

李江波,孔凡超,曾建刚,等,2019.河北省副热带高压外围降水的特征与预报[J].气象,45(11):1539-1549. Li J B, Kong F C, Zeng J G, et al, 2019. Characteristics and predictive focus of torrential rain along the outer boundary of west pacific subtropical high in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1539-1549(in Chinese).

河北省副热带高压外围降水的特征与预报^{*}

李江波 孔凡超 曾建刚 王玉虹 孙 卓

河北省气象台,石家庄 050021

提 要:应用高空、地面等常规观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料、京津冀降水量资料,对 2000—2013 年河北省 69 次副热带高压(以下简称副高)外围降水个例进行了综合分析,结果表明:(1)69 个副高外围降水个例雨量统计表明,暴雨和大暴雨发生频次自西北向东南明显增加,有三个区域较易出现暴雨和大暴雨:燕山南麓的唐山和秦皇岛、太行山东麓的邢台、河北平原东部的沧州和衡水。河北北部的坝上高原和保定西北部山区出现暴雨的概率较低。(2)按照副高型态,将 69 个副高外围暴雨过程分为三类,分别给出了每类的代表环流型和降水分布特征,并对这三种类型的环流背景场和物理量场进行了合成分析,给出了不同类型的环流特征和物理量特征。(3)统计了多个物理量及气象要素的平均值和极端值,统计结果可作为该类暴雨过程的量级、强度及极端性预报的重要参考指标。(4)在预报副高外围降水过程时,除了关注高空槽和副高的位置、强度、型态外,更要关注中低层及地面辐合系统。强降水多发生在 584 或 586 dagpm 等高线外围、低层 700 和 850 hPa 的低涡和切变线及地面倒槽或低压附近。

关键词:副热带高压外围,暴雨,分类,合成分析

中图分类号: P448

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.004

Characteristics and Predictive Focus of Torrential Rain Along the Outer Boundary of West Pacific Subtropical High in Hebei Province

LI Jiangbo KONG Fanchao ZENG Jiangang WANG Yuhong SUN Zhuo

Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

Abstract: Composite analyses of 69 torrential rain cases along the outer boundary of West Pacific subtropical high (WPSH) are carried out, based on the upper-level and surface observations, NCEP/NCAR reanalysis and the rainfall data of Beijing, Tianjin and Hebei Province. The results show that: (1) The frequency of torrential rain events increases obviously from the northwest to the southeast of Hebei Province, accompanied by three high-frequency areas, which are located in Qinhuangdao and Tangshan at the south foot of Yanshan Mountain, Xingtai at the east foot of Taihang Mountain and Cangzhou and Hengshui in Hebei Plain, respectively. There are two low-frequency areas, located in the mountains of the northwest of Baoding and the area in the north of Zhangjiakou and the north of Chengde respectively. (2) The 69 torrential rain cases can be divided into three groups according to the flow patterns of WPSH, which are called blocking, quasi-east-west banding and northeast-southwest banding WPSH, respectively. Some typical flow patterns at 500 hPa and the frequency of rainfall over 50 mm and 100 mm in each group are plotted by composite analysis, and spatial distributions of the elements including the atmospheric precipitable water vapor, CAPE, vertical velocity at 700 hPa, pseudo-equivalent potential temperature and K index etc.

^{*} 国家自然科学基金项目(41575049)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-007)和河北省强对流创新团队共同资助

2018 年 10 月 25 日收稿; 2019 年 9 月 18 日收修定稿

第一作者:李江波,主要从事短期天气预报、雾-霾研究. Email:ljbwave@aliyun.com

are given out. (3) Based on the statistics, the mean and extreme values of some physical quantities of the 69 torrential rain cases are counted, which can be considered as the important clues to forecast the amount and location of heavy rainfall, and to estimate the extremity of torrential rain in weather forecasting operation. (4) More attentions should be paid to the location and intensity of the middle/low-level convergence in addition to the location, intensity and flow pattern of WPSH and the upper trough in the operational forecasting of the torrential rain along the outer boundary of WPSH. Severe rainfalls are prone to occur in the areas along the 584 or 586 dagpm line at 500 hPa, the shear or the center of the vortex at 700/850 hPa, as well as the inverted trough or the center of the surface low pressure.

Key words: West Pacific subtropical high (WPSH), torrential rain, classification, composite analysis

引言

华北盛夏期暴雨中,西太平洋副热带高压(以下简称副高)外围暴雨是最为常见的一类,这类暴雨一般由副高与西来冷空气(常伴有西风槽、低涡、切变线等)相互作用造成。据统计,在北京地区,这类暴雨占该地区大降水的46%(刘还珠等,2007)。河北省气象台根据环流特征和影响系统,将河北暴雨分为5类:低槽冷锋类、低涡类、台风类、气旋类、切变线类(河北省气象局,1987),低槽冷锋类所占比例最多,副高与西来冷空气相互作用产生的暴雨也包含其中。

每年7—9月,伴随着副高的北跳和南退,华北进入雨季,尤以“七下八上”突出,华北历史上著名的极端暴雨过程如“63·8”“75·8”“96·8”“12·7”均出现在7月下旬到8月上旬,发生在三带系统(西风带、副热带、热带)相互作用的大尺度环流背景下(丁一汇等,1978;胡欣和马瑞隽,1998;边清河,2006;俞小鼎,2012;赵洋洋等,2013;孙建华等,2013),而直接的影响则是西风带冷空气与副高外围暖湿气流的相互作用。暴雨可发生在副高南撤东退的过程中(王欢,2007;李云等,2007;王莉萍,2004),也可发生在北抬西进过程中(杨学斌,2016;侯淑梅等,2017)。降水性质可能是对流性降水(王宗敏等,2014;孙军等,2013),也可能是稳定性降水,还可能是对流加稳定性的混合性降水(尤凤春等,1999)。

由于副高气团具有高温、高湿、高能特征,一旦有合适的抬升触发机制,便可产生较强降水,落区和强度具有明显的不均匀性(孙兴池等,2015)。在实际天气预报业务中,预报员常常把584或586 dagpm等高线作为副高外围的标志线,一般预报暴雨

发生在这两条等高线之间或附近,因此副高的形状、位置、强度对雨带的位置和强度起着重要作用。在华北暴雨中,一般根据副高的形状可分为块状副高和带状副高,它们所造成的雨带位置和强度有很大的不同。例如在2005年8月16日和2000年8月8—9日的华北东部大暴雨过程中,尽管副高呈块状,但位置不同,强降水中心也不同,分别位于天津和衡水。

由于三带系统相互作用的复杂性,导致副高的位置和强度存在不确定性,因此长期以来,副高外围降水落区和强度预报一直是暴雨预报中的难点。近些年,以欧洲气象中心为代表的数值天气预报已经取得了长足进步,准确率不断提高,然而在盛汛期,对副高强度和位置的预报仍有较大误差,从而导致副高外围雨带预报的失误。因此如何更好地应用和订正数值预报,是目前预报员面临的主要问题,而详细地总结和分析本地不同地形下、不同系统造成降水的规律和特征,可以合理地对数值预报进行订正。本文将对2000—2013年河北省(包括京津)69次副高外围暴雨过程进行分析,研究副高外围降水的特征和规律,建立天气概念模型,总结预报着眼点,以期更好地订正数值预报产品,提高副高外围暴雨预报准确率。

1 资料和分析方法

1.1 资料说明

所用资料包括:(1)2000—2013年河北及京津178个气象观测站08时至次日08时降水量资料;(2)2000—2013年常规地面、高空观测资料;(3)2000—2013年NCAR/NCEP($1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料。

1.2 分析方法

1.2.1 副高外围暴雨过程个例选择标准

根据京津冀 178 站逐日 08 时至次日 08 时降水量,有 5 个站及以上出现暴雨(≥ 50 mm),记为一次暴雨过程,如果在暴雨日 500 hPa 天气图上,584 dagpm 等高线位于 36°N 及以北,就认为该过程受副高影响,是一次副高外围降水过程。以此为标准,研究挑选了 2000—2013 年 69 次暴雨过程(表略)。

1.2.2 副高型态分类标准

以 588 dagpm 等高线所围区域型态分为三类:块状副高、准东西带状副高、东北—西南向带状副高。在 69 个个例中,块状副高个例 16 个,准东西带状副高个例 40 个,东北—西南向带状副高个例 13 个(表略)。

1.2.3 物理量合成分析

本文 69 个副高外围暴雨个例根据当日 08 时至

次日 08 时降水量选取,大部分个例的降水主要出现在当日午后到夜间,因此在做合成分析时,选取 08 时 NCEP/NCAR($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)再分析资料对相关物理量场做平均。

2 河北省副高外围暴雨统计特征

从 69 个副高外围暴雨个例看,此类暴雨过程最早出现在 7 月 1 日,最晚发生在 9 月 17 日。24 h 暴雨站数出现最多的过程是 2011 年 7 月 29—30 日,河北省有 62 个站点超过 50 mm(河北省总站数 142 个);24 h 大暴雨站数出现最多的过程是 2012 年 7 月 21—22 日,有 22 个站点超过 100 mm,最大降水量达到 364 mm,这也是 2000—2013 年河北省气象观测站 24 h 降水极值。

图 1 给出了 69 次副高外围暴雨过程降水量统计情况,图 1a 和 1b 分别为 24 h 降雨量在 50 和

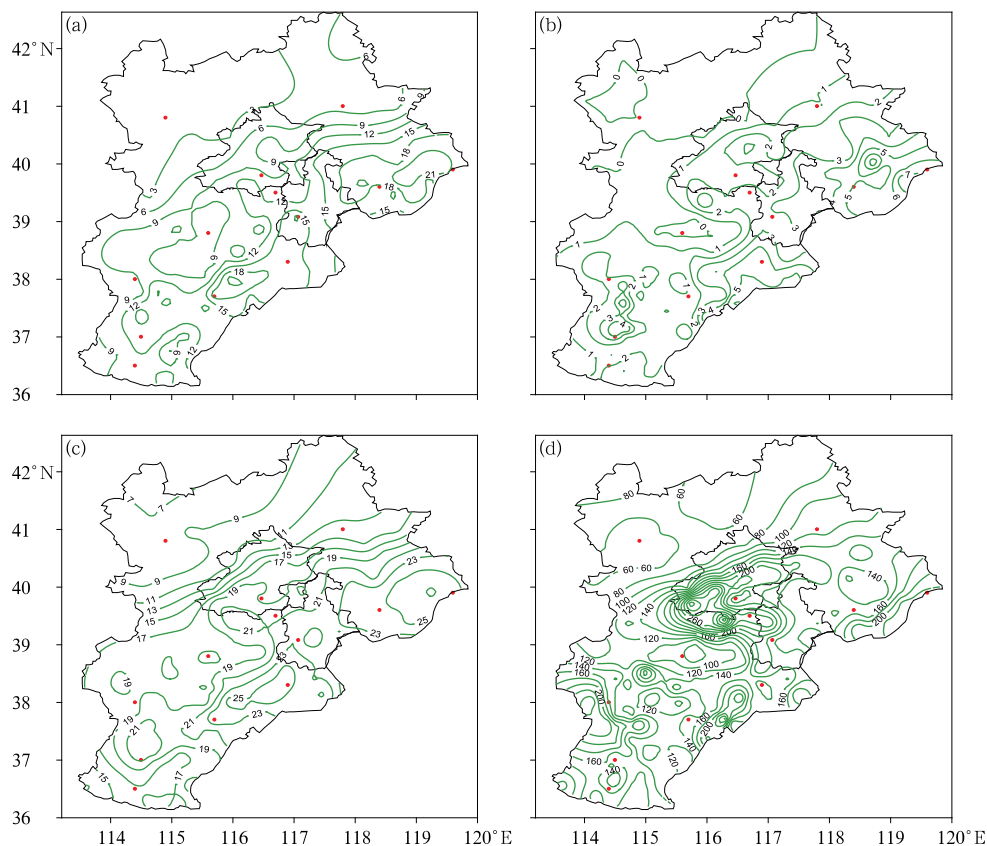


图 1 69 个暴雨过程雨量统计

(a) 24 h 降水量 ≥ 50 mm 和 (b) ≥ 100 mm 站次空间分布(单位:次),

(c) 平均和 (d) 极端降水量分布(单位:mm)

Fig. 1 Spatial distribution of some statistical quantities from the 69 torrential rain cases

(a) frequency of rainfall over 50 mm, (b) frequency of rainfall over 100 mm,

(c) mean rainfall, and (d) extreme rainfall (unit: mm)

100 mm 以上的站次空间分布,可以看出,暴雨和大暴雨发生频次自西北向东南明显增加,有三个区域较易出现暴雨和大暴雨:频次出现最高的是燕山南麓的唐山和秦皇岛,其次是河北平原东部的衡水和沧州,第三个是太行山东麓的邢台。69 次暴雨过程中就暴雨发生频次而言,张家口、保定西北部仅为 1~3 次,而东北部的唐山、秦皇岛及东部的衡水则达 18~24 次,滦县、抚宁达 24 次(图 1a)。从大暴雨发生频次看,张家口、承德北部、保定西北部没有大暴雨出现,而在东北部、东部达 5~8 次,秦皇岛的昌黎出现次数最多,达 8 次(图 1b)。69 次副高外围暴雨过程的平均降水量分布也呈西北少,东部、东北部多的规律,平均雨量为 7~27 mm(图 1c)。从 69 次过程的极端降水量看(图 1d),高值区有四个:北京西部、保定北部及廊坊,秦皇岛东部、唐山南部,石家庄、邢台西部,沧州、衡水东部;24 h 最大降水量出现在固安,为 364 mm,发生在 2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 08 时。

3 河北副高外围暴雨的天气尺度成因浅析

上文分析了 69 个副高外围暴雨过程的雨量统计特征:强降水高发区位于河北东部,呈东北—西南向带状分布(图 1a~1c)。那么是什么导致雨带呈此类分布?下文将从天气尺度进行初步分析。

图 2 给出了 69 次副高外围暴雨过程的高空高度场、风场、温度场及海平面气压场的合成分析。从 200 hPa 高空形势看(图 2a),华北中纬度地区上空

风场上出现分流型辐散场,河北东部、东北部及山东西北部处于高空急流轴出口区右侧,高层辐散作用明显。从 500 hPa 合形势场可以看出(图 2b),高空槽位于 110°E,槽前西南气流强盛,副高位于日本海到朝鲜半岛上,河北东部、东北部处于 584 dagpm 等高线外围,西风带冷空气和副高外围暖湿气流在河北相遇,为典型的低槽冷锋类暴雨形势(河北省气象局,1987);从海平面气压场的合成分析看出(图 2c),河北东北部及东部受西南—东北走向的低压倒槽控制,辐合条件较好,常存在弱冷锋和地面辐合线,成为不稳定能量释放的抬升触发机制,恰好这一区域是暴雨到大暴雨的高发区(图 1a 和 1b)。低空急流对暴雨发生具有重要作用,从 700 和 850 hPa 的风场合成可以看出(图略),沿冀鲁交界,有一大的强西南风风速带,其左侧即为河北东部的东北—西南向的强降水区。可见,从大尺度环流系统看,河北省副高外围降水发生在 200 hPa 分流辐散区、500 hPa 的 584 dagpm 等高线附近、地面低压倒槽中。

4 三类副高外围降水 500 hPa 流型及降水特征

为了更加详细地分析副高外围降水特征及分布规律,结合预报实践依据副高型态将此类过程分成三种类型:块状副高类、东西向带状副高类、东北—西南向带状副高类,分别给出 500 hPa 代表性环流型及降水分布特征。

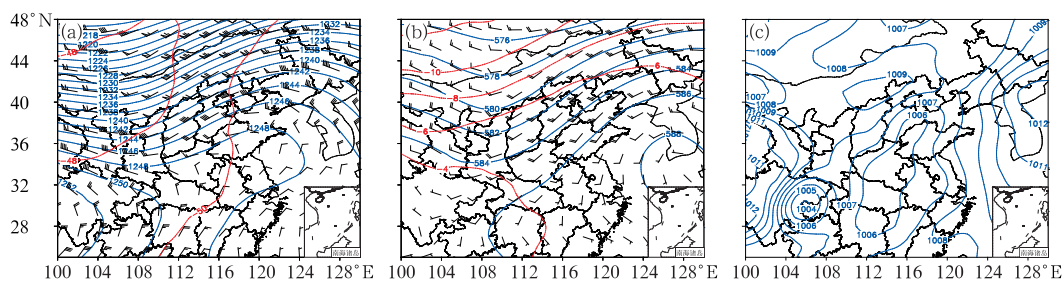


图 2 69 个副高外围暴雨过程环流背景场合成分析

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 海平面气压(单位: hPa)

(图 2a 和 2b 中, 蓝线: 等高线, 单位: dagpm; 红线: 等温线, 单位: °C)

Fig. 2 Composite analysis of synoptic circulations of the 69 torrential rain cases

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) sea level pressure (unit: hPa)

(In Figs. 2a and 2b, blue lines: geopotential height, unit: dagpm; red lines: temperature, unit: °C)

4.1 块状副高类

在 69 个副高外围暴雨个例中,此类暴雨有 16 例。该类暴雨大多发生在经向型环流背景下,暴雨开始前,副高呈块状,位于黄渤海(图 3a),或位于黄河以南的我国东部地区(图 3b),或位于我国东海(图 3c),高压中心多位于海上,584 dagpm 线控制河北中部以北地区,西来槽于河套地区东移加深,槽前偏南气流强盛,中低层 700、850 hPa 配有低涡或切变线,地面或有冷锋,或为低压(倒槽),或为台风倒槽。强降水绝大多数发生在西风槽东移、副高东退过程中,在 16 个暴雨个例中,只有 1 例发生在副高西进过程中。

对于块状副高类的暴雨过程,雨量合成分析表

明(图 4),最易出现强降水的区域有两个:一个位于中北部,即保定东北部、廊坊南部、北京西部、天津北部、承德南部、秦皇岛北部,在 16 次暴雨过程中,该区域出现 50 mm 以上降水次数达 4~6 次,承德兴隆县最多,为 6 次,而出现 100 mm 以上降水为 1~2 次;另一个中心位于河北南部的邢台东部、邯郸北部,该区域出现 50 mm 以上降水次数达 4~8 次,鸡泽最多,为 8 次,而出现 100 mm 以上降水为 2~3 次,邢台最多,为 3 次。16 个个例的平均降水量全省为 1~35 mm,中部和南部的两个降水中心平均降水量为 25~35 mm(图略)。从 24 h 降水量极值看,中部的保定、廊坊、北京西部最大,为 200~300 mm,固安最大达 364 mm(图略),发生在 2012 年 7 月 21—22 日。

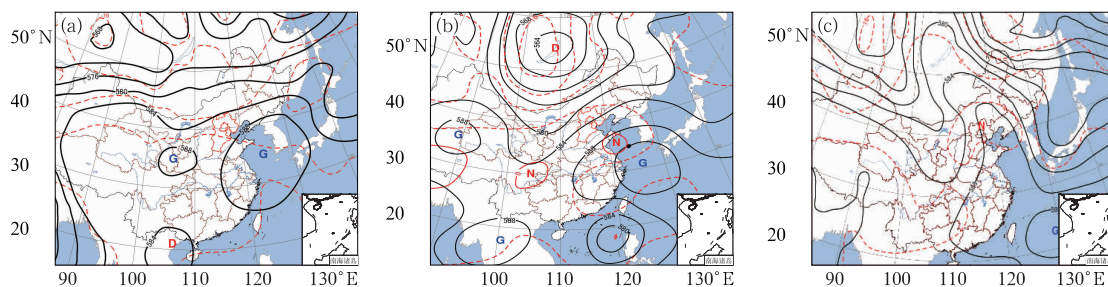


图 3 16 个块状副高类暴雨过程 500 hPa 典型环流型

(a)2005 年 7 月 23 日 08 时,(b)2007 年 7 月 30 日 08 时,(c)2012 年 7 月 21 日 08 时

(实线:位势高度,单位:dagpm;虚线:温度,单位:°C)

Fig. 3 Typical flow patterns at 500 hPa from 16 blocking WPSH cases

(a) 08:00 BT 23 July 2005, (b) 08:00 BT 30 July 2007, (c) 08:00 BT 21 July 2012

(solid lines: geopotential height, unit: dagpm; dot lines: temperature, unit: °C)

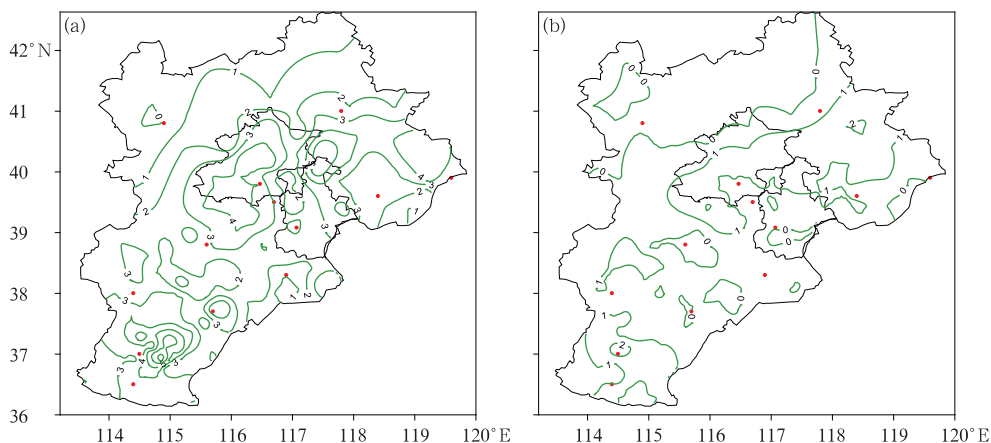


图 4 16 个块状副高类暴雨过程 ≥ 50 mm(a)和 ≥ 100 mm(b)站次空间分布(单位:次)

Fig. 4 Spatial distribution of frequencies of the rainfall over (a) 50 mm,

(b) 100 mm from 16 blocking WPSH cases

4.2 准东西向带状副高类

在 69 个副高外围暴雨个例中,准东西向带状副高类暴雨所占比例最大,有 40 例。该类暴雨大多发生在纬向型环流背景下,500 hPa 多短波槽活动,暴雨开始前,副高呈准东西带状分布,位于黄河以南的我国东部地区(图 5),高压中心多位于海上,584 dagpm 等高线控制河北中南部,短波槽前为西南气流,中低层 700 和 850 hPa 配有低涡或切变线,地面有冷锋,或为低压倒槽,或为中尺度辐合线。强降水均发生在西风槽东移、副高南撤过程中。

对于准东西向带状副高类的暴雨过程,雨量合

成分析表明(图 6),暴雨多发区位于河北东部东北部(包括天津),呈东北—西南向带状分布,在 40 次暴雨过程中,该区域出现 50 mm 以上降水次数达 6~16 次,其中衡水、沧州南部地区达 8~16 次,衡水武强县最多,为 16 次(图 6a);而出现 100 mm 以上降水为 2~5 次,沧州南部的东光县最多,为 5 次(图 6b)。40 个个例的全省平均降水量为 4~35 mm,唐山南部、沧州南部两个强降水中心平均降水量为 25~35 mm(图略)。从 40 次暴雨过程的 24 h 降水量极值看,唐山南部、秦皇岛南部、沧州南部、衡水的东部为 200~270 mm,衡水的景县最大,达 278 mm(图略)。

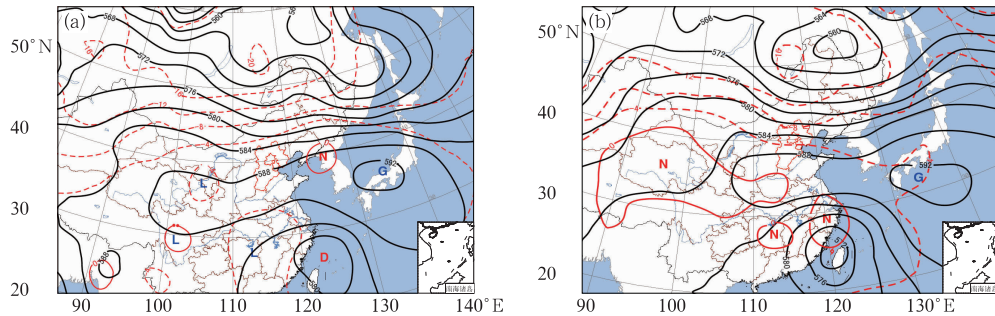


图 5 40 个准东西带状副高类暴雨过程 500 hPa 典型环流型

(a)2004 年 8 月 12 日 08 时,(b)2006 年 7 月 14 日 08 时

(实线:位势高度,单位:dagpm;虚线:温度,单位:℃)

Fig. 5 Typical flow patterns at 500 hPa from 40 quasi-east-west banding WPSH cases

(a) 08:00 BT 12 August 2004, (b) 08:00 BT 14 July 2006

(solid lines: geopotential height, unit: dagpm; dashed lines: temperature, unit: ℃)

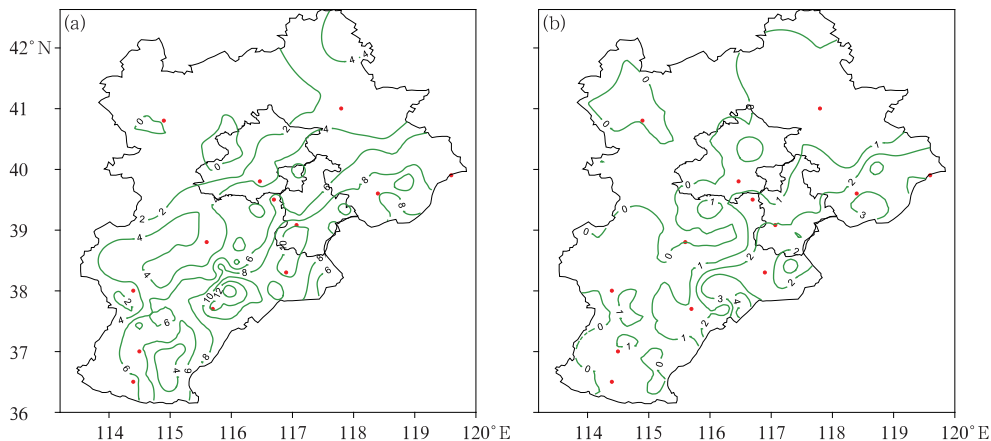


图 6 同图 4, 但为 40 个准东西带状副高类

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for 40 quasi-east-west banding WPSH cases

4.3 东北—西南向带状副高类

在 69 个副高外围暴雨个例中,此类暴雨所占比例最小,有 13 例。该类暴雨大多发生在经向型环流背景下,500 hPa 为两高对峙型(朱乾根等,2007),副热带高压呈东北—西南向带状分布,位于黄河以南的我国东部地区(图 7a),或位于黄渤海(图 7b),高压中心多位于海上,584 dagpm 等高线位于河北中东部,高空槽位于河套及以西地区,槽前西南气流强盛,中低层 700 和 850 hPa 配有低涡或切变线,地面或有冷锋,或为低压倒槽,或为中尺度辐合线。在 13 例中,有 12 例强降水均发生在西风槽东移、副高东退过程中。

对于东北—西南向带状副高类的暴雨过程,最易出现强降水的区域有两个(图 8),一个位于东北

部,即唐山东部、秦皇岛南部,在 13 次暴雨过程中,该区域出现 50 mm 以上降水次数达 4~6 次,秦皇岛和乐亭县最多,达 6 次(图 8a),而出现 100 mm 以上降水为 1~3 次,昌黎最多,为 3 次(图 8b);另一个中心位于沧州东部,该区域出现 50 mm 以上降水次数达 4~6 次,南皮最多,为 6 次(图 8a),而出现 100 mm 以上降水为 1~2 次,盐山、吴桥 2 次(图 8b)。13 个个例的平均降水量全省为 10~40 mm,上述两个降水中心平均降水量分别为 25~30 和 35~40 mm(图略)。从 24 h 降水量极值看,东北部的唐山、秦皇岛最大降水量为 120~162 mm,其中秦皇岛最大达 162 mm(图略),发生在 2010 年 8 月 4—5 日。

以上给出了三类副高外围降水的 500 hPa 代表性环流型及相应降水分布规律。就块状副高类而

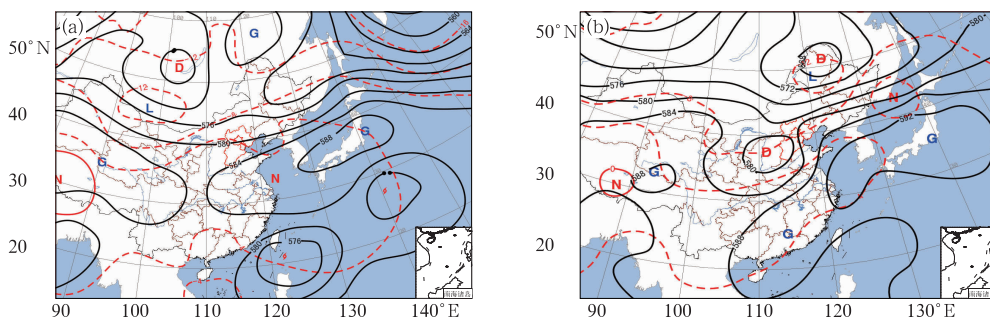


图 7 13 个东北—西南向带状副高类暴雨过程 500 hPa 典型环流型

(a)2012 年 8 月 31 日 08 时,(b)2010 年 7 月 19 日 08 时

(实线:位势高度,单位:dagpm;虚线:温度,单位:℃)

Fig. 7 Typical flow patterns at 500 hPa from 13 northeast-southwest banding WPSH cases

(a) 08:00 BT 31 August 2012, (b) 08:00 BT 19 July 2010

(solid lines: geopotential height, unit: dagpm; dashed lines: temperature, unit: ℃)

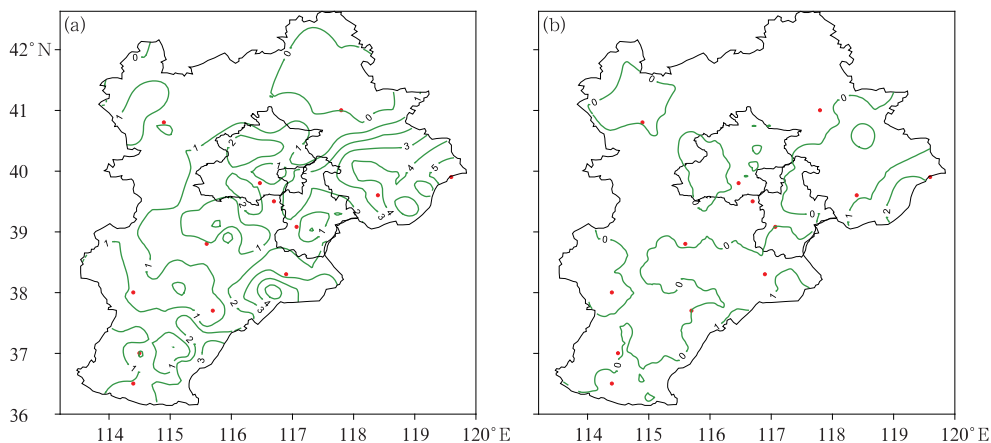


图 8 同图 4, 但为 13 个东北—西南向带状副高类

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for 13 northeast-southwest banding WPSH cases

言,最容易出现强降水的区域在北京、保定北部、承德南部一带;对于准东西带状副高类来说,最容易出现暴雨的区域位于河北东部的沧州;而东北—西南向带状副高类的强降水区域位于河北东北部的唐山、秦皇岛。

5 三类副高外围暴雨的物理量场合成分析

5.1 水汽场

分别对三类副高外围暴雨的水汽场进行了合成分析,包括大气可降水量场、比湿场、露点温度场、水汽通量散度场。图 9 为大气可降水量场的合成分析,尽管三类副高外围暴雨的大气可降水量平均值差异不大,但其空间分布还是有区别的。对于块状副高而言(图 9a),其等值线密集带明显比另外两类偏北,高值轴近似南北向,位于邢台—保定—北京一带,对应大气可降水量为 $52 \sim 54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,和该类暴雨易发区相对一致(图 4)。就准东西带状副高类来看(图 9b),大气可降水量的高值区位于河北中南部,其高值轴(湿舌)近似东西向,对应数值为 $50 \sim$

$58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,和该类暴雨的易发区沧州、衡水对应(图 6)。对东北—西南向带状副高类暴雨而言(图 9c),大气可降水量的高值区沿冀鲁交界自西南向东北伸展,河北东部的衡水到东北部的秦皇岛受东北—西南向湿舌控制,对应数值为 $50 \sim 56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,基本和该类暴雨的易发区相对应(图 8)。三类副高外围暴雨的 700 hPa 比湿场(图略)、850 hPa 露点温度场(图略)、850 hPa 水汽通量散度场(图略)具有相似分布特征。700 hPa 平均比湿场湿舌控制范围对应数值为 $7 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;850 hPa 平均露点温度高值轴在 $12 \sim 16^\circ\text{C}$,而 850 hPa 水汽通量散度场的相应辐合区平均为 $-2 \times 10^{-7} \sim -1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5.2 动力场

从高层 200 hPa 散度场看出,三类暴雨过程华北地区均为辐散场,散度值在 $0.4 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略),中心值位于河北中北部;在低层 850 hPa,河北南部、东部及东北部为辐合区,散度值为 $-0.6 \times 10^{-5} \sim -0.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略),高层辐散低层辐合,产生强烈抽吸作用,有利于垂直上升速度维持,产生强降水天气。图 10 给出了三类副高外

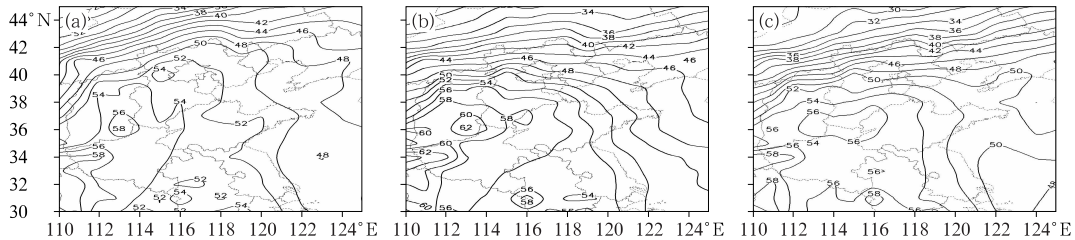


图 9 三类副高外围暴雨大气可降水量合成分析(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

(a) 块状副高类, (b) 准东西带状副高类, (c) 东北—西南向带状副高类

Fig. 9 Composite analysis of atmospheric precipitable water vapor (PWV) (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

(a) blocking WPSH, (b) quasi-east-west WPSH, (c) northeast-southwest WPSH

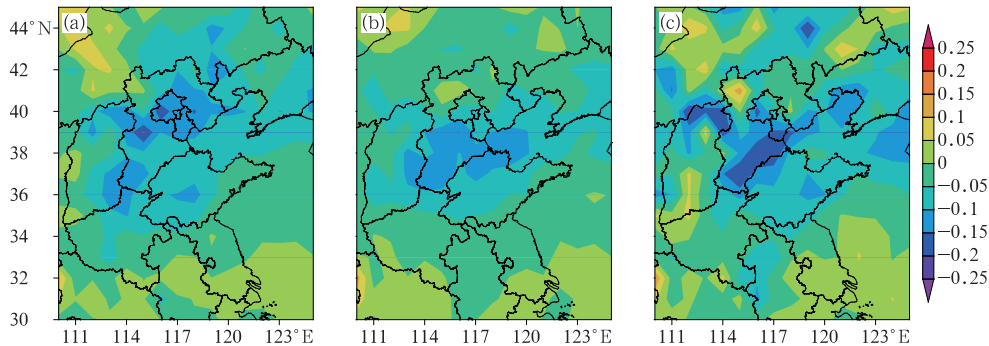


图 10 同图 9, 但为 700 hPa 垂直速度场合成分析(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for vertical velocity at 700 hPa (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

围暴雨的 700 hPa 垂直速度场的合成分析,对于块状副高类,在保定、北京附近上升速度最大,达到 $-0.2 \sim -0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 10a),正是该类暴雨出现最高频率的地方(图 4)。对于准东西向带状副高类和东北—西南向带状类,辐合上升区分别位于河北中南部(图 10b)和东部东北部(图 10c),对应这两类暴雨的高发区(图 6,图 8),上升速度高值区分别达到 -0.15 和 $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

涡度场合成分析:三类暴雨过程均表现为在东部、东北部的强降水区,涡度从低层到高层减少,从 850 和 700 hPa 的 $0.2 \times 10^{-5} \sim 2.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,减小到 500 和 200 hPa 的 $-4.2 \times 10^{-5} \sim -1.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略)。

5.3 能量场

分析三类副高外围暴雨过程的假相当位温平均场,可以看出,从低层到高层在河北中南部有一高能舌存在,且高能舌从低层到高层自东南向西北倾斜。这种自低层到高层一致的高温高湿分布,给这一区域暴雨的发生提供了充足的能量条件。这点和强对流天气过程假相当位温的垂直分布有着明显的不同,即 500 hPa 低能区叠加在 850 hPa 高能区之上(李江波等,2011)。对块状副高类而言(图 11a),850 hPa 高能舌呈南北向,自河北南部伸向北京,假相当位温在 $338 \sim 342 \text{ K}$;而另外两类带状副高,850 hPa 假相当位温高能舌呈东北—西南向,位于冀鲁交界处,数值在 $338 \sim 346 \text{ K}$ (图略)。

从对流有效位能(CAPE)的合成分析看,三类副高外围暴雨过程的 CAPE 值都比较小,并且和暴

雨高发区没有明显的对应关系,CAPE 值在 $200 \sim 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 11b),说明副高外围的区域性暴雨发生不一定需要较高的 CAPE,这一点和大部分强对流天气有较高的 CAPE 值有所不同。

5.4 稳定度

从 K 指数的合成分析看(图 11c),三类暴雨过程较相似,暴雨区的平均 K 指数在 $30 \sim 34^\circ\text{C}$,高于冰雹和雷暴大风等强对流天气发生的平均数(李江波等,2011)。850 和 500 hPa 平均温差在 $23 \sim 25^\circ\text{C}$ (图略),说明区域性暴雨的温度垂直递减率要明显小于冰雹和雷暴大风等强对流天气的平均值。

5.5 物理量均值及极大值统计

以上分别对三类副高外围的暴雨过程进行了合成分析,探讨了各种相关物理量空间分布状况与暴雨落区的关系。下文给出河北范围内副高外围 69 个暴雨过程相关物理量的平均值和极大值的统计情况(表 1),可作为副高外围暴雨预报的参考。

6 结论与讨论

应用 NCEP/NCAR 再分析资料、常规观测资料、京津冀降水量资料对 2000 年以后,69 个西风带冷空气与副高外围暖湿气流相互作用的降水个例进行了综合分析,总结了这类天气的特征和降水分布规律,同时根据副高型态,将这类天气分成三种类型,对这三类天气的环流背景场和物理量场进行了合成分析,结果表明:

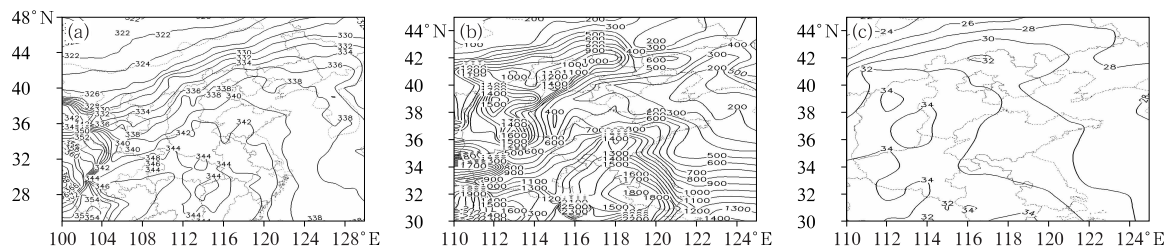


图 11 16 个块状副高类暴雨过程合成分析

(a)假相当位温(单位:K), (b)CAPE(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c)K 指数(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 11 Spatial distributions of (a) pseudo-equivalent potential temperature (unit: K),

(b) CAPE (unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and (c) K index (unit: $^\circ\text{C}$) from 16 blocking

WPSH cases by composite analysis

表 1 副高外围降水过程物理量平均及极值统计(69 个个例)

Table 1 The mean and maximum values of some physical quantities of 69 torrential rain cases		
物理量	平均值	极大值
700 hPa 比湿/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	7~9	11~13
850 hPa 比湿/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	9~13	13~18
大气可降水量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	40~56	64~82
850 hPa 露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	9~16	16~20
700 hPa 露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	2~6	8~12
850 hPa 水汽通量散度/ $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	-2~-1	-4~-2
850 hPa 假相当位温	330~346 K(57~73 $^{\circ}\text{C}$)	344~366 K(71~93 $^{\circ}\text{C}$)
K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	28~34	38~42
CAPE/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	200~1400	2000~5000
200 hPa 散度/ 10^{-5} s^{-1}	0.6~1.2	6~13
850 hPa 散度/ 10^{-5} s^{-1}	-0.2~-0.6	-12~-4
500 hPa 涡度/ 10^{-5} s^{-1}	-0.4~-0.4	7~13
700 hPa 涡度/ 10^{-5} s^{-1}	0.4~1.6	8~16
850 hPa 涡度/ 10^{-5} s^{-1}	1.2~2.4	6~21
700 hPa 垂直速度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	-0.1~-0.2	-3.6~-0.8
850 hPa 垂直速度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	-0.2~-0.05	-0.8
地面露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	20~24	26~29

(1) 69 个西风带冷空气与副高外围暖湿气流相互作用的降水个例雨量统计表明,暴雨和大暴雨发生频次自西北向东南明显增加,有三个区域较易出现暴雨和大暴雨:燕山南麓的唐山和秦皇岛、太行山东麓的邢台、河北平原东部的衡水、坝上及保定西北部山区出现暴雨的概率极低。

(2) 按照副高型态,将这类暴雨分为三类:块状副高类、准东西带状副高类、东北—西南向副高类,其降水分布特征有所不同:块状副高类最易出现强降水的区域有两个,一个位于中北部,即保定东北部、廊坊南部、北京西部、天津北部、承德南部、秦皇岛北部,另一个中心位于河北南部的邢台东部,该类最容易出现大范围较强暴雨到大暴雨过程;准东西向带状副高类的暴雨多发区位于河北东部、东北部(包括天津),呈东北—西南向带状分布,衡水、沧州南部地区最多;东北—西南向带状副高类最易出现强降水的区域有两个,一个位于东北部,即唐山东部、秦皇岛南部,另一个区域位于沧州东部。

(3) 分别对三类副高外围暴雨过程的环流背景场和物理量场进行了合成分析,统计了三类暴雨过程的相关物理量的平均值和极大值,可作为副高外围暴雨强度、量级及落区预报重要参考。

(4) 在预报西风带冷空气与副高相互作用的降水过程时,除了关注西风槽和副高的位置、强度、型态外,更要关注中低层及地面辐合系统,强降水一般发生在副高外围 584~586 dagpm 线之间或附近,

低层 700 和 850 hPa 的低涡和切变线系统及地面倒槽和低压系统附近。

鉴于三带系统(西风带、副热带、热带)相互作用的复杂性,本文主要从天气尺度对河北省副高外围暴雨过程进行了初步分析和总结,这对于副高外围区域性暴雨的预报,具有一定的指导意义。同时,在应用数值预报产品做预报时,在不同数值模式大尺度环流背景场(如 500 hPa 高度场、海平面气压场)相似,但降水预报的落区和强度却差别较大的情况下,可以帮助预报员对模式产品做合理的取舍和订正。

参考文献

- 边清河,丁治英,董金虎,等,2006.“96.8”华北暴雨数值模拟与稳定性分析[J]. 气象,32(8):17-22. Bian Q H, Ding Z Y, Dong J H, et al, 2006. Numerical simulation for “96.8” Huabei heavy rain and its stability analysis [J]. Meteor Mon, 32(8): 17-22 (in Chinese).
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺,1978,1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究[J]. 大气科学,2(4):276-289. Ding Y H, Cai Z Y, Li J S, 1978. A case study on the excessively severe rainstorm in Henan Province, early in August, 1975 [J]. Sci Atmos Sin, 2(4): 276-289 (in Chinese).
- 河北省气象局,1987. 河北省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:126-131. Hebei Meteorological Bureau, 1987. Handbook of Weather Forecast in Hebei Province [M]. Beijing: China Meteorological Press: 126-131 (in Chinese).
- 侯淑梅,郭俊建,张磊,等,2017. 西风槽与副高相互作用的暴雨过程动热力场结构特征分析[J]. 气象,43(2):151-165. Hou S M,

- Guo J J, Zhang L, et al, 2017. Analysis of dynamic and thermal field structure characteristics on rainstorm area in interaction process between westerly trough and subtropical high[J]. Meteor Mon, 43(2): 151-165(in Chinese).
- 胡欣, 马瑞隽, 1998. 海河南系“96.8”特大暴雨的天气剖析[J]. 气象, 24(5): 8-13. Hu X, Ma R J, 1998. Synoptical analysis of the torrential rain over the southern Haihe River Basin during August 1996[J]. Meteor Mon, 24(5): 8-13(in Chinese).
- 李江波, 王宗敏, 王福侠, 等, 2011. 华北冷涡连续降雹的特征与预报[J]. 高原气象, 30(4): 1119-1131. Li J B, Wang Z M, Wang F X, et al, 2011. Characteristic and forecasting of continuous hail shooting processes caused by the North China cold vortex[J]. Plateau Meteor, 30(4): 1119-1131(in Chinese).
- 李云, 缪起龙, 江吉喜, 2007. 2005 年 8 月 16 日天津大暴雨成因分析[J]. 气象, 33(5): 83-88. Li Y, Miu Q L, Jiang J X, 2007. Analysis of “2005. 8. 16” heavy rain in Tianjin[J]. Meteor Mon, 33(5): 83-88(in Chinese).
- 刘还珠, 王维国, 邵明轩, 等, 2007. 西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J]. 大气科学, 31(4): 727-734. Liu H Z, Wang W G, Shao M X, et al, 2007. A case study of the influence of the western pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 31(4): 727-734(in Chinese).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10): 1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1267-1277(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 37(3): 705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing Area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 705-718(in Chinese).
- 孙兴池, 郭俊建, 王业宏, 等, 2015. 低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析[J]. 气象, 41(4): 401-408. Sun X C, Guo J J, Wang Y H, et al, 2015. Analysis of the common effect of vortex and subtropical high on rainstorm fall area[J]. Meteor Mon, 41(4): 401-408(in Chinese).
- 王欢, 2007. “8. 16”华北暴雨的数值模拟和诊断分析[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang H, 2007. Numerical simulation and diagnostic analysis of the rainstorm process in North China occurred on August 16 2005[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 王莉萍, 2004. 一次冷涡暴雨的诊断分析和数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang L P, 2004. The diagnostic analysis and numerical simulation of a cold vortex heavy rain[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 王宗敏, 丁一汇, 张迎新, 等, 2014. 副高外围对流雨带中的对流-对称不稳定及锋生的诊断分析[J]. 大气科学, 38(1): 133-145. Wang Z M, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2014. Analysis of convective-symmetric instabilities and frontogenesis in a convective rain band on the northwest edge of WPSH[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 133-145(in Chinese).
- 杨学斌, 代玉田, 陈华凯, 等, 2016. 鲁西北一次持续性暴雨成因分析[J]. 气象科学, 36(2): 275-282. Yang X B, Dai Y T, Chen H K, et al, 2016. Cause analysis of a continuous rainstorm in Shandong Northwest[J]. J Meteor Sci, 36(2): 275-282(in Chinese).
- 尤凤春, 景华, 李江波, 1999. “96.8”河北特大暴雨雷达回波和闪电资料特征[J]. 气象, 25(8): 47-50. You F C, Jing H, Li J B, 1999. Features of lightning data and radar echo of a heavy torrential rain in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 25(8): 47-50(in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329(in Chinese).
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等, 2013. 北京“7. 21”特大暴雨环流形势极端性客观分析[J]. 气象学报, 71(5): 817-824. Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al, 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 817-824(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社: 362-363. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Synoptic Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 362-363(in Chinese).