苗爱梅, 贾利冬, 李苗, 等. 2009年山西5次横切变暴雨的对比分析[J]. 气象, 2011, 37(8): 956-967.

2009 年山西 5 次横切变暴雨的对比分析*

苗爱梅1 贾利冬2 李 苗3 晋立军4 范光海5

1 山西省气象台,太原 030006
 2 山西省气象局,太原 030002
 3 山西省气象科技服务中心,太原 030002
 4 山西省人工降雨防雹办公室,太原 030032
 5 山西省气象局培训中心,太原 030032

提要:利用常规和非常规气象观测资料,针对 2009 年汛期山西境内出现的 5 次横切变区域性暴雨天气过程进行流型配置、物理量诊断、卫星、雷达、GPS/MET 资料以及可预报性综合分析。发现:5 次横切变暴雨过程中 2009 年 7 月 7-8 日的暴雨过程是暴雨范围最大、降水强度最强、系统配置最完整的一次;连阴雨过程中无论是暴雨日还是非暴雨日都具有湿度大、湿层厚的特征,这是与其他 4 次非连阴雨暴雨过程的最大区别;对流性或混合性暴雨,在暴雨发生前 12 小时 500 hPa 及其以下都具有 θ_{*}随高度的增高而减小、500 hPa 以上都具有 θ_{*}随高度的增高而增加的特征,稳定性暴雨则具有 θ_{*}随高度的增高而增加的特征。5 次暴雨过程 500 hPa 副高均为纬向型,700 hPa 均有西南急流轴配合以及大陆小高压相伴,暴雨落区均位于气柱水汽总量梯度的大值区到大值区南(东)部 0.5 个经纬度的范围内。分析结果表明:小高压的位置不同导致了不同风向的辐合和不同走向的横切变线产生,急流头向北伸展的纬度不同导致了横切变线所处的纬度差异,直接影响暴雨的落区;低涡的强度不同使得降水量发生明显的差异;高低空系统配置越完整暴雨落区和量级的可预报性也越强;连阴雨过程中垂直速度、水汽通量散度、垂直风切变是提前 24 小时判断暴雨发生与否的敏感因子;水汽锋区走向与中低层切变线走向基本一致,在降水开始前,稳定性暴雨过程比强对流暴雨过程水汽锋区形成时间有更多的提前量,且对流越强烈水汽锋区形成的时间越晚。 关键词:横切变,暴雨,流型配置,对比分析

Comparative Analysis of Five Transverse Shear Rainstorms During the Year 2009 in Shanxi

MIAO Aimei¹ JIA Lidong² LI Miao³ JIN Lijun⁴ FAN Guanghai⁵

- 1 Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006
- 2 Shanxi Meteorological Service, Taiyuan 030002
- 3 Shanxi Meteorological Scientific and Technological Service Centre, Taiyuan 030002
- 4 Shanxi Artificial Rainfall and Hail Resistance Office, Taiyuan 030032
- 5 Shanxi Meteorological Training Centre, Taiyuan 030032

Abstract: With conventional and unconventional meteorological observational data, aiming at the 5 transverse shear regional rainstorm weather processes appearing in the flood season during 2009 in Shanxi area, the authors configured the flow pattern, diagnosed the physical variables, and comprehensively analyzed the satellite, radar, and the GPS/MET data and the predictability, and discovered that within the 5 transverse shear rainstorm processes, the rainstorm process appearing during July 7–8, 2009, was the one that the range was the widest, the precipitation strength was the strongest, and the system configuration was

* 山西省科技攻关项目(20090311083)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M11)、公益性行业(气象)科研专项(GY-HY200906011)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2011-004)等共同资助
 2010年7月27日收稿; 2011年4月6日收修定稿
 第一作者:苗爱梅,主要从事中短期和短时天气预报技术研究.Email:mam1226@163.com

the most complete; in the continuous rainy process, whether rainstorm days or non-storm days, all have the following features that humidity was high and thick, and this was the biggest difference from the other 4 non-continuous rainy rainstorm processes; the convective or mixed rainstorm, has characteristics that it would decrease with the increasing height under 500 hPa, and would increase with the increasing height above 500 hPa 12 h ahead of the rainstorm setting in. Moreover the stable rainstorm has characteristics that it would increase with the increasing height. The 500 hPa horse latitude highs were all zonal types in the 5 rainstorm processes, and the 700 hPa horse latitude highs all had the southwest axis of jet stream being combined and the continental small high being accompanied, the rainstorm falling areas were all located at the area between the big value zone of the air column total vapor gradient and its southern (eastern), within $0.5^{\circ}E$ (N). The analysis result shows that: the location difference of the small high led to the convergence of the different wind direction and the generation of transverse shear line in different trend, the latitude difference of the jet stream head stretching toward north led to the latitude difference of transverse shear line location, which would directly influence the falling areas of rainstorms; the strength difference of low vortex made the evident difference of precipitation; the more complete the high-low air system configuration is, the stronger will be the predictability of rainstorm falling area and magnitude; during the continuous rainy processes, the vertical speed, moisture flux divergence, and vertical wind shear are the sensitive factors in judging whether rainstorm will approach or not 24 h in advance. The vapor front area trend is almost consistent with the mid-low layer shear line; before the rain approaches, the stable rainstorm process has more initial lead time in relation to the formation of the vapor front area than the severe convective rainstorm process, moreover, the stronger the convection is, the later the vapor front area forms.

Key words: transverse shear, rainstorm, flow pattern configuration, comparative analysis

引 言

2009 年汛期,山西的北中部几乎是同样的经、纬 距范围内出现了 5 次横切变线,但暴雨的落区不尽相 同,暴雨的站数从 8~34 站相差很大。有关暴雨及横 切变暴雨的落区问题已有不少研究^[1-19],但本文试图 从日常预报业务中,尤其是从 MICAPS 平台上能够 快捷获得的资料中寻找差异,探讨 5 次暴雨过程的可 预报性,旨在提高暴雨的短期预报质量。

1 资料来源

诊断分析所用的风场、高度场、地面气压场、物

理量场以及物理量场剖面图、5次横切变暴雨过程 的流型配置图制作均是采用北京区域中心下发的 MM5(0.25°×0.25°经纬度)分析场资料。所用降水 量资料是经过山西省气象信息中心审核过的雨量资 料,数据无误。

2 2009年山西横切变暴雨概况

表1为2009年汛期山西横切变暴雨的概况。 由表1可知,5次横切变暴雨过程,其中有2次为暖 式切变线、3次为冷式切变线暴雨过程;2次稳定性 暴雨过程24小时降水量最小,对流性转稳定性暴雨 过程24小时降水量最大;700 hPa均为西南暖湿急 流,850 hPa急流走向多样化。

表 1	2009	年汛期山	西横切	变暴雨概况
-----	------	------	-----	-------

Table 1 Overview of transverse shear rainstorms in flood season during 2009 in Shanxi									
时间/月、日、时	暴雨站数	700 hPa 急流走向	850 hPa 急流走向	横切变类型和位置	24 h 最大降水量/mm	降水性质			
7.07.20-7.08.20	34	西南	西南转东南	暖切(山西北中部)	96	对流转稳定			
7.16.20-7.17.20	8	西南	西南转东南	冷切(山西北中部)	82	混合			
8.21.08-8.22.08	14	西南	偏东	暖切(山西北中部)	77	稳定			
8.25.08-8.26.08	9	西南	南	冷切(山西北中部)	89	对流			
9.06.08-9.07.08	8	西南	东北和东南	冷切(内蒙古南压至山西)	78	稳定			

图 1 为 5 次暴雨过程暴雨中心逐时降水量。由 5 次暴雨过程暴雨中心站点逐时降水量演变发现, 2009 年 8 月 25—26 日对流性暴雨 1 小时降水强度 最强,但强降水维持的时间最短;7 月 7—8 日降水 总量最大,1 小时强降水持续的时间最长。



图 1 2009 年山西 5 次横切变暴雨中心逐时降水量 (a)7 月 7 日 20 时至 8 日 20 时太原小店区逐时降水量; (b)7 月 16 日 20 时至 17 日 20 时石楼逐时降水量; (c)8 月 21 日 08 时至 22 日 08 时平定逐时降水量; (d)8 月 25 日 08 时至 26 日 08 时汾阳逐时降水量; (e)9 月 6 日 08 时至 7 日 08 时临县逐时降水量 Fig. 1 The hourly precipitation in the center of rainstorms in shanxi during July—September 2009 (a) Xiaodian District of Taiyuan, 20:00 BT 7-20:00 BT 8 July 2009; (b) Shilou, 20:00 BT 16-20:00 BT 17 July 2009;

(c) Pingding, 08:00 BT 21-08:00 BT 22 August 2009;
(d) Fenyang,08:00 BT 25-08:00 BT 26 August 2009;

(e) Linxian, 08:00 BT 6-08:00 BT 7 September 2009

3 流型配置与暴雨落区

图 2 给出了 2009 年 7 月 8 日 08 时(a)、7 月 16

日 20 时(b)、8 月 21 日 08 时(c)、8 月 25 日 08 时 (d)、9 月 6 日 08 时(e)和 9 月 7 日 08 时(f)的流型 配置与 7 月 7 日 20 时至 7 月 8 日 20 时(a)、7 月 16 日 20 时至 7 月 17 日 20 时(b)、8 月 20 日 20 时至 8 月 21 日 20 时(c)、8 月 25 日 08 时至 8 月 26 日 08 时(d)、9 月 6 日 08 时至 9 月 7 日 08 时(e)的暴雨落 区以及 9 月 7 日 08 时至 9 月 8 日 08 时的大雨落区 (f)。

由图 2 可知:5 次暴雨过程副高均呈纬向型,5 个暴雨日和1个大雨日 700 hPa 均有西南急流相 伴,不同的是暴雨日 700 hPa 急流呈气旋性弯曲,大 雨日 700 hPa 急流呈反气旋性弯曲,且急流头不在 山西境内。

7月8日08时,位于河套中东部的500、700和 850hPa的槽线、地面冷锋均呈东北一西南走向;在 700hPa上,大陆小高压位于内蒙古的中东部地区; 700和850hPa分别有3040和1400gpm的闭合低 涡,中心位于河套的东北部,700和850hPa位于山 西北中部的暖切变线近似西北一东南走向;暴雨落 区在700hPa低涡的第一和第四象限、850hPa低涡 的第一象限、地面冷锋前、700hPa急流头的北端和 850hPa急流头的左前方(朔州以南、吕梁一晋中以 北),暴雨中心在700与850hPa暖切变线之间,700 hPa急流头与850hPa急流头相汇的区域(图2a)。

7月16日20时,500 hPa 槽线位于河西走廊, 700 hPa 横切(冷式切变)在山西境内段近似东西走向,副高位置比7月8日08时明显偏北,在110°~ 120°E,5880 gpm 北边界达34.8°N。暴雨落区位于 700 hPa 横切变线南侧、700和850 hPa 急流头左 侧、5840 gpm 附近(图2b,山西中西部)。

8月21日08时,500 hPa 中纬度环流平直,在 110°~120°E,5880 gpm 北边界达34.7°N;在 700 hPa 上,大陆小高压位于内蒙古中部,其底后部 的东南气流与700 hPa 的西南急流在山西境内形成 近似东一西向的横切变线,由于河套中部3080 gpm 闭合低涡的形成与发展,迫使横切变演变为近似西 北一东南走向的暖切变;暴雨落区主要位于700~ 850 hPa 暖切变线之间、700 hPa 急流头的左前侧和 850 hPa 急流头的左侧(图 2c,山西中部)。

8月25日08时,500 hPa上东北一西南向的槽 线位于100°E附近,在110°~120°E,5880 gpm线北 边界达36.6°N;700 hPa上大陆高压中心位于中蒙 边界,其前部的东北气流与西南急流之间形成近似 东北一西南向走向横切变(冷切变);暴雨落区位于 700 hPa 西南急流头前部、700 hPa 横切变南侧至 5880 gpm 线北边界之间的区域(图 2d,山西中部)。

9月6日08时,500 hPa上,在110°~120°E, 5880 gpm线北边界达34°N;在700 hPa上,大陆高压 位于蒙古国,其前部的东北气流与西南急流在内蒙古 中部形成近似东一西走向的横切变线(冷切变);在 850 hPa上,近似东北一西南走向的切变线位于山西 的西北部到河套的南部,有东北和东南两支急流在切 变线前部汇合;暴雨落区主要位于地面冷锋后部、 850 hPa东北和东南两支急流交汇处与东北一西南 走向切变线之间的区域(图 2e,山西北中部)。

与9月6日08时相比,9月7日08时,在 500 hPa上,5880 gpm线进一步北抬,在110°~120°E, 5880 gpm线北边界达35°N;在700 hPa上,横切变线 随大陆高压的东南移动进入山西北中部,急流轴由气 旋性弯曲演变为反气旋性弯曲;在 850 hPa 上,东南 急流消失,仅有东北急流尚存;地面冷锋由 6 日的黄 河流域南压到长江流域。大雨落区在 700 hPa 切变 线南侧、850 hPa 东北急流头的前端(图 2f,山西中 部)。

图 2 流型配置与暴雨落区表明,2009 年 7 月 8 日和 8 月 21 日 700 和 850hPa 的横切变线均为暖式 切变线,河套地区均有低涡影响,低涡的强度不同、 急流头和切变线位置的差异、高低空系统配置的不 同,导致暴雨的落区、范围和量级的不同。2009 年 7 月 16 日、8 月 25 日、9 月 6—7 日 700 hPa 的横切变 线均为冷式切变线,5880 gpm 的走向和纬度不同, 急流头和切变线位置的差异、高低空系统配置的不 同,导致暴雨的落区、范围和量级的不同。



960

4 物理量诊断分析

4.1 水汽通量散度



图 3为2009年汛期山西5次横切变暴雨过程

各层水汽通量散度随时间的变化。图 3 表明:5 次 区域性暴雨过程有 4 次水汽通量在 700 hPa 辐合最 强,且对于暴雨的发生有 12~24 小时的提前量;与 9 月 6 日 08 时相比,9 月 7 日 08 时 700 hPa 的水汽 辐合量显著下降,尽管 7 日 08 时横切变线南压到山 西的北中部,但由于 6 日 08 时 850 hPa 的两支湿急 流仅剩下一支偏东急流,700 hPa 的暖湿急流轴由 6 日的气旋性弯曲演变为反气旋性弯曲,气压场克服 阻力作功,非地转风动能减少,降雨量明显减小。

图 4 给出了 2009 年山西 5 次横切变沿112.3°E 水汽通量散度的垂直剖面图。稳定性(包括对流转 稳定)暴雨前 12 小时水汽辐合轴线随高度的增加向 北倾斜,水汽先在中层辐合而后向下扩散,湿层增 厚;而对流性暴雨前 12 小时水汽辐合轴线随高度的 增加向南倾斜,水汽先在低层辐合而后向上扩散,湿 层增厚;24 小时最大降水量与该过程中水汽通量散 度的最大辐合量成正比。如:2009 年 7 月 8 日暴雨 过程暴雨中心 24 小时最大降水量为 96 mm,水汽 通量散度的最大辐合量为 -35×10^{-8} g•hPa⁻¹• cm⁻²•s⁻¹,2009 年 8 月 21 日暴雨过程暴雨中心 24 小时最大降水量为 77 mm,水汽通量散度的最大辐 合量为 -15×10^{-8} g•hPa⁻¹•cm⁻²•s⁻¹。

4.2 垂直速度

图 5 给出了 2009 年山西 5 次横切变暴雨中心 区垂直速度的高度-时间演变图。暴雨中心 24 小时 最大降水量与各过程中垂直上升速度最大值基本成 正比(图 5a~5d,5e 对应的暴雨中心 24 小时最大降 水量分别为 96、82、77、89 和 78 mm,最大垂直上升 速度分别为: -26×10^{-3} 、 -18×10^{-3} 、 -16×10^{-3} 、 -22×10^{-3} 和 -14×10^{-3} •hPa•s⁻¹);5 次暴雨过 程最大上升运动中心大多位于 500~400 hPa;稳定 性降水暴雨过程,垂直速度有 12~24 小时的提前量 (见图 5c 和 5e),对流性降水暴雨过程垂直速度仅 有 0~12 小时的提前量(见图 5a、5b 和 5d)。

图 6 为 5 次横切变暴雨过程暴雨前 12 小时垂 直速度随高度的变化。稳定性暴雨过程,上升运动 主要发生在 700~300 hPa,对流性、混合性及对流 转稳定性暴雨过程,上升运动主要发生在 700~ 200 hPa。说明不稳定降水较稳定降水有更强的上 升运动。



图 4 2009 年山西 5 次横切变暴雨过程各时次沿 112.3°E 水汽通量散度的垂直剖面图 单位:10⁻⁸ g•hPa⁻¹•cm⁻²•s⁻¹

(a)7月8日08时;(b)7月8日20时;(c)7月16日20时;(d)7月17日08时;

(e)8月20日20时;(f)8月21日08时;(g)8月25日20时;(h)9月6日08时

Fig. 4 The vertical profiles of the moisture flux divergence in different times along 112. 3°E in Shanxi unit: 10^{-8} g · hPa⁻¹ · cm⁻² · s⁻¹

(a) 08:00 BT 8 July 2009; (b) 20:00 BT 8 July 2009; (c) 20:00 BT 16 July 2009;

(d) 08:00 BT 17 July 2009; (e) 20:00 BT 20 August 2009; (f) 08:00 BT 21 August 2009;

(g) 20:00 BT 25 August 2009; (h) 08:00 BT 6 September 2009



图 5 2009年山西 5次横切变暴雨中心区垂直速度的高度-时间演变(单位:10⁻³ hPa・s⁻¹) (a)7月8日;(b)7月17日;(c)8月22日;(d)8月26日;(e)9月7日

Fig. 5 Height-time evolvement of vertical speed of central area of rainstorms during 2009 in Shanxi (unit:10⁻³ hPa • s⁻¹) (a) 8 July; (b) 17 July; (c) 22 August; (d) 26 August; (e) 7 September



4.3 相对湿度

由暴雨区上空各层相对湿度随时间的变化(图略)可知:对流性暴雨过程,暴雨前12~24小时湿度从低层开始增加,而后向上扩散湿层增厚;稳定性、混合性、对流转稳定性暴雨过程,暴雨前12~24小时湿度从中层开始增加,而后向低层扩散湿层增厚; 连阴雨过程中的暴雨日和非暴雨日,中低层相对湿度都很大,对暴雨的预报不敏感。

4.4 假相当位温

对流性、混合性和对流转稳定性暴雨,在暴雨发 生前 12~24 小时,500 hPa 及其以下都具有 θ_{se} 随高 度的增加而减小、500 hPa 以上都具有 θ_{se} 随高度的 增加而增加的特征(见图 7 中 7 月 7 日 20 时、7 月 16 日 20 时和 8 月 25 日 20 时 θ_{se} 随高度的演变曲 线),而稳定性暴雨则具有 θ_{se} 随高度的增加而增加 的特征(见图 7 中 8 月 21 日 08 时和 9 月 6 日 08 时 θ_{se} 随高度的演变曲线)。印证了对流性降水引发的 暴雨与稳定性降水造成的暴雨在能量场垂直分布上 的差异。

随高度的变化 Fig. 7 The pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se} in ℃) changing with the height 12 h ahead of rainstorm in Shanxi during 2009

4.5 风的垂直切变特征

4.5.1 常规探空资料分析

由常规探空资料(图略)分析可知:2009年5次 暴雨过程太原站风随高度和时间的变化为暴雨前 24小时风速随高度的增高而增加,风向随高度顺 转,有暖平流,是5次暴雨过程的共同特征(图略); 暴雨结束时风速随高度的增高而增加,但风向随高 度逆转,有冷平流是7月7—8日、7月16—17日、8 月21—22日、8月25—26日4次暴雨过程的共同 特征。9月5—10日是一个连阴雨天气过程,其中6 日08时至7日08时出现了区域性暴雨,9月7日 暴雨结束,但降水依然维持,7日08时,850 hPa以 上太原站为一致的西风控制,且风速随高度的增高 而减小。横切变线虽然压到山西中部,但由于风速 随高度的增高而减小,低空急流呈反气旋式弯曲,9 月7—10日降水虽维持,但无暴雨产生。说明风随 高度的变化无论是稳定还是不稳定,无论是连阴雨 过程中的暴雨还是非连阴雨过程的暴雨都很敏感。 4.5.2 VAD风廓线资料分析

VWP^[9](VAD wind proffile)产品即 VAD^[9] (velocity azimuth display)风廓线,它是指雷达用每 个体扫资料(6分钟一次)在不同高度上,通过用 VAD技术得到该高度上的平均风的风向风速。这 是一种间接探测水含量的方法。在 VWP 中,每个 风向杆是由某个体扫某层高度的一圈探测资料点通 过 VAD技术得到的,在算法中必须满足三个条件, 才能得到一个平均的风向风速。一是降水数据点不 少于 25个;二是这些点至少要分布在一定大小的扇 型区域内;三是这些点的风向离散度不能太大。上 述三个条件其中之一不满足,算法将在 VWP 中对 应位置标"ND"(No Data)。因此,该方法适应范围 是较均匀的降水过程。

图 8a 和 8b 分别为 2009 年 7 月 7 日 11:01— 20:53(北京时)和 7 月 8 日 05:47—15:45 的 VWP 产品,图 8c 和 8d 分别为 7 月 16 日 10:53—20:46 和 7 月 17 日 07:38—17:31 的 VWP 产品。

7月7日12:00,从6.1~9.1 km开始出现风场 (即从高层开始增湿),而后向下伸展;7日15:57,从 0.9~9.1 km整层有风显示(增层增湿),且风向随 高度的升高顺转,有弱的暖平流(图 8a);7日 22:52—23:51 风的垂直切变达到最大(图略),9小 时后,暴雨中心太原小店区1小时降水量达10 mm 以上并持续5小时之久(见图 1a),风的垂直切变最 大值出现时间比降水峰值出现时间提前13小时;整 层风场出现时间比降水年值出现时间提前10小时(见图 8a和图 1a);当高层风场被ND开始取代时,降水在 3~4小时内结束(见图 8b和图 1)。8月21—22日 和9月6—7日的稳定性暴雨过程,风场随时间和高 度的变化与2009年7月8日的暴雨过程类似,但风 的垂直切变均小于7月8日(图略)。

7月16日10:53风场从低层开始出现(低层开 始增湿),而后向高层扩展;14:51,1.8~9.1 km 整 层风场出现,且风向随高度顺转,风速开始加大(图 8c),之后对流进一步向高层发展,17日07:38,风场 高度达12.2 km(见图 8d),2小时后,暴雨中心石楼 县1小时降水量达24.1 mm(见图 1b);17日11:35, 风场高度迅速下降(见图 8d),17 日 14:00 降水停止。从 17 日 01:00 降水开始出现到 14:00 降水过程结束,降水持续时间为 13 小时。整层风场出现时间比降水开始时间提前 9 小时。8 月 25—26 日的强对流暴雨,风场的时间-高度演变与 7 月 16—17

日的对流性暴雨类似(图略),不同的是整层风场出现时间仅比降水开始时间提前 30 分钟,风的垂直切变最大值出现时间比降水峰值出现时间仅提前 24 分钟(4 个体扫时间)。印证了 8 月 25—26 日强对流暴雨过程的中小尺度特征。

图 8 2009 年 7 月 8 日和 16 日的 VWP 产品(北京时) Fig. 8 The VWP products on July 8 and July 16, 2009 BT

通过对 5 次横切变暴雨过程的逐时和逐 6 分钟 多普勒雷达 VAD 风廓线分析发现:稳定性暴雨(包 括对流转稳定),降水开始前 9~11 个小时,风场从 高层(6~9 km)开始出现(即从高层开始增湿)并向 下伸展,风速随高度的增高而增大,风向随高度增高 顺转;降水结束前 3~4 小时,从高层开始风场迅速 被 ND 取代;对流性暴雨,降水开始前 1~9 小时,风 场从低层开始出现(即从低层开始增湿)并向高层扩 展,风向和风速分别随高度的增高顺转和增大;降水 结束前从高层开始风场迅速被 ND 取代,风向随高 度的升高逆转。在 3 次(2009 年 7 月 8 日、8 月 21-22 日、9 月 6-7 日)稳定性暴雨过程中,风的垂 直切变越大,过程降水量也越大;在2次(2009年7 月7-8日、8月25-26日)对流性暴雨过程中,由 于过程降水总量差别不大,因此风的垂直切变差别 也不大;不同的是对流越强,即雨强越强整层风场出 现的时间比降水开始时间的提前量越少。

对流性暴雨与非对流性暴雨在湿度层扩散方向 上的不同和垂直运动提前量的不同,印证了两者在 产生垂直运动机制上的不同。风廓线资料分析结果 印证了深厚的湿层、源源不断的水汽输送是稳定性 暴雨形成的主要特征,而上干冷、下暖湿强烈的不稳 定是强对流暴雨形成的特征。 5 气柱水汽总量和卫星云图特征分析

5.1 气柱水汽总量特征分析

图 9 给出了 2009 年山西 5 次横切变暴雨的气 柱水汽总量图。

利用山西省 63 个 GPS/MET 站逐时监测资料 反演获得的气柱水汽总量图分析发现:5 次暴雨过 程,暴雨落区均位于气柱水汽含量梯度的大值区到 大值区南(东)部 0.5 个经纬度的范围内;水汽锋走 向与中低层切变线走向基本一致。不同的是:(1)稳 定性暴雨过程相对于强对流暴雨过程,水汽锋形成 时间比降水开始时间有较长的提前量(约24小时的 提前量,参见图9a、9d、和9f和图1a、1c和1e),且对 流越强烈水汽锋形成的时间越晚,印证了稳定性降 水暴雨过程中大、中尺度系统的相互作用以及强对 流暴雨过程发生的中小尺度特征。如:2009年8月 25—26日,水汽锋在25日16时形成(25日水汽含 量演变图略),比降水开始时间提前1小时,比降水 峰值出现时间提前3小时(见图9e和图1d)。(2) 稳定性暴雨过程,山西运城地区整层水汽含量较高

图 9 2009 年山西 5 次横切变暴雨(世界时)的气柱水汽总量图

(a)7月7日19时;(b)7月8日00时;(c)7月16日22时;(d)8月20日00时;(e)8月25日08时;(f)9月6日00时
Fig. 9 The air column total vapor graphs of the 5 rainstorm processes during 2009 in Shanxi (UTC)
(a) 19:00 UTC 7 July; (b) 00:00 UTC 8 July; (c) 22:00 UTC 16 July; (d) 00:00 UTC 20 August;
(e) 08:00 UTC 25 August; (f) 00:00 UTC 6 September

(一般高于 50 mm,见图 9a、9d 和 9f),而对流性暴 雨过程,运城地区整层水汽含量较低(一般低于 50 mm,见图 9c 和 9e),印证了稳定性降水与强对流 降水在水汽输送方面的差异。(3)稳定性暴雨过程, 降水开始前24小时水汽含量梯度较大,而对流性暴 雨过程则水汽含量梯度较小,印证了稳定性降水形 成的暴雨过程与强对流降水暴雨过程在水汽辐合方 面的差异;(4)稳定性暴雨过程,降水开始前24小 时,水汽含量梯度南(或东)部 0.5个经纬度区域内, 水汽含量可达 35~40 mm, 而对流性暴雨, 降水开 始前24小时,水汽含量梯度南(或东)部0.5个经纬 度区域内,水汽含量不足 30 mm,印证了:深厚的湿 层和源源不断的水汽输送是稳定性降水暴雨过程发 生、发展、维持的关键,而中上层冷空气的强度以及 它与中低层暖湿空气的垂直配置则是强对流暴雨过 程发生的关键。

5.2 卫星云图分析

由7月8日,8月21日,8月25日,9月6日的 红外卫星云图(图略)分析表明:对流性、混合性、对 流转混合性暴雨过程,云顶亮温较低,云顶亮温的最 低值达一70℃;稳定性降水暴雨过程,暴雨的发生主 要以降水持续时间长为特征,云顶亮温一般高于 -30℃。

6 可预报性分析

(1) 当 700 hPa 大陆小高压位于内蒙古的中东 部时,在 700 和 850 hPa 容易形成暖式横切变线,暴 雨的落区会出现在 700 与 850 hPa 暖切变线之间, 700 hPa 西南急流头的北(前)端和 850 hPa 偏东急 流头的西(左)侧,若此时地面有冷锋配合,暴雨落区 在锋前暖区。本文中 7 月 8 日和 8 月 21 日均为暖 式切变暴雨,但 7 月 8 日地面有冷锋配合,河套低涡 更强、高低空系统配置更完整,暴雨的范围也更大、 强度也更强。24 小时暴雨落点预报可预报性强,TS 评分也较高。

(2) 当 700 hPa 大陆小高压位于内蒙古的中西 部时,在 700 hPa 容易形成冷式横切变线,850 hPa 一般没有横切变线与 700 hPa 的冷式横切变线相配 合。暴雨的落区较复杂,与暖式切变线暴雨落区预 报相比,可预报性差。当地面有冷锋配合时,暴雨落 区会在锋后冷区与 700 hPa 横切变线之间。24 小 时暴雨落点预报空报率较大,TS评分较低。

(3)对流性暴雨过程,暴雨前12~24小时湿度 从低层开始增加,而后向上扩散湿层增厚;稳定性、 混合性、对流转稳定性暴雨过程,暴雨前12~24小时湿度从中层开始增加,而后向低层扩散湿层增厚; 连阴雨过程中的暴雨日和非暴雨日,中低层相对湿 度都很大,对暴雨的预报不敏感。

(4) 假相当位温因子用于对流性、混合性、对流转稳定性暴雨的发生与结束预报指示性很强,但对稳定性暴雨过程没有指示意义。

(5)水汽通量散度对于稳定、非稳定,连阴雨、 非连阴雨暴雨过程暴雨的开始与结束都有很强的指 示意义,且对暴雨的发生与结束有 12~24 小时的提 前量。

(6)多普勒雷达 VAD 风廓线分析和 GPS/ MET 资料反演的气柱水汽总量分析都表明对流性 暴雨过程比稳定性暴雨过程预报难度更大,可预报 性更差。

7 结论与讨论

(1)2009年汛期5次横切变线暴雨过程,稳定 性降水,暴雨前12小时水汽辐合轴线随高度的增高 向北倾斜,水汽先在中层辐合而后向下扩散,湿层增 厚;而对流性暴雨前12小时水汽辐合轴线随高度的 增高向南倾斜,水汽先在低层辐合而后向上扩散,湿 层增厚;24小时最大降水量与该过程中水汽通量散 度的最大辐合量成正比。此结论是否符合不同年 份、是否适合南北向切变线还需做进一步的研究。

(2)5次横切变线暴雨过程的物理条件差异主要在温度场和湿度场的垂直分布上,温度场和湿度场的垂直分布上,温度场和湿度场的垂直分布决定了对流是否可以发生。

(3)根据环流形势和湿度场判断有连阴雨天气 过程时,用水汽通量散度、垂直风切变、垂直速度判 断暴雨的发生和结束更敏感。暖式切变暴雨比冷式 切变暴雨在落区和落点预报上可预报性更强。

(4)5次暴雨过程,暴雨落区均位于气柱水汽 总量梯度的大值区到大值区南(东)部0.5个经纬度 的范围内;水汽锋区走向与中低层切变线走向基本 一致,在降水开始前,稳定性暴雨过程比强对流暴雨 过程水汽锋区形成时间有更多的提前量,且对流越 强烈水汽锋区形成的时间越晚。

气柱水汽总量的空间分布特征印证了:稳定性

降水暴雨过程中,大、中尺度系统的相互作用以及强 对流暴雨过程发生的中小尺度特征;稳定性降水与 强对流降水在水汽输送方面的差异;稳定性降水形 成的暴雨过程与强对流降水暴雨过程在水汽辐合方 面的差异;深厚的湿层和源源不断的水汽输送是稳 定性降水暴雨过程发生、发展、维持的关键,而中上 层冷空气的强度以及它与中低层暖湿空气的垂直配 置则是强对流暴雨过程发生的关键。

(5)多普勒雷达 VAD 风廓线分析发现:稳定性 暴雨,降水开始前 9~11 小时,风场从高层开始出现 并向下伸展(从高层开始增湿),风速随高度的增高 而增大,风向随高度增高顺转;降水结束前 3~4 小 时,从高层开始风场迅速被 ND 取代;对流性暴雨, 降水开始前 1~9 小时,风场从低层开始出现并向高 层扩展(从低层开始增湿),风向和风速分别随高度 的增高顺转和增大;降水结束前从高层开始风场迅 速被 ND 取代,风向随高度的升高逆转。

对流性暴雨与非对流性暴雨在湿度层扩散方向 上的不同和垂直运动提前量的不同,印证了两者在 产生垂直运动机制上的不同。风廓线资料分析结果 印证了深厚的湿层、源源不断的水汽输送是稳定性 暴雨形成、发展的必要条件,而上干冷、下暖湿强烈 的不稳定是强对流暴雨形成的关键。

(6) 在目前数值预报产品形势场预报优于要素 场预报的前提下,流型配置依然是预报区域性暴雨 的有效手段。根据归纳出的各物理量因子对暴雨发 生、发展、消亡的提前量,应用常规气象观测资料计 算的物理量场加实况场的流型配置方法,是目前要 素场预报误差较大现状下,提高短期暴雨预报准确 率的有效途径。

参考文献

[1] 冯伍虎,程麟生. "98.7"突发性特大暴雨中尺度切变线低涡发

展的涡源诊断[J]. 高原气象,2002,21(5):447-456.

- [2] 冯伍虎,程麟生."98.7"特大暴雨中尺度系统发展的热量和水 汽收支诊断[J].应用气象学报,2001,12(4):419-432.
- [3] 隆霄,程麟生."99•6"梅雨锋暴雨低涡切变线的数值模拟和 分析[J].大气科学,2004.28(3):343-355.
- [4] 谌贵,何光碧.2000-2007年西南低涡活动的观测事实分析 [J]. 高原山地气象研究,2008,28(4):60-65.
- [5] 张腾飞,鲁亚斌,普贵明.低涡切变影响下云南强降水的中尺 度特征分析[J]. 气象,2002,29(12):29-33.
- [6] 李鲲,徐幼平,字如聪,等.梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟 比较研究[J].大气科学,2005,29(2):236-248.
- [7] 师锐,顾清源,青泉.西南低涡与不同系统相互作用形成暴雨 的异同特征分析[J].高原山地气象研究,2009,29(2):9-18.
- [8] 肖递祥,顾清源,祁生秀,等."07.7"川东北连续3场大暴雨过 程的诊断分析[J].暴雨灾害,2008,26(3),256-261.
- [9] 胡明宝,高太长,汤达章,等.多普勒天气雷达资料分析与应用 [M].北京:解放军出版社,2000,52-62.
- [10] 姚晨,张雪晨,毛冬艳. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对 比分析[J]. 气象,2010,36(11):18-25.
- [11] 郑媛媛,张小玲,朱红芳,等.2007 年 7 月 8 日特大暴雨过程 的中尺度特征[J]. 气象,2009,35(2):3-7.
- [12] 金少华,葛晓芳,艾永智,等.低纬高原两次冷锋切变天气对比 分析[J].气象,2010,36(6):35-42.
- [13] 张端禹,王明欢,陈波.2008年8月末湖北连续大暴雨的水汽 输送特征[J]. 气象,2010,36(1):49-53.
- [14] 曹晓岗,张吉,王慧,等."080825"上海大暴雨综合分析[J]. 气 象,2009,35(4):51-58.
- [15] 张家国,岳阳,牛淑贞,等.一次长历时特大暴雨多普勒雷达中 尺度分析[J]. 气象,2011,36(4):21-26.
- [16] 郑媛媛,张小玲,朱红芳,等.2007年7月8日特大暴雨过程 的中尺度特征[J]. 气象,2009,35(2):3-7.
- [17] 林建. 2009 年 8 月 29 日黄淮和西南地区不同性质暴雨特征 分析[J]. 气象, 2011, 37(3): 276-284.
- [18] 马文彦,冯新,杨芙蓉.地面资料在侦测暴雨天气过程中的应 用[J]. 气象,2010,36(1):41-48.
- [19] 张家国,王珏,黄治勇,等. 几类区域性暴雨雷达回波模型[J]. 气象,2011,37(3):285-290.