

王娟, 谌芸. 2015. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析. 气象, 41(2): 160-170.

2009—2012 年中国闪电分布特征分析^{*}

王娟^{1,3} 谌芸²

1 成都信息工程学院, 成都 610225

2 国家气象中心, 北京 100081

3 北京市昌平区气象局, 北京 102200

提 要: 运用全国雷电监测定位系统 ADTD 获取的 2009 年 1 月至 2012 年 12 月云地闪电资料, 对我国闪电的时空分布特征进行统计分析。结果表明: 地闪中负地闪占闪电总数的 94% 以上, 正地闪占 5% 左右, 我国闪电主要发生在 5—9 月, 7、8 月是闪电高发期, 同雨带的推进有较好的对应关系。随着季风的推进, 闪电从南向北, 从东向西逐渐增多。闪电在夏季达最大, 春秋季节次之, 冬季最小; 闪电频次日变化主要呈单峰分布, 全国闪电多发时段在 16—17 时, 同强对流天气多发时段相对应。闪电总体分布南部比北部多, 东部沿海比西部内陆多; 闪电密度分布呈明显的地域性差异, 其中华南地区、中东部地区以及四川盆地为我国闪电密度高值区; 闪电白天主要发生在江浙以及广东沿海一带, 夜间则主要发生在云贵、川渝内陆地区。午后至傍晚(14—20 时)闪电最活跃, 上午(08—14 时)最不活跃。三个闪电高发区的闪电峰值所在月份不同, 华南地区主要在 6 月, 四川盆地主要在 7 月, 而中东部地区则在 8 月出现最大值。春季闪电最活跃的区域是华南, 这和该区域的前汛期降水密切相关。正负闪电强度主要集中在 10~40 kA, 累计概率在 60% 以上的正、负地闪电强度分别小于 60 kA 和 35 kA; 累计概率在 90% 以上的正、负地闪强度分别小于 140 kA 和 65 kA, 闪电强度的低值区主要分布负闪, 而正闪主要分布在闪电强度的大值区。

关键词: 闪电活动, 时空分布, 闪电密度, 闪电强度

中图分类号: P427

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.004

Analysis of the 2009—2012 Lightning Distribution Characteristics in China

WANG Juan^{1,3} CHEN Yun²

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Changping District Meteorological Office of Beijing, Beijing 102200

Abstract: Using the cloud-to-ground lightning data from 2009 to 2012 probed by ADTD Lightning Location Monitoring System, we analyze the spatio-temporal distribution characteristics of flashes. The results show that: the negative lightning flashes are over 94% of the total, but the positive lightning accounts for about 5%. Lightning is prone to occur from May to September, most frequently seen in July and August, which is correspondent to rainfall belts. With the advance of monsoons, lightning flashes gradually increase from south to north and from east to west. Summer has lightnings the most, followed by spring and autumn, and in winter almost none. The diurnal distributions of lightnings show the single-peak characteristic, and most of them occur in 16:00—17:00 BT, corresponding to the time periods of severe convective weather events. The overall distribution of lightning is that there are more in Eastern coast and the South than in western inland and the North. The lightning density distribution has obvious regional differences.

* 国家自然科学基金项目(41175048)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006005 和 GYHY201206004)共同资助

2013 年 9 月 23 日收稿; 2014 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者: 王娟, 主要从事预报和中尺度灾害天气研究. Email: andycris@126.com

通信作者: 谌芸, 主要从事中尺度天气研究. Email: chenyun@cma.gov.cn

The central and eastern regions, South China and the Sichuan Basin are the high lightning density area. The daytime lightning mainly occurs in the coastal areas of Jiangsu, Zhejiang and Guangdong while the night lightning usually appears in inland areas of Yunnan, Sichuan and Chongqing. The lightning in the afternoon (14:00—20:00 BT) is most active, but less active from 08:00 to 14:00 BT. The lightning high value areas in different regions appear in different months. The high lightning value of South China is in June, Sichuan Basin in July and the central and eastern parts in August. Spring lightning of southern China is most active, which is closely related to the pre-rainy season in the region. The positive and negative lightning intensity is mainly concentrated in the 10 to 40 kA. The positive and negative ground lightning intensities with cumulative probability of more than 60% are less than 60 kA, 35 kA respectively. The positive and negative lightning intensities with cumulative probability of more than 90% are less than 140 kA, 65 kA respectively. Lightning intensity low value areas mainly distribute in negative lightnings while the high value areas often appear in positive lightnings.

Key words: lightning activities, spatio-temporal distribution, lightning density, lightning intensity

引 言

闪电即雷电,作为强对流天气(雷暴)的产物之一,是由带电荷的积雨云层内部、云层与云层之间或者云层与大地之间产生的一种长距离瞬间放电现象,具有大电流、高电压、强电磁辐射等特征。闪电尤其是地闪,与电力系统、通讯系统、交通运输等密切相关,给人类的生命财产安全带来严重威胁。据相关统计,全球每年因雷电造成的人员伤亡超过 1 万人,所造成的损失在 10 亿美元以上,被联合国公布为“最严重的十种自然灾害之一”(许小峰,2004)。20 世纪 80 年代以来,随着信息技术的快速发展,微电子产品普遍使用,雷电引起的危害显著增加,产生的社会影响越来越大。因此,对闪电的深入研究显得尤为重要。

近十几年来,随着雷电探测技术和手段的进步,国内外学者对闪电活动规律进行了大量的研究。Smith 等(2005)研究墨西哥湾沿岸北部 5—9 月地闪活动,发现闪电活动受地理特征和中尺度环流的影响。Westcott 等(1995)分析美国中心城市及其周围的闪电,发现大城市的闪电密度显著增大,闪电频率与较大的云凝结核浓度、城市人口、城市面积及地形特征有关。MacGorman 等(1984)和 Hidayat 等(1998)分别对美国本土、印度尼西亚的落雷密度、闪电的日变化等特征进行了分析,研究结果发现落雷密度与地形有很好的相关。Scott 等(2011)研究发现佛罗里达州的闪电具有季节性、区域性以及随

风暴尺度变化的特点;Gabriele 等(2013)研究了美国 16 年云地闪电活动,指出极端雷电活动主要集中在美国中部以及阿巴拉契亚山脉西部,闪电主要发生在夏季,且最近几年有增加的趋势,所观察到的闪电活动的变化可能与自然或人为引起的气候变化有关。Sheridan 等(1997)研究了美国中南部地区 4—9 月地闪和地面降水的关系,发现不同区域两者的相关系数存在差异。MacGorman 等(1998)总结了不同雷暴过程中地闪的特征,指出在一些产生冰雹、龙卷风等灾害性天气的雷暴中常产生大量的正地闪,且正地闪峰值出现在冰雹或龙卷风发生前几分钟。

国内也有许多学者对闪电活动特征做了大量的统计分析,总结了一些区域性的闪电活动规律。张义军等(2008)综述了闪电活动的气候学特征研究进展,指出全球闪电密度高值区主要分布在海岸、山地、中尺度气旋多发区以及热带辐合带的辐合区内。马明等(2007)分析了中国雷电活动特征,划分出 4 个雷暴区域,华南地区最高,西南次之,再后是华东、华北和东北地区,西北最低。郟秀书等(2003)利用 TRMM 卫星对青藏高原中部地区的闪电活动进行了研究,表明高原上的闪峰值出现在下午 17 时左右,比同纬度带上的荆州地区提前 3 h。张敏锋等(2000)、冯桂力等(2002)分别研究我国北方以及山东地区闪电活动特征,指出闪电空间分布与地形和下垫面性质有关;石玉恒等(2012)、王学良等(2008; 2012)、黄振等(2010)和周泓等(2014)分别研究了北京、湖北、大连地区、滇中地区闪电的极性分布、日变

化、强度、闪电密度等,指出地表状况发生明显变化的地带是雷电多发区。李京校等(2013)对北京及其周边地区闪电活动进行分析,指出北京中部地区闪电较多,这与北京中部人口密集、高楼和硬化地面多以及大气污染易出现城市热岛效应有关。李照荣等(2004)分析了兰州及周边地区闪电活动,发现闪电空间分布中心与冰雹发生源地和影响区对应一致;闪电多发区与地形和气候背景有很大关系。蔡晓云等(2001)对北京地区云地闪电活动进行研究,发现闪电定位资料比雷达资料在降雹、雷雨过程中至少有1~3 h的提前量。郑栋等(2012)利用闪电定位资料和气象台站雨量观测资料,分析地闪活动与降水的相关关系,发现我国由南向北的区域两者相关性逐渐增强。

综上所述,在我国不同地区闪电的时空分布特征存在明显的差异。虽然我国在闪电活动特征方面已开展大量研究,但大部分仍关注局部地区;而且很多的分析仅限于闪电统计特征;针对全国范围内的闪电活动特征研究时,没有将与之有密切关系的强对流天气联系起来,近几年全国性的闪电活动和强对流关系的研究相对较少。因此本文利用2009—2012年我国地闪定位资料,对全国地闪时空分布特征进行分析,旨在进一步全面地加深对我国地闪活动规律的认识;同时闪电的发生总是伴随有强对流天气的发展和演变,将闪电和强对流天气联系起来,有助于提高对强对流天气的认识。这不仅为我国雷电灾害防御及雷击风险评估提供参考依据,而且有助于提高闪电活动的短时预报水平,最终为我国对流活动的临近预报提供背景参考。

1 资料来源

本文所使用的闪电资料由全国雷电监测定位系统ADTD获取,该系统是基于闪电发生时向外辐射的电磁波有其固有的特征这一原理,通过设置多个探测点,分析波形特征点到达每个测站的准确时间,从而实现云地闪电的精确定位。截至2010年12月,国家雷电监测网全国有337个监测站,目前基本覆盖了除青藏高原以及新疆新疆外的我国大部分地区;单站的探测效率是80%~90%,有效探测范围平均是300 km,定位精度小于500 m。另外闪电回

击的定位时间很快,在雷电数据定位计算和处理效率上平均小于10 ms。闪电定位系统测量的参数主要提供的信息包括地闪回击发生的时间、位置、极性、强度、陡度、定位误差、定位方式以及地闪发生的省市县资料。为了有效得出我国近4年全国发生的闪电频数以及闪电密度空间分布特征,选用了2009年1月1日到2012年12月31日全国范围内的地闪资料,对中国年、月、季、日、逐日各时段发生闪电频数和随经纬度变化、闪电密度分布的气候特征以及闪电强度变化进行处理和统计分析。将国外发生的地闪数据、闪电强度显示为0的数据以及重复记录的闪电数据进行剔除,避免统计重复,提高数据的质量。所有的闪电资料皆为地闪,只统计发生闪电的频次以及正负闪电的强度变化,而不考虑闪电放电陡度、误差以及定位方式。闪电密度定义为:每年每平方千米范围内发生的总闪电次数,该值能够较为精确地反映全年闪电活动的多少,单位:次·km⁻²·a⁻¹。

2 时间分布

2.1 年变化

2009—2012年我国正负地闪频数统计(见表1)。由表1可见,近4年我国逐年发生闪电次数相差不大,其中总地闪频数以2010年最高,达841万多次;地闪过程中以负地闪为主,比率高达94%以上,而正地闪发生的几率很少,只占5%左右。本文中所得的正地闪比例与许小峰等(2003)报道的美国1992—1994年正闪电占总闪4%~5%的结果相一致。负闪大约是正闪的18倍,这主要与对流云中电荷分布结构有关。在云的中部一般带负电荷,上部一般带正电荷,正负电荷累积到一定程度就会放电,相对于带正电的上部电荷区而言,带有负电荷的云下部距离地面较近,负电荷和地面之间更容易放电。

同时,我国各年度白天的地闪频数高于夜间,4年年平均每天白天所发生的总地闪频数达13496次,占年均日闪电次数的59.77%;夜间达到9082次,占年均总地闪频数的40.23%,昼夜闪比为1.49。昼夜正闪比低于昼夜负闪比,4年平均正地闪占总地闪百分比为5.1%。

表 1 2009—2012 年中国正、负和总地闪频数(次·a⁻¹)以及所占比例、正负地闪比的统计
Table 1 Statistics of lightning frequency of positive, negative and total flash rate (times/year) as well as the proportion of positive and negative ground flash ratio in China in 2009—2012

年份	闪电类别	全年闪电次数	正闪占总闪百分比/%	白天闪电次数	夜晚闪电次数	昼夜闪比
2009	正闪	411062	5.2	210854	200208	1.05
	负闪	7475271		4403650	3071621	1.43
	总和	7886333		4614504	3271829	1.41
2010	正闪	504746	6.0	272381	232365	1.17
	负闪	7908665		4478657	3430008	1.31
	总和	8413411		4751038	3662373	1.30
2011	正闪	367859	4.4	207459	160400	1.29
	负闪	7920613		4972507	2948106	1.69
	总和	8288472		5179966	3108506	1.67
2012	正闪	397140	4.7	219693	177447	1.24
	负闪	7978725		4938952	3039773	1.62
	总和	8375865		5158645	3217220	1.60
4 年平均	正闪	420201	5.1	227597	192605	1.18
	负闪	7820819		4698441	3122377	1.50
	总和	8241020		4926038	3314982	1.49

2.2 月、季变化

图 1a 表明我国全年闪电活动月分布呈现单峰特征,主要集中在 5—9 月,占总闪电频数的 91.8%,高发月份 6—8 月,正地闪峰值在 7 月,7 月的正地闪次数占全年的 24.23%;负地闪峰值在 8 月,8 月的负闪次数占全年的 28.52%。7—8 月空气中水汽含量充足,而温暖潮湿的上升气流是产生雷电的必要条件之一;同时盛夏对流旺盛,0℃层高度较高,所积累的不稳定能量增强,对流活动向上发展,这有利于云内正负电荷相互碰撞摩擦后在不同部位形成和累积,最终容易形成闪电。冬半年 10 月至次年 3 月

发生闪电很少,仅占总闪电的 4.3%,但每月均有闪电出现。这是因为冬季气温较低,热力作用较弱,对流活动不强,但是冬季强的暴风雪天气出现时也可能会出现闪电,就是人们常说的“雷打雪”的现象,可能与其中的微物理过程有关。9 月较 8 月地闪频数迅速减小,可能是因为 9 月天气转凉,大气中水汽含量下降的缘故。

同时,正地闪百分比最大值在 1 月,高达 49.2%,最小值在 8 月,为 3.6%。正地闪百分比夏季最低,比例不足 10%,春秋季节较高,冬季最大,高达 40%以上,正地闪百分比与正地闪频数的月变化形势基本相反。说明在闪电高发的月份主要以负地闪为主,而在闪电很少发生的冬季则表现出正闪电活动频繁,此分析符合正极性地闪容易在冬季出现的特点。

由我国地闪次数季节变化分布(图略),可知夏季地闪最多,为 5957015 次,占全年总地闪的 72.28%;冬季最少为 70022 次,占全年的 0.85%;春、秋季分别为 1070426 和 1143557 次,占全年的 12.99%和 13.88%。夏季闪电次数是冬季的 85 倍。2011 年(2010 年)夏季闪电次数最多(最少),而冬季闪电次数最少(最多)。夏季(6—8 月)是闪电的主要高发季节,冬季(12—2 月)则很少发生闪电活动,这是因为冬季我国大范围地区受西伯利亚高压以及蒙古西北气流的控制,气温普遍较低且空气干燥,对流天气很难产生,因此是闪电次数最少的时期;春季(3—5 月)暖湿气团逐渐活跃,受冷暖气团

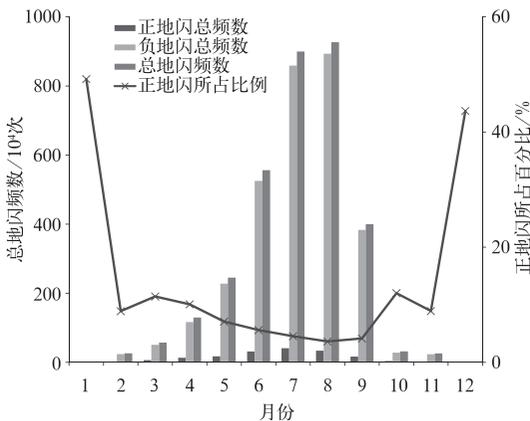


图 1 2009—2012 年正、负及总地闪频数以及正地闪比例月变化

Fig. 1 Monthly changes of positive, negative and total flash frequencies and the proportion of positive lightning in 2009—2012

的交替影响,对流活动开始活跃,闪电次数呈现明显的上升趋势;夏季(6—8月)受夏季风和热带系统的影响为闪电活动最强的时期;秋季(9—11月)夏季风活动逐渐减弱,闪电也随之逐渐减少。

2.3 日变化

由图2a可见,每日逐小时内都有可能出现闪电,地闪日变化主要呈单峰分布,负地闪和总地闪频数的日变化分布趋势基本一致,总地闪次数在23—11时处于低值段,在10时达到最小值,12时开始呈上升趋势,16时达到一天的最大值,之后又快速下降,这一变化规律在4年的资料中基本一致。负地闪主峰出现在16时,谷值出现在10时,最大值为最小值的7.5倍,同强对流天气多发时段相对应;01时左右出现次峰值,可能与一些地方(如四川盆地等)凌晨强的强降水时段相对应。而正地闪电日变化

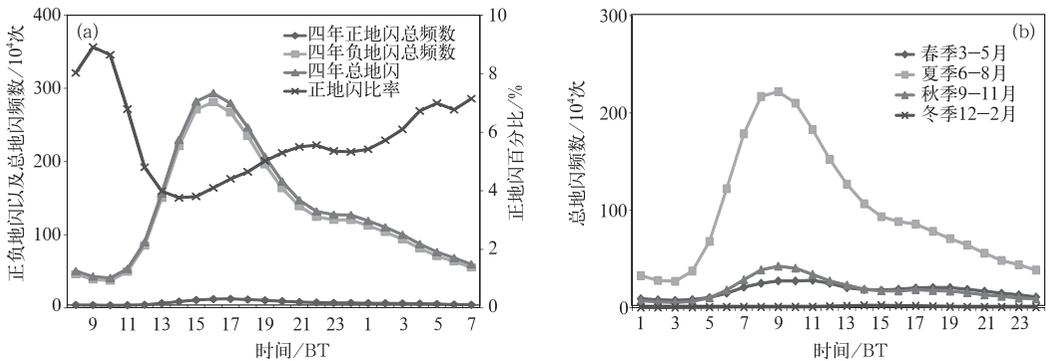


图2 (a)2009—2012年正、负及总地闪频数以及正地闪比例逐时变化,
(b)2009—2012年不同季节总地闪频数逐时变化

Fig. 2 (a)Diurnal changes of positive, negative and total flash frequencies and the proportion of positive lightning in 2009—2012, (b) diurnal changes of total flash frequencies in different seasons in 2009—2012

由图2b可见,地闪频次季节性日变化的单峰型特点在夏季尤为明显。春秋两个季节的闪电活动明显减少,但下午16时以及凌晨01时出现两个相对高发时段;春秋总闪次数差不多,但13—20时秋季闪电频数高于春季,而在一天的其他时段则是春季地闪频数高于秋季;冬季的雷暴活动较少,但冬季主要发生在夜间至凌晨时段。

2.4 随经纬度变化

图3a表明我国近4年发生的总地闪电活动主要位于 34°N 以南地区,呈现双峰结构,分别在 $22^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 、 $27^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 之间,这两个峰值区分别覆盖了我国南部沿海以及中东部地区;闪电高发区主要

相对于负地闪较为缓慢,谷值出现在10时,最大值为最小值的3.5倍,主峰出现在17时,落后于负地闪峰值1小时。其原因可能是由于负地闪占总地闪的绝大多数且相对于正地闪而言离地面较近,负地闪发生机会明显高于正地闪,致使云地放电过程中负地闪提早于正地闪达到峰值。

正地闪百分比在09—10时出现高值,该时段闪电活动较弱,负地闪次数少,总地闪次数减少,使得正地闪百分比高。低值时段主要在14—15时,提前负闪峰值出现时段1~2h,对负地闪电的预报是否有一定的指示意义还需要进一步的分析。上述统计说明,我国一般在14时以后比较容易出现强对流天气,而在16时前后是一天中强对流天气高发时段,这一结论与一些文献中得出的结论相似。主要是因为午后至傍晚受到太阳辐射的加热作用,下垫面温度升高,热力条件较好,午后强对流有利于闪电发生。

集中在 $22^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 之间,主峰集中在 30°N 左右。 $42^{\circ}\sim 53^{\circ}\text{N}$ 之间为闪电低发区,主要位于我国东北地区,可能是由于北方地区,气温较低,闪电分布较为稀少。

图3b表明我国近4年发生的总地闪高发区主要集中在 $100^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 之间,峰值顶部位于 113°E ;在 $131^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ 、 $73^{\circ}\sim 97^{\circ}\text{E}$ 之间几乎很少发生闪电。我国主要的闪电活动基本发生在 100°E 以东地区,以西的高原地区受多方面原因,所探测到的闪电活动极少。闪电高发区 $100^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 之间覆盖我国东南部以及中东部地区, 100°E 以西的区域位于我国西部内陆地区,常年几乎很少发生闪电,可能是因为我国西部内陆地区远离海洋,水汽向内陆地区输

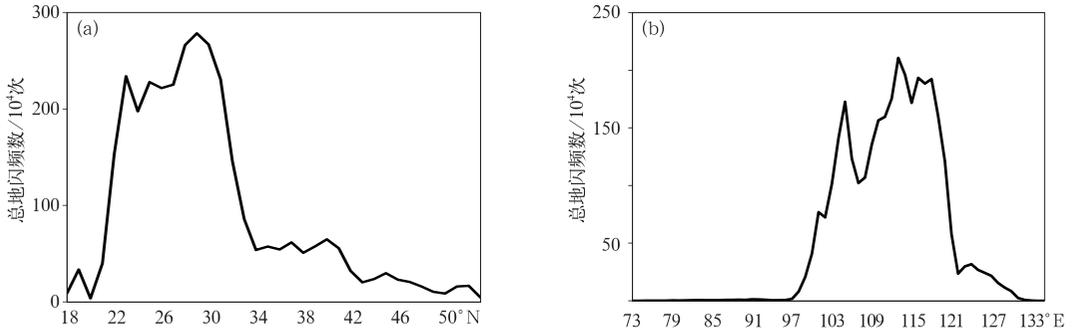


图 3 中国 2009—2012 年发生的总地闪频数随纬度(a)和经度(b)变化

Fig. 3 Total ground flash frequency changing with latitude (a) and longitude (b) in China 2009—2012

送过程中逐渐减少,常年空气湿度小,即使出现高温天气,该地区强对流天气也会快速释放,能量得不到有效聚集,强对流天气不容易发生,从而该区域闪电分布较为稀少。综合上述可知我国发生的年总地闪频数随纬度变化的峰值比随经度变化的峰值大得多,大约是 1.5 倍;闪电总体分布南部比北部多、东部沿海比西部内陆多的特点。

3 空间分布

由图 4 可见:我国闪电密度分布呈明显的地域性差异。其中青藏高原地区所探测到的闪电较少,这与我国雷电监测定位系统未覆盖青藏高原以及新疆南疆等地有关。总的来说,全年总地闪高值区呈片状或带状分布。整体上中国闪电密度东部比西部高,南部比北部高,沿海比内陆高,与我国短时强降水的分布较为一致。各个地区每年几乎都会发生闪电,但闪电高密度区相对比较集中,主要出现在中东部地区($27^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$)、华南地区($18^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)以及四川盆地($28^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $103^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$)。其中华南地区是最活跃区域,其次是四川盆地西南部以及江淮、江西、浙江东部沿海等地区。我国的强对流天气主要以短时强降水为主,闪电的整体分布及其闪电密度的高值中心同短时强降水的分布特征及高发区相对应,具有较好的一致性。闪电的多个活跃中心的地理分布特征主要与该地区的地理位置、日加热状况、地形地貌、下垫面情况以及大气中的水汽含量等因素有关。郑栋等(2005)研究指出,闪电活动多出现在水体和山脉附近,在特定时段山脉和山体具有热力和动力抬升条件,并提供充足水汽,则利于云内起电形成雷暴。而四川盆地

由于所处特殊的地形地貌,山脉的动力抬升作用加之“巴山夜雨”提供的水汽,闪电活动频繁;中东部以及华南地区则主要受水体作用,海陆热力差异等影响,出现闪电高值区。另外还与产生强对流天气的影响系统有关,如:受季风和台风等天气系统影响,闪电频发,但具体的原因还需要针对不同的天气系统进行研究。其中,Venne 等(1989)注意到飓风中存在一定闪电活动,并指出闪电集中发生在眼壁和外雨带,与强对流有关。

由图 5 可见:不同季节出现闪电密度值和分布的地区存在较大差异,其中闪电主要发生在夏季,其次为春季,秋季闪电显著减弱,冬季最弱。春季(3—5月)在广东出现闪电密度最大值,云南东北部以及福建和江西交界处出现闪电高密度区,内陆其他地区为闪电密度低值区域。春季西南地区温度较高,随着西南季风的增强易产生强对流天气;华南前汛期暴雨主要与西太平洋副热带高压北上以及东亚夏季风的北上有关,常伴随雷电天气。夏季(6—8月)是闪电的高发季节,闪电密度高而且分布面积广,随着季风的推进,闪电高发区逐渐向北推进,在东北地区也出现闪电。 30°N 以南地区,高值中心主要为华南、中东部地区以及四川盆地,闪电密度值在 $4.0 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;相对于春季而言夏季闪电明显北推西伸;而 30°N 以北,在华北出现闪电的相对高值中心。到了秋季(9—11月)闪电密度高值区回落到 32°N 以南,四川盆地、云南南部、江西北部以及华南沿海等地闪电较活跃,从北到南连成一串高闪电密度小面积区,近似呈带状分布,强度相对于夏季明显减弱,可能与夏季风的进退决定我国雨带的位置有关(陶诗言,1980)。秋季西太平洋副热带高压南撤,低层干燥的东北气流开始占据主导地位,热力和水汽

条件减弱,台风影响也逐渐减少,夏季风随之南退,我国雨带位置发生变动,原来不稳定的、潮湿的海洋性气团被稳定的、干燥的大陆性气团所取代,秋季对流活动较夏季明显减弱,闪电发生次数迅速减少。冬季(12—2月)全国闪电密度最弱,闪电区域面积小且闪电密度低,江浙和安徽东南部以及江西北部为闪电高发区,闪电密度值约为 $0.1 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

总之,春季闪电最为活跃的区域为华南,这与华南区域的前汛期降水有密切关系。不同季节闪电密度分布特征同我国雨带随季风的季节性移动也较为一致,而且与不同地区产生的强对流天气的影响系统、地形等因素有密切关系。我国闪电在夏季有明显北推而冬季出现南退的季节变化特点,同雨带的推进有较好的对应关系。

由图6可见:不同时段闪电活跃区域分布显著不同。总体而言,午后至傍晚(14—20时)闪电最活跃,上午(08—14时)最不活跃,这与我国短时强降水频率分布特征相一致(陈炯等,2013)。上午(08—14时)闪电密度值较小,最大约为 $5.5 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要分布在长江中下游、华南地区以及川渝地区,可能因为沿海地区受海陆分布、地势分布导致的局地环流或较大尺度天气系统的影响;午后至傍晚(14—20时)闪电高值区范围分布广,密度值最大约为 $18 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要集中在江浙以及华南沿海一带,这不仅与较大尺度的天气系统(比如梅雨锋、东风波和低压槽等)提供的有利对流环境有关,而且还和地形分布、午后热对流引发的强对流天气等密切相关(郑永光等,2008;2010;陈国春等,2011;李典等,2014);前半夜至凌晨(20—02时)地面辐射冷却,接近下垫面的空气趋于稳定,对流活动减弱,闪电密度仅次于下午,密度值最大约为 $10 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要发生在云贵、川渝地区,闪电表现出显著的夜间发展特征,而沿海地区的闪电密度相对白天而言明显减弱;后半夜至早晨(02—08时)闪电分布范围较前半夜(20—02时)显著减少并向内陆地区收缩,主要集中在四川盆地,可能是因为四川盆地夜间常有中低云存在,云的逆辐射作用较大,地面附近被加热,大气层结趋于不稳定,所以较易在夜间形成强对流天气。上午至午后(08—14时)虽然闪电不活跃,但沿海地区、四川盆地东部以及长江中下游等地区仍较活跃。由图还可见:夜间闪电主要发生在云贵、川渝的内陆地区,白天则集中在江浙以及广东沿海一带,可能与海陆热力性质差异有关。白天大

陆增温快,海水表面增温慢,这样在沿海地区就易形成较强的水平温度——海风锋。在有利的大气层结条件下,当平行于海岸线的狭窄的辐合区内水平温度梯度超过某一临界值时,就可能触发强对流天气的发生(黄振等,2010)。四川盆地的闪电具有夜发性,而沿海地区夜发性不明显,可能与四川盆地地势分布所导致的山谷风环流密切相关。

另外,三个闪电高发区具有显著传播特征:华南地区在14—20时发展最强,20时以后显著减弱,02时以后闪电逐渐向内陆传播;08—14时又继续加强向沿海方向传播,可能与海陆风环流有关。四川盆地,在20—02时非常活跃,02—08时闪电活动减弱,并向四川盆地东北方向传播,14—20时闪电最不活跃;该区域的闪电表现出下午时段最不活跃而在前半夜最活跃,闪电具有夜发性。与该地区的中尺度对流系统以及短时强降水日变化及传播特征一致(郑永光等,2008;2010),可能与该地区地势分布所导致的山谷风环流密切相关。中东部地区在14—20时闪电显著活跃,在20—02时显著减弱,02—08时最不活跃,该区域主要受梅雨锋系统的影响,易产生暴雨及强对流天气(郑永光等,2008)。但后半夜的闪电分布与我国该时段短时强降水的分布不太一致,其原因有待进一步的研究分析。

4 三个闪电高发区的特征

从上面分析发现,中东部地区($27^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$)、华南地区($18^{\circ} \sim 27^{\circ} \text{N}$ 、 $104^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$)、四川盆地($28^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}$ 、 $103^{\circ} \sim 108^{\circ} \text{E}$)是我国三个闪电高发区,接下来分析这三个闪电高发区的时间分布特征。

由图7a可见:我国中东部以及华南地区的闪电日变化分布主要呈单峰型特点,峰值集中在15—17时,华南地区峰值在16时,落后于中东部地区1h左右,而四川盆地峰值在01时左右,与四川盆地的夜雨有关。由图7b可见:不同地区所发生的闪电峰值所处月份不同,华南地区主要在6月,四川盆地闪电最大值在7月,而中东部地区闪电主要出现在8月,闪电峰值的月分布从南向北传播,这可能与副热带高压位置的季节性移动以及东亚夏季风的进退决定雨带的南北推进有关。由图7c可见:春季闪电最为活跃的区域是华南地区,这与该区域的前汛期降水有关。三个地区在夏季闪电数值最高,秋季在华

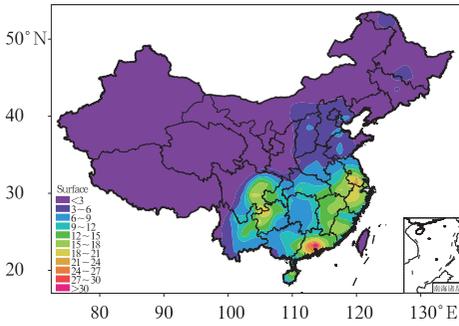


图 4 2009—2012 年中国 4 年年平均总地闪电密度(单位: $\text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)分布
Fig. 4 Total ground flash mean density distribution in China in 2009—2012

南和中东部地区闪电相对比较活跃,而冬季闪电最为活跃的区域是中东部沿海地区。

由图 8 可见:不同地区闪电候分布存在差异,闪电的候分布呈显著的间歇性和阶段性发展,具有多个极大值分布。华南地区在 3 月第 1 候首次出现极大值,9 月第 2 候闪电最活跃,其次是 7 月第 6 候。四川盆地和中东部地区分别在 7 月第 5 候、8 月第 4 候闪电最活跃,次活跃分别是 8 月第 4 候、7 月第 6 候。4、5 月华南进入前汛期,该地区闪电活跃,5 月中旬至 6 月上旬南海夏季风已经建立,6 月下旬至 7 月上旬中国江淮流域进入梅雨期,7 月中上旬和 8 月上旬,江淮流域会出现二度梅雨期并位于副高边

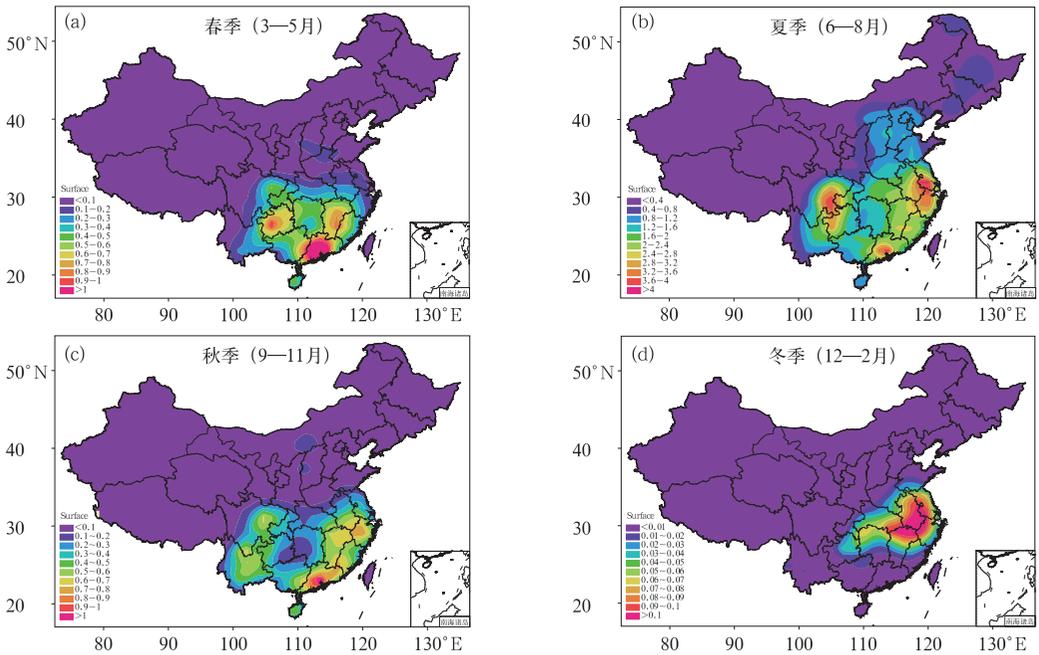


图 5 2009—2012 年中国四个季节年均总地闪电密度($\text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)分布
(a)春季, (b)夏季, (c)秋季, (d)冬季

Fig. 5 Four-season annual mean total ground flash density distribution in China in 2009—2012
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

缘,8 月后期华南进入后汛期,主要受台风和东风波等热天气系统以及北进的热带辐合带的影响(郑永光等,2008),表现出华南在 9 月第 2 候闪电最活跃。9 月下旬,东亚夏季风迅速南撤,表现出三个地区 9 月以后闪电活动迅速减弱。综上可知,我国三个闪电高发区的闪电月分布以及候分布与东亚夏季风的进退从而影响对流性天气密切相关。

5 强度的变化

由图 9a 可见:正、负地闪强度主要集中在 10~

40 kA,正、负地闪分别在 30~40 kA、20~30 kA 达最大,最大数值分别为 14.09%、30.8%;两者强度上相差 10 kA 左右。闪电强度在 10~50 kA 时负地闪百分率高于正地闪百分率,在 50 kA 以上则相反。100 kA 以上的闪电很少,强度在 30 kA 以内的闪电频数高于 50~100 kA 的闪电频数。在闪电强度高值区正地闪所占比率高于负地闪,因为对流云团内部整体呈现中性,负地闪频次在总地闪中占绝对优势,遵循电荷守恒原理,所以正地闪平均所携带的电荷强度就要高于负地闪,正地闪造成的危害明显大于负地闪。因此在雷电防护方面应重点加强对

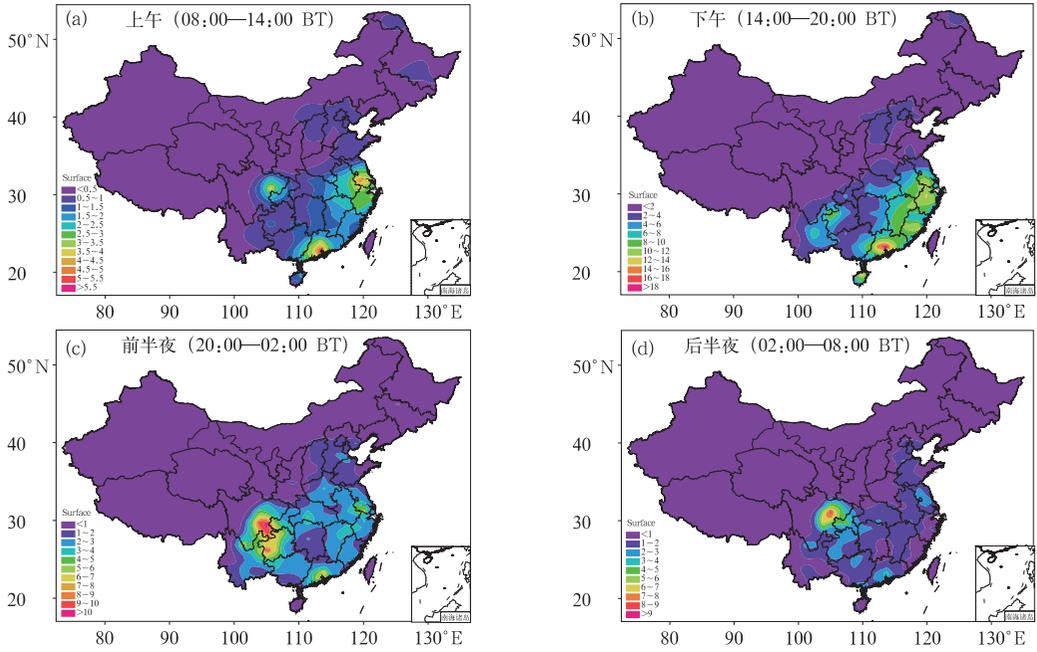


图 6 2009—2012 年中国总闪电密度(次·km⁻²·a⁻¹)
在不同时段的分布

Fig. 6 Total flashes density distribution in different periods of
time in China in 2009—2012

(a) 08:00—14:00 BT, (b) 14:00—20:00 BT, (c) 20:00—02:00 BT, (d) 02:00—08:00 BT

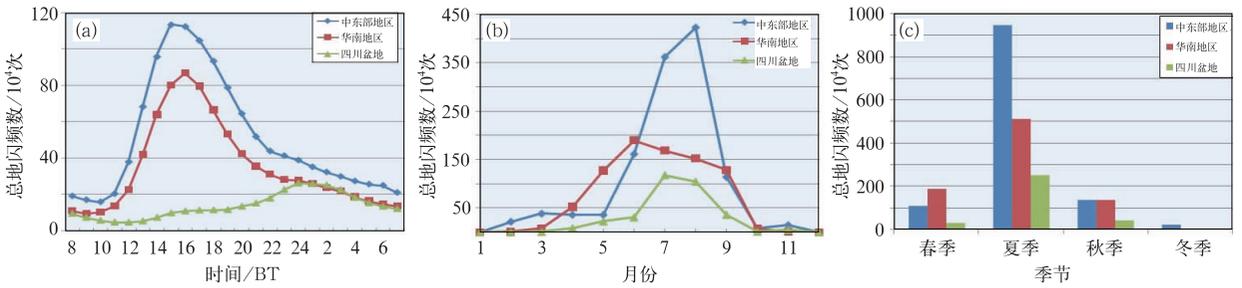


图 7 2009—2012 年不同地区总闪电次数(a)日变化,(b)月变化,(c)季节变化

Fig. 7 Total lightning frequency in different regions in 2009—2012
(a) diurnal changes, (b) monthly changes, (c) seasonal changes

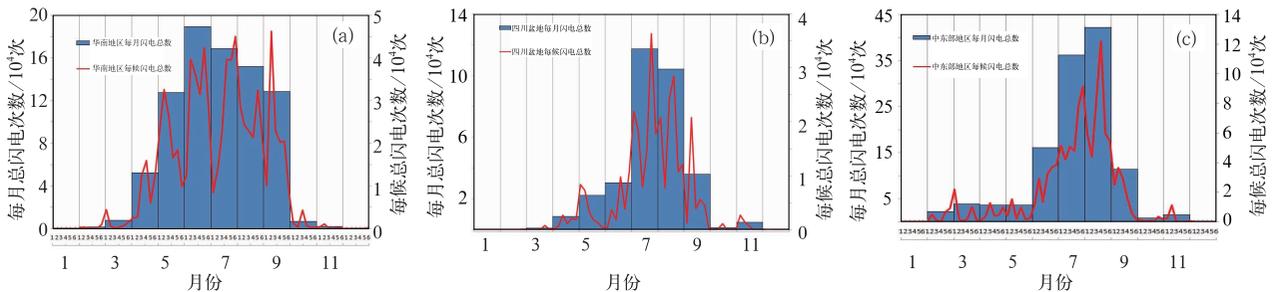


图 8 2009—2012 年不同地区总闪电次数月以及候分布
(a)华南地区,(b)四川盆地,(c)中东部地区

Fig. 8 Monthly and pentad distributions of total lightning frequency in different regions in 2009—2012
(a) South China, (b) Sichuan Basin, (c) Mid-East China

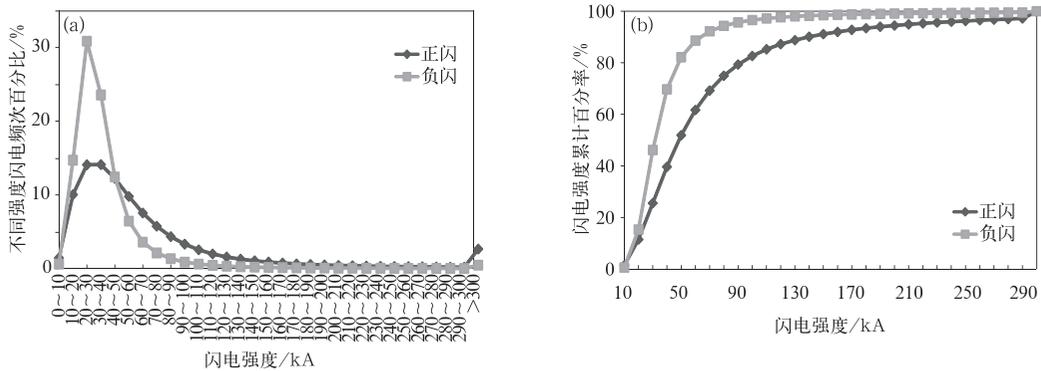


图 9 (a)不同闪电强度的正、负地闪次数占各自闪电总频次的百分率变化,(b)闪电强度累计百分率
Fig. 9 (a) Percentage changes of positive and negative lightning frequency of different lightning intensity, (b) cumulative percentage of lightning intensity

10~40 kA 强度范围内的闪电的防范。

由 9b 图可知:60%以上的正地闪强度小于 60 kA,90%以上的正地闪强度在 140 kA 以下,100 kA 以下的正地闪占总正地闪的 82.6%;而对于负地闪,60%以上的负地闪强度小于 35 kA,90%以上的负地闪强度在 65 kA 以下,100 kA 以下的负地闪次数占总负地闪的 96.6%。同样可以得出在闪电强度的低值区主要分布负闪,而正闪主要分布在闪电强度的大值区。

6 结论和讨论

由 2009—2012 年我国闪电时空分布特征分析可以得出:负闪在总地闪中占绝大多数,闪电在夏季达最大,春秋季节次之,冬季最小;华南地区、西南以及华东地区为闪电高发区,西北地区是相对较弱的区域;这和前人的研究结论相一致。但是本文研究结果还指出,闪电活动随着夏季风的推进出现从南向北、从东向西增加的趋势,这和雨带的推进有较好的对应关系,说明闪电活动与降水之间关系密切。同时,还得出四川盆地的闪电活动具有夜发性;在空间分布上三个高发区闪电活动的日变化、年变化具有传播特性,昼夜空间分布从沿海向内陆传播,年空间分布从春季到夏季为从南向北推进、尔后秋季到冬季为从北向南回落。我国三个闪电高发区的闪电月分布以及候分布与东亚夏季风的进退从而影响对流性天气密切相关。春季华南地区闪电高值分布与华南前汛期降水有关,冬季华东地区主要受海陆热力分布差异,而四川盆地主要是受地形的影响。本文

得出的主要结论如下:

(1) 白天发生的闪电总数高于夜间,昼夜闪比平均为 1.49。我国闪电主要集中在 5—9 月,7、8 月是高发期。随着我国夏季风的进退,我国闪电在夏季有明显北推而冬季出现南退的季节变化特点,同雨带的推进有较好的对应关系。闪电多发时段在 16—17 时,同强对流天气多发时段相对应,但各个地区日平均闪电逐小时分布差异明显。我国闪电主要发生在下午到傍晚(14—20 时),在上午(08—14 时)闪电发生较少。

(2) 中国闪电密度呈明显的地域性差异,总体上中国闪电密度东部比西部高,南部比北部高,沿海比内陆高。中国闪电高发区主要出现在华南地区、中东部地区以及四川盆地。白天闪电主要发生在江浙以及广东沿海一带,夜间则主要发生在云贵、川渝内陆地区。四川盆地的闪电具有夜发性,而沿海地区夜发性不明显。春季闪电最活跃的区域是华南,这和该区域的前汛期降水密切相关。

(3) 我国中东部以及华南地区的闪电日变化峰值集中在 15—17 时,华南地区的峰值落后中东部地区 1 h 左右,而四川盆地峰值集中在 01 时左右。不同地区所发生的闪电高值区所处月份不同,华南地区主要在 6 月,四川盆地在 7 月,而中东部地区则在 8 月出现最大值。

(4) 闪电强度主要集中在 10~40 kA。正、负地闪分别在 30~40 kA、20~30 kA 达最大;闪电强度在 10~50 kA 时负地闪百分率高于正地闪百分率,在 50 kA 以上为正地闪百分率高于负地闪百分率。100 kA 以上的地闪很少,强度在 30 kA 以内的

地闪频数高于 50~100 kA 的地闪频数;在地闪强度的低值区主要分布负地闪,而正地闪主要分布在地闪强度的大值区,正地闪强度整体高于负地闪。

由于本文所使用的闪电资料由全国雷电监测定位系统 ADTD 获取的地闪资料,不包括云闪;同时目前国家雷电监测站在青藏高原以及新疆南疆的大部分地区未覆盖,这就导致所获取的资料不完整。因此,在后续的工作中进一步考虑采用全球闪电定位网(WWWLLN)获取的全中国闪电定位资料,并且增加闪电资料的时间序列,从而才能得出较为全面的结论。

参考文献

- 蔡晓云,宛霞,郭虎. 2001. 北京地区闪电定位资料的应用. *气象科技*, (4):33-38.
- 陈国春,郑永光,肖天贵. 2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析. *气象*,37(1):75-84.
- 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.
- 冯桂力,陈文选,刘诗军,等. 2002. 山东地区闪电的特征分析. *应用气象学报*, 13(3):347-355.
- 黄振,李万彪. 2010. 2007—2008 年大连地区闪电时空分布特征分析. *安徽农业科学*,38(7):3728-3730,3733.
- 李典,白爱娟,薛羽君,等. 2014. 青藏高原和四川盆地夏季对流性降水特征的对比分析. *气象*,40(3):280-289.
- 李京校,宋海岩,肖稳安,等. 2013. 北京及其周边地区闪电活动的时空特征. *大气科学报*,36(2):235-245.
- 李照荣,陈添宇,康凤琴,等. 2004. 兰州周边地闪分布特征. *干旱气象*,22(2):45-51.
- 马明,吕伟涛,张义军,等. 2007. 中国雷电活动特征分析. *气象科技*, (35)1-7.
- 石玉恒,张义军,郑栋,等. 2012. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系. *气象*,38(1):66-71.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,5-7.
- 王学良,黄小彦,刘学春,等. 2008. 2006—2007 年湖北地区云地闪电时空分布特征分析. *暴雨灾害*,27(4):359-362.
- 王学良,张科杰,黄小彦,等. 2012. 湖北省雷暴日数与云地闪电密度关系研究. *气象*,38(6):728-732.
- 郑秀书,周筠珺,Toumi R. 2003. 青藏高原中部的闪电活动特征及其对对流最大不稳定能量的响应. *科学通报*,48(1):87-90.
- 许小峰. 2004. 雷电灾害与监测预报. *气象*,30(12):17-21.
- 许小峰,郭虎,廖晓农,等. 2003. 国外雷电监测和预报研究. 北京:气象出版社,34-52.
- 张敏锋,刘欣生,葛正漠. 2000. 我国北方地区雷电活动的时空特征. *高原气象*,19(3):277-284.
- 张义军,马明,吕伟涛,等. 2008. 闪电活动的气候学特征研究进展. *气象学报*,66(6):906-915.
- 郑栋,但建茹,张义军,等. 2012. 我国地闪活动和降水关系的区域差异. *热带气象学报*,28(4):569-576.
- 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. *应用气象学报*,16(5):638-644.
- 郑永光,陈炯,朱佩君. 2008. 中国及其周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. *科学通报*,53(4):471-481.
- 郑永光,王颖,寿绍文. 2010. 我国副热带地区夏季深对流活动气候分布特征. *北京大学学报(自然科学版)*,46(5):793-804.
- 周泓,段玮,赵爽,等. 2014. 滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析. *气象*,40(9):1132-1144.
- Hidayat S, Ishii M. 1998. Spatial and temporal distribution of lightning activity around Java. *J Geophys Res*,103:14001-14009.
- Gabriele V, James A S. 2013. Spatial and temporal variability of cloud-to-ground lightning over the continental U S during the period 1995—2010. *Atmos Res*,124:137-148.
- MacGorman D R, Maier M W, Rust W D. 1984. Lightning strike density for the contiguous United States from thunderstorm duration records. NUREG/CR3759, Nucl Regul Comm, Washington, D C, 51.
- MacGorman D R, Rust W D. 1998. The electrical nature of storms. New York:Oxford University Press, 49 - 75.
- Scott R D, Henry E Fuelberg. 2011. Seasonal, regional, and storm-scale variability of cloud-to-ground lightning characteristics in Florida. *Mon Wea Rev*,139, 1826-1843.
- Sheridan S C, Griffiths J F, Orville R E. 1997. Warm season cloud-to-ground lightning-precipitation relationships in the South-Central United States. *Wea Forecasting*,12:449-458.
- Smith J R, Fuelberg H E, Watson A I. 2005. Warm season lightning distributions over the Northern Gulf of Mexico Coast and their relation to synoptic-scale and mesoscale environments. *Wea Forecasting*,20:415-438.
- Venne M G, Lyons W A, Keen C S, et al. 1989. Explosive supercell growth; A possible indicator for tropical storm intensification? Preprints, 24th Conf. on Radar Meteorology, Tallahassee, FL, Amer Meteor Soc, 545-548.
- Westcott N E. 1995. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major midwestern urban areas. *J Appl Meteor*,34:1633-1642.