

北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征^{* 1}

杨波¹ 孙继松² 毛旭¹ 林隐静¹
YANG Bo¹ SUN Jisong² MAO Xu¹ LIN Yinjing¹

1. 国家气象中心,北京,100081

2. 北京市气象台,北京,100089

1. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2. *Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100081, China*

2016-02-02 收稿,2016-08-26 改回.

杨波,孙继松,毛旭,林隐静.2016.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征.气象学报,74(6):919-934

Yang Bo, Sun Jisong, Mao Xu, Lin Yinjing. 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(6):919-934

Abstract Auto-weather station observations and ERA-Interim reanalysis data are used to investigate large and meso-scale circulation characteristics related to short term heavy rainfall events over Beijing during June to August from 2007 to 2014. This is done by classifying large-scale synoptic circulations. The results show that; (1) according to their occurrence frequencies, weather systems generally are able to be classified into four synoptic types for short term heavy rainfall events, i. e. the interaction between subtropical high and western trough (I), small trough moving along the westerly stream (II), cold vortex in northeastern China (III), and low-pressure vortex or inverted trough over Huanghuai Plain (IV). Except that water vapor comes from Bohai Sea and Yellow Sea for Type III, for the other three patterns the water vapor are related to remote supplies from the South China Sea and the East China Sea; (2) temporal and spatial distributions of short-time strong rainfall are different with different weather systems; the rainfall distribution is along the southeast-to-northwest mountain range extending from the southeastern plain across the urban area to northwestern mountains under Type IV. However, the rainfall distribution under the other three types is generally along the southwest-to-northeast mountain range (also along the topography in Beijing area). In particular, three high frequency centers are located in front of at the southwestern and northeastern mountains and central urban area respectively. Looking at the time series, it is found that short-time strong rainfall mainly occurs in the afternoon for Type III, from dusk till mid-night for Type I, and at night for Type II and IV; (3) looking at the meso-scale characteristics, convections over mountainous area in Beijing are often triggered first by cold air at the lower level in western and northern Beijing, followed by organized thunderstorm highs. The cold pool outflow from the thunderstorm high and the warm moist airflow from the southerly winds in front of the mountains converge, further intensifying convections; for Type II, the southeasterly winds at the boundary layer are blocked by the terrain in front of the northwestern mountain over Beijing. The flow bifurcates around the two sides of the mountains. The southwestern branch generates a cyclonic circulation and triggers convective weather over western urban area; the northeastern branch generates a terrain-induced convergence line in front of the mountain, and vertical motion strengthens at the nighttime because the southern component of the southeasterly winds enhances obviously, and triggers convective weather in front of northeastern mountains. As a result, two separate high-frequency rainfall centers characterized by nighttime rainfall appear. For Type III, cold air invades from the north or west of Beijing, and meet with easterly winds at the lower layer in front of mountain, leading to convective weather in the afternoon. For type IV, the easterly

* 资助课题:公益性行业(气象)科研项目(GYHY201506006)、国家科技支撑计划(2015BAC03B04)、国家自然科学基金项目(41475051)。

作者简介:杨波,主要从事强对流天气预报。E-mail: yangbo7625@163.com

通讯作者:孙继松,主要从事中尺度天气学、城市气象学及预报技术研究。sunjs_0314@sina.com

flow at the top of the low vortex over Huanghuai Plains is lifted by the terrain in front of western mountains, which triggers convections. Mesoscale cyclonic circulation gradually forms, resulting in short term heavy rainfall.

Key words Short-term heavy rainfall, Synoptic type, Mesoscale, Topography

摘要 为了探讨不同天气尺度背景下,北京地区短时强降水过程的基本特征,利用2007—2014年6—8月北京地区自动气象站观测数据和ECMWF ERA-Interim($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)全球再分析数据,在对北京地区短时强降水日的大尺度环流特征进行分型的基础上,基于分型合成场和距平场分析了北京地区短时强降水天气过程的基本环流背景及相应的中尺度环流特征。结果表明:(1)造成北京地区出现短时强降水过程的天气系统,依据其出现的频次,大体可分为副热带高压(副高)与西来槽相互作用型、西风小槽型、东北冷涡型和黄淮低涡倒槽型等4类;从低层水汽来看,除东北冷涡型主要来自于渤海、黄海外,其他3型短时强降水过程的水汽主要来自中国南海或东海。(2)不同天气系统主导下的短时强降水时空分布存在较大差异:在空间分布上,黄淮低涡倒槽型短时强降水带分布从北京东南平原穿过城区至西北山前成东南—西北走向,其余3型大体上沿北京地形形成西南—东北走向,其中,西南山前、城区和东北山前地区是3个短时强降水事件的多发中心;在时间分布上,东北低涡型造成的短时强降水过程主要发生在午后,副高与西来槽相互作用型主要集中在傍晚至前半夜,而西风小槽型和黄淮低涡倒槽型短时强降水表现出较强的夜雨特征。(3)从中尺度环流特征上看,副高与西来槽相互作用型短时强降水过程主要是低层冷空气从北京西部、北部进入,首先触发山区对流,与之对应的雷暴高压逐渐组织化,外侧辐散气流(冷池流出)和山前的偏南风暖湿气流辐合造成对流过程加强;西风小槽型主要是边界层内较强东南风在北京西北部山前受地形阻挡,向两边绕流,西南支气流在西部形成气旋性环流,造成城区西部的对流性天气,东北支气流在东北部山前形成地形辐合线,夜间随着东南气流中偏南分量显著加强,东北部山前地区的辐合上升运动加强,造成东北部山前对流性天气,因此在短时强降水落区上表现为两个分离的多发中心且具有夜发性;东北冷涡型主要是系统性的冷空气从北京北部或西部南下,在山前与低空偏东风形成辐合切变线,触发午后对流性天气;黄淮低涡倒槽型主要是黄淮低涡顶部的低层偏东气流在北京西部山前辐合抬升,触发对流,并逐步演变为中尺度气旋性环流,形成相对组织化的短时强降水。

关键词 短时强降水, 天气分型, 中尺度环流特征, 地形

中图法分类号 P466

1 引言

暴雨是中国夏季最主要的灾害性天气,每年因暴雨造成的经济和人员损失都远超过其他灾害性天气^①,致灾性暴雨过程往往包含短时强降水过程,但与暴雨(日降水量 ≥ 50 mm)主要关注降水在给定时间段的累积量不同,短时强降水更加强调的是降水的强对流特征和短历时特征(陈炯等,2013)。作为中国最主要的强对流灾害天气之一,短时强降水由于在较短时间内累积了较大的降水量往往会形成暴洪,造成城市内涝和山洪、泥石流等地质灾害。特别是近几年来,由于城市规模的扩大,短时强降水造成的城市内涝往往会给城市带来巨大的财产损失甚至人员伤亡,如2007年7月18日济南特大暴雨,2012年7月21日北京特大暴雨,2013年9月13日上海特大暴雨,其间的最大小时雨量均超过了100 mm。因而暴雨过程中的短时强降水特征一直是中国气象工作者的一个重点研究方向之一。陶诗言(1977,

1980)、陶诗言等(1979)、Tao等(1981)曾从季节突变对中国梅雨爆发的影响、暴雨发生的多尺度相互作用、暖湿季风输送带对北方大暴雨的影响、高空急流对暴雨的作用、暴雨和强对流发生的物理条件、地形对暴雨的增幅作用等6个方面对中国暴雨进行了系统研究。近些年来,随着观测资料时空分辨率的提高和数值模式的进步,科学家们进一步从不同的角度对中国暴雨进行了大量研究。气候学家利用中国长时间的降水序列,分析了中国夏季暴雨的分布特征,将中国暴雨划分为多种类型,再对大尺度环流背景进行讨论(周放等,2014;鲍名,2007;冷春香等,2005),证明了季风变化及海温的差异对中国暴雨时空分布的重要影响。大多数暴雨过程都是多尺度天气系统相互作用背景下的强降水过程(陶诗言,1980;丁一汇,2014),特别是中尺度系统在暴雨中的作用引起了气象学家的重点关注。丁一汇(1994)在总结天气系统和暴雨的时空尺度关系时,重点讨论了暴雨过程中的中尺度动力学问题;程麟生等(1993a,

^①根据中国气象局灾情直报系统统计。

1993b)通过数值模拟对中国3次典型大暴雨过程进行模拟,并对其中的中尺度系统的发生、发展进行了诊断分析。

由于特殊的地理位置和社会影响,北京地区的暴雨研究始终是学者们的一个重点研究方向。在大尺度环流特征方面,张文龙等(2013)分析了对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用。而基于“7.21”北京特大暴雨过程,气象学家分别从水汽输送(廖晓农等,2013)、高空急流的作用(全美兰等,2013)、变形场驱动锋生(李娜等,2013)、锋生引起倾斜涡度发展和环流形势的极端性(赵洋洋等,2013)等多个角度对北京地区的暴雨成因进行了分析;在中小尺度对流系统研究方面,郭虎等(2006)对一次北京局地暴雨过程中重力波激发中小尺度波动的过程进行了分析。李青春等(2011)通过个例分析了近地面辐合线的形成及其与暴雨落区和强度的关系。孙继松等(2008)、吴庆梅等(2012)分析了北京特殊地形和城市热岛效应对北京地区局地暴雨过程中中尺度对流系统的影响。一次暴雨过程往往包含着若干个短时强降水过程,而短时强降水主要是由强对流过程触发,因而对短时强降水的研究多集中在中尺度对流系统方面:陈炯等(2013)研究了中国暖季短时强降水分布和日变化特征,并采用卫星资料分析了其与

中尺度对流系统日变化关系;张小玲等(2014)采用雷达资料分析了梅雨锋上造成短时强降水的中尺度对流系统的发展模态。

以上研究使人们对多时空尺度的天气系统在暴雨和短时强降水中的作用有了一定的认识。但以长时间序列为基础的大尺度环流特征的分析 and 以个例为基础的中尺度特征分析在揭示短时强降水过程的多尺度系统特征方面难以兼顾。本研究试图采用一种简便易行的方法,来揭示北京地区不同天气尺度系统背景下短时强降水过程特征的异同点,以及相对应的地面中尺度环流特征,以便于更好地理解不同尺度系统在短时强降水过程中的作用。

2 资料和方法

所用资料为2007—2014年6—8月北京地区资料连续性与稳定性较好的159个自动气象站(图1)逐时的观测数据,还使用了ECMWF水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 、垂直分辨率为37层的ERA-Interim全球再分析数据。

短时强降水目前还没有统一的定义,文中采用的标准是小时降水量 ≥ 20 mm(中国国家气象中心业务标准);首先统计2007—2014年6—8月北京地区所有站点的短时强降水事件(共3204站次),为筛

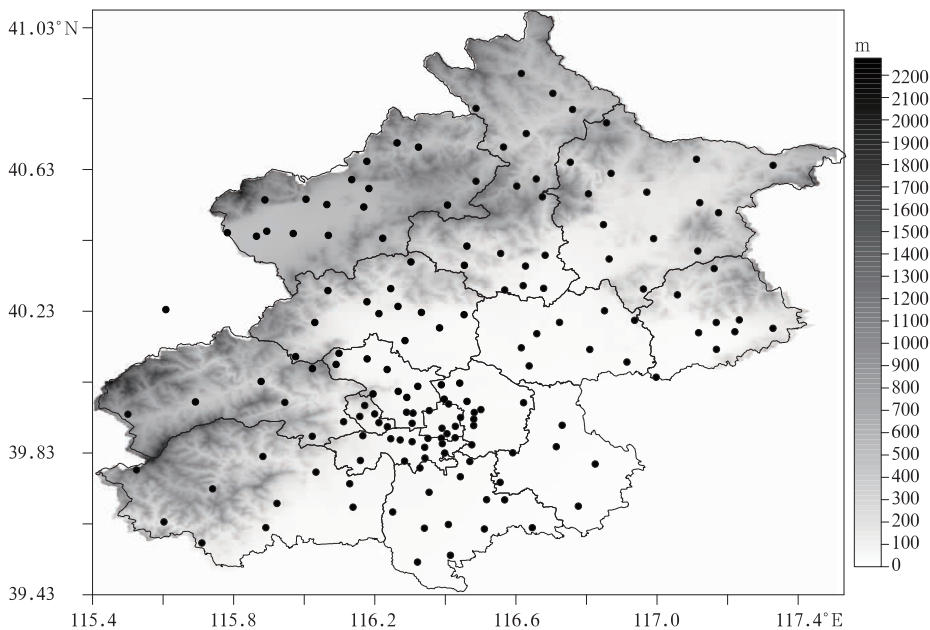


图1 北京地区地形(阴影)和自动气象观测站点(图中黑点)分布

Fig. 1 Topography (shaded) and automatic weather observation stations (black spots) over Beijing region

选具有较强中尺度信息的短时强降水个例,并考虑自动站降水记录的可靠性,只有当该日(08时至次日08时,北京时,下同)有10%(15站)以上的自动站、且每个站至少发生一次短时强降水事件才记为短时强降水日,8a中挑选出短时强降水日56个;然后基于中低层大气的大尺度环流特征对56个短时强降水日进行环流分型;再基于同一类型短时强降水日的大气环流基本要素场计算其平均场(即合成场)及其与2007—2014年夏季(6—8月)平均场的差异(以下简称为距平场);最后依据地面自动站观测资料讨论不同天气尺度系统主导下的中尺度环流特征的异同。考虑到不同环流分型下短时强降水日的样本数差异较大,在统计对比各个分型下发生短时强降水事件频次的空间分布特征时采用了均一化方法:即每类分型下发生短时强降水事件的站点,对于其发生频次采用式 $X^* = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ 进行计算,使其结果均映射到[0—1]。其中, x 为某一站点的发生频次, x_{\min} 、 x_{\max} 是所有参与计算站点中发生短时强降水事件最少、最多的频次, X^* 为均一化的结果。

3 北京地区短时强降水过程的主要天气尺度系统特征

灾害性天气的分型有多种方式,一般以大尺度环流形势特征或影响系统来分型(陶诗言,1980;孙建华等,2005)。文中基于大尺度环流的形势特征对北京地区短时强降水日进行分型,大体可分为5型:(1)副热带高压(副高)与西来槽相互作用型(简称西来槽型),该型是造成北京地区短时强降水的主要天气类型,约占总数的34%(19例),其主要环流特点是经向度大,副高呈块状结构,588 dagpm等值线从30°N以南一直延伸至40°N以北,强盛偏南气流中常伴有低空急流;西风槽较深,高度槽后常伴有冷温度槽。(2)西风小槽型,约占总数的27%(15例),其主要特点是500 hPa以纬向环流为主,多为平直西风下的波动,典型特征是副高脊线呈东西带状走向。(3)东北冷涡型,约占总数的14%(8例),其主要特点是中国东北地区高空为一深厚冷性低涡控制,表现为冷空气从冷涡后部分裂南下,呈现出多横槽活

动特征。(4)蒙古低涡低槽型(北支槽型),约占总数的14%(8例),其主要特点是蒙古高原存在低涡系统,北京地区受其底部低槽系统影响,但南支系统较弱。该型天气系统特征和西来槽型较为相似,可视为西来槽型的一种亚型,文中不对此型做详细讨论。(5)黄淮低涡倒槽型,约占总数的11%(6例),其主要特点是北京地区的北部多为高压脊控制,而南部则受黄淮低涡倒槽系统影响。

图2为西来槽型中低层环流特征,在500 hPa位势高度的距平场上,位于东北地区的正距平和位于河套地区的负距平均明显偏强,而北京位于东西向位势高度距平梯度的最大区域,下游阻高偏强有利于西来低值系统在北京地区的维持(图2a)。在850 hPa高度上,对应500 hPa低槽,在河套地区为气旋性环流,槽前西南气流异常显著,而副高外围的东南风也明显偏强,两支偏南风气流在黄淮地区交汇继续北上,北京正位于这条显著的南风通道上(图2b);与850 hPa南风通道对应,在925 hPa上两条南风水汽通道也异常明显,从中国西南、东南地区一直延伸至东北地区,而华北地区正处在这两条汇合后的水汽通道控制下,河北中部至北京东北部形成一个明显的西南—东北向的水汽辐合中心(图2c)。850 hPa温度距平与500 hPa高度距平类似,负距平中心位于内蒙古中部,中国东部地区则为正距平,北京处在东西向温度梯度最大的位置(图2b),说明冷暖空气在北京地区东西向对峙是其主要环流特征。

西风小槽型的500 hPa位势高度较为平直,副高形状相对扁平,位置也较为偏南,纬向环流特征明显,距平场上则表现为东南偏高,西北偏低,北京位于东南—西北向距平梯度区偏向正距平区一侧(图3a)。在850 hPa上,副高外围的西南气流明显偏强,这支天气尺度的偏南气流从中国南海一直延伸至东北地区南部(图3b);对应在925 hPa上,副高外围的南风气流把中国南海的水汽向北输送可至东北地区南部,水汽辐合的中心同样也在河北中西部至北京东南部地区(图3c)。850 hPa温度距平场上,冷空气主体明显偏北,华北地区则为正距平控制(图3b),表明低层暖湿空气北上为西风小槽型的主要环流特征。

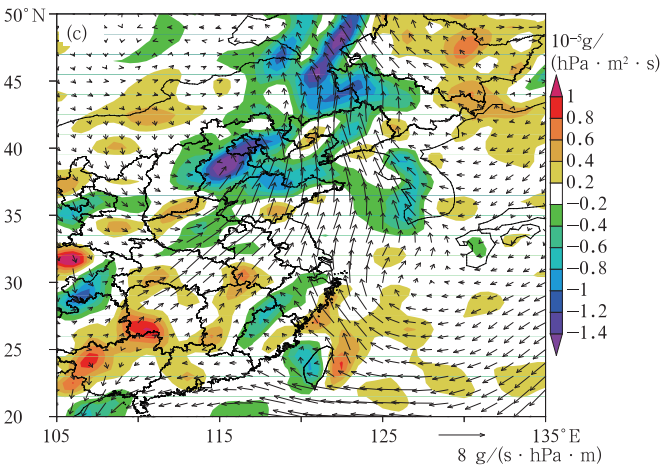
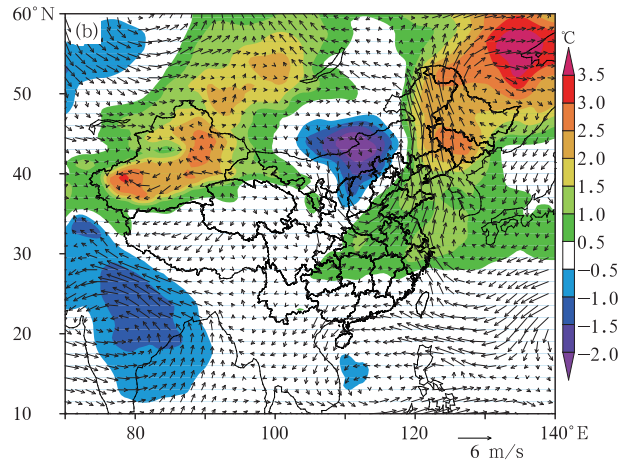
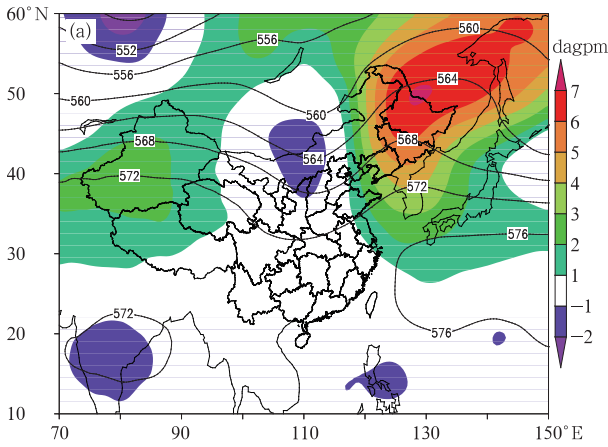


图 2 副高与西来槽相互作用型环流特征

(a. 500 hPa 位势高度合成场(等值线,单位:dagpm)和距平场(色阶),b. 850 hPa 风场距平(矢量)和温度场距平(色阶),c. 925 hPa 水汽通量散度(色阶)和水汽通量矢量的距平场)

Fig. 2 Atmosphere circulation of Type I.

(a) Composite and anomalies (shaded) of geopotential height (unit: dagpm) at 500 hPa, (b) anomalies of wind field (vector) and temperature (shaded) at 850 hPa, (c) anomalies of water vapor flux divergence (shaded) and water vapor flux at 925 hPa

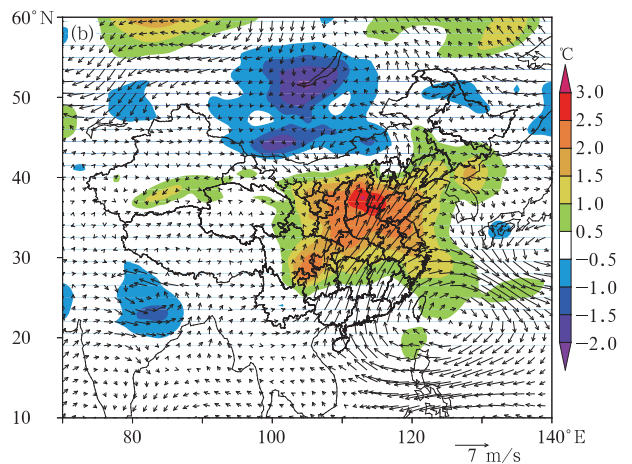
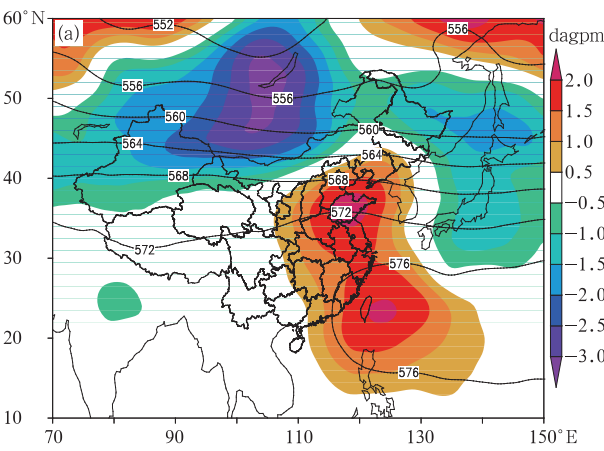
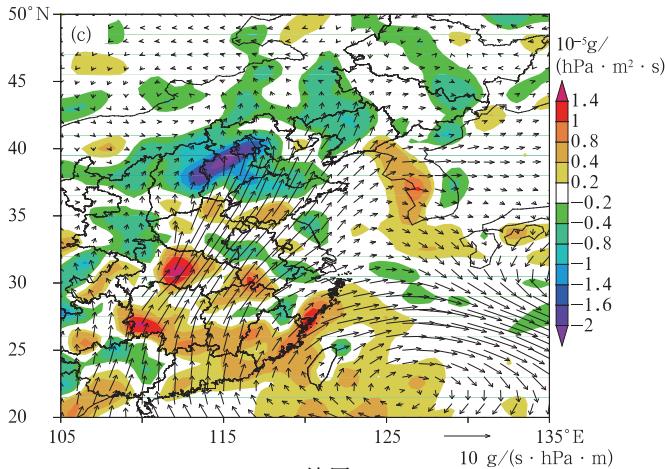


图 3 西风小槽型环流特征(a. 500 hPa 位势高度合成场(等值线,单位:dagpm)和距平场(色阶),b. 850 hPa 风场距平(矢量)和温度场距平(色阶),c. 925 hPa 水汽通量散度(色阶)和水汽通量矢量的距平场)

Fig. 3 Atmosphere circulation of Type II. (a) Composite and anomalies (shaded) of geopotential height (unit:dagpm) at 500hPa, (b) anomalies of wind field (vector) and temperature (shaded) at 850hPa, (c) anomalies of water vapor flux divergence (shaded) and water vapor flux at 925 hPa



续图 3
Fig.3 Continue

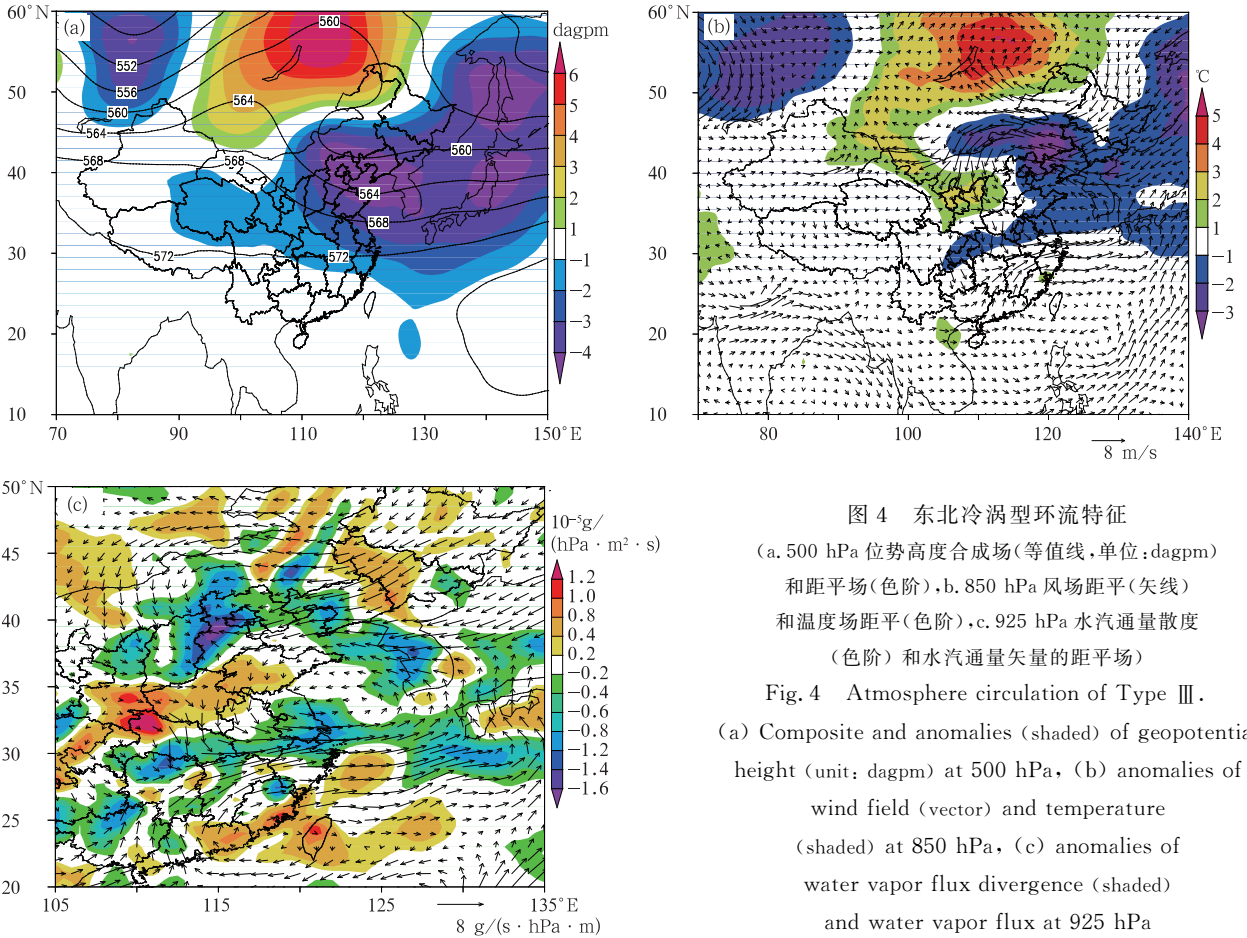


图 4 东北冷涡型环流特征
(a. 500 hPa 位势高度合成场(等值线,单位: dagpm)和距平场(色阶), b. 850 hPa 风场距平(矢线)和温度场距平(色阶), c. 925 hPa 水汽通量散度(色阶)和水汽通量矢量的距平场)

Fig. 4 Atmosphere circulation of Type III.
(a) Composite and anomalies (shaded) of geopotential height (unit: dagpm) at 500 hPa, (b) anomalies of wind field (vector) and temperature (shaded) at 850 hPa, (c) anomalies of water vapor flux divergence (shaded) and water vapor flux at 925 hPa

东北冷涡型 500 hPa 高度距平场则表现为北高南低,东北、华北大部分地区处在负距平区域,北京位于负距平中心区域(图 4a)。对应 850 hPa 的风场距平,华北地区有一明显的气旋性环流,北京主要受

东北冷涡底部较强的偏东气流影响;对应 850 hPa 温度距平场上,负距平极值中心在东北地区的西南部,北京位于负距平中心的西南前沿,距平梯度较大(图 4b),冷空气从东北地区以偏东路径影响华北平

原,说明东北地区低层冷空气南下是东北冷涡型的主要环流特征。对应 925 hPa 的水汽通道和上述两型的远距离输送明显不同,其水汽通道主要建立于日本海及黄海、渤海,北京及河北中西部(太行山前)仍然是一个水汽辐合中心(图 4c)。

黄淮低涡倒槽型 500 hPa 位势高度正距平中心在日本海,东西向正距平区经东北地区中部一直到河套北部,这有利于深厚的东南暖湿气流沿东部高压西侧影响北京地区(图 5a)。850 hPa 风场距平

上,华北北部至东北地区呈反气旋环流,对北上系统形成阻滞作用。而气旋性环流则在黄淮地区,北京位于该气旋性环流顶部的东南气流中;850 hPa 温度距平场上,在对流层低层没有明显的冷空气活动(图 5b),是这类短时强降水过程与其他 3 类短时强降水过程在天气背景上的显著区别。受黄淮气旋影响,925 hPa 水汽辐合中心在安徽中部,但仍有部分水汽由黄淮气旋东南支气流输送到太行山前形成辐合,北京地区的水汽辐合的强度相对其他 3 型偏弱(图 5c)。

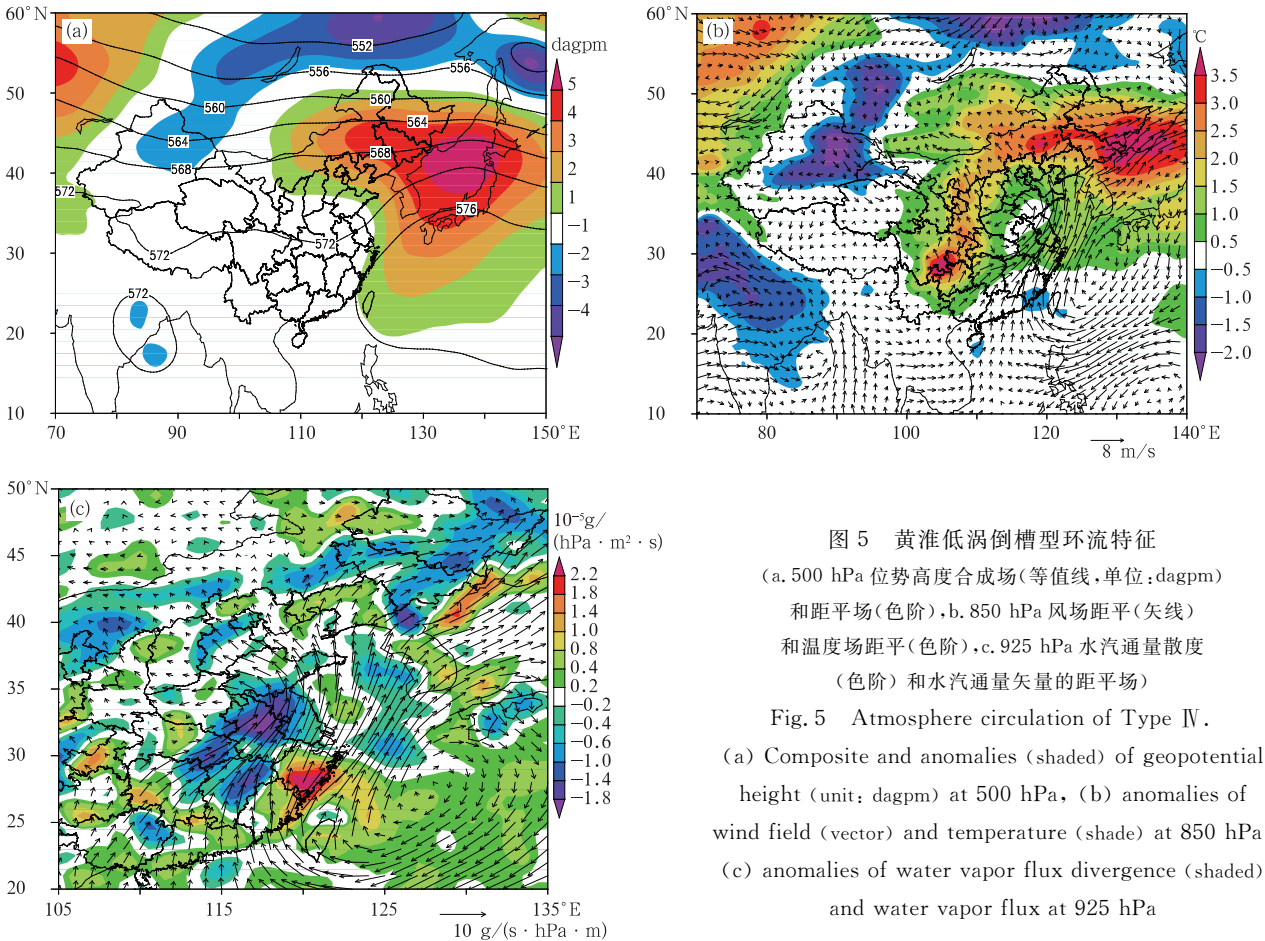


图 5 黄淮低涡倒槽型环流特征

(a. 500 hPa 位势高度合成场(等值线,单位: dagpm)和距平场(色阶), b. 850 hPa 风场距平(矢线)和温度场距平(色阶), c. 925 hPa 水汽通量散度(色阶)和水汽通量矢量的距平场)

Fig. 5 Atmosphere circulation of Type IV.

(a) Composite and anomalies (shaded) of geopotential height (unit: dagpm) at 500 hPa, (b) anomalies of wind field (vector) and temperature (shade) at 850 hPa, (c) anomalies of water vapor flux divergence (shaded) and water vapor flux at 925 hPa

4 不同天气系统影响下北京地区短时强降水的时空分布特征

不同天气尺度系统影响下,北京地区短时强降水分布的时空特征是否存在明显差异呢? 图 6a 为 2007—2014 年 6—8 月北京地区短时强降水事件 (≥ 20 mm/h 的总次数) 的空间分布, 总体而言, 北京地区短时强降水频发区域主要沿山前成西南—东北带状分布, 两个多发区域分别在城区和东北部山

前。图 6b—e 为 2007—2014 年 6—8 月 4 类不同天气尺度环流背景下的短时强降水事件均一化频次空间分布: 西来槽型的短时强降水频发区域分布(图 6b)与短时强降水总频次的走向类似, 但是有 3 个中心区, 分别位于北京西南部山前、城区西部和东北部山前, 而中心城区出现短时强降水的频次反而较低; 西风小槽型短时强降水频发区域主要在北京城区和北京东北部山前(图 6c), 中间有明显的低频分割带; 东北冷涡型短时强降水带也大体沿山前成西

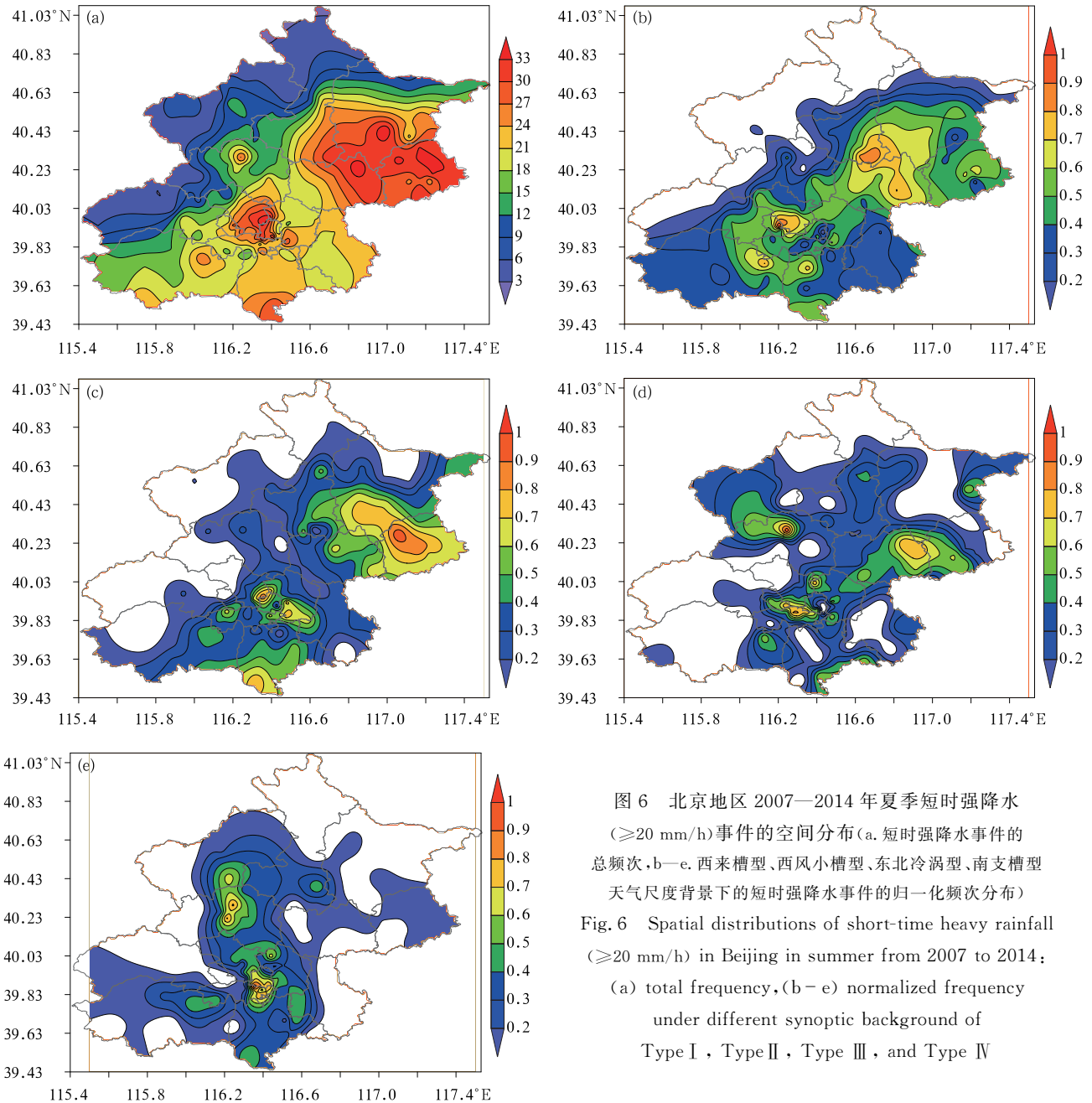


图6 北京地区2007—2014年夏季短时强降水(≥ 20 mm/h)事件的空间分布(a. 短时强降水事件的总频次, b—e. 西来槽型、西风小槽型、东北冷涡型、南支槽型天气尺度背景下的短时强降水事件的归一化频次分布)
Fig. 6 Spatial distributions of short-time heavy rainfall (≥ 20 mm/h) in Beijing in summer from 2007 to 2014; (a) total frequency, (b—e) normalized frequency under different synoptic background of Type I, Type II, Type III, and Type IV

南—东北带状走向(图6d),呈现出水平尺度更小的多中心分布,表明东北冷涡背景下的短时强降水落区更为分散;黄淮低涡倒槽型短时强降水带与其他几个类型明显不同,成东南—西北走向,2个短时强降水中心分别在中心城区、西北部山前(图6e),此外,虽然黄淮低涡倒槽型是4类短时强降水天气型中最少发生的,但是中心城区和昌平山前地区发生短时强降水的总频次接近天气个例数,表明这类天气尺度背景下的强降水落区更具重复性。

图7为2007—2014年6—8月4类天气系统背景下北京地区所有站点发生短时强降水的总频次(总站次)和站点的平均频次(总站次/发生短时强降水的站数)的日变化特征,发生短时强降水站点数越少而总频次越多即站点的平均频次越大,说明短时强降水在空间分布越集中,其极大值中心说明该时段在某些地区更容易发生短时强降水。西来槽型(图7a)短时强降水主要发生在午后至前半夜,呈单峰型分布,最大峰值在20时前后。西风小槽型(图

7b)短时强降水主要时段在夜间,呈典型的双峰特征,第1个峰值出现在21—23时,最大峰值出现在02—04时。东北冷涡型(图7c)频发时段从午后至傍晚前后,时段较为集中,总频次和站点平均频次的

峰值均呈双峰型,两个峰值的时间非常接近。黄淮低涡倒槽型(图7d)短时强降水主要发生在夜间,总频次和站点平均频次的峰值均在凌晨03时。

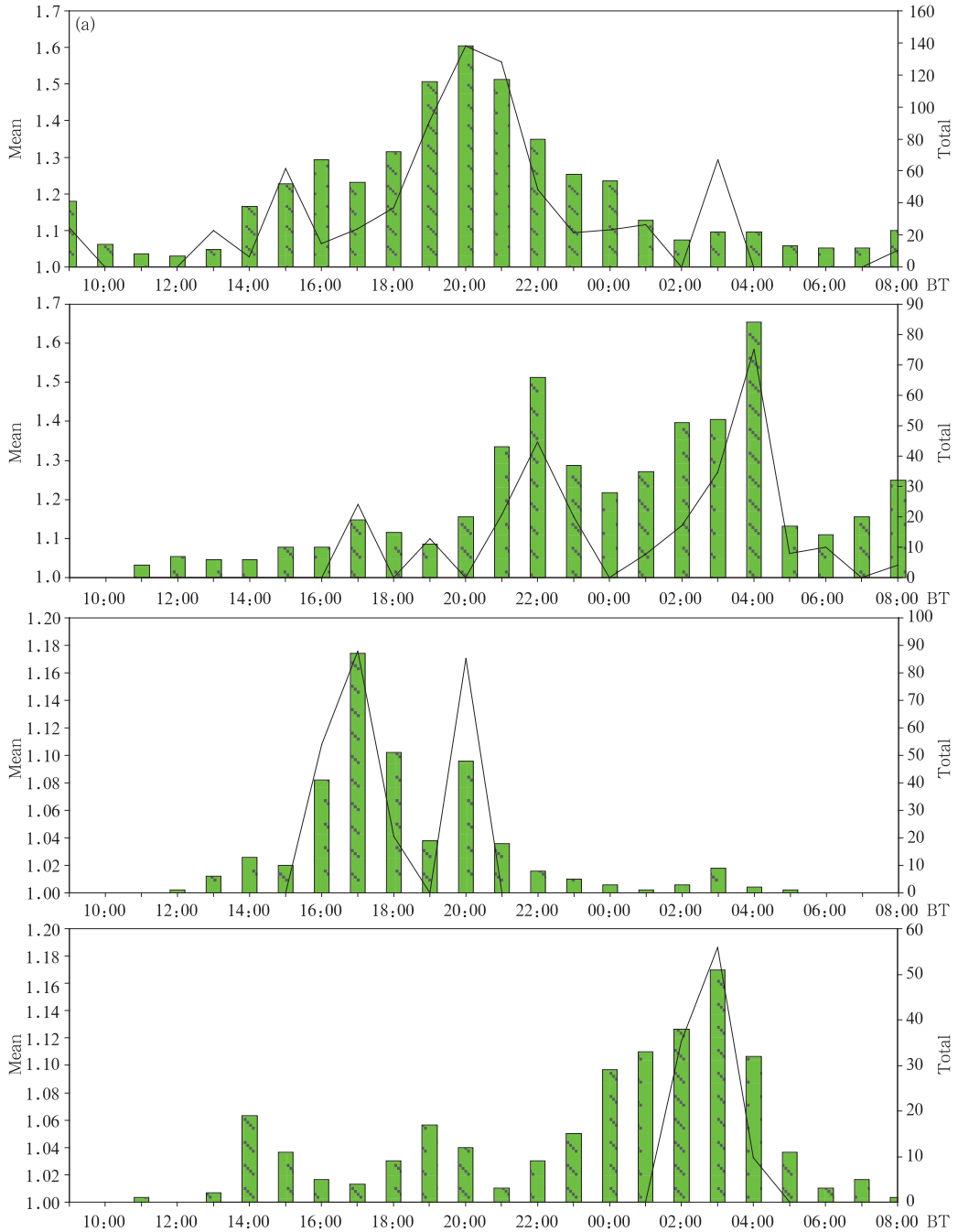


图7 2007—2014年6—8月北京地区根据分型统计的短时强降水日内出现短时强降水事件的总频次(柱状)和发生短时强降水站点的平均频次(线条)的逐时变化特征 (a. 西来槽型, b. 西风小槽型, c. 东北冷涡型, d. 南支槽型)

Fig. 7 Hourly total (columns) and mean (curves) frequency variations of short term heavy rainfall over Beijing region from 00:00 to 24:00 during June-August from 2007-2014 associated with circulation patterns of (a) Type I, (b) Type II, (c) Type III, and (d) Type IV

上述分析表明不同环流背景下,短时强降水的时空分布存在较大差异:在空间分布上,西来槽型、西风小槽型和东北冷涡型的短时强降水频发区主要沿北京山前成西南—东北走向的带状分布,西南山前、北京城区和东北山前地区是3个最容易发生短时强降水的区域。黄淮低涡倒槽型的短时强降水带与其他3型的雨带分布有较大不同,从北京城区到西北山前成东南—西北走向的带状分布,短时强降水的高频中心位于城区和西北部山前地区;在时间分布上,低空暖湿平流主导和冷暖空气相互作用发生的短时强降水具有明显差异,其中,西风小槽型和黄淮低涡倒槽型短时强降水具有明显的夜发特征,对应于850 hPa气温为正距平;而冷暖空气相互作用发生的短时强降水主要发生在午后至前半夜,其中850 hPa气温负距平最强的东北冷涡型主要发生在午后,而西来槽型主要集中在傍晚至前半夜。对应发生短时强降水总频次和站点的平均频次的日变化特征,西来槽型、西风小槽型和东北冷涡型的峰值高度重合,说明这3型的短时强降水频发区域相对集中;黄淮低涡倒槽型短时强降水则是02—04时发生区域高度集中。需要说明的是,由于东北冷涡型和黄淮低涡倒槽型样本数相对偏少,对其时空分布规律特征的认识还有待进一步验证。那么,不同天气背景下北京地区短时强降水的时空分布特征是否与边界层内中尺度环流演变有关呢?

5 地面中尺度特征

短时强降水分布的不均匀性主要由中小尺度系统的发生、发展主导。从上面的分析可以看出,不同环流背景下北京地区的短时强降水具有一定的时空集中度,表明每一类天气背景下的短时强降水系统的中小尺度特征是存在明显共性特征的。

用地面自动站观测资料,计算上述4类环流背景下,北京地区逐时温度、风与夏季(6—8月)同一时刻平均的分类距平场。由图7a可知,西来槽型短时强降水主要从午后开始加强至20时许达到峰值,而凌晨至上午相对较弱。从西来槽型的地面风场距平(图8)可以看到,09时北京大部分地区为偏南风异常,温度场距平也均为正距平(图略),表明北京地区近地面层上午以暖平流为主;至13时,沿北京西北部山区出现带状温度负距平区(图8e),温度负距平中心与风场距平上的局地反气旋环流对应,主城

区西部则出现了气旋性环流,也就是说在西南—东北向的降水带中,北京西部、北部山区首先有局地冷高压生成,表明强对流系统开始在山区出现,其外围辐散气流(冷池)有利于城区激发对流;至15时,北京西部、北部山区的辐散高压已明显加强并呈组织化趋势,其外围的辐散气流也显著增强,与南风气流形成一条东北—西南走向的辐合线穿过北京城区,短时强降水站次也迅速增多;至20时,组织化的中尺度辐散带出现,城区及平原地区由偏东风异常转为偏北气流异常,此时的温度场上(图8f),北部山区已转为明显的正距平,表明该区域对流活动已趋于结束,冷池已经消失,而城区气温负距平和强降水雨带基本重合,说明城区地面气温下降主要是强降水形成的冷池,而城区及平原地区此时的偏北风异常是组织化中尺度对流系统的出流形成的。

西风小槽型短时强降水从午后至后半夜均有发生,但是夜雨特征明显(图9b);短时强降水分布区域和西来槽型也略有不同,有两个相对独立的频发区分别在北京西部城区和东北山前。午后和凌晨时刻的风场距平(图9a、b)表明,在高空相对平直的风场控制、对流层低层偏南气流异常的背景下,北京平原地区的近地面层主要以东南风异常为主,其中,伴随短时强降水的3个峰值均有一条明显的东南风异常风速带从北京东南部通过城区到达西北山前,受西部地形阻挡,在山前向西南发生绕流,城区的西部方向形成气旋性环流。其温度距平(图9c、d)的日变化特征非常明显,北部山区从10时开始,出现温度负距平并逐步加强,16时达到最强,然后逐渐减弱,至19时已全部转为正距平。这种天气背景下,为什么呈现出这种温度距平日变化特征呢?图10是西风小槽型的15个个例合成的北京地区(39.4°—41.2°N,115.4°—117.6°E)FY-2红外1通道逐时的平均云顶亮温和观象台站逐3小时观测的总云量盒须线。可以看到,北京观象台各个时次的总云量基本在8成以上,平均在9成左右。这表明在对流层中层平直西风气流这种大尺度天气背景下,北京地区容易出现长时间的云层覆盖。其中,白天大部分时段的云顶亮温高于-15℃,表明以层云为主;夜间大部分时间云顶温度下降到-20℃以下,这与该期间局地对流活动增强(造成短时强降水)是一致的。

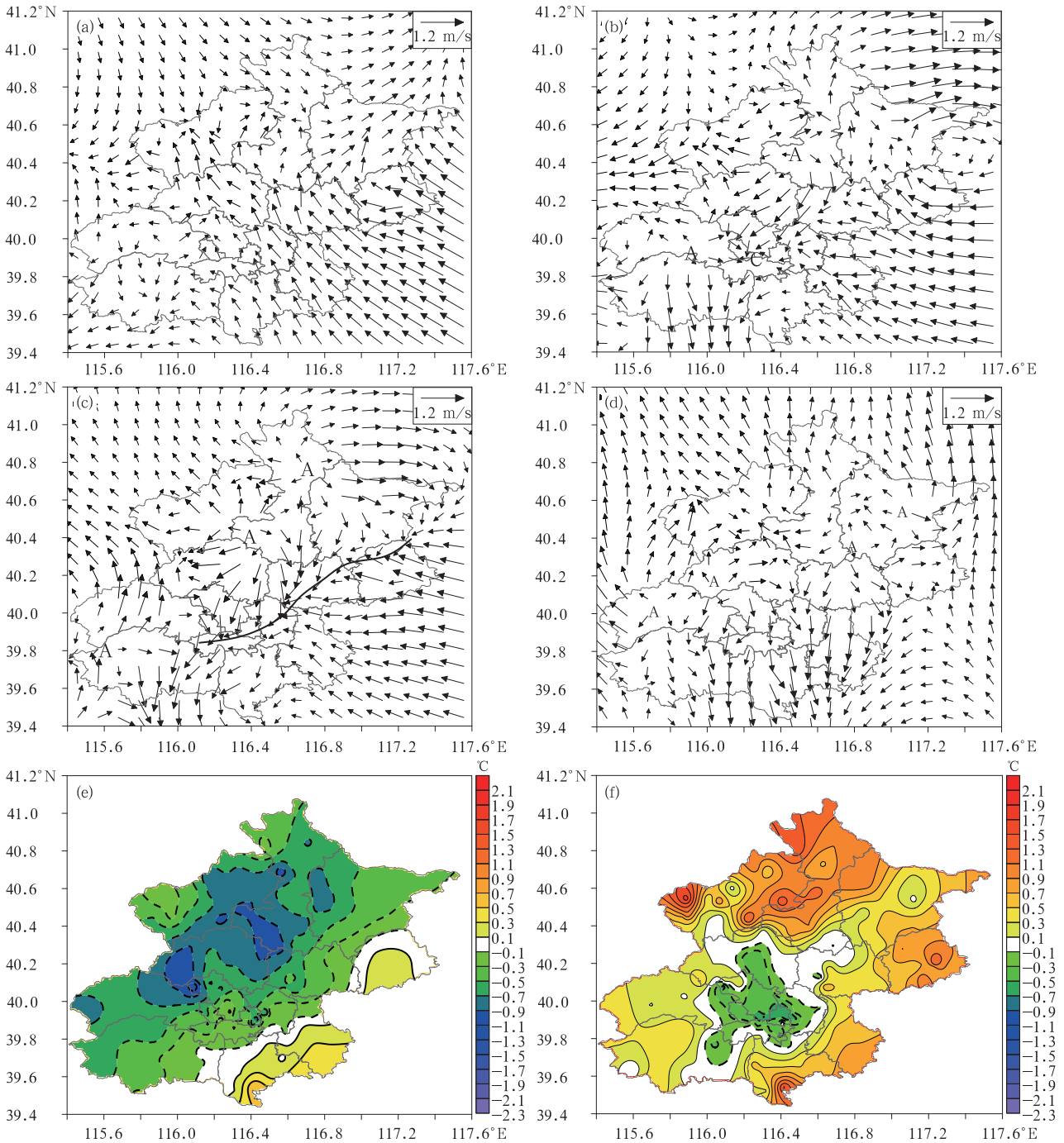


图8 西来槽型地面风场距平(a—d,图中黑粗实线为辐合线,A:反气旋,C:气旋)和温度场距平(e—f)
(a. 09时,b.e. 13时,c. 15时,d.f. 20时)

Fig. 8 Anomalies of surface wind (a—d, the thick solid black line is the convergence line. “A” represents anticyclone and “C” represents cyclone) and surface temperature (e—f) for Type I (a. 09:00 BT; b. e. 13:00 BT; c. 15:00 BT; d. f. 20:00BT)

上述分析表明,在西风小槽引发短时强降水发生前后,北京地区由于受到大范围层云较长时间覆

盖,北部山区与平均状态相比,白天气温偏低(缺乏太阳辐射情况下,气温回升缓慢),且越接近午后,气

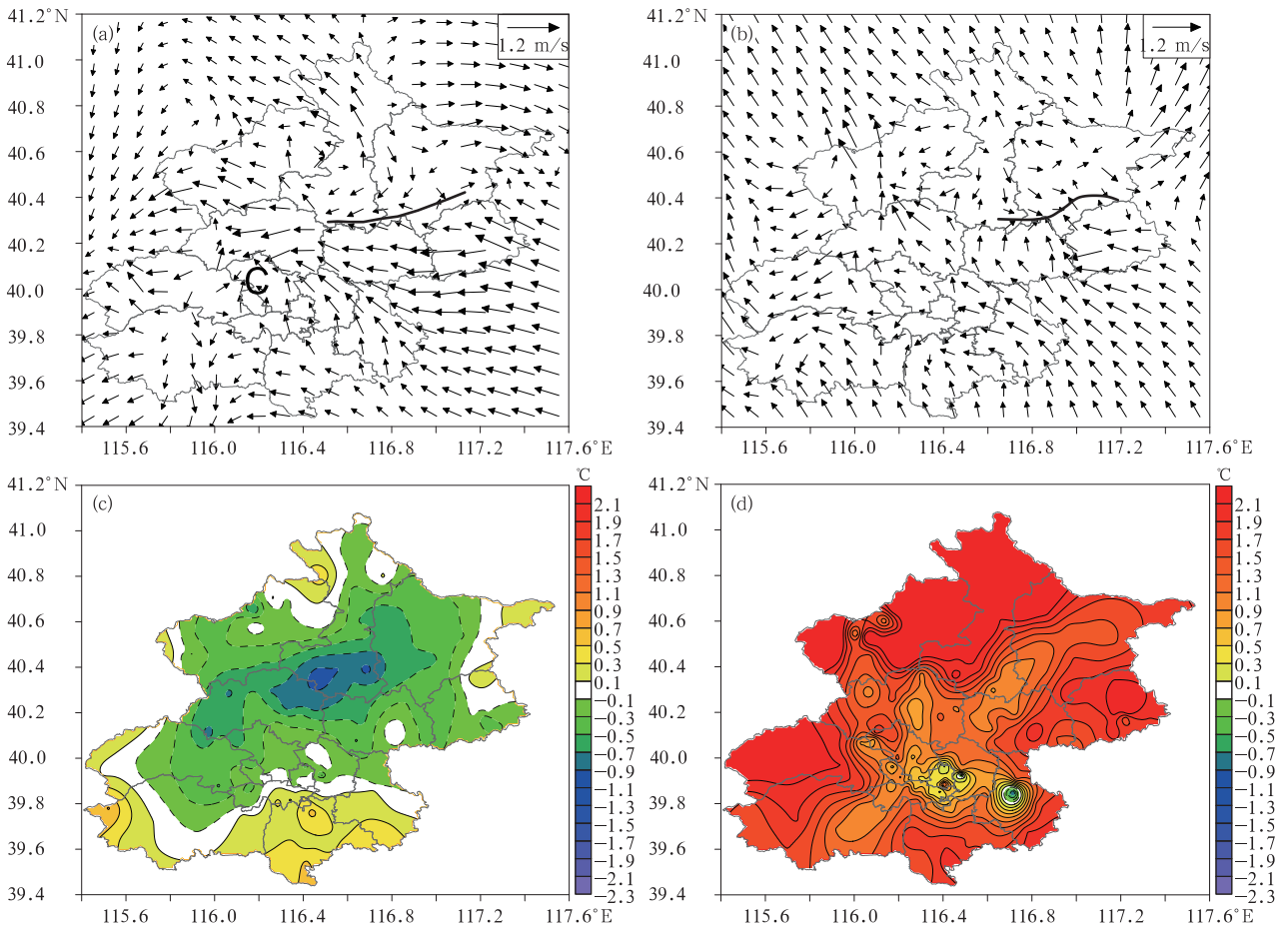


图9 西风小槽型地面风场距平

(a,b,图中黑粗实线为辐合线,C:气旋)和温度场距平(c,d)(a,c.15时,b,d.03时)

Fig.9 Anomalies of surface wind (a - b, the thick solid black line is the convergence line, and "C" represents cyclone) and surface temperature (c - d) for Type II (a, c. 15:00 BT; b, d. 03:00 BT)

温偏低幅度越大,造成偏北风异常,平原地区由于近地面层暖平流作用,气温基本正常甚至略偏高。这支北风气流与平原地区的偏东气流相遇在东北部山前形成一条准静止的地形辐合线;夜间则相反,云层减弱了地表长波辐射降温作用,造成大范围气温偏高,随着东南气流中偏南分量显著加强,东北部山前地区的辐合上升运动加强,这可能是西风小槽型环流背景下,北京东北部山前地区容易出现较大范围夜雨的重要因素。

东北冷涡型短时强降水主要发生在午后至傍晚的5—6 h内,时间相对集中(图7c)。各时次的气温距平(图略)均为负距平,相对其他时段,15—20时的负距平的范围明显偏大,强度也明显偏强,这是系统性冷空气侵入与短时强降水形成的冷池共同作用

的结果。风场距平图(图11)上,15时北京大部分地区仍以偏东风和偏南风为主,至16时,北京山前地区突然转为偏北风异常,这显然与对流造成的冷池有关,这支偏北气流与偏东风形成一条明显的地面辐合切变线,该辐合切变线从东北山前向西南方向一直延伸到北京城区,辐合线附近短时强降水站次也明显增多;19时许,北京大部分地区转为系统性的偏北风,中尺度辐合线逐渐消失,表明天气尺度冷空气活动在该期间占主导地位,对流活动明显减弱;但至20时,西北部山前(昌平—怀柔)再次形成较强的辐散气流,表明有组织化的对流系统出现,而此时北京东部的近地面偏东风有所加强,中尺度辐合线再次出现,出现短时强降水站次的第2个峰值。由此可见,系统性冷空气南下以及近地面偏东风的扰

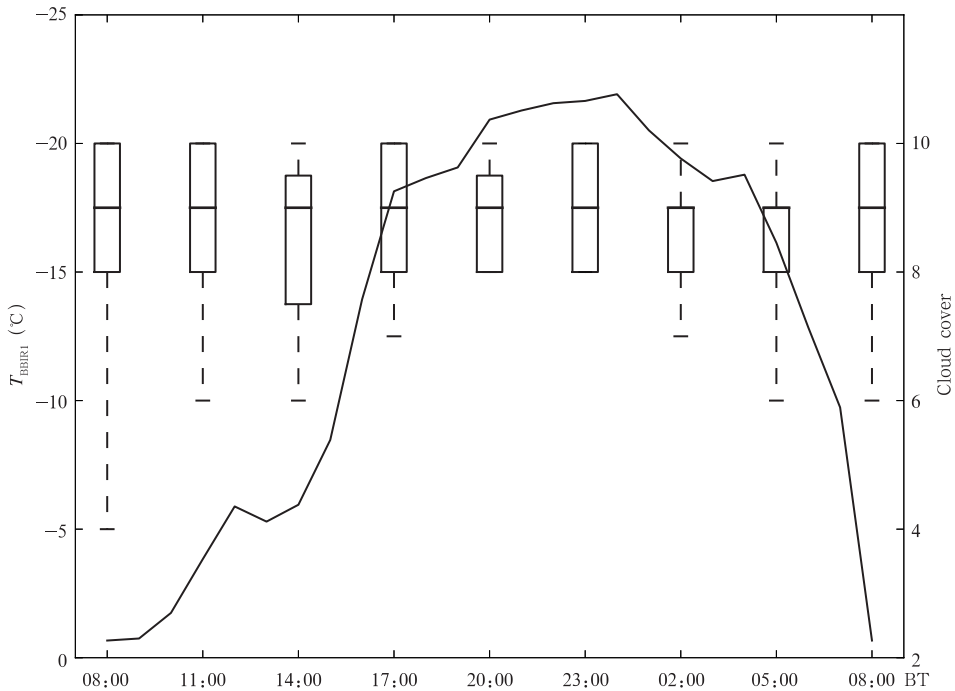


图 10 西风小槽型北京地区(39.4°—41.2°N;115.4°—117.6°E)FY-2 红外 1 通道逐时的平均云顶亮温(黑线)和观象台站逐 3 小时的总云量盒须图

Fig. 10 Average brightness temperature of FY-2 infrared split-window channel (black line) in Beijing region (39.4° - 41.2°N, 115.4° - 117.6°E) and total cloud cover (box plots) observed at Beijing Observatory base for Type II

动是触发东北冷涡型短时强降水的主要原因。

黄淮低涡倒槽型短时强降水随时间变化特征与西风小槽型类似,短时强降水的夜雨特征更明显。合成的地面气温距平图(图略)上,所有时段均明显偏高,说明黄淮低涡倒槽型的加热作用对北京地区这类短时强降水的发生非常重要,不仅有利于增强对流不稳定,同时减弱了近地面对流冷池的强度。风场距平(图 12)表明,黄淮低涡倒槽型与西风小槽型有类似的方面,一支东南气流自东向西穿过城区,在西北山前受山体阻挡发生绕流,在西北山前至西部城区产生南北走向并平行于地形分布的辐合线,最后演变为气旋式中尺度环流,而北部山前不存在地面辐合线,在这种中尺度环流背景下,对流可能首先在西部山前出现并向低空入流方向(东南)方向发展,最终形成西北—东南走向的短时强降水分布。

6 结 论

采用北京地区 2007—2014 年夏季的逐时自动气象站观测数据和 ECMWF 水平分辨率为 $0.5^\circ \times$

0.5° 、垂直分辨率为 37 层的 ERA-Interim 全球再分析数据,在对北京地区 56 个短时强降水日对应的大气环流特征进行天气分型的基础上,通过分析不同类型短时强降水日的平均场与近 8 a 夏季平均场之间的差异来讨论北京地区发生短时强降水的天气尺度环流特征和地面中尺度环流特征,得到了以下结论:

(1)影响北京地区夏季短时强降水的天气系统主要可分为副高与西来槽相互作用型(简称西来槽型)、西风小槽型、东北冷涡型、黄淮低涡倒槽型。对北京地区的短时强降水过程而言,东北冷涡型低层水汽主要来自于日本海和黄海、渤海,其他类型的短时强降水过程的水汽主要与中国南海或东海的远距离输送有关,其中西来槽型和西风小槽型对应的短时强降水在北京地区的水汽辐合最强。

(2)不同天气系统影响下,北京地区的短时强降水时空分布存在明显差异:从空间分布来看,西来槽型、西风小槽型、东北冷涡型对应的短时强降水带主要沿北京山前成西南—东北走向的带状分布,西南

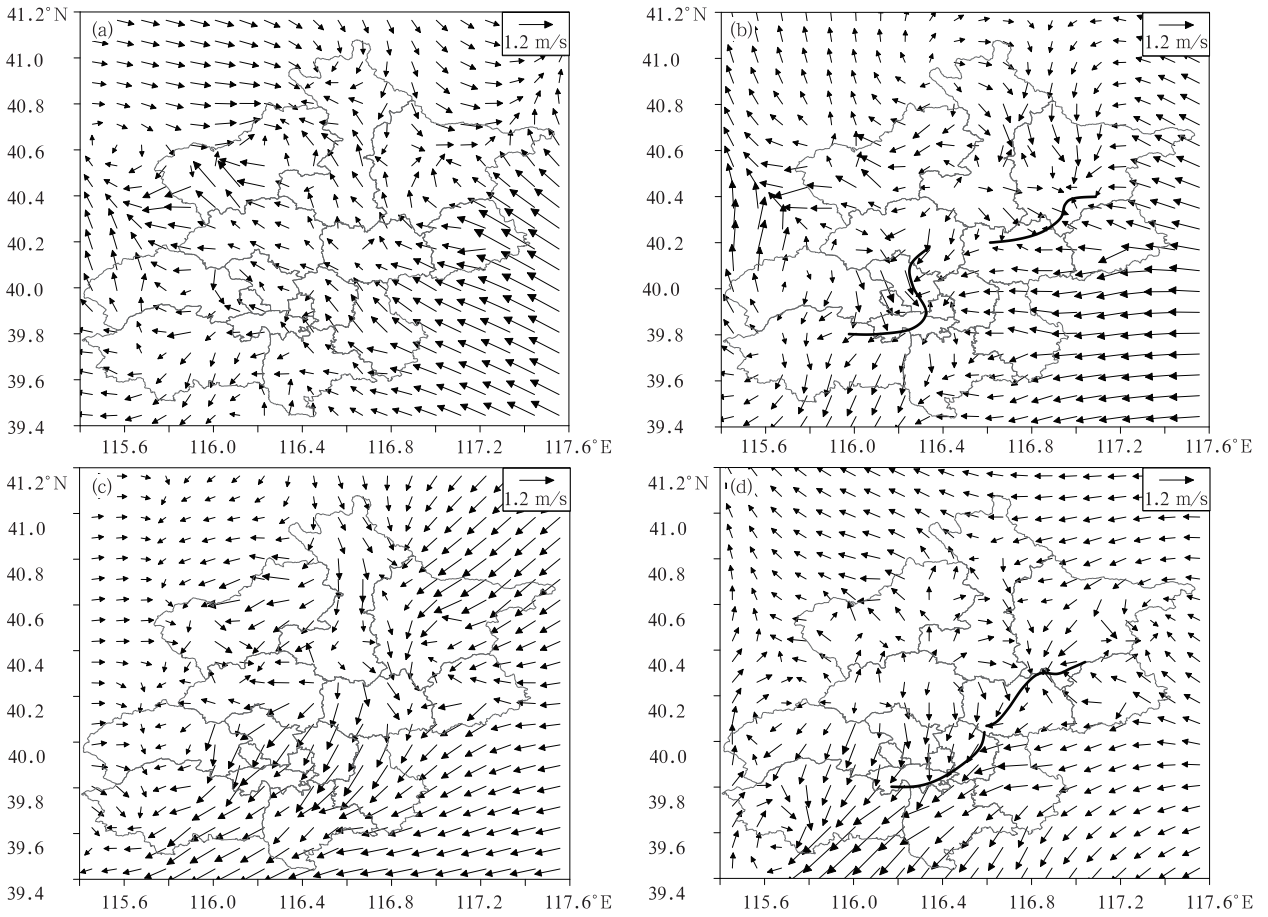


图 11 东北冷涡型地面风场距平

(图中黑实线为辐合线)(a. 15 时, b. 16 时, c. 19 时, d. 20 时)

Fig. 11 Anomalies of surface wind (The thick solid black lines are the convergence lines) for Type III

(a. 15:00 BT, b. 16:00 BT, c. 19:00 BT, d. 20:00 BT)

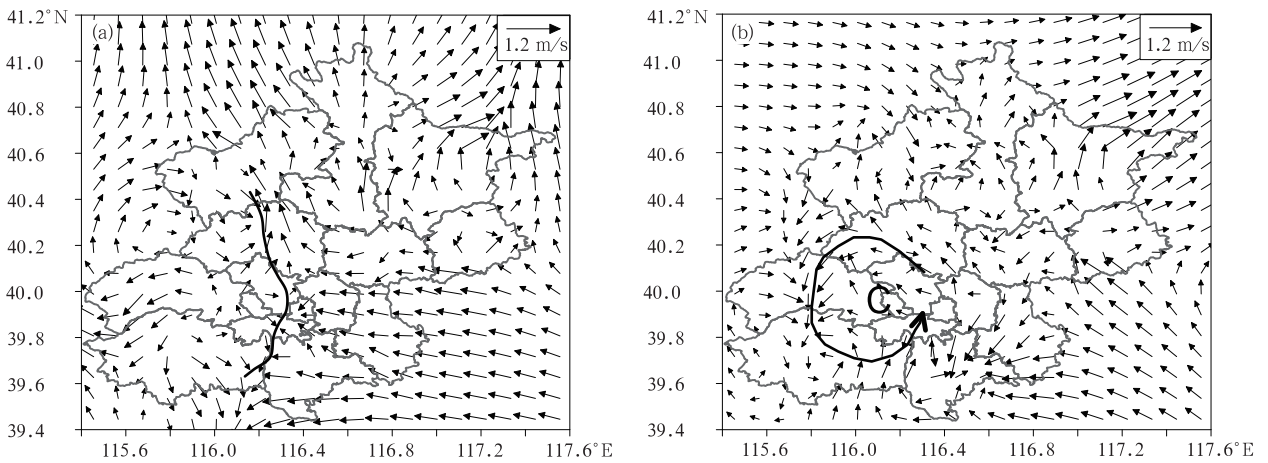


图 12 南支槽型地面风场距平(黑实线为辐合线,C:气旋)(a. 21 时, b. 03 时)

Fig. 12 Anomalies of surface wind (the thick solid black line is the convergence line,

and "C" represents cyclone) for Type IV (a. 21:00 BT, b. 03:00 BT)

山前、北京城区和东北山前地区是短时强降水事件容易发生的3个区域;黄淮低涡倒槽型的短时强降水分布则从北京城区到西北山前成东南—西北走向的带状分布,和其他3型的雨带分布有较大不同。在日变化特征上,低空暖平流主导的西风小槽型和黄淮低涡倒槽型短时强降水夜间多发,冷平流主导的东北冷涡后部型则主要发生在午后,而低空冷暖平流对峙的西来槽型短时强降水主要集中在傍晚至前半夜。

(3)在不同天气环流背景下,北京地区短时强降水的中尺度环流特征各有不同:西来槽型表现为,北京西部、北部山区首先触发局地对流,形成中尺度雷暴高压和冷池,并逐渐组织化,其外围辐散气流(冷池)和偏南暖湿气流主导了对流性系统的发展和移动。西风小槽型主要是近地面层较强的东南风受北京西部地形阻挡,在山前向西南发生绕流,于城区的西部方向形成气旋性环流,而在东北部山前形成一条准静止的地形辐合线;夜间,在低空暖平流的持续作用下,东南气流中的偏南分量显著增强,造成东北部山前地区的辐合抬升作用加强,这可能是这类天气尺度背景下,东北部地区容易出现较大范围、具有夜雨特征的短时强降水的动力学原因。东北冷涡型主要是在近地面偏东南风背景下,系统性的冷空气从北京北部和西部南下,与偏东风形成辐合切变线以及地形抬升运动触发午后的对流性天气;黄淮低涡倒槽型主要是低涡顶部的东南风气流在北京西北山前受山体阻挡向西绕流,在西北山前至城区西部产生气旋性环流,触发对流性天气。

由于受中尺度地面观测资料时间序列长度的限制,选取的个例样本有限,特别是东北冷涡型和黄淮低涡倒槽型,其样本数相对较少,分析的结论并不一定具有气候统计学意义;另外,中尺度系统主导下的对流过程演变为短时强降水事件,不仅与不同尺度天气系统的相互作用有关,而且与对流尺度系统的结构演变有关,这将是下一步希望开展的工作。

参考文献

鲍名. 2007. 近50年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. *大气科学*, 31(5): 779-792. Bao M. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over china and their backgrounds on the large scale circulation. *Chinese J Atmos Sci*, 31(5): 779-792 (in Chinese)

陈炯, 郑永光, 张小玲等. 2013. 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. *气象学报*, 71(3): 367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season. *Acta Meteor Sinica*, 71(3): 367-382 (in Chinese)

程麟生, Kuo Y H, 彭新东等. 1993a. 中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析和数值模拟(I): 诊断分析. *应用气象学报*, 4(3): 257-268. Cheng L S, Kuo Y H, Peng X D, et al. 1993a. Diagnosis and numerical simulation for the genesis and development of mesoscale systems with heavy rainfall part I: Diagnostic analysis. *Quart J Appl Meteor*, 4(3): 257-268 (in Chinese)

程麟生, Kuo Y H, 彭新东. 1993b. 中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析和数值模拟(II): 数值模拟. *应用气象学报*, 4(3): 269-277. Cheng L S, Kuo Y H, Peng X D. 1993b. Diagnosis and numerical simulation for the genesis and development of mesoscale systems with heavy rainfall part II: Numerical simulation. *Quart J Appl Meteor*, 4(3): 269-277 (in Chinese)

丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题. *气象学报*, 52(3): 274-284. Ding Y H. 2014. Some aspects of rainstorm and mesoscale meteorology. *Acta Meteor Sinica*, 52(3): 274-284 (in Chinese)

丁一汇. 2014. 陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献. *大气科学*, 38(4): 616-626, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13226. Ding Y H. 2014. Contributions of Prof. Shiyao Tao to the study of formation conditions and mechanisms of heavy rainfall in China. *Chinese J Atmos Sci*, 38(4): 616-626, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13226 (in Chinese)

郭虎, 季崇萍, 张琳娜等. 2006. 北京地区2004年7月10日局地暴雨过程中的波动分析. *大气科学*, 30(4): 703-711. Guo H, Ji C P, Zhang L N, et al. 2006. A case study of local rainstorm in Beijing on 10 July 2004: The analysis of the gravity wave. *Chinese J Atmos Sci*, 30(4): 703-711 (in Chinese)

冷春香, 陈菊英. 2005. 近50年中国汛期暴雨旱涝的分布特征及其成因. *自然灾害学报*, 14(2): 1-9. Leng C X, Chen J Y. 2005. Distribution characteristic of precipitation and rainstorm in flood periods of recent 50 years in China and its formation cause. *J Nat Disasters*, 14(2): 1-9 (in Chinese)

李娜, 冉令坤, 周玉淑等. 2013. 北京“7.21”暴雨过程中变形场引起的锋生与倾斜涡度发展诊断分析. *气象学报*, 71(4): 593-605. Li N, Ran L K, Zhou Y S, et al. 2013. Diagnosis of the frontogenesis and slantwise vorticity development caused by the deformation in the Beijing “7.21” torrential rainfall event. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 593-605 (in Chinese)

李青春, 苗世光, 郑祥芳等. 2011. 北京局地暴雨过程中近地层辐合线的形成与作用. *高原气象*, 30(5): 1232-1242. Li Q C, Miao S G, Zheng Z F, et al. 2011. Formation and effect of surface convergence line in local rainstorm process of Beijing. *Plateau Meteor*, 30(5): 1232-1242 (in Chinese)

廖晓农, 倪允琪, 何娜等. 2013. 导致“7.21”特大暴雨过程中水汽

- 异常充沛的天气尺度动力过程分析研究. 气象学报, 71(6): 997-1011. Liao X N, Ni Y Q, He N, et al. 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the "7. 21" heavy rain case. Acta Meteor Sinica, 71(6): 997-1011 (in Chinese)
- 全美兰, 刘海文, 朱玉祥等. 2013. 高空急流在北京“7. 21”暴雨中的动力作用. 气象学报, 71(6): 1012-1019. Quan M L, Liu H W, Zhu Y X, et al. 2013. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing rainstorm of 21 July 2012. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1012-1019 (in Chinese)
- 孙建华, 张小玲, 卫捷等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in north China during the 1990s. Climatic Environ Res, 10(3): 492-506 (in Chinese)
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨. 大气科学, 32(6): 1352-364. Sun J S, Yang B. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation. Chinese J Atmos Sci, 32(6): 1352-1364 (in Chinese)
- 陶诗言. 1977. 有关暴雨分析预报的一些问题. 大气科学, 1(1): 64-72. Tao S Y. 1977. Some aspects on the analysis and forecast of the heavy rainfall. Scientia Atmos Sinica, 1(1): 64-72 (in Chinese)
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学, 3(3): 227-238. Tao S Y, Ding Y H, Zhou X P. 1979. The present status of the research on rainstorm and severe convective weathers in China. Scientia Atmos Sinica, 3(3): 227-238 (in Chinese)
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao S Y. 1980. Heavy Rainfalls in China. Beijing: Science Press, 225pp (in Chinese)
- 吴庆梅, 杨波, 王国荣等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象, 38(2): 174-181. Wu Q M, Yang B, Wang G R, et al. 2012. Effects of topography and urban heat to a meso- β torrential rain in Beijing area. Meteor Mon, 38(2): 174-181 (in Chinese)
- 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春等. 2013. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用. 大气科学, 37(4): 829-840. Zhang W L, Cui X P, Wang Y C, et al. 2013. Roles of low-level easterly winds in the local torrential rains of Beijing. Chinese J Atmos Sci, 37(4): 829-840 (in Chinese)
- 张小玲, 余蓉, 杜牧云. 2014. 梅雨锋上短时强降水系统的发展模式. 大气科学, 38(4): 770-781. Zhang X L, Yu R, Du M Y. 2014. Evolution pattern of short-time intense precipitation-producing systems associated with Meiyu front. Chinese J Atmos Sci, 38(4): 770-781 (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. 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. Acta Meteor Sinica, 71(5): 817-824 (in Chinese)
- 周放, 孙照渤, 许小峰等. 2014. 中国东部夏季暴雨日数的分布特征及其与大气环流和海温的关系. 气象学报, 72(3): 447-464. Zhou F, Sun Z B, Xu X F, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics of summer rainstorm days in eastern China and their relationships with the atmospheric circulation and SST. Acta Meteor Sinica, 72(3): 447-464 (in Chinese)
- Tao S Y, Ding Y H. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China. Bull Amer Meteor Soc, 62(1): 23-30