

孔锋, 郭君, 王一飞, 等. 近56年来中国雷暴日数的时空分异特征[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 87-95. [KONG Feng, GUO Jun, WANG Yifei, et al. Spatial and temporal variation characteristics of thunderstorm days in China in recent 56 years [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 87-95. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.017.]

## 近56年来中国雷暴日数的时空分异特征<sup>\*</sup>

孔 锋<sup>1,2,3</sup>, 郭 君<sup>1</sup>, 王一飞<sup>2</sup>, 吕丽莉<sup>2</sup>

(1. 清华大学 公共管理学院, 北京 100084; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 100081 北京;  
3. 中亚大气科学研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘 要:** 采用1961-2016年2481站的雷暴日数数据, 利用多种数理统计方法, 分析了中国及其七大地理分区的雷暴日数时空分布特征、周期变化规律和突变特征。结果表明: 1961-2016年中国整体及其不同区域的雷暴日数整体均呈减少趋势, 年均单站雷暴日数均在2000年代普遍偏少, 而2010年代开始迅速增加。全国、东北、西北东部、西北西部和西藏地区的年均单站雷暴日数在30年尺度上的振荡周期相对显著。全国、东北、北方、西北东部、西北西部、西藏、西南和东南的年均单站雷暴日数在1992、1994、1996、2000、1994、1963及2005、1989和1994年发生突变。中国年均雷暴日数超过45 d的区域主要分布在新疆西北部、西藏中部、青海南部、四川西部及沿长江的以南地区。西北地区的大部分地区年均雷暴日数则均在10 d以下。不同年代的雷暴日数距平空间差异较大。西藏大部分地区、重庆、甘肃北部、山西、河北、黑龙江西北部、浙江沿海等地区的雷暴日数呈现出明显的增加趋势。新疆西北部、四川西部和长江以南的广大地区等均呈现出明显的减少趋势。西藏、青海、西北地区以及长江中下游南北附近地区的雷暴日数年际波动较大, 而内蒙古中北部和长江以南的多数地区年际波动较小。

**关键词:** 雷暴日数; 变化趋势; 波动特征; 集合经验模态分解; Mann-Kendall 突变检验

**中图分类号:** P446; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0087-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.017

雷暴事件是一种产生于强烈发展的积雨云中、云间或云地之间的可产生闪电及雷声的对流性天气现象<sup>[1-2]</sup>, 它通常伴随着滂沱大雨或冰雹, 而在冬季甚至会随暴风雪而来<sup>[3]</sup>, 是我国主要的气象灾害之一<sup>[4]</sup>。雷暴特别是云对地间的放电对国民经济建设有较大的危害<sup>[5]</sup>, 常对农林、交通、通讯、航空航天及地面建筑物或其他设施造成不同程度的经济损失, 甚至造成人员伤亡<sup>[6-7]</sup>。雷暴灾害不仅被联合国列为“最严重的十种自然灾害之一”<sup>[8]</sup>, 而且被国际电工委员会称为“电子时代的一大公害”<sup>[9-10]</sup>。随着中国社会经济的快速发展和电子信息产业的迅速推进, 雷暴造成的灾害影响越来越大<sup>[11-13]</sup>, 因此, 深入系统研究雷暴事件活动的气候态特及其变化趋势和波动特征, 不仅可以反映雷暴事件时空分布特征, 而且对新形势下防雷工作, 尤其对减少雷暴天气下各行业经济损失有明确的指导作用。雷电产生于中尺度对流

天气系统<sup>[14]</sup>, 局地 and 时效特征明显<sup>[15]</sup>, 其时空分布与气候条件、天气系统、季节、地形和下垫面性质等多种因素有关<sup>[16-18]</sup>。长期以来, 研究人员对于雷暴的研究一直没有停止, 但研究的侧重点迥异<sup>[19]</sup>。有的侧重于研究雷暴的气候特征<sup>[20-21]</sup>; 有的则侧重研究雷暴、雷电或闪电等的结构成因<sup>[22-23]</sup>; 还有的侧重于雷暴天气的临近预报<sup>[24-25]</sup>。在雷暴的气候特征研究方面, 较多的是针对雷暴事件的年代际变化进行分析<sup>[26-29]</sup>。这类研究主要是分析特定区域雷暴的动态变化特征, 尤其是季节性变化及其与大气环流和海温异常的相关性研究<sup>[26]</sup>。雷暴活动存在很强的季节性和日变化特征。一般来说一年之中雷暴事件发生频率, 冬季最少, 夏季最多<sup>[30-31]</sup>; 一天之中, 白天多, 夜间少<sup>[32-33]</sup>。在天气和气候预报上, 学者们更多关注雷暴天气的各种物理量特征, 关注短时或临近预报的准确性<sup>[24-25]</sup>。通过梳理发现, 针对中国

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-08-24 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201843; CCSF201844); 中亚大气科学研究中心基金(CAAS201804); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701103; 41775078); 山西省高等学校创新人才支持计划项目(晋教科2016[3]号)

第一作者简介: 孔锋(1986-), 男, 山西临汾人, 博士, 主要研究方向为自然灾害与环境演变。E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

长时间尺度雷暴事件的时空分布格局及其变化趋势和波动特征的研究相对较少,尤其是中国不同区域间雷暴事件的对比研究则更少。因此,本文基于中国区域 2 481 个气象站点的雷暴事件观测记录,运用多种统计方法和 GIS 技术,对 1961 – 2016 年中国及七大地理分区的雷暴日数动态变化规律和时空演变格局进行研究。一方面,能更好地为中国强对流的预报、防御及进一步分析强对流成因以及与大尺度环流的关系打好基础。另一方面,以期对该领域的研究有所促进和补充,为全国和区域防雷减灾及雷暴天气风险评估提供可能的科学依据和决策支撑。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

本文采用的 1961 – 2016 年的 2 481 站的雷暴日数年值数据来自于中国气象局国家气象信息中心的《对流性天气数据集(V1.0)》。雷暴天气现象按《地面气象观测规范》的要求进行观测<sup>[34]</sup>,初期对观测数据进行了反复质量检测与控制,期间纠正了大量的错误数据,并对数字化遗漏数据进行了补录,使得数据质量和完整性得到明显提升。后期数据集是由中国气象局国家气象信息中心对地面气象观测数据文件和实时上传的地面气象要素数据文件综合校对后制作而成,经过了严格的“台站 – 省级 – 国家级”三级质量控制。数据的实有率均在 98% 以上,数据的正确率均接近 100%,站点分布如图 1 所示。

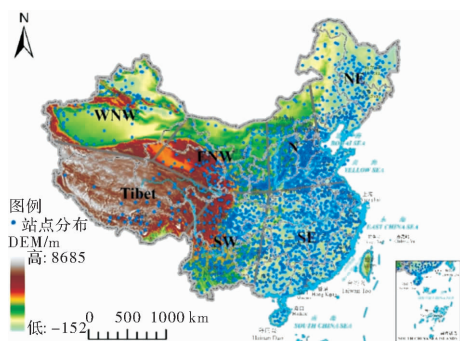


图 1 中国数字高程、七大地理分区和气象站点分布

### 1.2 计算方法

本文采用的方法主要包括线性趋势检测<sup>[35–36]</sup>、集合经验模态分解 (EEMD)<sup>[37]</sup>、Mann – Kendall (MK) 突变检验<sup>[37–38]</sup>、反距离权重插值<sup>[39–40]</sup>、图谱对比分析<sup>[41–43]</sup>和变异系数<sup>[35]</sup>,其中前三种方法主要用来检测时间序列趋势、波动和突变特征;反距离权重插值、图谱对比分析和变异系数主要是诊断不同研究时段空间格局差异的方法。其中

反距离权重插值将雷暴日数站点数据插值成 10 km × 10 km 分辨率的栅格数据。变异系数表征 1961 – 2016 年中国雷暴日数的波动特征空间分布格局。在数理统计上,变异系数是衡量资料中各观测值变异程度的一个统计量,是标准差与平均数的比值,可以用于衡量数据的波动性<sup>[35]</sup>。变异系数可以消除单位和平均数不同对两个或多个资料变异程度比较的影响。在本文中,雷暴日数的变异系数越小,其波动程度越小;反之,变异系数越大,波动程度越大。上述方法均已经在大气科学和地理学中得到了广泛的应用<sup>[37]</sup>。同时本文根据已有研究成果对中国的分区<sup>[44–45]</sup>,统计七大地理分区的雷暴动态变化特征(图 1)。

## 2 结果与分析

### 2.1 中国雷暴日数时变趋势性分析

从时间序列动态变化来看,1961 – 2016 年中国年均单站雷暴日数在波动中呈现出减少趋势(图 2)。从年代际变化来看,中国年均单站雷暴日数从 1970 年代到 2000 年代呈梯次减少趋势,而 1970 年代和 2010 年代分别比上个年代有所增加。从七大地理分区来看,1961 – 2016 年东北、北方、西北东部、西北西部、西南和东南地区年均单站雷暴日数均在波动中整体呈现出减少趋势(图 2)。从分段特征来看,东北地区年均单站雷暴日数从 1960 年代到 2010 年代分别呈现出“增 – 减 – 增 – 减 – 减 – 增”的变化趋势,其中 1980 年代年均单站雷暴日数最多,2000 年代最少,2010 年代迅速增加,且 2000 年以来波动增大。北方地区年均单站雷暴日数从 1960 年代到 2010 年代分别呈现出“增 – 增 – 增 – 减 – 减 – 增”的变化趋势,波动特征整体偏大。其中年均单站雷暴日数在 1970 年代最多,2000 年代最少,2010 年代有所增加。西北东部地区年均单站雷暴日数从 1960 年代到 2010 年代分别呈现出“增 – 增 – 增 – 减 – 减 – 增”的变化趋势,其中 1980 年代年均单站雷暴最多,2000 年代最少。西北西部地区年均单站雷暴日数从 1960 年代到 2010 年代分别呈现出“减 – 减 – 增 – 减 – 减 – 增”的变化趋势,且年际波动整体偏大,其中 1960 年代年均单站雷暴日数最多,2000 年代最少。西藏地区年均单站雷暴日数分段变化明显,但年际波动偏小。其中 1960 年代到 1980 年代前期呈增加趋势,1980 年代中期开始到 2000 年代末呈减少趋势,2010 年后开始有所增加,年均单站雷暴日数 1980 年代最多,1960 年代最少。西南地区年均单站雷暴日数从 1960 年代到 2010 年代依次呈现出

“减-减减-减-减-增”的变化趋势,但值得注意的是1960年代年均单站雷暴日数相比1970年代偏小,其中1970年代年均单站雷暴日数最多,2000年代最少。东南地区年均单站雷暴日数从1960年代到2010年代依次呈现出“减-减减-减-增-增”的变化趋势。值得注意的是1960年代年均单站雷暴日数相比1970年代偏小,其中1970年代年均单站雷暴日数最多,2000年代最少。通过对比发现才,七大地理分区中年均单站雷暴日数均在2000年代普遍少,而2010年代开始迅速增加。

## 2.2 中国雷暴日数周期变化特征分析

基于EEMD来诊断全国及七大地理分区的年均单站雷暴日数时间序列中低频信号的波动特征,本文在EEMD分解中加入的白噪音振幅标准差为原序列的0.2倍,集合次数为1 000次,最终分解出4个不同时间尺度的本征模态函数IMF序列和1个剩余残差序列。从IMF 1、IMF 2、IMF 3和IMF 4分量序列可以看出,全国的年均单站雷暴日数时

间序列分别表现出1~3、6~10、15和30年左右的周期波动特征(图3)。剩余的残差即是EEMD分解得到的趋势,该趋势和图2中的线性趋势十分相似。从图3左边各分量的显著性检验结果来看,位于不同显著性水平的线上方表示通过了不同显著性水平的检验,即可以认为该分量包含了具有实际物理意义的信息,反之则该分量包含了较多的白噪声。该图的纵轴表示IMF分量所具有的能量谱密度,纵坐标值越大表示IMF分量所具有的能量越高,振幅越大。从图3中可以看到全国年均单站雷暴日数的IMF 4所具有的能量最大,且大都落在90%的显著性水平之上,说明IMF 4分量最显著,说明在30年尺度上,中国年均单站雷暴日数的振荡周期相对显著。类似的东北、西北东部、西北西部和西藏地区的年均单站雷暴日数均在30年尺度上具有显著振荡周期。同时西藏地区也具有60年的显著振荡周期。值得注意的是北方、西南和东南地区的年均单站雷暴日数振荡周期均不显著。

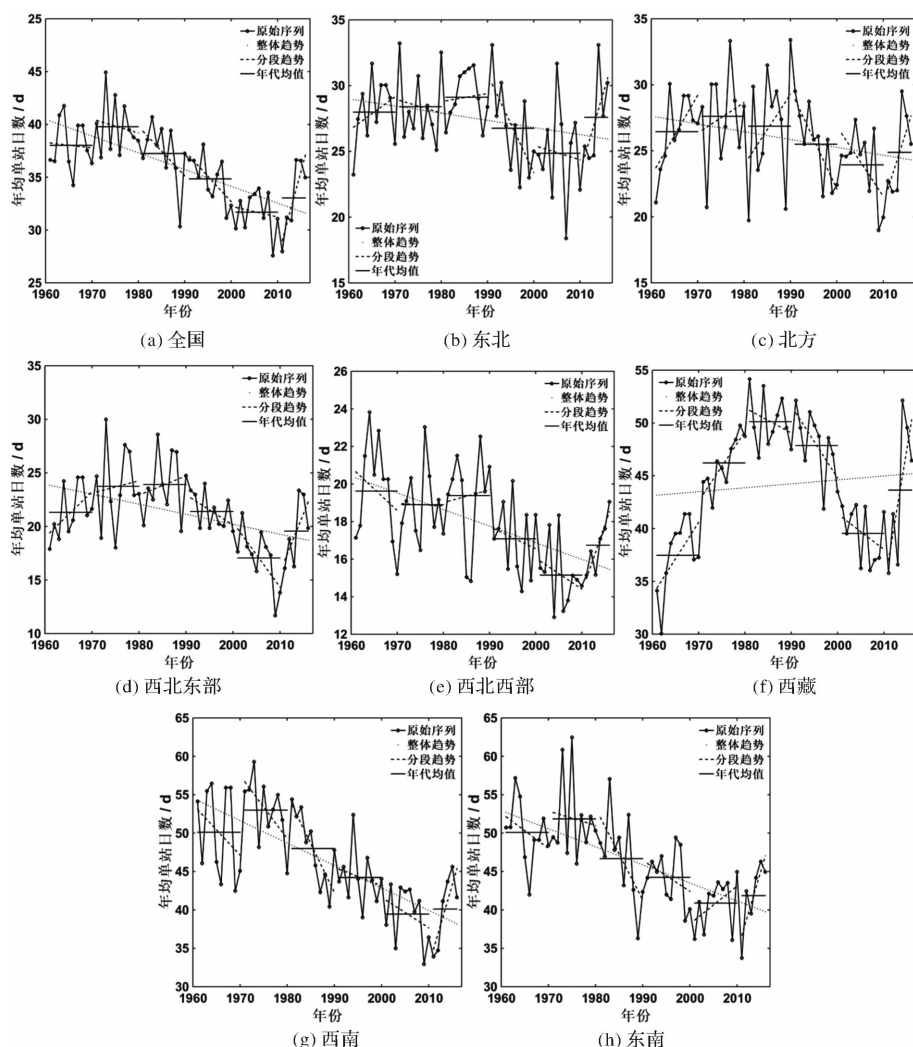


图2 中国及七大地理分区年均雷暴日数分段变化趋势(1961-2016年)

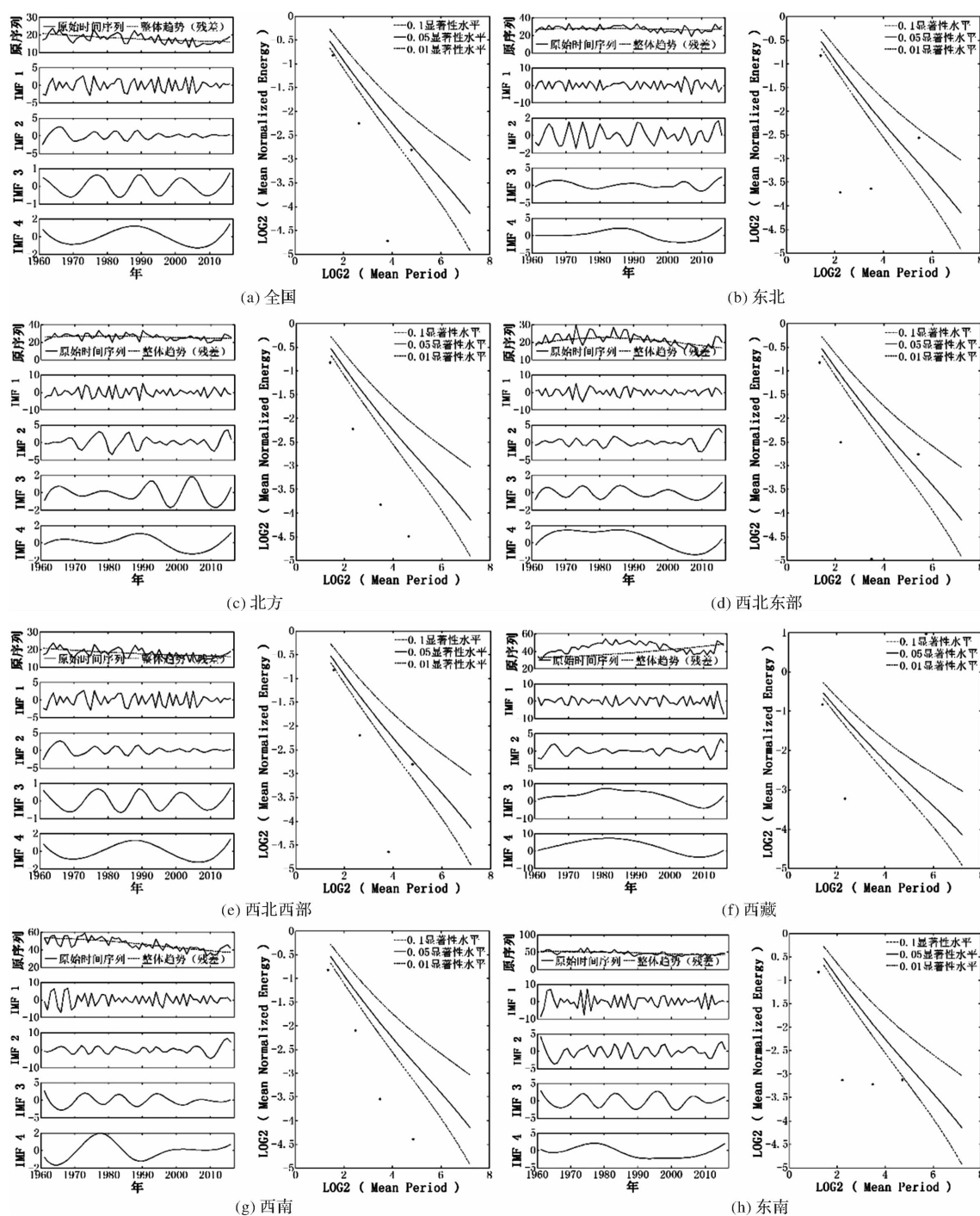


图3 基于 EEMD 的中国及七大地理分区年均雷暴日数波动特征(1961-2016 年)

### 2.3 中国雷暴日数突变特征分析

为了诊断 1961-2016 年中国及七大地理分区年均单站雷暴日数时间序列是否发生突变及其突变时间,进一步采用 MK 突变检验的方法来诊断,结果如图 4 所示。其中 UF 和 UB 为统计量曲线,取  $\pm 1.96$  和  $\pm 2.56$  为临界曲线的 MK 检验值,即 0.05 和 0.1 显著性水平的置信度检验区间。全国、东北、北方、西北东部、西北西部、西藏、西南和东南的年均单站雷暴日数的 UF 统计量和 UB 统

计量的交点大致分别在 1992、1994、1996、2000、1994、1963 及 2005、1989 和 1994 年,且交点在 0.05 和 0.1 显著性水平的置信区间内(图 4)。因此,可以判断 1992、1994、1996、2000、1994、1963 及 2005、1989 和 1994 年,是全国、东北、北方、西北东部、西北西部、西藏、西南和东南地区的年均单站雷暴日数发生突变的年份。已有的研究分析表明 1998 年是中国年均气温突变的年份,即中国年均气温增加从 1998 年以后开始停滞,甚

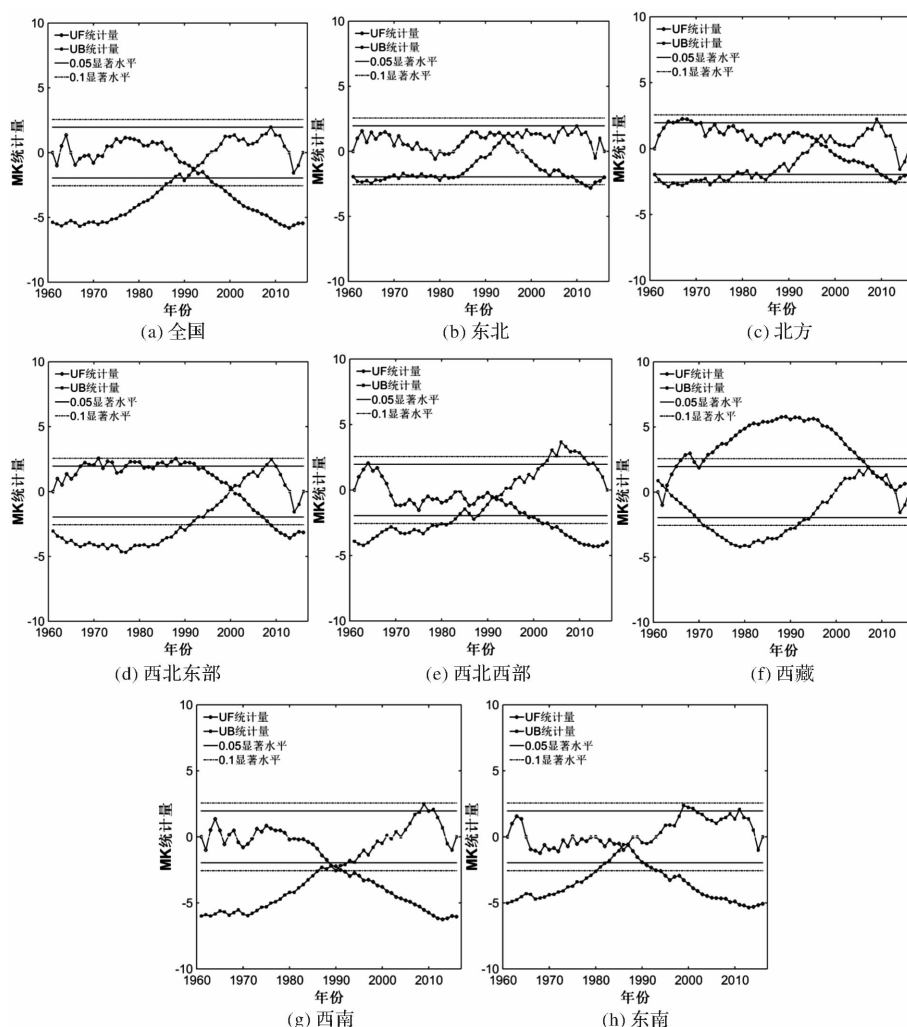


图4 基于 MK 检验的中国及七大地理分区年均雷暴日数突变诊断(1961–2016 年)

至下降<sup>[46]</sup>。且 1991–2000 年是中国年均气温显著上升的 10 年<sup>[47]</sup>, 该年代中全球和中国的大部分地区的气候均有显著变化<sup>[48]</sup>。这暗示 1961–2016 年中国年均单站雷暴日数除了受区域地形和环境因素影响外, 可能还与全球大气和海洋环流的变化有深层次的联系。

#### 2.4 中国雷暴日数气候态空间分异格局

从气候态空间分布格局来看, 1961–2016 年中国年均雷暴日数明显的区域性分布特征。其中年均雷暴日数超过 45 d 的区域主要分布在新疆西北部、西藏中部、青海南部、四川西部及沿长江的以南地区(图 5)。沿长江以北地区年均雷暴日数大致在 15~45 d 左右, 其中内蒙古和河北及陕西交界的地区年均雷暴日数大致在 35~45 d 左右。而西北地区的大部分地区年均雷暴日数则均在 10 d 以下。尤其是新疆西南地区的年均雷暴日数最少, 在 5 d 以下。综合来看, 高原和丘陵地区是雷暴事件频发的区域, 雷暴事件在低纬地区多于高纬地区; 同纬度地区则是地形复杂的山区多于地形缓和的平原地区。尤其

是夏季青藏高原是一个巨大的热源, 高原上空以上升运动为主, 由于高原特殊的地形热力和动力作用强烈地影响了其上空的大气环流<sup>[49]</sup>, 已有的研究表明, 青藏高原特有的地理和气候环境, 使其对流雷暴云发生十分频繁, 是全年对流云出现最多的地区之一, 其阵性降水日数、雷暴日数和雷暴日数远高于长江中下游地区, 而且青藏高原上对流云、雷暴和冰雹大值区都位于高原中、东部沿 32°N 附近地形复杂和海拔较高的山区。受地理位置、地形地貌、人类活动等因素的影响, 1961–2016 年中国年均雷暴日数呈明显的三块区域分布特征。尤其值得注意的是沿长江南北年均雷暴日数空间分布格局差异明显, 这可能是由于水汽条件是雷暴形成的基本条件之一, 长江以南地区大气中常年水汽含量丰富, 且随着快速城镇化进程, 城市热岛效应导致大气热力不稳定条件较高, 相比其它区域对流活动也更显著<sup>[48]</sup>。可见这种明显的空间分异特征不仅与空间地理环境密切相关, 而且与气候变化与人类活动密切相关。

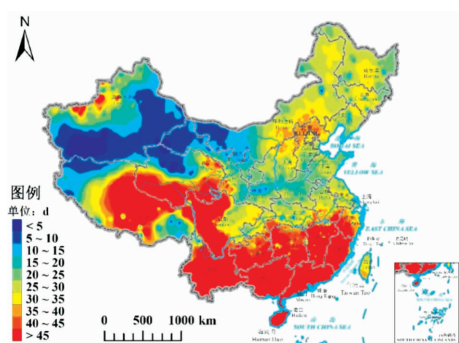


图5 中国雷暴日数气候态空间分异格局(1961-2016年)

## 2.5 中国雷暴日数年代际距平空间分异格局

从年代距平空间分布来看,不同年代间的距平空间差异较大(图6)。1960年代中国年均雷暴日数呈负距平的地区主要集中在西藏、重庆、浙江、山西、河北、黑龙江东北等地。而山东西北至西藏东部一线南部的大多数地区呈现较大正距平。同时高值正距平在新疆西北和四川西北等地也

均有分布。1970年代中国年均雷暴日数的负距平高值区域相比1960年代大大缩减,仅在西藏东部地区有分布。而年均雷暴日数的正距平高值区域主要集中在长江以南的区域及四川西部及其毗邻的青海南部地区。1980年代中国年均雷暴日数的负距平高值区域进一步减少,仅在西藏、青海和四川三省交界处有分布,其它地区分布较少。而年均雷暴日数的正距平高值区域主要集中在西藏和青海东部等地区。1990年代中国年均雷暴日数的负距平高值区域除在西藏、青海和四川三省交界处有分布,同时在四川中西部和云南西部等地也有分布。而年均雷暴日数的正距平高值区域主要集中在西藏地区。进入2000年代后,全国年均雷暴日数的负距平高值区域大大增加,其中长江以南、四川西部和南部、西藏中部、青海东部、新疆北部及内蒙古和河北交界的地区主要以负距平为主。而正距平仅在西藏拉萨附近地区有分布。

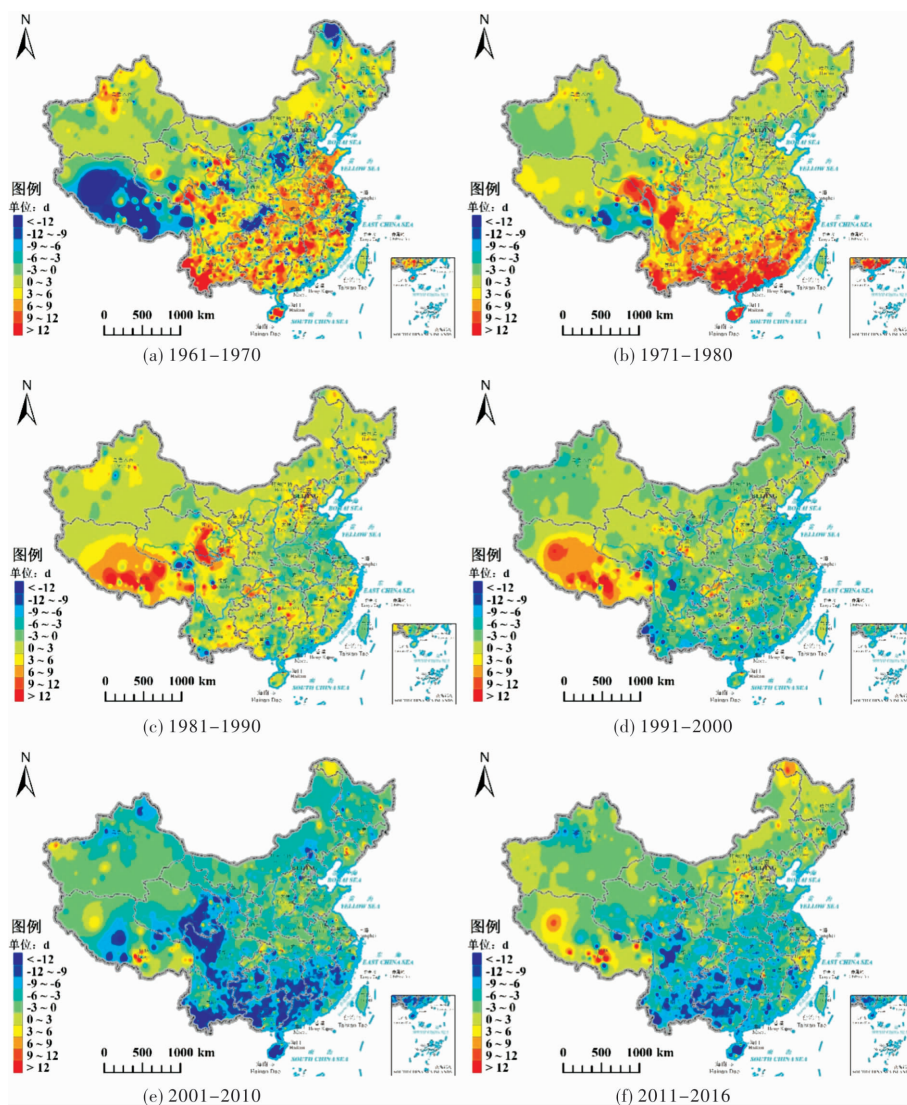


图6 中国雷暴日数年代际距平空间分异格局(1961-2016年)

## 2.6 中国雷暴日数年际变化趋势和波动特征空间分异格局

从变化趋势空间分布来看, 1961–2016 年中国雷暴日数年际变化趋势具有明显的区域性特征(图 7)。其中西藏大部分地区、重庆、甘肃北部、山西、河北、黑龙江西北部、浙江沿海等地区的雷暴日数呈现出明显的增加趋势。新疆西北部、四川西部和长江以南的广大地区等均呈现出明显的减少趋势。广大的西北地区由于深居内陆腹地, 水汽少, 对流活动弱, 较少形成雷暴事件, 因此, 雷暴日数的年际变化趋势也相对不明显。从波动特征空间分布来看, 1961–2016 年中国年际雷暴日数变异系数具有明显的东西分布特征(图 8)。其中新疆南部、西藏西部和东部、青海和甘肃北部、内蒙古西北部以及东北和长江中下游的南北局部零散地区均是雷暴日数年际波动较大的区域。而内蒙古中北部和长江以南的多数地区雷暴日数年际波动相对较小。

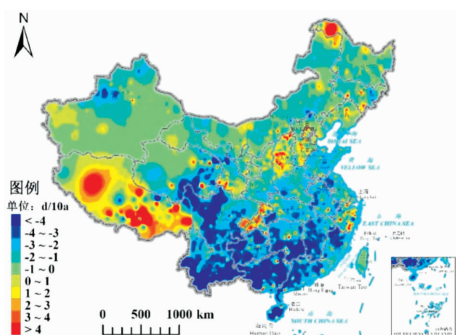


图 7 中国雷暴日数年际变化趋势空间分异格局(1961–2016 年)

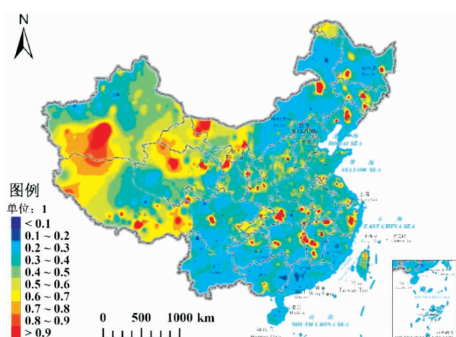


图 8 中国雷暴日数年际波动特征空间分异格局(1961–2016 年)

## 3 结论和讨论

### 3.1 结论

(1) 在时间上, 1961–2014 年中国和七大地理分区年均单站雷暴日数在年际和年代变化上均呈减少趋势。西藏地区年均单站雷暴日数分段变化明显, 表现出“先增–后减–再增”的特征。七大

地理分区的年均单站雷暴日数均在 2000 年代普遍少, 而 2010 年代开始迅速增加。中国、东北、西北东部、西北西部和西藏地区的年均单站雷暴日数在 1961–2016 年具有 30 年的显著振荡周期。西藏地区还具有 60 年的显著振荡周期。但北方、西南和东南地区的年均单站雷暴日数振荡周期均不显著。全国、东北、北方、西北东部、西北西部、西藏、西南和东南的年均单站雷暴日数在 1992、1994、1996、2000、1994、1963 及 2005、1989 和 1994 年发生突变。

(2) 在空间上, 1961–2016 年中国年均雷暴日数超过 45 d 的区域主要分布在新疆西北部、西藏中部、青海南部、四川西部及沿长江的以南地区。沿长江以北地区年均雷暴日数大致在 15~45 d 左右。西北地区的大部分地区年均雷暴日数则均在 10 d 以下。不同年代间的距平空间差异较大。1960 年代到 1970 年代正距平区域增多; 1970 年代到 1980 和 1990 年代 1960 年代正距平区域开始减少, 但直到 2000 年以后负距平才开始显著增多。

(3) 在变化趋势空间分布上, 1961–2016 年中国雷暴日数年际变化趋势具有明显的区域性特征。其中西藏大部分地区、重庆、甘肃北部、山西、河北、黑龙江西北部、浙江沿海等地区的雷暴日数呈现出明显的增加趋势。新疆西北部、四川西部和长江以南的广大地区等均呈现出明显的减少趋势。西北地区的雷暴日数年际变化趋势不明显。在波动特征空间分布上, 1961–2016 年中国年际雷暴日数在西藏、青海、西北地区以及长江中下游南北附近地区波动较大, 而内蒙古中北部和长江以南的多数地区雷暴日数年际波动较小。

### 3.2 讨论

(1) 多时间尺度的雷暴事件变化的对比分析。本文仅从年际和年代际尺度研究了雷暴时空变化分布特征。由于雷暴事件在不同季节, 不同月份, 不同周, 不同侯, 甚至同一天的不同时刻均有不同方式的变化。尤其是在当今社会, 人类的生活越规律, 具有明显的周期性, 最明显的是按周和日安排工作生活。因此, 尚需从不同时间尺度开展雷暴事件的时空动态变化特征, 尤其是与人们生产生活密切相关的雷暴事件周变化和日变化特征。

(2) 雷暴事件的减少的归因研究。本文仅从时空演变特征角度研究并发现 1961–2016 年中国雷暴事件不断减少, 但并未探究其机理。由于雷暴事件的致灾性影响, 仍需从动力和热力机制探究中国地区雷暴事件不断减少的内在原因和外在影响因素。尤其在快速城市化背景下, 航空和通讯

产业不断发展,雷暴事件在一定程度上影响着两大产业的发展。因此,亟需针对特定区域的雷暴时空变化开展归因研究,以有效开展防雷减灾工作,从而有效规避雷暴事件对特定行业产生的不利影响。

(3)雷暴事件的气候均值区划和变化区划研究。快速城市化背景下,人类活动叠加在自然气候因素之上,已经从更深更广的方式影响着全球气候因素,并开始认识到气候变化是一种复杂的、非线性的综合变化,其包含了趋势性变化、波动性变化和极端天气气候事件变化。基于该理念,史培军等采用气温和降水因素,依据趋势性变化和波动性变化开展了1961–2010年中国气候变化区划研究工作<sup>[50]</sup>。雷暴事件在此领域还未开展相关研究,并且从全国范围开展雷暴事件气候态的平均区划研究也相对较少。在本文时空演变特征的基础上,还需进一步开展雷暴事件的气候均值区划和变化区划研究,以进一步服务社会经济发展。

## 参考文献:

- [1] Tippet M K, Allen J T, Gensini V A, et al. Climate and hazardous convective weather [J]. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(2): 60–73.
- [2] Chen J, Zheng J, Feng W, et al. Statistical method of thunderstorm day [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(11): 115–118.
- [3] 孙丽,于淑琴,李岚,等.辽宁省雷暴日数的时空变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2010, 26(1): 59–62.
- [4] 马金福,冯志伟.雷击地闪密度与雷暴日数的关系分析[J]. *气象科学*, 2009, 29(5): 674–678.
- [5] 王纪军,郭红晨,卢广建.河南省雷暴日数时空分布的非均一性特征[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(4): 115–119.
- [6] 王学良,张科杰,黄小彦,等.湖北省雷暴日数与云地闪电密度关系研究[J]. *气象*, 2012, 38(6): 728–732.
- [7] 彭锦荣,曾庆硕,卢炳源.番禺区雷灾事故与雷暴日数、闪电定位数据的对比分析[J]. *广东气象*, 2012, 34(2): 53–55.
- [8] Gensini V A, Mote T L. Estimations of hazardous convective weather in the United States using dynamical downscaling [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(17): 6581–6589.
- [9] Ushio T, Wu T, Yoshida S. Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 154(2): 89–102.
- [10] Trapp R J, Robinson E D, Baldwin M E, et al. Regional climate of hazardous convective weather through high-resolution dynamical downscaling [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(3): 677–688.
- [11] 黄芳.近60年南宁市雷暴日数特征分析[J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(2): 222–224.
- [12] 主毅,张润琼,赵群剑,等.贵州西部雷暴日数的时空分布特征[J]. *热带地理*, 2008, 28(5): 411–413.
- [13] 张金,聂长春,陈玉华.广州市雷暴日数变化特征分析[J]. *成都信息工程学院学报*, 2009, 24(1): 61–63.
- [14] Haberlie A M, Ashley W S, Pingel T J. The effect of urbanisation on the climatology of thunderstorm initiation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(688): 663–675.
- [15] Pinto O. Thunderstorm climatology of Brazil: ENSO and Tropical Atlantic connections [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(6): 871–878.
- [16] Gensini V A, Mote T L. Downscaled estimates of late 21st century severe weather from CCSM3 [J]. *Climatic Change*, 2015, 129(1): 307–321.
- [17] 孔尚成,戴升,王敏.1961–2013年青海高原雷暴日数及雷电灾害变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 888–897.
- [18] 杨志华.陆川年雷暴日数变化特征与相关气象因子关系的分析[J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(3): 97–99.
- [19] 黄慧君.云南大理州近40年雷暴日数演变分析[J]. *云南地理环境研究*, 2007, 19(3): 18–20.
- [20] 尼玛央珍,央金,洛桑曲珍.近30年西藏地区雷暴日数的气候分布特征[J]. *高原山地气象研究*, 2014, 34(3): 55–59.
- [21] 谢文杰,叶小玲,甘锦蕾,等.1961–2013年新丰县雷暴日数的气候特征分析[J]. *广东气象*, 2015, 37(4): 38–40.
- [22] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 96(D6): 11007–11017.
- [23] 张义军, P. R. Krehbie, 刘欣生.雷暴中的反极性放电和电荷结构[J]. *科学通报*, 2002, 47(15): 1192–1195.
- [24] 赵旭寰,王振会,肖稳安,等.神经网络在雷暴预报中的应用初步研究[J]. *热带气象学报*, 2009, 25(3): 357–360.
- [25] 白筱璐.豫西南地区雷电分布规律及其潜势预报研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [26] 陈圣劫,孙燕,韩桂荣.太平洋年代际振荡与江苏夏季雷暴日数年代际变化的联系[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 1015–1026.
- [27] 李锁玲,孟瑞娟,孙秋生,等.菏泽市近51年雷暴日数的气候特征[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(33): 16263–16264.
- [28] 丁旻.贵州省雷暴日数的时空分布、周期及突变特征[J]. *防灾科技学院学报*, 2013, 15(4): 36–42.
- [29] 陈星宇,迟立志.直方图和正态分布图在雷暴日数统计中的应用[J]. *农技服务*, 2010, 27(8): 1064–1065.
- [30] 程萌.近50年菏泽地区雷暴日数的气候分布特征[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(25): 166–169.
- [31] 王海东,万寒,吴正可.温州地区雷暴日数时空变化研究[J]. *贵州气象*, 2014, 38(1): 31–33.
- [32] 于淑洁,黄晓东.大兴安岭雷暴日数的时空分布特征[J]. *气象水文海洋仪器*, 2010, 27(1): 72–74.
- [33] 靳永才,高卫东,刘扬,等.甘肃省天水市雷暴日数时空特征分析[J]. *甘肃科技*, 2014, 30(18): 46–48.
- [34] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2005.
- [35] 孔锋,王铸,刘凡,等.全球、大洲、区域尺度暴雨时空格局变化(1981–2010年)[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(2): 228–234.
- [36] 孔锋,方建,吕丽莉,等.中国短历时和长历时暴雨对总暴雨贡献的空间差异性研究(1961–2015)[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(2): 293–303.
- [37] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格

- 局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165–174.
- [38] 陈秋壮, 吴名杰. 海南省雷暴日数年代际变化特征[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(4): 106–108.
- [39] 孔锋, 吕丽莉, 方建. 1991–2010 年中国小时暴雨时空变化格局及其与城镇化因子的空间相关分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(3): 355–364.
- [40] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 基于日值和小时降水数据诊断中国暴雨时空变化差异的研究(1991–2010)[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 72–79.
- [41] 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 中国长短历时暴雨时空变化格局及其对总暴雨贡献的研究(1951–2010)[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(s2): 316–321.
- [42] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1281–1290.
- [43] 史培军, 孔锋. 1951~2010 年中国年代际累积暴雨时空格局变化的相关因素研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1457–1465.
- [44] Wang A, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil Moisture Drought in China, 1950–2006[J]. Journal of Climate, 2011, 24(13): 3257–3271.
- [45] 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降雨时空特征的预估[J]. 水文, 2016, 36(4): 37–43.
- [46] IPCC SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. London: Cambridge University Press. 2012.
- [47] IPCC AR5. Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5) [R]. London: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [48] 史培军, 孔锋, 叶谦, 等. 灾害风险科学发展与科技减灾[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1205–1211.
- [49] 侯栋, 孙晓光, 卓永, 等. 昌都地区雷暴日数的时空变化特征及防御对策[J]. 安徽农业科学, 2014(25): 8665–8666.
- [50] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961–2010 年)[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294–2306.

## Spatial and Temporal Variation Characteristics of Thunderstorm Days in China in Recent 56 Years

KONG Feng<sup>1,2,3</sup>, GUO Jun<sup>1</sup>, WANG Yifei<sup>2</sup> and LU Lili<sup>2</sup>

(1. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Meteorological Administration Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Central Asia Atmospheric Sciences Center, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Based on the 2481 stations' data of hail days in 1961–2016 years, the temporal and spatial distribution characteristics, periodic variation and mutation of hail days in China and seven geographical regions were analyzed by using a variety of statistical methods. The results showed that the thunderstorm days in China and its different regions decreased as a whole in the 1961–2016 years. The annual average single station thunderstorm days was generally low in 2000s, but began to increase rapidly in 2010s. The average annual single station thunderstorm days in the whole country, Northeastern China, Northwestern China, Eastern China, Western China, Northwestern China and Tibet regions' oscillation cycle are relatively significant on the 30 years scale in 1961–2016 years. The mutation of annual average single station thunderstorm days in the whole country, Northeastern China, Northern China, Northwestern China, Eastern China, Western China, Northwestern China, Tibet, Southwestern China and Southeastern China occurred in 1992, 1994, 1996, 2000, 1994, 1963 and 2005, 1989 and 1994 respectively. The annual average thunderstorm days over 45 days mainly distributed in the northwest of Xinjiang, central Tibet, south of Qinghai, west of Sichuan and south of the Yangtze river regions. The annual average thunderstorm days are below 10 days in most areas of Northwestern China. Thunderstorm days has a big difference in different decade. The thunderstorm days in most areas of Tibet, Chongqing, north of Gansu, Shanxi, Hebei, northwest of Heilongjiang and Zhejiang coast showed an obvious trend of increase. The northwest of Xinjiang, west of Sichuan and the vast area south of the Yangtze River regions all showed a clear trend of decrease. The annual thunderstorm days in Tibet, Qinghai, Northwestern China and the middle and lower reaches of the Yangtze River regions had a high fluctuation characteristics. While the central and north of Inner Mongolia and the south of the Yangtze River regions had a low fluctuation characteristics.

**Key words:** thunderstorm days; trend; fluctuation; ensemble empirical mode decomposition; Mann-Kendall mutation test