

张俊兰. 南疆柯坪强雷暴天气的分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 880-888.

南疆柯坪强雷暴天气的分析^{*}

张俊兰

新疆阿克苏地区气象局, 阿克苏 843000

提 要: 利用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 小时再分析资料和常规观测资料以及位于南疆阿克苏新一代 C 波段多普勒天气雷达资料, 分析了 2009 年 8 月 19 日发生在南疆阿克苏地区柯坪县的强雷暴天气。分析显示, β 中尺度切变线和地面中低压、辐合线是雷暴的直接影响系统, 其水汽源于塔里木盆地东部和中部地区, 水汽输送集中在低层, 低空偏东急流为水汽输送发挥了重要作用, 雷暴发生前对流有效位能有一个增大的过程。雷暴从暴雨雷暴发展为雹暴, 持续时间超过 1 小时。在雷暴单体成熟期, 雹暴中层反射率呈现回波悬垂和弱回波区。

关键词: 强雷暴, β 中尺度切变线, 低空偏东急流, 对流有效位能, 弱回波区

Analysis of the Strong Thunderstorm Process over Keping in Southern Xinjiang During 19 August 2009

ZHANG Junlan

Aksu Meteorological Office of Xinjiang, Aksu 843000

Abstract: Using NCEP ($1^\circ \times 1^\circ$) 6 h reanalysis data, observational data and new generation C-band Doppler radar data, a strong thunderstorm process in Keping, Aksu in August 19, 2009 was investigated. The results show that the meso- β shear line, the surface mesoscale low and the convergence line are the direct affecting systems of thunderstorm. The water vapor came from the eastern and middle regions of Tarim Basin, and the water vapor transportation was concentrated at low levels, where the easterly jet stream took a vital part in the water vapor transportation. Convective available potential energy had increased before the thunderstorm occurred. The thunderstorm developed initially from an ordinary rainstorm, then evolved gradually into a hailstorm, and lasted more than an hour. The reflectivity of the hailstorm at its mature stage displayed a middle-level echo overhang aloft and weak-echo region.

Key words: strong thunderstorm, meso- β shear line, the eastern jet stream at the low level, convective available potential energy (CAPE), weak echo region

引 言

南疆柯坪县地处天山南麓中段, 县域地势特殊, 为西、北、南部三面环山的谷地地形, 谷地向东开口, 为东喇叭口地形。柯坪属国家级的贫困县, 以农业和牧业为主, 生态环境脆弱, 夏季阵性天气多, 暴雨、冰雹是主要的气象灾害, 经常给农业、林果业、设施

农业带来很大危害。南疆地区暴雨、冰雹等强对流天气局地性强、生消快、危害重, 一直是天气预报工作的难点, 许多学者对我国东部暴雨、冰雹等强对流天气研究取得了一定的研究成果, 何群英等^[1]对天津的局地大暴雨天气进行了动力学诊断和中尺度分析, 廖玉芳等^[2]分析了常德市大暴雨的 β 中尺度系统, 王莉萍等^[3]、王楠等^[4]、王中等^[5]、屠妮妮等^[6]应用多普勒雷达资料对河北、陕西、重庆、川渝地区的

* 中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2010004)和科技部公益性行业科研专项(GYHY201006012)共同资助
2010 年 10 月 21 日收稿; 2011 年 1 月 30 日收修定稿
作者: 张俊兰, 从事天气预报研究和气象服务工作. Email: zjl_0997@sina.com

局地暴雨进行了中尺度分析,张晰莹等^[7]、王华等^[8]、郭艳等^[9]、龙余良等^[10]对黑龙江、北京、江西等地的冰雹天气进行了系统的研究,潘玉洁等^[11]、郑媛媛等^[12]分析了福建、安徽的超级单体风暴的雷达回波特征,李文娟等^[13]对山东境内的冰雹天气的中小尺度系统进行了分析。南疆地区强对流天气的研究也有一定进展,张云惠等^[14]应用多普勒天气雷达资料对南疆西部的强降雨进行详细分析;刘进新^[15]和彭江良等^[16]通过研究南疆阿克苏的强对流和冰雹天气过程,得出了冰雹天气发生时物理量场分布和雷达回波特征,这些研究提高了对南疆雷暴物理机制的认识水平。

2009年8月19日南疆阿克苏地区柯坪县出现强雷暴天气,本文通过分析应用地面、高空环境场常规资料、6 h时间间隔 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP再分析资料以及阿克苏新一代天气雷达产品资料,运用天气学原理^[17-18],对造成这次强雷暴天气的环境场条件和中小尺度系统进行诊断分析,揭示引发这次雷暴天气的成因,借助多普勒天气雷达探测强对流天气的优越性,揭示南疆强雷暴天气的雷达回波特征,提高强雷暴天气的预警和预报能力和水平,对今后雷暴天气的预报预警与服务提供有益的参考和依据。

1 雷暴天气概况

2009年8月19日午后,受强对流云影响,南疆阿克苏地区西南部的柯坪县17:12开始降水,至18:47雨量达74.1 mm,县城积水深度15~20 cm(22:00时至24:00时又降雨7.9 mm)。此次大暴雨为1959年柯坪建站以来最大的一次暴雨。暴雨过程中出现冰雹,柯坪测站冰雹最大直径10 mm,降雹从17:27持续到18:01,长达34分钟,测站平均积雹厚度5~8 cm,平均积雹厚度12 cm,最大积雹厚度接近30 cm,此次冰雹直径和持续时间也突破历史极值。暴雨和冰雹灾害使6200户农民不同程度受灾,农作物受灾面积达1880 hm²,其中雹灾造成的农作物损失,棉花2000 hm²、红枣1200 hm²、玉米1353 hm²,暴雨和冰雹共造成经济损失5540余万元。

2 天气背景分析

2.1 环流形势分析

在500 hPa等压面上,2009年8月18日08:00,

欧亚大陆上空环流经向度开始增大,为两槽两脊型:里海和巴尔喀什湖地区为高压脊,威海和贝加尔湖以西地区各有一低槽,20:00,随着里海到东欧的高压脊发展和东移,威海低槽东移南压,巴尔喀什湖脊也开始出现南跨,19日08:00,威海至东欧的高压脊继续向北发展,乌拉尔山南部西北风带建立,随着乌拉尔山北风带上冷空气的南下,威海—巴尔喀什湖的中亚低槽也不断向南加深,中亚低槽前部的西南气流在喀什至阿克苏之间生成一中尺度切变线,柯坪地区处于中尺度切变线前(图略)。中亚低槽的稳定,配合切变线系统,在阿克苏西南部柯坪县形成有利于对流云系发展的环流背景。

2.2 中尺度影响系统

造成此次雷暴天气的直接影响系统是 β 中尺度影响系统,主要有中尺度切变线、地面中尺度低压和地面辐合线。

2.2.1 中尺度切变线

影响此次雷暴天气的系统为中尺度切变线。19日08:00,500 hPa上 40°N 附近锋区增强,中亚低槽低值中心由568 dagpm加深为564 dagpm,风速加大了 $2\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在喀什与阿克苏之间出现了切变线,切变线西侧为西北风,东侧为西南风,西南风速达 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略),该切变线尺度约500 km,有明显的气旋式风向转变,为中尺度切变线。中低层700和850 hPa也有切变线配合,南疆东部偏东风较强,850 hPa若羌的东风达 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,形成了风场向南疆西部辐合的态势。08:00—20:00中亚低槽东移南压,切变线东移出境造成柯坪雷暴天气。

19日08时,柯坪附近700 hPa至地面均存在西南风与偏东风之间的风切变线,即有一条从低压中心向东伸出的暖式切变线,850 hPa附近强对流天气区东部的偏东风最强,形成的暖式切变线也最强,雷暴天气发生在对流层中低层较为一致的暖式切变线中,柯坪正好位于暖式切变线上,暖式切变线可造成低层辐合的发展,形成低层辐合区,对柯坪此次强雷暴天气的发生和发展起到了重要作用。

2.2.2 地面中尺度低压

19日08:00的地面图上,柯坪西部,阿图什、巴楚和柯坪之间生出一1003 hPa闭合圈的中尺度低压系统,中心最低值1002.7 hPa,低中心南部出现了与500 hPa切变线对应的地面中尺度切变线,其上存在明显的西北—西南风向的转变。

2.2.3 地面辐合线

图1为8月19日暴雨发生前地面中尺度流场结构,08:00起伊塞克湖至柯坪南部出现中尺度辐合线,辐合线上有较强的风速辐合,11:00中尺度辐合线位于伊塞克湖至柯坪南部,长度约450 km,中尺度辐合线呈西北—东南向,辐合线北部为东北气流,以南为西南气流,辐合线北端在伊塞克湖附近形成了气旋性涡旋,辐合中心位于伊塞克湖南部(图1a)。17:00,中尺度辐合线顺转东移呈南北向,辐合线后方偏西风速 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,前方只有

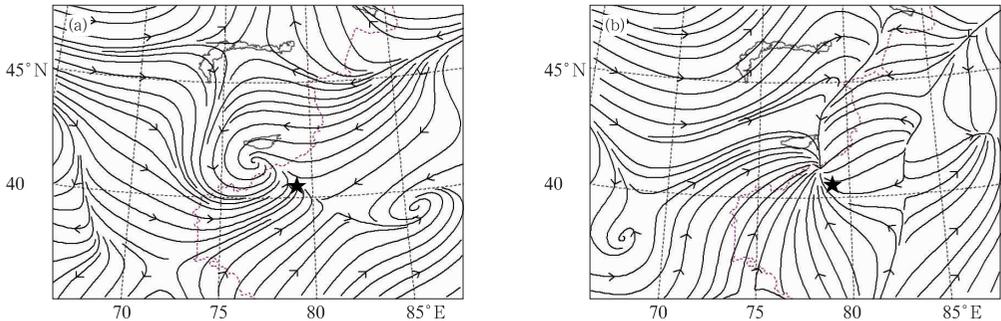


图1 2009年8月19日11:00(a)和17:00(b)地面流场(★为柯坪县位置)

Fig. 1 The surface stream fields at 11:00 BT (a) and 17:00 BT (b) 19 August 2009

(★ denotes Keping)

此次雷暴天气的影响系统 β 中尺度切变线较为深厚,从500 hPa延伸到地面,雷暴区配合有地面中低压和辐合线。此次雷暴天气就是在有利的大尺度环流背景下、深厚的中尺度切变线、地面中低压和辐合线的共同作用产生的。

为分析此次雷暴天气中的高低空急流、水汽条件和层结稳定度,利用NCEP每6小时时间间隔的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,对雷暴发生前后的高低空急流、水汽通量、水汽通量散度以及对流有效位能CAPE等物理量场进行了诊断分析。

2.3 高低空急流

2.3.1 低空急流

由850 hPa风场变化可以看出,19日02:00,雷暴区柯坪站南部的塔里木盆地中部出现了两支低空急流,位置在 39°N 附近的塔里木盆地,呈东西走向,东支为东风急流,西支为西北急流,在柯坪南部的 39°N 附近形成明显的东西风辐合带,柯坪位于急流区北侧,配合有 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负散度中心(图略)。08:00,中亚低槽前切变线发展,西北急流减弱,偏东急流带北移至 $39^\circ \sim 41^\circ\text{N}$,塔里木盆地东部的东风加大,位置东扩,东风急流从盆地东部延伸

$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着风速逐渐加大,辐合明显增强,辐合线上存在偏东、偏西、偏南三股气流的风场辐合,流线从偏东、偏西、偏南三个方向向柯坪北部辐合,形成辐合中心,柯坪位于辐合中心南部(图1b)。11:00至17:00中尺度辐合线较强,20:00减弱消散,维持10小时左右。从地面流场来看,地面中尺度辐合线维持时间较长,柯坪位于辐合中心南部,暴雨区上空存在中尺度辐合上升运动,中尺度辐合线的出现、维持和加强增强了近地面层的辐合抬升,对此次雷暴的产生起到重要作用。

到盆地西部,东风急流风速 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,盆地东部若羌站的实测东风达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,柯坪位于低空偏东急流出口区的北侧,同时负散度区北抬,强度有所减弱($-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),柯坪南部出现了气旋式环流圈(图2a)。14:00偏东急流减弱,但柯坪西部出现了偏西气流,柯坪位于偏西和偏东风的辐合区内,散度仍为 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,20:00偏东急流消失,转为西南气流控制,偏西风速有所增强。

700 hPa风场上,08:00柯坪位于弱偏西和偏东风的辐合区附近,东西风速较小,散度值接近 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图2b),500 hPa雷暴区上空为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的西南偏西风,处于弱辐散区内(图2c),14:00—20:00转为偏西风,风速有所加大,弱辐散作用减弱(图2d)。

2.3.2 高空急流

分析200 hPa风场资料,发现高空也存在急流。19日02:00,200 hPa出现了两支高空急流——西北和西南急流,西北急流位于中亚地区,西南急流带位于 $38^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ 附近的南疆南部—东疆—河西走廊一带,中心最大风速大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,影响此次天气的为西南急流。08:00,西南急流加强东移,西南急流带上若羌站的实测西南风速为 $44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,柯坪

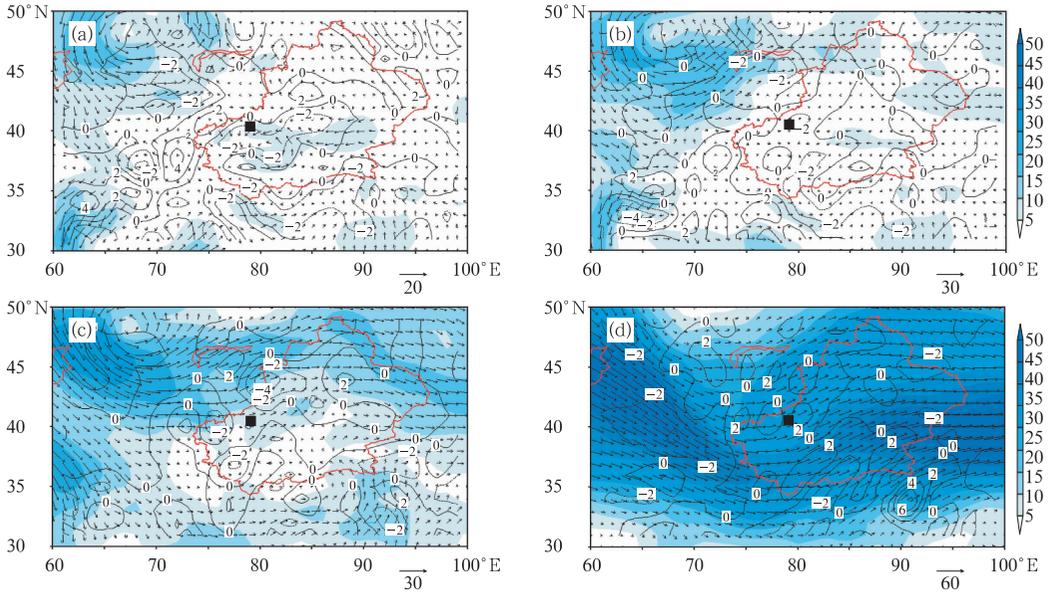


图 2 2009 年 8 月 19 日 08 时 850 hPa(a)、700 hPa(b)、500 hPa(c)、200 hPa(d) 风矢量(带箭头短线)、全风速(阴影部分, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度(实线或虚线, s^{-1}) (■为雷暴区)
 Fig. 2 The distributions of wind vector (arrow), total velocity (shadings, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (solid or dashed line, unit: 10^{-5}s^{-1}) at 08:00 BT 19 August 2009, at (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, and (d) 200 hPa (■ is the place of stormrain)

处于西南急流入口区北侧的辐散区(散度 $0 \sim 2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)下,大于 $60 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流核北抬加强到 40°N 附近的塔里木盆地东部—甘肃西部地区(图 2d),14:00,西南急流带继续东移,辐散作用增强,盆地东部最大散度中心值 $4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,说明暴雨发生前高空急流入口区右侧辐散作用增强,20:00,西南风减弱,西南急流消失。

上述分析表明,高低空急流也是本次雷暴天气的重要影响系统。图 2 中较好地显示了高低空急流在本次雷暴天气中的配置,低空偏东急流位于高空西南急流的北侧,雷暴区上空 200 hPa 西南急流加大了高层辐散,低空偏东急流加剧低层辐合,200 hPa 辐散区与 850 hPa 辐合区在柯坪附近重合,低空急流携带暖湿气流在雷暴区北侧交汇,高低空急流出现了耦合形势。这种形势配置加强了大气潜在的不稳定,有利于产生辐合上升运动。

2.4 水汽条件

水汽输送和水汽辐合是暴雨天气的重要条件,除了在暴雨区上空有大量的水汽和水汽输送,还需有水汽的集中和辐合的过程。由于此次天气中水汽大部分集中在中低层,以 800 hPa 以下为主,因此重点分析 850 hPa 的水汽通量和水汽通量散度的分

布。

2.4.1 水汽来源

强对流天气的发生发展和维持,必须有丰富的水汽供应^[13],水汽来源及水汽输送可通过水汽通量的水平分布场分析判断,从 850 hPa 水汽通量场可看出,水汽的输送与低空急流的建立和发展密切相关,19 日 02:00(图 3a),在雷暴区附近出现了两条水汽输送带,分别与东风急流、西北急流相对应,来自塔里木盆地中部的东方水汽通道建立,借助东风急流向雷暴区南部输送水汽。08:00(图 3b),水汽通量大值区向盆地东部扩展,东方水汽输送从塔里木盆地东部一直延伸到雷暴区南部地区,雷暴区位于水汽通量大值区内,水汽通量 $(4 \sim 6) \text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,雷暴区北部的北方水汽输送也有一定的补充。此时雷暴区南部的气旋式环流也将环流圈南部的水汽高湿区 [水汽通量 $(4 \sim 6) \text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$] 通过气旋式环流南部的偏西气流和东部的偏南气流将水汽向雷暴区输送,雷暴区位于水汽通量大值区的下风方,此时到达雷暴区的水汽达到最强盛时期;14:00(图 3c),随着偏东急流的减弱和偏西气流的出现,产生了偏东和偏西两条水汽通道的输送和在雷暴区的辐合,水汽输送带范围缩小,强度减弱,20:00 水汽输送通道切断。

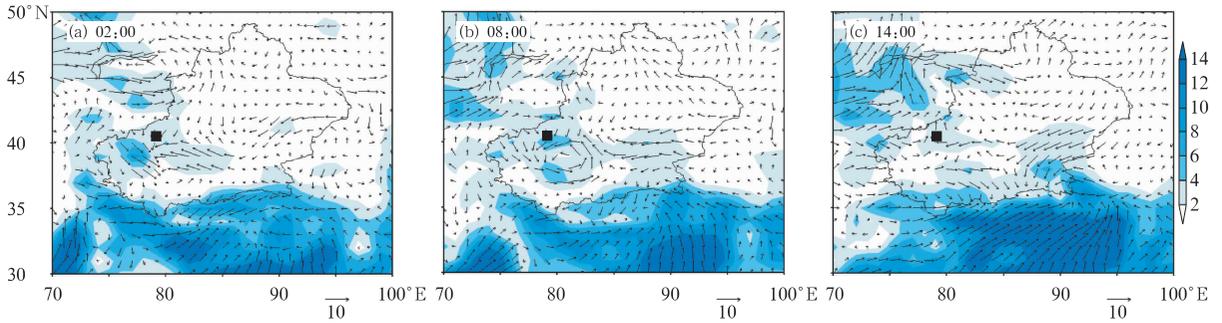


图 3 2009 年 8 月 19 日 850 hPa 水汽通量(阴影区,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)、水汽通量矢量(带箭头短线)(■为雷暴区位置)

Fig. 3 The distributions of vapor flux (shadings, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and vapor flux vector (arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa on 19 August 2009 at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT, and (c) 14:00 BT (■ is the place of stormrain)

2.4.2 低层水汽辐合

低层水汽的辐合作用是此次雷暴天气发生的必不可少的条件,水汽通量散度的水平分布可说明水汽输送的集中和辐合程度,在 19 日 02:00—14:00 的 850 hPa 水汽通量散度变化图(图 4)上,02:00 雷暴区位于天山西部水汽辐合中心的边缘,柯坪水汽通量散度值为 $0 \sim -1 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (图 4a);08:00 水汽辐合中心南压,中心强度加强,水汽辐合中心在雷暴东北方,中心数值为 $-3 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,柯坪为 $-2 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,水汽辐合作用增强(图 4b),可判断

近地层至对流层低层柯坪东北方向的水汽辐合中心维持了数小时;14:00,水汽辐合中心东移至天山中段,位于南疆西南部的水汽辐合区东北上,移至帕米尔以东区域,柯坪位于水汽通量散度 0 值附近,水汽辐合作用明显减弱(图 4c)。

雷暴天气临近时,低层不断有水汽向雷暴区聚集,主要水汽来源地为塔里木盆地东部,还有部分水汽来源于塔里木盆地中部和帕米尔高原附近,水汽输送集中在低层,塔里木盆地东部为暴雨区的主要水汽来源,在雷暴过程中,低空偏东急流的存在为水汽输送起到了重要作用。

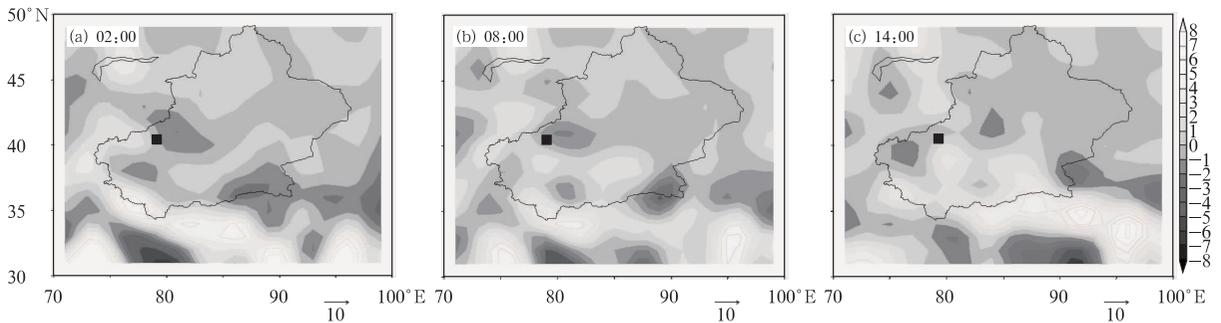


图 4 2009 年 8 月 19 日 850 hPa 水汽通量散度(单位: $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)分布图(■为雷暴区位置)

Fig. 4 The distributions of 850 hPa vapor flux divergence (unit: $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) on 19 August 2009 at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT, and (c) 14:00 BT (■ is the place of stormrain)

2.5 层结稳定度

2.5.1 对流有效位能 CAPE

目前我国的探空资料只有 08 时和 20 时,强对流天气与高空探测站的位置和探空施放时间完全吻合的概率很小。此次雷暴天气的发生地柯坪县距离最近的探空站——阿克苏探空站也有 120 km,而且雷暴出现时间为 17:00 以后,探空数据和雷暴发生

的时间相隔近 10 小时,用当日阿克苏探空资料分析层结探空特征物理量是欠妥当的,潘玉洁等^[11]、郑媛媛等^[12]也遇到此类情况。彭治班等^[19-20]研究提出,对流有效位能 CAPE 不是单层的指数,属垂直积分稳定度参数,是研究强对流天气过程能量变化最有效最为常用的物理量。本文绘制了由 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的资料给出的 CAPE 水平分布(图 5),分析柯坪强雷暴天气发生前后 CAPE 的变化。

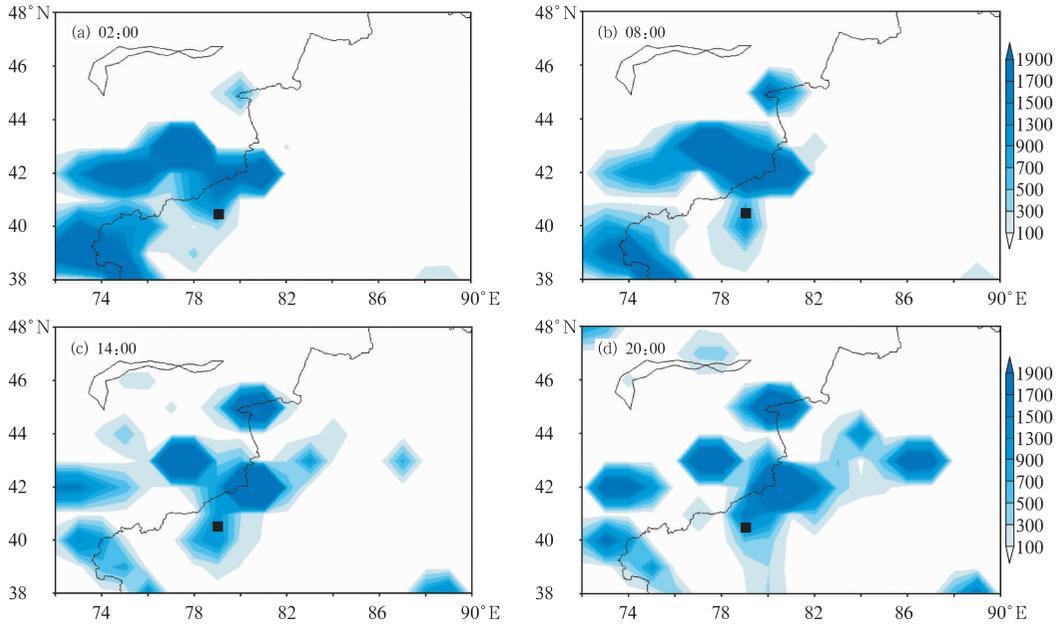


图 5 2009 年 8 月 19 日对流有效位能 $CAPE$ (单位: $J \cdot kg^{-1}$) 的分布(■为雷暴区位置)

Fig. 5 The distributions of $CAPE$ (shadings, unit: $J \cdot kg^{-1}$) on August 19, 2009 at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT, (c) 14:00 BT, and (d) 20:00 BT(■ is the place of stormrain)

在发生雷暴天气前后,图 5 中 $CAPE$ 的大值中心始终位于雷暴区柯坪的北部,前期 19 日 02:00, $CAPE$ 大值中心位于天山西段及西国境线区域,柯坪上空处于 $CAPE$ 大值中心的南侧,约为 $800 J \cdot kg^{-1}$, 含有一定的不稳定能量(图 5a);08:00, $CAPE$ 高值区范围扩大,有一 $CAPE$ 高能舌向南伸展,雷暴区柯坪地区被 $CAPE$ 高能舌覆盖,柯坪 $CAPE$ 升为 $900 J \cdot kg^{-1}$ 左右(图 5b),此时阿克苏探空站资料计算 $CAPE$ 由 18 日 20:00 增为 $524.8 J \cdot kg^{-1}$; 14:00, $CAPE$ 高能舌继续向南伸展,雷暴区附近 $900 \sim 1300 J \cdot kg^{-1}$ 的高能区明显扩大,柯坪 $CAPE$ 也约升为 $1100 J \cdot kg^{-1}$,雷暴临近,雷暴区 $CAPE$ 达到最大值(图 5c);20:00,高能中心东移北收,雷暴区位于 $CAPE$ 值为 $900 \sim 1300 J \cdot kg^{-1}$ 区域的南部边缘(图 5d),雷暴天气爆发后,凝结潜热释放,空气增温,不稳定能量逐渐减弱。

以上分析显示,受太阳短波辐射的影响, $CAPE$ 最小值出现在 19 日 02:00,最大值出现在 14:00—20:00,有明显的日变化特征,与雷暴天气对应关系较好,和陈立强等^[21]的研究结论一致。同时,此次雷暴发生区内 $CAPE$ 有一个增大的过程,但雷暴区均在 $CAPE$ 高值中心南侧的低值区内,这与井宇等^[18]的研究结果类似,原因有待于进一步分析和研究。

2.5.2 湿静力温度

柯坪地面自动站每小时观测资料在雷暴出现前

后发生了剧烈的变化,19 日 18:00 雨量猛增,17:12—18:00 雨量 $67.2 mm$,气温由 17:00 的 $27.1^{\circ}C$ 降为 18:00 的 $12.3^{\circ}C$,降温幅度近 $15^{\circ}C$,19:00,雨强明显减弱,雨量为 $6.8 mm$,气温也上升了 $7.2^{\circ}C$ 。气象要素的剧烈变化,使低层能量堆积并释放,用湿静力温度代表低层能量,根据文献^[22]中湿静力温度计算公式,计算了雷暴出现前后新疆阿克苏地区 10 个自动气象站每小时一次的湿静力温度,发现柯坪站 19 日 08:00 后湿静力温度值居地区 10 站之首,湿静力温度随雷暴临近逐渐增大,对形成雷暴较为有利,15:00 最高($63.3^{\circ}C$),18:00 湿静力温度降至最低($41.2^{\circ}C$),雷暴天气出现后,低层能量得到了释放。

3 多普勒雷达回波特征

3.1 组合反射率

本文所用资料为新疆阿克苏 CINRAD-CC 多普勒雷达每 6 分钟一次的强度和径向风场以及导出产品,阿克苏站的雷达观测显示本次暴雨由单一单体风暴发展而来,该单体离雷达距离 $100 km$ 左右,图 6 是降雨回波的组合反射率因子,通过强回波中心的反射率因子垂直剖面 and 径向速度的演变过程,从图 5 中的雷达回波演变看,本次雷暴天气分为两

个阶段,第一阶段从 17:15—18:04,为暴雨特征,17:30—18:00 柯坪雨量达 68.7 mm,为特大暴雨强度;第二阶段从 18:21—18:54,为雹暴特征,柯坪东南部的卡拉库提村附近的雹灾可以说明,当地冰雹直径 10 mm,降雹密度大,最大积雹深度接近 30 cm。

对流单体风暴从 16:40—19:05 在柯坪县附近维持了 2 小时以上。8 月 19 日 15:03 在距离雷达站 128 km、方位 251° 的高空新生了一块回波单体,向上发展到 8~9 km,回波以 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度向东南方向移动,不断增强。从地面天气系统的演变来看,雷暴第一阶段正是地面中尺度辐合线和地面中尺度低压的维持和加强、有利于中尺度辐合上升运动发展的时期。17:15 雷暴前沿移到柯坪县上空,县城出现降雨,反射率因子达到 55 dBz,回波自 2 km 发展到顶高 10 km,对流单体在柯坪县城维持的时间是 17:25—17:58,17:31—17:59 回波继续增强,出现了 65 dBz 强回波中心,最大反射率因子达 69 dBz (图 6a)。同时反射率因子的垂直结构(图 6b)也发生了变化,17:59 回波向高低层伸展,回波底已下降到 1.5 km 左右,回波顶超过了 12 km,为最大回波顶高,对流云顶远远超过 -20°C 层(08:00 阿克苏为 7189 m)的高度。50 dBz 的强回波区升到 9 km,6 km 左右高度出现了 60 dBz 的强中心,此时柯坪测站测得降雨强度大,降水率高达 $135 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,为最强降雨时段,雷暴也发展为暴雨雷暴。18:04,50 dBz 的强回波区移出柯坪县,回波略有减弱,强中心仍为 60 dBz,回波顶开始下降,回波顶降到 11 km,强回波高度降至 8 km。

雷暴的第二阶段为雹暴特征。回波主体移出柯坪县后,向东南移的速度明显加快,强度又开始增强,分析发现,雷暴发展的中后期 18:21—18:54 为雹暴特征,反射率因子由低到高向低层入流一侧倾斜,雷暴东南方入流区一侧出现了明显的弱回波区和悬垂结构,60 dBz 的强中心位于中低层弱回波区以下,60 dBz 的回波面积增大,18:54 最强,最大反射率因子达 71 dBz,估计此时雨量比 17:25—18:04 大,但无观测站点,无法获取监测数据。19:05 回波减弱,强回波面积缩小,回波顶高下降,弱回波区开始坍塌(图 6b)。

3.2 径向速度

分析 8 月 19 日阿克苏雷达的 0.5° 仰角的径向速度平显(图 6c),在暴雨雷暴第一阶段,17:15 距离雷达 120 km 处出现了零速度线,由于正负速度区

域的变化,17:59—18:04 零速度线近乎直线,零速度线呈西北—东南向,其东北部为正速度区,西南部为负速度区,形成了西北—东南向的中尺度辐合线,辐合较为明显,同时在中尺度辐合线的南端出现了一对正负速度对,正负速度对表现为辐合式气旋性旋转,为气旋性涡旋,旋转速度较小,为 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,上述中尺度辐合线发展、维持的时间与雷暴第一阶段持续时间基本一致,中尺度辐合线与反射率因子强回波位置基本对应。随着回波的移动辐合加强,17:59 负速度范围明显增大,并伸展到 12 km 左右(图略),此时气旋性涡旋达到最强阶段,18:04 正速度面积减小,旋转高度降低,旋转速度减小,之后气旋性涡旋和气旋性辐合逐渐减弱,直至消亡。而在雹暴阶段,中尺度辐合线和气旋性涡旋均未出现。

此次雷暴过程的气旋性涡旋的水平直径约 15 km 左右,高度在 4~6 km 之间,厚度约 2 km,消亡时顶部快速下降,由于它转动速度较小($< 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),厚度较浅薄,强度相对较小。17:43—18:04 雷达识别出风暴中存在中气旋,但在径向速度平显和垂直剖面图上的气旋性涡旋未达到中气旋标准,但它的存在,对雷暴单体的发展维持起着重要的作用。

3.3 垂直累积含水量

图 7 给出垂直液态水含量 VIL 在暴雨云发展过程中的变化,暴雨区上空水分累积区的含水量较为丰富,尤其是 17:42—18:54,垂直液态水含量都超过 $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,从图 7 可以看出, VIL 的大值区有 2 次明显跃增,分别与雷暴的第一阶段和第二阶段相对应,第 1 次 VIL 跃增与暴雨雷暴相对应,在气旋性涡旋生成前的半小时左右(17:31 左右), VIL 值由 $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,这种强度一直维持到 18:04。第 2 次 VIL 值跃增与雹暴相对应,出现在 18:21,此时 $\geq 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 水含量大值区面积突然增大,18:21—18:54, VIL 值由 $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,此时弱回波区已经形成,对流单体发展成熟, VIL 值的明显增长与弱回波区出现、维持的时间基本一致。

4 卫星云图分析

目前针对新疆地区的中尺度对流系统的分析较少,笔者利用每小时一次的 FY-2C 卫星红外云图资

料,对这次发生在柯坪的中尺度对流云系进行了分析。从图 8a 可见,16:00,由于受 β 中尺度影响系统相互作用,在中尺度暖切变线附近、强雷暴区柯坪县

北部生成一中尺度对流云系;17:00(图 8b),柯坪县北部对流单体强度明显增强,云系略有南压,面积有所增大,此时离柯坪县出现暴雨还有 12 分钟;

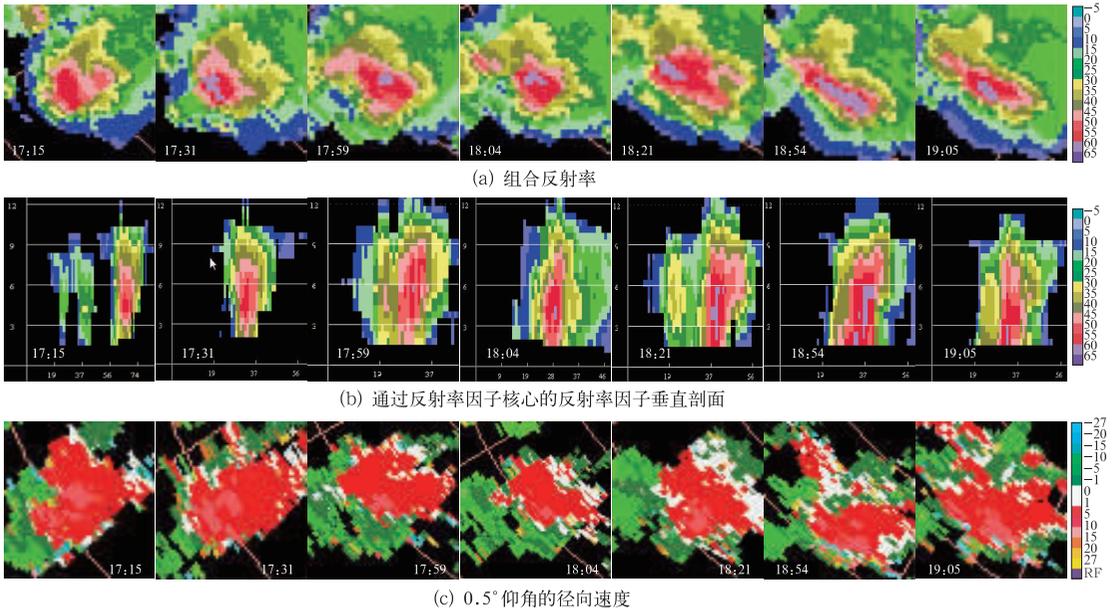


图 6 2009 年 8 月 19 日阿克苏多普勒雷达组合反射率(a,单位:dBz)、通过反射率因子核心的反射率因子(b,单位:dBz)垂直剖面以及径向速度(c,单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 6 Time series of the storm radar reflectivity (a,unit: dBz) and the reflectivity cross sections (b,unit: dBz) and the storm relative radial velocity (c,unit: $m \cdot s^{-1}$) from Aksu C-band radar from 17:15 BT to 19:05 BT August 19, 2009

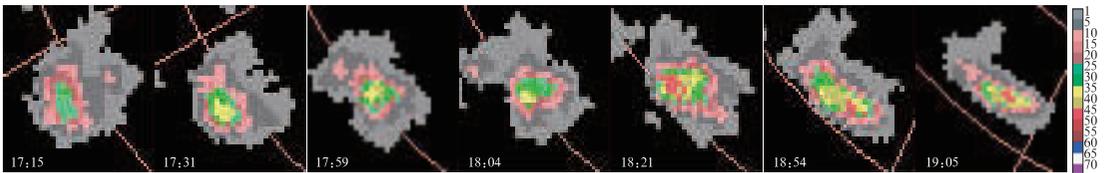


图 7 阿克苏雷达 2009 年 8 月 19 日垂直液态水含量 VIL(单位: $kg \cdot m^{-2}$)演变

Fig. 7 Variations of the vertically integrated liquid water content (unit: $kg \cdot m^{-2}$) from Aksu C-band radar on August 19, 2009

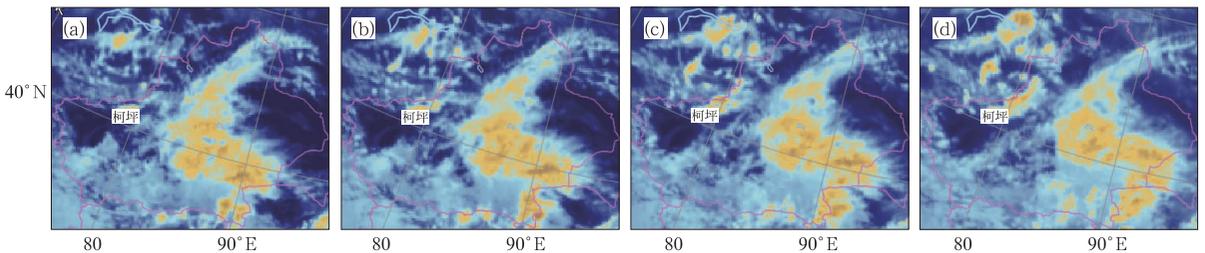


图 8 2009 年 8 月 19 日 16:00—19:00 柯坪县强雷暴卫星云图云系演变

(a) 16:00,(b) 17:00,(c) 18:00,(d) 19:00

Fig. 8 Development of cloud system in satellite cloud images corresponding to thunderstorm in Keping on 19 August 2009 at (a) 16:00 BT, (b) 17:00 BT, (c) 18:00 BT, and (d) 19:00 BT

18:00 (图 8c), 发展成为一较完整宽度 < 100 km、长度 < 200 km 的 β 中尺度对流单体, 随着对流单体向柯坪县方向的继续南压, 强度进一步加强, 范围也有所扩大, 云团主体压在柯坪县上空; 19:00 (图 8d), 强雷暴对流云团继续南压, 强度仍较强影响柯坪县的强雷暴对流云团向东移过程中, 又先后影响柯坪县东南部的部分乡镇, 柯坪县 17:00—19:00 的 2 小时降水量达 74.1 mm, 20:00 (图略) 切变线减弱, 对流云系也明显减弱消散并东移, β 中尺度对流单体生命史约 2~3 小时。

5 结 语

(1) 此次雷暴天气过程是在中亚低槽、高空西南急流和低空偏东急流的大尺度影响系统下、与 β 中尺度切变线、地面中低压、地面辐合线等中尺度影响系统的共同作用造成的, 中尺度切变线是造成此次雷暴天气的主要影响系统, 深厚的切变线、地面中低压和辐合线在雷暴天气的短时临近预警中具有一定的指示意义。

(2) 供应此次暴雨的水汽源地主要位于塔里木盆地东部和中部, 两个水汽源地将水汽向雷暴区输送, 塔里木盆地东部的水汽输送更强, 水汽集中更显著。水汽输送集中在低层, 低空偏东急流的存在为水汽输送起到了重要作用。

(3) 受探空站点位置和施放探测时间的影响, 采用距离雷暴最近探空站点的资料不能很好地捕捉中小尺度天气, 应用对流有效位能 *CAPE* 的水平分布变化较为合理, 此次雷暴发生区内 *CAPE* 有一个增大的过程, 但并不处于 *CAPE* 高值中心, *CAPE* 的增大对强对流天气的发生具有一定的指示作用。加密和完善南疆气象灾害观测系统, 对提高灾害性对流天气的预警能力和水平具有重要的意义。

(4) 阿克苏多普勒天气雷达实时跟踪观测了此次雷暴天气的强度、移动与发展过程, 探测到了雷暴的中尺度辐合线、气旋性涡旋、弱回波区等一些雷暴的典型特征, 反射率因子、反射率因子垂直剖面、速度图上的中尺度辐合以及垂直液态水含量 *VIL* 值的变化与暴雨雷暴和雹暴两个阶段存在较好的对应关系。

(5) FY-2C 卫星红外云图资料显示, 此次影响柯坪县强雷暴区的对流单体为 β 中尺度对流单体, 生命史约 2~3 小时, β 中尺度对流云系产生在暖锋

式切变线附近, 与多普勒天气雷达探测到的中尺度辐合线等系统相互对应, 强雷暴对流单体的中尺度辐合作用较为显著。

参考文献

- [1] 何群英, 东高红, 贾慧珍, 等. 天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 16-22.
- [2] 廖玉芳, 唐小新, 陈媛, 等. 常德市 2002 年 5 月 13 日大暴雨成因解析[J]. 气象, 2009, 35(5): 42-48.
- [3] 王莉萍, 崔晓东, 王国宁, 等. 两次突发性强对流天气的对比分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 40-44.
- [4] 王楠, 刘勇, 郭大梅. 用多普勒雷达资料对一次区域性暴雨的中尺度分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 29-34.
- [5] 王中, 白莹莹, 杜钦, 等. 一次无地面冷空气触发的西南涡大暴雨分析[J]. 气象, 2008, 34(12): 63-71.
- [6] 屠妮妮, 段玮. 2006 年 9 月 4—5 日四川暴雨过程分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 51-60.
- [7] 张晰莹, 张礼宝, 安英玉, 等. 弱冰雹云雷达回波结构特征分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 38-42.
- [8] 王华, 孙继松. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象, 2008, 34(3): 16-21.
- [9] 郭艳. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 40-46.
- [10] 龙余良, 刘建文. 江西冰雹与雷雨大风气候变化特征的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(12): 62-67.
- [11] 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 一次强飚线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 621-635.
- [12] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翔, 等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 317-338.
- [13] 李文娟, 郑国光, 朱君鉴, 等. 一次中气旋冰雹天气过程的诊断分析[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 291-295.
- [14] 张云惠, 王勇, 支俊, 等. 新疆西部依次强降雨的多普勒天气雷达分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(6): 17-20.
- [15] 刘进新. 2008 年盛夏阿克苏一次强对流天气成因及雷达回波分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(4): 43-50.
- [16] 彭江良, 吴芳, 黄海云, 等. 阿克苏地区一次冰暴天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(5): 15-18.
- [17] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 248-252.
- [18] 丁一汇. 高等天气学 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2005: 323-326.
- [19] 彭治班, 周小刚, 孟遂珍, 等. NCAPE——归一化对流有效位能 [M] // 彭治班, 刘建文, 等. 国外强对流天气的应用. 北京: 气象出版社, 2001: 111-115.
- [20] 彭治班, 李晓东, 刘建文, 等. 作为热机的自然对流 [M] // 彭治班, 刘建文, 等. 国外强对流天气的应用. 北京: 气象出版社, 2001: 134-135.
- [21] 陈力强, 张立祥, 周小珊. 东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系 [J]. 高原气象, 2008, 27(2): 339-348.
- [22] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础 [M]. 北京: 气象出版社, 2005: 39-40.