中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 8 期： 2931–2941
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

雷暴对极端日降水趋势的作用及对年代际变化的贡献

朱可欣[1,2]，郄秀书[1,2*]，袁善锋[1]，蒋如斌[1]，黄子凡[1,2]，孙竹玲[1]

1. 中国科学院大气物理研究所大气环境与极端气象全国重点实验室，北京 100029
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
* 通讯作者，E-mail：qiex@mail.iap.ac.cn

2025-03-10收稿，2025-10-18修回，2026-05-12接受，2026-07-16网络版发表
国家自然科学基金重点项目(42230609)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)资助

摘要 极端降水和雷击每年给人类造成大量经济损失和人员伤亡，气候变化背景下这些极端天气事件的频率、强度和持续时间都会发生变化。本文利用1979–2013年中国345个气象台站资料，研究了雷暴日和极端降水的关系，揭示了雷暴对极端降水长期趋势和年代际变化的重要贡献，明确了产生极端降水和雷电的雷暴如何变化。在中国，几乎所有站点雷暴日对极端降水频次的贡献都在50%以上，其中南部沿海地区对极端降水频次的贡献可达80%。雷暴极端降水频次、雷暴极端降水量和雷暴最大日降水量在华南和华东地区呈显著上升趋势，对应的极端降水指数呈现较弱上升趋势，但非雷暴极端降水指数呈显著且大范围的下降趋势，这种趋势的对比揭示了雷暴作为降水系统对极端降水呈现增长趋势的主导作用。研究进一步发现极端降水指数均在1990年和2000年附近呈现显著的年代际突变，并且2000年是趋势转折年份，这之后极端降水指数呈现上升趋势；去除雷暴降水系统对极端降水事件的影响后，极端降水频次在1990年附近的年代际突变由显著变为不显著，2000年左右的趋势转折也相对减弱，表明了雷暴对极端降水年代际变化的重要作用。本研究发现雷暴是影响极端降水的重要对流系统，其主导了极端降水的上升趋势并影响了极端降水年代际变化，不仅有助于加深对全球变暖背景下极端降水变化的理解，对雷击和极端降水复合灾害的防灾减灾也有重要意义。

关键词 雷暴，极端降水，变化趋势，年代际变化，气候变化

1 引言

雷暴是中小尺度强对流天气系统，常常伴随短时强降水、闪电、冰雹、龙卷以及极端阵风等强天气灾害。雷暴如果产生极端强降水，则可能同时造成雷击、暴洪和山体滑坡等复合灾害，对生命和财产安全构成严重威胁，产生重大的经济损失和社会影响(Dotzek等，2009)。因此了解极端降水雷暴对许多领域都十分重要，包括防灾减灾、气候变化风险评估、经济和保险、健康和能源等(Greenough等，2001；Field等，2012；Sander等，2013)。

气候变暖背景下降水变率将会增加(Zhang等，2021)，极端天气事件频率、强度、发生时间和持续时间等也会发生改变(Fowler和Hennessy，1995； Myhre等，2019)，因此，在气候变暖的背景下，极端降水事件近年来受到了越来越多的关注(Pfahl和Wernli，2012；Tippett，2018；Zhou等，2025)。在过去气候变暖的背景下，强降水事件已有所增加；在未来气候情景下，极端天气事件(如极端降水和极端温度)的频次或强度预计也将进一步增加(Allan和Soden，2008；He和Takemi，2024；La Sorte等，2021)。在不同区域和变暖情景下，极端天气事件受到动力和气象因素强迫的共同作用(Maraun等，2011)，其变化仍有待进一步研究(Freychet等，2021；Iles等，2024)。极端降水的区域特征取决于一系列不同降水物理过程的综合影响，包括各种天气系统，例如雷暴、气旋和锋面等(Dowdy和Catto，2017)，气候变暖背景下不同

中文引用格式：朱可欣, 郄秀书, 袁善锋, 蒋如斌, 黄子凡, 孙竹玲. 2026. 雷暴对极端日降水趋势的作用及对年代际变化的贡献. 中国科学: 地球科学, 56(8): 2931–2941, doi: 10.1360/SSTe-2025-0047
英文引用格式：Zhu K, Qie X, Yuan S, Jiang R, Huang Z, Sun Z. 2026. Role of thunderstorms in extreme daily precipitation trends and their contribution to decadal variability. Science China Earth Sciences, 69(8): 2889–2899, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1957-8

© 2026《中国科学》杂志社

尺寸降水系统的形态变化趋势存在不同(Zhang和Wang，2024)。不同极端降水物理过程对气候变化的响应可能不同，例如温带气旋可能在很大程度上响应温度经向梯度的变化，而对流往往对局地温度的变化更敏感(Hawcroft等，2012)。值得注意的是，很多证据表明气候变化背景下中国雷暴日、冰雹日在大多数地区呈现下降趋势(Tang等，2021；Zhang等，2017)，极端降水日在华南、长江中下游等部分地区呈现上升趋势(Ng等，2021)。雷暴是产生短时强降水的关键天气系统，这种雷暴日减少与极端降水增加并存的现象进一步表明传统雷暴日变化研究在表征强降水等灾害性天气方面的局限性。因此，量化极端降水雷暴对总极端降水的贡献，不仅有利于了解极端降水事件背后的机制，对估计其在未来气候变化背景下可能的强度或者频率有重要意义，而且有利于深化对雷暴对气候变化的响应机制的理解。

已有研究对降水雷暴气候学做了分析。例如，Dai(2001a，2001b)利用综合海洋大气数据集(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set，COADS)中1975–1999年约15000个气象站资料，分析了各种类型降水的发生频率的全球气候学特征，包括毛毛雨、非毛毛雨降水、阵雨降水、非阵雨降水、雷暴和雪，但没有区分降水雷暴和干雷暴，他指出在北半球夏季，亚洲东南部有30%–50%的天数会出现雷暴。Xu(2020)利用闪电资料和极端降水资料，通过相关性分析，研究了闪电和极端降水同时变化的情况，指出极端降水量与闪电密度和雷暴弱相关或相关。Ng等(2022)指出华南地区雷暴小时降水频率显著增加，主要是弱垂直风切变雷暴增多，受到低层比湿增加和可降水量上升的驱动。小时极端降水和日极端降水变化趋势在中国华南和华北地区一致呈现上升趋势(任国玉等，2010)。然而，很少有研究系统分析雷暴和非雷暴相关的极端日降水指数空间分布和趋势变化，量化雷暴对极端降水的气候学贡献仍需进一步研究。

本研究利用全球地表日摘要(Global Surface Summary of the Day，GSOD)雷暴日资料和降水资料，将某日同一站点极端降水和雷暴同时发生记作极端降水相关的雷暴日(或称极端降水雷暴)，评估中国极端降水雷暴对极端降水气候学的贡献，并进一步量化了极端降水雷暴的年代际变化特征及其对极端降水年代际变化的重要性。

2　数据和分析方法

2.1　站点资料来源

GSOD是由分布在世界各地的8000多个地面气象站组成的数据集(https://data.nodc.noaa.gov/)。该数据集以日分辨率记录了雾、雨、雪/雨夹雪、冰雹、雷电和龙卷风等天气现象是否发生。在本文中，使用了雷暴日资料。雷暴日是指地面站在观测日内至少听到一次雷声，一些地面站点的记录可以追溯到1929年，但是1979年以后的数据是最完整的。因此，本文选取了1979年以后中国区域内GSOD中的824个基准、基本气象站的雷暴日资料进行分析。为了保证数据质量，考虑到台站迁徙及数据缺测情况，本文对数据做了以下筛选：剔除站点水平变动距离大于30 km或垂直变动距离大于50 m，以及每年缺测7天以上的年份以及累计缺测年份大于7年的站点。在中国大部分气象站点中，1999年的GSOD降水日资料缺测天数超过7天，因此删去1999年的降水日资料及其对应的雷暴观测记录。最终利用我国345个站点1979–2013年雷暴日和降水日资料进行雷暴相关的极端降水时空分析。

2.2　极端降水事件的定义

传统上，定义极端降水采用绝对阈值法，但该方法仅适用于降水量空间变率较小的地区。而在气候差异显著的区域，通常采用相对阈值法。因此，本文选取相对阈值指数定义中国极端降水事件。参考前人对极端降水事件的定义(翟盘茂和潘晓华，2003)，基于百分位数确定每个站的阈值。具体而言，将某站1979–2013年逐年日降水量按照升序排列，取第99个百分位数的35年平均值作为该站阈值。当某站某天的日降水量超过此阈值，即视为发生一次极端降水事件。

2.3　极端降水指数

极端气候指数的定义兼顾定量研究的可行性、不同地区的可比性和应用的实际意义，有利于深入理解气候变化(任国玉等，2010)。为了评估降水事件的强度、频率和持续时间的变化，专家定义了反映不同特征的11个核心极端降水指数。所有指数可以分为4类：相对阈值指数，是指反映某一时间段内极端降水值的分布，有R95p(强降水量)和R99p(极强降水量)；绝对阈值指数；强度指数，主要有Rx1day(最大1日降水量)、Rx5day(最大5日降水量)；持续时间指数。

本文选择R99p、R99d、R99i、R99c、Rx1day五个极端降水指数来分析中国极端降水事件，以及TR99p、TR99d、TR99i、TR99c、TRx1day五个雷暴极端降水指数来定义雷暴对极端降水的贡献，这两套指数的定义如表1所示，可用于评估雷暴极端降水事件和极端降水事件的强度和频率的变化。具体计算过程中，通过将雷暴日和极端降水日进行匹配，考虑可能由雷暴日产生的极端降水日的强度和频率，从而计算雷暴极端降水指数。

表1 (雷暴)极端降水指数及其缩写和定义

指数	缩写	定义
(雷暴)极端降水量(mm)	(TR99p) R99p	全年日降水量大于第99个百分位值的(雷暴)降水总和
(雷暴)极端降水频次(d)	(TR99d) R99d	全年日降水量大于第99个百分位值(雷暴)频次的总和
(雷暴)极端降水强度(mm/d)	(TR99i) R99i	站点(TR99p)R99p与(TR99d)R99d的比值
(雷暴)极端降水贡献率(%)	(TR99c) R99c	(TR99p)R99p占全年降水总量的百分比
最大(雷暴)日降水量(mm)	(TRx1day) Rx1day	一年内的(雷暴)日降水量最大值

3 雷暴相关的极端降水空间分布和趋势

本节利用1979–2013年中国345个气象观测站的雷暴日数据和日降水数据，分析雷暴极端降水及其对极端降水贡献的气候态和趋势分布。

3.1 雷暴极端降水指数气候态

图1给出了1979–2013年雷暴相关的极端降水事件频次的时空分布特征。图1A表明几乎所有站点雷暴引发的极端降水事件占总极端降水事件频次的比例均在30%以上，呈现东南高、西北低的空间分布；且几乎所有站点雷暴极端降水频次占比均大于50%，最高可达92%，因此在中国，几乎所有站点中超过50%的极端降水事件均发生在雷暴日。图1B显示雷暴对降水事件的贡献比例，远低于雷暴对极端降水的贡献比例，最高达到43.9%。图1C和1D反映了雷暴极端降水和极端降水高发月份的空间分布，72.4%的站点两者高发月份一致，反映了雷暴极端降水频次和极端降水对大尺度环流场的响应在年内尺度上具有类似性。中国华南地区雷暴极端降水与极端降水事件的高发期均集中于5月和6月，而30°N以北地区和105°E以西地区最大频次月份延迟至7月和8月。图1E和1F分别是雷暴极端降水(极端降水)月最大频次占年雷暴极端降水(极端降水)频次的比例，进一步揭示了雷暴极端降水频次年内集中程度在大多数地区大于极端降水频次年内集中程度，尤其是30°N以北的地区，其月最大频次占比大部分站点都超过0.5，高原北部局部可达0.8。

图2给出了中国1979–2013年雷暴相关的极端降水量的时空分布特征。图2A和2B给出了雷暴极端降水量和极端降水量的多年平均空间分布，雷暴极端降水量与总极端降水量的空间分布均呈现东南多、西北少的格局，其中东南部为高值核心区，并且散点大小由东南到西北急剧变小，反映了雷暴极端降水量和极端降水量由东南到西北减小的梯度很大。图2C和2D给出了雷暴降水贡献率和雷暴极端降水贡献率。雷暴极端降水贡献率和极端降水贡献率的分布类似，而且雷暴极端降水贡献率(最大10.9%)和极端降水贡献率(最大26.4%)总体都不高。雷暴降水贡献率最大可达71.4%，在华南和环渤海部分地区，而且50%以上的年降水量发生在雷暴日。另外，雷暴降水贡献率和雷暴极端降水贡献率空间相对分布存在差异，尤其是在高原地区，在青藏高原中部地区和高原东南部分地区降水贡献率大于同纬度其他地区，高原雷暴极端降水率比同纬度其他地区小，这可能和高原深对流频次较高但对流强度较弱有关(Wu等，2013；Qie等，2014)。图2E和2F分别给出了雷暴极端降水量占极端降水量的比例和极端降水贡献率(极端降水量占全年降水总量的比例)。极端降水量占全年降水总量的比例较低，雷暴极端降水量占极端降水量的比例在西南地区最大可达91.4%，在中国南部、西南和环渤海部分地区50%以上的极端降水量发生在雷暴日。

图3展示了雷暴极端降水强度指数的两个指标，雷暴极端降水强度(TR99i)和雷暴最大日降水量(TRx1day)的空间分布，及其非雷暴极端降水强度R99i和非雷暴最大日降水量Rx1day之间的空间分布差异。雷暴极端降水强度(图3A)和雷暴最大日降水量(图3C)在华南、东南地区和华东地区是高值区，其中华南地区雷暴极端降水强度远大于其他地区。雷暴极端降水强度(图3A)在华南和华中地区明显大于中国其他地区，并且雷暴极端降水强度在华中和华北部分地区明显大于非雷暴极端降水强度(图3B)。对于最大日降水量，雷暴最大日降水量(图3C)在华南和华中地区明显大于中国其他地区，并且在中国大部分地区雷暴最大日降水量都大于非雷暴最大日降水量(图3D)，尤其在华南、华中和环渤海地区，雷暴最大日降水量显著大于非雷暴最大日降水量。基于雷暴极端降水强度指数的两个指标的分析，均表明雷暴降水强度显著高于非雷暴降水强度，突出了雷暴在极端降水强度中的主导作用，且这些区域与极端降水事件频次的高值区高度重合。

另外，尽管雷暴极端降水强度和极端降水强度多年平均空间分布和雷暴极端降水量和极端降水量的空间分布是类似的，但极端降水强度最强月份的空间分布，明显不存在由东南向西北推进的规律(未附图)，因此雷暴

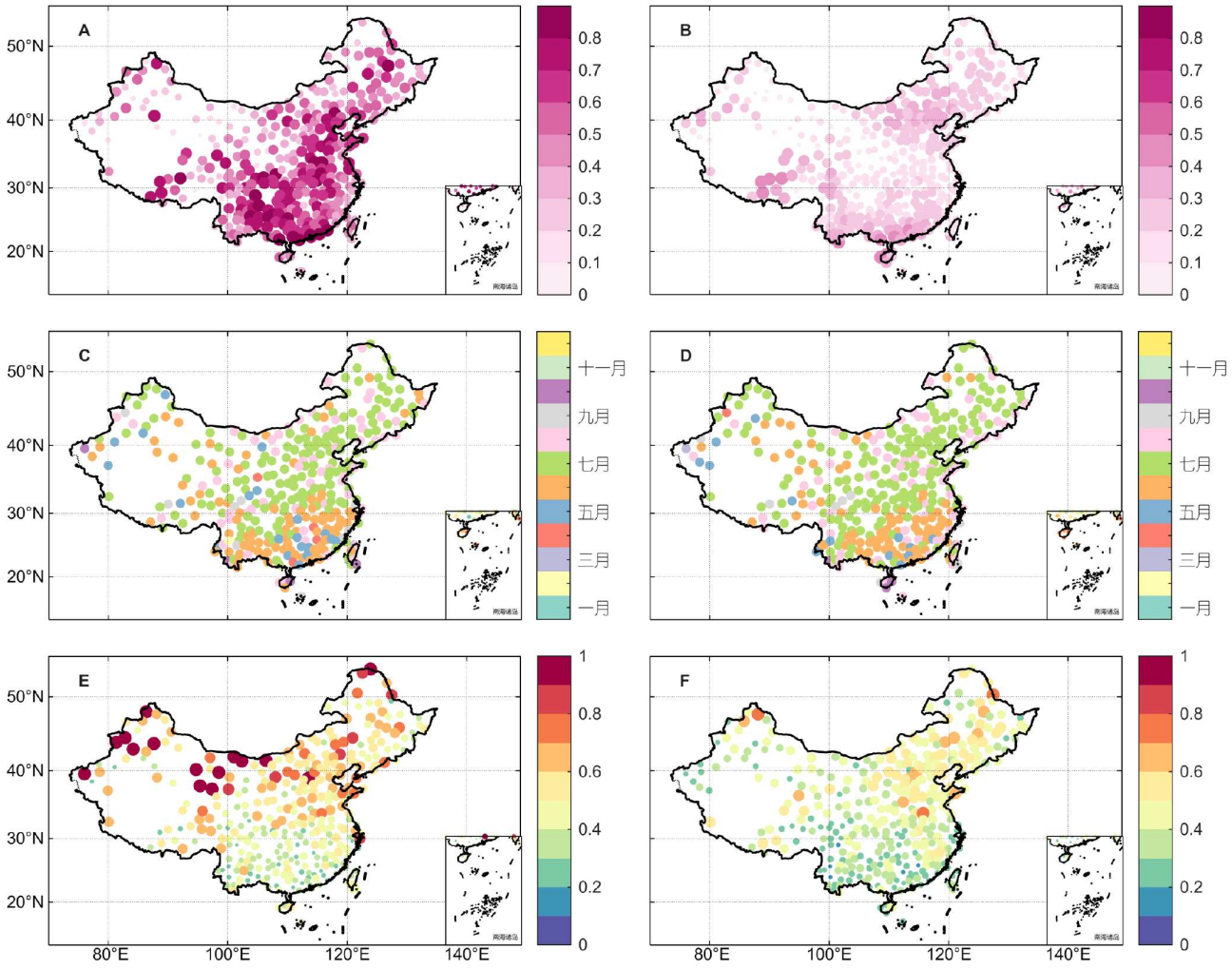


图 1　中国雷暴极端降水频次和极端降水频次1979–2013年时空分布。(A) 雷暴产生的极端降水事件占极端降水频次的比例，散点大小代表数值标准化到[0.1, 2]之后放大20倍像素的大小；(B) 雷暴产生的降水事件占降水频次的比例；(C) 雷暴极端降水频次峰值月份；(D) 极端降水频次峰值月份；(E) 雷暴极端降水月最大频次占年雷暴极端降水频次的比例；(F) 极端降水月最大频次占年极端降水频次的比例

极端降水强度和极端降水强度的季节变化可能对大尺度环流的响应较弱。

3.2　雷暴对极端降水指数趋势的主导作用

图4显示了1979–2013年雷暴极端降水频次以及极端降水频次趋势空间分布。图4A是雷暴极端降水频次占极端降水频次比例的趋势。雷暴极端降水频次占比在几乎所有站点均呈现上升趋势，尤其在华南部分地区呈现显著上升趋势。两者对比表明雷暴对极端降水频次贡献增加，雷暴对极端降水频次的重要性增强。

为进一步解析雷暴对极端降水频次的重要影响，图4B–4D分别给出了雷暴极端降水频次、非雷暴极端降水频次和极端降水频次的趋势。极端降水频次在东南和西北部分地区呈现显著上升趋势，和前人研究一致(任国玉等，2010；尹红和孙颖，2019)，而雷暴极端降水频次在中国大部分地区呈现上升趋势。非雷暴极端降水频次仅在局部区域微弱上升(如中国西南及东南部零星站点)，且部分区域(如西南大部分地区)甚至呈现显著下降趋势。这表明极端降水频次上升的主要原因是雷暴极端降水频次增加，后文将通过年代际变化，进一步证实雷暴对极端降水频次变化的重要贡献。

图5分析了雷暴极端降水贡献率、雷暴极端降水量、非雷暴极端降水量和极端降水贡献率的趋势。图5A表明雷暴极端降水量对总降水量的贡献率在华南和华东部分地区呈显著上升趋势。图5B–5D表明极端降水量仅在华南和华东部分地区呈现增长趋势，而雷暴产生的极端降

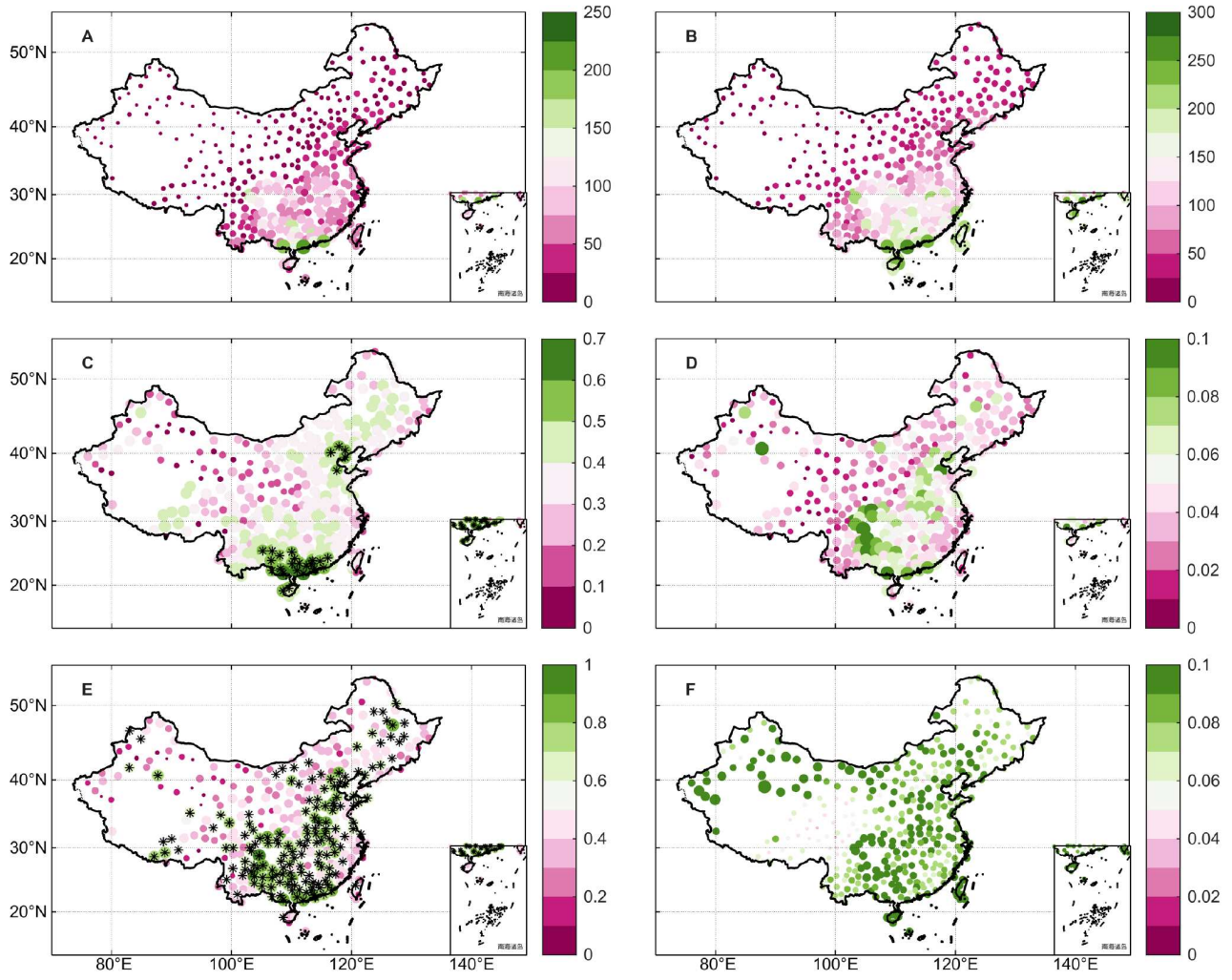


图 2 1979–2013年中国雷暴极端降水量和极端降水量时空分布。(A) 雷暴极端降水量(单位：mm)；(B) 极端降水量(单位：mm)；(C) 雷暴降水贡献率(贡献率大于50%的站点标注*号)；(D) 雷暴极端降水贡献率；(E) 雷暴极端降水量占极端降水量的比例(贡献率大于50%的站点标注*号)；(F) 极端降水贡献率。(A–D) 散点大小是数值的绝对值标准化到[0.1, 2]之后放大20倍像素的大小

水量则表现出更显著且广泛的空间增长趋势。另外，对于华南地区极端降水量呈现出上升趋势的站点，筛除雷暴对流系统对极端降水量的贡献之后，非雷暴极端降水量呈现下降趋势，表明雷暴对极端降水量在华南和东南地区增加的重要作用。这种对比突显了所有产生降水的对流系统中，雷暴对极端降水量变化的关键作用：尽管总极端降水量在中国西南部分地区呈显著下降趋势，但雷暴主导了中国东南部极端降水的增长趋势。这一现象进一步印证，在气候变暖背景下，雷暴对流过程对区域水循环的调控能力具有重要作用。

图6给出了1979–2013年雷暴极端降水强度、总极端降水强度和非雷暴极端降水强度趋势的空间分布特征。整体上来说，中国雷暴极端降水强度(雷暴最大日降水量，图6A)和极端降水强度(最大日降水量，图6C)均在华南部分地区、华东和华北部分地区呈现上升趋势，雷暴最大日降水量(图6B)在华南和海南省呈现显著上升趋势。筛除雷暴对流系统对极端降水强度的贡献之后，非雷暴极端降水强度(图6E、6F)在中国大部分地区呈现下降趋势，而且在西南大部分地区为显著下降趋势，比极端降水强度的下降趋势更明显(图6C、6D)。这表明了雷暴在西南地区抑制了极端降水强度的减弱趋势，在华南和华东地区增强了降水强度的增强趋势。不过对于海南省和福建部分地区，去除雷暴对流系统的影响后极端降水强度仍然呈现显著上升趋势，说明在这些地区明显还有其他降水系统控制着极端降水强度和最大日降水量的变化趋势。华南地区夏季以中低高度暖云降水为主(Gao

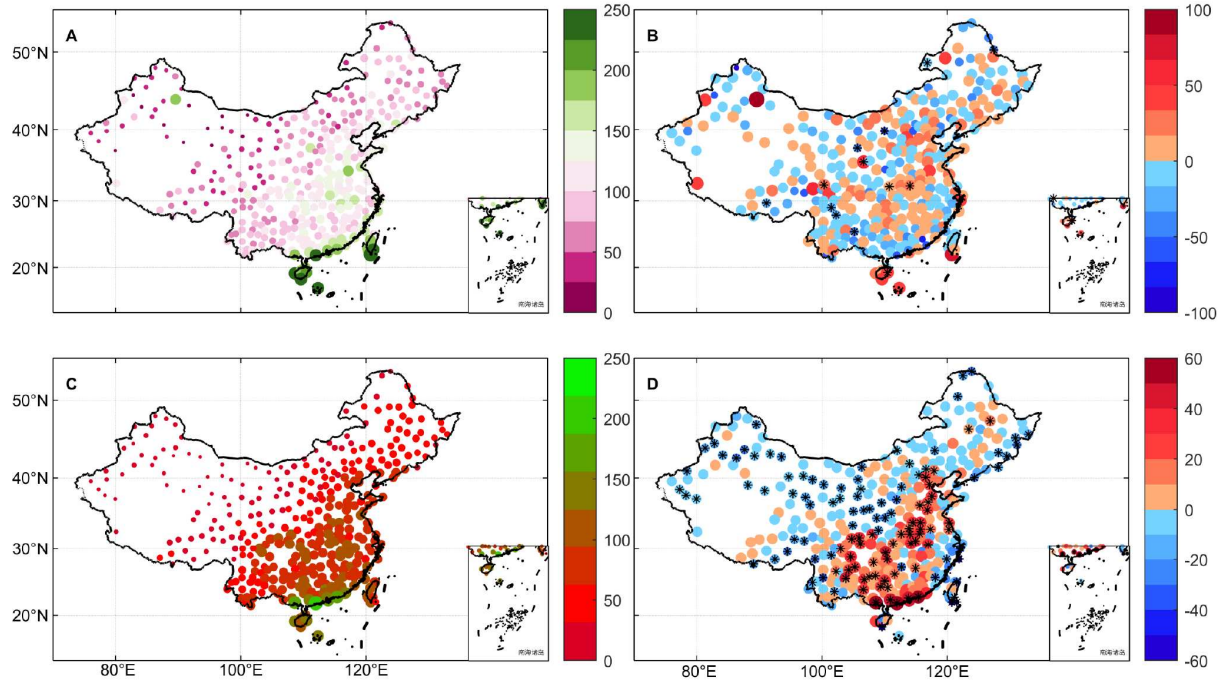


图 3　雷暴极端降水强度和极端降水强度1979–2013年多年平均空间分布。（A）雷暴极端降水强度(单位：mm/d)；（B）雷暴极端降水强度和非雷暴极端降水强度的差值(*号表示该站点两者之间均值有显著差异，单位：mm/d)；（C）雷暴最大日降水量(单位：mm)；（D）雷暴最大日降水量和非雷暴最大日降水量的差值(*号表示该站点两者之间均值有显著差异，单位：mm)。散点大小代表数值的绝对值标准化到[0.1，2]之后放大20倍像素的大小。暖色调表明雷暴降水强度大于非雷暴降水强度

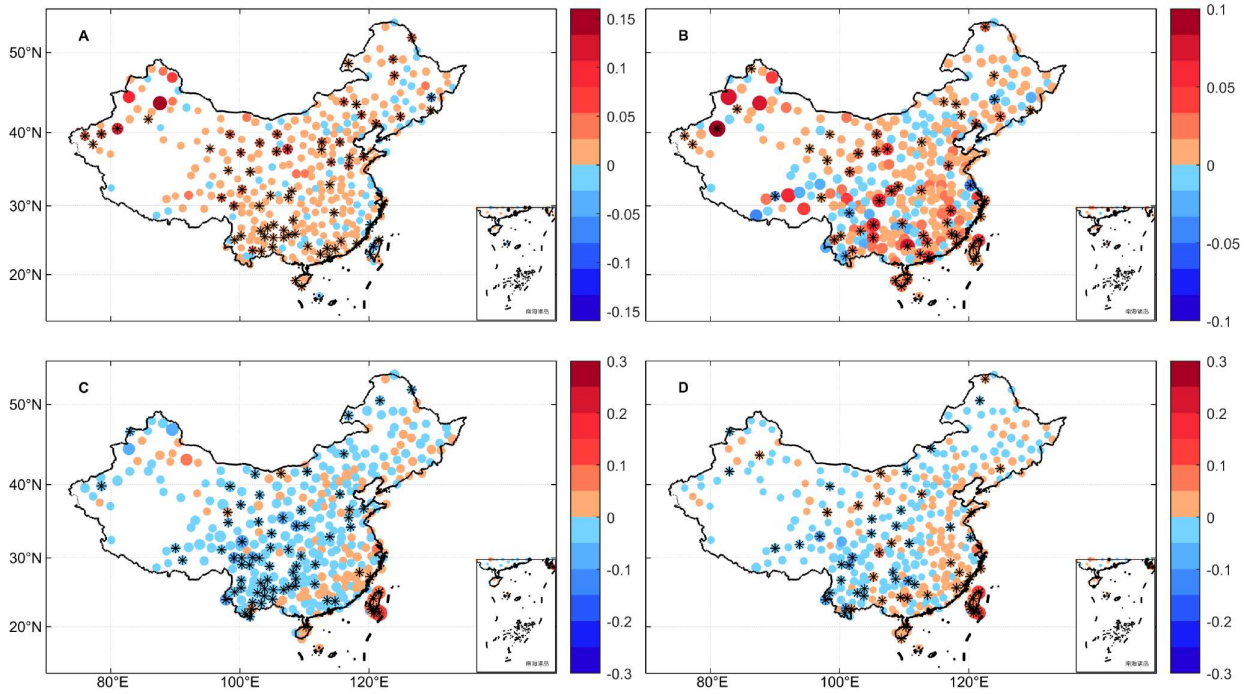


图 4　1979–2013年雷暴极端降水指数和极端降水指数趋势空间分布特征。（A）雷暴产生的极端降水频次占极端降水频次的比例；（B）雷暴产生的降水频次占降水频次的比例；（C）非雷暴产生的极端降水频次；（D）极端降水频次。*号处的站点线性趋势通过了95%的显著性检验

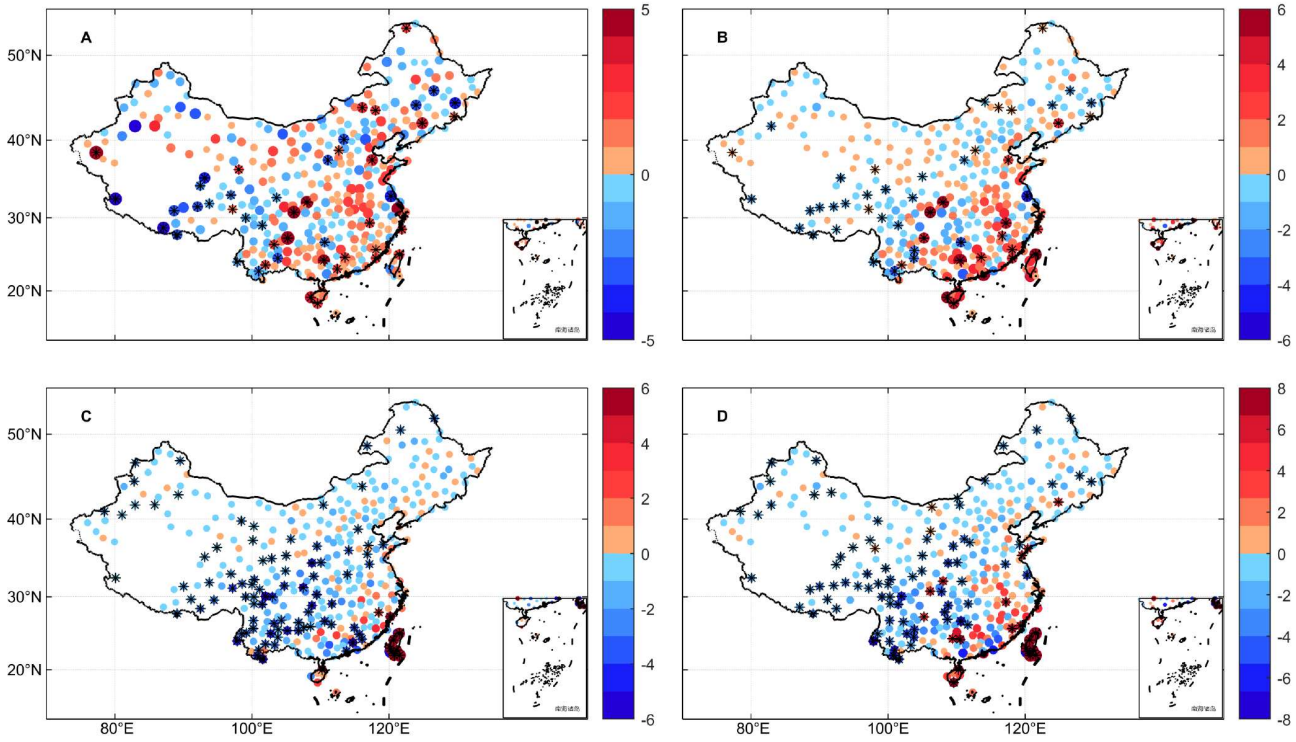


图5 1979–2013年雷暴极端降水指数和极端降水指数趋势空间分布特征。(A) 雷暴极端降水贡献率；(B) 雷暴极端降水量；(C) 非雷暴极端降水量；(D) 极端降水量。*号处的站点线性趋势通过了95%的显著性检验

等，2021)，此时尽管产生极端降水，但对流较弱云顶高度较低且地表温度更高，0 ℃以上的混合相态区域更薄，不利于云中的起电(Prein和Heymsfield，2020)，因此降水云难以发展成产生闪电的雷暴云。有研究表明在华南和东部地区6–8月大尺度温带气旋对降水的贡献率存在大值区(Hawcroft等，2012)，因此华南沿海地区雷暴对极端降水变化趋势的影响可能相对较小。

图7给出了1979–2013年站点平均标准化雷暴极端降水指数与标准化总极端降水指数的年际变化。值得注意的是，站点年均雷暴极端降水频次、雷暴极端降水量、雷暴极端降水贡献率、雷暴最大日降水量的趋势均和极端降水频次、极端降水量、极端降水贡献率、最大日降水量的趋势相反，其中雷暴相关的极端降水指数均呈现上升趋势。雷暴极端降水频次呈现显著的上升趋势，变化率为0.14 d (10 a)$^{-1}$；雷暴极端降水强度呈现显著下降趋势，变化率为−0.04 mm d^{-1} (10 a)$^{-1}$，其余雷暴极端降水指数没有显著的变化趋势。全国区域平均极端降水指数都呈现下降趋势，但其中雷暴贡献的分量均呈现上升趋势(除了雷暴极端降水强度呈现显著下降趋势)，尤其是极端雷暴降水频次呈现上升趋势，因此在气候变暖可能放大极端事件变率的背景下(Allan和Soden，2008)，雷暴作为对流降水系统对极端降水的重要性更加凸显，有必要在气候预测中重点关注雷暴引发的极端降水的变化。

4 雷暴对极端降水年代际变化的作用

图8给出了极端降水指数、非雷暴极端降水指数和雷暴极端降水指数(包括降水频次、降水量和降水强度三个极端降水特征的描述)站点平均标准化序列及滑动t检验结果。极端降水指数和非雷暴极端降水指数均呈现下降趋势，并且非雷暴极端降水指数的下降趋势比极端降水指数的下降趋势更明显，这种雷暴极端降水对极端降水下降趋势的缓和作用在2000年之后和极端降水事件频次中更加明显。

极端降水频次、极端降水量和极端降水强度特征中有2个一致的年代际变化转折点：1989年和2000年。很多研究者均发现了这两个极端降水年代际变化出现趋势转折或均值突变的年份，如中国南部在1990年附近极端降水发生年代际均值突变(Ning和Qian，2009)，中国北部和东部在2000年和2003年前后极端降水发生年代际趋势转折(Diao等，2023)。本研究进一步发现去除雷暴极端

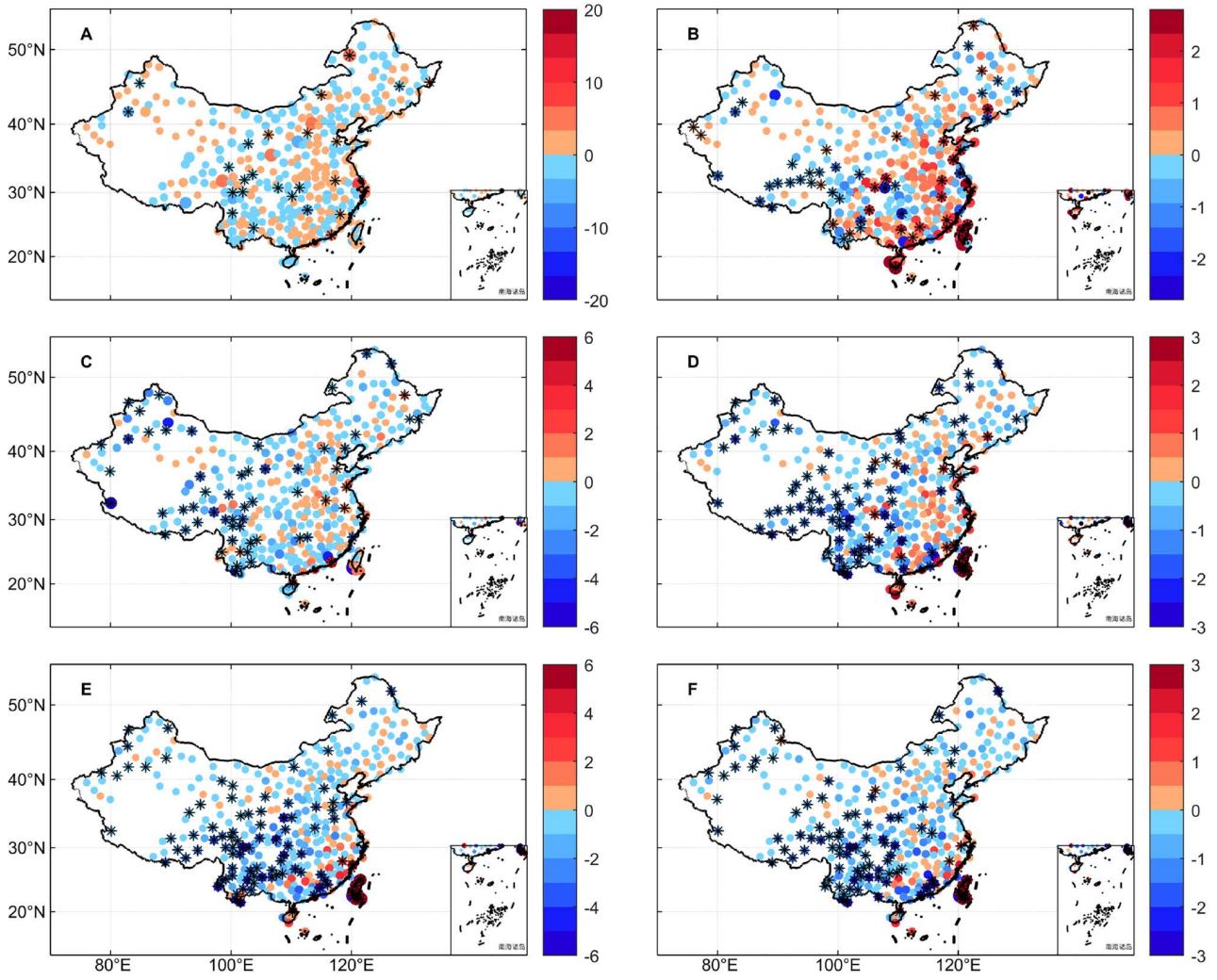


图 6　1979–2013年雷暴极端降水强度指数和极端降水强度指数趋势空间分布特征。（A）雷暴极端降水强度；（B）雷暴最大日降水量；（C）极端降水强度；（D）最大日降水量；（E）非雷暴极端降水强度；（F）非雷暴最大日降水量。*号处的站点线性趋势通过了95%的显著性检验

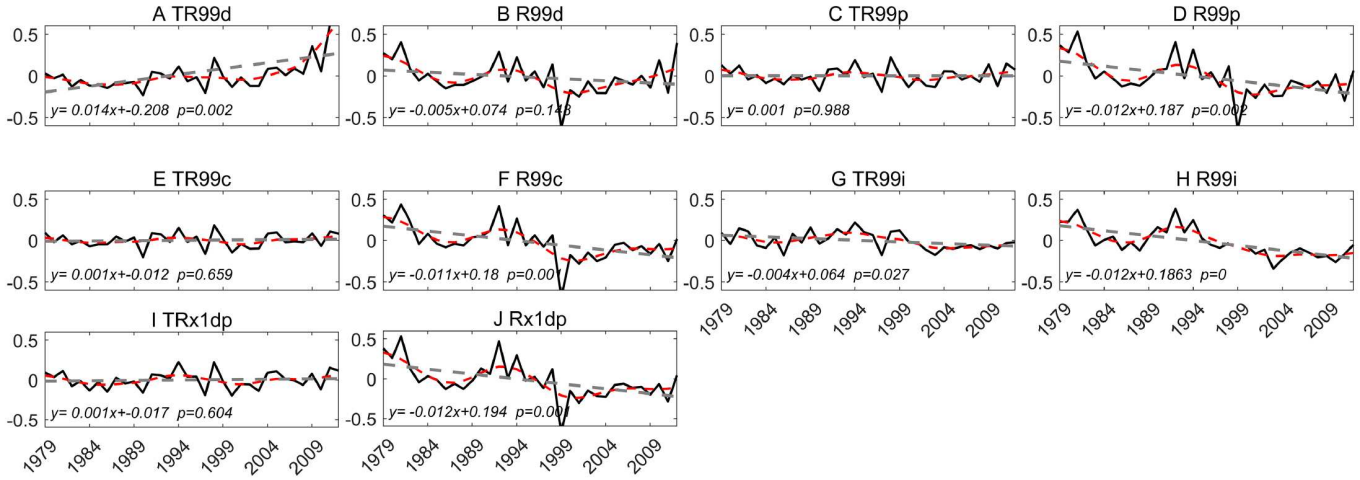


图 7　六个雷暴极端降水指数和六个极端降水指数的年际变化(黑色折线)及其10 a高斯平滑序列(红色曲线)和线性回归趋势(黑色虚线)

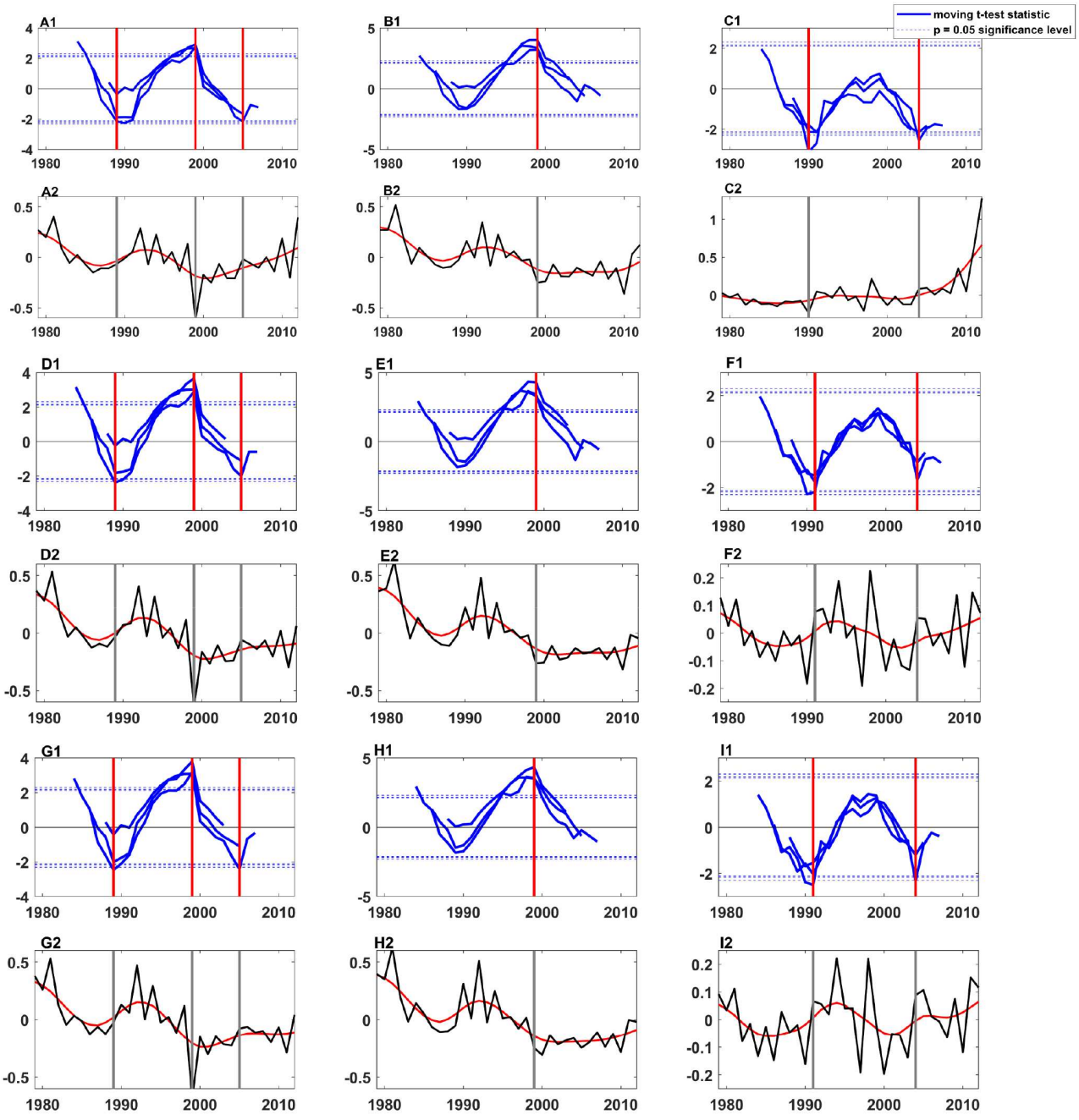


图 8　极端降水指数、非雷暴触发极端降水指数及雷暴极端降水指数的滑动*t*检验结果(A1、B1、C1–I1，滑动窗口为7、9、11 a)及其对应指数序列(A2、B2、C2–I2，黑色折线为原始序列，红色曲线为10 a高斯滤波序列)。(A) 极端降水频次；(B) 非雷暴极端降水频次；(C) 雷暴极端降水频次；(D) 极端降水量；(E) 非雷暴极端降水量；(F) 雷暴极端降水量；(G) 极端降水强度(最大日降水量)；(H) 非雷暴极端降水强度(去除雷暴事件后的最大日降水量)；(I) 雷暴极端降水强度(雷暴最大日降水量)

降水的影响后，尽管滑动*t*检验的极端低值还保持一致，但在1989年和2005年附近极端降水日由显著年代际变化转变为不显著(图8B1、8E1、8H1)。1989年前后极端降水指数有增加趋势向减弱趋势的转变，由图8D2和8G2的极端降水量和极端降水强度变化可以明显看出，雷暴对于2000年之后极端降水指数的上升趋势有明显的贡献作用。2000年之后的极端降水事件频次(图8A2)、极端降水量(图8D2)的上升趋势明显大于去除雷暴贡献后的降水事件频次(图8B2)、极端降水量(图8E2)的上升趋势。

总的来说，去除雷暴贡献之后，极端降水在1990年附近年代际突变点由显著变为不显著，并且2000年之后的上升趋势明显减弱。由此可见雷暴对极端降水年代际

变化有重要贡献，因此研究极端降水中雷暴分量的贡献而非总体极端降水事件，可为从机制上理解极端降水年代际变化，并预测未来变暖情景下极端降水的变化提供重要帮助。

5　结论与讨论

本研究基于GSOD雷暴日和降水日数据集，从雷暴极端降水频次、雷暴极端降水量、雷暴极端降水贡献率、雷暴极端降水强度、雷暴最大日降水量五个方面，分析研究了中国雷暴极端降水气候学及雷暴对流系统对极端降水的重要贡献。主要结论如下。

(1)从多年平均来看，我国几乎所有气象站点雷暴对极端降水日频次的贡献都在50%以上，最高可达80%(华南地区、环渤海部分地区和海南省)。雷暴对降水量的贡献率在华南地区和环渤海地区大于50%，雷暴极端降水量占极端降水量的比例在华南和华中超过50%。雷暴极端降水强度和雷暴最大日降水量呈现从东南到西北均匀递减的空间分布，并且在华南、华东、华中地区和西南部分地区的广泛范围上雷暴最大日降水量均大于非雷暴最大日降水量。

(2)从空间趋势上，中国大部分站点雷暴极端降水频次呈现上升趋势，非雷暴日相关的极端降水频次仅在海南省和东南沿海部分地区仍呈现上升趋势。雷暴极端降水贡献率和雷暴极端降水量在华南、西南和华东部分地区呈现上升趋势，但是非雷暴极端降水量在西南地区和华中地区呈现显著下降趋势。最大日降水极端降水强度指数在广东和华东地区的上升趋势在去除雷暴日的贡献之后呈现下降趋势，而雷暴极端降水指数在华南、华东部分地区呈现显著的上升趋势。

(3)在中国大部分地区(除海南省和东南沿海部分地区)极端降水指数的上升趋势的主要原因是雷暴极端降水指数的上升趋势。全国平均雷暴极端降水频次呈现显著的上升趋势($0.14\ \mathrm{d}\ (10\ \mathrm{a})^{-1}$)，雷暴极端降水贡献率呈现微弱的上升趋势。

(4)极端降水频次、极端降水量和最大日降水量均在1990年和2000年附近存在显著的年代际变化(滑动平均t检验)。对极端降水频次去除雷暴的贡献后，极端降水频次在1990年附近的年代际变化由显著转为不显著；去除雷暴的贡献之后，极端降水指数在2000年附近由下降转为上升的趋势转折明显减弱了。可以说雷暴对极端降水年代际变化有重要贡献。

本文使用日资料和Ng等(2022)利用小时资料分布研究极端日降水和极端小时降水均发现，中国南部、长江中下游和华东地区极端降水频次的增加趋势，以及青藏高原东部极端降水频次的减弱趋势，而且雷暴相关极端降水频次在中国南部地区显著增加。尽管日资料并不能完全反映雷暴局地对流过程的特征，但本文所使用GSOD资料空间覆盖范围广、时间跨度长，有利于在气候变化尺度上对雷暴日和相关的极端降水进行分析和区域比较。

雷暴主导了极端降水指数的趋势变化中增长的分量，对极端降水指数的年代际变化有重要影响，研究极端降水中雷暴分量的贡献和变化，对从机制上理解极端降水年代际变化并预测未来变暖情景下极端降水的变化提供新的思路。雷暴极端降水年代际变化无疑会受到AMO、太平洋年代际振荡(PDO)等海温信号的影响。有很多研究表明，PDO处于冷位相时，中国东部降水存在明显的南旱北涝的局面(Yang等，2017)。另外，海温异常还将通过大气遥相关波列激发大气环流异常特征模态影响对流不稳定和雷暴发生(Tang等，2021)。因此今后的工作中将进一步研究影响雷暴极端降水年代际变化的大尺度动力因素及海温驱动作用。

参考文献

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. 气候与环境研究, 15: 337–353

杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 等. 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析. 大气科学, 45: 683–696

尹红, 孙颖. 2019. 基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析. 气候变化研究进展, 15: 363–373

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报, S1: 1–10

Allan R P, Soden B J. 2008. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. Science, 321: 1481–1484

Dai A. 2001a. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part I: Seasonal and interannual variations. J Clim, 14: 1092–1111

Dai A. 2001b. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations. J Clim, 14: 1112–1128

Diao Y, Guo J, Zhang Y, et al. 2023. Trend turning of North China summer extreme precipitations around early 2000s and its possible reason. Clim Dyn, 61: 5367–5386

Dotzek N, Groenemeijer P, Feuerstein B, et al. 2009. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. Atmos Res, 93: 575–586

Dowdy A J, Catto J L. 2017. Extreme weather caused by concurrent cyclone, front and thunderstorm occurrences. Sci Rep, 7: 40359

Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

Fowler A M, Hennessy K J. 1995. Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. Nat Hazards, 11: 283–303

Freychet N, Hegerl G, Mitchell D, et al. 2021. Future changes in the frequency of temperature extremes may be underestimated in tropical and subtropical regions. Commun Earth Environ, 2: 1–8

Gao W, Xue L, Liu L, et al. 2021. A study of the fraction of warm rain in a pre-summer rainfall event over South China. Atmos Res, 262: 105792

Greenough G, McGeehin M, Bernard S M, et al. 2001. The potential impacts of climate variability and change on health impacts of extreme weather events in the United States. Environ Health Perspect, 109: 191

Hawcroft M K, Shaffrey L C, Hodges K I, et al. 2012. How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? Geophys Res Lett, 39: 2012GL053866

He S, Takemi T. 2024. Future changes of extreme precipitation and related atmospheric conditions in East Asia under global warming projected in large ensemble climate prediction data. J Clim, 37: 5171–5186

Iles C E, Samset B H, Sandstad M, et al. 2024. Strong regional trends in extreme weather over the next two decades under high- and low-emissions pathways. Nat Geosci, 17: 845–850

La Sorte F A, Johnston A, Ault T R. 2021. Global trends in the frequency and duration of temperature extremes. Clim Change, 166: 1

Maraun D, Osborn T J, Rust H W. 2011. The influence of synoptic airflow on UK daily precipitation extremes. Part I: Observed spatio-temporal relationships. Clim Dyn, 36: 261–275

Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, et al. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. Sci Rep, 9: 16063

Ng C P, Zhang Q, Li W. 2021. Changes in hourly extreme precipitation over Eastern China from 1970 to 2019 dominated by synoptic-scale precipitation. Geophys Res Lett, 48: e2020GL090620

Ng C P, Zhang Q, Li W, et al. 2022. Contribution of Thunderstorms to Changes in Hourly Extreme Precipitation over China from 1980 to 2011. J Clim, 35: 4485–4498

Ning L, Qian Y. 2009. Interdecadal change in extreme precipitation over South China and its mechanism. Adv Atmos Sci, 26: 109–118

Pfahl S, Wernli H. 2012. Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes. J Clim, 25: 6770–6780

Prein A F, Heymsfield A J. 2020. Increased melting level height impacts surface precipitation phase and intensity. Nat Clim Chang, 10: 771–776

Qie X S, Wu X K, Yuan T, et al. 2014. Comprehensive pattern of deep convective systems over the Tibetan Plateau–South Asian Monsoon Region based on TRMM data. J Clim, 27: 6612–6626

Sander J, Eichner J F, Faust E, et al. 2013. Rising variability in thunderstorm-related U.S. losses as a reflection of changes in large-scale thunderstorm forcing. Weather Clim Soc, 5: 317–331

Tang J, Guo X, Chang Y, et al. 2021. Temporospatial distribution and trends of thunderstorm, hail, gale and heavy precipitation events over the Tibetan Plateau and associated mechanisms. J Clim, 34: 9623–9646

Tippett M K. 2018. Extreme weather and climate. npj Clim Atmos Sci, 1: 1–2

Wu X K, Qie X S, Yuan T. 2013. Regional distribution and diurnal variation of deep convective systems over the Asian monsoon region. Sci China Earth Sci, 56: 843–854

Xu W. 2020. Thunderstorm climatologies and their relationships to total and extreme precipitation in China. J Geophys Res-Atmos, 125: e2020JD033152

Yang Q, Ma Z, Fan X, et al. 2017. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies. J Clim, 30: 7017–7033

Zhang Q, Ni X, Zhang F. 2017. Decreasing trend in severe weather occurrence over China during the past 50 years. Sci Rep, 7: 42310

Zhang W, Furtado K, Wu P, et al. 2021. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. Sci Adv, 7: eabf8021

Zhang Y, Wang K C. 2024. The changing morphology of global precipitation systems during the last two decades. Bull Am Meteorol Soc, 105: E1861–E1880

Zhou X, Li Y, Xiao C, et al. 2025. High-impact extreme weather and climate events in China: Summer 2024 overview. Adv Atmos Sci, 42: 1064–1076

（责任编委：陈文）