

一次燕山南麓局地大暴雨的成因分析及数值预报检验

崔粉娥¹ 畅巨峰² 燕成玉¹ 张晨宇¹

(1 河北省秦皇岛市气象局, 秦皇岛 066001; 2 河北省青龙满族自治县气象局, 秦皇岛 066500)

摘要: 利用常规观测资料、区域自动站、卫星云图及多普勒天气雷达资料, 对2013年6月28—29日发生在秦皇岛地区一次局地大暴雨过程进行了综合分析, 并从环流形势、影响系统、降水强度和落区等方面对多种数值预报进行检验。结果表明: 中尺度对流复合体和线状回波中的超级单体, 造成了北部山区的短时强降水, 强降水区域位于黑体亮度温度TBB度最大处, 燕山山脉地形抬升作用和中尺度风场辐合是本次过程的触发机制。多种数值模式产品对暴雨有一定的预报能力, 但强降水中心都偏北, 且未能体现出大于100 mm的大暴雨区域。对产生暴雨天气影响系统位置和强度的预报, 不同的数值模式有所差异, ECMWF模式对亚洲地区中高空环流预报的结果更为准确, 对弱高空槽系统预报偏差较大。冷涡天气形势下, 当各种数值预报模式均预报有降水时, 降水量级一致或相差不多, 并且日本传真图在秦皇岛附近预报有25 mm左右降水中心时, 考虑地形作用, 秦皇岛北部山区降水量级可增加一个量级或稍大一些。由于各家数值预报对地形作用难以准确把握, 从而对地形诱发的中小尺度系统容易漏报。

关键词: 低涡, 模式检验, 大暴雨

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.009

The Cause and Numerical Prediction of a Strong Convective Weather Process at the Southern Foot of Yanshan

Cui Fen'e¹, Chang Juzheng², Yan Chengyu¹, Zhang Chenyu¹

(1 Qinhuangdao Meteorological Bureau, Qinhuangdao 066000

2 Qinglong Manchu Autonomous County Meteorological Bureau, Qinglong 066500)

Abstract: Based on the MICAPS conventional observation data, regional automatic station, satellite cloud pictures, and Doppler weather radar data on June 28 and 29, 2013 in Qinhuangdao area, a local torrential rain process was analyzed. Several numerical products from the aspects of circulation situation, influence system, and precipitation elements were inspected. The results showed that the mesoscale convective complexes and super monomer in linear echo mainly contributed to the short-time strong rainfall in the northern mountainous area. The heavy rain area was located in the TBB maximize gradient. Yanshan mountain terrain lifting effect and mesoscale wind field convergence triggered this process. The numerical model products had certain ability in forecasting rainstorm, but the heavy precipitation center predicted was deviated to the north and failed to capture the heavy rainstorm area > 100 mm. Different numerical models produced different results in terms of the position and intensity of the heavy rain. ECMWF mode was more accurate in predicting mid- and upper-level air circulation in the Asian region, but it was less accurate in predicting weak upper trough system. When all numerical prediction models predicted to rain in the cold vortex weather situation, the precipitation level was consistent or similar. When the Japanese FAX forecasted about 25 mm rainfall in the vicinity of Qinhuangdao, the precipitation level in the northern mountainous area of Qinhuangdao can be increased by an order of magnitude or larger by including the topographical effects. Because the numerical prediction was difficult to incorporate the terrain effect, the prediction was usually unsatisfactory at the small-meso scale system.

Keywords: low vortex, numerical model test, heavy rain

收稿日期: 2018年6月28日; 修回日期: 2019年5月28日

第一作者: 崔粉娥(1977—), Email: cuijene@126.com

资助信息: 河北省气象局科研项目(15ky31)

0 引言

致灾暴雨一直是广大气象工作者关注的重点^[1-3]。大范围对流性暴雨多数是由中尺度对流系统或中尺度对流复合体而产生^[4-5], 由对流风暴引起的强天气

很容易漏报而成为众多学者关注和研究的重点^[6-16]。而对数值预报产品进行评估、检验,是数值预报产品在实际预报业务中有效应用,提高天气预报准确率的重要途径之一。许多学者从不同角度做了大量的检验工作^[17-27],孟英杰等^[17]认为,在武汉区域降水预报中,JAPAN模式的综合预报性能好于T213、AREM、GRE模式。肖明静等^[19]对汛期山东降水预报进行了多模式检验,结果认为一般性降水和小雨预报,24 h、48 h降水MM5模式评分结果均为最差,T639模式预报效果最好;中雨及以上量级,两个区域模式均不如T639模式预报效果好。蔡梦宁^[26]认为ECMWF模式对各影响系统及要素的预报最接近实况JAPAN模式和T639模式次之。程锦霞^[27]对主要物理量因子的T639预报场进行检验,结果认为垂直速度预报最优,其次是涡度、散度、涡度平流预报,水汽通量、假相当位温24~72 h预报产品参考价值较大。本文通过对基层气象台(站)常用的几家数值模式在一次局地大暴雨过程中的预报情况进行检验,为预报工作者正确使用数值模式产品提供依据。

2013年6月28—29日,秦皇岛市各县区出现强降雨天气,降水分布不均匀,北部青龙为大暴雨,卢龙为暴雨,昌黎、抚宁为大雨,其他地区为中雨,并伴有较强雷电。5个区域气象站降水量超过100 mm,26个区域气象站超过50 mm,最大出现在青龙土门子为132.6 mm。强降水时段出现在28日22时至29日00时,小时雨强最大为59.7 mm,3 h累计降水量超过100 mm,达短时暴雨标准。本次过程降水时段集中,降水强度大,且强降水出现在北部山区,跟燕山南麓地形关系较大。

1 环流背景及影响系统分析

500 hPa环流形势中高纬度呈一槽一脊型,2013年6月27日08时贝加尔湖附近形成一低涡,在鄂霍次克海存在一阻塞高压,该低涡系统稳定少动,强度不断加强,到28日20时低涡中心强度从544 dagpm增强至542 dagpm,并配合有一20℃的冷温度中心。由于涡后部冷空气不断分裂南下,在28日20时形成阶梯槽,一支位于贝加尔湖南部,另一支位于华北北部,这种形势有利于冷空气补充南下影响秦皇岛地区。在相应的200 hPa上,秦皇岛地区受高压脊控制,脊前呈疏散状,表明高空存在辐散,有利于中低层气流辐合上升。

在28日20时的700 hPa和850 hPa上,秦皇岛受西南气流和温度脊控制,700 hPa在河北西北部至内蒙古一带温度露点差小于2℃,说明水汽充沛。850 hPa在河北、山西、内蒙古交界处存在一切变。

本次强降水过程的影响系统是高空短波槽和东蒙低涡。由中尺度环境场(图1)可知:由于东蒙冷涡稳定少动,且不断发展加强,冷空气不断分裂南下影响河北东北部地区。秦皇岛位于高空冷温度槽和低压暖脊之间,且为K指数大值区,该区域为不稳定区域,有利于产生对流活动。强降水落区位于高空急流出口右侧和低压急流入口左侧,850 hPa显著湿区,且K指数大于32℃。切变线和地面辐合线触发了秦皇岛北部短时强降水。

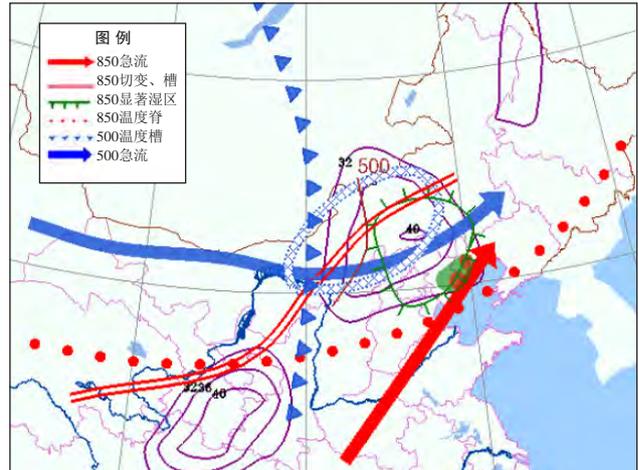


图1 2013年6月28日20时高低空系统配置图
(其中紫色线条代表K指数场,绿色区域为暴雨区)
Fig. 1 Configuration of high and low weather system at 2000 BT on 28 June 2013
(The purple line represents K exponential field, and the green area represents the rainstorm area)

由图2可知,28日20时秦皇岛受低压控制,辐合线位于河北和内蒙交界,青龙站小时降水量为1.9 mm。到23时随着系统东移和冷空气补充,辐合区位于河北北部,并在河北东部产生新的辐合区,河北西北部处于气旋性曲率大值区,青龙站小时雨量达到32.2 mm,说明该区域辐合强,有利于对流活动的发展。到29日02时河北东北部转为反气旋环流,秦皇岛北部受东北气流控制,降水明显减弱,04时降水基本结束。

2 中尺度特征分析

2.1 卫星云图演变分析

从红外云图动态分析可知:28日08:30在河北西北部有一低涡云系,该云系范围较宽广(图3a)。由于高空冷空气补充南下及日本海阻塞高压的存在,有利于对流云团加强发展和维持,在22:30低涡云系发展为中尺度对流复合体MCC(图3b),该云系结构密实,青龙县位于TBB梯度最大处,该时刻与最大

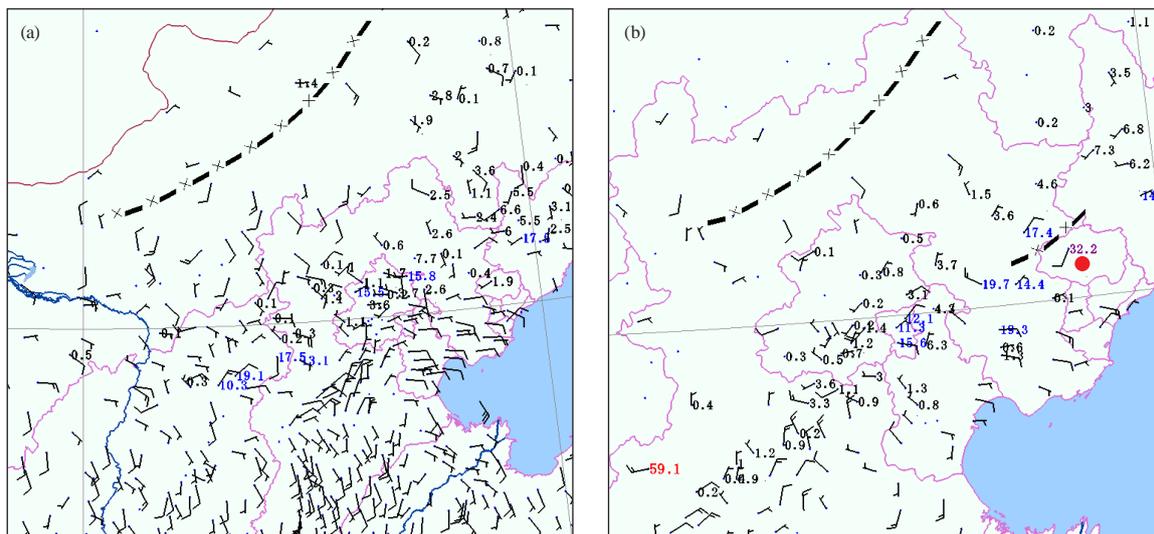


图2 2013年6月28日20时和23时加密站风场叠加小时雨量(红色区域代表青龙站)
Fig. 2 Wind field and hourly rainfall (The red area represents Qinglong station)
(a) 2000 BT on 28 June; (b) 2300 BT on 28 June 2013

小时降水量相吻合(图3e)。随着系统东移和低层辐合减弱,从00:30开始,对流云团东南部的云系逐渐减弱与主体分离,云团结构开始松散(图3c),至03:30对流云团基本移出秦皇岛(图3d),强降水明显减弱,后期转为分散的降水云系影响,降水趋于结束(图3e)。

2.2 多普勒雷达组合反射率演变分析

本次过程的强降水时段出现在28日22时至29日04时,由组合反射率因子的动态变化(图4)可知:28日20时青龙上空开始有弱降水回波,在兴隆到宽城一带存在一窄带回波,大片降水回波中镶嵌着超级单体,中心强度值为50~60 dBz,该回波带缓慢向东南方向移动。位于秦皇岛上空的回波带呈线状,线状回波中不断有超级单体影响秦皇岛市北部县区,类似“列车效应”。21时青龙上空降水回波中心强度最大值为60 dBz,由于秦皇岛市西北部位于切变线附近,且低层湿度条件较好,并且在北京一天津一带不断有带状降水回波生成,使该回波带经过降水区时回波中心强度值稳定维持在55~65 dBz,青龙最大小时降水量达到44.3 mm。29日02时降水回波的线状结构开始松散,秦皇岛市转为零散的降水回波影响,该降水回波影响秦皇岛市长达4~5 h,从而造成北部山区暴雨到大暴雨。04时以后降水明显减弱,降水趋于结束。

2.3 闪电资料及自动站资料分析

分析强降水时段基本径向速度图和闪电实况图(图略)可知:秦皇岛市降水出现在28日20时至29日04时,北部山区为雷电极高密度区域。速度图在低空

有明显的东南气流输送水汽,青龙县区附近低层为辐合,高层为辐散,有利于上升运动的维持,且中低层为大范围正速度区包围有负速度区,有“逆风区”存在,该区域与强降水区域吻合。5 min加密自动站风场显示(图略):28日21:30青龙县区有明显的风场辐合,29日01:30青龙转为南到东南风,中尺度风场辐合减弱、消失,降水开始明显减弱。

3 物理量诊断分析

3.1 水汽条件分析

分析可知:水汽通量散度辐合区位于河北东部,最大值为 $-3 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,同时次的水汽通量场显示有东南和西南两支气流输送水汽,水汽主要来源于渤海和黄海(图5a)。850 hPa比湿大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这充分说明中低层充沛的水汽条件,对降水起到增幅作用,有利于产生短时强降水(图5b)。

3.2 热力条件分析

相当位温 θ_e 是一个重要的温湿特征参数,由相当位温的径向剖面图(图6a)可知:秦皇岛上空在900 hPa附近存在一闭合暖区,中心值达342 K,且850 hPa以下为位势不稳定区域,与径向分量大正值区相对应,偏南风有利于暖湿气流输送。

在 $T-\ln P$ 图上(图6b),湿层较厚,高湿区达700 hPa高度,925 hPa存在一浅薄的逆温层,并且存在风切变。 K 指数为34, SI 指数为-9.12, $CAPE$ 值为2766.1,整层比湿积分为4682.7,这说明大气为层结不稳定状态,蕴含着不稳定能量,为强降水的产生提供了不稳定条件。同时, -20°C 层高度为5.8 km,

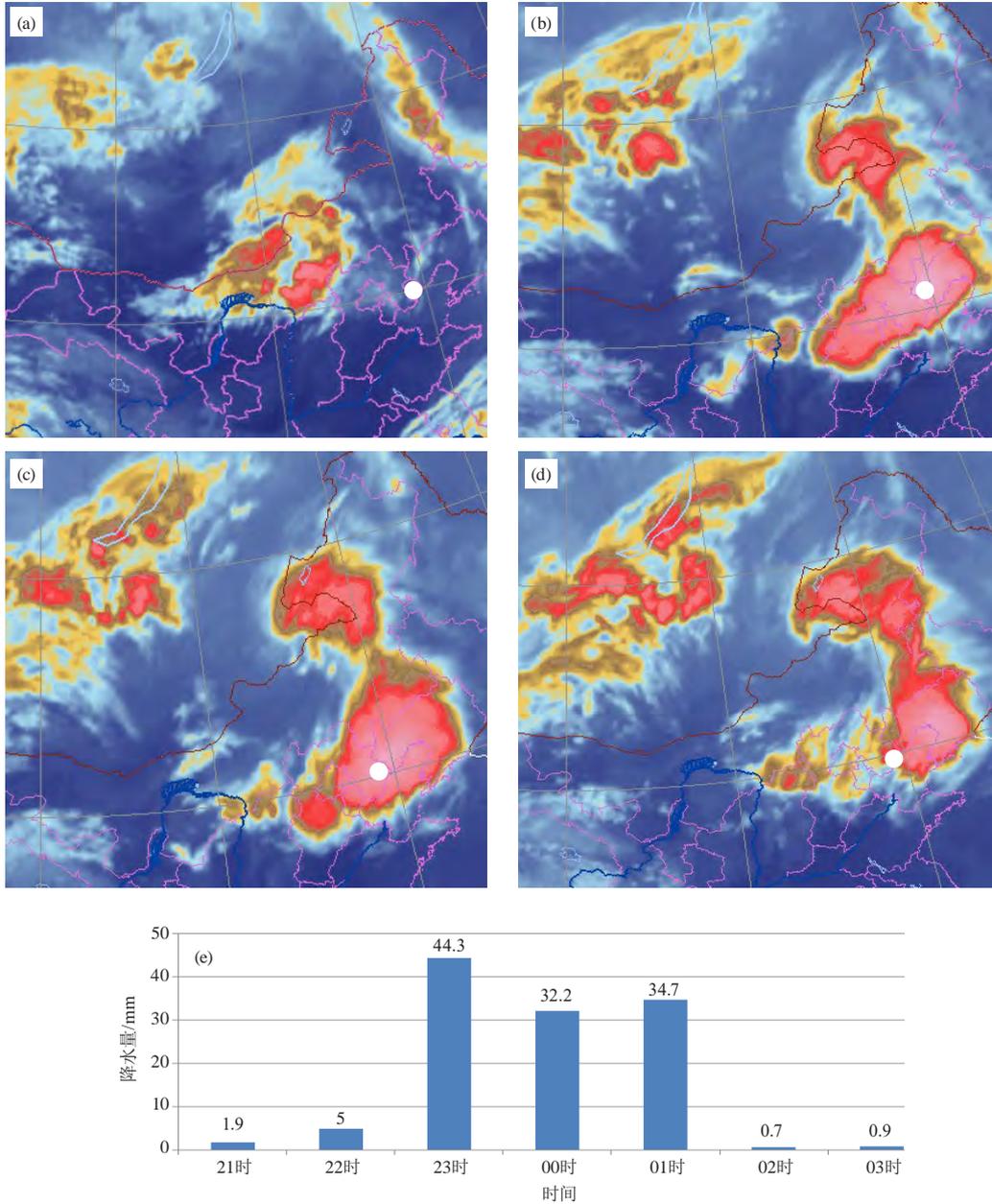


图3 2013年6月28—29日红外云图（其中白圆圈代表秦皇岛）：（a）28日08:30，（b）28日22:30，（c）29日00:30，（d）29日03:30和（e）青龙站逐小时降水量

Fig. 3 Infrared cloud image (a) 0830 BT on 28 June, (b) 2230 BT on 28 June, (c) 0030 BT on 29 June and (d) 0330 BT on 29 June 2013 and hourly precipitation (e) at Qinglong station (The white circle represents Qinhuangdao)

0 °C层高度为4.3 km，但由于中低层湿层深厚，且风切变小，不满足大风、冰雹等强对流天气的条件。

3.3 动力条件分析

从垂直速度剖面可以看出秦皇岛北部地区600 hPa以下为上升运动区，最大上升速度中心值为 $-40 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （图7a），对应散度场在300 hPa以下为辐合区（图7b），中心值为 $-16 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，高层为辐散区，中心值为 $24 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，正散度明显大

于负散度，说明高空急流抽吸作用明显，有利于降水增强。

4 数值预报产品检验分析

4.1 环流形势检验（T639模式/EC模式）

对比EC、T639模式500 hPa高度场预报稳定性（图8），可以看出：对东蒙冷涡系统，EC模式和T639模式各时效均预报出544 dagpm低涡中心，EC模式和T639模式24 h、48 h预报接近实况场，72 h预

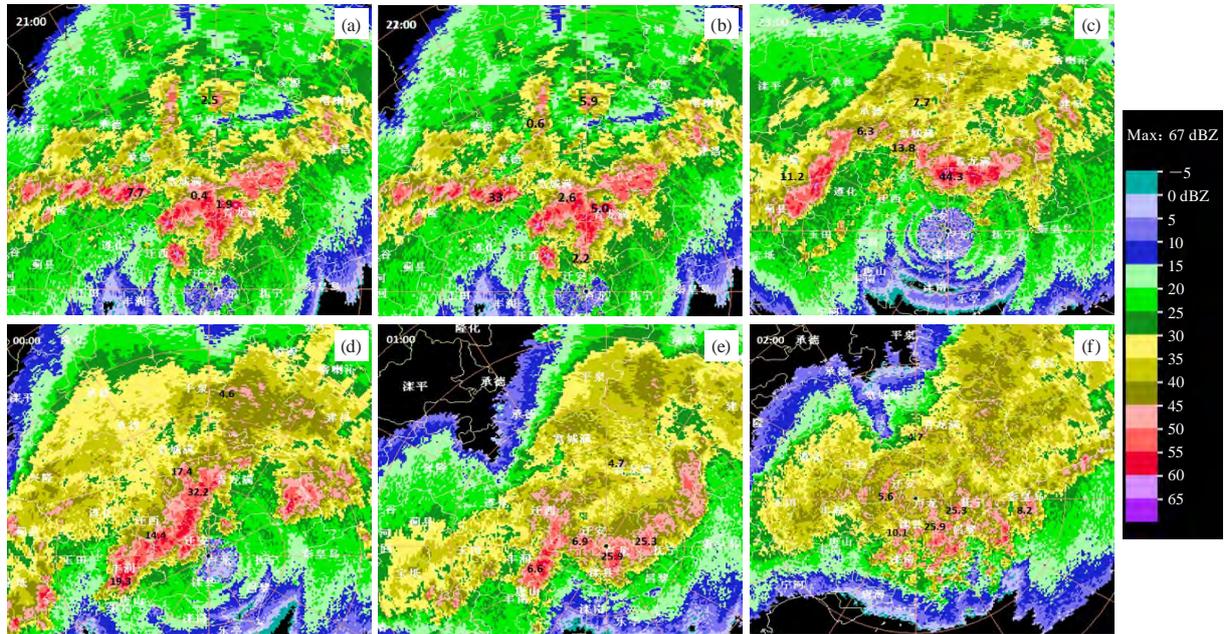


图4 2013年6月28日21时—29日02时组合反射率 (单位: dBZ) 与小时降水量 (单位: mm) 配置图

(a) 28日2100 BT; (b) 28日2200 BT; (c) 28日2300 BT; (d) 29日0000 BT; (e) 29日0100 BT; (f) 29日0200 BT

Fig. 4 Combined reflectance (unit: dBZ) and hourly precipitation (unit: mm) from 2100BST 28th to 0200BST 29th

(a) 2100BST on 28 June; (b) 2200BST on 28 June; (c) 2300BST on 28 June; (d) 0000BST on 29 June; (e) 0100BST on 29 June; (f) 0200BST on 29 June

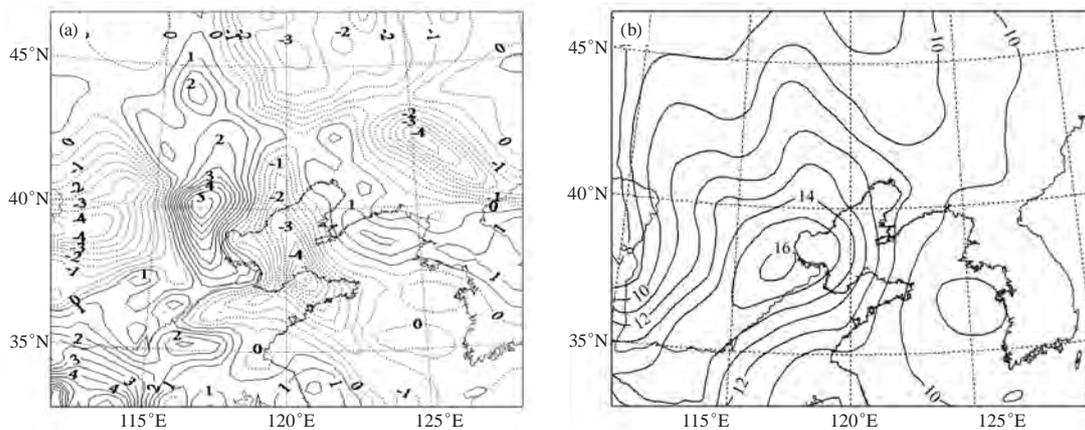


图5 2013年6月28日20时850 hPa (a) 水汽通量散度 (单位: $10^{-6} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 (b) 比湿场 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 5 Moisture flux divergence field (units: $10^{-6} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) and specific humidity (units: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) at 850 hPa at 2000 BT on 28 Jun 2013

报EC模式较实况场略偏强, T639模式较实况场略偏弱; 对副热带高压584 dagpm特征线时次的预报, EC模式的预报比较稳定, 跟实况基本一致, T639模式误差较大。对日本海阻塞高压T639模式各时效均预报偏弱, 且时效越长稳定性越差, EC模式各时效预报效果较好。

4.2 850 hPa 风场检验

对影响华北东北部的低空急流系统 (图9), 两家模式24 h时效预报的风速均较实况偏弱, 对850 hPa

切变线预报均偏弱、偏北, EC模式对秦皇岛北部的风向预报偏差较大。

4.3 降水强度及落区检验

对降水落区进行检验 (图10), 本次强降水过程, 各家数值预报对雨带的走向把握较好, 从预报量级上看, 均存在预报偏小的情况, 特别是对大暴雨的落区预报效果均不理想, 稳定性差。对华北地区东北部中雨以上量级的降水, 各家模式预报均偏北, 强度偏弱。各家指导产品强降水中心为大雨到暴雨, 比

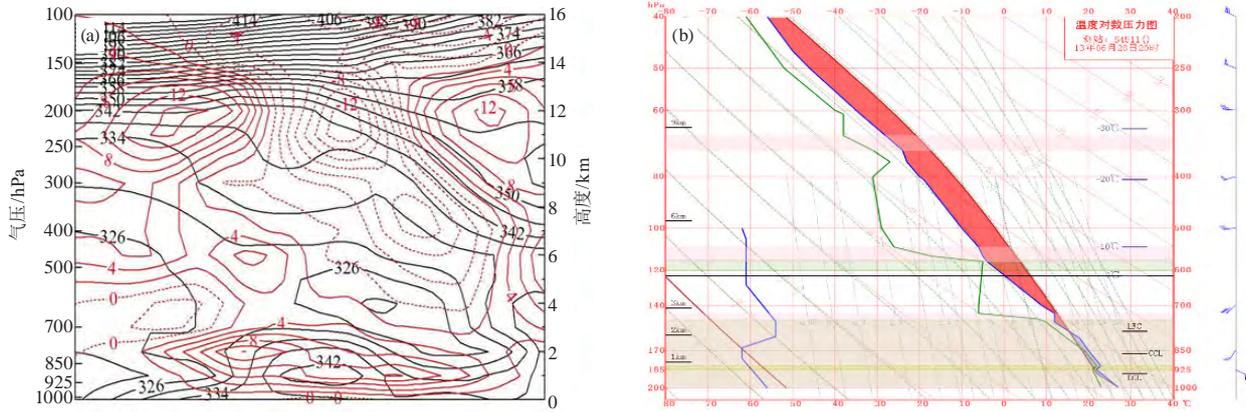


图6 2013年6月28日20时 (a) 相当位温沿119°E径向剖面 (单位: K) 叠加风速径向分量和 (b) 北京探空图 (黑色: 相当位温; 红色: 风速径向分量)

Fig. 6 The vertical cross-section of potential equivalent temperature (units: K) along 119°E with the radial component of the wind velocity (a) and sounding figure from Beijing station at 2000 BT on 28 June 2013 (b) (The black represents potential equivalent temperature; the red represents radial component of the wind velocity)

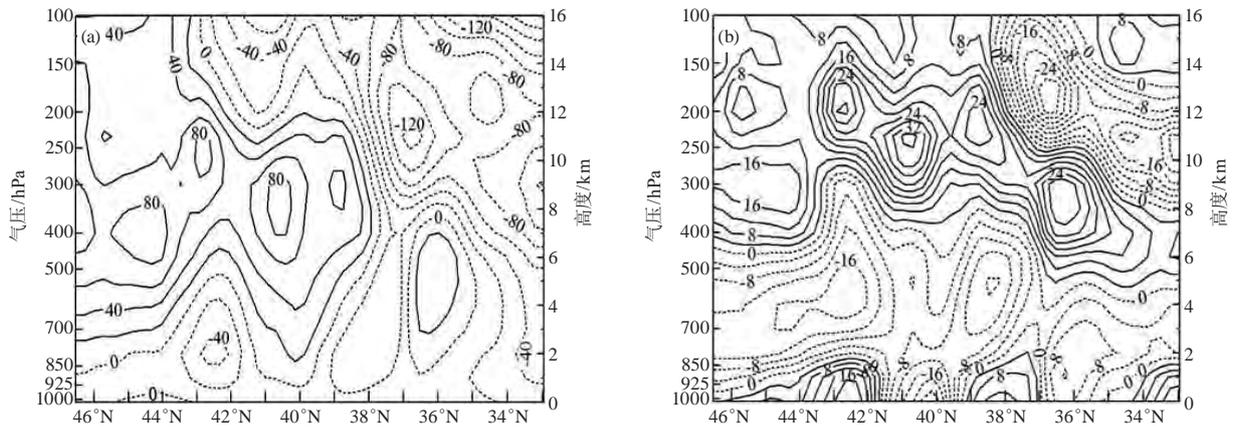


图7 2013年6月28日20时沿119°E径向剖面的 (a) 垂直速度 (单位: $m \cdot s^{-1}$) 和 (b) 散度 (单位: s^{-1})

Fig. 7 The vertical cross-section of vertical velocity (a, units: m/s) and divergence (b, units: s^{-1}) along 119°E at 2000 BT on 28 June 2013

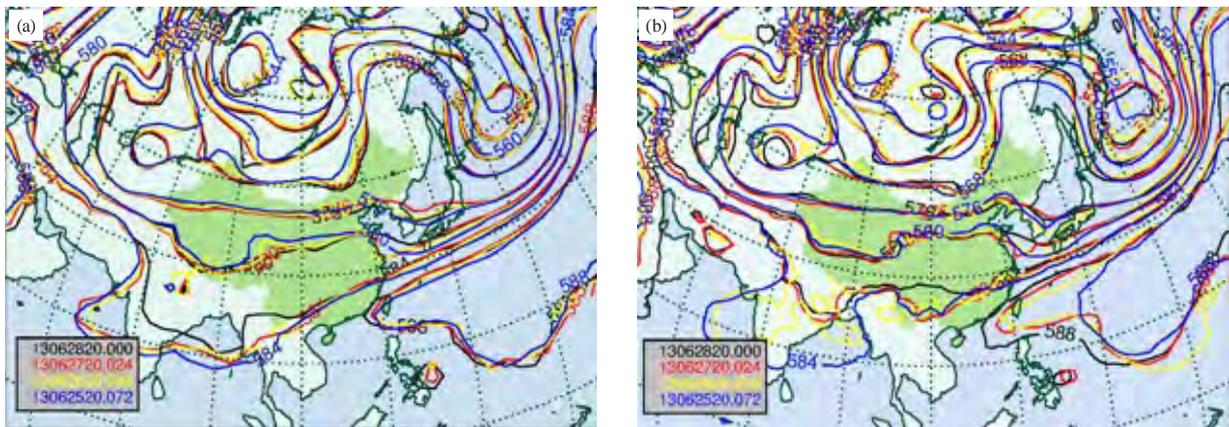


图8 2013年6月28日20时500 hPa高度实况场及对应24 h、48 h、72 h预报 (a) EC模式; (b) T639模式

(其中黑色为实况场, 红色表示24 h预报, 黄色表示48 h预报, 蓝色表示72 h预报)

Fig. 8 The actual field at 500 hPa and the corresponding forecasts at 24 h, 48 h and 72 h: (a) EC model; (b) T639 model (black: actual field, red: 24 h forecast, yellow: 48 h forecast, blue: 72 h forecast)

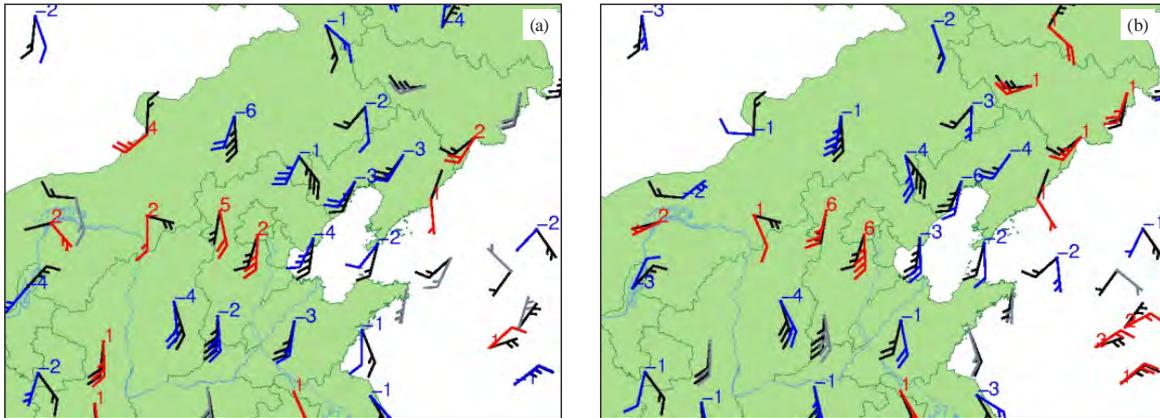


图9 2013年6月28日20时850 hPa风场实况及EC (a)、T639 (b) 模式24 h时效预报图
 (其中黑色表示观测值, 红色表示预报值大于观测值, 蓝色表示预报值小于观测值)
 Fig. 9 Wind field at 850 hPa and 24 h forecast from EC (a) and T639 (b) models (black: observed value, red: Larger than observed values, blue: Less than observed values)

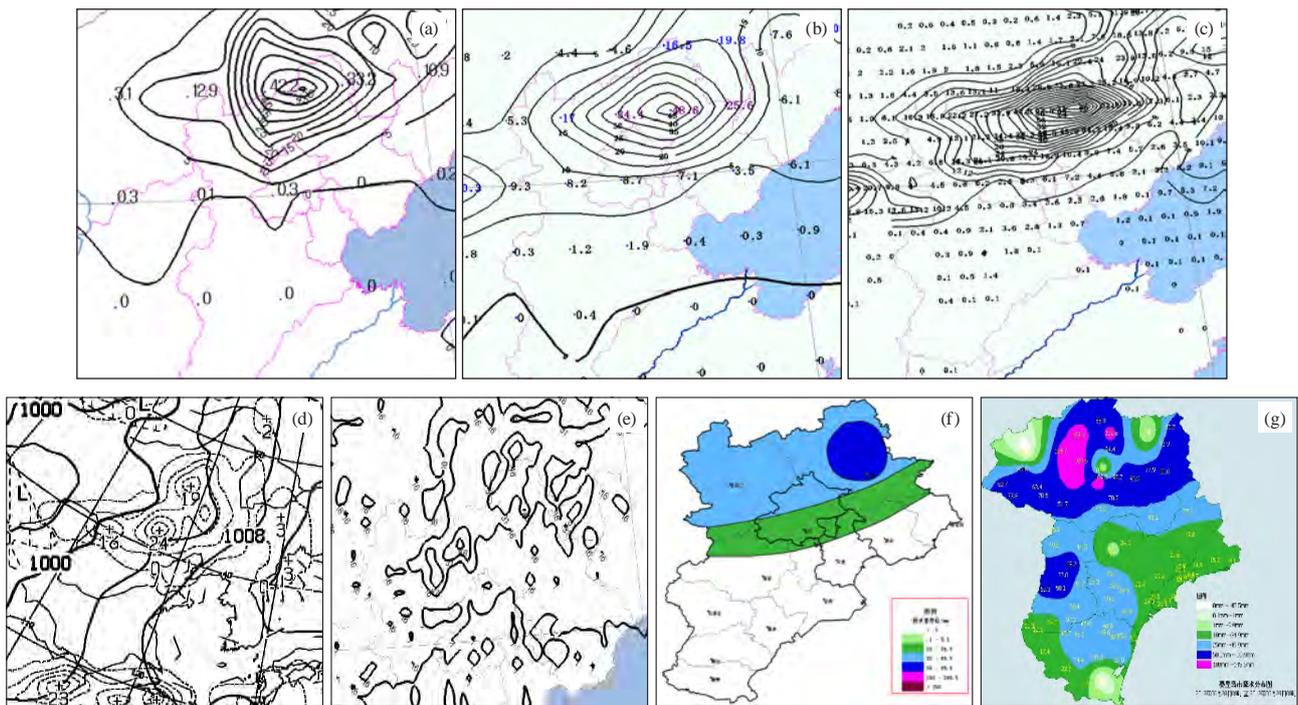


图10 2013年6月28日08时至6月29日08时累积降水量预报及实况 (单位: mm)
 (a) T639; (b) EC; (c) 日本细网格; (d) 日本传真图FAX; (e) GRAPES; (f) 省台预报; (g) 实况
 Fig. 10 Forecast and reality of cumulative precipitation (unit: mm) from 0800 BT on 28 June to 0800 BT on 29 June 2013
 (a) T639; (b) EC; (c) Jap-thin; (d) FAX; (e) GRAPES; (f) Provincial forecast; (g) Actual

较一致, 但强降水中心都偏北, 且未能体现出大于 100 mm 的大暴雨区域。T639 预报偏差较大, 量级为大雨并且中心在河北张家口一带, 偏差较大。日本细网格和省台指导预报对强降水落区偏差较小, 中心略偏北, 更接近实况。

上图的基本结论是: 各家预报均预报了一次大到暴雨过程 (即雨量在 25~50 mm), 只有省台综合预报为暴雨到大暴雨过程 (即雨量为 50~100 mm), 但

位置普遍偏北。总之各家模式对这次过程的预报能力基本相同。造成位置偏北的原因可能与大尺度流场的预报存在缺陷有关。

整体而言, EC 模式的预报对亚洲地区中高空环流预报的结果更为准确, 对弱高空槽系统预报偏差较大。日本细网格和省台指导预报对暴雨落区的预报偏差较小, 而降水极值预报需结合强对流工具、实况加密资料及时更新预报, 发布短临预报。

冷涡天气形势下,各种数值预报模式均预报有降水,且降水量级一致或相差不多时,考虑地形作用,秦皇岛北部山区降水量级可增加一个量级或稍大一些;当细网格预报有大雨,数值接近暴雨时,应考虑有暴雨或局地暴雨出现。

5 结论

(1) 本次暴雨过程是由于东蒙冷涡稳定少动,影响系统是高空低涡和高空槽,触发机制是切变线和中尺度风场辐合。强降水落区位于水汽通量大值区,600 hPa以下强上升运动区和850 hPa以下位势不稳定区域。

(2) 对500 hPa中高纬环流场、槽线进行检验,对东蒙冷涡预报T639和EC两模式预报都比较稳定,但对日本海阻高预报T639预报偏弱,且时效越长稳定性越差。EC模式对弱高空槽系统预报偏差较大,需重点关注。

(3) 降水强度和落区检验:各家数值模式预报产品对雨带走向把握较好,但对降水的强度把握均较实况偏弱、偏北。在降水量级上,日本细网格和省台指导预报偏差较小。

综上所述,检验结果由于其局限性并不能全面精确地评述每种模式的预报性能,只能从典型个例给相似天气过程的模式预报解释应用提供一个参考。

参考文献

[1] 高松影,孙连强.日本数值预报产品在丹东地区降水预报的检验和评估.气象,2006,32(6):79-84.
[2] 王雨.2002年主汛期国家气象中心主客观降水预报检验.气象,2003,29(5):21-25.
[3] 张晶,姚文,何晓东,等.营口地区数值预报降水产品定量检验和预报指标研究.气象与环境学报,2014,30(1):30-35.
[4] 项续康,江吉喜.我国南方地区的中尺度对流复合体.应用气象学报.1995,6(1):9-17.

[5] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析.大气科学,2004,28(3):330-341.
[6] 吴紫煜,姚雯,李超,等.京津冀地区中 α 尺度飑线过程中大风特征分析及成因初探.气象与环境科学,2016,39(2):90-98.
[7] 李改琴,吴丽敏,许庆娥,等.一次下击暴流天气特征分析.气象与环境科学,2016,39(3):60-67.
[8] 马月枝,苏爱芳,叶东,等.2014年7月14日新乡强对流过程成因分析.气象与环境科学,2017,40(1):54-63.
[9] 孟妙志.K指数在暴雨分析预报中的应用.气象,2003,29(8):1-2.
[10] 马鸿青,丁治英.河北中南部一次大暴雨个例的成因诊断.干旱气象,2009,27(3):254-262.
[11] 王金兰,陈红霞,段中夏,等.河南省一次致灾强对流天气的中尺度分析.气象与环境科学,2014,37(3):14-20.
[12] 李艳芳,程胜,吴彬.2012年4月2日华东灾害性飑线大风成因分析.气象与环境科学,2014,37(4):59-65.
[13] 王秀明,周小刚,俞小鼎.雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究.气象学报,2013,71(5):839-852.
[14] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等.山东省2006年4月28日飑线天气过程分析.气象,2007,33(1):74-80.
[15] 张琪.三门峡地区一次飑线天气成因及特征分析.气象与环境科学,2015,38(4):76-83.
[16] 苏爱芳,梁俊平,崔丽曼,等.豫北一次局地雹暴天气的预警特征和触发机制.气象与环境学报,2012,28(6):1-7.
[17] 孟英杰,吴洪宝,王丽,等.2007年主汛期武汉区域四种数值模式定量降水预报评估.暴雨灾害,2008,27(3):273-277.
[18] 赵晓琳.2012年12月至2013年2月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验.气象,2013,39(5):653-658.
[19] 肖明静,盛春岩,石春玲,等.2010年汛期多模式对山东降水预报的检验.气象与环境学报,2013,29(2):27-33.
[20] 肖明静,隋明,范苏丹,等.3种数值模式温度预报产品在山东应用的误差分析与订正.干旱气象,2012,30(3):472-477.
[21] 张国华,张江涛,张南,等.基于河北区域天气分型的多模式降水检验评估.气象,2011,37(8):968-976.
[22] 崔粉娥,王勇,李慧君.多家数值产品沿海大暴雨预报性能检验.气象科技,2013,41(4):696-702.
[23] 贾丽红,张慧岚,肖开提·多莱特,等.T639数值产品对影响新疆主要系统的预报检验评估.气象,2012,38(8):971-976.
[24] 陈超君,李俊,王明欢.2013年汛期华中区域业务数值模式降水预报检验.气象与环境学报,2015,31(2):1-8.
[25] 肖红茹,王灿伟,周秋雪,等.T639、ECMWF细网格模式对2012年5—8月四川盆地降水预报的天气学检验.高原山地气象研究,2013,33(1):80-85.
[26] 蔡梦宁.2012年9—11月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验.气象,2013,39(2):253-258.
[27] 程锦霞.2013年5月河南一次大暴雨成因分析及数值预报检验.气象与环境科学,2014,37(2):42-48.