

高帆,尹承美,蔡哲,等. 济南市重大短时强降水过程特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 131-141.
GAO Fan, YIN Chengmei, CAI Zhe, et al. Characteristic analysis on short-time severe rainfall events in Jinan[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 131-141. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.014. (in Chinese)

济南市重大短时强降水过程特征分析

高帆,尹承美,蔡哲,焦洋,褚颖佳,李瑞,马蕾
(济南市气象局, 山东 济南 250102)

摘要: 利用常规天气资料、多普勒雷达资料和区域自动气象站资料,对发生在济南的33次重大短时强降水过程进行总结分析。结果表明,重大短时强降水过程年均发生3.3次,主要发生在7月上旬—8月中旬,17—23时和02—08时最易发生,南部山区较北部平原地区更易发生,且雨强更大。低槽冷锋型出现最多,水汽和动力条件充足,层结曲线中上层具有喇叭口型结构,对流有效位能呈瘦高状,平均值为 $1\,370\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对流由冷锋触发(有时存在暖区对流),强降水范围最广;副热带高压边缘型水汽充沛,对流有效位能呈粗胖状,平均值为 $2\,400\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对流由底层的动力系统触发,局地性和突发性强,强降水分布不均匀;低涡切变线型具有夜雨性,水汽较充沛,动力条件一般,对流有效位能平均值为 $607\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。低槽冷锋型和低涡切变线型平均雨强较大,副热带高压边缘型持续时间较长,低槽冷锋型能够产生平均雨强异常大或持续时间较长的过程,因此易出现极端降水事件。带状回波出现最多,主要由低槽冷锋型产生,块状回波主要由副热带高压边缘型产生,分布零散,絮状回波主要由低涡切变线型产生,强度较弱。强回波主要集中在中低层,回波整体质心偏低,呈现热带降水型特征。10次形成列车效应的过程中有7次由带状回波或短带回波的后向传播形成,另外3次由尺度较大的絮状回波形成,其持续时间和平均降水量是其余过程的两倍。

关键词: 短时强降水;流型配置;降水特征;环境参数;回波特征

中图分类号: P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0131-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.014

Characteristic analysis on short-time severe rainfall events in Jinan

GAO Fan, YIN Chengmei, CAI Zhe, JIAO Yang, CHU Yingjia, LI Rui, MA Lei
(Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China)

Abstract By using conventional observation data, Doppler radar data, and regional automatic weather station data, 33 cases of short-time severe rainfall events happened in Jinan are analyzed and systematically summarized. The results show that the short-time severe rainfall occurred averagely 3.3 times per year, mainly occurred from early July to mid-August, and the most probable time is from 17:00 to 23:00 and from 02:00 to 08:00 (local time). The short-time heavy precipitation is more likely to occur and has stronger intensity in the southern mountainous region than in the northern plains. The Type I (upper trough/cold front) severe rainfall events happen most frequently with plentiful vapor and

收稿日期:2018-02-13 修订日期:2018-06-06

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2016sdqx01, 2016sdqx05);山东省气象局科研项目(sdjn2016-04);中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-063)

作者简介:高帆,男,工程师,主要从事短期天气预报工作, gaofan8510@sina.com。

通信作者:尹承美,女,高级工程师,主要从事短期天气预报和预报管理工作, ycm_sdjn@sina.com。

favorable dynamic conditions. There is a flared structure in the middle and upper stratification curve, while the pattern of CAPE (convective available potential energy) is narrow with the average value of $1\ 370\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$. The convections are mostly triggered by the cold front (sometimes the warm convection existed) and generate widespread severe rainfall. For the Type II (subtropical high edge) severe rainfall events, the water vapor supply is plentiful, the pattern of CAPE is wide with the average value of $2\ 400\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$. The convections are usually triggered by the underlying dynamical systems locally and suddenly with unevenly distributed heavy rainfall. The Type III (low vortex/shear line) severe rainfall events often happen at night with plentiful water vapor supply, fairly good dynamic conditions, and averaged CAPE of $607\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$. For these different types of severe rainfalls, the average rainfall intensity of Type I or Type III is stronger, and the duration of Type II is longer. Because of extremely strong rainfall intensity and longer duration, Type I severe rainfall frequently leads to extreme precipitation events. The banded echo occurs most frequently produced by Type I and the lump echo is mainly produced by Type II with sparse distribution. The floccose echo is mainly produced by Type III with weaker intensity. The strong echo is mainly concentrated in the middle and low level with a low echo mass center and the vertical structure is consistent with the characteristics of tropical rainfall event. Among the 10 severe rainfall processes with the train effect, 7 are produced by the back-propagation of the banded echo or short-banded echo, and the other three by large-scale floccose echo. The average duration and precipitation of the 10 processes are twice of the average of the other processes.

Key words short-time severe rainfall; flow pattern configuration; precipitation characteristics; environmental parameters; echo characteristics

引言

短时强降水是强对流天气的一类,体现了水汽和能量在短时间内的集中释放,其主要特征是强对流性和短历时性,由于在较短时间内产生了较大的降水量往往会形成暴洪,造成城市内涝及山洪、泥石流等地质灾害,特别是近些年来,由于城市规模的不断扩大,短时强降水造成的城市内涝往往会带来巨大的经济损失甚至人员伤亡,正因此,短时强降水一直是国内外气象学者的重点研究方向之一。

20世纪70年代末, MADDIX et al.^[1]通过分析美国的致洪暴雨天气过程,归纳总结出了暴洪预报的3种典型的天气流型配置,用于致洪强降水的预报,即“流型识别法”。针对流型识别法的一些局限性和缺陷, DOSWELL et al.^[2]提出了基于各类构成要素的预报方法,即“配料法”。俞小鼎^[3]认为“流型识别法”和“配料法”两者之间有很强的互补性,“流型识别法”是一项很有用的主观预报技术,同时预报员应尝试用基于构成要素的方法去解释,从而获得充分的物理解释。陈元昭等^[4]认为在统计大量个例基础上,给出短时强降水的主要流型配置,根据“配料法”思路,统计分析每种流型配置下的关键环境参数特征,将流型识别与关键环境参数特征

识别结合起来,将有助于更深入地了解包括强降水在内的强对流天气发生的物理过程,提高这类天气的预报水平。

近年来各地气象学者从不同的角度对短时强降水进行了系统、全面的分析和研究。陈秋萍等^[5]、杨诗芳等^[6]和陈炯等^[7]对不同地区短时强降水的时空分布特征进行了分析研究。韩宁和苗春生^[8]、杨波等^[9]、张永婧等^[10]对短时强降水的环流形势进行了分型,并对不同流型的物理量特征或中尺度形势进行了分析。针对短时强降水的多普勒雷达回波特征,气象学者也进行了统计分析和研究,得出了一些对短时强降水临近预报有参考意义的指标^[11-17]。孙继松等^[18]对北京市的极端暴雨事件从对流系统发展演变的角度进行了基本特征的总结和分析。俞小鼎^[19]综合阐述了短时强降水临近预报的思路与方法,认为短时强降水事件的识别主要由雨强和降水持续时间两个要素确定。以上研究有的针对于本地区的短时强降水事件,有的针对于短时强降水的某一方面进行分析,针对济南市区重大短时强降水事件所进行的系统、全面的分析目前还比较少。

本文对2007—2016年发生在济南的重大短时强降水过程进行筛选和总结,分析基本时空特征,

按照流型识别法的思路进行流型配置分类,分析各类流型的降水、环境参数和探空图形态特征,总结对流系统多普勒雷达回波结构和移动传播特征,为济南市重大短时强降水过程的短时临近预报提供一定的参考。

1 基本时空特征

1.1 资料来源与标准确定

所用资料包括:2007—2016 年济南市区基本气象观测站和市中区、历下区、天桥区、槐荫区、历城区的区域自动气象站逐小时降水量资料(区域自动气象站的数量逐年增加,由 2007 年的 19 个增加到 2016 年的 39 个);济南(齐河)新一代 SA 型多普勒天气雷达资料;国家气象信息中心下发的 MICAPS 资料(包括常规地面高空观测、加密地面观测)。在数据质量控制上,调阅了信息中心的自动气象站维护记录,剔除了异常数据,同时利用 Z-R 关系检验了自动站的降雨量。

短时强降水的标准采取中国气象局规定的标准^[20],即每小时降水量 ≥ 20 mm。考虑到自动站数量逐年增加的因素,规定在一次短时强降水间隔不超过 2 h 的降水过程中,当三分之一站(时)次的气象站出现短时强降水时,即确定为一次重大短时强降水过程,按照上述标准,10 a 间共筛选出 33 次重大短时强降水过程。

1.2 时间特征

重大短时强降水过程平均每年发生 3.3 次,最多的一年(2013 年)发生了 8 次,最少的一年(2014 年)发生了 1 次(图 1a)。最早发生在 5 月上旬,最晚发生在 8 月下旬,85%的过程发生在 7 月上旬—8 月中旬(图 1b)。一天中有两个易发生时段,一个在傍晚—前半夜(17—23 时),一个在后半夜—早晨(02—08 时),最不易发生的时段是中午前后(11—14 时),10 a 间仅发生了 1 次重大短时强降水过程(图 1c)。图 1d 的持续时间指降水过程中短时强降水的持续时间,而非整个降水过程的持续时间,可见 55%的重大短时强降水过程持续时间在 3 h 之内,91%的重大短时强降水过程持续时间在 5 h 之内,3 次过程持续时间超过 5 h。

1.3 空间特征

济南地势南高北低,南部为泰山山脉,北部为黄河下游平原,特殊的地理位置对短时强降水的空间分布有一定的影响。由于 2008 年济南才开始在南部山区建设自动气象站,因此选取 2008—2016 年

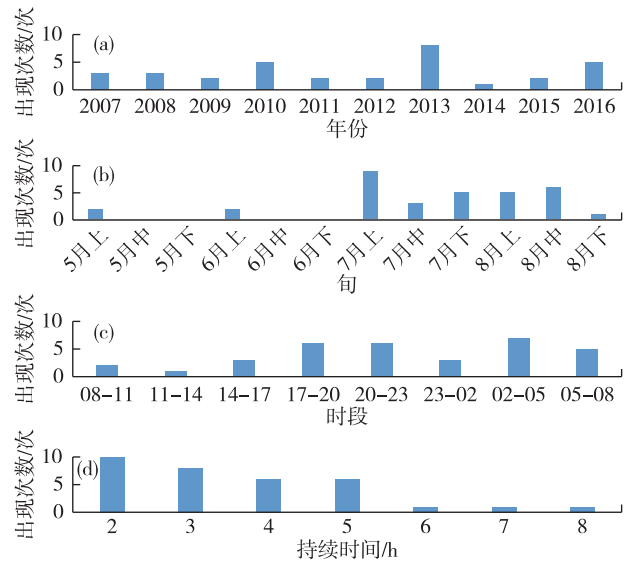


图 1 重大短时强降水过程逐年(a)、逐旬(b)、逐时段(c)出现次数和持续时间(d)

Fig.1 Number of yearly occurrence (a), 10-day occurrence (b), periodic occurrence (c), and duration (d) of short-time severe rainfall processes

有连续观测资料的 30 个气象站,统计各站所有短时强降水出现次数(图 2a)和最大雨强(图 2b),由图可知北部平原地区(市中区、历下区、天桥区、槐荫区的所有气象站和历城区最北部的两个气象站)短时强降水出现次数平均为 32 次,南部山区(历城区除最北部两个以外的气象站)为 38 次,北部平原地区短时强降水最大雨强平均为 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,南部山区为 $67 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,可见南部山区的地形结构增加了短时强降水的出现频次和最大雨强,另外市区中心和山区南部各存在一个短时强降水出现次数和最大雨强的大值中心。

2 流型配置与降水特征

通过分析 33 次重大短时强降水过程的高低空环流形势和影响系统,重点分析初始对流的触发机制,结果显示,33 次过程的天气流型配置主要有 4 类:低槽冷锋型(图 3a)出现 17 次,副热带高压(以下简称“副高”)边缘型(图 3b)出现 8 次,低涡切变线型(图 3c)出现 7 次,气旋型(图 3d)出现 1 次,可见低槽冷锋型是发生重大短时强降水过程最多的流型配置,占比为 51.5%,其次是副高边缘型和低涡切变线型,占比分别为 24.2%和 21.2%。

2.1 低槽冷锋型

低槽冷锋型发生在 5 月上旬—8 月下旬,时间跨度最长。500 hPa 存在明显的高空槽,中低层为

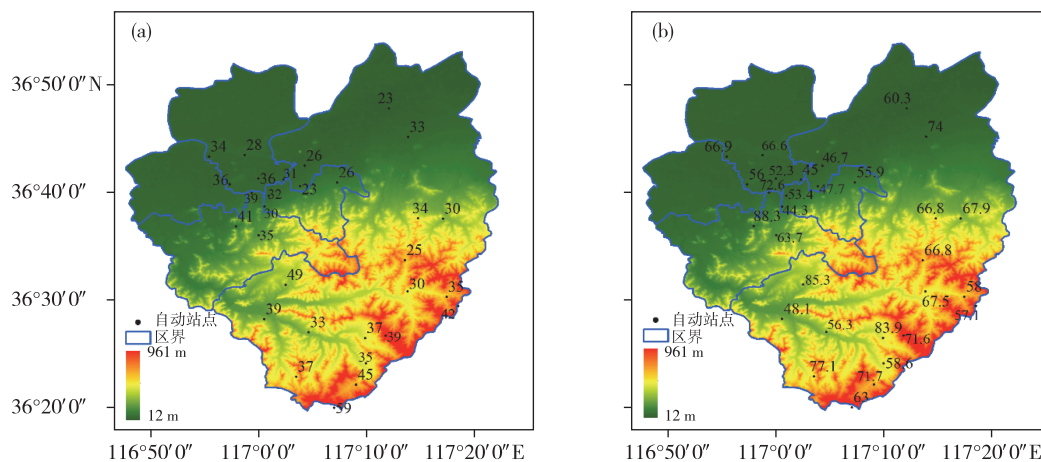


图 2 2008—2016 年各站短时强降水出现次数 (a) 和最大雨强 (b; 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
 Fig.2 Number of occurrence (a) and maximum rainfall intensity (b; units: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) of short-time severe rainfall at each station

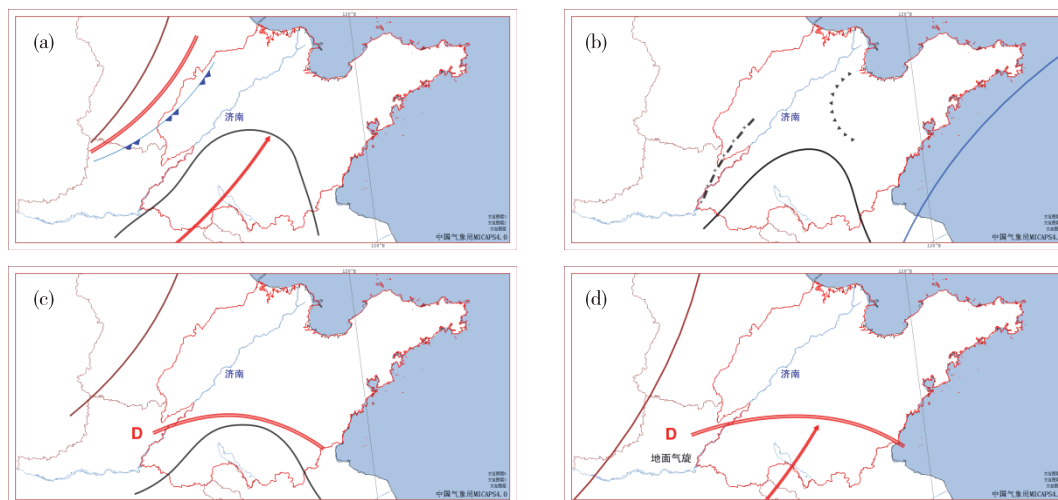


图 3 低槽冷锋型 (a)、副高边缘型 (b)、低涡切变线型 (c) 和气旋型 (d) 流型配置 (棕线为 500 hPa 槽线, 蓝线为 588 dagpm 等高线, D 为 850 hPa 低涡中心, 红色双实线为 850 hPa 切变线, 红色箭头线为 850 hPa 低空急流, 黑线为地面等压线, 蓝色锯齿线为地面冷锋, 黑色点画线为地面辐合线, 黑色箭头线为地面阵风锋)
 Fig.3 Flow pattern of upper trough/cold front (a), subtropical high edge (b), low vortex/shear line (c), and cyclonic type (d) (trough at 500 hPa in brown line, contour line at 588 dagpm in blue line, D for low vortex center at 850 hPa, shear line at 850 hPa in red double solid line, low-level jet stream at 850 hPa in red arrow line, surface isobar in black line, surface cold front in blue sawtooth line, surface convergence line in black dotted line, surface gust front in black arrow line)

过渡层, 可以是槽, 也可以是冷式切变线, 地面存在冷锋和倒槽 (或低压)。对流系统由冷锋触发生成, 若锋前暖区的水汽和热力条件适合, 则暖区的地面倒槽或辐合线 (中心) 可以触发暖区对流, 当冷区对流和暖区对流合并后, 降水强度将增强。

2.2 副高边缘型

副高边缘型发生在 7 月下旬—8 月中旬的盛夏季节。500 hPa 副高强盛, 济南位于 584 dagpm 等高线附近, 中低层系统不明显, 触发系统位于底层, 主要有 3 类, 第一类是地面辐合线, 一般位于山东西

部, 第二类是从山东北部侵入的冷空气或从东北部移来的阵风锋, 第三类是台风倒槽。副高边缘型强降水的局地性和突发性较强, 且常伴有后向传播现象, 降水分布很不均匀, 预报难度大。

2.3 低涡切变线型

低涡切变线型出现在 5 月上旬—7 月上旬的晚春至初夏季节。低层 850 hPa 存在明显的低涡和 (或) 切变线。7 次低涡切变线型强降水过程中有 5 次发生在后半夜, 具有明显的夜雨特征。

2.4 气旋型

气旋型重大短时强降水过程 10 a 间仅在 2016 年 7 月 20 日出现过 1 次, 平均降水量为 51.1 mm, 但雨强较小, 最大雨强仅为 $33 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.5 降水特征

影响程度指在一次重大短时强降水过程中发生短时强降水的站(时)次数占总气象站数的比例, 前 3 类流型均可产生影响程度超过 100% 的过程, 其中低槽冷锋型能够产生影响程度达 175% 的极端过程, 且就平均值而言, 低槽冷锋型的影响程度最大(图 4a)。

平均雨强指在一次重大短时强降水过程中所有气象站小时降水量的平均值, 低槽冷锋型和低涡切变线型的平均雨强较大, 平均值分别为

$12.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $10.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中低槽冷锋型能够产生平均雨强异常大的过程, 副高边缘型的平均雨强较小, 平均值为 $7.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4b)。

各类流型强降雨的持续时间差异较大, 副高边缘型持续时间较长, 平均值为 4.9 h, 最大值为 8 h, 低槽冷锋型和低涡切变线型持续时间较短, 平均值分别为 3.2 h 和 2.9 h, 其中低槽冷锋型的最长持续时间为 7 h (图 4c)。

平均降水量指所有气象站总降水量的平均值, 也即平均雨强与持续时间的乘积, 低槽冷锋型、副高边缘型和低涡切变线型的平均值相差不大, 分别为 39.1 mm、37 mm 和 30.4 mm。但由于低槽冷锋型能够产生平均雨强异常大或持续时间很长的过程, 因此低槽冷锋型易出现极端降水事件(图 4d)。

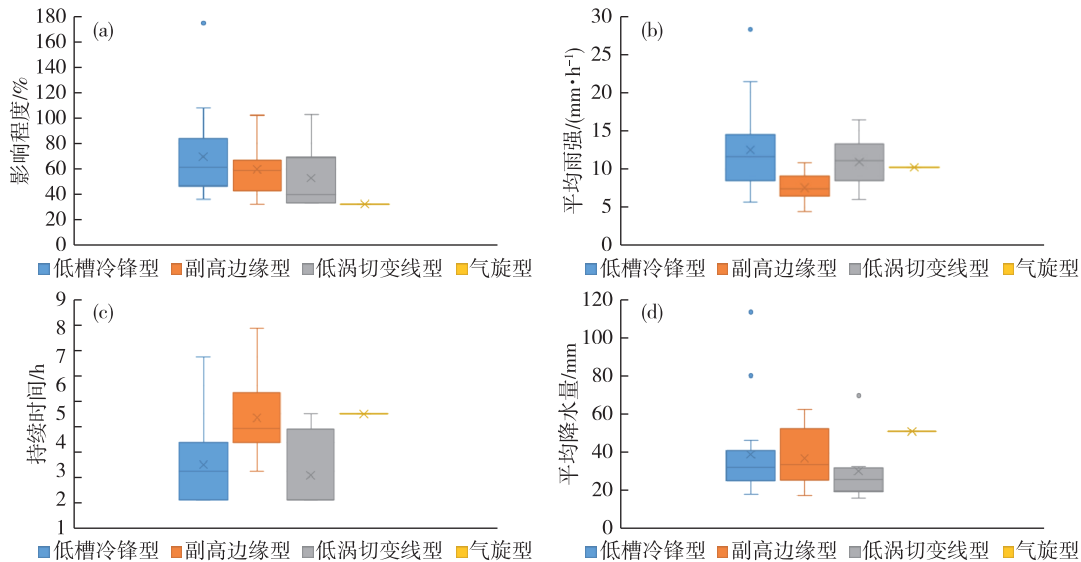


图 4 4 类流型的影响程度(a; 单位: %)、平均雨强(b; 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、持续时间(c; 单位: h) 和平均降水量(d; 单位: mm) 箱线图(圆点为软件自动识别的异常值, 但是真实发生的实况, 因此在本文讨论之内, 下同)

Fig.4 Box plot of extent of influence (a; units: %), average rainfall intensity (b; units: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), duration (c; units: h), and average precipitation (d; units: mm) of the 4 flow patterns

3 环境参数与探空图形态特征

文中选取的环境参数包括: 表示大气水汽条件的地面露点温度(T_d)、低层比湿(850 hPa 与 925 hPa 比湿的大值)、大气整层可降水量(PW)和暖云层厚度, 表示大气层结稳定度的 850 hPa 与 500 hPa 温差、K 指数、对流有效位能(CAPE)和对流抑制能量(CIN), 表示大气动力条件的低层偏南风风速(850 hPa 和 925 hPa 偏南风风速的较大值)、0~6 km 垂直风切变和强天气威胁指数(SWEAT)。除地面露点温度选取强降水发生前一时次济南市区基

本气象站数据外, 其余参数均选取强降水发生前最近时次章丘探空数据, 若强降水发生在 21 时一次日 08 时, 则 CAPE 选取 20 时探空数据, 若强降水发生在 09—20 时, 则用强降水发生前的温度和露点温度对 08 时 CAPE 进行订正。

3.1 水汽参数

由 4 类流型的 4 个水汽参数的箱线图(图 5) 可看出, 就平均值而言, 低槽冷锋型和副高边缘型水汽很充沛, 低层比湿为 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右(图 5a), 地面露点温度为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右(图 5b), 大气整层可降水量为 54 mm 左右(图 5c), 暖云层厚度为 4 300 m 左右

(图5d),低涡切变线型水汽较充沛,低层比湿为 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,地面露点温度为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$,大气整层可降水量为 43 mm ,暖云层厚度为 3650 m 。就箱体宽度而言,除低槽冷锋型的大气可降水量箱体较宽外,低

槽冷锋型和副高边缘型其余参数的箱体均较窄,水汽参数分布较集中,低涡切变线型4个水汽参数的箱体均较宽,水汽参数分布较分散。

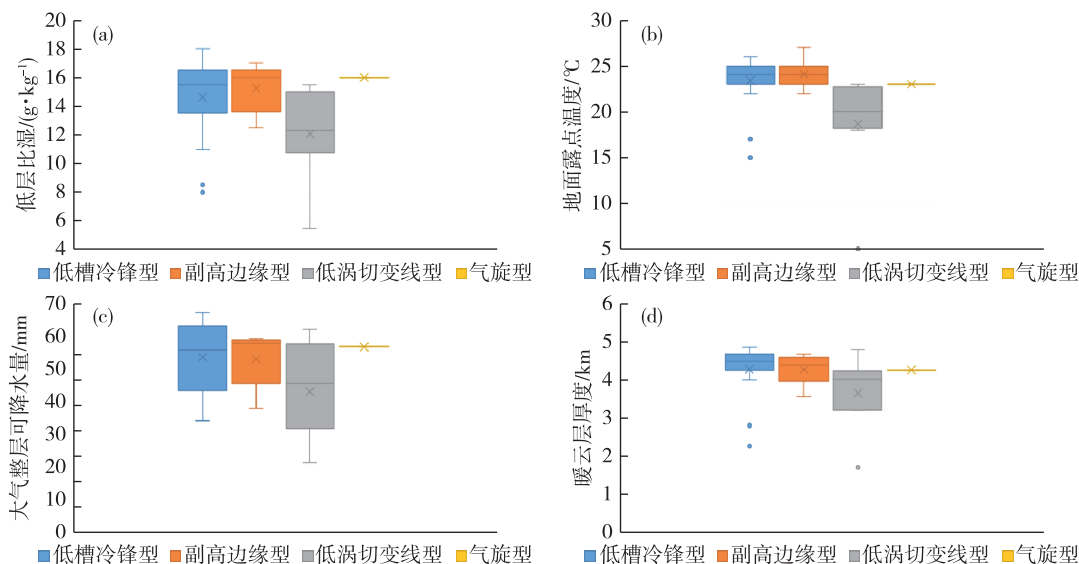


图5 4类流型的低层比湿(a;单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、地面露点温度(b;单位: $^\circ\text{C}$)、大气整层可降水量(c;单位:mm)和暖云层厚度(d;单位:km)箱线图

Fig.5 Box plot of low-level specific humidity (a;units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), surface dew-point temperature (b;units: $^\circ\text{C}$), atmospheric total precipitable water (c;units:mm), and warm cloud thickness (d;units:km) of the 4 flow patterns

3.2 层结稳定度参数

前3类流型850 hPa与500 hPa温差均不大,平均值在 $24 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,副高边缘型中位值略大,层结不稳定性较低槽冷锋型和低涡切变线型略强

(图6a)。

副高边缘型K指数较大,平均值为 $37 \text{ }^\circ\text{C}$,层结不稳定性强,低槽冷锋型K指数平均值为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$,中位值为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$,层结不稳定性较强,低涡切变线型K

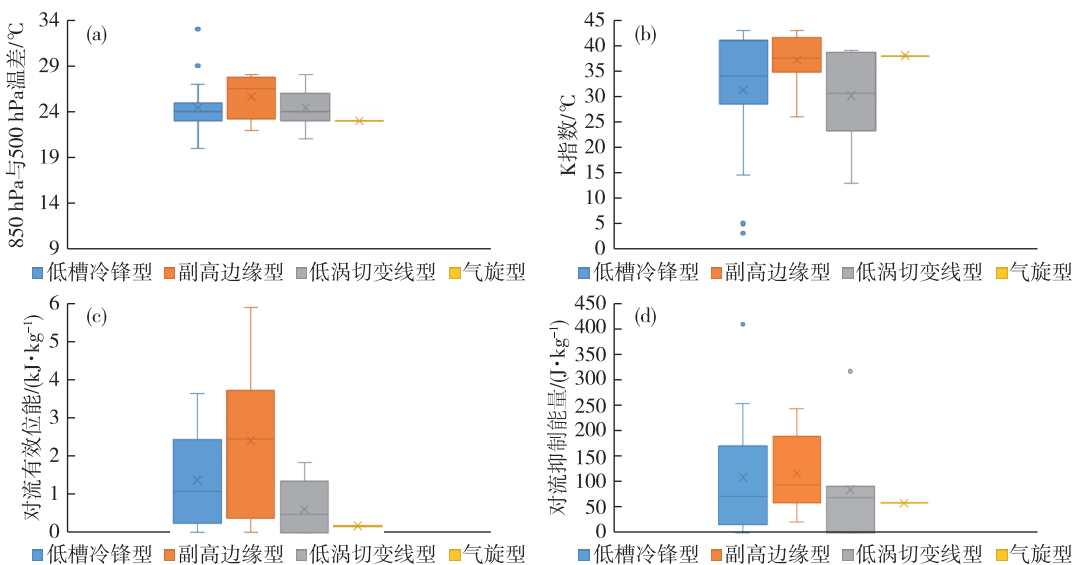


图6 4类流型的850 hPa与500 hPa温差(a;单位: $^\circ\text{C}$)、K指数(b;单位: $^\circ\text{C}$)、对流有效位能(c;单位: $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)和对流抑制能量(d;单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)箱线图

Fig.6 Box plot of temperature difference between 850 hPa and 500 hPa (a;units: $^\circ\text{C}$), K index (b;units: $^\circ\text{C}$), CAPE (c;units: $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), and CIN (d;units: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) of the 4 flow patterns

指数平均值为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 有一定的层结不稳定性(图 6b)。

前 3 类流型的 $CAPE$ 平均值相差较大, 副高边缘型为 $2\ 400\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 层结不稳定性很强, 低槽冷锋型为 $1\ 370\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 层结不稳定性较强, 低涡切变线型为 $607\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 层结不稳定性一般(图 6c)。

低槽冷锋型和副高边缘型的 CIN 较大, 平均值分别为 $109\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $125\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明强降水发生前大气抑制能量强, 需要积累较强的能量或存在较强的动力作用才能触发对流, 低涡切变线型的 CIN 平均值为 $83.7\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6d)。

3.3 动力参数

低槽冷锋型低层偏南风风速较大, 平均值为 $11\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 接近低空急流的标准, 副高边缘型与低

涡切变线型低层偏南风风速相对较小, 平均值均为 $8.3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但副高边缘型的中位值较低涡切变线型大(图 7a)。

前 3 类流型的 $0\sim 6\ \text{km}$ 垂直风切变平均值在 $11\sim 14\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 属于中等偏弱的量级, 均有利于产生较高的降水效率(图 7b)^[19]。

$SWEAT$ 指数是一个反映不稳定能量、风向风速垂直切变对风暴强度综合作用的指数, 其值越大, 发生龙卷或者强雷暴的可能性越大。低槽冷锋型的 $SWEAT$ 最大, 平均值为 293, 最大值为 458, 低槽冷锋型强降水过程也是前 3 类流型中雷暴强度最强的, 低涡切变线型的 $SWEAT$ 最小, 平均值为 218, 副高边缘型介于两者之间, 平均值为 262(图 7c)。

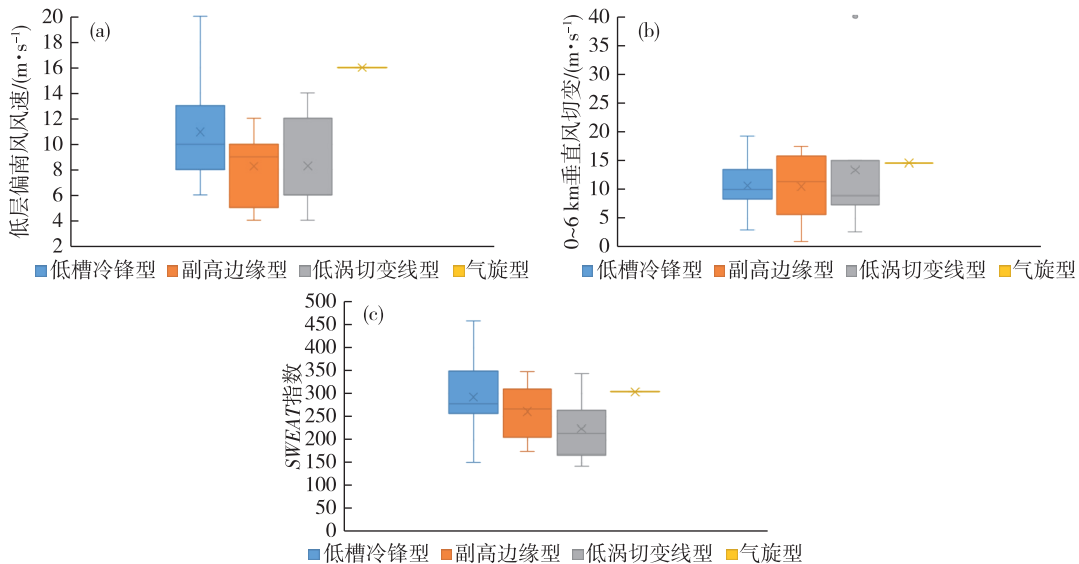


图 7 4 类流型的低层偏南风风速(a;单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、 $0\sim 6\ \text{km}$ 垂直风切变(b;单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和强天气威胁指数(c)箱线图
Fig.7 Box plot of low-level southerly wind speed (a;units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vertical wind shear between 0 to 6 Km (b;units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and SWEAT index (c) of the 4 flow patterns

3.4 探空图形态特征

对前 3 类流型的探空图分析发现, 大部分低槽冷锋型强降水过程层结曲线的中上层具有喇叭口型结构(图 8a-c), 低层由于暖湿气流的输送而层结较湿, 中高层由于干冷空气的侵入而层结较干, $CAPE$ 形状一般呈瘦高状, 低槽冷锋型强降水过程的自由对流高度较高, 平均为 $2.8\ \text{km}$ 。大部分副高边缘型强降水过程的温度曲线与湿绝热线较接近(图 8d-f), 说明整层大气水汽含量丰富, $CAPE$ 形状一般呈粗胖状, 平均自由对流高度为 $2.5\ \text{km}$ 。低涡切变线型强降水过程的自由对流高度较低, 平均为 $2.3\ \text{km}$, 7 次过程中有 3 次过程 $500\ \text{hPa}$ 以下层结曲

线较紧靠(图 8g-i), 这 3 次过程的平均降水量均在 $30\ \text{mm}$ 以上, $CAPE$ 形状均呈瘦高状, 其余 4 次过程平均降水量均在 $23\ \text{mm}$ 以下, $CAPE$ 较小。

4 雷达回波特征

4.1 回波结构

33 次重大短时强降水过程有 2 次因为雷达故障没有资料, 对 31 次过程对流系统影响济南时的回波结构分析发现, 其水平结构主要有 4 类: 带状回波、块状回波、絮状回波和短带回波。带状回波指长度大于 $100\ \text{km}$, 长宽比大于 $5:1$ 的强回波带(图 9a)^[13], 其中心强度一般超过 $55\ \text{dBz}$, 有时在强回波

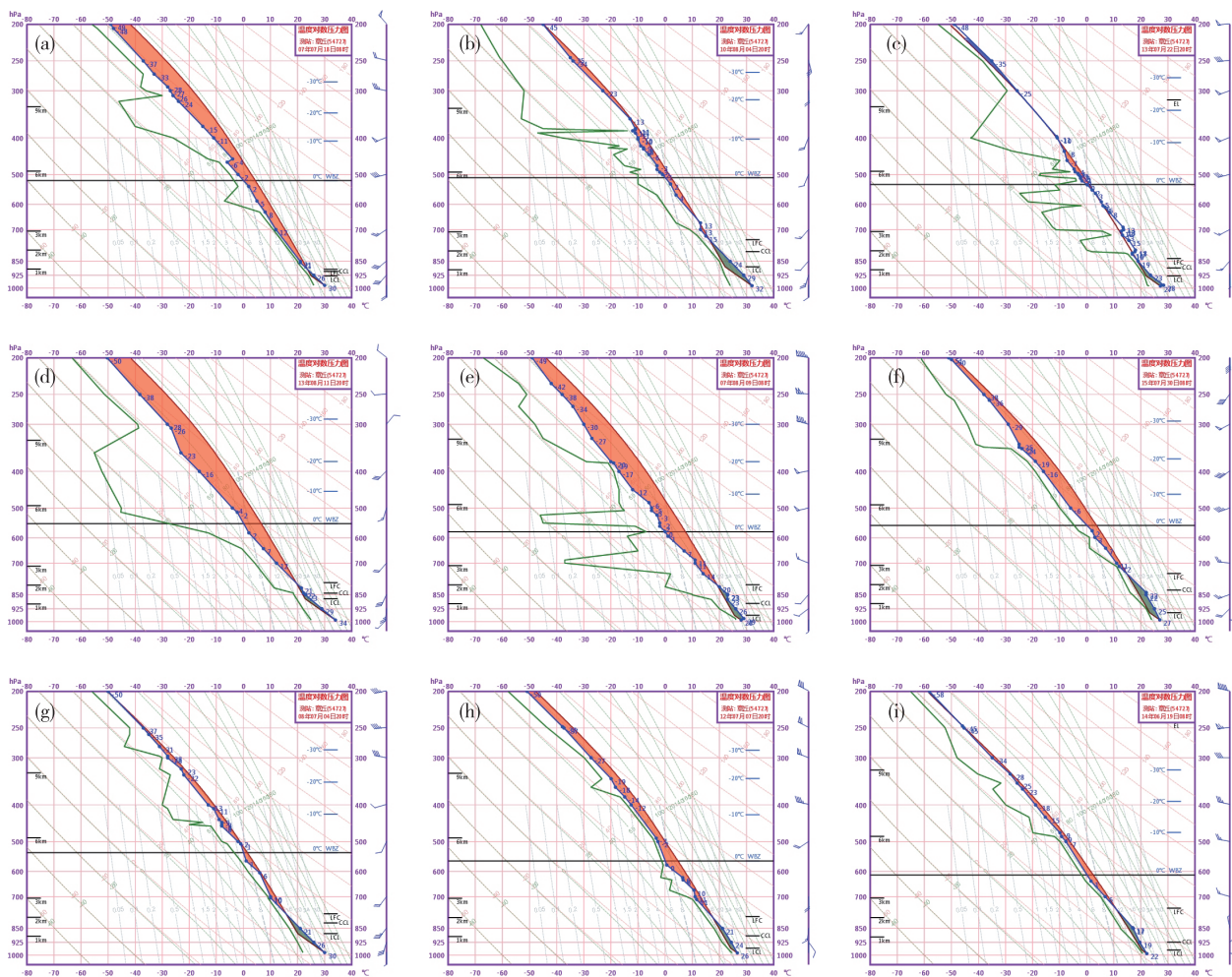


图 8 低槽冷锋型(a,b,c)、副高边缘型(d,e,f)和低涡切变线型(g,h,i)典型探空图

Fig.8 Typical t - $\ln p$ diagram of upper trough/cold front (a , b , c), subtropical high edge (d , e , f), and low vortex/shear line (g , h , i)

带后部伴有弱的层状云降水回波,带状回波产生的雨强最大,3次最大雨强超过 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的过程均由带状回波产生。块状回波由分散的对流单体构成(图 9b),中心强度一般超过 55 dBz,分布零散,没有规律,其产生的强降水局地性较强。絮状回波由整体强度相对较弱的片状回波构成(图 9c),强度一般不超过 45 dBz,雨强较小,但空间尺度较大,影响范围较广,持续时间较长。短带回波介于

带状回波和块状回波之间,其长度一般小于 50 km,中心强度一般超过 55 dBz(图 9d)。从 4 类回波的分型统计(表 1)可看出:带状回波出现次数最多,共出现 12 次,其主要由低槽冷锋型过程产生,块状回波出现了 7 次,主要由副高边缘型过程产生,絮状回波出现了 7 次,主要由低涡切变线型过程产生,短带回波出现了 5 次,主要由低槽冷锋型和低涡切变线型产生。

表 1 4 类回波的分型统计

Table 1 Classification statistics of four types of echo

次

回波类型	低槽冷锋型	副高边缘型	低涡切变线型	气旋型	总计
带状	11	1	0	0	12
块状	2	4	1	0	7
絮状	1	1	4	1	7
短带	2	1	2	0	5

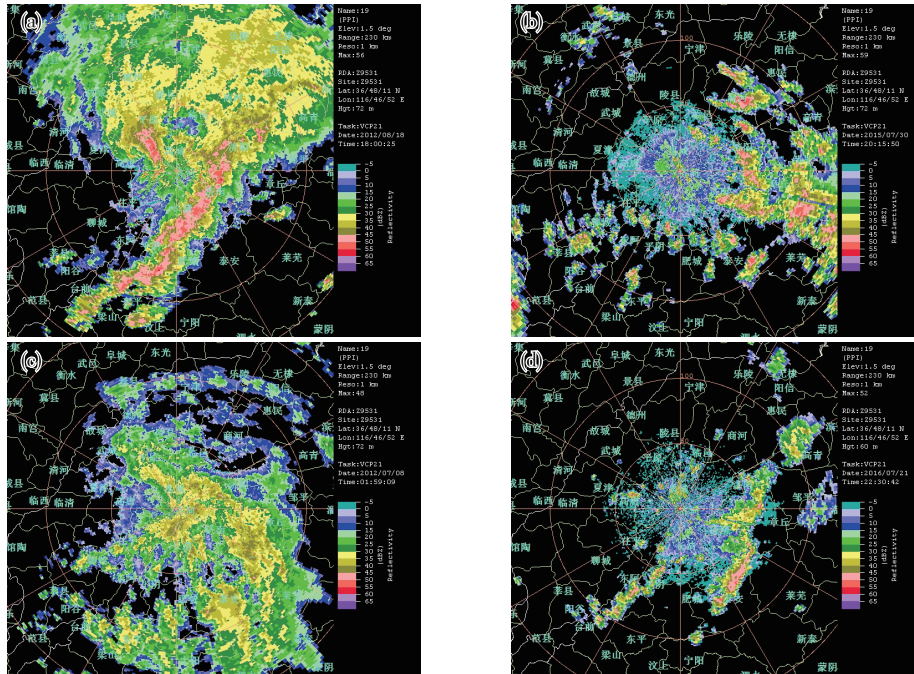


图 9 带状回波(a)、块状回波(b)、絮状回波(c)和短带回波(d)的典型雷达反射率因子图

Fig.9 Typical map of radar reflectivity factor of banded echo (a), lump echo (b), floccose echo (c), and short-banded echo (d)

垂直结构上,31次有雷达资料的重大短时强降水过程具有相似的特征,以6次最强的重大短时强降水过程(图10a-f分别为2007-07-18、2009-05-09、2013-07-23、2013-07-28、2015-07-30和2015-08-03重大短时强降水过程)为例,可以发现:回波强度一般在30~50 dBz,强回波主要集中在中层至低层,不同季节强回波发展高度不同,春季发展高度较低(2009年5月9日强降水过程中45 dBz以上的强回波发展高度为4 km,图10b),盛夏季节发展高度较高(2013年7月28日强降水过程中45 dBz以上的强回波发展高度为9 km,图10d),平均而言,45 dBz以上的强回波发展高度为6 km,即回波整体质心偏低,符合热带降水型的特征^[21]。

4.2 回波移动与传播

对31次有雷达资料的重大短时强降水过程分析发现,其中10次过程形成了列车效应,这10次过程的平均持续时间为5 h,平均降水量为58.7 mm,其他21次过程的平均持续时间为2.9 h,平均降水量为27.2 mm,可见形成列车效应的强降水过程的持续时间和平均降水量是没有形成列车效应过程的两倍左右。

10次有列车效应的过程中,由于后向传播现象而形成的有7次,7次过程的雷达回波均为带状回

波或短带回波,另外3次是由于对流系统本身尺度较大而形成的列车效应,这3次过程的雷达回波均为絮状回波。但需注意的是,对于某一个固定的地点而言,对流系统的后向传播现象并不一定都会形成列车效应,上述31次有雷达资料的强降水过程中有15次过程出现了后向传播现象,但其中仅有7次过程在济南市形成了列车效应,可见后向传播容易形成列车效应,但不是所有的后向传播现象均能形成列车效应,两者不是一一对应关系,在实际临近预报中判断是否形成列车效应产生强降水需综合考虑对流系统的尺度、移速、传播及其相对于固定地点的位置。

5 结论

对10 a间发生在济南的33次重大短时强降水过程进行了总结和分析,得出以下结论:

- 1)济南市重大短时强降水过程年均发生3.3次,主要发生在7月上旬—8月中旬,傍晚至前半夜和后半夜至早晨最易发生,持续时间一般为2~3 h,南部山区较北部平原地区更易发生短时强降水,且雨强更大。
- 2)流型配置可分为低槽冷锋型、副高边缘型、低涡切变线型和气旋型4类。低槽冷锋型出现最多,对流由冷锋触发,产生的强降水范围最广,雨强

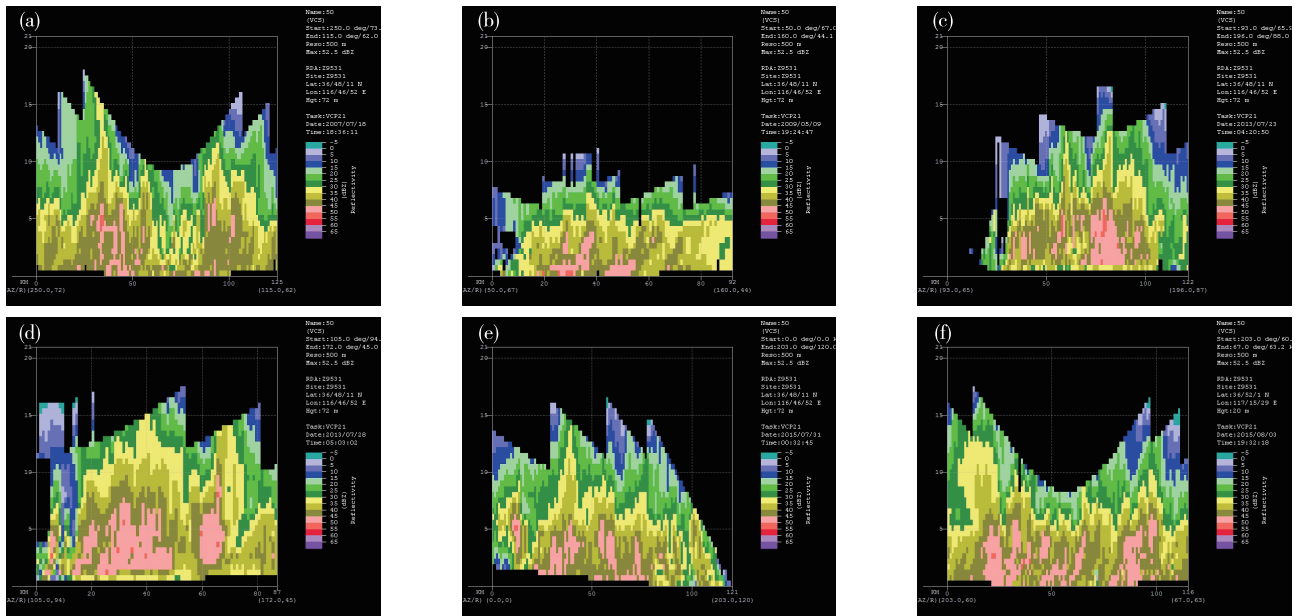


图 10 6次重大短时强降水过程反射率因子垂直剖面图(a.2007年7月18日18:36,b.2009年5月9日19:24,c.2013年7月23日04:20,d.2013年7月28日05:03,e.2015年7月31日00:32,f.2015年8月3日19:32)

Fig.10 Vertical cross-section diagram of reflectivity factors of 6 short-time severe rainfall processes (a. 18:36 on 18 July 2007, b. 19:24 on 9 May 2009, c. 04:20 on 23 July 2013, d. 05:03 on 28 July 2013, e. 00:32 on 31 July 2015, f. 19:32 on 3 August 2015)

最大。副高边缘型出现在盛夏,对流的局地性和突发性强,产生的强降水分布很不均匀,预报难度大,应重点关注地面辐合线、倒槽或弱冷空气等底层触发系统。低涡切变线型有明显的夜雨性。低槽冷锋型和低涡切变线型产生的平均雨强较大,副高边缘型的持续时间较长,3类流型产生的平均降水量在30~40 mm之间,由于低槽冷锋型能够产生平均雨强异常大或持续时间很长的过程,因此低槽冷锋型易出现极端降水事件。

3)强降水发生前,低槽冷锋型和副高边缘型的水汽都很充沛。低槽冷锋型动力条件充足,对流的发展主要依靠动力作用,副高边缘型层结不稳定性很强,对流的发展主要依靠热力作用。

4)大部分低槽冷锋型过程层结曲线中上层具有喇叭口型结构,CAPE呈瘦高状。大部分副高边缘型过程温度曲线与湿绝热线较接近,整层水汽含量充沛,CAPE呈粗胖状。低涡切变线型过程自由对流高度较低,当层结曲线较紧靠时,产生的降水较强。

5)雷达回波水平结构有带状、块状、絮状和短带4类。其中带状回波出现最多,主要由低槽冷锋型产生,其易产生 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的极端雨强。垂直结构呈现热带降水型的特征,强回波主要集中在中低层,回波整体质心偏低。10次形成列车效应的

过程的持续时间和平均降水量是其余过程的两倍,其中7次由带状回波或短带回波的后向传播形成,3次由尺度较大的絮状回波形成。

参考文献:

- [1] MADDOX R A, CHAPPELL C F, HOXIT L R. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1979, 60(2):115-123.
- [2] DOSWELL C A III, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Wea Forecasting, 1996, 11(4):560-581.
- [3] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法-配料法 [J]. 气象, 2011, 37(8):913-918.
- [4] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征 [J]. 气象, 2016, 42(2):144-155.
- [5] 陈秋萍, 黄东兴, 余建华, 等. 闽北前汛期短时强降水与雷达回波特征 [J]. 气象, 2001, 27(8):52-55.
- [6] 杨诗芳, 郝世峰, 冯晓伟, 等. 杭州短时强降水特征分析及预报研究 [J]. 科技通报, 2010, 26(4):494-500.
- [7] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析 [J]. 气象学报, 2013, 71(3):367-382.
- [8] 韩宁, 苗春生. 近6年陕甘宁三省5—9月短时强降水统计特征 [J]. 应用气象学报, 2012, 23(6):691-701.

- [9] 杨波,孙继松,毛旭,等.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].气象学报,2016,74(6):919-934.
- [10] 张永婧,高帆,于丽娟,等.济南市区短时强降水特征分析与天气分型[J].海洋气象学报,2017,37(3):109-116.
- [11] 应冬梅,许爱华,黄祖辉.江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J].气象,2007,33(3):48-53.
- [12] 李德俊,唐仁茂,熊守权,等.强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J].气象,2011,37(4):474-480.
- [13] 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.
- [14] 段鹤,夏文梅,苏晓力,等.短时强降水特征统计及临近预警[J].气象,2014,40(10):1194-1206.
- [15] 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等.短时强降水的多尺度分析及临近预警[J].气象,2012,38(8):903-912.
- [16] 王俊.线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):25-33.
- [17] 高帆,张永婧,李瑞,等.2015年8月3日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):96-101.
- [18] 孙继松,雷蕾,于波,等.近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,2015,73(4):609-623.
- [19] 俞小鼎.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,2013,32(3):202-209.
- [20] 中国气象局办公室.全国短时临近预报业务规定(气办发[2010]19号)[Z].2010,中国气象局办公室:3.
- [21] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,2012,70(3):311-337.