地区本地发展型个例较多, 因此, 取 37 dBz 为该地区短时强降水最大回波强度的阈值(占 81%; 指大于等于阈值的情况, 下同)。

2.1.5 巴州北部

由图 3e 可知, 巴州北部短时强降水最大回波强度箱体略宽于合并加强型, 说明最大回波值较分散。巴州、合并加强型最大回波强度值域分布分别是 43~59 dBz、50~59 dBz, 中位数为 57 dBz、58 dBz, 高于平均值 54 dBz、56 dBz, 25%~75% 四分位值是 50~59 dBz、51~59 dBz, 二者相差不大。短时暴雨最大回波强度均大于 50 dBz, 和北疆一致, 大于南疆其他地区。因此, 以 ≥ 50 dBz 为巴州北部短时强降水最大回波强度阈值(占 81%)。

2.2 强回波中心顶高

2.2.1 伊犁河谷

图 4 为新疆各区域短时强降水对流风暴雷达强回波中心顶高箱形分布。由图 4a 可知, 伊犁、合并加强型箱体均较窄, 说明强回波顶高较集中。中位数依次为 4.0 km、3.9 km, 平均值分别为 4.2 km、4.0 km, 二者相差较小。剔除异常极大值和异常极小值, 伊犁及合并加强型短时强降水对流风暴强回波中心顶高最小值均为 3.6 km, 最大值分别为 4.8 km、4.4 km; 25%~75% 四分位值分别为 3.7~4.2 km、3.7~4.0 km。因此, 伊犁河谷暖季短时强降水大多为低质心回波的高效率降水(黄小燕等, 2017; 曹艳察等, 2020), 与滇西高原短时强降水类似(张崇莉

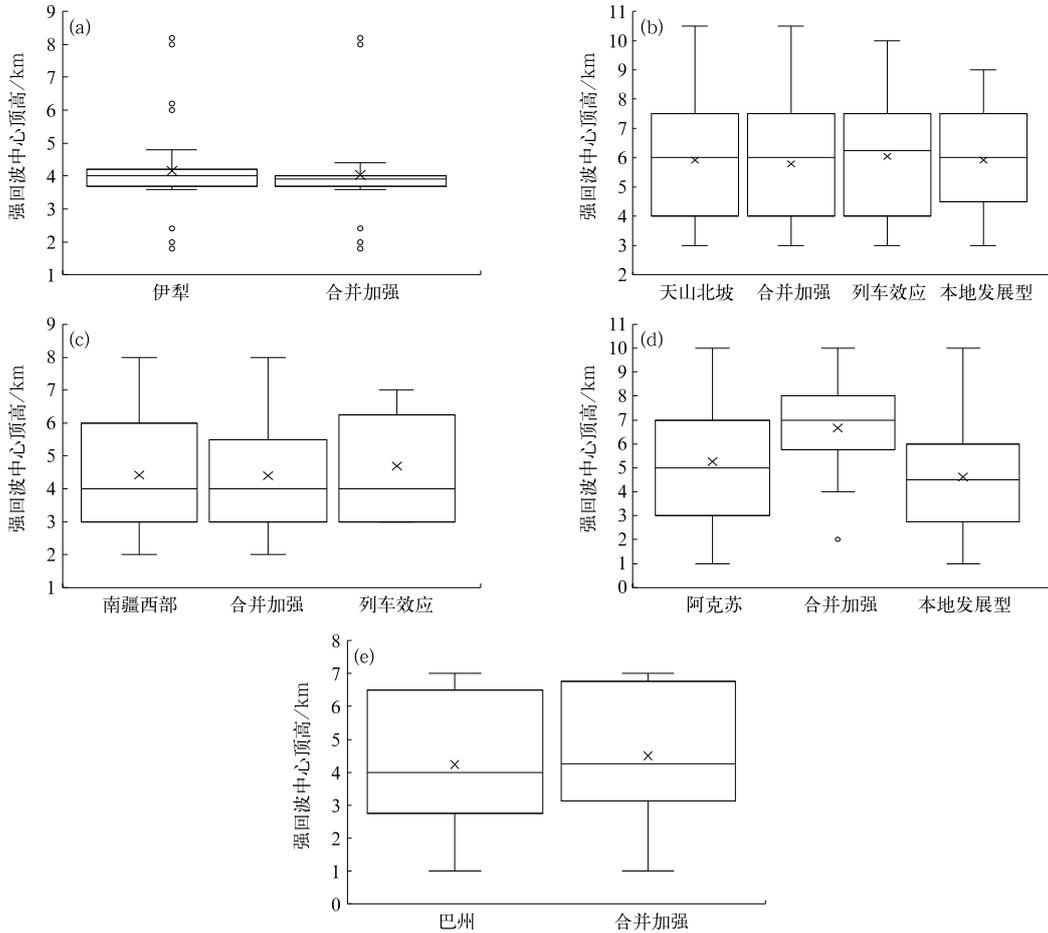


图 4 同图 3, 但为强回波中心顶高

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the peak height of echo center

等, 2011)。异常极大值强回波中心顶高达 8.2 km 的个例雨强为 $21.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 短时暴雨的强回波中心顶高为 4 km 左右的低质心回波。因此, 伊犁河谷短时强降水 $\geq 40 \text{ dBz}$ 强回波中心顶高取 3.7 km 为阈值。

2.2.2 天山北坡

由图 4b 可知, 天山北坡短时强降水雷达强回波中心顶高, 本地发展型箱体最窄, 值较集中, 其他三类箱体较宽, 值较分散。天山北坡、合并加强型、列车效应型和本地发展型强回波中心顶高的中位数依次为 6.0、6.0、6.3 和 6.0 km, 平均值分别为 5.9、5.8、6.1 和 5.9 km, 可见差别不大。天山北坡及三类对流风暴短时强降水强回波中心顶高最小值均为 3.0 km; 而最大值为 9.0~10.5 km, 仅为个例总数的 10%, 其中强回波中心顶高达 10.5 km 个例雨强为 $33.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (所有个例中的次强降雨强)。天山北坡、合并加强型、列车效应型和本地发展型强回波中心顶高值域分布分别为 3.0~10.5、3.0~10.5、

3.0~10.0 和 3.0~9.0 km; 25%~75% 四分位值分别为 4.0~7.5、4.0~7.5、4.0~7.5 和 4.5~7.5 km, 基本一致。而短时暴雨强回波中心顶高为 4.0 km 左右的低质心回波或强回波中心顶高超过 5.0 km 的高质心回波。天山北坡短时强降水强回波中心顶高取 4.0 km 为阈值。

2.2.3 南疆西部

由图 4c 可知, 南疆西部短时强降水三类对流风暴的雷达强回波中心顶高, 合并加强型箱体较窄, 回波值较集中, 南疆西部和列车效应型箱体较宽, 值相对较分散。南疆西部及合并加强型、列车效应型强回波中心顶高的中位数均为 4.0 km, 平均值分别为 4.4、4.4、4.7 km, 差别较小。各类型对流风暴强回波中心顶高最小值为 2.0~3.0 km; 而最大值为 7.0~8.0 km, 强回波中心顶高达 8.0 km 的个例雨强为 $25.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 25%~75% 四分位值为 3.0~6.0、3.0~5.5、3.0~6.3 km。而短时暴雨强回波中心顶高为 3.0 km 左右的低质心回波或强回波中

心顶高超过 5 km 的高质心回波。因此,南疆西部强回波中心顶高的阈值取 3.0 km。

2.2.4 阿克苏地区

由图 4d 可知,阿克苏地区短时强降水的雷达强回波中心顶高,箱体合并加强型最窄,回波值较集中,本地发展型和阿克苏箱体较宽,回波值较分散。阿克苏、合并加强型、本地发展型强回波中心顶高中位数依次为 5.0、7.0、4.5 km,平均值分别为 5.3、6.7、4.6 km,本地发展型最低。除异常极值点外,阿克苏及各类对流风暴短时强降水个例强回波中心顶高最小值为 1.0~4.0 km,最大值均在 10.0 km。强回波中心顶高超过 8.0 km 占总个例数的 19.2%。阿克苏、合并加强型、本地发展型强回波顶高范围分别为 1.0~10.0、4.0~10.0、1.0~10.0 km;25%~75%四分位值分别为 3.0~7.0、5.8~8.0、2.8~6.0 km,本地发展型最小。因此,阿克苏地区强回波中心顶高阈值为取 3.0 km(占 86%)。

2.2.5 巴州北部

由图 4e 可知,巴州北部短时强降水强回波中心顶高箱体巴州较宽,值较分散。巴州、合并加强型最小到最大值均为 1.0~7.0 km,中位数值为 4.0 km、4.3 km,平均值为 4.2 km、4.5 km,25%和 75%四分位值分别是 2.8~6.5 km、3.1~6.8 km,二者相差较小。因此,巴州北部强回波中心顶高阈值为取 2.8 km(占 75%)。

2.3 回波顶高(ET)

2.3.1 伊犁河谷

由图 5a 可知,合并加强型箱体较窄,ET 值较集中,伊犁 ET 值分布相对较分散。合并加强型有 1 个异常极小值 7.1 km。伊犁、合并加强型 ET 中位数依次为 9.4 km、9.5 km,平均值分别为 9.3 km、9.7 km。最小到最大的 ET 值分别为 6.1~11.8 km、8.2~11.5 km,25%~75%四分位值分别为 8.4~10.5 km、9.2~10.6 km。短时暴雨的回波顶高大多数超过 9.4 km,也超过所有个例回波顶高平均态(9.3 km)。以 8.4 km 作为伊犁州短时强降水 ET 阈值(占 78%)。

2.3.2 天山北坡

图 5b 为天山北坡短时强降水三类对流风暴 ET 值箱形分布图,列车效应型箱体宽于其他三型,ET 值分布较分散,合并加强和本地发展型 ET 比较集中。天山北坡、合并加强型、列车效应型和本地发

展型 ET 中位数依次为 10.7、10.2、10.8 和 11.3 km,平均值分别为 10.4、10.5、10.1 和 10.6 km,ET 范围分别为 4.7~14.5、7.9~14.5、4.7~14.1 和 6.7~12.5 km,可见,列车效应型的 ET 最小,合并加强型最大,且此个例的 ET 高达 10.5 km;25%~75%四分位值分别为 8.7~11.9、9.5~11.9、7.8~12.1 和 9.3~11.8 km,本地发展型 25%四分位值较天山北坡和合并加强型两型偏低,而 75%四分位值略大于其他两型,天山北坡短时强降水 ET 阈值为 8.7 km。短时暴雨 ET 值大多数超过 10.0 km,也超过所有个例 ET 平均态。

2.3.3 南疆西部

由图 5c 可知,南疆西部和合并加强型箱体较列车效应型宽,ET 值较分散,列车效应型 ET 分布比较集中。南疆西部及合并加强型、列车效应型 ET 的中位数均为 8.0 km,平均值分别为 7.7、7.8、8.0 km。ET 范围分别为 4.0~10.0、6.0~10.0、8.0~9.0 km,25%~75%四分位值分别为 7.0~9.0、7.0~9.0、8.0~9.0 km,可见,25%四分位值 ET 相差不大,而 75%四分位值一致,因此,南疆西部短时强降水回波顶高阈值为取 7.0 km。短时暴雨的 ET 大多数超过 8.0 km,也超过所有个例 ET 平均值。

2.3.4 阿克苏地区

由图 5d 可知,阿克苏箱体较宽,ET 分布较分散,合并加强型 ET 分布最集中。阿克苏及合并加强型、本地发展型 ET 中位数依次为 9.0、9.0、8.0 km,平均值分别为 8.3、9.1、7.9 km,本地发展型最低。ET 范围分别为 4.0~12.0、8.0~10.0、4.0~11.0 km,25%~75%四分位值分别为 7.0~10.0、9.0~10.0、6.7~9.0 km,可见,25%四分位值本地发展型最低,75%四分位值相差不大,本地发展型略低。短时暴雨的对流风暴平均 ET 值为 8.4 km,其中 64%回波顶高超过 9.0 km。因此,阿克苏地区 ET 阈值取 6.8 km。

2.3.5 巴州北部

由图 5e 可知,巴州短时强降水 ET 值箱体较宽,ET 值较分散,合并加强型 ET 值较集中。巴州、合并加强型 ET 范围为 6.0~12.5 km、6.0~10.0 km,中位数值为 9.1 km、9.3 km,高于平均值 8.4 km、9.0 km,25%~75%四分位值分别为 7.0~9.7 km、8.1~9.8 km。因此,巴州北部短时强降水 ET 的阈值取 7.0 km。

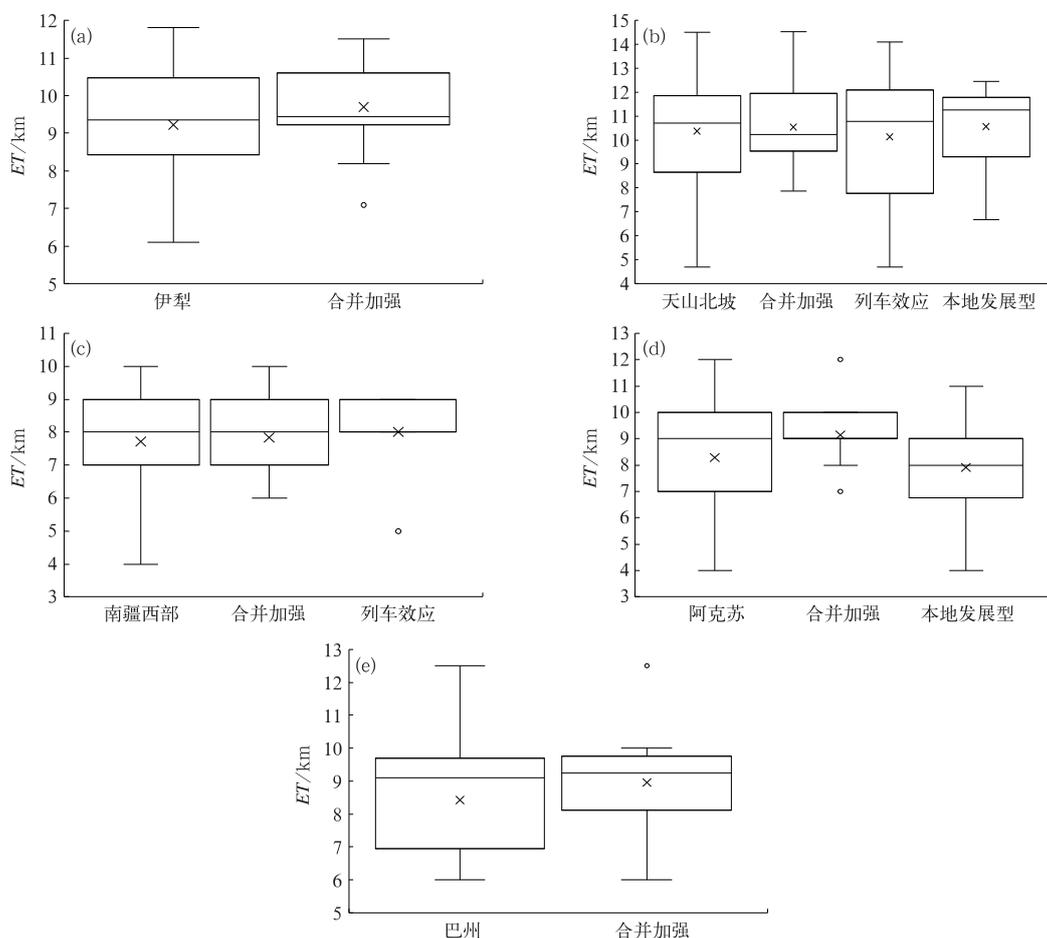


图 5 同图 3, 但为 ET

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for ET

2.4 最大垂直累积液态水含量

2.4.1 伊犁河谷

图 6a 为伊犁河谷短时强降水对流风暴的雷达 VIL 箱形分布图, 合并加强型箱体宽度较宽, 且存在两个异常极大值 ($44.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $45.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 伊犁箱体较窄。伊犁、合并加强型 VIL 的中位数依次为 $9.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $14.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均值分别为 $12.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $15.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。去掉异常极值点, VIL 范围分别为 $1.6 \sim 24.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3.3 \sim 24.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。异常极值点个例的雨强为 $27.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 3 h 累计雨量为 52.3 mm ; VIL 的 25%~75% 四分位值分别为 $6.0 \sim 16.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $6.4 \sim 19.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。以伊犁短时强降水 VIL 的 25% 分位值 ($6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 为阈值, 可包含个例的 75%, 明显大于滇西高原(张崇莉等, 2011)。

2.4.2 天山北坡

由图 6b 可知, 天山北坡短时强降水 VIL 值箱

体合并加强型最窄, VIL 值较集中, 天山北坡及其他两型较宽, VIL 值较分散。天山北坡及合并加强型、列车效应型和本地发展型的 VIL 平均值依次为 11.2 、 11.8 、 11.3 和 $10.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 中位值分别为 9.0 、 9.6 、 9.1 和 $8.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中本地发展型小于其他 2 型; 去掉极值点, VIL 范围分别为 $5.0 \sim 20.6$ 、 $5.0 \sim 20.1$ 和 $5.0 \sim 20.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 可见 3 类差别较小, VIL 最小值为 $5.0 \sim 6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大值为 $18.0 \sim 20.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而极值点 $32.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的个例雨强为 $15.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 25%~75% 四分位值分别为 $7.0 \sim 12.5$ 、 $8.2 \sim 12.5$ 、 $7.0 \sim 12.5$ 和 $6.5 \sim 12.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 本地发展型 25% 四分位值较其他两型偏低, 而 75% 四分位值三类相当。因此, 天山北坡短时强降水 VIL 阈值为 $6.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 明显大于滇西高原(张崇莉等, 2011)。

2.4.3 南疆西部

由图 6c 可知, 南疆西部短时强降水两类及南疆西部箱体基本一致。南疆西部及合并加强型、列车

效应型 VIL 中位数依次为 11.0、12.0、12.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 平均值分别为 12.0、12.8、13.9 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 去掉异常极值点, VIL 范围分别为 2.0~26.0、2.0~26、3.0~32.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, VIL 最小值为 2.0~3.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 各类相差不大; 最大值为 26.0~32.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。25%~75% 四分位 VIL 值分别为 5.3~15.8、5.5~16.5、8.3~18.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 可见, 南疆西部 VIL 值 25%~75% 分位值列车效应型较大, 南疆西部和合并加强型相差较小。南疆西部 VIL 的阈值为 5.3 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于滇西高原(张崇莉等, 2011)。

2.4.4 阿克苏地区

由图 6d 可知, 合并加强型较本地发展型箱体窄, VIL 值分布比较集中。阿克苏及合并加强型、本地发展型的 VIL 中位数依次为 5.2、7.6、2.4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 平均值分别为 5.8、8.3、4.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 本地发

展型明显偏小; VIL 范围分别为 0.5~17.0、2.5~15.4、0.5~12.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 25%~75% 四分位值分别为 1.8~8.1、5.7~10.2、1.7~6.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。本地发展型 VIL 强度最低, 尤其是 25% 四分位 VIL 值。取 1.7 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 为阿克苏地区 VIL 的阈值, 小于滇西高原(张崇莉等, 2011)。

2.4.5 巴部北部

由图 6e 可知, 合并加强型和巴州箱体基本一致。巴州及合并加强型 VIL 范围分别为 2.0~43.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、6.2~36.3 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 中位数值为 16.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、16.7 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均值为 19.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、20.9 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 25%~75% 四分位值分别为 10.0~25.7 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、10.3~26.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者相差较小。取 10.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 为巴州北部 VIL 的阈值(占 87.5%)。

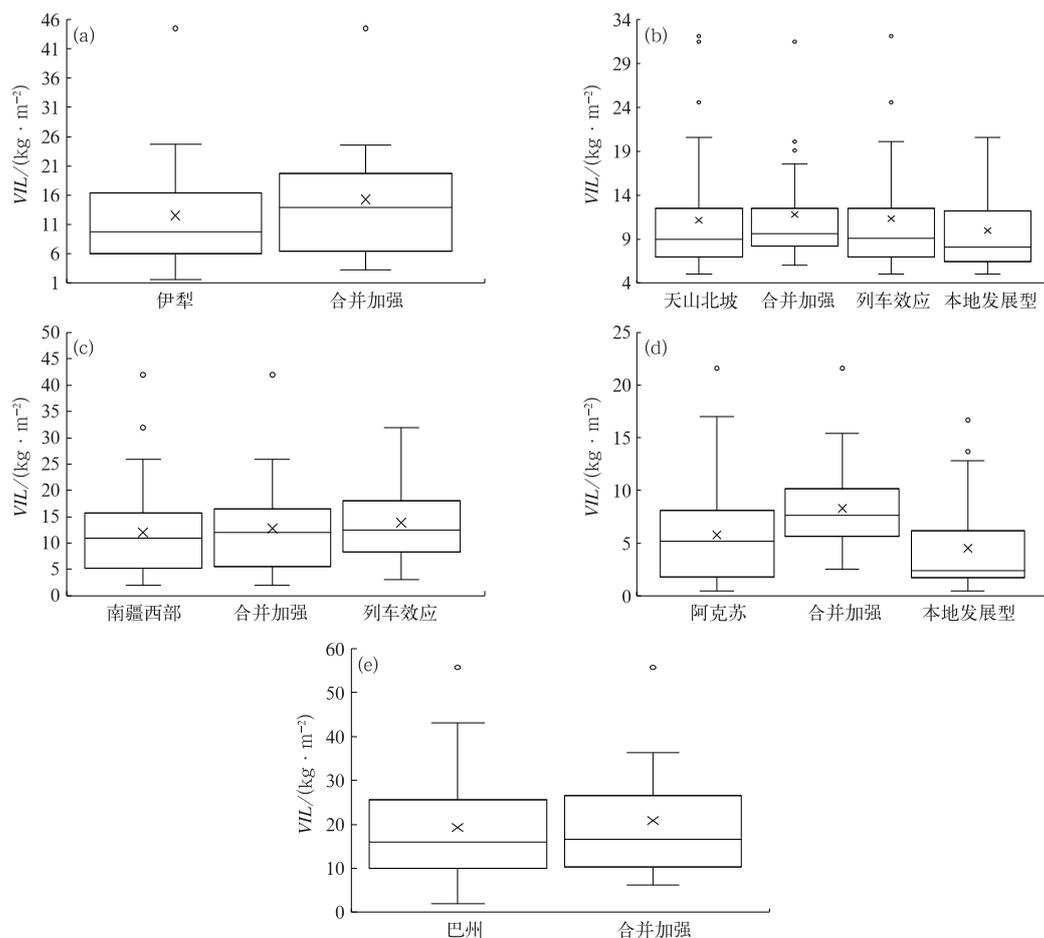


图 6 同图 3, 但为 VIL

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for VIL

2.5 径向速度图识别特征

在新疆短时强降水天气发生前雷达径向速度图上主要存在径向速度辐合,少数个例可以观测到中气旋。径向速度辐合是风速的不连续线,靠近雷达的一侧为离开雷达的正速度区,远离雷达的一侧为向着雷达的负速度区,称一般径向速度辐合(简称辐合);在雷达径向速度图上,同一种方向的速度区中出现方向相反的速度区,即一种方向的速度区中包围着另一种方向的速度区,两者不能跨越雷达原点,这种辐合为强径向速度辐合(简称强辐合)。分析新疆 229 个短时强降水天气发生前的雷达径向速度图可知(图略),新疆多数短时强降水中低层径向速度图上都观测到强辐合和辐合,有 24 例(占 10%)能识别出中气旋,其中阿克苏地区最多(19 例),占该地区短时强降水总个例的 26%,伊犁河谷 2 例,南疆西部、巴州北部、天山北坡各 1 例。说明由超级单体造成的短时强降水在新疆大部地区为小概率事件。下面主要针对强辐合对各区域进行统计分析。

由表 2 新疆各区域雷达径向速度图上强辐合占比可知,巴州北部短时强降水个例中强辐合占比最小,占巴州北部短时强降水总数的 29%,阿克苏地区次小,占该区域的 55%;南疆西部最大,占该区域的 83%,其次是天山北坡,占该区域的 78%。就各区域各类型而言,合并加强型南疆西部占比最高(92%),天山北坡次之(85%),伊犁河谷最小(32%);列车效应型天山北坡占比最高(91%),其次是南疆西部(80%)。可见,南疆西部和天山北坡短时强降水发生前雷达径向速度图上易观测到强辐合,其主要原因是:受地形影响,冷空气从低层开始进入南疆,850~700 hPa 自河西走廊—哈密—巴州有支偏东急流(显著气流)建立,急流不断增强并维持,偏东急流携带着湿冷空气灌入,南疆西部位于低空偏东急流(气流)出口区的左侧,由于西天山、帕米尔高原及昆仑山地形阻挡,偏东急流前端与地形几乎垂直,增强辐合抬升,因此在雷达径向速度图上易监测到较强辐合;而天山北坡多强辐合的原因同第 2 节第二段,在此不再赘述。

表 2 新疆各区域雷达径向速度图上强辐合占比及中气旋发生情况
Table 2 Proportion of strong convergence and the occurrence of mesocyclone on radar radial velocity map in Xinjiang

区域	合并加强型/%	列车效应型/%	本地发展型/%	强辐合占比/%	中气旋/次
天山北坡	85	91	50	78	1
伊犁	32			57	2
南疆西部	92	80		83	1
阿克苏	45		60	55	19
巴州北部	42			29	1

注:表中只列出个例数 ≥ 10 个的类型。

Note: only listed types of more than 10 cases.

3 伴有冰雹的短时强降水雷达回波特征

在研究时段范围内新疆伴有冰雹短时强降水的

有 4 例。由表 3 可知,在其发生前最大回波强度大于 60 dBz,回波顶高大于 9 km,强回波中心顶高大于 5 m,垂直累积液态水含量大于 $32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,径向速度图具有强辐合和中气旋特征。上述雷达回波特征明显强于(大于)不伴有冰雹的短时强降水。

表 3 新疆伴有冰雹的短时强降水雷达回波特征

Table 3 Radar echo characteristics of short-time severe precipitation with hail in Xinjiang

时间	地点	最大回波强度/dBz	ET/km	强回波中心顶高/km	VIL/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	径向速度特征
20140623	喀什地区英吉沙克勒乡	68	9	7	49	中气旋
20150623	喀什地区岳普湖	62	9	5	32	强辐合
20120604	巴州库尔勒	60	11.5	7	35	中气旋
20170812	巴州轮台县西里阿热里	62	11.8	8	62	强辐合

4 新疆短时强降水雷达回波阈值

根据上述对各区域雷达有效探测范围内短时强降水主要回波参数的箱形图分析,概括出新疆各区域短时强降水及各类风暴回波阈值(表 4~表 6)。对比分析南疆和北疆短时强降水雷达探测回波阈值可知,总体而言,北疆大于南疆,伊犁河谷最大,阿克苏最小,都高于中国中东部地区(冯晋勤等,2014;苏俐敏等,2014;吴建秋等,2014;谢玉华等,2018;张崇莉等,2011;吴杞平等,2012)。巴州北部的最大回波强度和最大垂直累积液态水含量为全疆最大,其他回波参数阈值小于北疆,这可能是巴州北部短时强

降水发生最少的原因之一。在径向速度图上大多数个例能够监测到强辐合,与中国中东部地区相似(冯晋勤等,2014;苏俐敏等,2014;吴建秋等,2014;谢玉华等,2018;张崇莉等,2011;吴杞平等,2012);就各区域而言,巴州北部能识别出强辐合的比率最低,其次是阿克苏地区;南疆西部、天山北坡能监测到强辐合的比率较高,达 78%以上。由超级单体造成的短时强降水在阿克苏地区发生较多,在其他区域为小概率事件。

另外,雨强超过 $24 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时暴雨最大反射率因子强度,北疆和巴州北部均大于 50 dBz,南疆西部大于 45 dBz,阿克苏地区则有 79% 的个例大于 40 dBz。

表 4 天山北坡短时强降水及各类风暴回波阈值

Table 4 Various echo thresholds of short-time severe precipitation on the north slope of Tianshan Mountain

物理量	合并加强型	列车效应	孤立对流单体	天山北坡
最大回波强度/dBz	48	49	37	47
强回波中心顶高/km	4.0	4.0	4.5	4.0
回波顶高/km	9.5	7.8	9.3	8.7
累积液态水含量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	8.2	7.0	6.5	7.0

表 5 阿克苏地区短时强降水各类风暴回波阈值

Table 5 Various echo thresholds of short-time severe precipitation in Aksu Area

物理量	合并加强型	孤立对流单体	阿克苏
最大回波强度/dBz	44	37	40
强回波中心顶高/km	5.8	2.8	3.0
回波顶高/km	9.0	6.7	7.0
累积液态水含量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	5.7	1.7	1.8

表 6 伊犁河谷、巴州北部及南疆西部短时强降水各类风暴回波阈值

Table 6 Echo thresholds of various kinds of storms during short-time severe precipitation in Ili Valley, northern Bazhou and western South Xinjiang

物理量	伊犁	巴州北部	南疆西部
最大回波强度/dBz	49	50	45
强回波中心顶高/km	3.7	2.8	3.0
回波顶高/km	8.4	7.0	7.0
累积液态水含量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	6.0	10.0	5.3

5 结 论

综合以上分析得到以下结论:

(1)影响新疆短时强降水的对流风暴主要有合并加强型、列车效应型和本地发展型三类。合并加强型最多(占 45%),其次是本地发展型(占 35%),列车效应型最少(占 20%),且因地形作用主要发生天山北坡。就各区域而言:天山北坡合并加强、列车效应、本地发展型均较多,伊犁河谷和南疆西部及

巴州北部以合并加强型为主,阿克苏地区以本地发展型为主。

(2)通过对各区域及各型短时强降水雷达探测参数箱形图分析,得到主要回波参数的阈值:总体而言,南疆短时强降水阈值小于北疆,其中,伊犁河谷最大,阿克苏最小,均大于中国中东部;巴州北部最大回波强度和 VIL 均为全疆最大,其他参数阈值小于北疆,这可能是巴州北部短时强降水发生最少的原因之一。另外,伊犁河谷短时强降水以低质心回波为主,其他区域低质心和高质心均有发生;短时暴

雨最大反射率因子强度,北疆和巴州北部均 > 50 dBz,南疆西部 > 45 dBz,阿克苏地区大多数个例 > 40 dBz,高于中国中东部。

(3) 径向速度图上,大多数个例能够监测到强辐合,巴州北部能监测的比率最低,其次是阿克苏;天山北坡、南疆西部能监测到强辐合的比率较高,在 78% 以上,与滇西高原类似。由超级单体造成的短时强降水,阿克苏地区发生相对较多,其他区域为小概率事件。另外,在新疆伴有冰雹的短时强降水天气为小概率事件。

参考文献

- 曹艳察,郑永光,盛杰,等,2020. 2018年7月15—17日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J]. 气象,46(7): 885-897. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, et al, 2020. Characteristics of three types of convective storms during the Beijing extreme precipitation event in 15—17 July 2018[J]. Meteor Mon, 46(7): 885-897(in Chinese).
- 冯晋勤,汤达章,曹长尧,2014. 福建西部山区短时暴雨雷达回波特征及中小尺度系统分析[J]. 气象,40(3): 297-304. Feng J Q, Tang D Z, Cao C R, 2014. Analyses on radar echo characteristics and meso-microscale systems of short-time rainfalls in western mountainous area of Fujian[J]. Meteor Mon, 40(3): 297-304(in Chinese).
- 何钰,陈小华,李耀孙,等,2021. 云南省副热带高压外围类短时强降水的雷达回波特征[J]. 气象,47(4): 450-462. He Y, Chen X H, Li Y S, et al, 2021. Radar echo characteristics of short-time severe rainfall in the periphery of subtropical high in Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4): 450-462(in Chinese).
- 黄小燕,王小平,王劲松,等,2017. 1970—2012年夏半年中国大气 0°C 层高度时空变化特征[J]. 气象,43(3): 286-293. Huang X Y, Wang X P, Wang J S, et al, 2017. Spatio-temporal changes of 0°C isotherm height in China during summer half year of 1970—2012[J]. Meteor Mon, 43(3): 286-293(in Chinese).
- 黄艳,俞小鼎,陈天宇,等,2018. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J]. 气象,44(8): 1033-1041. Huang Y, Yu X D, Chen T Y, et al, 2018. Analysis of conceptual models and ambient parameter of short-time severe rainfall in South Xinjiang[J]. Meteor Mon, 44(8): 1033-1041(in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等,2020. 2018年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报,78(1): 1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15—16 July 2018 in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 1-17(in Chinese).
- 李京校,郭凤霞,扈海波,等,2017. 北京及其周边地区 SAFIR 和 ADTD 闪电定位资料对比分析[J]. 高原气象,36(4): 1115-1126. Li J X, Guo F X, Hu H B, et al, 2017. Comparative analysis of SAFIR and ADTD lightning location data over Beijing and its circumjacent regions[J]. Plateau Meteor, 36(4): 1115-1126(in Chinese).
- 李彦霖,张述文,田程,等,2018. 基于雷达回波的贵阳地区对流性降水特征分析[J]. 气象,44(6): 752-758. Li Y L, Zhang S W, Tian C, et al, 2018. Statistics characteristics of radar echoes of convective precipitation in Guiyang[J]. Meteor Mon, 44(6): 752-758(in Chinese).
- 刘晶,周玉淑,杨莲梅,等,2019. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学,43(5): 959-974. Liu J, Zhou Y S, Yang L M, et al, 2019. A diagnostic study of water vapor during an extreme precipitation event in the Yili River Valley[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 959-974(in Chinese).
- 刘璐,冉令坤,周玉淑,等,2015. 北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J]. 大气科学,39(3): 583-595. Liu L, Ran L K, Zhou Y S, et al, 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3): 583-595(in Chinese).
- 苏俐敏,夏文梅,马中元,等,2014. 2012年江西宜春四类短时强降水特征分析[J]. 气象科学,34(6): 700-708. Su L M, Xia W M, Ma Z Y, et al, 2014. Characteristics of four types of short-term strong precipitation in Yichun of Jiangxi Province in 2012[J]. J Meteor Sci, 34(6): 700-708(in Chinese).
- 孙继松,2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学,29(3): 445-452. Sun J S, 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 29(3): 445-452(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 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: 31-38. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principle and Technical Method of Severe Convection Weather Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press: 31-38(in Chinese).
- 孙颖姝,周玉淑,王咏青,2019. 一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程和水汽源分析[J]. 大气科学,43(5): 1041-1054. Sun Y S, Zhou Y S, Wang Y Q, 2019. Analysis of dynamic process and moisture source on a heavy precipitation event in southern Xinjiang associated with the double upper-level jet[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 1041-1054(in Chinese).
- 吴建秋,吴晶璐,雷正翠,等,2014. 多普勒天气雷达资料在强对流天气预报中的应用[C]//第31届中国气象学会年会 S1 气象雷达探测技术研究与应用. 北京:中国气象学会: 363-370. Wu J Q, Wu J L, Lei Z C, et al, 2014. Application of Doppler weather thunder data in severe convection weather forecast[C]// The 31st Annual Meeting of China Meteorological Society S1 Research and Application of Weather Radar Detection Technology. Beijing: Chinese Meteorological Society: 363-370(in Chinese).
- 吴杞平,王树雄,李燕,等,2012. 2004—2009年大连地区短时暴雨分析预报[J]. 气象与环境学报,28(2): 71-76. Wu Q P, Wang S X, Li Y, et al, 2012. Analysis and forecast of short time heavy rain from 2004 to 2009 in Dalian Region[J]. J Meteor Environ, 28(2): 71-76(in Chinese).
- 谢玉华,蔡菁,赖巧珍,2018. 龙岩地区不同类型短时暴雨雷达特征研究[J]. 气象研究与应用,39(1): 59-62, 152. Xie Y H, Cai J, Lai Q Z, 2018. Radar characteristics of different types of short time torrential rain in Longyan Area[J]. J Meteor Res Appl, 39(1): 59-62, 152(in Chinese).
- 杨波,孙继松,毛旭,等,2016. 北京地区短时强降水过程的多尺度环

- 流特征[J]. 气象学报, 74(6):919-934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al, 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 74(6):919-934(in Chinese).
- 杨莲梅, 李建刚, 刘晶, 等, 2017. 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, 36(5):389-409. Yang L M, Li J G, Liu J, et al, 2017. Medium and small scale characteristic analysis of a short-time heavy rain under northwest flow in Urumqi[J]. Torr Rain Dis, 36(5):389-409(in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:90-180. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press:90-180(in Chinese).
- 曾勇, 杨莲梅, 2017a. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析[J]. 暴雨灾害, 36(5):410-421. Zeng Y, Yang L M, 2017a. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-time precipitation events in the west of southern Xinjiang[J]. Torr Rain Dis, 36(5):410-421(in Chinese).
- 曾勇, 杨莲梅, 2017b. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析[J]. 干旱气象, 35(3):475-484. Zeng Y, Yang L M, 2017b. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang[J]. J Arid Meteor, 35(3):475-484(in Chinese).
- 曾勇, 杨莲梅, 2018. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J]. 高原气象, 37(5):1220-1232. Zeng Y, Yang L M, 2018. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 37(5):1220-1232(in Chinese).
- 曾勇, 杨莲梅, 2020. 新疆西部“6.16”强降水过程的中尺度分析[J]. 暴雨灾害, 39(1):41-51. Zeng Y, Yang L M, 2020. Mesoscale analysis on the “6.16” heavy precipitation event in the west of Xinjiang[J]. Torr Rain Dis, 39(1):41-51(in Chinese).
- 曾勇, 周玉淑, 杨莲梅, 2019. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析[J]. 大气科学, 43(2):372-388. Zeng Y, Zhou Y S, Yang L M, 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation[J]. Chin J Atmos Sci, 43(2):372-388(in Chinese).
- 张崇莉, 向明堃, 赖云华, 等, 2011. 滇西北高原冰雹、短时强降水的多普勒雷达回波特征比较[J]. 暴雨灾害, 30(1):64-69. Zhang C L, Xiang M K, Lai Y H, et al, 2011. Contrastive analysis of Doppler-radar products on hail and short-time severe rainfall on Northwest Yunnan Plateau[J]. Torr Rain Dis, 30(1):64-69(in Chinese).
- 张家宝, 邓子凤, 1987. 新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社:92-104. Zhang J B, Deng Z F, 1987. Introduction to Precipitation in Xinjiang[M]. Beijing:China Meteorological Press:92-104(in Chinese).
- 张云惠, 陈春艳, 杨莲梅, 等, 2013. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J]. 高原气象, 32(1):191-200. Zhang Y H, Chen C Y, Yang L M, et al, 2013. Cause analysis on rare rainstorm in west of southern Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 32(1):191-200(in Chinese).
- 赵俊荣, 2012. 天山北坡中部一次罕见局地强降水中小尺度系统分析[J]. 气象与环境学报, 28(6):19-24. Zhao J R, 2012. Analysis of meso-micro scale system characteristics in a rare heavy rain on the northern slope of Tianshan Mountain[J]. J Meteor Environ, 28(6):19-24(in Chinese).
- 赵俊荣, 晋绿生, 郭金强, 等, 2009. 天山北坡中部一次强对流天气中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 28(5):1044-1050. Zhao J R, Jin L S, Guo J Q, et al, 2009. Analysis of meso-small scale system characteristics of a severe convective weather on north slope of Tianshan, Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 28(5):1044-1050(in Chinese).
- 庄晓翠, 李健丽, 李博渊, 等, 2014. 北疆北部2次区域性暴雨的中尺度环境场分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 8(6):23-30. Zhuang X C, Li J L, Li B Y, et al, 2014. Analysis of mesoscale ambient field of two heavy rainstorms in northern Xinjiang[J]. Desert Oasis Meteor, 8(6):23-30(in Chinese).
- 庄晓翠, 李如琦, 李博渊, 等, 2017. 中亚低涡造成新疆北部区域暴雨成因分析[J]. 气象, 43(8):924-935. Zhuang X C, Li R Q, Li B Y, et al, 2017. Analysis on rainstorm caused by Central Asian vortex in northern Xinjiang[J]. Meteor Mon, 43(8):924-935(in Chinese).
- 庄晓翠, 李博渊, 秦榕, 等, 2020. 新疆东部一次区域极端暴雨环境场特征[J]. 高原气象, 39(5):947-959. Zhuang X C, Li B Y, Qin R, et al, 2020. Analysis on the causes of an extreme rainstorm in the eastern Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 39(5):947-959(in Chinese).
- 庄晓翠, 赵江伟, 李健丽, 等, 2018. 新疆阿勒泰地区短时强降水流型及环境参数特征[J]. 高原气象, 37(3):675-685. Zhuang X C, Zhao J W, Li J L, et al, 2018. Characteristics of short-time heavy precipitation weather flow and environmental parameter of Altay Region in Xinjiang[J]. Plateau Meteor, 37(3):675-685(in Chinese).
- Doswell III C A, 1994. Flash Flood-Producing Convective Storms: Current Understanding and Research[C]//Proceedings of Spain-U. S. Workshop on Natural Hazards. Barcelona, Spain:National Science Foundation:97-107.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting:an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.