

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/332245719>

Climatological characteristics of meso-scale and micro-scale strong convective weather events in China

Article · March 2019

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17148

CITATIONS

0

READS

41

5 authors, including:



Guoyu Ren

China Meteorological Administration, Beijing; China University of Geosciences, W...

258 PUBLICATIONS 4,912 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Xiubao Sun

Chinese Academy of Sciences

19 PUBLICATIONS 73 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Yuyu Ren 中国

China Meteorological Administration

21 PUBLICATIONS 200 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



yu yu

China Meteorological Administration

6 PUBLICATIONS 97 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



International Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth (ACRE) China [View project](#)



Regional and urban climatology [View project](#)

薛晓颖, 任国玉, 孙秀宝, 等. 2019. 中国中小尺度强对流天气气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 24 (2): 199–213. Xue Xiaoying, Ren Guoyu, Sun Xiubao, et al. 2019. Climatological characteristics of meso-scale and micro-scale strong convective weather events in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (2): 199–213, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17148.

中国中小尺度强对流天气气候学特征

薛晓颖^{1,2,3} 任国玉^{2,4} 孙秀宝^{4,5} 任玉玉⁴ 余予⁶

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

3 辽宁省营口市气象局, 辽宁营口 115000

4 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

5 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

6 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081

摘要 中小尺度强对流天气具有极强的破坏力, 了解其气候学特征对于预测、预报和影响评价都具有实际意义。利用 1961~2015 年的 2332 个高密度逐月国家级气象站观测资料, 分析了中国大陆 3 种常见中小尺度强对流天气(雷暴、闪电、冰雹)在年、季、月尺度上发生日数的时间变化规律和空间分布特征。结果表明: 全国年平均雷暴、闪电和冰雹发生频率分别为 39.23 d/a、20.56 d/a 和 1.07 d/a; 雷暴和闪电主要发生在夏季 3 个月, 雷暴日数 7 月最多, 闪电日数 8 月最多; 冰雹主要发生在每年 5~9 月, 6 月发生频率最高; 雷暴和闪电的高发区分布基本一致, 主要集中在华南和西南, 青藏高原也是雷暴的高发区域之一; 冰雹的高发区主要集中在青藏高原、内蒙古高原东部以及中西部山地, 而东南沿海地区发生频率则较低。进一步分析发现, 我国雷暴和冰雹出现频率随海拔高度增加而明显增加, 冰雹和海拔高度有更好的对应关系, 二者增加速率分别为 2.87 d/500 m 和 1.80 d/500 m, 表明地势高度对这两种强对流天气形成和发展具有重要影响。

关键词 中小尺度强对流 雷暴 闪电 冰雹 地形 气候学特征

文章编码 1006-9585 (2019) 02-0199-16

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17148

Climatological Characteristics of Meso-scale and Micro-scale Strong Convective Weather Events in China

XUE Xiaoying^{1,2,3}, REN Guoyu^{2,4}, SUN Xiubao^{4,5}, REN Yuyu⁴, and YU Yu⁶

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074

3 Yingkou Meteorological Bureau, Yingkou, Liaoning Province 115000

4 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

5 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

6 National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Meso-scale and micro-scale strong convective weather events usually contain a great destructive power. Understanding climatological characteristics of strong convective weather events is of great importance for forecast,

收稿日期 2017-10-19; 网络预出版日期 2018-02-11

作者简介 薛晓颖, 女, 1988 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: xuexiaoying@cma.gov.cn

通讯作者 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575003, 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206012

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575003), the Ministry of Science and Technology of China (Grant GYHY201206012)

prediction and impact assessment of convective weather. In this paper, a newly developed dataset of meso-scale and micro-scale strong convective weather events in China that includes observations at 2332 national weather stations for the period of 1961–2015 is used to reanalyze the climatological characteristics of strong convective weather events (thunderstorms, lightnings, hails) on annual, seasonal, and monthly scales in China. The results show that the occurrence frequencies of thunderstorm, lightning, and hail are 39.23 d/a, 20.56 d/a, and 1.07 d/a, respectively. Thunderstorms and lightnings mainly occur in the summer, while most of the thunderstorms occur in July and most of lightnings occur in August. Hails mainly occur between May and September, and the highest frequency occurs in June. Areas with high frequency of thunderstorms are similar to those with high frequency of lightnings, which are mainly located in southern and southwestern China and the Qinghai–Tibet Plateau. The occurrence frequency of hail is closely related to topography, and areas with high frequency of hail are mainly distributed in the Qinghai–Tibet Plateau, the eastern part of Inner Mongolia and the mountainous areas of central and western China, while the southeastern coastal areas have lower frequency than other areas. In addition, hail and thunderstorm increase significantly with elevation, especially hail, and the increase rates are 2.87 d/500 m and 1.80 d/500 m, respectively. It is found that elevation has important influences on the formation and development of these two types of strong convective weather.

Keywords Meso-scale and micro-scale strong convective weather event, Thunderstorm, Lightning, Hail, Topography, Climatological characteristics

1 引言

中小尺度强对流天气是多种灾害性天气的统称,而其中最受人们关注的3种强对流天气分别是雷暴、闪电和冰雹。中小尺度强对流天气是一种复杂的大气现象,其特有的复杂性、局地性和突发性都增加了预报的难度(俞小鼎等,2012; Zhang et al., 2017)。强对流天气通常与其他极端天气现象相伴而生,雷暴、闪电和冰雹一般伴随着极端强降水过程(陈思蓉等,2009)。这种伴随性天气发生的特点,使中小尺度强对流天气具有了更强的破坏力,更容易造成社会经济损失(符琳等,2011)。因此,分析中小尺度强对流天气的时空分布特征,对加深气象灾害规律的理解及预防有着重要的科学意义。

在全球尺度上, Dai (2001) 运用 1975~1997 年全球约 15000 个站的实测资料研究雷暴的日变化特征,发现雷暴存在海陆差异,大部分陆地上雷暴主要出现在傍晚,而海洋上则出现在午后。Brooks et al. (2003) 使用再分析资料分析欧洲超强雷暴,发现欧洲南部是全球可能孕育超强雷暴环境最佳的地区。Christian et al. (2003) 利用光学瞬态检测器研究全球闪电频率和分布,发现全球每年约有 14 亿次闪电发生,陆地闪电发生平均概率是海洋的 10 倍,北半球夏季闪电发生较多,北大西洋和西太平洋闪电发生频次比热带东太平洋和印度洋多。Sioutas et al. (2009) 分析希腊北部冰雹空间分布,发现高海拔地区和靠近高山的区域冰雹发生较多。

对于中国大陆,雷暴、冰雹等中小尺度强对流天气的气候学特征很早就受到了普遍关注。例如,张敏锋和冯霞(1998)利用中国 104 个台站 30 年的雷暴资料,分析了中国雷暴天气气候学分布特征,发现我国 30 年平均的雷暴日空间分布可大致分为 4 个区域:东南及华南高值区,高原及邻近地区的次高值区,华北、华中及西北东部的次低值区和西北地区的雷暴最低值区。鄯秀书等(2014)系统回顾了我国学者针对闪电气象学和气候学的研究进展,总结了对应于不同类型强对流天气的闪电活动特征、闪电活动与雷暴的联系,闪电资料同化方法及其在强对流天气中的预警预报作用等。Zhang et al. (2017) 利用 1961~2010 年 580 个观测站的雷暴资料,分析了我国雷暴的空间分布特征,发现华南地区是雷暴发生频次最多地区、青藏高原东部和东南部是次大值区。

在更小的区域尺度上,徐桂玉和杨修群(2001)使用我国南方 62 个气象观测站 1971~1995 年雷暴日数资料研究发现,南方雷暴分布总趋势自南向北递减,多雷暴带与主要山地分布密切相关,东南沿海地区雷暴比内陆要少。李照荣等(2005)研究西北地区雷暴活动的差别发现,总的特征是高原和山区雷暴发生频率更高,河谷、盆地和沙漠雷暴少,并且雷暴夏季最强,而春、秋次之,冬季几乎无雷暴发生。以上研究结果在其他区域范围的研究中也得到了证实(秦丽等,2006;李韬光等,2015;黄武斌等,2016)。

综上,国内目前研究已经开始关注不同地区中

小尺度强对流天气的气候学特征。已有的研究提高了人们对中小尺度强对流天气的气候学分布、季节性和周期性等方面的认知，但在气候学特征研究方面，仍存在以下 3 方面的不足：第一，对于区域尺度的分析较多，而把全国作为一个整体的研究较少，这样就造成了对于全国整体的中小尺度强对流天气气候学特征认识不足；第二，已有的针对全国的研究，选用较为稀疏或不完善的观测站网资料，空间分辨率不高，且观测站密度东部明显大于西部，这样就造成全国尺度中小尺度强对流天气气候学特征研究代表性不充分的问题；第三，已有研究更多关注于雷暴、闪电或冰雹单一的强对流天气现象，利用长时间高分辨率数据对于 3 种中小尺度强对流天气进行综合分析研究，还是非常欠缺的。造成上述不足的主要原因是，过去缺少更新到现在的全国高密度、高质量台站观测资料。

本文利用中国气象局国家气象信息中心最新发布的全国 2425 个高密度台站观测资料，综合分析中国大陆 3 种中小尺度强对流天气的气候学特征，包括年、月、季节尺度的时间演化特征，以及不同区域之间发生频率的空间差异。本文结果对中小尺度强对流天气的监测、预报和影响评价，都具有重要的参考价值。

2 资料和方法

2.1 资料

雷暴、闪电和冰雹资料来源于国家气象信息中心最新发布的《中国地面强对流天气数据集》(赵煜飞和余予, 2015) 中的逐月数据。全部台站约为 2425 个，其中包括国家基本、基准和一般站。资料长度起始年为 1954 年，雷暴和闪电资料截止于 2013 年，冰雹资料截止于 2015 年。图 1a 表明，观测站点数在 1954 年不足 500 个，之后快速增长，1961 年以后台站数超过 2000 个，并且之后基本保持不变。

数据基本来源于地面气象观测数据文件，月值由日值统计得到，若 1 月中出现 7 d 及以上缺测，则该月日数为缺测。年值由月值统计得到，若一年中各月日数有 1 个及以上缺测时，则年日数为缺测。

在数据集制作过程中，主要应用内部一致性方法，对雷暴、闪电和冰雹的日值数据进行质量控制。参与质量控制的相关要素为日云状、日最大风速和

日降水量。具体质控方案如下：(1) 若某日出现雷暴现象，且未出现积雨云，日最大风速小于 5.4 m/s，则该现象数据视为可疑；(2) 若某日出现闪电现象，且未出现积雨云，日最大风速小于 5.4 m/s，则该现象数据视为可疑；(3) 若某日出现冰雹现象，且未出现积雨云，日降水量等于 0.0 mm，则该现象数据视为可疑。月值质控基于日值统计给出，若 1 月中出现 1 d 及以上可疑数据，则月值记录为可疑数据。年值质控基于月值统计给出，若 1 年中出现 1 月及以上可疑数据，则年值记录为可疑数据。最终质控结果显示，各项要素数据的实有率均在 98% 以上，数据的正确率均接近 100% (赵煜飞和余予, 2015)。本文在数据处理时，剔除了数据集中标记的所有可疑数据。

2.2 中小尺度强对流天气现象

雷暴指积雨云中、云间或云地之间产生的放电现象，表现为闪电并有雷声，有时亦可只闻雷声而不见闪电。闪电指积雨云中、云间或云地之间产生放电时伴随的光芒，但不闻雷声。冰雹指坚硬的球状、锥状或形状不规则的固态降水，大小差异大，大的直径可达到数十毫米，常伴随雷暴出现。当某日台站观测出现了雷暴(闪电、冰雹)现象，则记为 1 个雷暴(闪电、冰雹)日(赵煜飞和余予, 2015)。

2.3 台站选取

因为数据集在 1961 年以后台站数稳定超过 2000 个，所以选取雷暴、闪电的研究时段为 1961~2013 年，冰雹的研究时段为 1961~2015 年。根据上述台站记录不一致的情况及后续研究的需要，依据以下 3 条标准对台站进行筛选：(1) 台站观测记录大于或等于 35 年；(2) 台站每年观测记录大于或等于 3 个月；(3) 1981~2010 年台站观测记录大于或等于 20 年。根据以上 3 条标准，筛选后观测台站共有 2332 个。图 1b 为筛选后观测台站的空间分布情况，台站空间上基本覆盖了除台湾外的全国范围，其中东北、西北和青藏高原台站相对较稀疏，其他地区台站覆盖率相对较高。

2.4 方法说明

全国平均，采用的是全国所有站的算术平均。具体计算方法是：计算每个月所有站的平均值，缺测时不参与计算，然后再计算研究时段内所有月份的平均值，最后根据各月的平均值获得年或季节的平均值。季节划分采用气象季节划分的方法，即

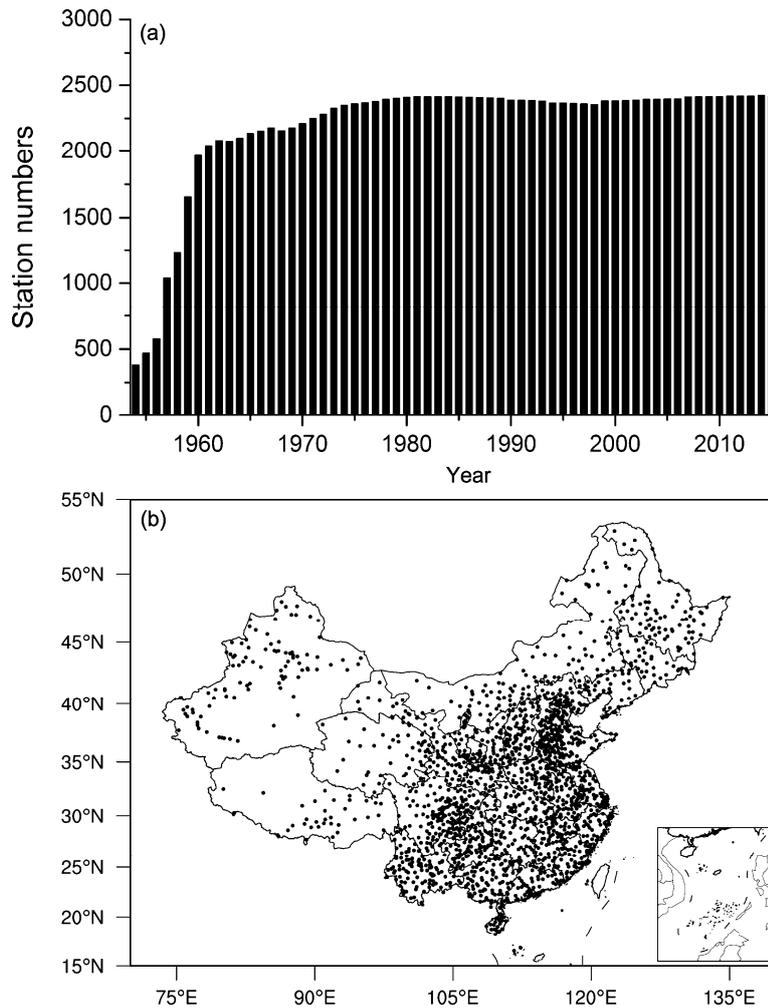


图 1 (a) 1954 年以来中国观测台站数随时间的变化和 (b) 筛选后 2332 个台站位置的空间分布

Fig. 1 (a) Temporal change in the numbers of stations in China since 1954 and (b) spatial distribution of the selected 2330 stations

上年 12 月至当年 2 月为冬季, 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季。

3 结果

3.1 雷暴日数气候学特征

图 2a 为全国平均的各月平均雷暴日数年际变化, 图 2b 为全国平均年内各月平均雷暴发生日数。我国雷暴发生日数主要分布在 2~11 月, 夏季(6~8 月)是雷暴发生的高频期, 雷暴日数占全年雷暴总日数的 62.31%, 其中 7 月是雷暴日数最多的月份, 次多月份为 8 月。1961~2013 年, 全国平均雷暴日数在波动中变化, 但整体呈减少趋势。2000 年代以前全国夏季雷暴发生频率在 7 月最大可以达到 13 d, 1980 年代以前夏季雷暴发生频率保持在每月

12 d 以上。由此可见, 我国雷暴主要发生在夏季, 以 7 月发生日数最多, 近 50 年来虽然雷暴的季节性高频期并没有太大变化, 但雷暴发生日数逐渐趋于减少。

图 3a 为雷暴日数多年平均值的空间分布情况。全国年平均雷暴为 39.23 d/a, 年平均雷暴日数随着纬度的增加而明显减少。在长江流域附近, 年平均雷暴日数为 40~50 d, 两广和海南为 70~120 d, 其他地区为 50~70 d。华南和西南地区是高雷暴中心, 海南岛是全国雷暴发生日数最多的地区。东南部丘陵地带年平均雷暴日数高于同纬度平原地区, 同时内陆比沿海地区雷暴发生频次高。

中国雷暴次大值区包含青藏高原东南部和云贵高原, 前者年平均雷暴日数明显大于同纬度的其他地区, 一般为 40~110 d, 云贵高原南部为 100~

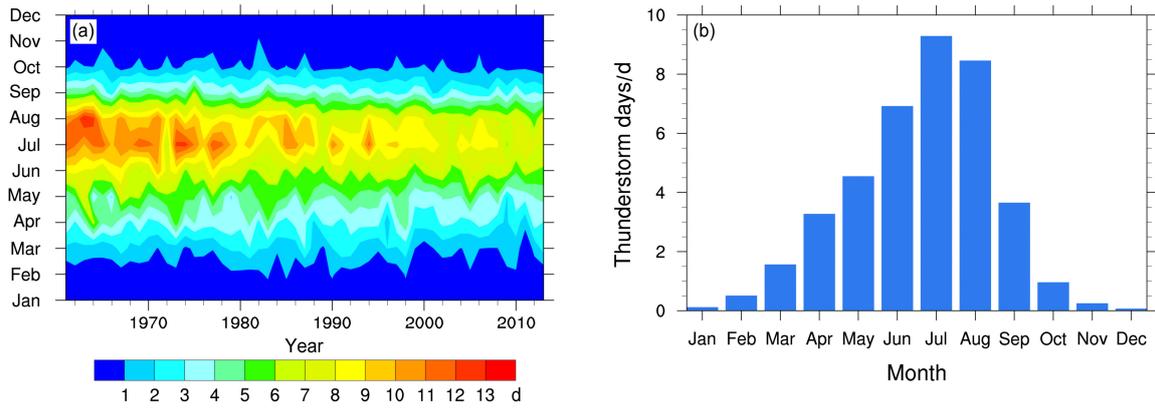


图2 1961~2013年 (a) 全国平均各月雷暴日数年际变化 (横坐标为年份, 纵坐标为月份, 填色为每年各月的雷暴日数全国平均值), 以及 (b) 全国平均年内各月雷暴发生日数

Fig. 2 (a) Inter-annual variation of monthly mean thunderstorm days in China during 1961-2013 (X-axis indicates the year, Y-axis indicates the month and various colors indicate monthly mean numbers of thunderstorms averaged in China), and (b) average values of monthly mean thunderstorm days in China during 1961-2013

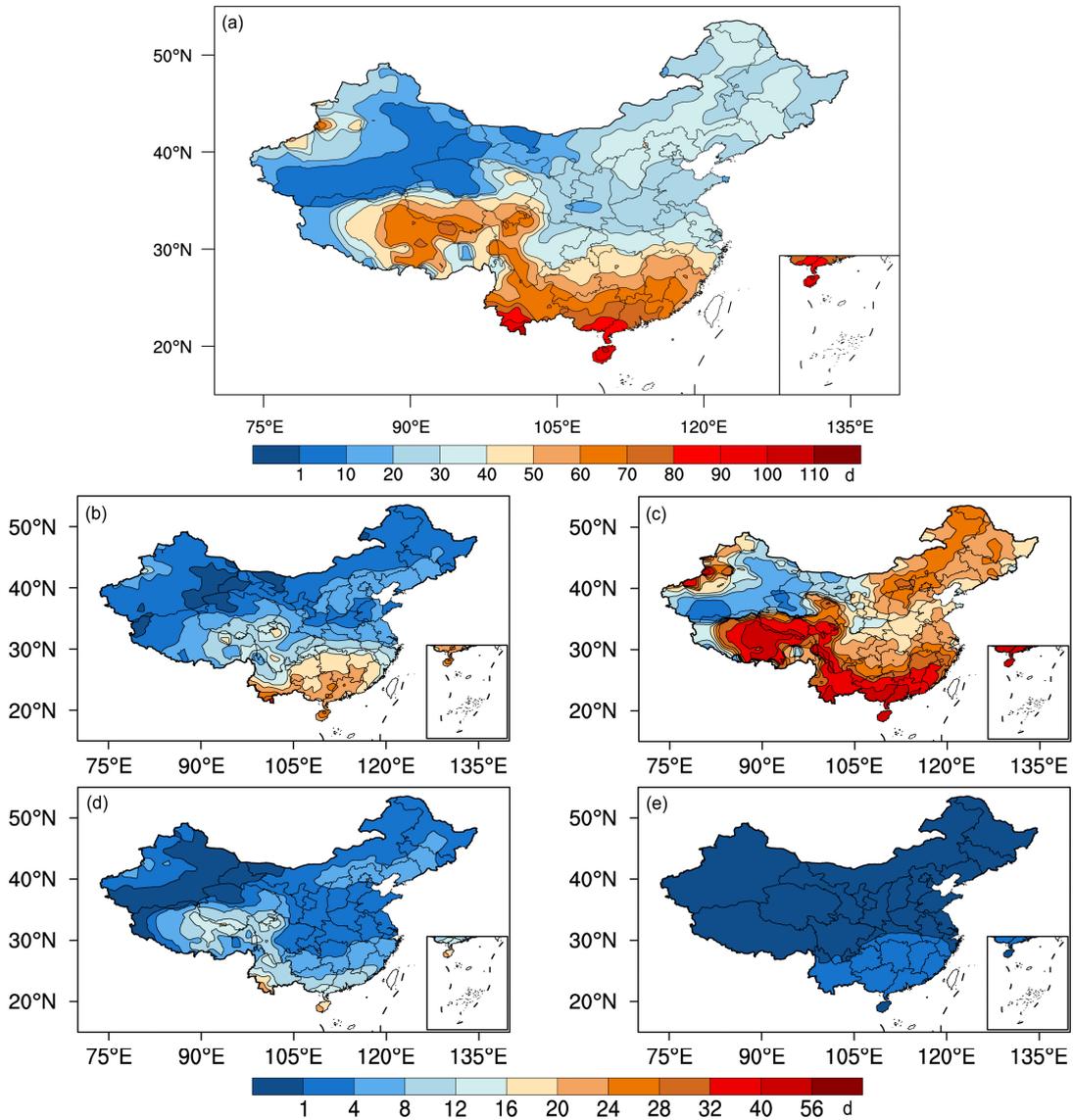


图3 1961~2013年中国年平均和季节平均雷暴日数空间分布: (a) 年; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 冬季

Fig. 3 Spatial distributions of annual and seasonal mean numbers of thunderstorm days in China during 1961-2013: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter

110 d。年平均雷暴日数水平梯度大,等值线极为密集。青藏高原中东部和四川西部雷暴日数一般为 60~90 d,雅鲁藏布江中下游区域雷暴日数较少。

长江以北的华北和东北地区,年平均雷暴日数随纬度的变化不明显,一般在 20~40 d,其中黄河流域中下游为 20 d 左右,是个相对低值区;内蒙古东部地区相对较高,年平均雷暴日在 35 d 以上。

西北干燥区为全国年平均雷暴日的最低值区。这个区域下垫面主要是沙漠和戈壁,年平均雷暴日在 30 d 以下,尤其是甘肃的北部、内蒙的西部以及新疆东部等地区,年平均雷暴日数在 10 d 以下。

图 3b、3c、3d、3e 为各个季节平均雷暴日数空间分布。全国四季平均雷暴日数分别为春季 9.28 d,夏季 24.49 d,秋季 4.81 d,冬季 0.68 d。四季雷暴发生日数的高低值分布和全年分布特征相类似,但量级大小不同。春季雷暴主要发生在华南、西南和青藏高原东部,且表现为纬度越低则发生日数越多;夏季发生区遍及全国,而高发区同样集中在华南、西南和青藏高原,但青藏高原高发区范围已经由春季的高原东部扩展到几乎整个高原;秋季雷暴发生频次空间分布和春季类似,但次数低于春季;冬季全国大部分地区不再有雷暴出现,仅在华南和西南仍有少量雷暴发生,最大日数均在 5 d 以下。

图 4 给出年平均雷暴日数的各年代平均的分布情况。各年代大值区的分布情况变化不大,即两广、海南、云南的南部、青藏高原中东部和四川的西部。然而,几乎所有地区年平均雷暴日数在早期 3 个年代偏多,此后不断减少;雷暴日数大值区范围随时间不断缩小更为明显。

因此,我国雷暴主要发生在夏季、年和四季平均雷暴日数有着不同的空间分布特征,但是大值区分布范围较为固定,主要在华南、西南和青藏高原,并且纬度越低雷暴发生日数越多;年平均雷暴日数的年际和年代际变化,都表现出了随时间不断减少现象,雷暴高发区域范围也在缩小。

3.2 闪电日数气候学特征

图 5a 为全国平均的各月平均闪电日数的年际变化,图 5b 为全国平均年内各月平均闪电发生日数。我国闪电日数在 3~11 月均有发生,并且夏季(6~8 月)是闪电发生的高频期,夏季发生闪电日数占全年闪电总日数的 65.59%,其中 8 月是闪电日数最多的月份,次多月份是 7 月。从 1961~2013 年,全国平均各月闪电的发生日数在明显减少,尤

其是在 1990 年代以后,1970 年代以前全国夏季闪电发生频率在 8 月最大可以达到 10 d 以上,2000 年代以后夏季闪电减少到了每月 1~3 d。由此可见,我国闪电主要发生在夏季,并且 8 月发生最多,虽然近 50 年闪电的季节性高频期没有太大变化,但闪电发生日数明显在减少。

图 6a 为闪电日数多年平均值的空间分布情况。全国年平均闪电为 20.56 d/a,闪电均值有类似于雷暴的空间分布。在长江流域附近,年平均闪电日数为 15~25 d/a,闪电日数随着纬度的增加而减少,但是递减幅度弱于雷暴。两广和海南为 50~100 d/a,其他地区为 25~50 d/a。华南和云南是闪电发生日数最多的地区,这也与雷暴的高发区相重合。

中国闪电次大值区包含云南的南部、四川的西部以及西藏的边缘部分地区,为 35~80 d/a。闪电与雷暴空间分布相比有很明显的不同,尤其是在青藏高原的中东部,雷暴显示出高发,而闪电并没有显示出高发。

长江以北的华北和东北地区,年平均闪电日数和雷暴一样随纬度的变化不明显,在 5~30 d/a,其中黄河流域中下游一般为 5 d/a 左右,是个发生相对低值区。

西北干燥区为全国年平均闪电日数的最低值区,年平均闪电日数低于 30 d,尤其是甘肃的西北部、青海的西部和新疆的东南部,闪电每年发生日数在 5 d 以下。

图 6 b、6c、6d、6e 为各个季节平均闪电日数的空间分布。全国四季闪电日数分别为春季 3.40 d,夏季 13.52 d,秋季 3.49 d,冬季 0.19 d。春季、夏季、秋季闪电发生日数的高低值分布类似于年的分布,高值区都在华南、广西的南部、云南的南部以及四川的西部,冬季闪电主要发生在云南的南部。

图 7 为年平均闪电日数的各年代分布情况。各年代大值基本分布在华南南部、广西的南部、云南的南部及四川的西部。1960 年代至 1990 年代闪电日数偏多,之后不断减少,尤其从 1990 年代以后这种变化更加明显,并且大值区范围也变得越来越小,2010 年之后全国闪电发生日数趋于一致。

因此,闪电发生在每年 3~11 月,同样主要发生在 6~8 月。年平均闪电日数的空间分布和雷暴类似。春季、夏季、秋季闪电有类似于年的分布,冬季闪电主要发生在云南的南部。年平均闪电日数的年际和年代际变化,都表现出了近 50 年闪电发

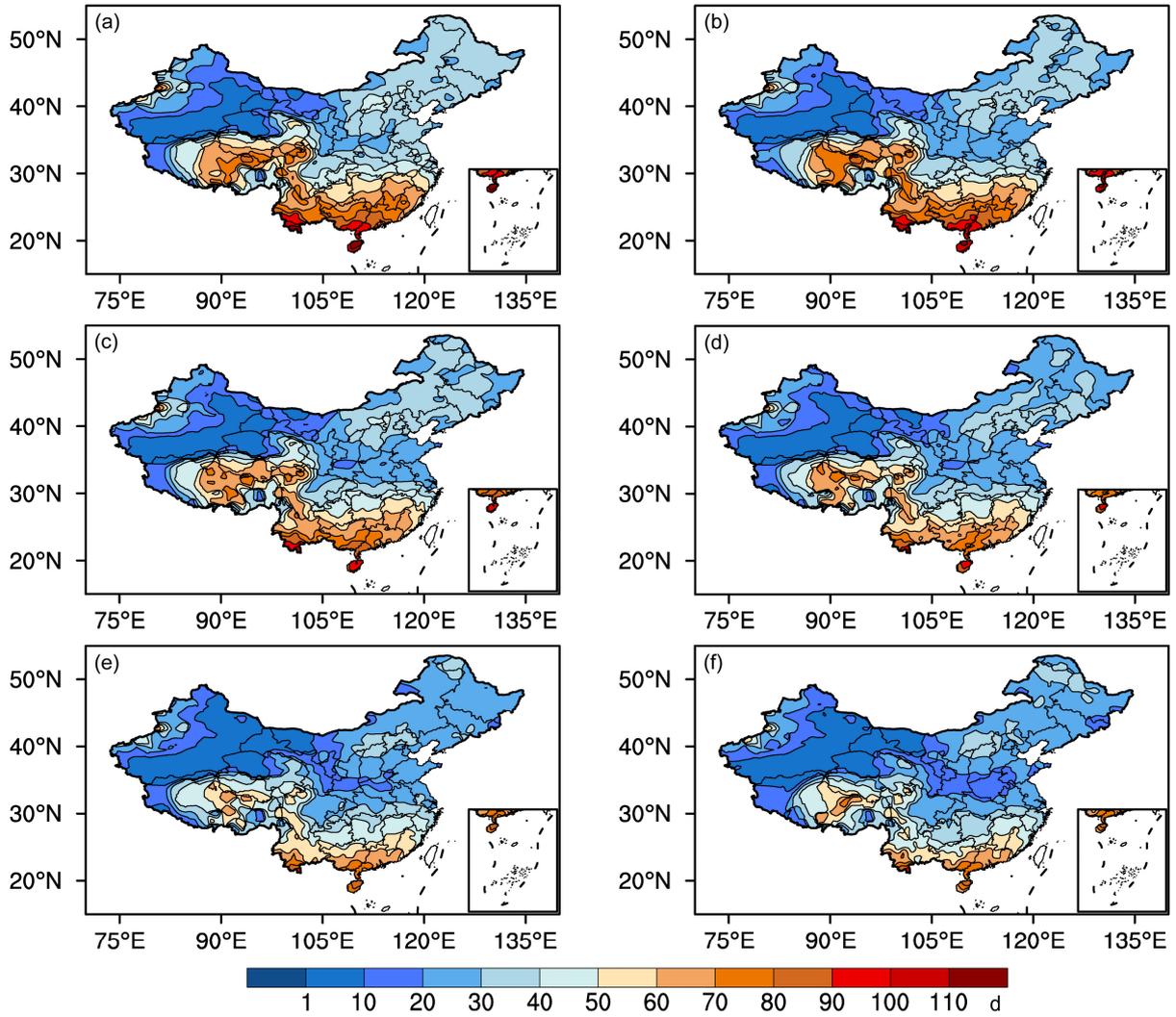


图 4 不同年代（时期）平均的中国年平均雷暴日数空间分布：(a) 1961~1970 年；(b) 1971~1980 年；(c) 1981~1990 年；(d) 1991~2000 年；(e) 2001~2010 年；(f) 2011~2013 年

Fig. 4 Interdecadal variation of annual mean thunderstorm days in China: (a) 1961–1970; (b) 1971–1980; (c) 1981–1990; (d) 1991–2000; (e) 2001–2010; (f) 2011–2013

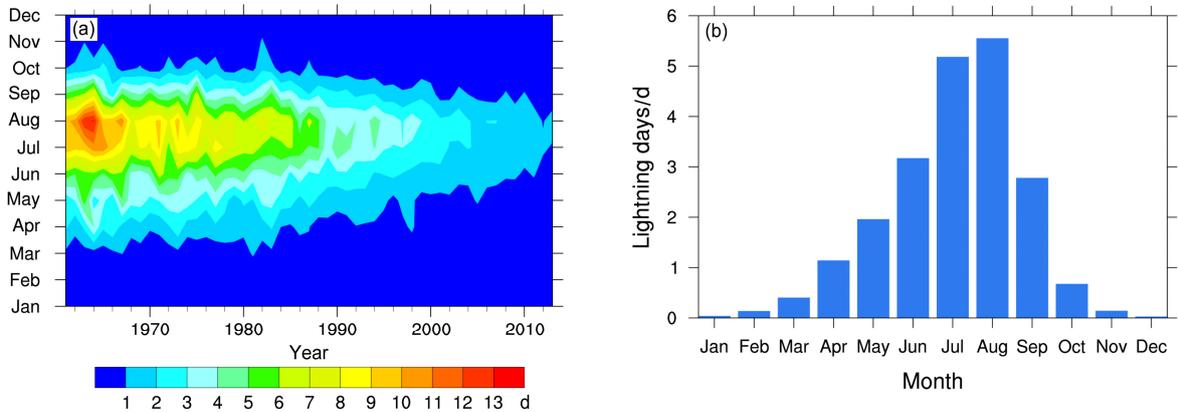


图 5 同图 2，但为闪电日数

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for lightning days

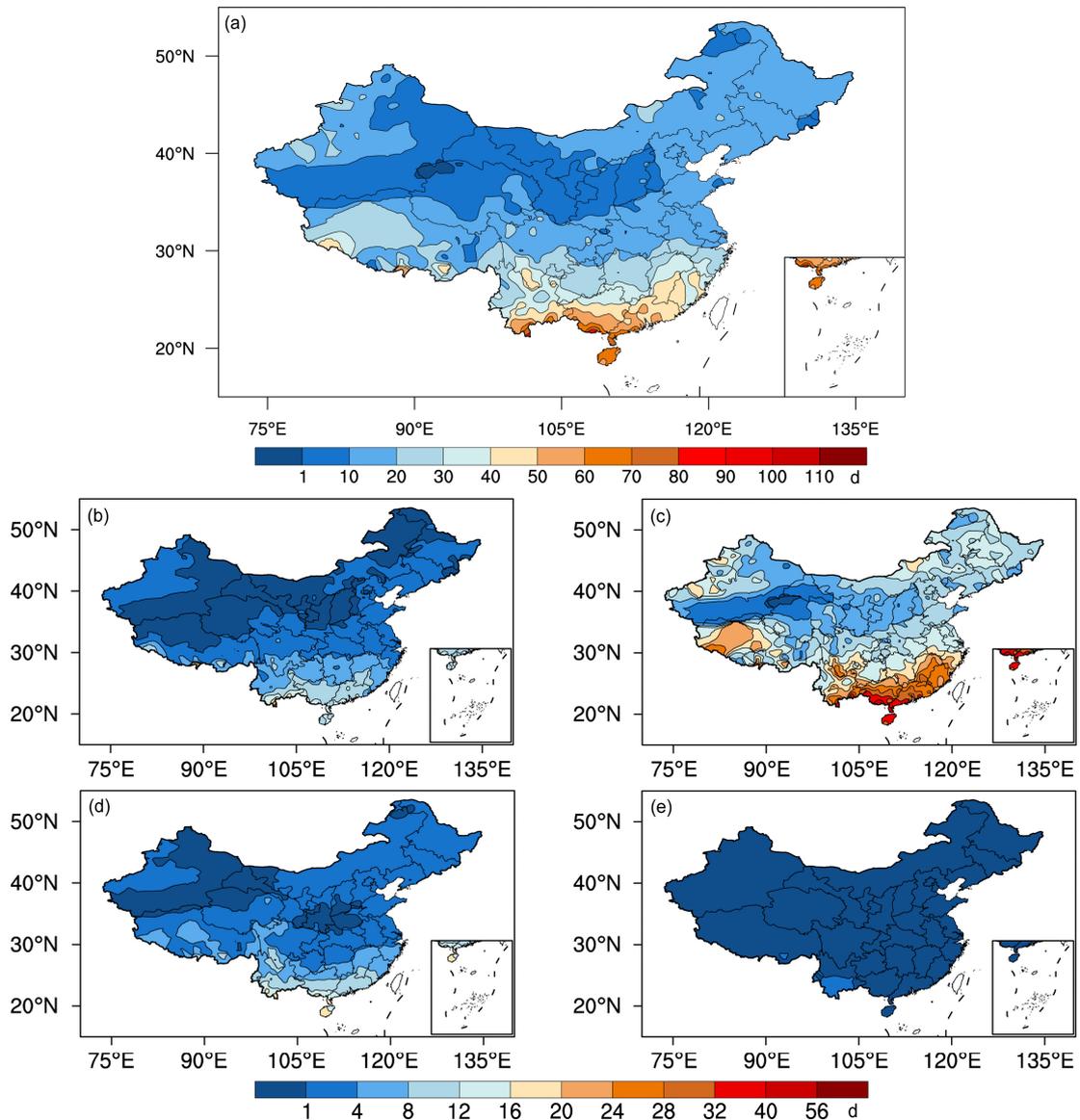


图6 同图3, 但为闪电日数
Fig. 6 Same as Fig. 3, but for lightning days

生日数在随时间减少, 并且在 2000 年代以后全国发生闪电日数趋于一致。

3.3 冰雹日数气候学特征

图 8a 为全国平均的各月平均冰雹日数年际变化, 图 8b 为全国平均年内各月平均冰雹发生日数。全国 2~11 月均有冰雹发生, 但主要发生在 5~9 月, 占全年冰雹总日数的 76.65%, 其中 6 月是冰雹日数最多的月份, 5 月和 9 月是冰雹发生的次多月。研究时期内, 在 2000 年代以前冰雹发生日数在波动中几乎没有变化, 但是 2000 年代以后冰雹发生日数明显减少, 在 1990 年代以前冰雹发生频率在 6

月份最大可达到 0.35 d 以上, 但是到 2000 年以后全国冰雹平均每年发生不足 0.15 d。由此可见, 我国冰雹主要发生在 5~9 月, 近 50 年发生日数在 2000 年代以前变化不大, 但是 2000 年代以后明显减少。

图 9a 为冰雹日数多年平均值的空间分布情况。全国年平均发生冰雹日数为 1.07 d。年平均发生冰雹日数同雷暴、闪电相比有很大差异。长江流域以南, 除西南地区很少有冰雹发生, 在此区域中年平均冰雹日数一般都在 1 d/a 以下, 是全国冰雹的低值区。

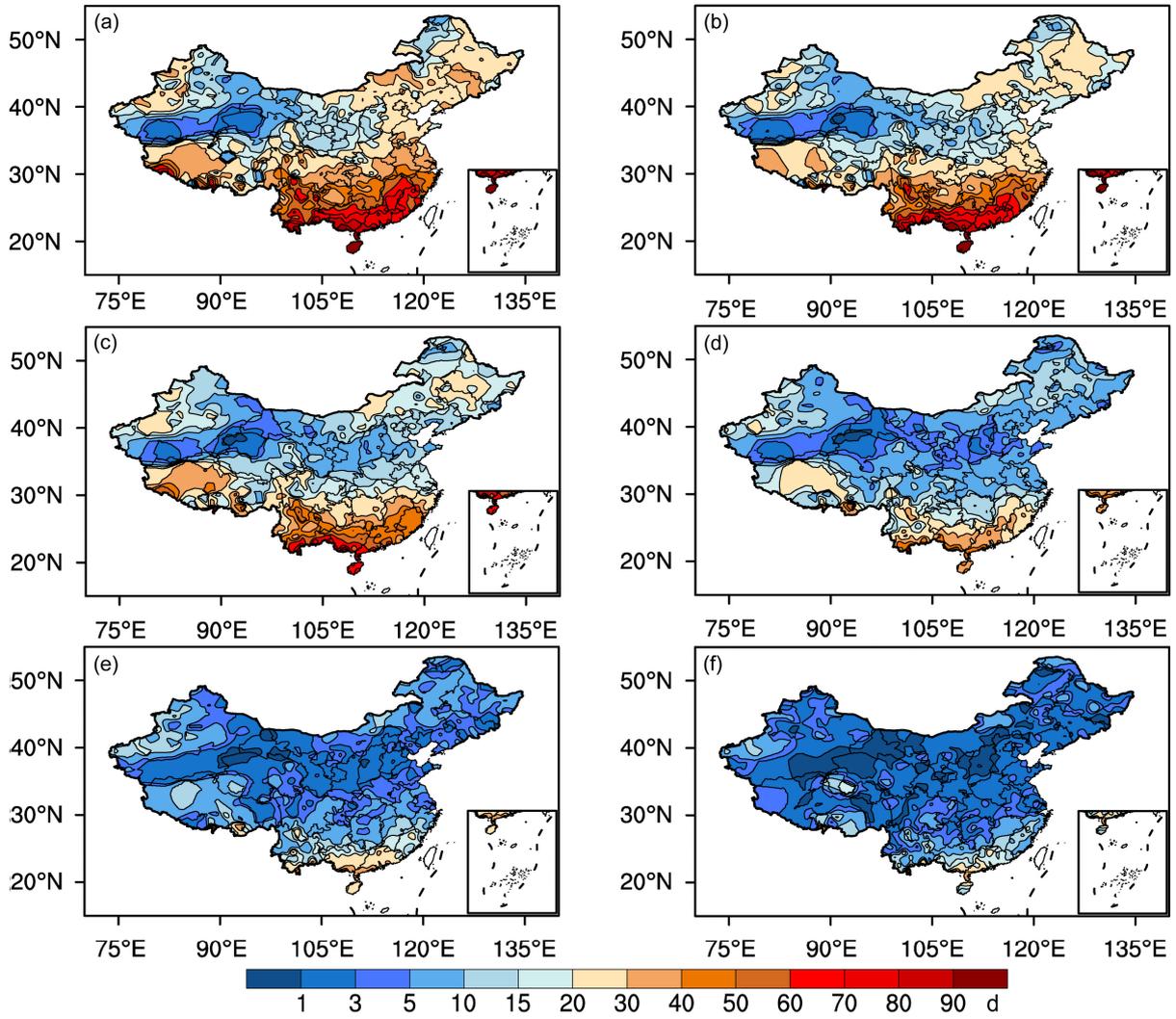


图7 同图4，但为闪电日数

Fig.7 Same as Fig. 4, but for lightning days

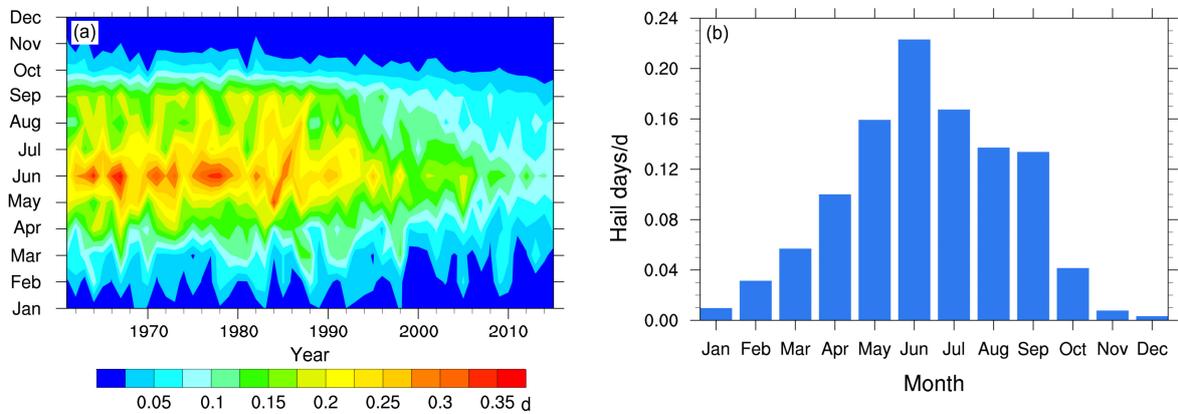


图8 同图2，但为冰雹日数，且研究时段为1961~2015年

Fig. 8 Same as Fig. 2, but for hail days and the period is from 1961 to 2015

中国冰雹的高发区集中在青藏高原及高原周边地区，这些区域也是中国地势最高的区域，在高原中部有一个明显的大值中心，最多每年可发生冰雹 24 d 以上，除了这个大值中心冰雹高发区域内一般每年发生冰雹都在 1~8 d。

长江以北的华北和东北地区是全国冰雹发生的次高值区域，在东北大部分地区、内蒙古东部冰雹每年发生 1~4 d，其他地区每年发生冰雹在 1 d 以下，但多年平均都会有冰雹发生。

西北干旱区同样也是全国冰雹较少发生的地区之一，除了新疆的西部以及青藏高原的周边地区每年发生冰雹在 1~4 d，其他地区基本没有冰雹发

生。

图 9b、9c、9d、9e 为各季节全国冰雹发生日数均值的空间分布。全国四季冰雹分别为春季 0.31 d/a，夏季 0.53 d/a，秋季 0.18 d/a，冬季 0.04 d/a。春季冰雹只发生在新疆极少地区和青藏高原的东北部，每年发生日数为 1 d 以上；夏季冰雹发生区域扩大，冰雹大值区在青藏高原可达 3 d/a 以上，中心最大可达 15 d/a 以上，但大值区中心和春季相比西南移。秋季冰雹大值区和夏季类似，频率明显比夏季小但大于春季，大值中心在 7 d/a 以下。冬季全国基本没有冰雹出现。由此可见，我国冰雹主要集中在发生在青藏高原地区，这主要受地形的局地

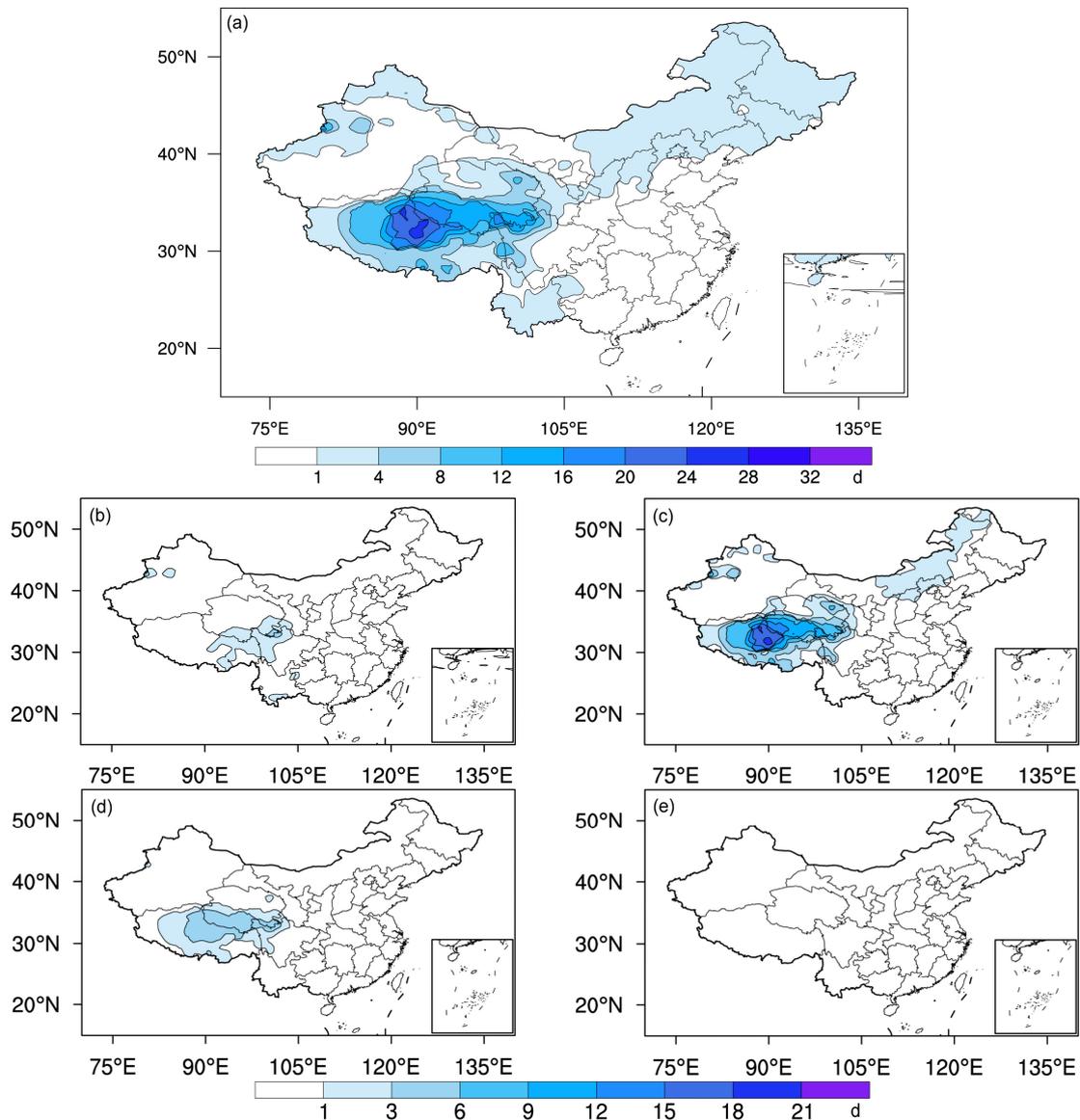


图 9 同图 3，但为冰雹日数，且研究时段为 1961~2015 年

Fig. 9 Same as Fig. 3, but for hail days and the period is from 1961 to 2015

条件影响，复杂的地形使得边界层内各物理量水平分布不均匀，容易触发易产生冰雹的不稳定条件。冰雹均值分布的大值区在年、春季、夏季和秋季均在青藏高原有个大值区，且春季大值区位置在高原东部，夏秋季节高值区域扩大并且高值中心变化到高原中部。

图 10 为冰雹日数各年代分布情况。年代之间差异显示各年代空间分布变化不大，大值区都在青藏高原地区，但是发生的范围越来越小，尤其是从 2000 年代以后，华北和东北基本没有冰雹发生了，青藏高原虽然仍有冰雹发生，但是日数明显减少。

因此，冰雹主要发生在每年 5~9 月，年和四季的冰雹日数有着不同的空间分布特征，但年、春季、夏季和秋季均在青藏高原表现出一个大值区，平均冰雹日数的年际变化和冰雹日数均值的年代

际变化，都表现出了冰雹发生日数近 50 年在 2000 年代以前变化不大，但是 2000 年代以后明显减少。

4 讨论

对我国不同地区中小尺度强对流天气的气候学特征，已经开展了一些分析。徐桂玉和杨修群(2001)研究我国南方地区雷暴地理分布特征，发现雷暴频次是从南向北递减，高发区主要分布在东南和华南区域，其次是青藏高原地区，这与本文获得的雷暴频率空间分布特点基本相致。Zhang et al. (2017)、张芳华和高辉(2008)分析发现，全国冰雹主要发生在晚春到初秋，这与本文发现的冰雹发生在 2~11 月结果也基本相一致，但全国平均最高发生频率是在 6 月。本文分析发现青藏高原和华北北部是冰雹的高发区，

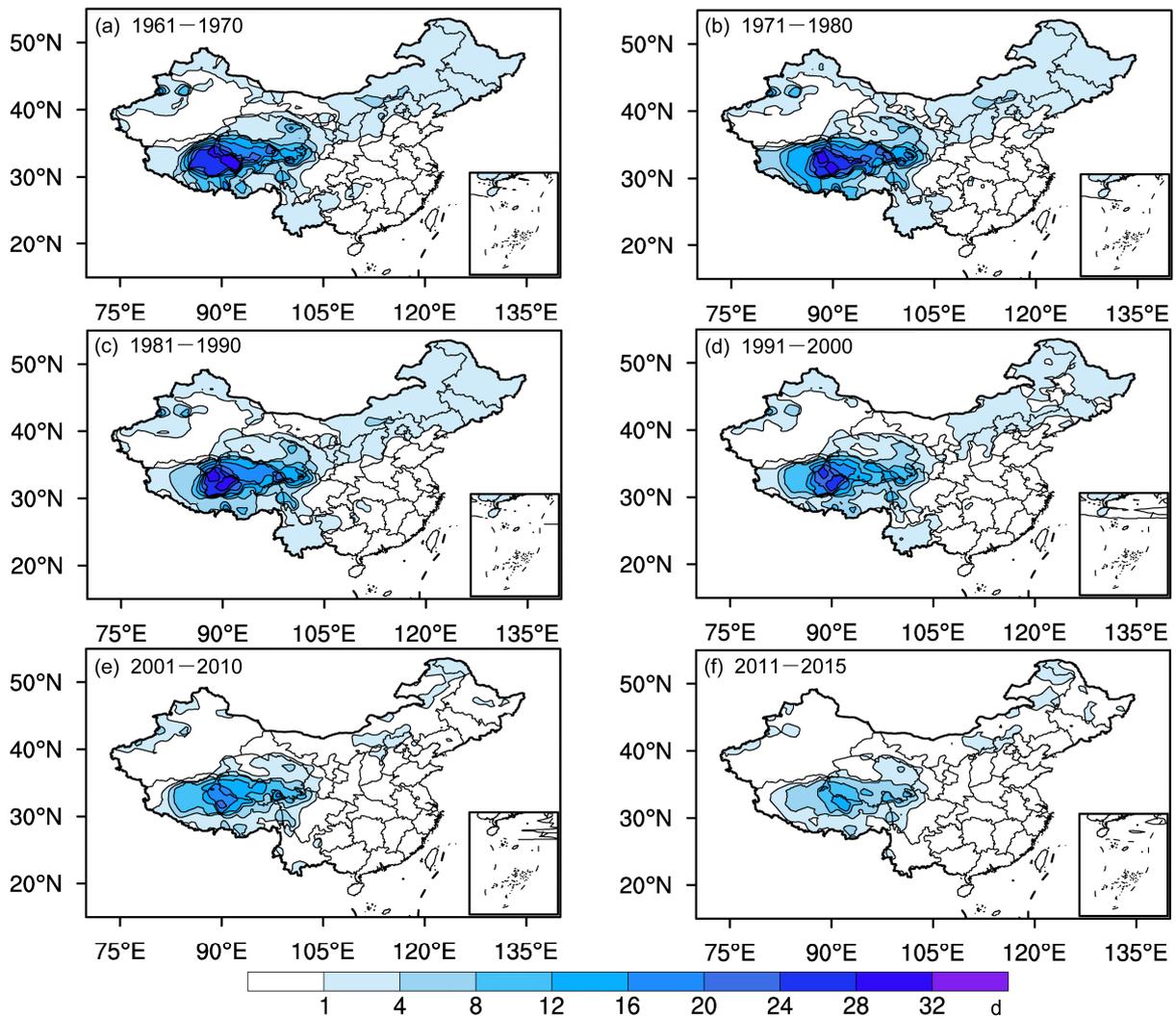


图 10 同图 4，但为冰雹日数，且研究时段为 1961~2015 年

Fig. 10 Same as Fig. 4, but for hail days and the period is from 1961 to 2015

这与先前研究指出的冰雹空间分布结论大体一致(张芳华和高辉, 2008; Zhang et al., 2017), 但不同于早期研究结论, 本文还发现东北地区也是冰雹天气的另外一个主要发生区。

总体上看, 先前针对部分地区和个别极端天气事件的分析结果, 与本文利用更新资料对大尺度多种极端天气事件的分析结果, 基本一致。在相同区域内, 与前人研究相比出现的空间分布和季节性差异, 可能主要和所用资料密度、质量和观测记录长度不同有关, 区域平均方法不同也会造成分析结果的差异。本文采用所有国家级台站长序列观测资料, 资料质量得到较严格的检验和控制, 区域平均方法也得到改进, 因此其结果具有更高的可信度。

对于 3 种中小尺度强对流天气现象形成原因, 已有成熟的解释(俞小鼎等, 2012; 孙继松和陶祖钰, 2012)。3 种强对流天气发生频率之间的联系, 也是值得关注的一个问题。雷暴、闪电、冰雹都与强风暴系统有着密切的关系, 尤其雷暴和闪电常常伴随性发生。图 11 给出全国 2332 个站点年平均雷暴和闪电发生次数的对应关系和拟合曲线, 可以看出, 雷暴和闪电有着很好的对应关系, 闪电频数随雷暴频数的变化不是简单的线性关系, 而是呈近似指数关系, 雷暴发生次数越多的站点闪电发生次数越多, 且随着雷暴频数增加, 闪电频数上升更快, 决定系数达到了 0.65。但是, 雷暴和冰雹、闪电和冰雹发生频数之间并不存在明显的关系, 相关性不好。这可能与冰雹的局地性,

更依赖于海拔高度有关。

雷暴和冰雹都在青藏高原地区表现出一个大值区, 但是闪电没有。为了探讨 3 种强对流天气和海拔高度的关系, 选取了青藏高原及其周边地区 ($25^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$), 在此区域内包含 309 个观测站点, 海拔高度最低为 292.8 m, 最高为 4800 m。图 12 为青藏高原及其周边地区年平均雷暴、闪电、冰雹发生次数和海拔高度的关系, 图 12a 显示雷暴随着海拔高度的增加总体呈现出在波动中增加的趋势, 平均每上升 500 m 雷暴天数增加 2.87 d, 1000~1500 m 年平均雷暴天数最少为 30.84 d, 4500 m 以上年平均雷暴天数最多为 61.37 d。而图 12b 闪电随着海拔高度的增加总体在波动中呈现微弱的减少趋势, 平均每上升 500 m 闪电天数减少 0.26 d, 在 3000~3500 m 平均年闪电天数最少为 13.95 d, 而在 500 m 以下、1500~2000 m、3500~4000 m 平均年闪电天数较多在 20 天以上。图 12c 显示冰雹随着海拔高度的变化表现出了极为明显的上升趋势, 这表明冰雹和海拔高度有特别好的对应关系, 平均每上升 500 m 冰雹天数增加 1.80 d, 1500 m 以下平均年冰雹天数较少为 1 d 以下, 逐渐增加到 4500 m 以上年平均为 19.67 d。同时在 3000 m 以下冰雹随海拔高度增加, 但是增加不明显, 而 3000 m 以上冰雹发生次数随着海拔高度增加强烈增加。

通过年代之间发生频率的比较, 发现全国雷暴、闪电和冰雹均在 1960 年代至 1980 年代发生日

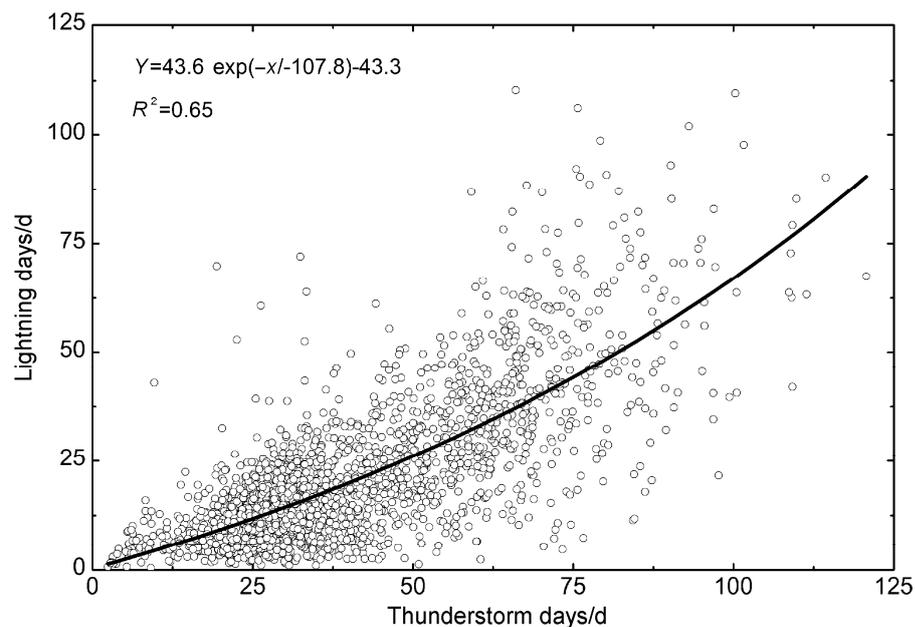


图 11 1961~2013 年我国台站年平均雷暴和闪电发生日数的对应关系 (圆圈) 和二者的拟合曲线 (黑色曲线)

Fig. 11 The correlation between annual average days of thunderstorm and lightning (circles) and their fitting curve (black line)

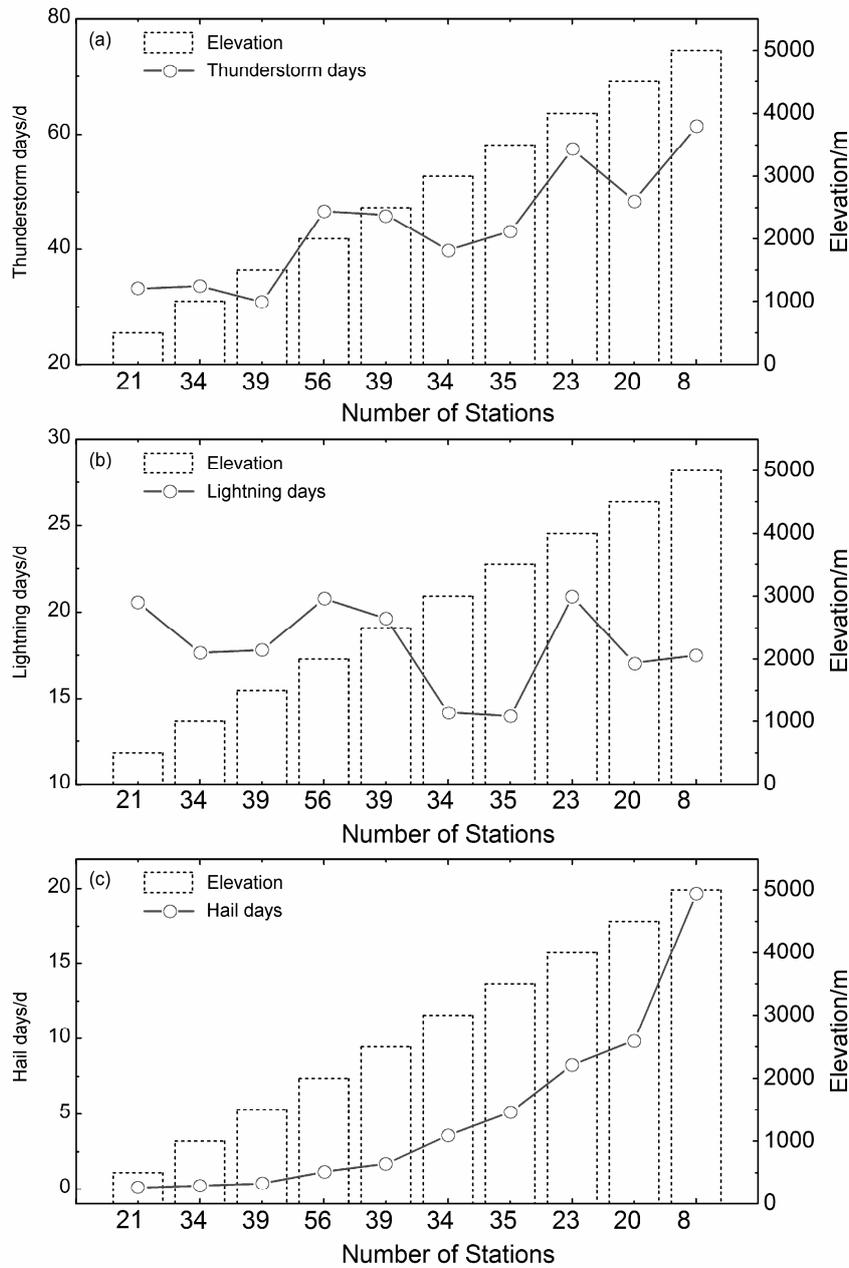


图 12 青藏高原及其周边地区 (25°N~40°N, 80°E~105°E) (a) 雷暴、(b) 闪电、(c) 冰雹天数随海拔高度的变化

Fig. 12 Changes in the days of (a) thunderstorms, (b) lightning, and (c) hail with elevation in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas (25°N-40°N, 80°E-105°E)

数偏多，而在 1990 年代之后明显减少。总体上，这些变化与早期针对部分地区和个别极端事件的研究结论也相一致（张敏锋和冯霞，1998；徐桂玉和杨修群，2001；张芳华和高辉，2008；余蓉等，2012；Zhang et al., 2017）。对于 3 种中小尺度强对流天气事件减少的原因，目前还没有很好的解释。观测研究表明，我国相对降水指标和极端强降水事件在近 60 年出现增加趋势（翟盘茂等，2007；

任国玉等，2015，2016），但全国范围极端强降水事件频率和累计降水量增多，可能和多种区域性和局地性自然、人为因素有关，也可能和降水观测资料的系统偏差有一定联系（任国玉等，2016）。中小尺度强对流天气中雷暴、闪电和冰雹一般情况下伴随着极端强降水事件，但本文分析得到的 3 种极端天气现象普遍减少减弱的结论，和先前有关短历时极端强降水事件频率有所增加的结论并不一致。

本文研究初步显示,雷暴、闪电和冰雹在年代际变化上表现出减少和减弱趋势,特别是1990年代以后3种强对流天气事件频数的减少现象更加突出。这一现象在前人研究中已有总结(任国玉等,2010)。对于中小尺度强对流天气现象年代际减少的原因,前人也已有一些初步分析(张敏锋和冯霞,1998;陈思蓉等,2009;符琳等,2011;Zhang et al.,2017)。张敏锋和冯霞(1998)指出雷暴气候变化异常是个很复杂的非线性过程,只有在充分理解日地关系、雷暴气候和大气环流变化关系、雷暴起电及放电物理过程的基础上,才能对这种长期变化机制有更为客观的认识与理解,并指出温度变化与雷暴变化之间可能存在着某种联系。Zhang et al. (2017)认为,过去50年中小尺度强对流天气急剧减少,与全球气候快速变暖、社会经济快速发展、城市化以及人口增长有关,同时指出雷暴的减少、减弱可能和亚洲夏季风减弱有关,但是相关性并不意味着因果关系。此外,大气水汽输送和动力条件的减弱也被认为可能引起了雷暴、闪电和冰雹减少的原因(余蓉等,2012)。而大气动力条件变化可能和普遍增加的气溶胶含量有关(陈思宇等,2012)。陈思蓉等(2009)认为影响雷暴发生的因子十分复杂,应该对于空间进行分型,在不同环流情况、不同地形条件下考虑影响雷暴长期变化趋势的原因。符琳等(2011)认为20世纪70年代末局地垂直温度场结构的变化是我国北方冰雹减少的主要原因。总体来说,目前的研究还不能确定我国中小尺度强对流事件频数快速减少的确切物理机制。对于本文报告的全国范围雷暴、闪电和冰雹频数年代际明显减少的事实和原因,还有待未来开展进一步研究。

同先前的研究比较,本文应用了更新的观测记录和更密集的台站资料,结果应该具有更高的可信度。然而,本文分析仍旧存在两方面的不确定性。一是全国台站的分布仍然不均匀,目前台站主要分布在中国东部、西部青藏高原和新疆的台站相对稀疏,这种东西部台站分布的不均匀会给平均结果带来一定程度的不确定性;二是天气现象的观测方法具有主观性,目前使用的数据都是人为观测,以观测员听到雷声或看到闪电为准,看到或听到则记录为一个雷暴或闪电日数,这势必造成漏记等情况存在,这也会为最终的分析结果带来一定程度的不确定性。今后需要加强对上述不确定性的系统评估。

5 结论

通过分析近50年中国2332个台站中小尺度强对流天气的气候学特征,获得以下主要结论:

(1)我国雷暴在每年2~11月均有发生,但主要发生在夏季。全国年平均雷暴日数为39.23 d,其中全国春季平均为9.28 d,夏季为24.49 d,秋季为4.81 d,冬季只有0.68 d。华南、西南和青藏高原是雷暴高频中心;甘肃北部、内蒙古西部以及新疆东部是雷暴低值区。年以及春季、夏季、秋季在青藏高原中东部和四川西部均有个大值区,冬季雷暴仅发生在华南和西南地区。

(2)闪电发生在每年3~11月,同样主要发生在夏季。全国年平均闪电日数为20.56 d,其中全国春季平均3.40 d,夏季13.52 d,秋季3.49 d,冬季0.19 d。年平均闪电日数的空间分布和雷暴类似,主要区别在于闪电在青藏高原不存在大值区。春季、夏季、秋季闪电有类似于年的分布,冬季闪电主要发生在云南的南部。

(3)冰雹发生在每年2~11月,但主要发生在5~9月。全国年平均冰雹日数为1.07 d,其中全国春季平均为0.31 d,夏季为0.53 d,秋季为1.90 d,冬季仅有0.04 d。我国冰雹集中发生在内陆山地和高原地区,东南部沿海地区发生较少,年、春季、夏季和秋季均在青藏高原有大值分布区。

(4)上述3种中小尺度强对流天气事件,其年际变化和年代际变化均表现出减少和减弱趋势,1990年代以后,这3种强对流天气事件的减少现象更加突出。

(5)雷暴和冰雹随着海拔高度的增加而明显增加,雷暴增加趋势可达2.87 d/500 m,闪电则随着海拔高度的变化有微弱的减少趋势(-0.26 d/500 m),冰雹对海拔高度具有更高的敏感性,并且具有很好的对应关系,增加趋势为1.80 d/500 m。

参考文献 (References)

- Brooks H E, Lee J W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data [J]. *Atmospheric Research*, 67-68: 73-94, doi:10.1016/S0169-8095(03)00045-0.
- 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 Sirong, Zhu Weijun, Zhou Bing. 2009. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 703-710.
- 陈思宇,黄建平,付强,等. 2012. 气溶胶对我国中东部地区秋季降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 28 (3): 339-347. Chen Siyu, Huang Jianping,

- Fu Qiang, et al. 2012. Effects of aerosols on autumn precipitation over mid-eastern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 339–347, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.03.006.
- Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio D J, et al. 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1): 4005, doi:10.1029/2002JD002347.
- Dai A G. 2001. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations [J]. *J. Climate*, 14 (6): 1112–1128, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1112:GPATFP>2.0.CO;2.
- 符琳, 李维京, 张培群, 等. 2011. 近 50 年我国冰雹年代际变化及北方冰雹趋势的成因分析 [J]. *气象*, 37 (6): 669–676. Fu Lin, Li Weijing, Zhang Peiqun, et al. 2011. Inter-decadal change of hail events over China and causation analysis in northern China in recent 50 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37 (6): 669–676, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.6.003.
- 黄武斌, 王研峰, 黄玉霞, 等. 2016. 1974~2013 年甘肃省冰雹气候时空变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 32 (1): 103–107. Huang Wubin, Wang Yanfeng, Huang Yuxia, et al. 2016. Spatial and temporal climatic characteristics of hail from 1974 to 2013 in Gansu Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 32 (1): 103–107, doi:10.11927/j.issn.1673-503X.2016.01.015.
- 李韬光, 张红雨, 柳琼, 等. 2015. 1981~2013 年山西地区冰雹气候特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 31 (5): 165–170. Li Taoguang, Zhang Hongyu, Liu Qiong, et al. 2015. Climate characteristics of hail in Shanxi Province from 1981 to 2013 [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 31 (5): 165–170.
- 李照荣, 康凤琴, 马胜萍. 2005. 西北地区雷暴气候特征分析 [J]. *灾害学*, 20 (2): 83–88. Li Zhaorong, Kang Fengqin, Ma Shengping. 2005. Analysis on climatic characteristics of thunderstorm in Northwest China [J]. *Journal of Catastrophology (in Chinese)*, 20 (2): 83–88, doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2005.02.018.
- 郝秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 2014. 闪电气象学研究进展 [J]. *气象学报*, 72 (5): 1054–1068. Qie Xiushu, Liu Dongxia, Sun Zhuling. 2014. Recent advances in research of lightning meteorology [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 1054–1068, doi:10.11676/qxxb2014.048.
- 秦丽, 李耀东, 高守亨. 2006. 北京地区雷暴大风的天气—气候学特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 754–762. Qin Li, Li Yaodong, Gao Shouting. 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (6): 754–762, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.06.10.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 337–353, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.01.
- 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 2015. 中国大陆降水时空变异规律——II. 现代变化趋势 [J]. *水科学进展*, 26 (4): 451–465. Ren Guoyu, Ren Yuyu, Zhan Yunjian, et al. 2015. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: Recent trends [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 26 (4): 451–465, doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.001.
- 任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等. 2016. 中国大陆降水时空变异规律——III. 趋势变化原因 [J]. *水科学进展*, 27 (3): 327–348. Ren Guoyu, Liu Yanju, Sun Xiubao, et al. 2016. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: III: Causes for recent trends [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 27 (3): 327–348, doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2016.03.001.
- Sioutas M, Meaden T, Webb J D C. 2009. Hail frequency, distribution and intensity in northern Greece [J]. *Atmospheric Research*, 93 (1–3): 526–533, doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.023.
- 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 Jisong, Tao Zuyu. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (2): 164–173, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.004.
- 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 Guiyu, Yang Xiuqun. 2001. Climatic features of thunderstorms in the South China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 21 (3): 299–307, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2001.03.006.
- 余蓉, 张小玲, 李国平, 等. 2012. 1971~2000 年我国东部地区雷暴、冰雹、雷暴大风发生频率的变化 [J]. *气象*, 38 (10): 1207–1216. Yu Rong, Zhang Xiaoling, Li Guoping, et al. 2012. Analysis of frequency variation of thunderstorm, hail, and gale wind in eastern China from 1971 to 2000 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (10): 1207–1216, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.10.006.
- 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 Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (3): 311–337, doi:10.11676/qxxb2012.030.
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. *气候变化研究进展*, 3(3): 144–148. Zhai Panmao, Wang Cuicui, Li Wei. 2007. A review on study of change in precipitation extremes [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 3 (3): 144–148, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.004.
- 张芳华, 高辉. 2008. 中国冰雹日数的时空分布特征 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (5): 687–693. Zhang Fanghua, Gao Hui. 2008. Temporal and spatial features of hail days in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (5): 687–693, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.05.011.
- 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 Minfeng, Feng Xia. 1998. A study on climatic features and anomalies of the thunderstorm in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 14 (2): 156–162.
- Zhang Q H, Ni X, Zhang F Q. 2017. Decreasing trend in severe weather occurrence over China during the past 50 years [J]. *Scientific Reports*, 7: 42310, doi:10.1038/srep42310.
- 赵煜飞, 余予. 2015. 中国地面强对流天气数据集 [DB]. 国家气象信息中心, http://10.1.64.154/mdms/jsp_index.index?id=http://10.1.64.154/mdms/jsp_metadata.index?id=194 [2016-11-02]. Zhao Yufei, Yu Yu. 2015. Chinese Strong Convective Weather Data Set (in Chinese) [DB]. National Meteorological Information Center, http://10.1.64.154/mdms/jsp_index.index?id=http://10.1.64.154/mdms/jsp_metadata.index?id=194 [2016-11-02].