黎慧琦, 崔晓鹏, 李琴, 等. 2019. SANDRA法对北京小时强降水扰动环流场的分型研究 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 445−454. Li Huiqi, Cui Xiaopeng, Li Qin, et al. 2019. Anomaly-based classification study of synoptic patterns associated with hourly heavy rainfall over Beijing by SANDRA method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 445−454. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18046

SANDRA法对北京小时强降水扰动环流场的分型研究

黎慧琦[1,2,3] 崔晓鹏[1,2,4] 李琴[5] 吴凡[1,2]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室，北京100029
2 中国科学院大学，北京100049
3 中国气象局广州热带海洋气象研究所，广州510640
4 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京210044
5 重庆市气象局，重庆401147

摘　要　利用cost733class软件中的SANDRA（Simulated ANnealing and Diversified RAndomization）客观分型方法对北京地区2007～2014年暖季5～9月的小时强降水日的500 hPa扰动位势高度场进行分型研究。结果显示，所划分的4类环流形势分别在蒙古、东北—华北地区、河套地区和俄罗斯远东地区存在扰动低压区。根据4类环流形势的质心，将2007～2014年暖季所有日划归4类，计算每类小时强降水日占各自类型总天数的百分比得出蒙古扰动低压类的小时强降水日出现概率最大。统计小时强降水日的探空廓线得出，925 hPa和850 hPa的比湿中位数分别为13.01 g kg^{-1}和10.64 g kg^{-1}，这2个层级上最常出现的风向是180°～225°。

关键词　分型　小时强降水　扰动　SANDRA客观分型方法
文章编号　1006-9585(2019)04-0445-10　　**中图分类号**　P448　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18046

Anomaly-Based Classification Study of Synoptic Patterns Associated with Hourly Heavy Rainfall over Beijing by SANDRA Method

LI Huiqi[1,2,3], CUI Xiaopeng[1,2,4], LI Qin[5], and WU Fan[1,2]

1 *Key Laboratory of Cloud−Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Institute of Tropical and Marine Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Guangzhou* 510640
4 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044
5 *Chongqing Meteorological Bureau*, *Chongqing* 401147

Abstract　Using SANDRA (Simulated ANnealing and Diversified RAndomization), the hourly heavy rainfall days in Beijing during the warm seasons (May−September) of 2007−2014 are classified into four types based on 500 hPa anomalous geopotential height fields. There is an anomalous low in Mongolia, Northeast and North China, Hetao region, and Russian Far East, respectively, in the four types. All the days during the warm seasons of 2007−2014 are then

收稿日期　2018-03-21；**网络预出版日期**　2018-06-09
作者简介　黎慧琦，女，1990年出生，博士研究生，主要从事强降水机理研究。E-mail: lihuiqi@mail.iap.ac.cn
通讯作者　崔晓鹏，E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点基础研究发展计划项目2014CB441402，国家自然科学基金项目41475040
Funded by　National Basic Research Program of China (Grant 2014CB441402), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475040)

assigned to one of the four types according to the centroids of the types. The result shows that the type in which an anomalous low is located in Mongolia has the largest probability of hourly heavy rainfall. The statistical analysis of sounding on hourly heavy rainfall days reveals that the median specific humidity values of 925 hPa and 850 hPa are 13.01 g kg^{-1} and 10.64 g kg^{-1}, respectively, and that the wind direction in the range of 180°−225° is dominant at these two levels.

Keywords Classification, Hourly heavy rainfall, Anomaly, SANDRA method

1 引言

小时降水量超过20 mm的短时强降水容易造成城市积水内涝、泥石流和山洪等灾害，甚至带来生命和财产损失。近年来，北京地区不时遭受短时强降水的袭击，对强降水的预报一直是业务的重点问题。强降水的发生与多种尺度（从云微物理、对流尺度、中尺度到大尺度）的过程及其相互作用密切相关。天气分型是研究大尺度环流的一个重要方法。气象研究者利用不同的方法对不同地区的强对流或暴雨天气形势进行分型研究（孙明生等，1996；孙建华等，2005；熊亚军等，2012；李江萍等，2012；冯志刚等，2013；许爱华等，2014；闵晶晶等，2015；钱维宏等，2016；张永婧等，2017）。其中，孙明生等（1996）将北京地区强对流天气分为东北冷涡型、西北冷涡型、斜槽型、西来槽型和槽后型。熊亚军等（2012）将北京地区的雷暴天气环流形势分为东北低涡低槽型、贝蒙低涡低槽型和西来槽等11类。闵晶晶等（2015）利用自组织特征映射方法对京津冀地区强对流天气进行天气分型，分成暖湿切变型、冷涡型、西北气流型和西风槽型。不同天气形势在不同月份主要出现的强对流天气类型有差异。以往的分型工作往往根据物理量的原始场进行分型，而钱维宏等（2012，2016）指出扰动场对暴雨的指示能力比总体形势场强，因此本文使用扰动场作为分型对象，对北京地区2007～2014年暖季（5～9月）小时强降水日的天气环流形势进行分型研究，探讨不同类型的扰动场特征，为业务预报提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用北京地区自动气象站逐5 min的观测数据挑选小时强降水日。数据经过包括极值检验、时间连续性检验等质量控制过程。对于降水量数据，5 min降水量超过40 mm的数据被剔除（窦以文等，2008）；将时间相连的12个5 min降水记录累加得到1 h降水量，若1 h降水量超过145 mm，则将相应的数据剔除（任芝花等，2010，2015）。如果一个自动站的上述被剔除数据和缺测数据占该自动站记录的所有数据量超过5%，则不使用该自动站进行统计。然后根据王国荣和王令（2013）的方法，本文中的小时强降水事件定义如下：开始时刻所记录的5 min降水量大于或等于0.1 mm，随后1 h累积降水量大于或等于20 mm；每隔5 min计算新的1 h累积降水量，直到1 h累积降水量小于或等于5 mm，则认为该事件结束。小时强降水日定义为当日08:00（北京时间，下同）到次日08:00之间北京地区至少有5个自动站记录到小时强降水事件。由此统计得北京地区2007～2014年暖季共149个小时强降水日（Li et al.，2017）。分型所使用的数据是欧洲中心0.75º（纬度）×0.75º（经度）的再分析资料。

2.2 SANDRA客观分型方法

本文利用cost733class分型软件（Philipp et al.，2014）（http://cost733. geo. uni-augsburg. de[2018-03-01]）进行客观分型。相较于主观分型方法，客观分型方法更方便应用于业务工作中。使用500 hPa扰动位势高度场作为分型对象。扰动场由原始场减去30年气候平均值得到。cost733class软件提供了多种分型方法，首先对多种分型方法进行评估。参与评估的方法包括倾斜旋转T模态主成分分析法（PCT）、正交旋转T模态主成分分析法（PTT）、Lund领导者算法（LND）、Kirchhofer领导者算法（KIR）、k均值法（KMN），使用不同种子的k均值法（CKM），模拟退火算法和多元化随机化技术相结合的SANDRA（Simulated ANnealing and Diversified RAndomization）法，基于随机过程的方法。每个方法的详细介绍见Philipp et al.（2014）。使用可释方差（E_v）作为评估指数。

$$E_V = 1 - \frac{W_{ss}}{T_{ss}}, \quad (1)$$

其中，W_{ss}是各类内每个元素偏离该类中心的偏差平方和，T_{ss}是所有元素偏离总体中心的偏差平方和。可释方差越大，表示各类内的成员越相近，分型效果越好。评估结果见表1，可见SANDRA方法表现较优，因此本文选用SANDRA方法进行分型。

SANDRA方法是一种类似k均值聚类分析的非系统聚类分析方法（Philipp et al.，2007）。SANDRA的结果往往优于传统的k均值聚类法（Philipp et al.，2014）。模拟退火算法是根据熔融金属中的粒子被重新加热退火过程提出的。在模拟退火聚类分析中，初始的分类是随机的，每次迭代都会检查每个对象是否被归到适当的类别中，若不是则重新调整，重新调整后的分类状态的接受概率值（P）大于一个由随机数产生器产生的0~1的随机数，则接受重新调整后的分类，否则保持调整前的分类。

$$P = \exp\left(\frac{D_{old} - D_{new}}{T}\right), \quad (2)$$

其中，D_{old}是调整前的欧氏距离，D_{new}是调整后的欧氏距离；T是控制参数，称作退火温度，T初始为一个较大的值，然后按$T_{i+1}=CT_i$变化，其中C称为冷却系数，小于1。

在每次迭代中，检查每个对象归到不同类别时的整体分类状态，对于各个类别次序是随机的。每次迭代后T变小，直到T很小而C非常接近1时，计算过程需要非常长的时间，而且对随机数稍有依赖性。因此，为了得到接近全局最优的结果，结合使用多元化随机化技术。多元化随机化技术是指在整个迭代过程中，随机对每个对象和类别排序，以减小向局部最优解收敛的可能性。总的来说，在SANDRA方法中，执行模拟退火聚类分析1000次，第一次令C=0.99990，接下来的999次使用C=0.90，最后选取最优者。这种方法能有效减少运行时间。

模拟退火算法和多元化随机化技术这两种技术的结合使得结果能更接近全局最优。

表1 分型方法评估结果

Table 1 Evaluation results for different classification methods

方法	可释方差
PCT	0.317
PTT	0.285
LND	0.315
KIR	0.089
KMN	0.373
CKM	0.374
SANDAR	0.375
RAN	0.050

3 分型结果

用SANDRA方法对北京地区小时强降水日08:00的500 hPa扰动位势高度场进行分型。为了得到更合理的环流形势分型，分别尝试分成3、4、5类进行对比。结果显示，分成4类的环流形势场之间的差别更明显。4个类别的样本数分别为：57（38.3%）、40（26.8%）、31（20.8%）、21（14.1%）。从500 hPa总位势高度场看，第一类北京受西来槽影响，位于槽前；第二、三类北京分别受东北低涡和西北低涡影响。下面讨论四类环流形势各自对应的小时强降水日的合成平均场，重点分析四类环流形势的扰动场特征（图1）。

3.1 蒙古扰动低压型

500 hPa扰动位势高度场显示，蒙古地区处于扰动低压区，与其形成鲜明对比的是我国华北和东北地区均是扰动高压区（图1a）。850 hPa的扰动风场上，北京地区的偏南风比气候平均强，而且强于河套扰动低压型，相当位温（θ_e）偏高的程度也大于其它3种类型。500 hPa位势高度场显示，北京西面有西来槽，850 hPa上从南海到北京均为偏南风，向北伸的暖舌明显（图2a）。平均可降水量比气候平均多6～7 mm，达42 mm，西部达44 mm（图3a）。此类环流形势下发生的小时强降水日集中于5月到9月上半月，发生在7月的最多，从5月到7月逐渐增多，8月开始减少（图4）。

3.2 东北扰动低涡型

这类型在500 hPa上，整个华北地区都是扰动低压区，扰动低压中心在我国东北地区和朝鲜半岛附近，北京位于扰动低压向西伸的低压槽上，即北京上空对流层中层位势高度比气候平均要低（图1b）。850 hPa的扰动风场上，北京地区是一个气旋，θ_e比气候平均高。从总体形势场上看，500 hPa的低压主体位于黑龙江地区，形势与前人提出的东北冷涡型类似（孙明生等，1996），850 hPa在该处

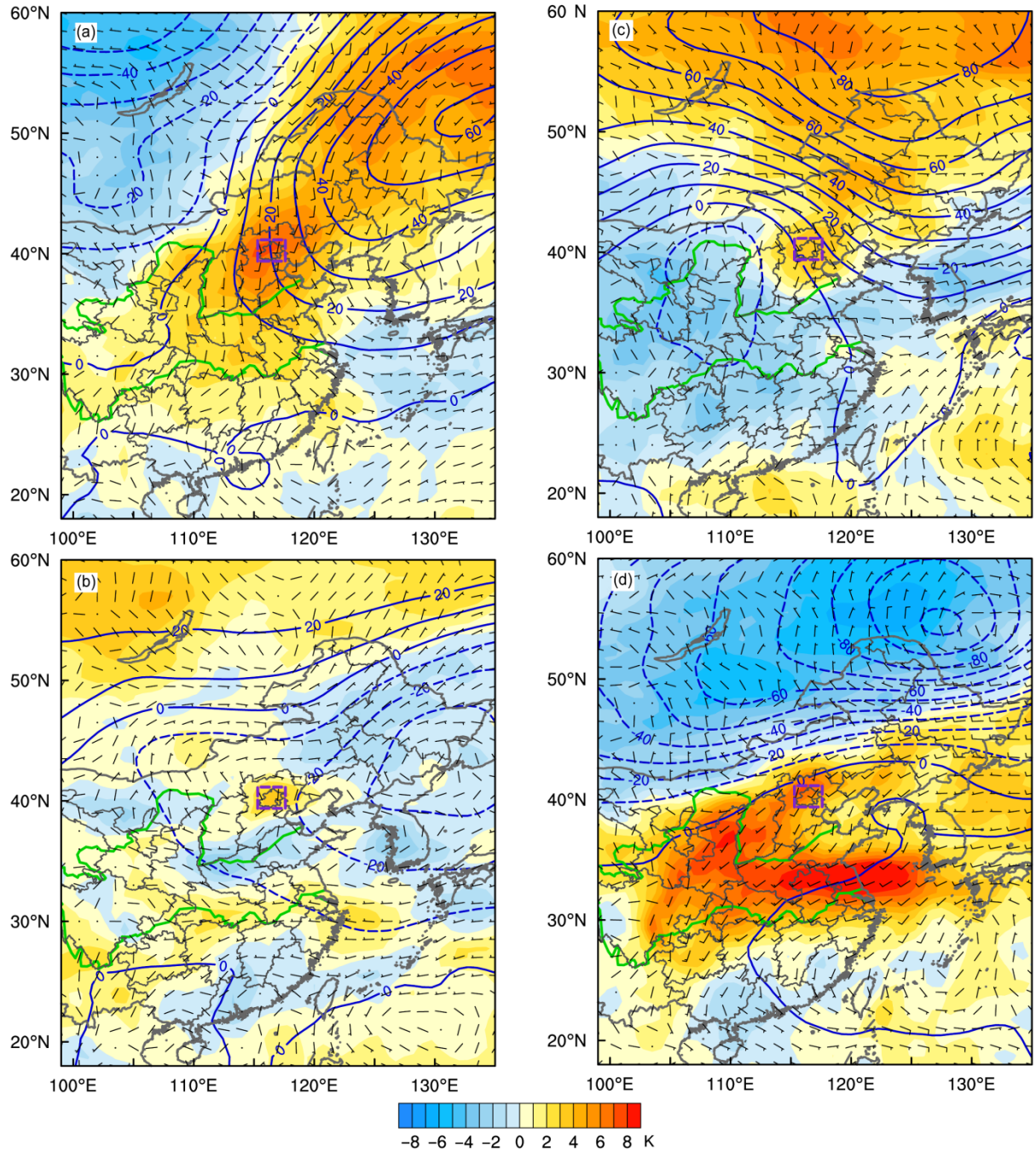

图1 4类天气环流形势的500 hPa扰动位势高度（蓝色等值线，单位：gpm）、850 hPa扰动相当位温（填色，单位：K）、850 hPa扰动风场（矢量）。图中给出的是4类天气环流形势各自对应的小时强降水日的合成平均场。（a）蒙古扰动低压型；（b）东北扰动低涡型；（c）河套扰动低压型；（d）俄罗斯远东扰动低压型。紫色方框指示北京所在位置

Fig. 1 500-hPa anomalous geopotential height (blue contour, units: gpm), 850-hPa anomalous potential temperature (shaded, units: K), 850-hPa anomalous winds (vector) for four types of synoptic patterns. Composite fields for the hourly heavy rainfall days of each type are shown in the figures. (a) Mongolia anomalous low; (b) Northeast China anomalous low; (c) Hetao anomalous low; (d) Russian Far East anomalous low. The purple rectangle denotes the position of Beijing

对应的是气旋性环流。本文的分型结果同时展现出东北低涡类型中有时在华北地区伴随出现横槽的形势，这需要预报员更多关注。北京地区500 hPa上为西北气流，850 hPa上为西南风。内蒙古地区在850 hPa存在气旋性环流（图2b）。图中给出的是多个例的平均场，每个个例的低压位置稍有偏差，这

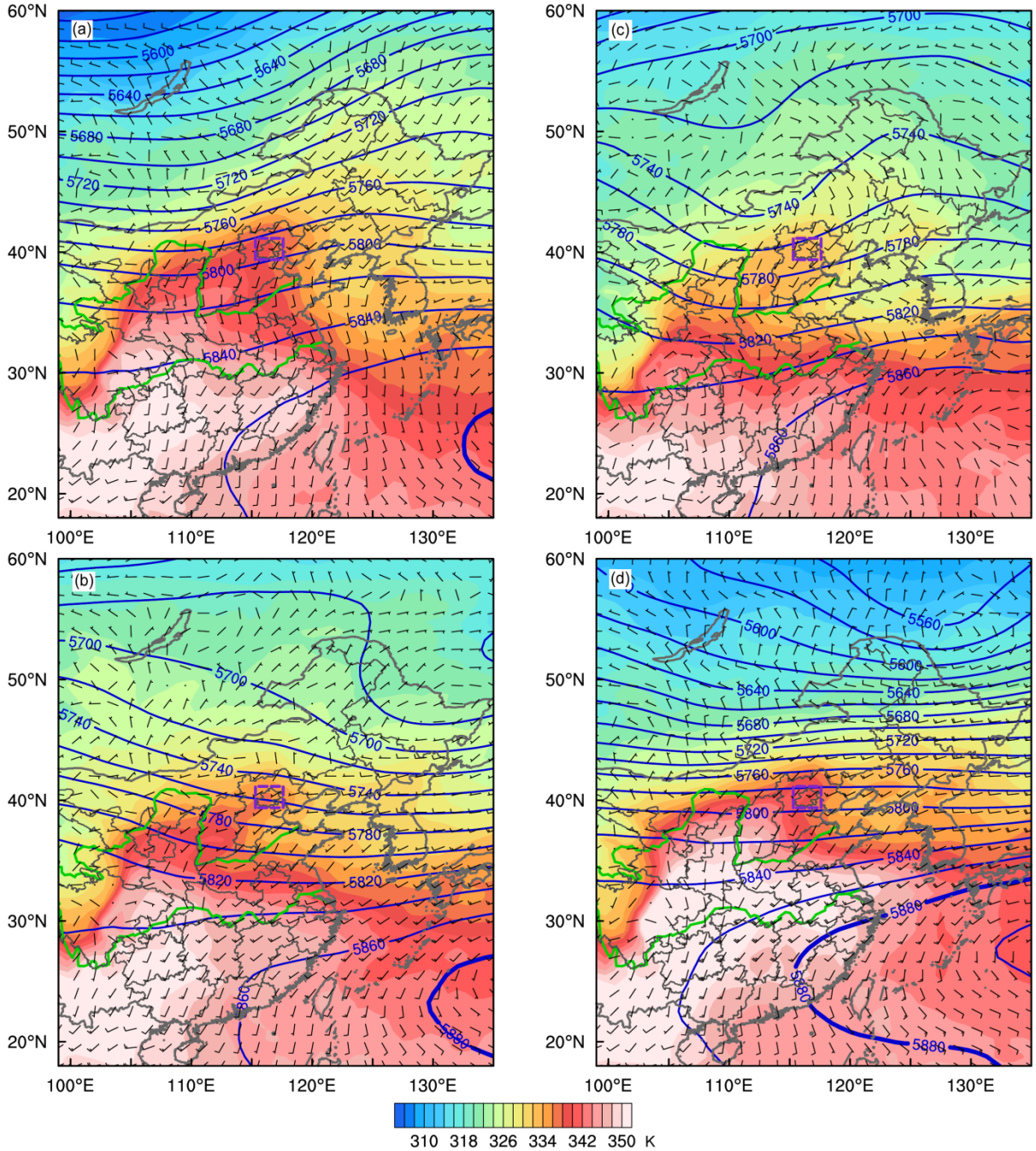

图2　4类天气环流形势的500 hPa位势高度（蓝色等值线，单位：gpm）、850 hPa相当位温（填色，单位：K）、850 hPa风场（矢量）。（a）蒙古扰动低压型；（b）东北扰动低涡型；（c）河套扰动低压型；（d）俄罗斯远东扰动低压型。紫色方框指示北京所在位置

Fig. 2　500-hPa geopotential height (blue contour, units: gpm), 850-hPa potential temperature (shaded, units: K), 850-hPa winds (vector) for four types of synoptic patterns. (a) Mongolia anomalous low; (b) Northeast China anomalous low; (c) Hetao anomalous low; (d) Russian Far East anomalous low. The purple rectangle denotes the position of Beijing

可能是500 hPa位势高度平均场没有出现闭合等压线的原因。北京地区的平均可降水量也有约40 mm，但仅比气候平均多1~2 mm（图3b）。属于这类环流形势的小时强降水日主要发生在5月到9月上半月，7月下半月发生的频数明显高于其它时间（图4）。

3.3　河套扰动低压型

500 hPa扰动位势高度图上，在河北以西的河套地区存在一个扰动低压。北京地区500 hPa位势高度比气候平均高，850 hPa上偏南风比气候平均

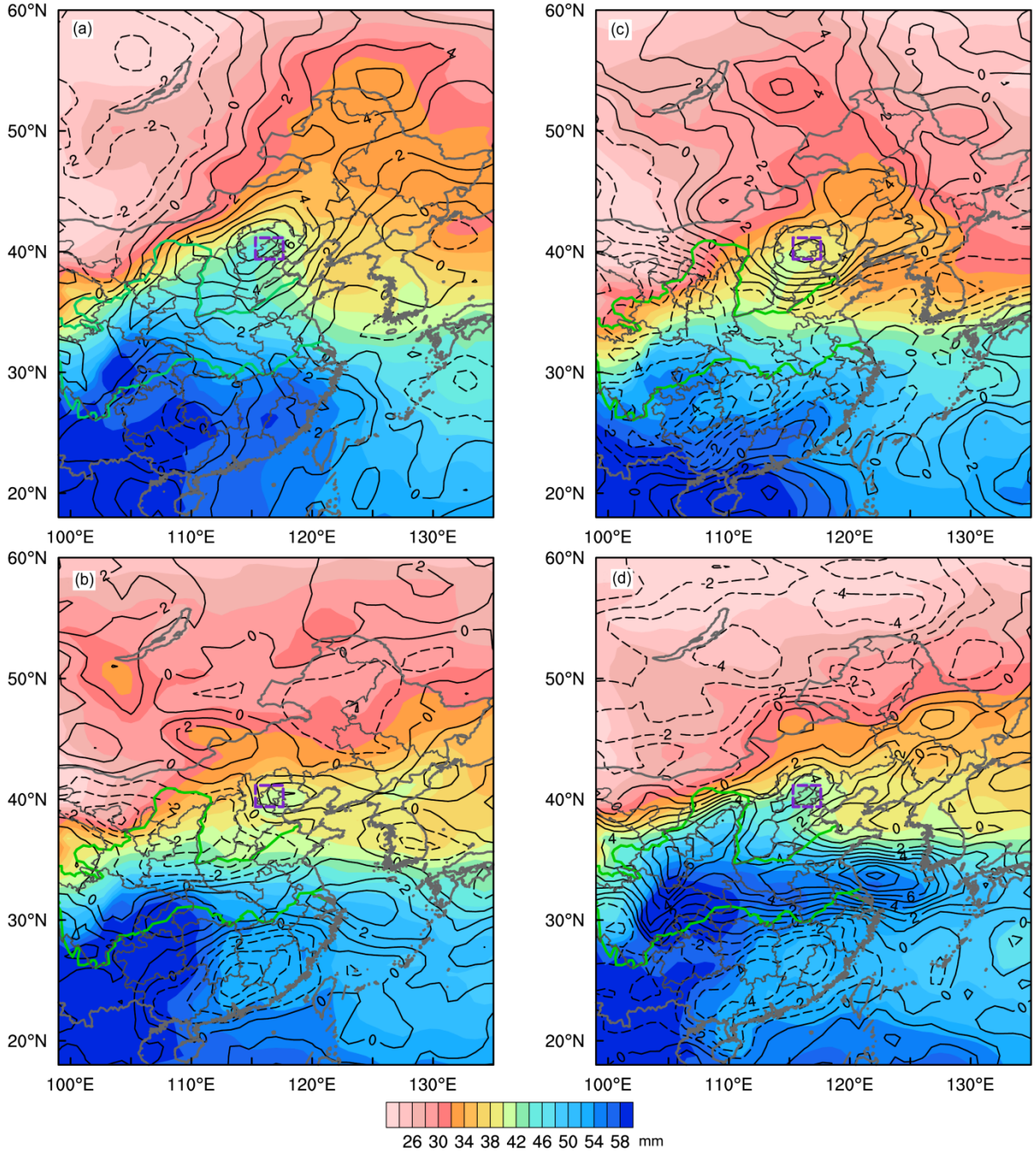

图3 4类天气环流形势的整层可降水量（填色，单位：mm）和扰动可降水量（黑色等值线，单位：mm）。（a）蒙古扰动低压型；（b）东北扰动低涡型；（c）河套扰动低压型；（d）俄罗斯远东扰动低压型。紫色方框指示北京所在位置

Fig. 3 Precipitable water (shaded, units: mm) and anomalous precipitable water (black contour, units: mm) for four types of synoptic patterns. (a) Mongolia anomalous low; (b) Northeast China anomalous low; (c) Hetao anomalous low; (d) Russian Far East anomalous low. The purple rectangle denotes the position of Beijing

偏强，有利于南方暖空气向北输送，θ_e比气候平均高（图1c）。而在总体形势场上，500 hPa在河北西北面，内蒙古与蒙古地区存在低压（图2c），这与前人提出的西北低涡型类似（孙明生等，1996）。对应850 hPa该地区存在一个气旋。北京地区受500 hPa蒙古低压东南部的槽前气流及850 hPa气旋东南部偏南气流的影响，处于850 hPa的高θ_e区，北京西北面等θ_e线较密集。北京地区的可降水量比气候平均多约5 mm，西南部平均可降水量较高，约40 mm，北京其它地区有约38 mm的可降水量

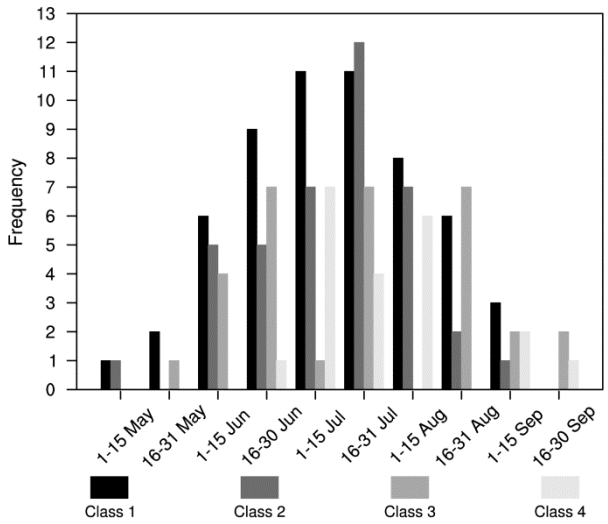

图4　4类天气环流形势下小时强降水日的频数的逐半月变化。颜色由深到浅的柱状依次代表蒙古扰动低压型（Class 1）、东北扰动低涡型（Class 2）、河套扰动低压型（Class 3）、俄罗斯远东扰动低压型（Class 3）

Fig. 4　Semi-monthly variation of the frequency of hourly heavy rainfall days for four types of synoptic patterns. Class 1: Mongolia anomalous low; Class 2: Northeast China anomalous low; Class 3: Hetao anomalous low; Class 4: Russian Far East anomalous low

（图3c）。与前两类不同，9月下半月也出现这类环流形势下的小时强降水日，6月下半月、7月下半月和8月下半月发生较多（图4）。

3.4　俄罗斯远东扰动低压型

这类型的个例数最少，21个，占总数的14.1%。500 hPa上，在黑龙江以北，俄罗斯远东地区是一个扰动低压，位置比东北扰动低涡型更偏北。北京地区的位势高度处于与气候平均相近的状态，比气候平均稍高（图1d）。850 hPa上，北京地区仍为扰动南风，θ_e比气候平均偏高。在500 hPa总位势高度上，我国北方地区是平直西风气流。北京地区850 hPa上为西南风，高θ_e区偏于北京西面山区（图2d）。北京地区平均可降水量达42 mm，比气候平均多3～4 mm（图3d）。这类环流形势下的小时强降水日总体来说在暖季中发生得比前面三类都晚，集中在6月下半月到9月，7月上半月和8月上半月较多（图4）。需要指出的是，由于此类型的低压中心偏北，距离北京地区较远，难以对北京地区产生很大的影响，但可能在东北地区引发强降水。

根据上面分型所得的4个类型的质心，对2007～2014年暖季所有日08:00的500 hPa扰动位势高度场进行分型。属于蒙古扰动低压型、东北扰动低涡型、河套扰动低压型和俄罗斯远东扰动低压型的日数依次为348、375、233和268。每类小时强降水日占各自类型总天数的百分比依次为16.4%、10.7%、13.3%和7.8%，也就是说，蒙古扰动低压型和河套扰动低压型环流形势下，北京出现小时强降水日的概率较高。

利用小时强降水日的南郊观象台平均探空廓线研究小时强降水日的相关特征。小时强降水日925 hPa、850 hPa、700 hPa的比湿中位数依次分别为13.01、10.64、5.62 g kg^{-1}；925 hPa上，50%的比湿在10.86～15.54 g kg^{-1}；850 hPa上，50%的比湿在9.13～12.62 g kg^{-1}；700 hPa上，50%的比湿在4.19～7.08 g kg^{-1}。4个类型在925 hPa上的比湿中位数依次为13.44、12.52、12.13、14.97 g kg^{-1}；在850 hPa上的比湿中位数依次为11.51、10.29、10.36、10.22 g kg^{-1}；在700 hPa上的比湿中位数依次为5.71、5.87、5.50、5.31 g kg^{-1}。第一类在925 hPa和850 hPa上的比湿较高。第四类的925 hPa和700 hPa比湿差值在4类中最大。从所有小时强降水日925 hPa、850 hPa和700 hPa的风向分布情况可见（图5a），925 hPa和850 hPa最常出现的是西南偏南风（风向在180°～225°），其次是西南偏西风（风向在225°～270°），700 hPa则最常出现西南偏西风，其次是西北偏西风（风向在270°～315°）。结合分型结果，可对预报作出以下提示：当500 hPa扰动位势高度出现类似蒙古扰动低压型，而且南郊观象台的探空测得925 hPa的比湿大于13 g kg^{-1}，850 hPa的比湿大于10 g kg^{-1}，风向为偏南风，则北京地区出现小时强降水事件的概率较高。从4个类型各自在3个层次上的风向分布看，第一类蒙古扰动低压型的分布（图5b）与所有小时强降水日的风向分布（图5a）相似；第一、三、四类在925 hPa上出现频数最高的都是西南偏南风（图5b、5d、5e），在700 hPa上最常出现的是西南偏西风，而第二类比较不一样（图5c），925 hPa上出现频数最高的是东北偏北风（风向在0°～45°），其次才是西南偏南风，700 hPa上最常出现的是西北偏西风，其次才是西南偏西风；4种类型在850 hPa上的风向分布差异较大，第一类最常出现的是西南偏南风，与总体分布一致，第二类和第四类出现西南偏南和西南偏西风的频数相当，第三类出现西南偏西风的频数稍高。

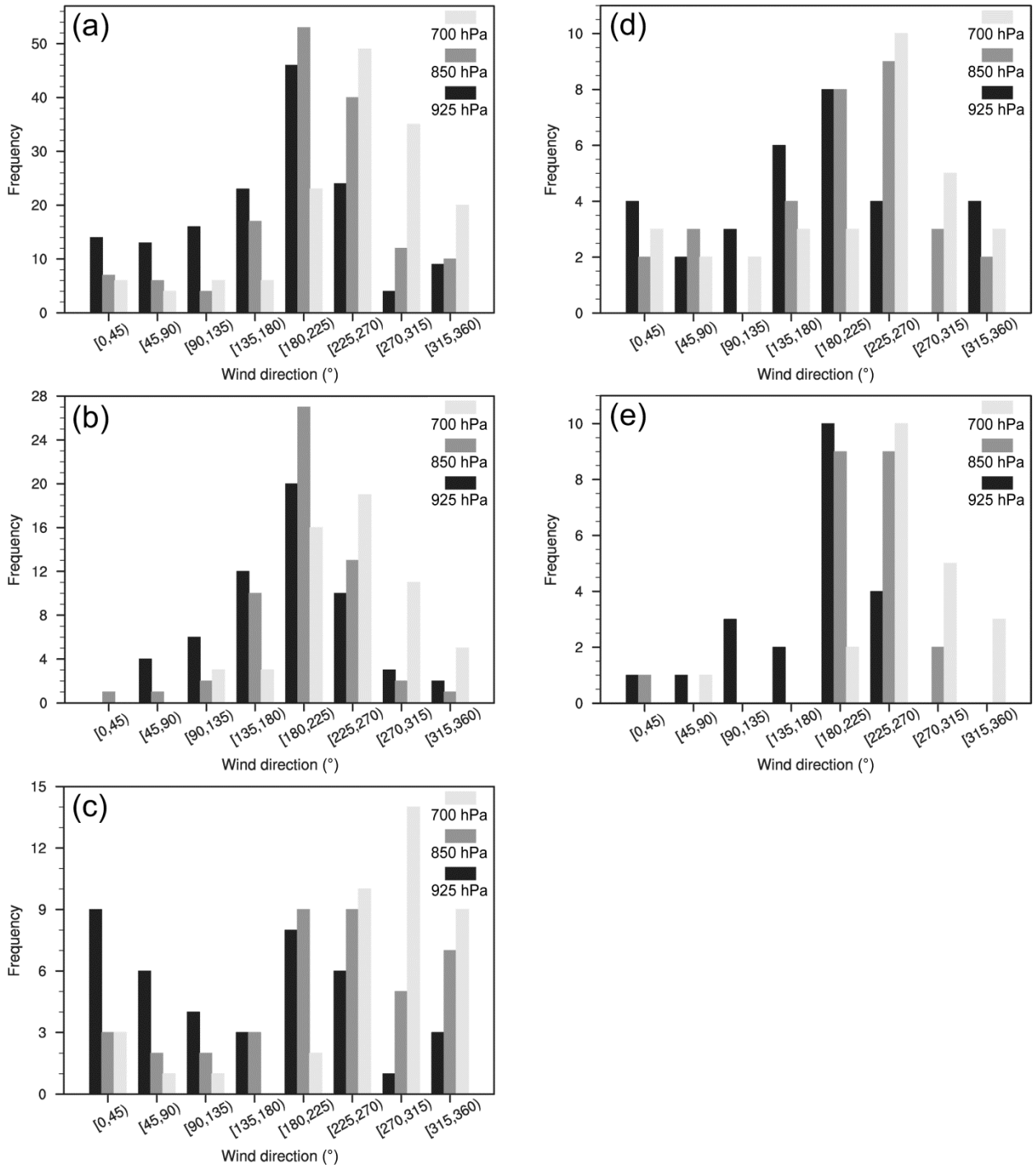

图5 北京南郊观象台测得925 hPa（黑色）、850 hPa（深灰）和700 hPa（浅灰）上的风向分布频次：（a）所有小时强降水日；（b）蒙古扰动低压型；（c）东北扰动低涡型；（d）河套扰动低压型；（e）俄罗斯远东扰动低压型

Fig. 5 Frequency of different wind directions at 925 hPa (black), 850 hPa (dark gray), and 700 hPa (light gray) from the soundings for: (a) all hourly heavy rainfall days; (b) Mongolia anomalous low; (c) Northeast China anomalous low; (d) Hetao anomalous low; (e) Russian Far East anomalous low

4 结论

本文利用cost733class软件中的SANDRA客观分型方法对北京地区2007～2014年暖季5～9月的小时强降水日08:00的500 hPa扰动位势高度场进行分型研究，探讨不同类型扰动位势高度场的特征。SANDRA方法将模拟退火算法和多元化随机化技术相结合，它的结果往往优于传统的k均值聚

类法（Philipp et al.，2014），对比多种分型方法的评估结果也显示SANDRA方法表现较优。

（1）分型结果分成4类，4类分别在蒙古、东北—华北地区、河套地区和俄罗斯远东地区存在扰动低压区，4类的频数依次递减。

（2）根据4类的质心，将2007～2014年5～9月所有日的500 hPa扰动位势高度场划归4类，计算每类小时强降水日占各自类型总天数的百分比得到蒙古扰动低压类中小时强降水日的占比最大。

（3）统计小时强降水日的探空廓线发现，925 hPa和850 hPa的比湿中位数分别为13.01 g kg^{-1}和10.64 g kg^{-1}，这2个层级上最常出现的风向的是180°～225°。可以说，当500 hPa扰动位势高度场出现类似蒙古扰动低压型，且探空测得925 hPa的比湿大于13 g kg^{-1}，850 hPa的比湿大于10 g kg^{-1}，风向为西南偏南风时，北京地区有较大的可能出现小时强降水事件。

本文主要针对扰动位势高度场开展分析，而结合500 hPa扰动温度场、500 hPa和850 hPa扰动位势高度场看（图略），4个类型在各自500 hPa扰动低压中心附近区域对应的是扰动温度负值区，其中蒙古扰动低压型和俄罗斯远东扰动低压型的扰动温度负值区更明显，中心的扰动温度值比另外两个类型的要低；除了河套扰动低压型外，其它3个类型在各自500 hPa扰动低压中心位置附近，在850 hPa上也是扰动低压区，而河套扰动低压型在850 hPa上，在河套地区附近是扰动位势高度正值区。从总体形势场上看，蒙古扰动低压型和俄罗斯远东低压型在500 hPa低压区附近有较强的冷区，水平温度梯度较大；俄罗斯远东扰动低压型在850 hPa上，我国黑龙江以北，俄罗斯远东地区仍是一个强低压中心，低压系统深厚；在850 hPa上，蒙古扰动低压型、东北扰动低涡型和河套扰动低压型分别在贝加尔湖东面、黑龙江和内蒙古地区有低压中心，但强度不及俄罗斯远东扰动低压型。由此可见，4个类型的不同层次温压场配置、斜压性特征和深厚性特征等也有所不同，未来将针对这些问题以及水汽输送通道等特征开展进一步的研究。

参考文献（References）

窦以文, 屈玉贵, 陶士伟, 等. 2008. 北京自动气象站实时数据质量控制应用[J]. 气象, 34(8): 77−81. Dou Yiwen, Qu Yugui, Tao Shiwei, et al. 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(8): 77−81.

冯志刚, 程兴无, 陈星, 等. 2013. 淮河流域暴雨强降水的环流分型和气候特征[J]. 热带气象学报, 29(5): 824−832. Feng Zhigang, Cheng Xingwu, Chen Xing, et al. 2013. The classification of the circulations and the climatic characteristics of rainstorms in Huaihe River basin[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29(5): 824−832. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.05.012

Li H, Cui X, Zhang D L. 2017. A statistical analysis of hourly heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region during the warm seasons of 2007-2014[J]. International Journal of Climatology, 37: 4027−4042, doi:10.1002/joc.4983.

李江萍, 杜亮亮, 张宇, 等. 2012. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析[J]. 高原气象, 31(6): 1582−1590. Li Jiangping, Du Liangliang, Zhang Yu,et al. 2012. Analysis on circulation pattern and water vapor source of heavy precipitation in Maqu region[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(6): 1582−1590.

闵晶晶, 邓长菊, 曹晓钟, 等. 2015. 强对流天气形势聚类分析中SOM方法应用[J]. 气象科技, 43(2): 244−249. Min Jingjing, Deng Changju, Cao Xiaozhong, et al. 2015. Synoptic circulation pattern clustering analysis of severe convective weather based on self-organizing maps (SOM)[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 43(2): 244−249. doi: 10.3969/j. issn. 1671-6345.2015.02.015

Philipp A, Della-Marta P M, Jacobeit J, et al. 2007. Long-term variability of daily north atlantic-european pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering[J]. J. Climate, 20 (16): 4065−4095. doi:10.1175/jcli4175.1

Philipp A, Beck C, Esteban P, et al. 2014. Cost733class-1.2 User Guide [M]. http://cost733. geo. uni-augsburg. de/download/cost733class-1.2/cost733class_userguide.pdf

钱维宏, 单晓龙, 朱亚芬. 2012. 天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力[J]. 地球物理学报, 55(5): 1513−1522. Qian Weihong, Shan Xiaolong, Zhu Yafen. 2012. Capability of regional-scale transient wind anomalies to indicate regional heavy rains[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(5): 1513−1522. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.008

钱维宏, 蒋宁, 杜钧. 2016. 中国东部7类暴雨异常环流型[J]. 气象, 42(6): 674−685. Qian Weihong, Jiang Ning, Du Jun. 2016. Seven anomalous synoptic patterns of regional heavy rain in eastern China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(6): 674−685. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.003

任芝花, 赵平, 张强, 等. 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J]. 气象, 36(7): 123−132. Ren Zhihua, Zhao Ping, Zhang Qiang, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(7): 123−132.

任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制[J]. 气象, 41(10): 1268−1277. Ren Zhihua, Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in

China[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(10): 1268−1277. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.010

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[J]. 气候与环境研究, 10(3): 492−506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie,et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(3): 492−506. doi: 10.3969/j. issn. 1006-9585.2005.03.020

孙明生, 汪细明, 罗阳, 等. 1996. 北京地区强对流天气展望预报方法研究[J]. 应用气象学报, 7(3): 336−343. Sun Mingsheng, Wang Ximing, Luo Yang,et al. 1996. A prospect forecasting method study of severe convective weather in Beijing area[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorlolgy (in Chinese), 7(3): 336−343.

王国荣, 王令. 2013. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 32(3): 276−279. Wang Guorong, Wang Ling. 2013. Temporal and spatial distribution of short-time heavy rain of Beijing in summer[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32(3): 276−279. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.012

熊亚军, 廖晓农, 于波, 等. 2012. 基于天气分型的北京地区雷电潜势预报预警系统[J]. 灾害学, 27(2): 67−71, 81. Xiong Yajun, Liao Xiaonong, Yu Bo, et al. 2012. Warning and forecast system of potential thunderstorm based on weather patterns in Beijing[J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 27(2): 67−71, 81. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2012.02.014

许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400−411. Xu Aihua, Sun Jisong, Xu Dongbei, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(4): 400−411. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002

张永婧, 高帆, 于丽娟, 等. 2017. 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，37(3): 109−116. Zhang Yongjing, Gao Fan, Yu Lijuan, et al. 2017. Characteristics analysis and synoptic classification of short-duration heavy rainfall in Jinan urban area[J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 37(3): 109−116. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.013