

周雪松,冯勇,陈澍,等.影响山东的台风温比亚(1818)中尺度云团“列车效应”特征分析[J].海洋气象学报,2021,41(2):46-57.

ZHOU Xuesong, FENG Yong, CHEN Shu, et al. Analysis on “train effect” of mesoscale rain clusters of Typhoon RUMBIA (2018) affecting Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(2): 46-57. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.005. (in Chinese)

影响山东的台风温比亚(1818)中尺度云团“列车效应”特征分析

周雪松^{1,2},冯勇^{1,2},陈澍^{1,2},刘思宇^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.山东省气象信息中心,山东 济南 250031)

摘要: 基于多普勒天气雷达、区域气象观测站、常规观测和 NCEP 再分析数据等,利用三维雷达拼图技术对 2018 年第 18 号台风“温比亚”造成的山东暴雨中尺度特征进行分析。研究表明:台风“温比亚”造成的山东暴雨,不同阶段雨强特征有较大差异,长时间强降雨是造成灾害性暴雨的主要因素;此次台风暴雨雨团具有很强的移动特征,是否形成“列车效应”是造成灾害性暴雨的重要因素;雷达三维拼图数据可以清晰识别和分析暴雨过程中尺度雨团的移动、合并和发展规律,这些对准确监测预报暴雨的发生至关重要。

关键词: 台风;暴雨;中尺度雨团;雷达立体拼图;列车效应

中图分类号: P458.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)02-0046-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.005

Analysis on “train effect” of mesoscale rain clusters of Typhoon RUMBIA (2018) affecting Shandong

ZHOU Xuesong^{1,2}, FENG Yong^{1,2}, CHEN Shu^{1,2}, LIU Siyu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Information Center, Jinan 250031, China)

Abstract In this paper, the mesoscale characteristics of rainstorms in Shandong caused by Typhoon RUMBIA in 2018 are analyzed by using 3-D radar mosaic technology based on data of Doppler weather radar, regional automatic meteorological station, conventional observation, and NCEP reanalysis. The results show that the rainstorms in Shandong caused by Typhoon RUMBIA have great differences in the characteristics of rain intensity at different stages, and the sustained heavy rainfall is a main factor causing the disastrous rainstorms; the rainstorm clusters of this typhoon have strong moving characteristics and the formation of train effect is an important factor causing the disastrous rainstorms; the 3-D radar mosaic data can clearly identify and analyze the movement, merging, and development of mesoscale rain clusters during rainstorms, which is very important for accurate monitoring and forecasting of rainstorms.

Key words typhoon; rainstorm; mesoscale rain cluster; 3-D radar mosaic; train effect

收稿日期:2021-01-09; 修订日期:2021-02-23

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2019sdqzx04)

通信作者:周雪松,男,正高级工程师,主要从事灾害性天气、系统研发方面研究,cedarzhou2005@163.com。

引言

我国是世界上气象灾害最严重的国家之一,暴雨历来是我国气象工作者关注和研究的重点领域^[1]。台风往往带来长时间暴雨等气象灾害,给我国社会生产和人民生活带来严重影响,如2018年8月17—20日,第18号台风“温比亚”直接影响我国华东区域,造成了严重气象灾害,除在长江口和巢湖等地方造成大的风浪外^[2-3],还给安徽、河南、山东等地带来了大范围强降雨,部分地区出现大暴雨和特大暴雨,形成严重洪涝灾害^[4-6]。

随着人民生活和社会发展对暴雨预报精细化水平要求的日益提高,台风暴雨分析研究更加深入、详尽和精细^[7]。特别是近年来,对暴雨中尺度雨团和暴雨精细落区的研究也日益增多。牛淑贞等^[8]在研究“海棠”台风时认为中尺度雨团和雷达强回波有很好的对应关系。周文志等^[9]还分阶段研究了台风暴雨中尺度雨团的发展规律。吴家富等^[10]对闽西北前汛期暴雨雨团的移动特征进行了分析。陈博和李新峰^[11]则对台风暴雨开展了诊断分析研究。郑怡等^[6]在分析台风“温比亚”时发现低层强风速带在鲁中山区迎风坡强迫抬升不断触发中尺度对流系统,在中高层气流引导和地形作用下产生“列车效应”,这也是造成局地特大暴雨的重要因素。综上所述,前期关于台风暴雨雨团的研究已经取得了很好的进展,但是以上研究主要还是以针对暴雨的天气学诊断分析为主,缺少使用更高分辨率数据资料对台风暴雨中尺度雨团进行的定量分析和统计研究,暴雨高时空分辨率监测和短时临

近精准预警难题还需要进一步研究解决。

本文借助山东省广泛使用的多普勒天气雷达网,建立了高时空分辨率的三维雷达拼图数据集,并在此基础上结合使用自动气象观测站和其他常规观测数据,详细研究分析台风“温比亚”影响山东期间暴雨中尺度雨团的发生、发展和变化规律,以期通过对暴雨雨团的定量分析给出山东此次特大暴雨发生、发展和造成严重洪水灾害背后的短历时强降雨细节,为进一步做好短时与短期之间无缝隙天气预报,更好地发挥气象防灾减灾第一道防线作用提供更好的参考和依据。

1 台风过程概述

1.1 台风路径

2018年第18号台风“温比亚”是一个月内3个连续密集影响山东的台风中的最后一个。2018年8月15日早晨在东海东南部海面生成热带低压;17日04时(北京时间,下同)在上海浦东登陆,中心最大风力为9级(热带风暴级);后经过江苏、安徽,18日03时进入河南固始,在河南南部长时间滞留,19日05时从河南驻马店转向东北移动,于19日傍晚进入山东菏泽。“温比亚”进入山东境内后,阵风维持在7~8级,穿过山东的西部于20日07时由东营进入渤海,进入渤海后又显著增强,中心风力达到7~8级,阵风10~11级(图1a)。该台风具有生成快、发展迅速的特点,登陆北上长时间影响山东,移速慢,残余环流强,风大雨大。此次暴雨也是山东1951年有记录以来到2018年最强的一次暴雨过程。

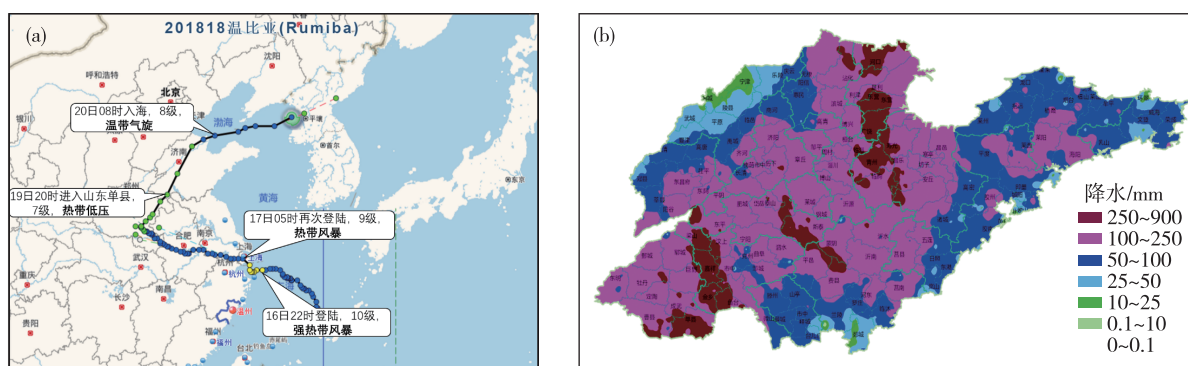


图1 第18号台风“温比亚”移动路径(a)和过程总降雨量(b;色阶,单位:mm)

Fig.1 Track (a) and total precipitation (b; color scale, units: mm) of Typhoon RUMBIA (2018)

1.2 台风暴雨

受台风影响,山东出现大范围强降雨。2018年8月17日17时,山东受其外围影响开始出现降水,

至20日14时影响基本结束。全省出现大范围大暴雨天气,部分地区出现特大暴雨,全省平均降水量为135.5 mm,3市平均降水量超过200 mm,8市平

均降水量超过 100 mm,其中尤以东营(245.3 mm)、泰安(209.3 mm)、菏泽(200.9 mm)、济宁(185.0 mm)和潍坊(178.7 mm)最大。单站最大降水量为 511.2 mm(泰安徂徕土门村),广饶(258.0 mm)等 9 个国家级气象观测站 8 月 19 日的降水量突破本站历史极值,鱼台(214.3 mm)等 12 个国家级气象观测站的 3 日连续降水量突破本站历史极值(图 1b)。

1.3 台风灾害

受台风影响山东省部分地区出现大暴雨,局部特大暴雨,造成潍坊、菏泽、济宁等 13 市 81 个县(市、区)的 626 个乡镇(街道)不同程度受灾。据统计,全省 518.46 万人受灾,农作物受灾面积 61.63 万 hm^2 ,倒塌房屋 13 317 间,直接经济损失 215.13 亿元。潍坊市灾情最重,其中寿光境内的弥河出现险情,全市 152.86 万人受灾,农作物受灾面积 16.79 万 hm^2 ,倒塌房屋 10 335 间,直接经济损失 174.73 亿元。

8 月 19 日 16 时 50 分,泰安高新区天宝镇年家峪村东一自然村,因强降雨引发山洪地质灾害;多地交通受到影响,G20 青银高速济青段(济青高速北线)K178(昌乐站以西 2 km)丹河桥梁护坝被冲塌;多列火车晚点,多个高速路段、收费站临时限行或关闭,多地城区积水路段采取交通管制。在此次台风过程中,据统计山东省各级气象部门共发布了 433 个暴雨、大风等灾害性天气预警信号,也为多年来少有。

2 数据和方法

2.1 主要数据

研究中使用的高时空分辨率数据主要包括:2018 年 8 月 17 日 08 时—2018 年 8 月 21 日 08 时的地面高空常规观测数据,其中国家基本(准)站、一般气象站和区域气象观测站共 1 536 个站点数据,时间分辨率 1 h,研究前对该数据进行了认真的分析质控以提高数据可用性。多普勒天气雷达数据主要是济南、青岛、烟台、潍坊、临沂、滨州、威海等 7 个 S 波段多普勒天气雷达基数据,共 6 842 个体积扫描数据,间隔 6 min。另外,为研究天气学背景,还使用了 NCEP 再分析资料,时间分辨率 6 h,空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

2.2 多普勒天气雷达立体拼图方法

在进行雷达数据拼图算法设计中,雷达拼图算法总体参考肖艳姣和刘黎平^[12]使用的拼图算法,将每个雷达基数据所包含的各个仰角数据进行坐标

转换,匹配到地面 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 格点上;然后在水平面上使用最大值方法进行雷达二维拼图,在垂直方向上使用反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值方法进行三维插值拼图,最终得到二维的雷达组合反射率拼图数据和三维的反射率因子数据。

最终,通过雷达拼图算法计算获得的雷达组合反射率因子和三维反射率因子数据集,其水平范围为 $113.2^\circ \sim 124.3^\circ \text{E}$, $32.8^\circ \sim 39.8^\circ \text{N}$,水平分辨率为 0.01° 约 1 km,时间分辨率为 10 min,数据涵盖山东省全境及部分周边区域。三维反射率因子数据在垂直方向上从 200 m 开始一直到 14 000 m,垂直分辨率为 200 m。数据集时间段为 2018 年 8 月 17 日 08 时—21 日 08 时。

通过多普勒天气雷达拼图技术的使用,得到了一个完整的三维立体雷达回波数据集,该数据集比原来的单站雷达数据更好地保证了暴雨观测的完整性和客观性。首先,三维雷达拼图算法很好地保持了原始雷达信息基本一致,对比检验证明雷达强回波的范围和强度,雷达回波的轮廓等均很好地进行了重现,如 2018 年 8 月 19 日 16:02,在 118.7°E 雷达反射率因子剖面图上,位于 36.8°N 附近的 45 dBZ 以上的强回波区均得到很好的保留(图 2)。同时,采用三维拼图后,原单站雷达观测不到的盲区,雷达回波信号也得到了很好的呈现,如图 2a 中位于 35.6°N 以南的强回波区由于低仰角探测原因,使用单站雷达不能很好地探测到,但是在雷达三维拼图(图 2b)中,2 km 以下的底层雷达回波得到很好的补充。可以看出,通过三维雷达拼图,可以得到更加真实的回波结构,使得分析此次台风暴雨的中尺度雨团更加科学、客观和有效。

3 台风暴雨雨团特征分析

关于此次台风暴雨和大风过程,有关学者已经做了很多的研究。前期大量研究分析认为,此次台风持续时间较长,并且阶段特征明显,且部分阶段降雨非常集中。郑怡等^[6]认为“温比亚”及其残骸长时间影响山东引发特大暴雨可分为三个阶段,分别受台风外围螺旋云系、倒槽和变性后温带气旋冷锋影响。其中,弱冷空气与台风倒槽相互作用对强降水的产生和维持起到了重要作用。上述分析阶段主要是从天气学角度进行的分析和阶段划分。为更客观、细致地分析强降雨不同阶段的特征,使用了全省区域自动气象站高分辨率数据进行统计

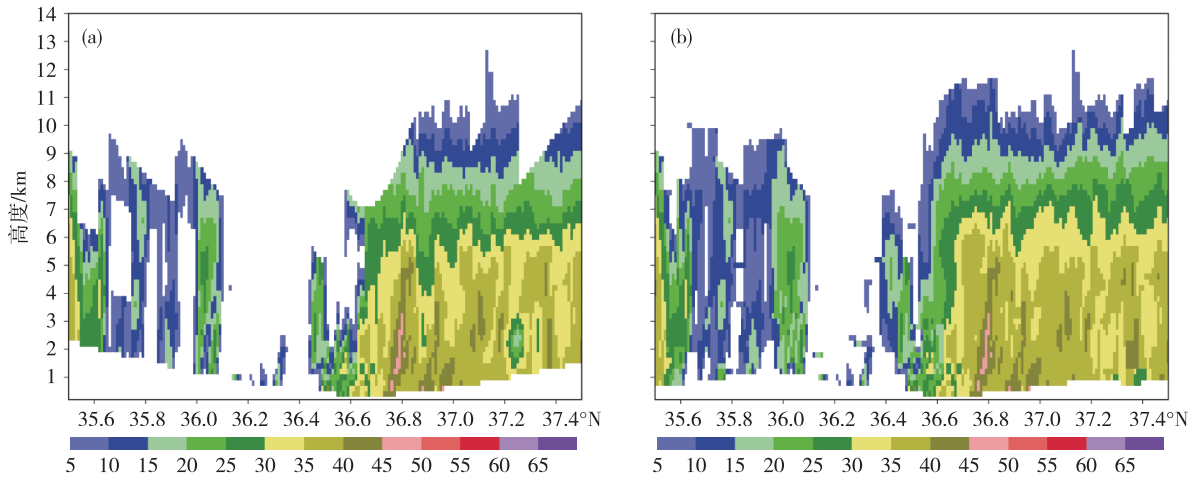


图 2 2018 年 8 月 19 日 16:02 左右潍坊雷达反射率因子沿 118.7°E 剖面(a.单站,b.拼图;色阶,单位:dBZ)
 Fig.2 Cross profile of Weifang radar along 118.7°E at about 16:02 BST 19 August 2018 (a. Weifang Station, b. mosaic; color scale, units: dBZ)

分析,进而进行更加详细的阶段分析研究。

3.1 降雨的时间分布特征

为更客观地分析此次暴雨过程的阶段性特征,从全省平均降雨量、最大雨强和大于 20 mm · h⁻¹ 的短时强降雨站数三个维度对此次暴雨过程的时间变化规律进行了深入分析。由全省平均降雨量时间演变图(图 3a),可以清楚地看到,此次台风“温比亚”暴雨过程中,全省平均降水量有三个峰值对应三个阶段,分别是 18 日上午、18 日夜间和 19 日白天到夜间。由每个阶段的最大雨强的变化趋势(图 3b)来看,阶段性相对比较明显,但差别不是太大,

但是在第三阶段雨强较为特殊,雨强达到最大,达 124.1 mm · h⁻¹。另外,由全省强降水站数(图 3c)来看,三个阶段强降水站数逐次增加,特别是在 2018 年 8 月 19 日 21—22 时,全省出现大于 20 mm · h⁻¹ 的短时强降雨站数达到 106 个,为短时强降雨最活跃时段,也是整个暴雨过程降水量最大的时段。

3.2 台风降雨的空间分布特征

从空间角度看,此次暴雨过程中,强降雨空间变化也较大。由整个台风暴雨过程逐 12 h 降雨量(图 4)分析来看,从 2018 年 8 月 17 日下午降雨开

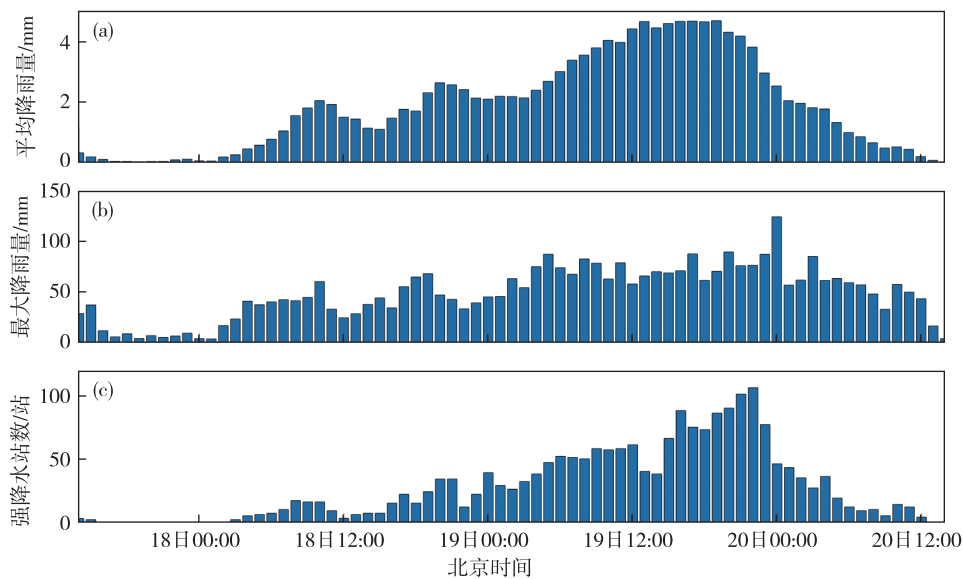


图 3 台风过程中山东逐小时平均雨量(a,单位:mm)、最大小时雨量(b,单位:mm)和强降雨站数统计(c)
 Fig.3 Statistics of mean rainfall intensity (a), maximum rainfall intensity (b), and the number of heavy rainfall stations (c) in Shandong during the typhoon

始到18日18时,降雨主要出现在鲁南和鲁中南部,其中最主要集中在两个区域,分别是淄博、泰安东部和临沂北部的强降雨区,菏泽、枣庄和济宁南部的强降雨区(图4a,b)。此后,强降雨区从鲁西南地区开始(图4c),覆盖鲁中(图4d)、鲁西北地区(图

4e),最后到半岛结束(图4f)。通过时间维度分析可以看出,此次暴雨过程强降水区域空间差异性很大,这与降雨的移动性特征有很大的关系。为此,下面将从空间和时间维度上更加详细地分析此次暴雨过程的特征。

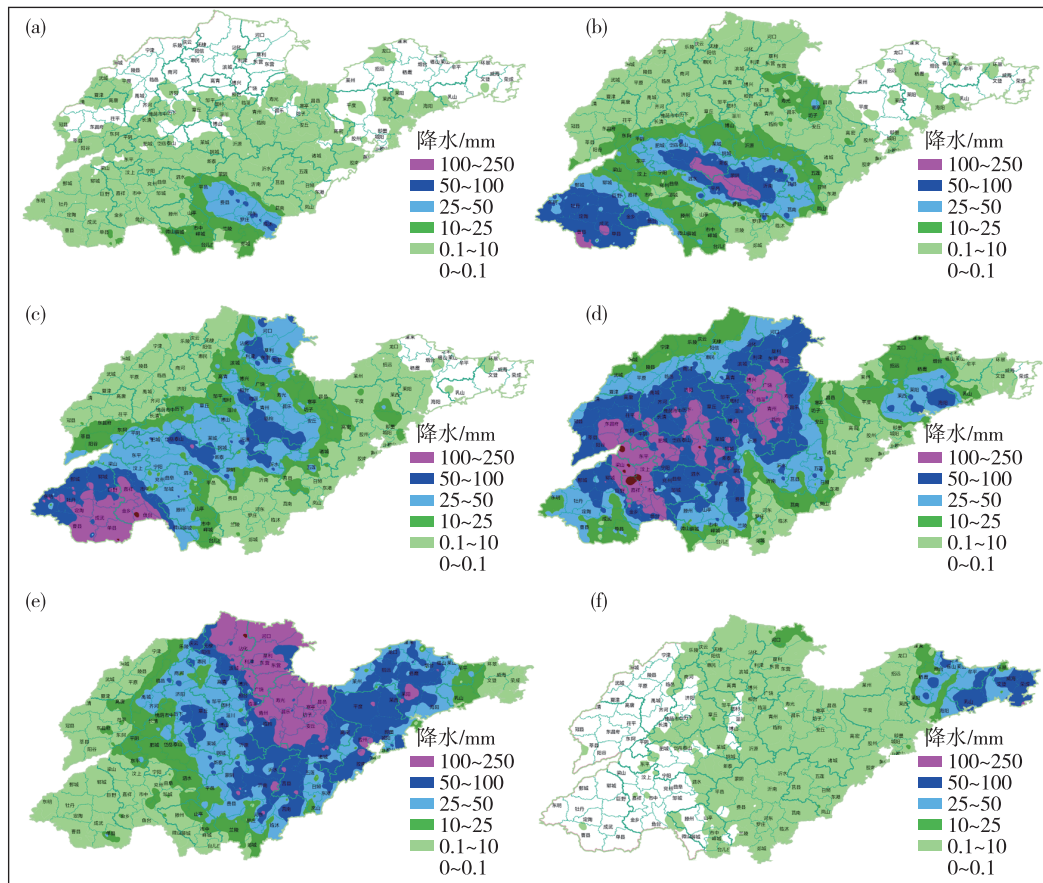


图4 2018年8月17日17:00—20日16:00各时段降雨量(a. 17日17:00—18日06:00, b. 18日06:00—18:00, c. 18日18:00—19日06:00, d. 19日06:00—18:00, e. 19日18:00—20日06:00, f. 20日06:00—16:00; 色阶, 单位: mm)

Fig.4 Precipitation of different time periods from 17:00 BST 17 to 16:00 BST 20 August 2018 (a. from 17:00 BST 17 to 06:00 BST 18, b. from 06:00 BST 18 to 18:00 BST 18, c. from 18:00 BST 18 to 06:00 BST 19, d. from 06:00 BST 19 to 18:00 BST 19, e. from 18:00 BST 19 to 06:00 BST 20, f. from 06:00 BST 20 to 16:00 BST 20; color scale, units: mm)

由上述分析可知,山东不同区域的降水时段不尽相同。更进一步从不同城市平均降雨量变化(图5)进行分析,可以看到此次暴雨过程阶段性更为显著,并且可以分类为单峰型(日照、聊城)、双峰型(菏泽、青岛、烟台)、三峰型(临沂、淄博、东营、潍坊、滨州)、四峰型(枣庄、济宁、泰安、济南、德州、威海)。从地理分布上看,除单峰型外,其他不同类型降雨城市相对临近,且这些城市主要是南北走向分布,这表明不同降雨雨团的移动可能是造成不同城市处于不同降水阶段的一个重要原因。此次台风暴雨过程中暴雨中尺度雨团与降雨阶段性特征的关系需要进一步深入研究和认识。

3.3 台风暴雨的雨强分布特征

分析上述各城市的暴雨时间演变,可以看到南北相邻的城市降雨雨强变化具有一定的相关性。为更好地研究此次台风降雨在地理空间上的相关性,沿 118.5°E 自南向北选取临朐九山、临朐、青州、青州何官、寿光台头、东营、垦利共7个台站(各台站相距约几十公里)作为研究对象,分析了这些台站在此次台风暴雨过程中雨强的变化(图6)。可以比较明显地看到,2018年8月18日夜間,临朐九山在19时达到最大雨强,为 $35\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (图6a),而临朐站在20时雨强显著增大,在21时为到最大雨强,为 $15.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (图6b),青州站在22时达到最大

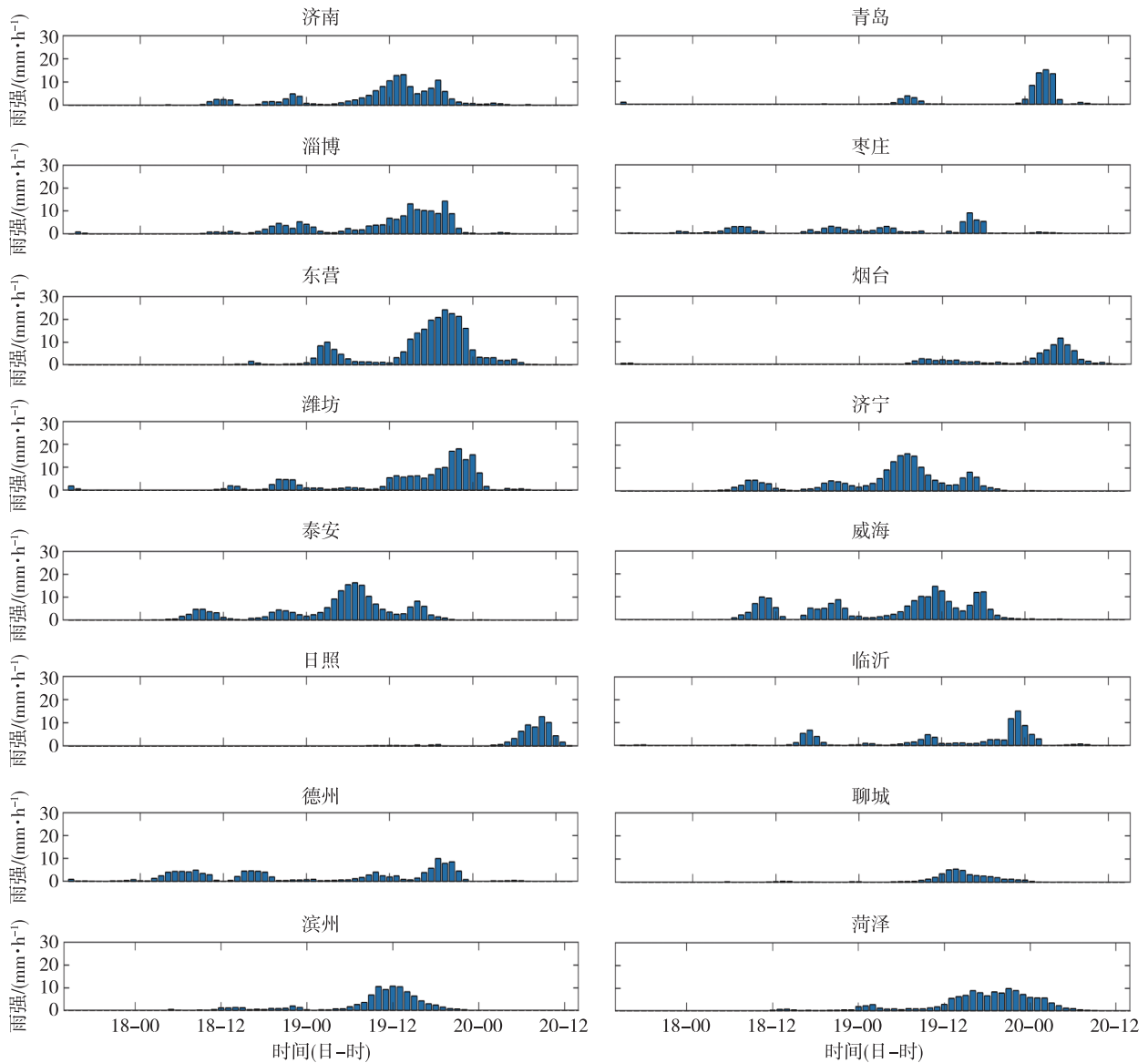


图 5 台风过程中各市平均雨强(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 随时间的变化

Fig.5 Evolution of mean rainfall intensity (units: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) in 16 cities of Shandong during the typhoon

雨强,为 $22.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 6c),青州何官在 23 时达到最大雨强,为 $6.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 6d),东营和垦利则分别在 19 日 02 时和 03 时达到最大雨强。这种随时间和空间变化的演变特征非常清晰,在一定程度上表明降雨雨团的移动是造成强降水空间变化的重要原因。

分析表明,19 日白天到夜间的强降水阶段也存在类似的特征,且更为明显。临朐九山在 19 日 18 时雨强为 $30.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此后 19 时临朐和青州雨强分别达 $20.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $39.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,青州何官在 20 时达到最大雨强,为 $24.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此后更靠北的寿光台头在 21 时达到最大雨强 $51.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分析研究表明该时段暴雨雨团移

动和空间相关性也非常强(图 6)。

针对此次台风暴雨雨团的移动,本文对上述站点逐小时气压、风向、风速演变特征等与降水强度进行了对比分析和深入研究。分析研究表明海平面气压在部分时段,存在由南向北前导变化特征,但是大部分时段降水与气压变化相关性不强,风向风速由于受地形和其他因素影响与降水联系更弱。

对于台风暴雨来说,在降雨过程中往往对应很多典型的强降雨时段。在此次台风暴雨过程中,分 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $30 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 等四类统计了短时强降水不同量级占比。由图 7a 可以看到,雨强在 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次最多占 58.9%,在 $30 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占

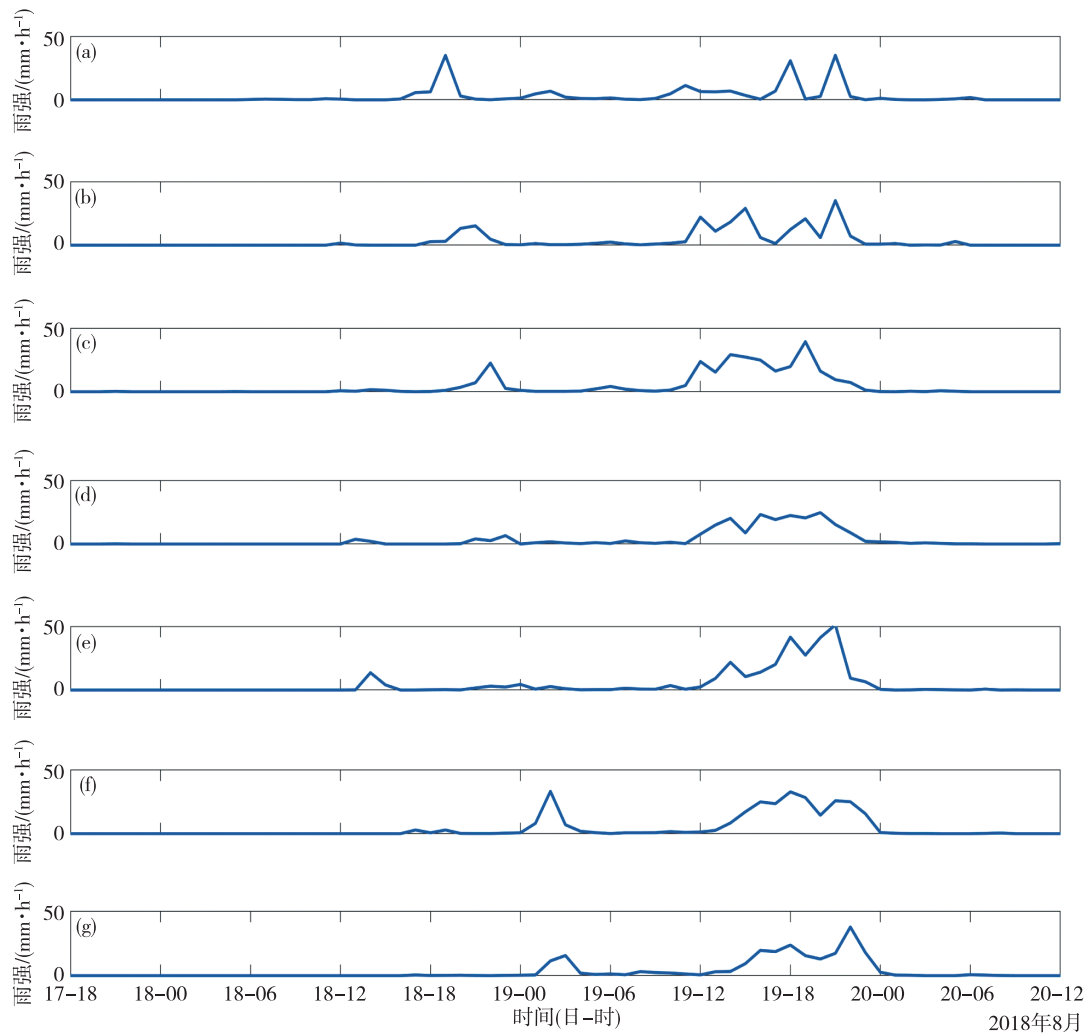


图6 南北临近站点雨强变化(a.临朐九山,b.临朐,c.青州,d.青州何官,e.寿光台头,f.东营,g.垦利;单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig.6 Evolution of rainfall intensity at 7 nearby stations from south to north along 118.5°E (a. Jiushan of Linqu, b. Linqu, c. Qingzhou, d. Heguan of Qingzhou, e. Taitou of Shouguang, f. Dongying, g. Kenli; units: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

22.4%,在 $40 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占10.0%,在 $50 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占4.9%,以上总共占比达96.2%,而雨强大于 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比仅为3.8%。尽管如此,雨强在 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水仍是造成过此次台风暴雨灾害的重要原因。

研究发现,在短时强降雨中, $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降雨是此次台风暴雨过程三个阶段短时强降雨的主体,很好地体现了此次台风暴雨三次高峰时段。而 $30 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降雨在三个阶段都有涉及,但后两个阶段占比明显更大,甚至在第三阶段该强度强降雨占总强降雨的近三分之一,这也是第三阶段强降雨形成的主要原因。 $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降雨主要分布在第二阶段和第三阶段,基本上每个时段都存在。大于 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降雨较为极端,强降雨零星分布在第二阶段和第三阶段,第

一阶段则没有超过 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降雨(图7b)。

综合分析可以看出,此次台风暴雨过程中短时强降雨的时间分布和量级与降雨各个阶段的关系相对比较清楚;此次台风暴雨中,长时间的强降雨既是造成暴雨的主要原因,也是极端降水的重要因素。

4 台风暴雨雷达回波分析

下面使用多普勒天气雷达的二、三维拼图数据,主要从雷达回波的时空变化特征、雷达回波的强度分布特征、暴雨雨团的移动特征和中尺度雨团的三维分布特征等几个维度进行研究分析。

4.1 雷达回波的时空变化特征

此次台风暴雨过程降水主要发生在第三阶段,

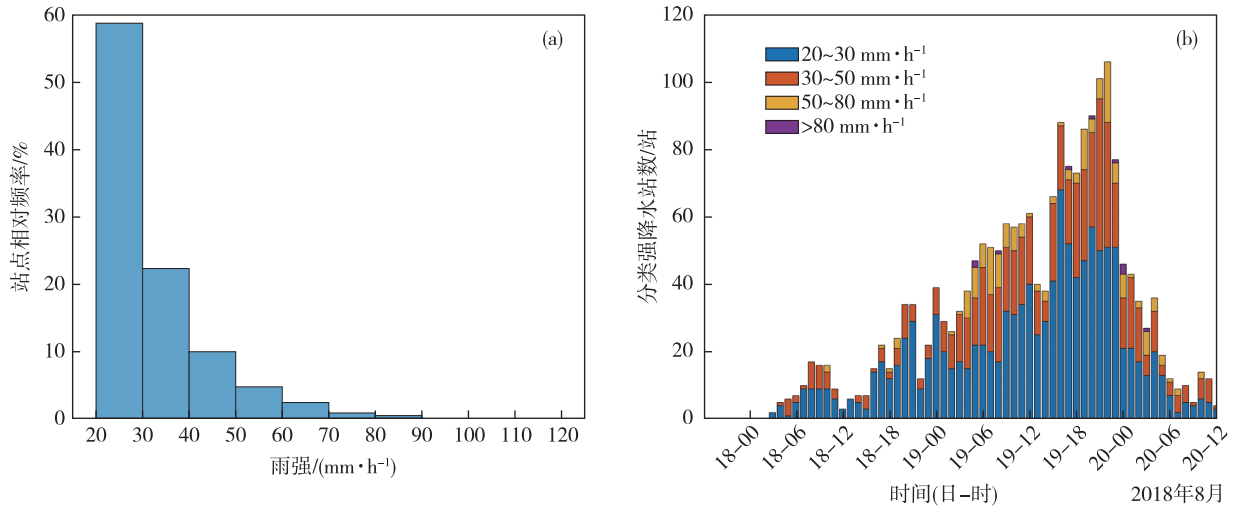


图 7 短时强降雨全过程(a)和分时段(b)分布情况

Fig.7 Distribution of short-time heavy rainfall during whole process (a) and each time period (b)

造成的暴雨灾害也主要发生在第三阶段。台风暴雨相对集中的潍坊市、寿光市、青州市、临朐县在 19 日 12 时至 20 日 00 时累计降水量分别为 132.1 mm、206.3 mm、206.7 mm 和 148.4 mm, 分别占降雨过程总量的 72%、78%、70%和 65%。因此主要以第三阶段暴雨过程作为研究对象, 这些演变规律在暴雨发生的其他几个阶段也有类似的情况。而这一阶段降水强度大、范围广。特别是淄博、潍坊等地出现强降雨。

图 8a 为暴雨过程中降雨较为集中的 2018 年 8 月 19 日 18 时多普勒天气雷达组合反射率因子拼图。由图中可以看到从鲁南到鲁北都大面积存在强降雨回波, 大范围强降雨也相对集中, 并且从南

向北存在较为明显的带状分布, 特别是在临沂东部至潍坊北部一线。这表明, 台风暴雨具有较好的组织性和系统性。

在该降雨时段, 由间隔 10 min 的雷达组合反射率因子拼图产品(图略)分析可以看到, 雷达回波不仅具有带状分布特征, 在时间上还存在不断北移的运动过程。暴雨中尺度雨团的北移, 可以通过南北相距不远的两个观测站上空雷达组合反射率因子的变化得到类似反映。图 8b 为临朐九山和该站北面相距约 50 km 的青州站雷达反射率因子的变化曲线对比, 从中可以很清晰地看到, 17—18 时这一时间段, 青州站的雷达反射率因子位相明显落后于临朐九山站约 40 min, 且变化趋势基本一致。因此可

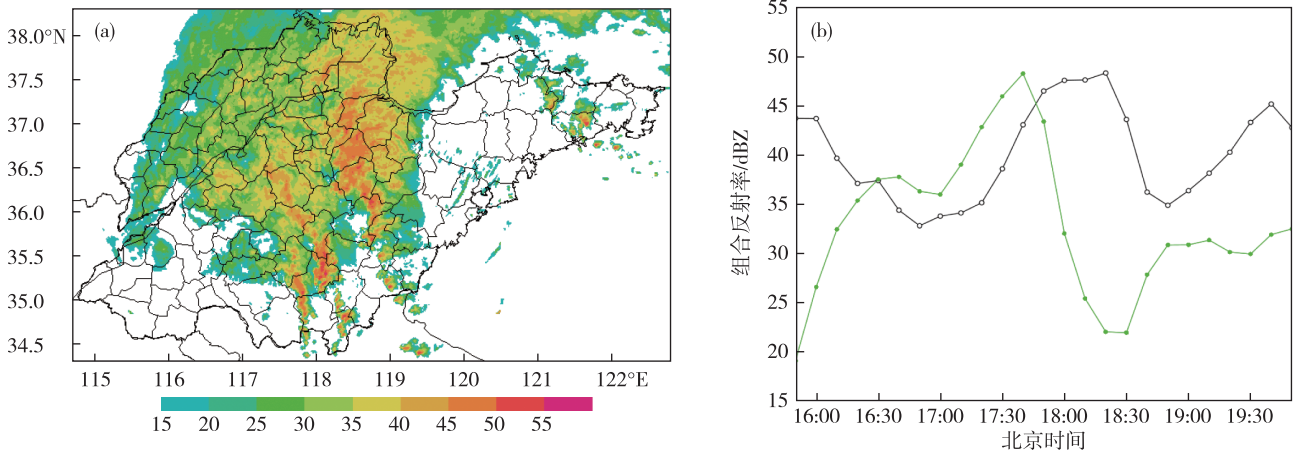


图 8 2018 年 8 月 19 日 18 时全省雷达组合反射率因子(a; 色阶, 单位: dBZ)和 2018 年 8 月 19 日 16—20 时不同站点雷达组合反射率因子变化(b; 黑线: 青州, 绿线: 临朐九山; 单位: dBZ)

Fig.8 Composite reflectivity (a; color scale, units: dBZ) at 18:00 BST 19 in Shandong and evolution of composite reflectivity (b; units: dBZ) at Qingzhou Station (black line) and Jiushan Station of Linqu (green line) from 16:00 BST to 20:00 BST 19 August 2018

以分析认为该暴雨中尺度雨团具有很大的移动特征,是造成降雨区变化的重要原因。

为了更客观深入地分析雨团移动方向和速度,沿 118.5°E 和沿 36.5°N 在南北和东西方向上分别

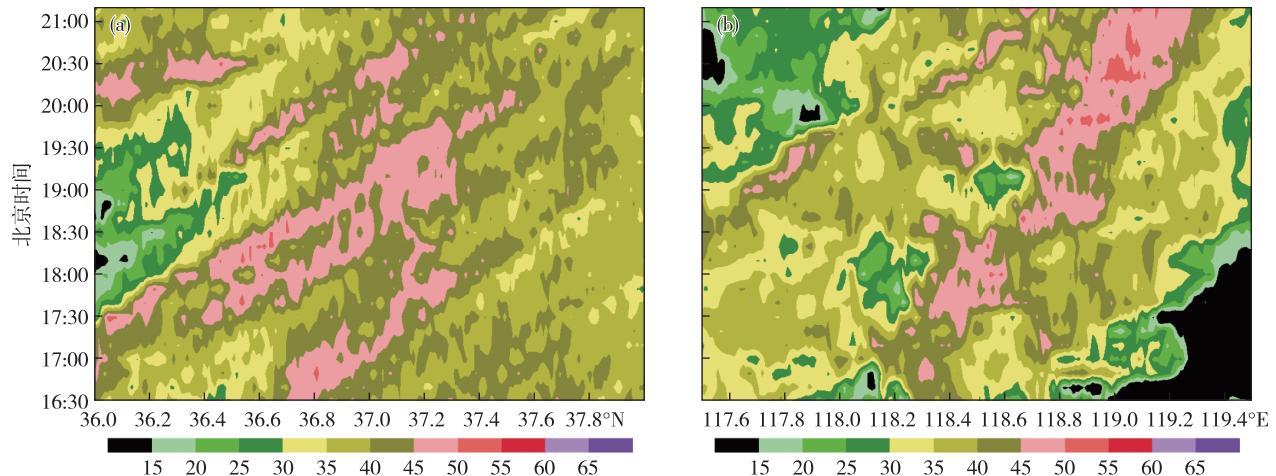


图9 2018年8月19日沿 118.5°E(a)和沿 36.5°N(b)的组合反射率因子(单位:dBZ)经纬度-时间剖面

Fig.9 Latitude-time cross section of composite reflectivity (units:dBZ) along 118.5°E (a) and 36.5°N (b) on 19 August 2018

由图9a可以看到,总体上看雷达组合反射率形状向右上角倾斜,表明随着时间的变化,回波向高纬度移动。在南北方向,18时开始,36.4°N高反射率回波区一直延伸到19:30的37.2°N。从中可以分析认为在1.5h的时间范围内,高反射率回波区向北移动了0.8纬度,即表明强降雨相关的雷达回波向北1h移动了0.53纬度,风暴移动的南北分量较大,也表明暴雨雨团向北方向移动较快。

对图9b进行同样的分析,从19时的118.8°E发展到20:30的119.2°E,同样1.5h,但雷达回波向东发展了仅0.4纬度,即移动速度1h仅为0.27纬度,风暴移动的东西分量较小。因此,通过雷达回波空间-时间剖面分析,可以得出该中尺度雨团存在北偏东移动的趋势,以向北移动为主。

但是,到整个台风暴雨的第三阶段后期,随着台风环流的调整,降雨回波移动的主流方向发生了很大的变化。分析雷达回波移动特征(图略),可以看到在20日00时以后,降水回波移动尽管还是向东北移动,但是已经转变成以向东移动为主,向北分量已经很小。

4.2 雷达回波的强度分布特征

前面研究分析中,已经对整个暴雨过程中雨强进行了统计分析,表明短时强降雨是此次暴雨过程的主要特征,且降雨雨强超过 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 甚至 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水占了很大比重,这也是在很短的

做了雷达组合反射率的纬度-时间剖面和经度-时间剖面(图9),以便分析该降雨雨团在南北和东西方向上的移动特征。

时间内造成突破历史极值降水的重要原因。

为分析强降雨发生时对应的雷达回波强度的特征,把整个暴雨过程短时强降雨分为 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $30\sim 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $50\sim 80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 等四类对其相应的雷达组合反射率因子进行统计分析(图10)。研究表明,不同降雨强度相对应的雷达组合反射率因子数值分布范围较大,其中25%至75%分位点间雨强差距也较大,但中值相对比较稳定。这表明,此次暴雨过程尽管暴雨范围和总雨量都很大,但是短时强降雨具有很强的局地性特征,且随时间变化很快,总降雨量很大的暴雨是由较小的短时强降雨累计形成的,短时间内雨强变化很大,不均匀。

同时,统计分析(表略)表明,四类强度的强降雨对应的一小时内逐10min雷达拼图组合反射率中值分别是35.65 dBZ、37.6 dBZ、39.5 dBZ和45.05 dBZ;而相应的均值分别为31.92 dBZ、35.02 dBZ、38.34 dBZ和42.54 dBZ。因此,从统计学特征上看,尽管随着雨强的增大,相应的雷达回波强度在增强,但是总体上组合反射率因子均值和中值相对来说都不是特别大。这主要是由于此次台风暴雨具有较为典型的热带型降雨回波特征,即雷达回波强度不是太强,但是降水效率和雨强特别大^[13]。同时,也说明了在整个降水过程中存在较多的低回波强度时间段、弱降水或甚至无降水时间段,降水

短时性较强且连续性不好,过程总降水量是由较多

的短时间强降水组成的。

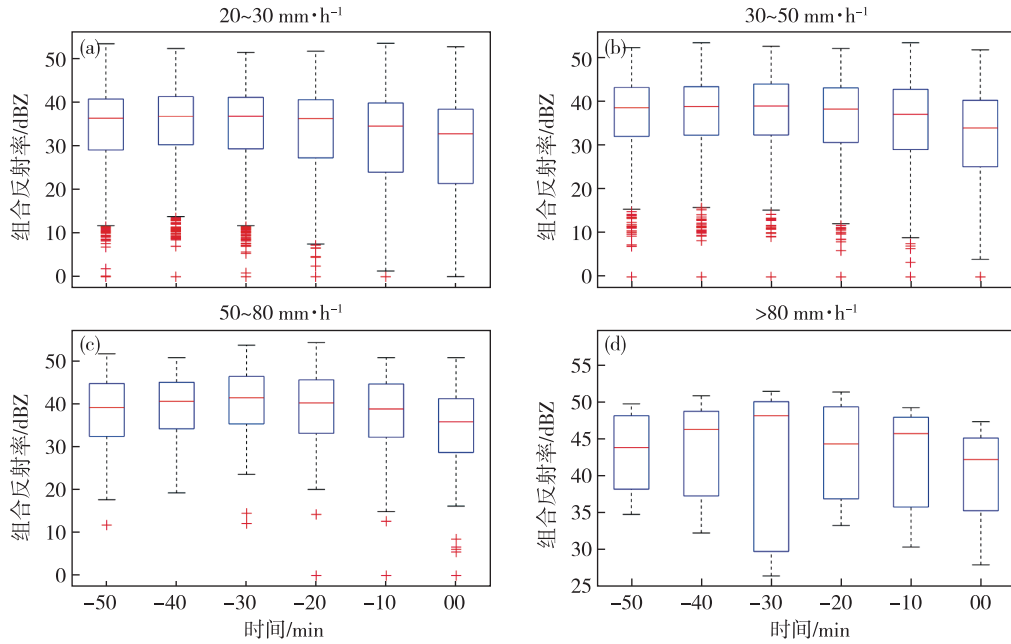


图 10 降雨过程中逐小时短时强降水对应的组合反射率因子分布

Fig.10 Distribution of composite reflectivity corresponding to hourly short-time heavy rainfall

4.3 暴雨雨团的移动特征

多普勒天气雷达组合反射率因子强度可以很好地表征暴雨中降雨雨团的降雨强度,因此雷达反射率因子的移动与降雨雨团的移动也具有很好的对应关系。上节分析中,已表明暴雨第三阶段的前半段暴雨雨团以向北北东方向移动为主,后半段暴雨雨团向东北方向移动为主。选取第三阶段降雨中相对具有代表性的 19 日 18—19 时和 20 日 00—01 时这两个典型时间段进行对比分析研究,从

而更详细分析每个暴雨雨团的移动方向和速度特征。

图 11a 为山东省 2018 年 8 月 19 日 18 时开始每隔 20 min 雷达组合反射率因子中大于 45 dBZ 的强回波区位置。可以看到,在该段时间内,强降雨雨团基本上呈南北向带状分布,并且雨团移动基本上以北向运动为主,方向略偏东;雨团还具有不断生消的情况,部分雨团合并发展,因此分析认为该时段雨团连续性强、发展稳定,同时在一定程度上

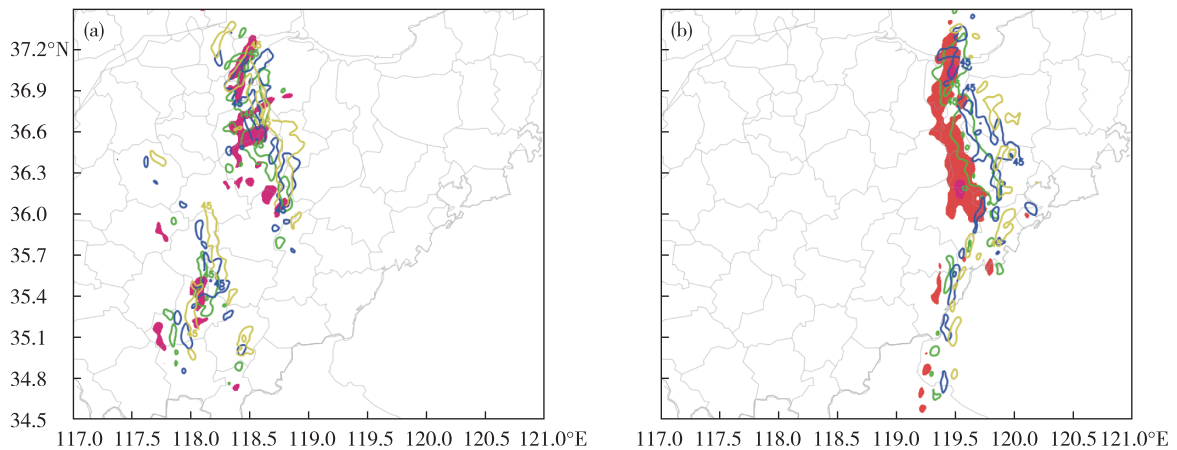


图 11 2018 年 8 月 19 日 18—19 时(a)和 20 日 00—01 时(b)中尺度雨团移动情况(红色区域为初始时次位置,绿色、蓝色、黄色分别为此后 20、40、60 min 位置)

Fig.11 Movement of mesoscale clusters from 18:00 to 19:00 BST 19 (a) and from 00:00 to 01:00 BST 20 (b) August 2018 (red area for initial time, area in green, blue, and yellow line for 20 min, 40 min, and 60 min later)

具有“列车效应”,即大量的强降水雨团不断重复向北经过,造成连续性强降雨。这种“列车效应”降水也是造成出现极端降水,破历史极值暴雨灾害的重要原因之一。

而在20日00时以后的第三阶段后期半岛地区降水(图11b),与第三阶段前期降水和降雨雨团移动有较大的区别。一是雷达组合反射率更强,达50 dBZ以上,表明此时雨强相对更大;二是降雨雨团带状分布特征更明显,雨带更规则,同样是南北向分布,但是,降雨雨团的移动方向与前期过程移动方向有显著差异,该时段雨团以向东移动为主,略偏北。尽管降雨强度很大,但是由于降雨雨团移动方向和带状分布方向不一致,因此没有很好地形成“列车效应”。该时段尽管降雨强度大,但是降雨时间短,没有造成很强的累计降雨,因此没有形成明显的暴雨灾害。

4.4 中尺度雨团的三维分布特征

尽管在以往的研究中,很多情况下对暴雨雨团的二维研究较多,但实际上暴雨与雨团的三维结构和演变分析也非常重要,相关研究可以很好地分析降雨强度特征和时间演变规律。针对2018年9月18日傍晚前后临朐、青州附近典型强降雨阶段,做了空间结构和时间演变特征的分析,以便更好地对此次台风暴雨雨团有更深入的认识。

分析了临朐九山至青州附近沿 118.5°E ,从地面至14 km高度暴雨雨团雷达反射率因子的垂直结构(图12a、b)。分析研究可知,2018年8月19日17:50,沿 118.5°E 有三个强对流区域A、B、C,分别位于 36.2°N 、 36.6°N 和 36.7°N ,对应三个强降雨雨团,中心相对独立,主要回波都集中在5 km以下。10 min以后,随着系统的发展,在18时原来的三个中心均明显北移了约0.1纬度,分别位于 36.3°N 、

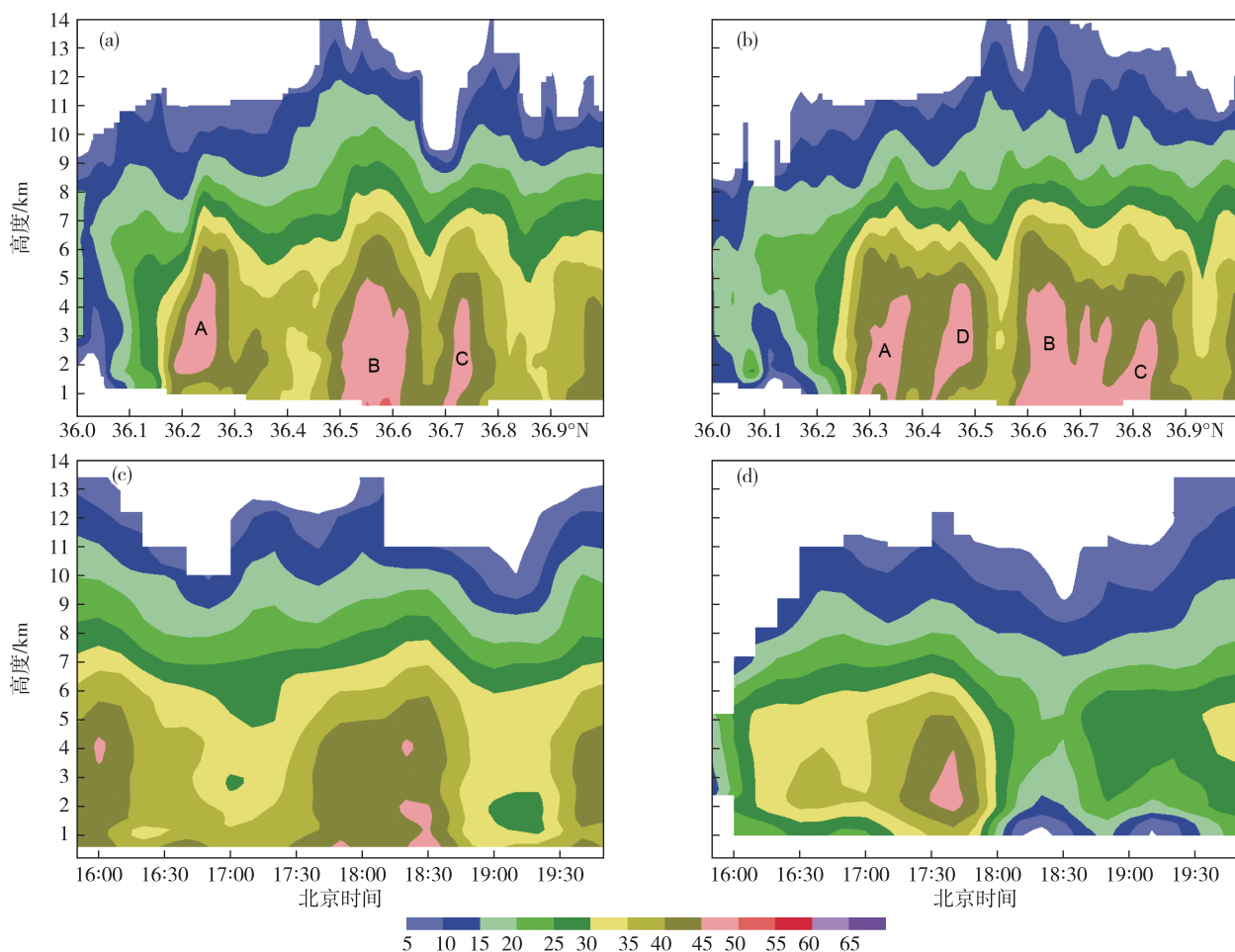


图12 2018年8月19日17:50(a)、18:00(b)沿 118.5°E 雷达反射率因子经向剖面 and 16—20时青州(c)、临朐九山(d)雷达廓线时间演变(色阶,单位:dBZ)

Fig.12 Meridional cross section of radar reflectivity along 118.5°E at 17:50 BST (a) and 18:00 BST (b) 19 and evolution of radar profiles at Qingzhou Station (c) and Jiushan Station of Linqu (d) from 16:00 BST to 20:00 BST 19 August 2018 (color scale, units: dBZ)

36.7°N和36.8°N;同时,在A和B的中间生成了新的强回波区D,位于36.5°N,而原来的B、C进一步发展合并,形成了一个组合的B、C联合体。研究表明三维结构的分析可以很好地识别雨团垂直结构,如果仅仅分析二维的雷达组合反射率因子拼图(图8a),这些与雨团紧密相关的发展特征很难被发现和识别。

对应于暴雨雨团的空间结构和发展、合并等演变,对于局地气象台站,需要分析连续且不断变化的本站降水过程变化。图12c为2018年8月19日16—20时经过青州上空的多普勒天气雷达反射率因子时间-高度剖面图,由图可以清晰地看到,16:00、17:30至18:30是两个相对集中的强回波阶段,此时雷达反射率因子强,强回波伸展高、厚度大,是造成强降水的重要特征。同样(图12d),临朐九山也存在类似的情况。

5 结论与讨论

本文使用多普勒天气雷达、区域气象观测站等数据,以一次影响山东造成重大暴雨灾害的典型台风暴雨过程为例,使用三维雷达拼图技术深入研究了台风暴雨中的中尺度雨团雷达回波结构和发展变化特征等,得出一些有益的结论。

1)2018年台风“温比亚”造成的山东暴雨过程中,三个降雨阶段雨强特征有较大差异,特别是最后一个阶段长时间强降雨是造成灾害性暴雨的主要因素之一。

2)此次台风暴雨雨团具有很强的移动特征,且不同时段和区域,移动方向和速度均不同,是否形成“列车效应”是能否造成灾害性暴雨的重要因素。

3)雷达三维拼图数据可以清晰地识别和分析强降水过程中的中尺度雨团的移动、合并和发展规律,这些对于准确监测预报暴雨的发生至关重要。

在本研究中,仅使用了多普勒天气雷达反射率因子三维拼图对台风暴雨的中尺度系统进行了较为详细的分析,也得到了一系列较好的结论,但是还存在一定的不足。主要是,雷达数据研究中仅使用了反射率因子作为研究数据,尽管可以对暴雨中尺度系统的强度等作出较好分析,但是对暴雨雨团的动力学、微物理特征等不能很好地分析研究。台

风暴雨具有比较复杂的结构^[7,14],随着双偏振多普勒天气雷达在济南、青岛、烟台等雷达站建设和业务应用,未来可以使用更多的雷达产品要素拼图和反演数据对中尺度台风暴雨系统进行研究,以便更好地为强降水预报预警提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 丁一汇.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):395-406.
- [2] 张怡辉,胡维平.台风影响下巢湖风浪特征研究[J].湖泊科学,2020,32(1):236-245.
- [3] 张国庆,韩露,徐斌,等.登陆台风对长江口口门水域的影响[J].水运工程,2020(3):1-6.
- [4] 徐玲玲.台风“温比亚”与莫拉克及海葵的区别[J].科学技术创新,2019(2):51-52.
- [5] 谷秀杰,张霞,苏艳华,等.台风“温比亚”停滞少动及转向机理探究[J].热带气象学报,2019,35(6):780-788.
- [6] 郑怡,杨晓霞,孙晶.台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):106-115.
- [7] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J].海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [8] 牛淑贞,张一平,王国安,等.“海棠”影响河南降水雷达回波和中尺度雨团对比分析[J].气象,2006,32(8):30-35.
- [9] 周文志,孙莹,唐熠,等.“碧利斯”的中尺度云团和雷达回波分析[J].气象研究与应用,2007,28(2):15-30.
- [10] 吴家富,王正廷,陈光咏,等.闽西北前汛期雨团和强雨团的若干特征分析[J].水利科技,2008(1):8-10.
- [11] 陈博,李新峰.2018年第18号台风“温比亚”引发大范围暴雨过程的诊断分析[J].民航学报,2019,3(4):28-34.
- [12] 肖艳姣,刘黎平.新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J].气象学报,2006,64(5):647-657.
- [13] 卢焕珍,张楠,刘一玮.天津一次局地大暴雨中尺度对流系统组织化特征与成因[J].暴雨灾害,2015,34(1):17-26.
- [14] 周雪松,孙兴池.台风“达维”(1210)非对称性结构及其对风雨分布的影响分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):58-64.