

王迪,牛淑贞,曾明剑,等,2020.河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J].气象,46(5):618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5):618-628(in Chinese).

河南省分类强对流环境物理条件特征分析*

王迪^{1,2} 牛淑贞^{1,2} 曾明剑^{3,4} 张一平²

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

3 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

4 中国气象局交通气象重点开发实验室, 南京 210009

提 要: 以冰雹、雷暴大风、短时强降水三类划分河南省 2006—2015 年暖季国家自动气象站的强对流个例, 考虑到月际变化和气候背景差异对强对流发生环境的影响, 采用 ECMWF 再分析资料计算表征大气动力、热力及水汽条件等特性的物理参数及其 15 d 滑动平均值, 对比分析各月三类天气环境物理条件特征, 并提炼分类强对流的关键物理参数。结果表明: 河南省暖季短时强降水发生频率最高, 冰雹最少, 各类均主要出现在 14—20 时。三类强对流发生临近时刻大多数物理参数的月际差异非常明显, 应用时有必要分月讨论。参数偏离滑动气候态的异常特征对于分类强对流同样有价值, 且不同物理条件偏差特征差异明显。平均来说, 短时强降水与冰雹的环境条件各月差异显著, 主要体现在: 整层可降水量、地面露点温度和 K 指数较大, 0℃和-20℃层高度较高, 低层垂直风切变较大, 低层辐合和正涡旋特征较强, 而 850 与 500 hPa 温差和对流有效位能较小。冰雹与雷暴大风的物理参数特征大多非常相似, 不过冰雹的整层可降水量和地面露点温度更小, 0℃和-20℃层高度更低、高层辐合和正涡旋特征更强, 尤其在 7 月和 8 月。

关键词: 分类强对流, 环境参数, 潜势预报, ECMWF 再分析资料

中图分类号: P466, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.003

Analysis on the Characteristics of Environmental and Physical Conditions for the Classified Severe Convections in Henan Province

WANG Di^{1,2} NIU Shuzhen^{1,2} ZENG Mingjian^{3,4} ZHANG Yiping²

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

3 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

4 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

Abstract: The historical severe convections from 2006 to 2015 in the warm season were classified into three types, namely hail, thunderstorm gale and short-term heavy rain, occurring at the national meteorological automatic stations in Henan Province. The physical parameters and their 15 d moving average values are calculated based on ECMWF reanalysis data, indicating the environmental characteristics such as vapor, thermal and dynamical conditions, and then the monthly characteristics are comparatively analyzed with the key parameters to classify convections selected, considering the influence of monthly change and the variety of climate background. The results showed that the frequency of short-time severe precipitation is

* 河南省气象局重点项目(KZ201702)、河南省科技攻关项目(162102310056)和中国气象局预报员专项(CMAY13Y2019-068)共同资助

2018 年 12 月 18 日收稿; 2020 年 1 月 30 日收修定稿

第一作者: 王迪, 主要从事短时预报和强对流天气研究. Email: Wdimail@126.com

通讯作者: 牛淑贞, 主要从事天气预报和强对流天气研究. Email: niushuzhen@163.com

the highest while that of hail is the lowest. All kinds of severe precipitation mainly occur in the afternoon (14:00 BT–20:00 BT). The inter-monthly variation of parameters is so prominent that the different parameter thresholds are advisable in the potential forecast monthly. The parameter deviations from the moving climate mean are also valuable for the classification and obviously vary in the different environmental conditions. The monthly characteristics of most parameters for the short-time severe precipitation are significantly distinct from the hail, such as the larger indices of precipitable water, ground dew point temperature, K index, 0°C and -20°C level heights, stronger vertical wind shear, convergence and positive vorticity in the lower level, and the less temperature difference between 850 and 500 hPa and CAPE. Most parameters for hail are similar to those of thunderstorm gale with less precipitable water and ground dew point temperature, lower 0°C and -20°C level heights, and stronger convergence and positive vorticity in the upper level, especially in July and August.

Key words: classified severe convection, environmental parameter, potential forecast, ECMWF reanalysis data

引 言

冰雹、雷暴大风、短时强降水等强对流是暖季(4—9月)常见的灾害性天气,因其突发性强、生命史短且易致灾,一直以来便是天气预报业务中的重点和难点,学者们从不同的角度开展了大量研究。一般认为,强对流的发生与大气层结不稳定、低层水汽条件、垂直风切变及抬升触发条件等因素密切相关(Doswell III et al, 1996; 章国材, 2011; 吴蓁等, 2011; 俞小鼎, 2011; 俞小鼎等, 2012; 孙继松和陶祖钰, 2012; 王秀明等, 2014; 许爱华等, 2014; 郑永光等, 2017)。针对这些影响因素目前已发展了K指数、SI指数、整层可降水量等百余种物理意义明确的特征量(刘健文等, 2005)。由于不同类型的强对流对各种环境物理条件的敏感程度不同,因此可以尝试通过归纳对比物理参数特征来分类(孙继松等, 2014)。雷蕾等(2011)采用由北京夏季常规探空资料计算的18种物理参数及其6 h变量较好地甄别出了冰雹(雷暴大风)和暴雨天气。樊李苗和俞小鼎(2013)通过探空资料归纳分析了中国短时强降水、强冰雹、雷暴大风以及混合型强对流天气的环境参数特征。高晓梅等(2018)利用探空资料讨论了鲁中地区暖季雷暴大风、冰雹雷暴大风和强降水混合型三类天气的关键环境参数特征和预报阈值。曾明剑等(2015a; 2015b)在统计环境物理参数特征时发现不同月份各类强对流天气对物理参数表现出不同的敏感性,具有同样温湿特性的大气在不同月份可能

产生的强对流类型和强度也不尽相同。方翀等(2017)对华北不同海拔地区雷暴大风环境物理参数的统计特征也表明,许多热力指标特征需要考虑季节因素影响。此外,不同地区温湿条件和下垫面特征存在差异,环境物理条件具有明显的地域特性(费海燕等, 2016; 杨新林等, 2017),对时空尺度小的强对流天气来说非常有必要针对特定地区具体研究。

那么河南省各类强对流天气不同月份物理参数的特征如何,是否与已有研究结论一致? 各类强对流的环境参数特征是否存在明显差异,能否据此分类? 张一平等(2013)基于常规观测和探空资料分析了河南省2001—2010年的区域性强对流天气,归纳了四种概念模型并给出不同流型下雷雨大风、冰雹及大风冰雹的分析要点和敏感物理量参考指标,对河南省强对流天气的分类识别开展了尝试。不过,由于常规探空资料分辨率的限制以及人为分型对个例样本的主观筛选,物理量特征的统计规律不可避免地会受影响,同时也未考虑季节变化的影响和对比分析短时强降水特征。为解决传统探空资料时空分辨率不足的问题,不少学者采用NCEP FNL资料研究强对流环境参数特征(曾明剑等, 2015b; 田付友等, 2017; 曹艳察等, 2018),但是资料空间分辨率提升有限,而且朱彦良等(2012)表明ECMWF ERA-Interim再分析资料与探空资料的相关性优于FNL资料。基于上述认识,本文采用较高分辨率的ECMWF ERA-Interim再分析资料,基于2006—2015年的强对流个例,详细对比分析河南省暖季各类强对流不同月份环境物理参数的变化规律,以期

提炼分类预报强对流的关键物理量,为开展河南省分类强对流客观预报提供支撑。

1 资料和方法

1.1 资料说明

对历史个例的普查发现一次天气过程可能同时出现多种强对流天气现象,为了便于有针对性的研究,文中将所有的强对流个例划分为冰雹、雷暴大风和短时强降水三种类型。定义:(1)只要地面观测到冰雹便认定为一次冰雹过程,且不论其他天气出现与否;(2)雷暴大风需满足出现雷暴和 $17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上阵风两个条件,且无冰雹出现;(3)将仅出现雨强达 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上降水的过程定义为短时强降水。

在文中统计的强对流个例中,冰雹和雷暴大风个例来源于河南省灾害性天气报及灾情统计,短时强降水个例取自全省 117 个国家自动气象站的历史降水资料库,各类天气均剔除嵩山和鸡公山两个高山站。

1.2 研究方法

首先采用 ECMWF ERA-Interim 再分析资料(空间分辨率为 $0.75^{\circ}\times 0.75^{\circ}$,每日 02、08、14、20 时四个时次,北京时,下同)计算环境物理参数,再根据“临(邻)近原则”,选用强对流发生前最临近时次且距离站点最邻近格点的参数值来表征强对流天气发生临近时刻的环境特征参数,从而较好解决了常规探空资料与强对流时空错位明显的问题。

灾害性天气的发生往往是大气出现偏离平均状态异常信号的反映,而且大气存在明显的季节性变化,相同的环境条件在不同月份产生的天气也会存在差异。因此,研究将物理量偏离气候平均态的异常程度也作为一个重要指标。为避免根据自然月份计算气候均值造成月末或月初气候态突变和过长时

间序列平均对气候态的弱化(曾明剑等,2015a),文中选择以某日前后 7 d 内的 15 d 滑动平均值来表示当日的气候态。为便于将强对流个例与 6 h 间隔的格点环境物理参数相匹配,文中规定当日 02 时至次日 02 时为一天。

2 强对流天气统计特征分析

按照上述分类标准,2006—2015 年河南省暖季共出现冰雹 189 站次、雷暴大风 727 站次和短时强降水 2844 站次。夏季(6—8 月)为各类强对流天气的高发期,6 月冰雹和雷暴大风最频繁,发生次数分别占其样本总数的 40%和 36%,7 月短时强降水最多,占比高达 45%。短时强降水 4 月相对较少,冰雹和雷暴大风 9 月最少,10 年内发生次数均不超过 10 次(表 1)。三类强对流均主要出现在 14—20 时段内,其次是前半夜(20 时至次日 02 时)。冰雹和雷暴大风发生时段类似,下午出现频率高达 60%以上,凌晨到上午(02—14 时)出现次数较少。短时强降水四个时段出现频次差异较小,下午到前半夜(14 时至次日 02 时)发生频次约占 60%,而上午(08—14 时)最少(图 1)。

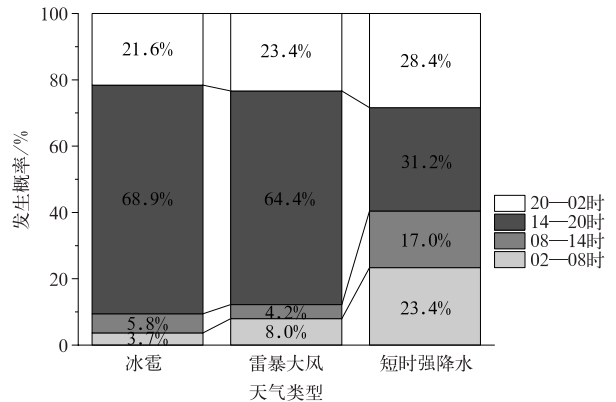


图 1 2006—2015 年河南省各类强对流天气发生时段概率分布

Fig. 1 Probability distribution of occurrence period of different kinds of severe convective weather in Henan Province from 2006 to 2015

表 1 2006—2015 年河南省各类强对流天气统计(单位:站次)

Table 1 The statistics of different kinds of severe convection weathers in Henan Province from 2006 to 2015

天气类型	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	暖季合计
冰雹	22	21	76	27	38	5	189
雷暴大风	50	82	264	179	146	6	727
短时强降水	51	184	323	1 279	859	148	2 844

3 环境物理条件特征分析

3.1 水汽条件

水汽条件是对流发生发展必不可少的因素,不仅对于成云致雨至关重要,而且在上升过程中水汽凝结释放潜热,可以提供对流活动所需能量。由于水汽主要集中在对流层低层,且绝对含量意义更重大,因此文中选用整层大气可降水量(PWV)和地面露点温度(T_d)来表征水汽条件。

由于箱线图能够直观地反映物理量最大值、最小值、主体分布、平均值和中位值等统计特征,这里采用箱线图来分析水汽条件,并定义第25%和75%分位数之间的箱体部分为物理量主体。考虑到强对流发生的局地性、极端性以及时空错位对统计极值

的影响,文中重点分析物理量的主体分布和平均态特征。

三类强对流天气的PWV(图2)和 T_d 值(图略)变化特征非常类似,均存在先增加后减小的月际变化特点,7月或8月达到最大,这与高晓梅等(2018)对鲁中地区强对流的研究结论较一致。除个别月份外,大多数月份平均值与中位值相差不大,特征值分布较对称。冰雹PWV暖季平均为36 mm,大于曹艳察等(2018)统计的我国中东部低于1 km海拔区的平均值。当PWV超过58 mm以上时,可不考虑冰雹发生可能性,与曹艳察等(2018)的统计值相当。雷暴大风各月特征与方翀等(2017)对华北地区的研究一致,但是由于他们始终采用08时PWV来表征雷暴大风的发生环境,使得各月特征值均比文中略小。雷暴大风暖季平均值为41 mm,略大于冰雹,与张一平等(2013)统计的河南区域性天气特征相

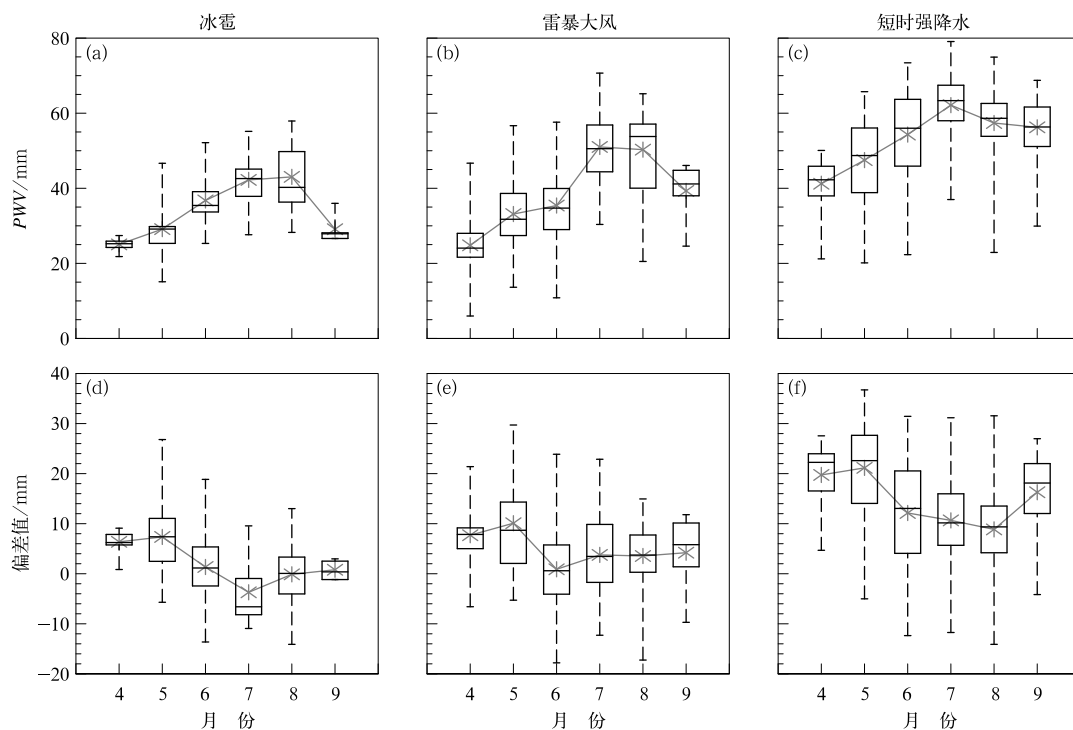


图2 2006—2015年河南省暖季各月冰雹(a,d)、雷暴大风(b,e)、短时强降水(c,f)三类强对流天气整层可降水量(a,b,c)及其偏离气候态偏差值(d,e,f)的箱线图
(箱线图中触须线的上端和下端分别表示统计最大值和最小值,箱体内的三条横线自下而上依次代表第25%、50%和75%分位值,符号“*”表示平均值)

Fig. 2 Box and whisker plots of precipitable water (a, b, c) and its climate deviation (d, e, f) of three kinds of severe convection weather for (a, d) hail, (b, e) thunderstorm gale, (c, f) short-time severe precipitation in the months of warm season in Henan Province from 2006 to 2015

(The upper and lower ends of whisker lines represent the statistical maximum and minimum while the three horizontal lines of the box from bottom to top indicate the 25th, 50th, 75th percentile, respectively; symbol “*” is the mean value)

左,这可能与区域性个例数较少及选用资料差异有关。短时强降水各月 PWV 远大于其他两类,暖季平均值与 Tian et al(2015)对我国中东部短时强降水的统计结果(59 mm)相差不大。当 $PWV < 20$ mm 时,不会出现短时强降水。各类强对流发生时 T_d 均不超过 28°C ,其中:冰雹各月平均为 $9\sim 22^{\circ}\text{C}$,雷暴大风平均为 $11\sim 23^{\circ}\text{C}$,而短时强降水介于 $16\sim 24^{\circ}\text{C}$ 。由于短时强降水对水汽要求较高,雷暴大风的形成常与强降水造成的下沉拖曳有关且伴有干空气夹卷,而冰雹粒子在温度垂直递减率较小的暖湿大气中很容易融化,难以到达地面,所以不同类型强对流水汽特征量差异显著,短时强降水各月均最大,雷暴大风略大于冰雹,在7月、8月最明显。

PWV 和 T_d 偏离滑动气候态的异常特征同样存在相似的月际变化和类型差异。短时强降水特征量各月主体均明显偏高于气候态,以4月、5月最显著,平均正异常分别大于 20 mm 和 5°C ;雷暴大风的异常值各月略高于冰雹,两者除在4月、5月偏离气候态较显著外,其余正异常较小,有时也出现负异常。尽管春季4月、5月各类强对流 PWV 和 T_d 特征值相对较小,水汽含量较少,但是特征值均明显偏高气候态。夏季水汽条件普遍转好,但与气候态的偏差却减小。这也在一定程度上说明强对流发生仅

需适度的水汽,春季对水汽条件更敏感。

3.2 热力不稳定条件

热力不稳定条件表征环境大气层结对于对流发展的有利程度,是影响强对流发生发展的重要因素。这里主要选取常用的 K 指数、最大对流稳定度指数、850 与 500 hPa 温差和沙氏指数(SI)来讨论。

K 指数侧重反映对流层中低层温湿分布对静力稳定度的影响。K 指数由于与低层水汽状况有关,变化特征与表征水汽条件的物理量非常类似,三类天气同样存在明显的类型和月际差异(图 3a)。冰雹的 K 指数月际变化最大,8月平均达到最大,暖季平均为 29.93°C ;雷暴大风 K 指数变化趋势与冰雹类似,暖季平均为 31.14°C ;而短时强降水各月均最大且月际差异较小,暖季平均高达 35.88°C ,略小于 Tian et al(2015)关于中东部短时强降水的统计值(37.7°C)。通常认为 K 指数必须超过 20°C 以上,才有可能发生对流天气。不过4月超半数冰雹的 K 指数低于 16°C ,而7月冰雹 K 指数均超过 27°C ,因此,必须充分考虑各月气候背景差异,不能简单以 20°C 为最低阈值。各类强对流天气的 K 指数各月同样偏高气候态,4月、5月正异常较大。短时强降水偏差各月均最大,雷暴大风略大于冰雹。

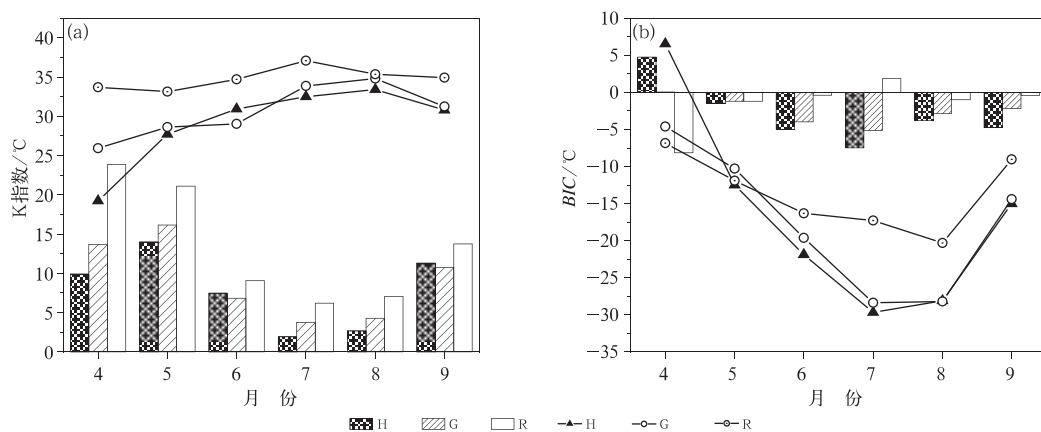


图3 2006—2015年河南省暖季各月三类强对流天气 K 指数(a)和 BIC(b)的平均特征值(折线)和平均气候偏差值(柱状图)特征分布
(“H”代表冰雹,“G”代表雷暴大风,“R”代表短时强降水;下同)

Fig. 3 Distribution of average characteristic values (polylines) and its average climate deviations (boxes) of K index (a) and best index of convective instability (b) for the three types of severe convections in the warm season in Henan Province from 2006 to 2015
(Symbols “H”, “G” and “R” indicate hail, thunderstorm gale and short-time severe precipitation, respectively, the same below)

最大对流稳定度指数(BIC)是对流层中层假相当位温极小值与边界层附近极大值之差(刘健文等, 2005),表征整层空气从边界层抬升到对流层中层的最大对流不稳定程度。BIC 负值越大,对流不稳定层结越明显。三类天气 BIC 指数各月基本均为负值,代数值均呈现先减小后增加趋势(图 3b)。冰雹和雷暴大风 BIC 月际差异最显著,在 7 月达最大负值,除 4 月外,两者差异不大。暖季平均一致低于气候态,在 7 月达到最大负异常,且冰雹偏差值各月差异最显著。而短时强降水的 BIC 代数值除 4 月、5 月外均大于其他两类,7 月最突出。除 7 月外,各月平均略偏低气候态,暖季平均偏高 0.25°C 。

850 与 500 hPa 温差(ΔT_{85})表征温度随高度垂直递减特性,反映环境大气的条件不稳定程度。 ΔT_{85} 越大,环境大气温度垂直递减越剧烈,层结不稳定越明显。与樊李苗和俞小鼎(2013)的结论类似,短时强降水 ΔT_{85} 暖季平均值约为 23.88°C ,各月差异最小且分布最集中。通常将 ΔT_{85} 超过 25°C 作有利于强对流天气发生的阈值指标,显然这对短时强降水来说并不适用。而冰雹和雷暴大风 ΔT_{85} 暖季平均值相差不大($26\sim 27^{\circ}\text{C}$),略小于他们的研究结果。除了 4 月和 9 月外,各月差异不大。三类强对流天气 ΔT_{85} 偏离气候态多数月份均为正异常,除 4 月外,冰雹、雷暴大风、短时强降水偏差依次减小(图 4a)。

沙氏指数(SI)表示气块从 850 hPa 抬升到 500 hPa 后与环境大气的温度差异,指数为负值时说明层结不稳定。三类强对流 SI 的暖季平均仅略小于 0°C ,大部分样本都不低于 -3°C 。各月除了 6 月、7 月、8 月负值略明显外,其他平均值都在 0°C 附

近或以上,冰雹 4 月平均高达 10°C (图 4b)。虽然 SI 特征值对三类强对流天气层结不稳定的指示意义不大,但是特征值均明显偏低气候态,暖季平均偏差都在 -3°C 左右,4 月短时强降水平均偏低 8.8°C 以上。这说明尽管强对流发生前指数表征的层结不稳定可能并不强烈,但是相对气候背景来说不稳定条件已有极大改善。偏离气候态的特征值确是一个判断不稳定条件变化的重要指标,也存在明显类型和月际差异。

3.3 特征层高度

0°C 是水相和冰相的临界点, -20°C 是大水滴的自然成冰温度,两特征层高度(分别简称 H_0 和 H_{-20})是对降水粒子增长及相态转化非常重要的指标。如图 5 所示,三类强对流的 H_0 和 H_{-20} 存在明显月际差异,逐月均先增加后下降,在 7 月达到最大,这可能与北半球太阳辐射的月际变化有关。短时强降水的 H_0 绝大部分都在 4000 m 以上,有利于形成降水效率高的深厚暖云层, H_{-20} 则多数都在 7200 m 以上,不利于较大固态降水粒子形成。两特征高度各月平均都最大,暖季平均分别约为 5055 和 8601 m,与樊李苗和俞小鼎(2013)的统计结果基本一致。雷暴大风 H_0 各月均高于冰雹,暖季平均分别为 4424 和 4110 m,与高晓梅等(2018)统计的鲁中地区结论一致; H_{-20} 除 4 月外也均大于冰雹,暖季平均分别为 7727 和 7371 m。三类强对流两特征高度偏离气候态的异常值差异显著(图略)。短时强降水各月主体均明显高于气候态,以 4 月、5 月最著。冰雹除了 4 月、5 月异常值离散度较大外,其余各月主体均偏低气候态,暖季平均偏低 300 m 以上,

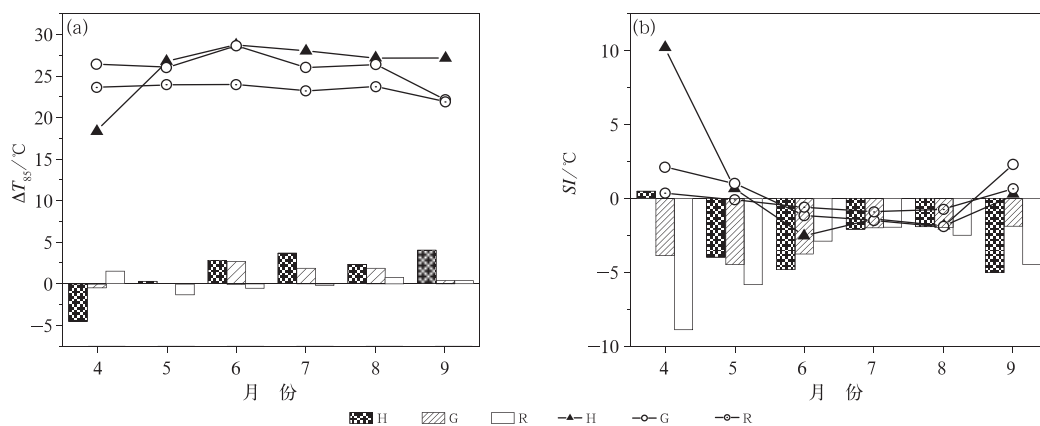


图4 同图3,但为 ΔT_{85} (a)和 SI(b)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for ΔT_{85} (a) and SI (b)

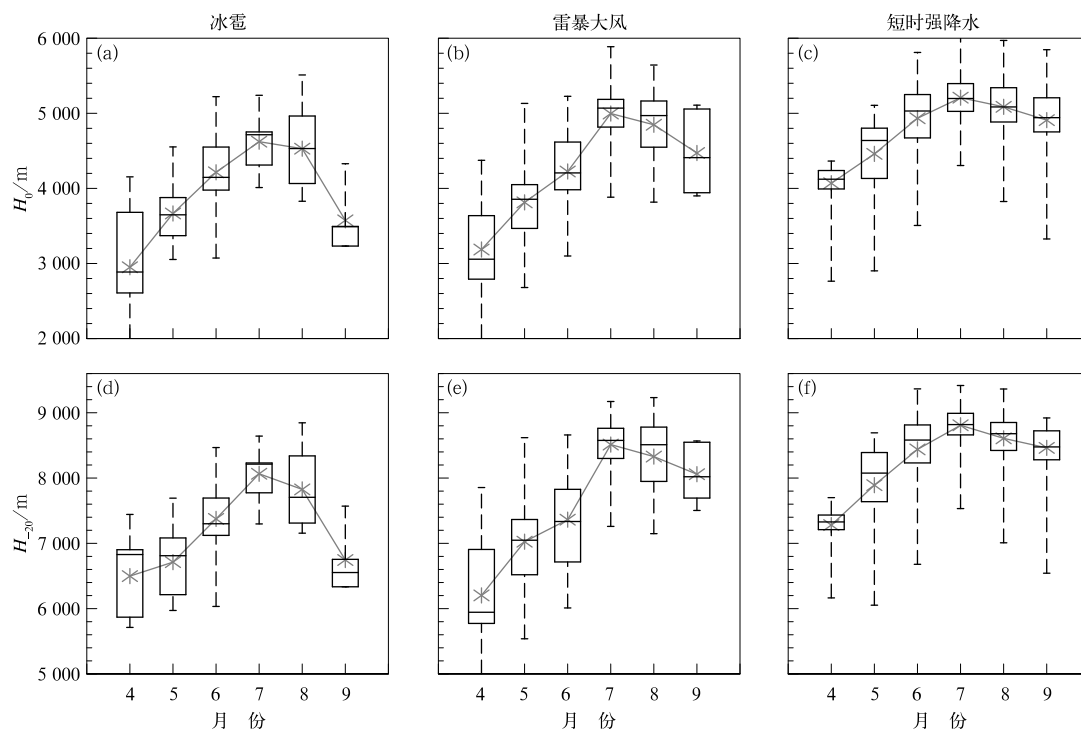


图 5 同图 2, 但为 H_0 (a, b, c) 和 H_{-20} (d, e, f) 特征值箱线图

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for H_0 (a, b, c) and H_{-20} (d, e, f)

非常有利于冰雹的产生。雷暴大风除 6 月明显偏低外, 其余各月略低于气候态。整体来看, 短时强降水与冰雹两特征层高度特征相差最大, 而雷暴大风与冰雹略有差异。

3.4 对流能量条件

对流有效位能(CAPE)表征了热对流上升运动可能达到的理论最大强度, 是反映对流发生潜能的重要能量参数。类似樊李苗和俞小鼎(2013)的研究结果, 短时强降水的 CAPE 大多不超过 $2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 暖季平均约为 $1200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于雷暴大风和冰雹(暖季平均约为 $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。三类强对流 CAPE 的平均值和气候偏差均呈现先增加后减小的月际变化, 在 7 月或 8 月达到最大(图 6), 也与太阳辐射月际变化有关。除了 4 月、5 月外, 各月短时强降水均最小, 冰雹略大于雷暴大风。对流抑制能量(CIN)反映了对流发生前的能量储存情况, 是对流发展必须克服的能量。对流发生前存在适当的 CIN 有利于形成强烈的对流天气。三类强对流发生前均存在一定的 CIN, 暖季平均值相差不大, 大体在 $160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上下。CIN

逐月均先增加后减小, 在 6 月达最大, 此时冰雹和雷暴大风远大于短时强降水。三类天气 CIN 各月偏离滑动气候平均态的程度均较小, 短时强降水暖季平均大体与气候态持平, 雷暴大风和冰雹略偏高 $40 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右(图 7a)。下沉对流有效位能(DCAPE)反映了对流云体中由于水物质强烈蒸发或升华降温导致的下沉气流达到地面时可能具有的最大理论动能(郑永光等, 2017)。雷暴大风 DCAPE 暖季平均略高于冰雹, 但都明显大于短时强降水(各月基本不超过 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。三类天气 DCAPE 平均值同样存在先增加后减小的月际变化, 以冰雹最显著。不同月份类型差异不一, 夏季短时强降水明显小于其他两类。冰雹 DCAPE 偏离滑动气候态的异常特征最明显, 除 4 月、5 月外平均为正异常, 暖季平均偏高 $103 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。雷暴大风的偏差各月和冰雹较相似, 但值略低。短时强降水基本都偏低低于气候平均态, 5 月负异常最大(图 7b)。总的来说, 冰雹和雷暴大风各类能量指标差异较小, 且比短时强降水能量条件要求更高, 更有利于产生较强的上升运动。

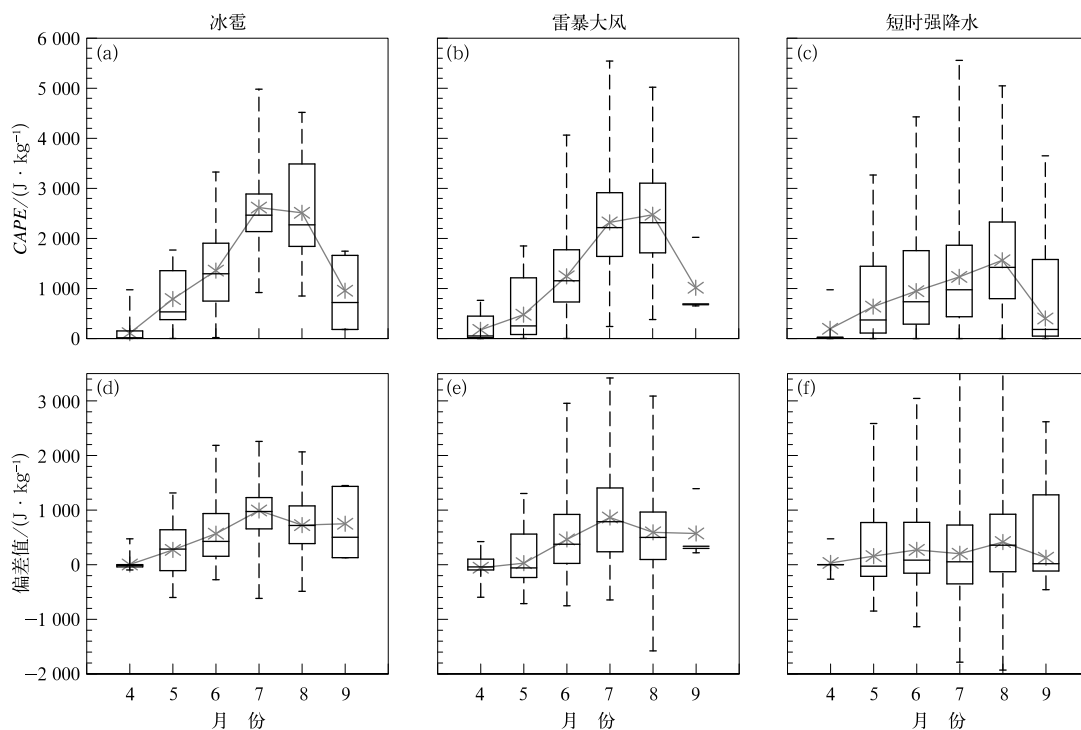


图6 同图2,但为CAPE(a,b,c)及其偏差值(d,e,f)箱线图

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for CAPE (a, b, c) and its deviation (d, e, f)

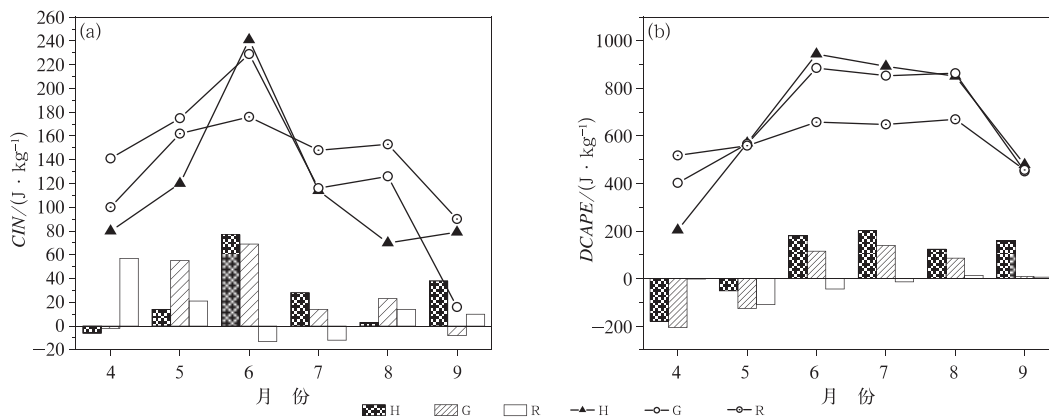


图7 同图3,但为CIN(a)和DCAPE(b)

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for CIN (a) and DCAPE (b)

3.5 垂直风切变条件

环境风的垂直切变对风暴单体的组织、结构及演变特征影响极大,是对流系统发展的转换条件。本文选取0~6、0~3和0~1 km高度层来分别探讨对流层高、中、低层(分别为0~6、0~3和0~1 km)垂直风切变,平均特征统计见图8。由于春季大气斜压性强,4月各类强对流的垂直风切变特别是中高层切变均最大。短时强降水的低层垂直风切变暖季平均为 $4.43 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot \text{km})^{-1}$,略小于Tian et al(2015)

的研究结果,各月均大于冰雹和雷暴大风,以4月最明显。雷暴大风暖季平均为 $2.93 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot \text{km})^{-1}$,略大于冰雹。三类天气中层垂直风切变差异较小,暖季平均均在 $2.6 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot \text{km})^{-1}$ 左右,属于中等强度切变,4—8月一致递减,9月冰雹远小于其他两类。高层垂直风切变三者均一致逐月先减小后增加,8月最小。短时强降水的高层垂直风切变以弱切变为主,冰雹和雷暴大风均以中等到强切变为主,与樊李苗和俞小鼎(2013)的研究类似,不过文中冰雹切变反而略大些。三类天气不同高度垂直风切变

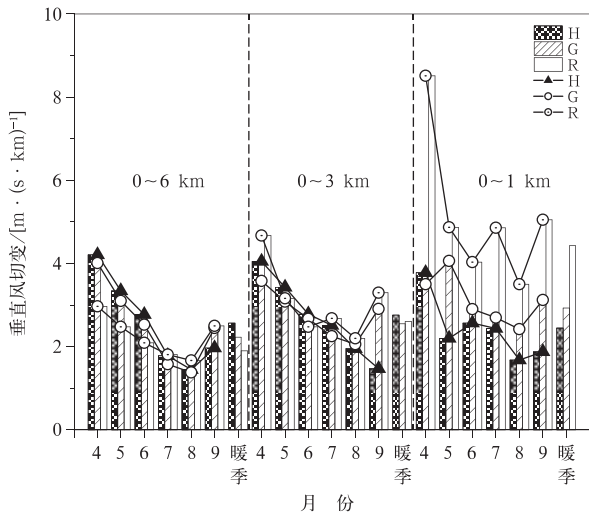


图 8 2006—2015 年河南省暖季各月三类强对流天气不同高度垂直风切变平均值(柱状图)及其月际变化(折线)特征

Fig. 8 Characteristics of average values (boxes) and its monthly change (polylines) of vertical wind shears at different altitudes for the three types of severe convections in the months of warm season in Henan Province from 2006 to 2015

各月气候偏差值均较小(图略)。短时强降水低层垂直风切变暖季平均偏高 $0.96 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot \text{km})^{-1}$, 偏差值各月均最大, 而雷暴大风略大于冰雹。三类强对流中层垂直风切变均偏高于气候态, 且相差不大。冰雹、雷暴大风、短时强降水高层垂直风切变偏高

气候态的异常值依次递减, 冰雹暖季平均偏高 $0.41 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot \text{km})^{-1}$ 。整体来看, 短时强降水低层垂直风切变大, 而冰雹和雷暴大风高层垂直风切变大。相比其他环境物理条件, 强对流发生时垂直风切变条件偏离气候背景的异常信号较弱。

3.6 动力抬升条件

抬升条件是强对流发生必不可少的条件, 系统性上升、边界层辐合、地形抬升等都是较有利的动力抬升触发条件。由于触发机制的复杂性以及资料分辨率的限制, 这里无法充分定量地讨论, 尤其是对中小尺度的动力特征, 仅选择大气不同高度层散度及涡度来初探较大尺度抬升条件(表 2)。

不同高度层散度和涡度除个别月份外月际差异均不明显。综合各层特征来看, 短时强降水表现为“低层辐合正涡旋而中高层辐散负涡旋”的有利配置, 低层辐合和正涡度均最大。冰雹表现为“低层辐合正涡度、中层辐散负涡度、高层辐合正涡度”特征, 上升运动更强烈, 对流系统发展更旺盛。雷暴大风散度特征类似短时强降水, 涡旋特征类似冰雹, 不过强度略弱, 动力条件介于冰雹和短时强降水之间。各层散度及涡度偏离气候态的异常值与特征值大小几乎一致, 这充分反映了强对流天气对辐合辐散和涡旋特征这类动力条件非常敏感, 动力因子对强对流发生不可或缺。

表 2 2006—2015 年不同类型强对流天气散度和涡度参数暖季平均值
Table 2 Average of divergence and vorticity for different kinds of severe convections in the warm season in Henan Province from 2006 to 2015

动力特征参数	高度层/hPa	天气类型		
		冰雹	雷暴大风	短时强降水
散度/ (10^{-6} s^{-1})	300	-3.53	0.98	3.07
	500	2.04	0.98	0.43
	700	1.99	2.49	0.81
	850	0.10	-1.07	-2.41
	925	-5.55	-6.62	-7.25
	地面	-3.88	-5.11	-5.24
涡度/ (10^{-6} s^{-1})	300	25.76	10.22	-24.27
	500	3.03	3.53	-2.59
	700	-4.74	-1.19	5.19
	850	6.92	10.23	15.52
	925	7.72	12.47	17.68
	地面	2.98	6.26	6.27

4 结论与讨论

研究充分考虑了季节变化和气候背景差异对环

境物理参数特征的影响, 通过对比分析河南省暖季各月三类强对流天气发生临近时刻物理参数特征值和其偏离气候态的变化规律, 提炼了能较好区分三类天气的物理参数及相应指标。文章主要结论如

下。

(1)河南暖季短时强降水发生频率最高,雷暴大风次之,冰雹最少。6—8月为各类强对流的高发期,冰雹和雷暴大风6月最多,而短时强降水7月居多。三类强对流均主要出现在14—20时,冰雹和雷暴大风日变化更显著。

(2)三类强对流大多数环境物理参数的月际变化都非常明显,尤其以水汽条件、能量条件和特征层高度为甚。对于不同月份的强对流不能简单地设定相同的特征阈值,有必要分月具体讨论分析。

(3)物理参数偏离滑动气候平均值的特征对预报强对流发生潜势和分类同样具有较好指示意义,以SI指数最为突出。不同环境物理条件偏离气候态的异常特征存在差异,垂直风切变的异常信号较弱,水汽条件、不稳定条件、特征层高度和对流能量条件相比气候态均有明显的异常反映,而各层涡度和散度特征的异常值基本可达到与特征值相同量级。不过,物理参数偏离气候态的异常特征基本都有利于强对流的发生发展。

(4)短时强降水与冰雹(或雷暴大风)的物理参数差异各月均比较显著,主要体现在:较大的整层大气可降水量、地面露点温度和K指数(暖季平均分别取58 mm、23℃和36℃),较小的850与500 hPa温差(大多低于25℃)和最大对流稳定度指数(暖季平均约为-17℃),较高的0℃和-20℃层高度(暖季分别平均为5055和8601 m),较小的对流有效位能和下沉有效位能,较小的0~6 km垂直风切变,较大的0~1 km垂直风切变,较强的低层辐合正涡旋和高层辐散负涡旋特征。

(5)冰雹与雷暴大风的大多数物理参数变化特征非常相似,不过冰雹的整层可降水量和地面露点温度更小,0℃和-20℃层高度更低,高层辐合和正涡旋更明显,这些特征在7月、8月最突出。

虽然文中对三类强对流环境物理参数特征进行了详细分析,但仍存在一些不足之处。河南地形复杂,由于样本所限文中将全省作为整体分析,忽略了地形差异对强对流发生环境条件的影响。同时,由于选用的再分析资料时空分辨率限制,无法精确刻画强对流的发生环境,这也使统计特征在时空上存在一定误差。此外,根据物理量统计特征设定阈值来判断强对流潜势存在很大的随机性,而且无法充分体现不同物理条件的“配料”作用。随后的研究将通过模糊数学方法(曾明剑等,2015a;周康辉等,

2017)构建能综合表征强对流发生环境物理条件的预报算子,结合业务数值模式定量预报各类强对流发生潜势。上述问题都有待今后进一步探究讨论。

参考文献

- 曹艳察,田付友,郑永光,等,2018.中国两级阶梯地势区域冰雹天气的环境物理量统计特征[J].高原气象,37(1):185-196. Cao Y C, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2018. Statistical characteristics of environmental parameters for hail over the two-step terrains of China[J]. Plateau Meteor, 37(1):185-196(in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):156-165(in Chinese).
- 方翀,王西贵,盛杰,等,2017.华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J].高原气象,36(5):1368-1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al, 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5):1368-1385(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J].气象,42(12):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12):1513-1521(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J].气象学报,76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):196-212(in Chinese).
- 雷雷,孙继松,魏东,2011.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,37(2):136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2):136-141(in Chinese).
- 刘健文,郭虎,李耀东,等,2005.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社. Liu J W, Guo H, Li Y D, et al, 2005. The Physical Calculation Basis of Weather Analysis and Forecasting [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法:中国强对流天气预报手册[M].北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. The Basic Principles and Methods of Convective Weather Forecasting: China Convective Weather Forecasting Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and

- forecast[J]. Meteor Mon, 38(2):164-173(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张涛, 等, 2017. 我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J]. 暴雨灾害, 36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6):518-526(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 40(4):389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4):389-399(in Chinese).
- 吴秦, 俞小鼎, 席世平, 等, 2011. 基于配料法的“08. 6. 3”河南强对流天气分析和短时预报[J]. 气象, 37(1):48-58. Wu Z, Yu X D, Xi S P, et al, 2011. Analysis of the 3 June 2008 Henan severe convection event with ingredients based method[J]. Meteor Mon, 37(1):48-58(in Chinese).
- 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 A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7):769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 俞小鼎, 2011. 基于构成要素的预报方法—配料法[J]. 气象, 37(8):913-918. Yu X D, 2011. Ingredients based forecasting methodology[J]. Meteor Mon, 37(8):913-918(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 曾明剑, 王桂臣, 吴海英, 等, 2015a. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. 气象学报, 73(5):868-882. Zeng M J, Wang G C, Wu H Y, et al, 2015a. Study of the forecasting method for the classified severe convection weather based on a meso-scale numerical model[J]. Acta Meteor Sin, 73(5):868-882(in Chinese).
- 曾明剑, 张备, 吴海英, 等, 2015b. 基于接近度概念的强对流天气预报方法研究[J]. 高原气象, 34(5):1357-1368. Zeng M J, Zhang B, Wu H Y, et al, 2015b. Study on severe convective weather forecast method based on approach concept[J]. Plateau Meteor, 34(5):1357-1368(in Chinese).
- 章国材, 2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社. Zhang G C, 2011. Analysis and Forecasting of Convective Weather [M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 张一平, 吴秦, 苏爱芳, 等, 2013. 基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J]. 高原气象, 32(5):1492-1502. Zhang Y P, Wu Z, Su A F, et al, 2013. Analysis on severe convective weather characteristic in Henan based on flow pattern identification and physical elements[J]. Plateau Meteor, 32(5):1492-1502(in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 周康辉, 郑永光, 王婷波, 等, 2017. 基于模糊逻辑的雷暴大风和非雷暴大风区分方法[J]. 气象, 43(7):781-791. Zhou K H, Zheng Y G, Wang T B, et al, 2017. Fuzzy logic algorithm of thunderstorm gale identification using multisource data[J]. Meteor Mon, 43(7):781-791(in Chinese).
- 朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等, 2012. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析[J]. 气候与环境研究, 17(3):381-391. Zhu Y L, Ling C, Chen H B, et al, 2012. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data[J]. Climatic Environ Res, 17(3):381-391(in Chinese).
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting:an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China[J]. J Meteor Res, 29(3):370-384.