

王婷波,周康辉,郑永光,2020. 我国中东部雷暴活动特征分析[J]. 气象,46(2):189-199. Wang T B,Zhou K H,Zheng Y G, 2020. Statistic analysis of thunderstorm characteristics in central and eastern China[J]. Meteor Mon,46(2):189-199(in Chinese).

我国中东部雷暴活动特征分析^{*}

王婷波¹ 周康辉² 郑永光²

1 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

提 要: 基于 2010—2014 年国家闪电监测网的云-地闪电定位数据,利用雷暴识别与追踪算法获得了 505 257 个雷暴系统,进而统计分析了我中东部地区的雷暴发生发展特征。考虑地形和气候差异,将我中东部划分为东北、华北、华中与华东、西南、华南五个区域,对比了上述区域的雷暴中地闪活动持续时间、移动距离、移动速度等特征,并进一步对雷暴发生的环境物理量特征进行了统计分析,最后讨论了雷暴发生与地形的相关关系。结果显示:雷暴具有局地性强、快速生消的特性,超过 70% 的雷暴移动速度低于 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,超过 80% 的雷暴持续时间低于 2 h,超过 90% 的雷暴移动距离低于 60 km;东北地区雷暴移动速度相对更快,西南地区移速较慢且雷暴移动距离更短。华中与华东、华南地区雷暴发生的整层可降水量与对流有效位能值最高,西南次之,东北与华北地区最低,而 0~6 km 垂直风切变则反之;广东、海南等地为雷暴发生最活跃区域,江南、西南地区东部、华南地区西部、华北地区太行山一带等地为雷暴发生较为活跃的地区;雷暴发生与地形密切相关,四川盆地西麓与珠江三角洲地区明显呈现出随地形抬升而导致雷暴触发的情况。

关键词: 雷暴,闪电,追踪,统计

中图分类号: P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.005

Statistic Analysis of Thunderstorm Characteristics in Central and Eastern China

WANG Tingbo¹ ZHOU Kanghui² ZHENG Yongguang²

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the cloud-ground lightning location data of the National Lightning Monitoring Network from 2010 to 2014, 505 257 thunderstorm systems were obtained by using the thunderstorm identifying and tracking algorithm, and then the occurrence and development characteristics of thunderstorms in central and eastern China were statistically analyzed. Due to the differences in topography and climate, in this paper, we divided the central and eastern part of China into five regions: Northeast China, North China, Central China and East China, Southwest China and South China. We compared the thunderstorm characteristic parameters, including duration, covering range and speed, etc., analyzed the characteristics of environmental physical quantities of thunderstorms, and also discussed the correlation between thunderstorms and topography. The results showed that thunderstorms have the characteristics of strong localization and rapid development. The moving speed of more than 70% thunderstorms is slower than $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the duration of more than 80% thunderstorms is less than 2 h, and the covering range of more than 90% of

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507504 和 2017YFC1502003)共同资助

2019 年 4 月 17 日收稿; 2019 年 11 月 4 日收修定稿

第一作者:王婷波,主要从事雷电科学研究. Email:wangtb@cma.gov.cn

thunderstorms is less than 60 km. The thunderstorms in Northeast China tend to move faster, whereas those in Southwest China travel slower and the covering range is even less. The thunderstorms in Central China, East China, and South China have the highest levels of CAPE (convective available potential energy), followed by the Southwest, and the lowest CAPE is found in Northeast China and North China. In comparison, the situation for the vertical wind shear of 0–6 km is on the contrary. Guangdong and Hainan Provinces are the regions where thunderstorms are most frequently generated. South of Yangtze River, east of Southwest China, west of South China and the Taihang Mountain regions are prone to have more active thunderstorms. In addition, the generation of thunderstorms is closely related to terrain, thus, the west foot of Sichuan Basin and the Pearl River Delta often see the thunderstorm triggered by the obvious lift of terrain.

Key words: thunderstorm, lightning, track, statistics

引 言

雷暴是最常见的对流活动之一,雷暴过程中常常伴随着冰雹、大风、短时强降水等强对流天气,因此,了解雷暴的发生发展特征对于强对流天气预报具有非常重要的意义。目前,我国已有雷暴气候统计特征主要基于常规地面气象观测、闪电定位、静止气象卫星观测和天气雷达观测等资料得到。

早在 20 世纪 60 年代,刘全根与汤懋苍(1966)利用 1951—1962 年全国 811 个气象测站资料分析了我国雷暴日的气候分布特征,发现华南、青藏高原东侧等地属于明显的雷暴多发区,山区一般多雷暴,平原地区或过分干旱的地区一般较少雷暴。随着地面观测资料的丰富,对基于地面观测的我国雷暴日气候分布认识也更为全面,比如张敏锋和冯霞(1998)、徐桂玉和杨修群(2001)、丁青兰等(2007)、巩崇水等(2013)、陈思蓉等(2009)利用地面人工观测雷暴数据,通过数值统计方法经更细致的分析,揭示了全国或地区的雷暴气候规律与时空分布特征。

地面观测资料时序较长,具有较好的时间延续性。然而其时空分辨率较低,因此难以全面地分析我国雷暴活动特征,如雷暴的初生、持续时间、移动规律等。利用卫星和雷达数据能够一定程度上弥补上述缺陷。郑永光等(2008)利用 1996—2006 年(2004 年缺失)10 年间 6—8 月地球静止卫星高分辨率逐时红外亮温资料对夏季中国及周边地区的中尺度对流系统(MCS)活动情况进行了统计分析,给出了更细致的 MCS 时空分布特征。马明等(2004)利用卫星闪电观测数据给出了中国及其周边地区的闪电活动特征。郭虎等(2008)利用 1995—2002 年的

LIS/OTD 卫星雷电资料给出了北京地区雷电活动的空间分布。

雷达观测数据的时间与空间分辨率则更高,能够给出更精细的雷暴活动特征。韩雷等(2009)基于雷达数据使用风暴识别与追踪算法 TITAN(thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting)对京津及邻近地区的强对流风暴的气候分布特征进行统计分析,给出风暴单体发生发展过程的气候分布特征,如风暴的生命史分布、速度大小和方向的分布。Lin et al (2011)利用 SCIT(storm cell identification and tracking)风暴识别与追踪算法,分析了 2005—2008 年台湾地区暖季弱天气系统强迫下的雷暴时空特征。

国外为了了解雷暴活动规律,往往利用雷达结合闪电等数据,通过对流识别追踪算法得到对流单体,进而得到其统计规律。Wapler and James (2015)利用基于雷达数据的 KONRAD 风暴追踪算法,结合闪电定位数据,分析了中欧地区的各种天气条件下的风暴单体特征。Liu and Li (2016)用 2010—2014 年雷达与闪电数据实现雷暴识别与追踪,分析了美国中部地区暖季的雷暴特征,包括雷暴移动速度、方向和持续时间参数,分析了雷暴发生与地形、地表特征的关系。

通过统计雷暴单体的活动规律,对于提高风暴发生发展规律的认识具有重要作用。然而,由于受雷达资料的覆盖范围和质量控制等因素影响,目前国内尚未有基于雷达数据的我国中东部的对流风暴分布特征和规律研究。

闪电作为雷暴中重要的天气现象,往往伴随着雷暴活动的始终,对雷暴活动的发生发展具有很好的指示性意义。相对于雷达与卫星观测数据,地面

闪电观测数据具有更好的实时性、更高的时空分辨率。陶祖钰和赵昕奕(1993)、郑栋等(2005)、冯桂力等(2002)、郇嘉诚等(2012)、陈光舟等(2014)利用地面观测的闪电数据分别分析了某地区的闪电时空分布特征。利用闪电数据识别雷暴单体,然后对雷暴的活动特征分析与统计,可得到雷暴单体活动和时空分布特征,然而国内尚未有这样的工作开展。

中国地域辽阔,地形复杂,不同地区产生雷暴的对流环境具有较大差异。Zheng et al(2013)使用2007—2010年6—9月的多普勒雷达数据对中国中东部的MCSs进行分类,观察强对流雷暴天气的发生环境,发现干对流与湿对流在能量条件、风切变条件等方面具有明显的差异。You et al(2015)基于2006—2010年的探空数据对青藏高原和平原雷暴的环境条件进行分析,发现不同对流指数其适用性具有极大差异。类似地,Brooks(2009)利用模式再分析数据,分析了美国和欧洲的强雷暴对流环境,发现两地的对流有效位能(CAPE)和风切变具有一定差异。因此,对于雷暴在不同地区产生的环境条件,有必要进行对比分析,进而为更有针对性地预报雷暴活动。

本文利用2010—2014年的国家雷电监测网观测的云-地闪电(以下简称地闪)数据,使用雷暴识别与追踪算法,对我国中东部的雷暴系统进行了识别与追踪,对其风暴尺度单体特征进行统计与分析,为认识雷暴活动规律提供参考依据。同时统计分析了不同区域雷暴发生的动力、水汽、能量条件,为更好地预报不同地区的雷暴活动提供有效参考。

1 资料和方法

1.1 闪电定位数据和区域划分

本文使用的闪电定位数据来自2010—2014年国家雷电监测网数据。国家雷电监测网的覆盖区域逐年增加,2010年覆盖区域最小,至2013年,该网投入业务考核的站点达到347站,较好地覆盖了除西藏高原、内蒙古中西部地区外的全国大部分地区。闪电定位信息包括地闪回击二维空间信息、发生时间、闪电强度、闪电陡度、定位方式、定位误差等信息。整套系统网设计定位精度优于300m(中国科学院空间科学与应用研究中心和ADTD雷电监测定位系统课题组,2004),探测效率 $\geq 80\%$,单站探测范

围 ≥ 300 km(中国气象局,2007)。经过长期的业务化运行,整套系统较为稳定,能够不间断地对覆盖区域进行地闪监测和定位(Xia et al, 2015; Yang et al, 2015)。

我国中东部为2010—2014年国家雷电监测网历年观测都能够覆盖的区域,且是我国主要的雷暴、暴雨等强对流天气发生区域,因此本文选择上述区域来研究雷暴的活动及其环境物理量分布特征和规律。但由于我国地区范围大,东西与南北跨度广,各地气候条件具有较大差异,为了方便进行对比分析,将我国中东部地区划分为五个大的区域,分别为:东北地区、华北地区、华中与华东地区、西南地区、华南地区。区域划分范围如图1。

1.2 NCEP FNL 分析资料

本文所用环境物理量资料是根据2012—2014年美国环境预报中心(NCEP)每日四次的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球分析资料(FNL)计算得到。基于该资料,按照时空临近/邻近原则(Kuk et al, 2012),统计雷暴发生时的物理量分布特征。本文用的物理量包括整层可降水量(PWAT,单位:mm)、850和500 hPa温差(DT85,单位: $^\circ\text{C}$)、对流有效位能(CAPE,单

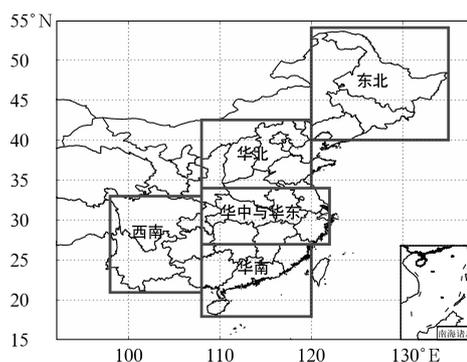


图1 统计区域的划分

(东北地区: $40^\circ \sim 54^\circ\text{N}$, $120^\circ \sim 125^\circ\text{E}$;
华北地区: $34^\circ \sim 42.5^\circ\text{N}$, $108^\circ \sim 120^\circ\text{E}$;
华中与华东地区: $27^\circ \sim 34^\circ\text{N}$, $108^\circ \sim 122^\circ\text{E}$;
华南地区: $18^\circ \sim 27^\circ\text{N}$, $108^\circ \sim 120^\circ\text{E}$;
西南地区: $21^\circ \sim 33^\circ\text{N}$, $98^\circ \sim 108^\circ\text{E}$)

Fig. 1 Division of statistical areas
(Northeast China: $40^\circ - 54^\circ\text{N}$, $120^\circ - 125^\circ\text{E}$;
North China: $34^\circ - 42.5^\circ\text{N}$, $108^\circ - 120^\circ\text{E}$;
Central and East China: $27^\circ - 34^\circ\text{N}$,
 $108^\circ - 122^\circ\text{E}$; South China: $18^\circ - 27^\circ\text{N}$,
 $108^\circ - 120^\circ\text{E}$; Southwest China:
 $21^\circ - 33^\circ\text{N}$, $98^\circ - 108^\circ\text{E}$)

位: $J \cdot kg^{-1}$)、 $0 \sim 6$ km 垂直风切变(SHEAR6, 单位: $m \cdot s^{-1}$), 从而诊断分析与雷暴活动密切相关的水汽、热力不稳定、垂直风切变等物理量分布阈值区间。

1.3 雷暴识别与追踪方法

为了得到雷暴单体的发生发展变化特征参数, 需要对闪电数据进行雷暴单体的识别与追踪。本文使用密度极大值快速搜索聚类算法(Rodriguez and Laio, 2014)实现雷暴识别, 通过计算闪电密度值和闪电距离, 进而确定雷暴聚类中心, 最终确定雷暴边界。根据雷暴移动特征, 可以建立其 Kalman 状态滤波模型, 利用 Kalman 滤波器输出的下一时刻雷暴位置, 能够有效处理雷暴单体分裂与合并的情况, 对雷暴实现追踪(周康辉等, 2016)。算法处理闪电数据的时间间隔为 10 min。

由于存在部分雷暴被识别而下一时刻不能延续的情况, 因此, 本文剔除了持续时间小于 10 min 的雷暴, 最终得到 2010—2014 年我国中东部持续时间超过 10 min(单体持续两个运行间隔)的雷暴单体 505 257 个。

2 结果和分析

2.1 雷暴单体特征统计分析

通过对 2010—2014 年 505 257 个雷暴单体的统计, 得到了雷暴移动距离、雷暴中地闪活动持续时间和移动速度等雷暴发生发展特征参数的统计特征。

2.1.1 雷暴移动距离

图 2 显示了各个区域内雷暴整个生命史的移动距离随方向的分布情况。整体而言, 雷暴移动距离基本在 60 km 以内, 其累计概率分布约为 90%; 其中以 $0 \sim 20$ km 的雷暴移动距离为最多, 占有雷暴的 40% 左右; 其次为移动距离为 $20 \sim 40$ km 雷暴, 占有雷暴的 25%。平均而言, 雷暴的移动距离约为 30 km。由此可见, 雷暴的发生与发展具有较强的局地性特征。对比各个地区的雷暴移动距离特征, 存在如下一些差异:

(1) 相对于南方地区(西南和华南), 华北地区、华中与华东、东北地区雷暴向偏东方向($45^\circ \sim 135^\circ$)移动的趋势更为明显, 其分别有 49.1%、46.7%、

44.4% 的雷暴移动方向集中在此区间。相比之下, 西南地区和华南地区的比例约为 35%。当雷暴向偏东方向($45^\circ \sim 135^\circ$)移动时, 移动距离大于 80 km 的雷暴的比例最高。这一特征在东北地区(5.4%)、华北地区(5.6%)、华中与华东(6.2%)等地区较为明显, 华南地区(3.7%)和西南地区(2.3%)这一趋势较弱。研究显示, 中尺度风暴系统的移动矢量可以由整层平均风矢量(V_{CL})、低层急流风的反向矢量($-V_{LLJ}$)相加进行计算(Corfidì et al, 1996)。由于纬度越高, 中高层风速越大, 整层平均风偏西分量越大。东北与华北等地低层急流以偏南急流为主, 为对流提供暖湿输送, 因此对流系统整体向偏东移动趋势明显, 且受中高层偏西分量大的影响, 移速往往较快, 导致相同时间内, 雷暴移动距离更大; 低纬度地区中高层风的偏西分量往往更小, 且低纬度地区盛夏(副热带高压南侧)季节中低层盛行偏东气流, 整层风矢量和不大, 造成雷暴向东移动的趋势并不显著。

(2) 相对于其他地区, 西南地区雷暴移动距离更短, $0 \sim 40$ km 移动距离的雷暴占总雷暴数量的 83%; 移动距离超过 100 km 的雷暴比例最低, 约为 3.1%。

整体而言, 雷暴具有较强的局地性特征, 然而不同地区其移动规律具有一定差异。

2.1.2 雷暴中地闪活动持续时间

相对于云闪而言, 地闪能够造成地面人员伤亡、建筑物和电子设备损坏(陆亚龙和肖功建, 2001)。因此, 了解雷暴中地闪活动的持续时间很有必要。Dixon and Wiener(1993)运用 TITAN 算法识别风暴并统计了风暴的持续时间, 发现大部分雷暴持续时间小于 2 h。Wilson et al(1998)在总结前人工作的基础上指出, 83% 的普通单体风暴的生命史小于 30 min。雷暴云电荷积累到一定阶段, 才会有地闪产生(Winn et al, 1974), 因此, 雷暴中地闪的持续时间应当稍短于雷暴持续时间。本文统计结果显示(图 3), 雷暴中地闪活动的持续时间基本维持在 2 h 以内, 占比达到 83%; 其中又以持续时间 $30 \sim 60$ min 居多, 达到 36%; 21% 的雷暴中地闪维持时间低于 30 min; 超过 3 h 的地闪活动的比例低于 7%。

对于各个区域而言, 雷暴中地闪活动持续时间随区域变化的差异不明显; 雷暴个体之间地闪活动持续时间具有较大差异, 大部分地闪活动具有快速

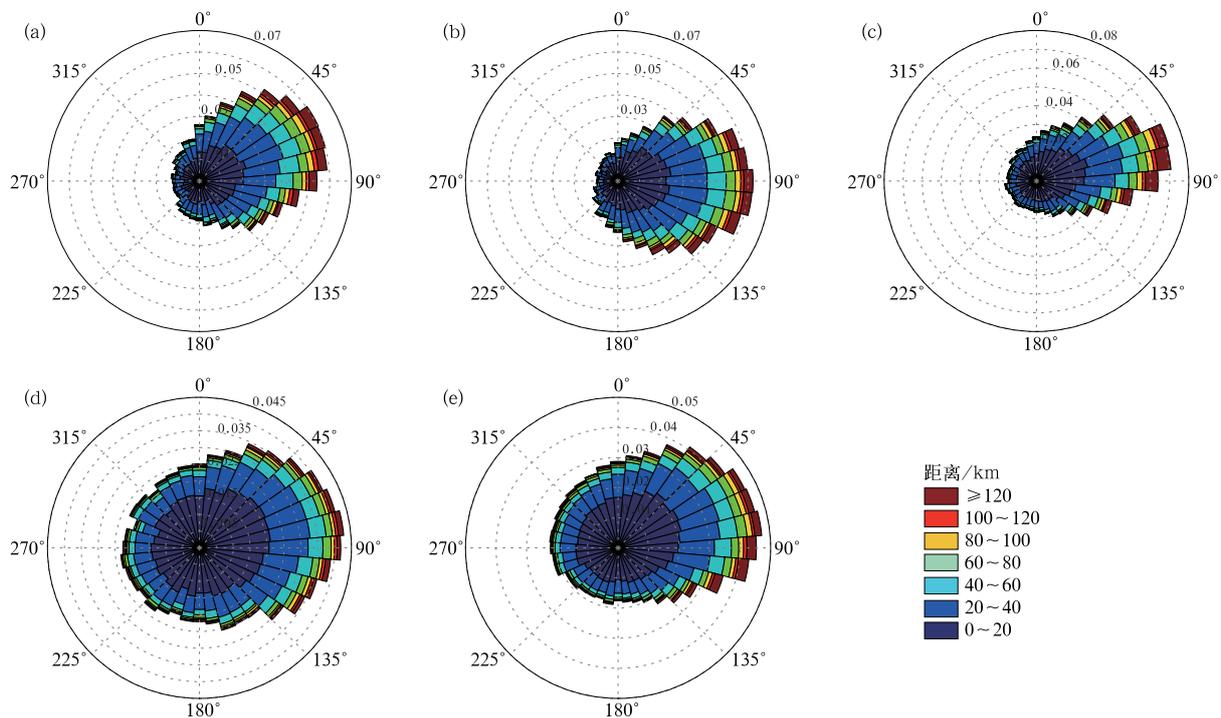


图 2 雷暴移动距离在各方向上的分布特征
 (a)东北,(b)华北,(c)华中与华东,(d)西南,(e)华南
 (0°为正北方位,90°为正东方向)

Fig. 2 Distribution characteristics of thunderstorm covering range in directions
 (a) Northeast China, (b) North China, (c) Central and East China,
 (d) Southwest China, (e) South China
 (0° is the north position, 90° is the east direction)

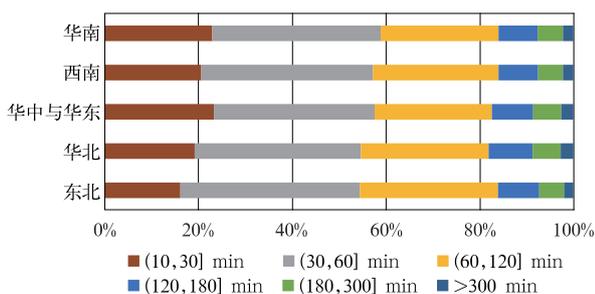


图 3 雷暴中地闪活动持续时间的分布特征
 Fig. 3 Duration characteristics of lightning
 during the process of thunderstorm

生成并消亡的特性。

2.1.3 雷暴移动速度

利用雷暴移动速度特征,可大致估算雷暴未来的移动范围。一般而言,雷暴移动速度分布于 0~100 km·h⁻¹ (韩雷等,2009;Liu and Li,2016),本文的统计结果显示出类似的特征。由图 4 可见在各个方向上,移动速度为 40~60 km·h⁻¹ 的雷暴比例

最高,占比约为 30%;其次为 20~40 km·h⁻¹ (28%)。从速度分布来看,移速缓慢(0~20 km·h⁻¹)的雷暴与移动速度快的雷暴(>80 km·h⁻¹)均较为少见。各个区域在各个移动方向上均有雷暴最快移动速度可超过 100 km·h⁻¹,但是出现的次数极少。整体而言,雷暴的平均移动速度约为 40 km·h⁻¹,与韩雷等(2009)、Liu and Li(2016)的统计结果相似。对于各区域而言,雷暴移动速度呈现出如下差异:

(1) 雷暴移动速度呈现纬度越高,速度越快的趋势。东北地区雷暴移动速度 40 km·h⁻¹ 以下的雷暴的比例明显偏低(24%),移速较快(>60 km·h⁻¹)的雷暴的比例相对较高(41%)。中纬度越高,中高层偏西风量越大,对流系统的环境平均风越大,引导雷暴更快速移动(具体分析见 2.1.1)。Maddox (1976)与 Bunkers et al(2000)研究显示,雷暴移速与高空风速往往存在正相关关系。

(2) 西南地区移速较慢的雷暴比例相对较高。

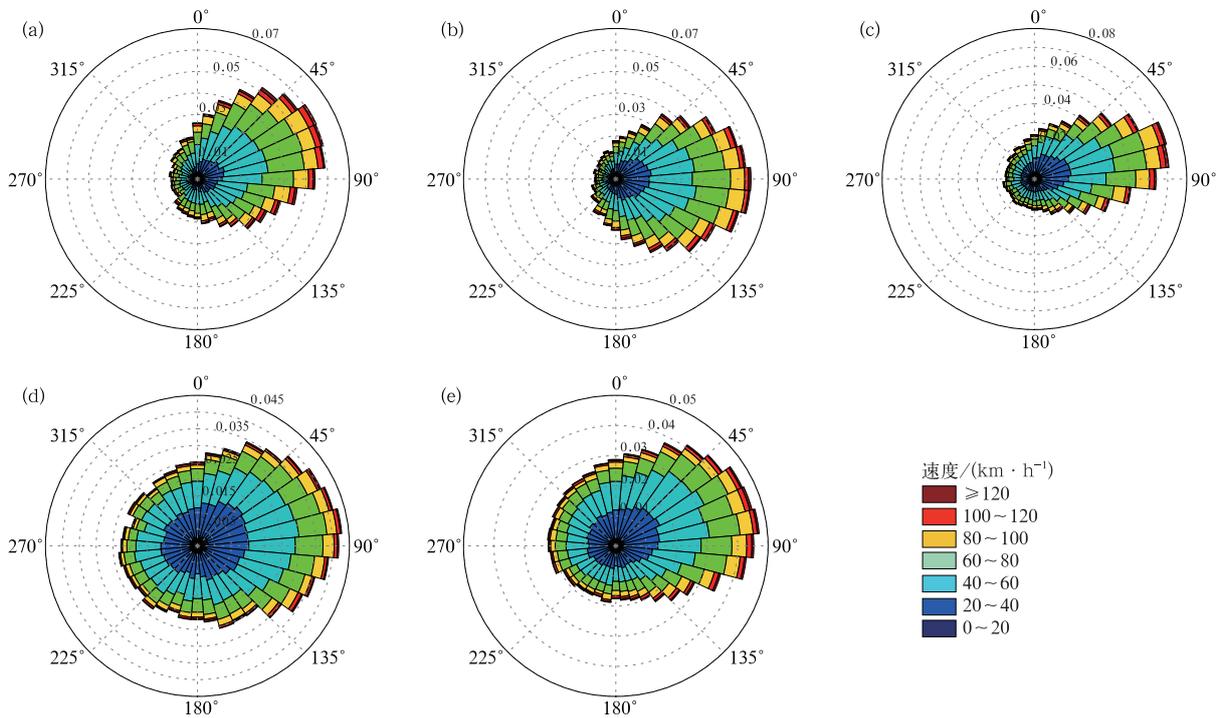


图 4 同图 2, 但为雷暴移动速度

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for thunderstorm moving speed

统计显示, 西南地区移速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下雷暴比例为 74.5%, 其余地区均低于 70%。西南地区地形主要以高原、盆地和丘陵为主, 除四川盆地外, 大部分地区海拔超过 1500 m, 由于特殊的地形地貌以及摩擦作用, 低层风速相对较小, 雷暴移动相对较慢, 同时导致雷暴移动距离较短。

2.2 雷暴发生的对流条件

Lock and Houston (2014) 分析了 2005—2007 年美国中部地区的雷暴初生的对流条件(包括对流有效位能、对流抑制能量和抬升条件等参数), 王婷波等(2014)基于 CAPE 和抬升指数(LI)对 2006—2008 年北京及其周边地区雷暴进行分类, 研究发现雷暴初生对流条件复杂, 没有一个单独的指数能有效判断对流是否触发。由此可见, 对于雷暴预报具有一定难度。

我国地域辽阔, 不同地区雷暴发生的对流环境往往具有较大差异。同时, 对于不同季节, 雷暴触发的动力、水汽与能量条件也大相径庭。为了对比不同地区、不同月份的雷暴发生发展对流环境, 图 5~图 7 分别给出了我国不同地区雷暴发生时的 PWAT、DT85、CAPE、SHEAR6 等对流物理参数在暖季(4—9 月)的统计分布情况。

2.2.1 水汽条件

水汽是影响雷暴云中动力、微物理过程的重要因子。整层可降水量表征大气中的水汽含量, 可反映雷暴中的大气水汽条件。由图 5 可见, 对于不同地

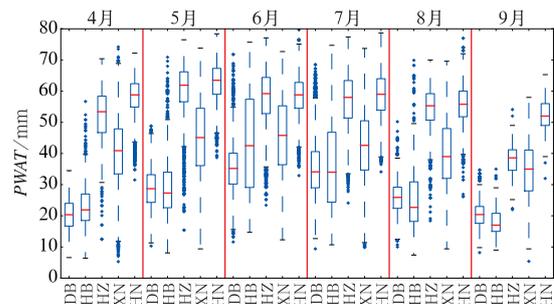


图 5 2010—2014 年 4—9 月不同地区雷暴的 PWAT 逐月分布 (DB: 东北区域, HB: 华北区域, HZ: 华中与华东区域, XN: 西南区域, HN: 华南区域, 下同)

Fig. 5 Monthly distribution of thunderstorm PWAT in different regions from April to September in 2010—2014 (DB: Northeast China, HB: North China, HZ: Central China and East China, XN: Southwest China, HN: South China; the same below)

区、不同月份,雷暴系统中的 PWAT 具有较大差异:

(1) 对于雷暴发生的水汽条件,我国中东部 5 个区域呈现明显的三个阶梯:华中与华东、华南地区雷暴发生的整层可降水量最高,西南次之,东北与华北地区最低。以 8 月为例,华中与华东、华北地区的 PWAT 中位值分别为 57、58 mm;东北与华北地区雷暴的水汽条件明显偏低,约为 25 mm;西南地区水汽条件居中,约为 38 mm。华中与华东、华南地区雷暴的 PWAT 的最小值基本超过 30 mm,对应这上述地区常年水汽条件较好。

(2) 各个地区的雷暴的 PWAT 随月份呈现一定变化。6、7、8 月的 PWAT 值明显高于 4、5、9 月,这也与我国季风气候,夏季暖湿而雷暴多发的情况密切相关。

总体而言,雷暴的生成需要一定的水汽条件,但是并非水汽条件越好,越有利于雷暴活动。过大的水汽可能会减少对流活动的上升能力,降低云底高度,减少云中水(冰)粒子的相互摩擦,从而抑制闪电活动的发生(罗慧等,2009)。熊亚军等(2006)也发现,当地面相对湿度过大时,相对湿度的增加不利于闪电活动的发生。我国南方地区由于地处低纬度地区,对流系统基本为热带型,暖云层厚度高,来自西南暖湿低空急流的高比湿云底水汽通量输送,使得暖区水汽条件较好。

2.2.2 不稳定条件

CAPE 揭示了大气层结稳定度,DT85 反映了大气垂直温度分布情况,二者能一定程度反映雷暴的大气不稳定条件。

图 6 给出了不同地区雷暴发生阶段 CAPE 与 DT85 的统计分布情况。对比分析后发现:

(1) 与水汽条件类似,6—8 月华中与华东、华南地区雷暴的 CAPE 较大,中位值超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;西南地区次之,约为 $750 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;东北地区与华北地区雷暴产生的大气不稳定能量较弱,均值低于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这与各地区主要对流类型密切相关。华中与华东、华南等地多底层暖平流强迫类型,能量条件最为充足;斜压锋生类型是西南地区最容易发生强对流天气类型,显著的冷暖平流导致斜压锋生,具备较好的能量条件;高空冷平流强迫对流天气是华北和东北地区主要的对流类型,高空强干冷平流起主导作用,在中等或较弱的能量条件下亦可触发对流(孙继松等,2014)。

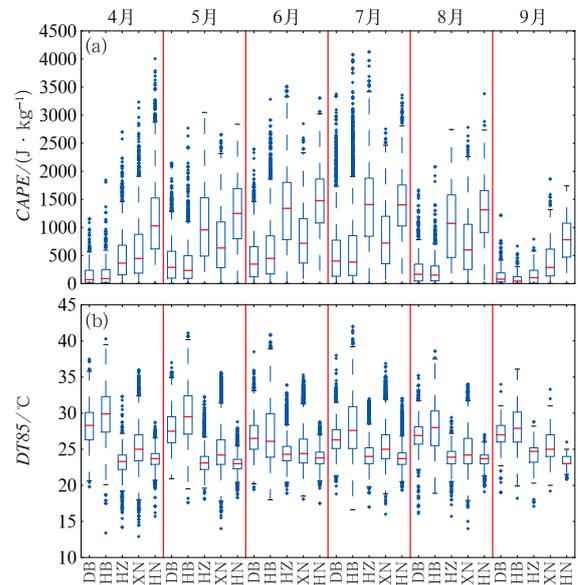


图 6 同图 5,但为 CAPE(a)与 DT85(b)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for CAPE (a) and DT85 (b)

(2) 虽然不同地区的雷暴 CAPE 均值差异较大,但是最小值基本都为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明不同地区在低的不稳定条件下均有触发雷暴的可能。张义军等(2009)研究发现有的系统性天气(如锋面),CAPE 值基本为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,层结较为稳定,对流性不强,然而能够产生较强的大气电场,进而产生闪电。此外,盛杰等(2014)统计发现,高架雷暴可在地面抬升计算的 CAPE 为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的环境下产生。

(3) 与 PWAT 和 CAPE 相反,东北与华北地区雷暴发生的 DT85 值最大,其次为西南,华中与华东、华南地区最低。各地区雷暴的 DT85 值,随月份变化较小,东北与华北地区 DT85 中位值接近 27°C ,西南地区约为 25°C ,华中与华东及华南地区约为 23°C 。中纬度地区,气旋波动模式中的主要天气现象为锋系活动,对流活动发生在冷空气一侧,暖区多晴好天气;相比之下,低纬度地区,对流活动通常并不是出现在锋际或锋后,而是位于锋前暖区,容易产生暖区对流,继而形成对流(何立富等,2016)。因此,导致南方地区产生雷暴的中低层温差显著低于北方地区。

2.2.3 动力条件

垂直风切变对于对流风暴的作用早已有共识,能够很大程度决定对流风暴是否组织化发展,能否形成较强雷暴(Bunkers, 2002; 张小玲等,2012)。

本文利用 SHERA6 条件对比了各个区域不同月份雷暴的垂直风切变条件。

整体而言,不同地区、不同季节的雷暴对应的垂直风切变条件具有较大差异。

(1) 雷暴在东北与华北地区对应的 SHERA6 最大,华中与华东次之,西南与华南地区最小。西南地区与华南地区水汽、能量条件相对更为充足,暖区对流更易发展,往往对应较弱的垂直风切变条件。与东北与华北地区雷暴产生时较强垂直风切变条件相对应,2.1 节分析显示上述地区雷暴移动迅速、雷暴移动距离较长。这与 Chisholm and Renick (1972) 研究一致,中高层垂直风切变越强,对流系统移动越快。

(2) 从闪电形成机理角度而言,强的垂直风切变利于产生较强的地闪,尤其是正地闪,放电过程。受高空风影响,雷暴云正负电荷结构倾斜,正负电荷区出现水平方向上的错位,利于正地闪的发生 (Brook et al, 1982; MacGorman et al, 1998); 另一方面,在强的垂直风切变条件下,上升气流倾斜,使阵风锋前部的暖湿气流源源不断地输送到发展中的上升气流中 (Doswell III, 2001), 进一步增大其起电过程,从而使得雷暴云电荷量增大,地闪等放电活动增强。

(3) 相对而言,越暖湿的月份,雷暴发生对应的 SHERA6 值越小。这也可能与暖湿条件下的热对流更易生成有关。在无垂直风切变的情况下,也能产生雷暴。如果无垂直风切变的影响,云内正负电荷呈上下分布的垂直结构,雷暴云下地面电场只受云内电量和荷电中心高度的影响。因此,雷暴闪电中正电荷区主要以云放电活动为主,负电荷区也会有产生较弱的地闪活动 (Brook et al, 1982)。

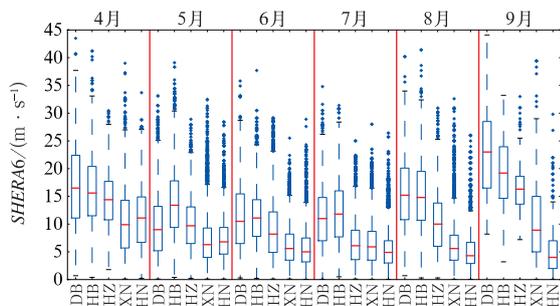


图 7 同图 5, 但为 SHERA6

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for SHERA6

2.3 雷暴的地理分布

2.3.1 我国中东部雷暴分布

我国地域辽阔,南北气候条件迥异,造成各地雷暴发生条件具有较大差异。雷暴的形成,一方面与局地的热力、水汽与动力气候条件相关,另一方面与当地地形密切相关。目前,一般用雷暴日、雷暴小时等参数表征某地的雷暴活动的强弱,反映雷暴整体活动状况,但是对于统计时段内雷暴过程的强弱与频次缺乏描述能力。本节给出雷暴触发频次的分布情况,能够从另一方面反映各地雷暴的活动规律。为了解我国中东部地区的雷暴发生概况,图 8 给出了 2010—2014 年雷暴过程触发频次的地域分布情况。我国中东部地区基本都属于雷暴活动范围。2010—2014 年,雷暴过程最密集的区域为广东、海南等地,雷暴年平均触发次数超过 $100 \text{次} \cdot (100 \text{km})^{-2}$; 云南与四川交界地区有一雷暴起始活跃区域,中心累计次数超过 $100 \text{次} \cdot (100 \text{km})^{-2}$ 。此外,江南、西南地区东部、华南地区西部等地为产生雷暴较为活跃的地区,雷暴过程次数超过 $80 \text{次} \cdot (100 \text{km})^{-2}$ 。华北地区太行山一带存在雷暴发生较为活跃的区域,雷暴发生频次超过 $50 \text{次} \cdot (100 \text{km})^{-2}$ 。

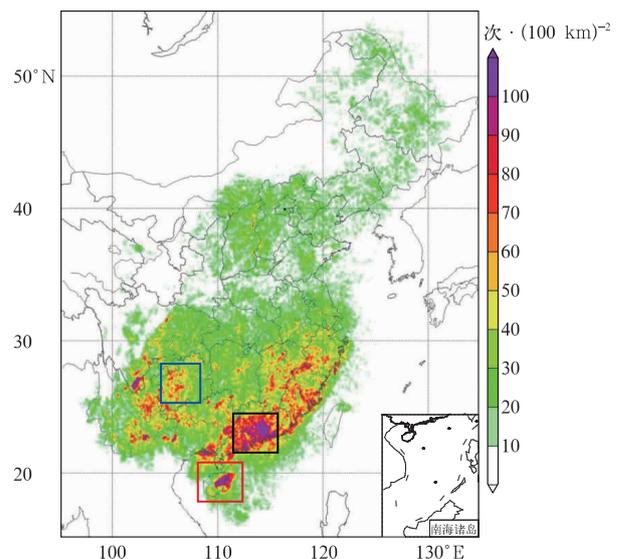


图 8 2010—2014 年雷暴年平均触发频次分布

(格点分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)

Fig. 8 The annual average initiation frequency of thunderstorms from 2010 to 2014

(The grid resolution is $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)

2.3.2 雷暴触发与地形的关系

已有研究表明,对流活动的触发与地形存在密切关系。Liu and Li (2016)发现雷暴发生和消亡与地表覆盖状况密切相关,雷暴初生在城区与郊区也存在显著差异。Lock and Houston(2015)发现雷暴的初生与地形存在显著相关关系,在墨西哥湾与海拔梯度较大的地区存在明显的雷暴初生密集区域。

图8展示了四川盆地地区(蓝色矩形区域)与广东珠三角地区(黑色矩形区域)受地形影响,存在明显的雷暴触发频次大值区。可以看到,在海拔梯度较大的四川盆地西麓存在一个明显的雷暴生成密集带,盆地内部地区雷暴触发频次约为 $30\sim 40$ 次 $\cdot(100\text{ km})^{-2}$,而四川盆地西麓频次则达到 $60\sim 70$ 次 $\cdot(100\text{ km})^{-2}$ 。与四川盆地的情况类似,珠江三角洲地区为平原地形,海拔较低,其北部地区地形变化为丘陵地形,海拔抬升,整个地形呈现明显的“喇叭口”地形。与此独特地形相对应,珠江三角洲“喇叭口”地区存在明显密集的雷暴触发,雷暴触发频次超过 100 次 $\cdot(100\text{ km})^{-2}$ 。雷暴生成之后,多向北移动,对应偏南暖湿气流向北输送,在“喇叭口”地形的抬升作用下,触发对流。此外,海南岛东部(红色矩形区域)存在一个雷暴密集区域,呈带状分布,与海南五指山南麓相对应。

3 结 论

本文利用全国闪电定位数据,采用雷暴识别与追踪算法,对2010—2014年全国的雷暴单体路径进行了识别与追踪,对输出的505 257个雷暴的特征参数进行统计分析,结果发现:

(1)我国中东部地区雷暴具有局地性强、快速生消的特征,超过70%的雷暴移动速度低于 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、超过80%雷暴中地闪活动持续时间低于2h、超过90%的雷暴移动距离低于 60 km 。

(2)各地区雷暴的活动规律具有一定差异,如东北地区雷暴移动速度相对更快,西南地区移速较慢,且雷暴移动距离相对更短。

(3)对于雷暴的水汽和能量条件,我国中东部5个区域呈现明显的三个阶梯:华中与华东、华南地区雷暴发生的PWAT与CAPE值最高,西南地区次之,东北与华北地区最低。SHERA6则反之。

(4)广东、海南等地为雷暴活动最活跃区域,江南、西南地区东部、华南地区西部、华北地区太行山

一带等地为产生雷暴较为活跃的地区。雷暴分布与地形密切相关,四川盆地西麓与珠江三角洲地区呈现出明显气流随地形抬升而导致的雷暴触发的情况。

整体而言,雷暴具有快速生消、局地性强的特性,具有较大的预报难度。本文的分析可以加深人们对雷暴发生发展过程的认识,在雷暴的短临预报过程中,为判断雷暴的发生发展提供一定参考依据。

参考文献

- 陈光舟,王体健,娄珊珊,等,2014.安徽闪电分布特征和不安定条件分析[J].气象科学,34(5):543-548. Chen G Z, Wang T J, Lou S S, et al, 2014. Analysis on the distributions and instabilities of lightning in Anhui[J]. J Meteor Sci, 34(5): 543-548 (in Chinese).
- 陈思蓉,朱伟军,周兵,2009.中国雷暴气候分布特征及变化趋势[J].大气科学学报,32(5):703-710. Chen S R, Zhu W J, Zhou B, 2009. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China[J]. Trans Atmos Sci, 32(5): 703-710 (in Chinese).
- 丁青兰,王令,陈明轩,等,2007.北京地区暖季对流天气的气候特征[J].气象,33(10):37-44. Ding Q L, Wang L, Chen M X, et al, 2007. Climate character analysis of convective weather during warm season (May to September) in Beijing[J]. Meteor Mon, 33(10): 37-44 (in Chinese).
- 冯桂力,陈文选,刘诗军,等,2002.山东地区闪电的特征分析[J].应用气象学报,13(3):347-355. Feng G L, Chen W X, Liu S J, et al, 2002. Preliminary analysis of lightning characteristics in Shandong[J]. J Appl Meteor Sci, 13(3): 347-355 (in Chinese).
- 巩崇水,曾淑玲,王嘉媛,等,2013.近30年中国雷暴天气气候特征分析[J].高原气象,32(5):1442-1449. Gong C S, Zeng S L, Wang J Y, et al, 2013. Analyses on climatic characteristics of thunderstorm in China in recent 30 years[J]. Plateau Meteor, 32(5): 1442-1449 (in Chinese).
- 郭虎,熊亚军,付宗钰,等,2008.北京市自然雷电与雷电灾害的时空分布[J].气象,34(1):12-17. Guo H, Xiong Y J, Fu Z Y, et al, 2008. Temporal-spatial characteristics of lightning activity and lightning disaster over Beijing[J]. Meteor Mon, 34(1): 12-17 (in Chinese).
- 韩雷,俞小鼎,郑永光,等,2009.京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征[J].科学通报,54(11):1585-1590. Han L, Yu X D, Zheng Y G, et al, 2009. Statistic characteristics of severe convective storm during warm-season in the Beijing-Tianjin Region and its vicinity[J]. Chin Sci Bull, 54(14): 2493-2498 (in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,等,2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, et al, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569 (in Chinese).

- 酃嘉诚,钟颖颖,冯民学,2012.江苏省区域闪电分布特征[J].大气科学学报,35(3):380-384. Li J C, Zhong Y Y, Feng M X, 2012. Regional distribution of lightning in Jiangsu[J]. Trans Atmos Sci, 35(3):380-384(in Chinese).
- 刘全根,汤懋苍,1966.中国降雹的气候特征[J].地理学报,(1):48-65. Liu Q G, Tang M C, 1966. The climatic characteristics of hail in China[J]. Acta Geogr Sin, (1):48-65(in Chinese).
- 陆亚龙,肖功建,2001.气象灾害及其防御[M].北京:气象出版社. Lu Y L, Xiao G J, 2001. Meteorological Disaster and Its Prevention[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 罗慧,刘勇,冯桂力,等,2009.陕西中部一次超强雷暴天气的中尺度特征及成因分析[J].高原气象,28(4):816-826. Luo H, Liu Y, Feng G L, et al, 2009. Mesoscale characteristics of a super thunderstorm weather in central Shaanxi Province and its cause analysis [J]. Plateau Meteor, 28(4):816-826(in Chinese).
- 马明,陶善昌,祝宝友,等,2004.卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布[J].中国科学D辑 地球科学,34(4):298-306. Ma M, Tao S C, Zhu B Y, et al, 2004. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 48(2):219-229(in Chinese).
- 盛杰,毛冬艳,沈新勇,等,2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].气象,40(9):1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al, 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring[J]. Meteor Mon, 40(9):1058-1065(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[M].北京:气象出版社:282. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Severe Convective Weather Forecasting[M]. Beijing:China Meteorological Press:282(in Chinese).
- 陶祖钰,赵昕奕,1993.京津冀地区闪电的气候分析[J].气象学报,51(3):325-332. Tao Z Y, Zhao X Y, 1993. Climatological analysis of lightning in Beijing-Tianjin-Hebei District[J]. Acta Meteor Sin, 51(3):325-332(in Chinese).
- 王婷波,郑栋,张义军,等,2014.基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系[J].应用气象学报,25(1):33-41. Wang T B, Zheng D, Zhang Y J, et al, 2014. Relationship between lightning and precipitation based on classification of atmospheric stratification and development of thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 25(1):33-41(in Chinese).
- 熊亚军,郗秀书,周筠珺,等,2006.区域闪电活动对地面相对湿度的响应[J].地球物理学报,49(2):367-374. Xiong Y J, Qie X S, Zhou Y J, et al, 2006. Regional responses of lightning activities to relative humidity of the surface[J]. Chin J Geophys, 49(2):367-374(in Chinese).
- 徐桂玉,杨修群,2001.我国南方雷暴的气候特征研究[J].气象科学,21(3):299-307. Xu G Y, Yang X Q, 2001. Climatic features of thunderstorms in the South China[J]. Sci Meteor Sin, 21(3):299-307(in Chinese).
- 张敏锋,冯霞,1998.我国雷暴天气的气候特征[J].热带气象学报,14(2):156-162. Zhang M F, Feng X, 1998. A study on climatic features and anomalies of the thunderstorm in China[J]. J Trop Meteor, 14(2):156-162(in Chinese).
- 张小玲,湛芸,张涛,2012.对流天气预报中的环境场条件分析[J].气象学报,70(4):642-654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T, 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):642-654(in Chinese).
- 张义军,言穆弘,孙安平,等,2009.雷暴电学[M].北京:气象出版社. Zhang Y J, Yan M H, Sun A P, et al, 2009. Thunderstorm Electricity[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 郑栋,孟青,吕伟涛,等,2005.北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析[J].应用气象学报,16(5):638-644. Zheng D, Meng Q, Lü W T, et al, 2005. Spatial and temporal characteristics of cloud-to-ground lightning in summer in Beijing and its circumjacent regions[J]. J Appl Meteor Sci, 16(5):638-644(in Chinese).
- 郑永光,陈炯,朱佩君,2008.中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J].科学通报,53(4):471-481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. Chin Sci Bull, 53(10):1574-1586. (in Chinese)
- 中国科学院空间科学与应用研究中心,ADTD雷电监测定位系统课题组,2004.雷电监测定位系统 ADTD 雷电探测仪用户手册[Z].北京:中国科学院. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, 2004. User's Manual of Lightning Detection and Position System ADTD Lightning Detector[Z]. Beijing: Chinese Academy of Science(in Chinese).
- 中国气象局,2007.闪电监测定位系统 第1部分:技术条件:QX/T 79-2007[S].北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2007. Lightning detection and location system Part 1 Technical specification: QX/T 79-2007[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 周康辉,郑永光,蓝渝,2016.基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法[J].应用气象学报,27(2):173-181. Zhou K H, Zheng Y G, Lan Y, 2016. Flash cell identification, tracking and nowcasting with lightning data[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):173-181(in Chinese).
- Brooks H E, 2009. Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data[J]. Atmos Res, 93(1/2/3):546-553.
- Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al, 1982. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms[J]. J Geophys Res, 87(C2):1207-1215.
- Bunkers M J, 2002. Vertical wind shear associated with left-moving supercells[J]. Wea Forecasting, 17(4):845-855.
- Bunkers M J, Klimowski B A, Zeitle J W, et al, 2000. Predicting supercell motion using a new hodograph technique[J]. Wea Forecasting, 15(1):61-79.
- Chisholm A J, Renick J H, 1972. The Kinematics of Multicell and

- Supercell Alberta Hailstorms[R]. Edmonton Research Council of Alberta Hail Studies;24-31.
- Corfidi S F, Meritt J H, Fritsch J M, 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes[J]. *Wea Forecasting*, 11(1): 41-46.
- Dixon M, Wiener G, 1993. TITAN: thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 10(6): 785-797.
- Doswell III C A, 2001. Severe convective storms—an overview[M]// Doswell III C A. *Severe Convective Storms*. Boston: American Meteorological Society; 1-26.
- Kuk B, Kim H, Ha J, et al, 2012. A fuzzy logic method for lightning prediction using thermodynamic and kinematic parameters from radio sounding observations in South Korea[J]. *Wea Forecasting*, 27(1): 205-217.
- Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al, 2011. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island[J]. *Wea Forecasting*, 26(1): 44-60.
- Liu W B, Li X G, 2016. Life cycle characteristics of warm-season severe thunderstorms in central united states from 2010 to 2014 [J]. *Climate*, 4(3): 45.
- Lock N A, Houston A L, 2014. Empirical examination of the factors regulating thunderstorm initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 142(1): 240-258.
- Lock N A, Houston A L, 2015. Spatiotemporal distribution of thunderstorm initiation in the US Great Plains from 2005 to 2007 [J]. *Int J Climatol*, 35(13): 4047-4056.
- MacGorman D R, MacGorman R, Rust W D, 1998. *The Electrical Nature of Storms*[M]. New York: Oxford University Press.
- Maddox R A, 1976. An evaluation of tornado proximity wind and stability data[J]. *Mon Wea Rev*, 104(2): 133-142.
- Rodriguez A, Laio A, 2014. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. *Science*, 344(6191): 1492-1496.
- Wapler K, James P, 2015. Thunderstorm occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions[J]. *Atmos Res*, 158-159: 231-244.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al, 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(10): 2079-2100.
- Winn W P, Schwede G W, Moore C B, 1974. Measurements of electric fields in thunderclouds[J]. *J Geophys Res*, 79(12): 1761-1767.
- Xia R D, Zhang D L, Wang B L, 2015. A 6-yr cloud-to-ground lightning climatology and its relationship to rainfall over central and Eastern China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(12): 2443-2460.
- Yang X L, Sun J H, Li W L, 2015. An analysis of cloud-to-ground lightning in China during 2010—13[J]. *Wea Forecasting*, 30(6): 1537-1550.
- You W, Zang Z L, Pan X B, et al, 2015. Statistical analysis of thunderstorms on the eastern Tibetan Plateau based on modified thunderstorm indices[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(4): 515-527.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al, 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. *Wea Forecasting*, 28(5): 1081-1098.