



基于文献计量的中国区域极端降水研究现状分析

赵林 陈滢 刘邱源 吴邱钰 李鑫鑫

A Bibliometric analysis of current research status on extreme precipitation in China

ZHAO Lin, CHEN Ying, LIU Qiuyuan, WU Qiuyu, LI Xinxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-178>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展

A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(3): 255–265 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-216>

中国南方极端降水的不同变化特征分析

Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China

暴雨灾害. 2025, 44(3): 390–399 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-204>

京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响

The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure

暴雨灾害. 2025, 44(3): 322–331 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-228>

湖北“8·12”极端降水特征及成因初探

Analysis of characteristics and causes of "8.12" extreme precipitation in Hubei Province

暴雨灾害. 2023, 42(1): 13–23 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-109>

赣江流域近50 a来极端降水时空变化特征

Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Ganjiang River Basin in the past 50 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 102–108 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.012>

基于复合极值模型的辽宁省极端降水重现期研究

Study on the return period of extreme precipitation in Liaoning Province based on the Compound Extreme Value Model

暴雨灾害. 2022, 41(6): 662–670 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-025>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵林,陈滢,刘邱源,等.2025.基于文献计量的中国区域极端降水研究现状分析[J].暴雨灾害,44(4):431–442. ZHAO Lin, CHEN Ying, LIU Qiuyuan, et al. 2025. A Bibliometric analysis of current research status on extreme precipitation in China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):431–442 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–178

基于文献计量的中国区域极端降水研究现状分析

赵林, 陈滢, 刘邱源, 吴邱钰, 李鑫鑫

(武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072)

摘要: 基于中国知网 (CNKI) 收录的 989 篇文献和 Web of Science (WOS) 收录的 995 篇文献数据, 利用可视化知识图谱分析法 (CiteSpace) 从发文量、研究团队、热点方向等方面, 系统分析了 2004–2023 年中国区域极端降水研究发展态势。主要结果表明: (1) 2004–2023 年中国区域选题为“极端降水”的中英文期刊年发文量均呈现上升趋势, 且 2018 年以后英文论文年发表量超过了中文; (2) 张强、王小军、尹义星、陈晓宏等是该领域的主要贡献学者, 以南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所、中国气象科学研究院等为主的科研机构是该选题研究的主力军; (3) 研究热点主要聚焦在极端降水的数据产品评估、时空演变特征和发生机制等三个方面。本领域未来研究可着重关注融合多源数据产品与 AI 气象大模型开展极端降水时空高精度监测与影响评估, 为区域防灾减灾助力。

关键词: 极端降水; 研究进展; 文献计量; 数据评估; 时空特征; 发生机制

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024–178

A Bibliometric analysis of current research status on extreme precipitation in China

ZHAO Lin, CHEN Ying, LIU Qiuyuan, WU Qiuyu, LI Xinxin

(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: Based on 989 publications indexed in CNKI and 995 publications from the Web of Science (WOS), this study systematically analyzes the development of research on regional extreme precipitation in China from 2004 to 2023 using CiteSpace for visual knowledge mapping. Key aspects such as publication trends, research collaborations, and thematic focuses are examined. The results are as follow: (1) From 2004 to 2023, the annual number of journal articles on “extreme precipitation” in both Chinese and English has shown an increasing trend, with English-language publications surpassing Chinese ones after 2018. (2) The primary contributing scholars in the field included Zhang Qiang, Wang Xiaojun, Yin Yixing, and Chen Xiaohong. For research institutions, Nanjing University of Information Science & Technology, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and Chinese Academy of Meteorological Sciences played the main roles. (3) The research hotspots focused on data assessment, spatiotemporal evolutionary characteristics, and occurrence mechanisms of extreme precipitation. Future research should pay more attention to integrating multi-source data products with AI-based meteorological large models for high-precision spatiotemporal monitoring and impact assessment of extreme precipitation, to help regional disaster prevention and mitigation.

Key words: extreme precipitation; research progress; bibliometrics; data assessment; spatiotemporal characteristics; occurrence mechanism

引言

极端降水事件是指在整体降水中出现严重偏离平均态的小概率降水事件 (翟盘茂等, 2003)。极端降水事件的界定一般有两种方法: 一是绝对阈值法, 即选定一个特定的降水值作为阈值。如中国将极端降

水统称为暴雨, 通常指连续 24 h 降水达到 50 mm 以上的降水 (史培军等, 2014; 薛媛等, 2022)。二是相对阈值法, 将降水序列的 90、95 或 99 百分位数作为阈值 (孔锋等, 2017)。在全球气候变化的背景下, 极端降水事件因发生频率高、强度大、范围广、破坏力强等特点, 引起了科研机构、社会公众与政府部门的广

收稿日期: 2024–09–26; 定稿日期: 2025–01–02

资助项目: 第三次新疆综合科学考察项目 (2022xjkk0600); 国家自然科学基金项目 (U22B2011); 湖北省自然科学基金项目 (2023AFB823); 国家自然科学基金面上项目 (42471085)

第一作者: 赵林, 主要从事自然灾害学、灾害监测与风险管理研究。E-mail: linzhao@whu.edu.cn

通信作者: 陈滢, 主要从事自然灾害学、灾害监测与风险管理研究。E-mail: chenying22@whu.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

泛关注(孔锋和孙邵, 2021)。IPCC 第六次评估报告显示, 在未来持续变暖的背景下, 极端强降水事件将变得更加频繁和强烈, 全球大部分区域发生诸类极端事件的可能性也将增加(IPCC, 2021)。极端降水通常伴随强风、洪水及其他次生灾害, 严重威胁生态环境、人类生命安全和经济发展(史培军, 2024)。近年来中国多次发生极端降水事件, 对生态环境、生命安全、社会经济等造成了严重威胁。例如, 1960—2014 年期间, 中国暴露人口超过 1 亿的极端降水事件有 378 次, 其中有 3 次事件暴露人口超过 2.5 亿(景丞等, 2016)。2021 年 7 月, 河南遭遇创纪录的极端降水, 其中郑州市 1 h 降水量高达 201.9 mm(丁一汇, 2024)。2023 年 7 月 29 日 08 时—8 月 2 日 08 时中国华北地区出现历史罕见特大暴雨, 北京西部、河北中部和西南部等地出现特大暴雨, 累计雨量超过 400 mm, 局地达 1 000 mm 以上, 造成严重灾害(杨舒楠, 2023)。因此, 研究全球变暖背景下中国极端降水的演变规律, 对于应对气候变化风险以及开展区域防灾减灾工作具有重要意义。

目前, 已有众多学者在不同空间尺度上对极端降水研究进展进行了总结。例如: 孔锋等(2017)综述了全球尺度上极端降水时空变化格局及其影响因素; Madsen 等(2014)对欧洲极端降水趋势开展了系统梳理, 并探讨了统计降尺度与偏差校正等系列研究方法; 姚俊强等(2020)阐述了中亚地区极端暴雨的演变机制; 高涛和谢立安(2014)梳理了中国极端降水趋势及物理成因; Gu 等(2022)总结了不同区域极端降水的统计方法; 翟盘茂等(2016)回顾了中国江淮流域持续性极端降水的形成机理和预报方法。

极端降水研究已成为气候变化领域的热点之一, 受到科研院校、政府部门及社会公众的广泛关注。现有文献资料主要聚焦于极端降水研究领域某些特定方面的进展综述, 如时空变化、形成机理、统计方法等(梁丰等, 2016; 潘欣等, 2017; Madsen et al., 2014; 孔锋等, 2017; 甘露等, 2021), 但关于极端降水整体性宏观统计分析的研究综述尚比较稀缺。鉴于此, 本文基于中国知网(CNKI)与 Web of Science(WOS)平台的文献资料, 采用可视化知识图谱分析法(CiteSpace)对 2004—2023 年中国极端降水选题的研究现状进行定量分析, 厘清相关研究热点与进展, 以期极端降水研究领域提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

本文基于中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)两大文献平台, 全面检索分析了本领域的中

英文文献。

借助中国知网(CNKI)文献检索平台, 以“极端降水”为主题, 对 2004 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日的相关文献进行检索(限北大中文核心期刊), 并剔除与研究主题不相关的文献, 共获取到 989 篇文献。借助 Web of Science(WOS)文献检索平台, 选取数据库中的“科学引文索引”(SCI-EXPANDED), 检索式为(TS="extreme precipitation", AND ALL="China")排除不相关学科后, 最终获得文献 995 篇。将筛选后的文献下载保存为纯文本文件, 作为后续分析的数据样本。

1.2 研究方法

文献计量分析是采用数学和统计学方法, 分析文献的外部属性, 从而描述和评估科学发展的趋势, 并预测未来发展方向的一种方法(蒋竹青等, 2021)。科学知识图谱作为文献计量学的一种技术, 以科学知识为研究对象, 通过图形展示其发展历程和结构关系, 能反映不同知识单元间的网络、结构、交叉、相互作用和演化等复杂关系(陈悦等, 2008)。CiteSpace 是美国德雷克塞尔大学陈超美基于 Java 语言开发的知识图谱软件, 主要用于对选定领域的文献进行计量分析(陈悦, 2015), 是目前最常用的文献计量统计工具之一(彭飞等, 2020)。该软件能够将繁杂的文献资料转换为可视化信息获取其发展的新兴趋势, 分析研究热点与前沿, 进而提高研究主题的针对性和效率(Chen, 2006; 何书金等, 2019; 蓝曼等, 2020)。

本文使用 OriginPro 进行年发文量统计分析, 并采用 CiteSpace 软件对 CNKI 和 WOS 数据库中极端降水相关的科学文献进行分析。节点分别设置为“Institution”、“Author”和“Keyword”, g-index 的 K 值默认为 25, 用于对研究机构、作者和热点进行可视化分析。数据处理与技术方法获取可参见图 1。

2 结果与分析

2.1 中国极端降水选题发文量变化趋势

年发文量反映了极端降水研究领域的整体发展水平和趋势。图 2 为 2004—2023 年文献发表量, 从图中可见, CNKI 和 WOS 平台上的论文发表数量总体呈上升趋势, 且自 2016 年起(图中阴影部分), 增长速度加快。其中, WOS 平台的论文数量从 2016 年的 40 篇增长到 2022 年的 170 篇, 增长超过 3 倍, 呈现快速增长的趋势。中文核心期刊发表量从 2016 年到 2022 年增长超过 1 倍, 整体呈现较平稳的增长。2018—2019 年, 中英文文献的年发文量呈现快速增长的趋势, 且自 2018 年起, WOS 平台论文发表量超过了 CNKI。这一显著增长表明, 随着气候变化及其

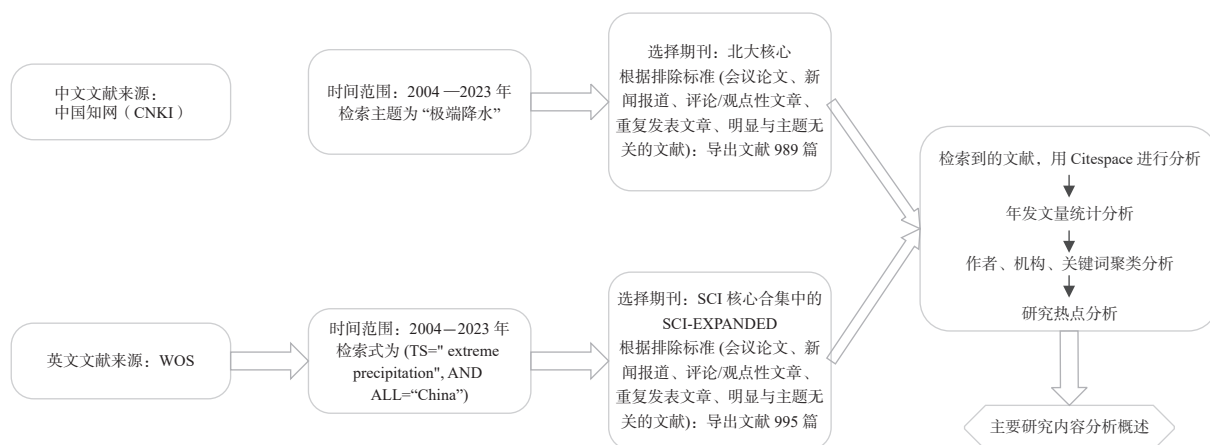


图1 2004—2023年检索主题为“极端降水”的相关论文数据处理与技术流程

Fig. 1 Data Processing and Technical Workflow of Papers Related to "Extreme Precipitation" from 2004 to 2023

对极端降水影响研究的深入, 极端降水变化趋势及其对气候变化的影响, 已成为国际学术界的研究热点。由于发文量从2016年后呈现快速增长趋势, 下文重点分析了2016—2023年(阴影部分)的文献资料。

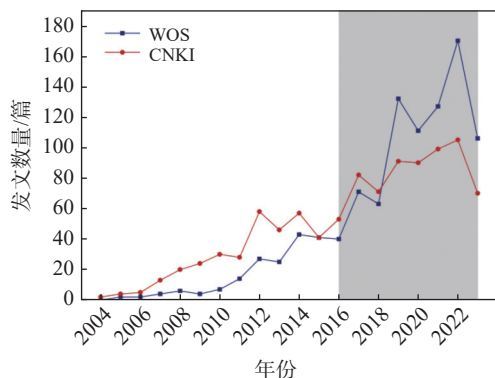


图2 2004—2023年中国极端降水领域发文量变化(阴影部分表示发文量快速增长的年份)

Fig. 2 Changes in the number of publications in the field of extreme precipitation in China during 2004-2023 (The shaded area represents the years with rapid growth in the number of publications)

2.2 主要贡献作者与机构的文献计量

文献计量通过定量分析某学科领域的文献, 客观地反映该领域的发展程度。从事科研工作的学者通常是推动学科领域发展的核心, 分析发文作者及其合作关系, 可以明晰该领域的核心研究成员及其团队, 揭示学术研究的团队效应, 有助于理解该领域的研究脉络(李前正等, 2022)。科研机构是学科领域研究的主要力量, 通过统计分析发表中国极端降水相关论文的科研机构, 可以初步了解这些机构在该领域的学术地位及活跃程度。

图3为利用CiteSpace软件绘制作者的合作关系网络图谱。可见, 该领域作者合作网络知识图谱均呈现“局部聚集, 整体分散”的特点, 中国极端降水相关领域的研究团队较多, 但团队间合作相对分散。

具体来看, 在CNKI数据库构建的作者合作网络知识图谱中, 发文量排名前三的作者分别是北京师范大学张强、南京水利科学研究院王小军、南京信息工程大学尹义星(图3a)。从合作关系与强度来看, 南京水利科学研究院王小军和中国农业大学孔锋是与外界合作较多的主要贡献学者。WOS平台发文量前面的学者分别是中山大学陈晓宏、北京师范大学张强(图3b)。北京师范大学张强和中山大学董文杰为主的团队与其他作者团队合作更紧密。

图4为基于CiteSpace软件分析各种机构之间的合作关系网络图谱。可见, WOS平台的机构间合作更为紧密。南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所、中国气象科学研究院在中文和英文期刊上的发文量和中心性均较为显著。由图4a可知, 发文量排名前三的机构分别为南京信息工程大学、河海大学、中国科学院大气物理研究所。其中南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所具有紫色外圈, 中心性较高, 表明这两个研究单位与其他机构合作密切。由于WOS数据库里中国科学院大学和中国气象局下属研究所的机构名称不统一, 部分文章未能精确到二级单位, 因此未做进一步细分。根据图4b, University of Chinese Academy of Sciences (中国科学院大学)、Nanjing University of Information Science & Technology (南京信息工程大学)、China Meteorological Administration (中国气象局)在WOS数据库中的发文量排名前三, 领先于其他机构。中国科学院大学、南京信息工程大学、中国气象局、Beijing Normal University (北京师范大学)等机构均有紫色外圈, 且中心性均不低于0.1, 表明这些机构在极端降水研究领域合作较为密切。

2.3 中国极端降水领域主要研究进展

关键词能够反映文章研究的内容, 通过对关键词进行共现与聚类分析, 可揭示中国极端降水领域

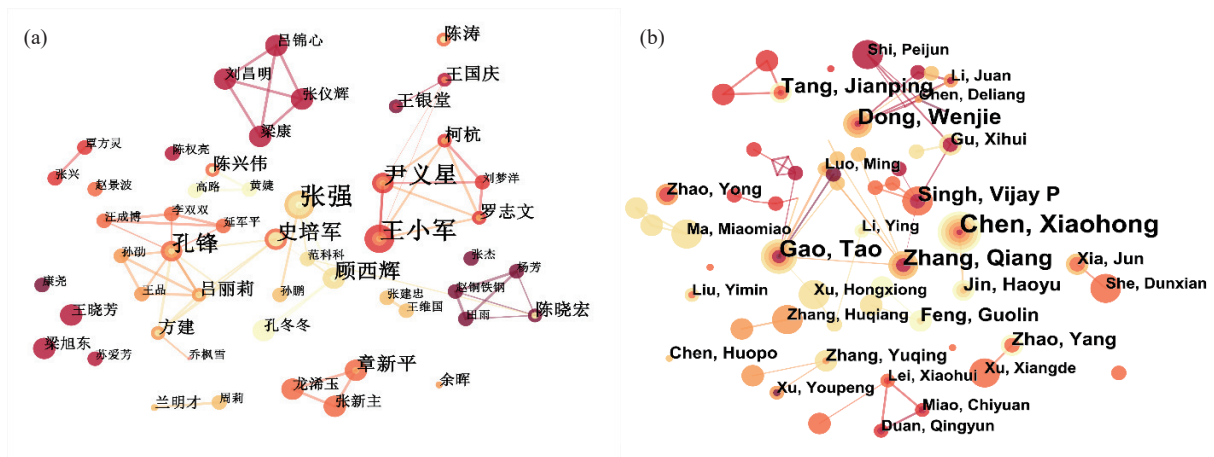


图 3 2016—2023 中国极端降水选题作者合作共现 CNKI 核心期刊 (a) 和 WOS 数据库 (b) 频次和时间 (节点大小代表频次, 节点越大表明频次越高, 下同。节点间的连线代表相互间有合作关系, 连线颜色代表初始合作的时间, 颜色黄色到紫红色渐变, 表明初始合作时间越来越晚)

Fig. 3 Frequency and temporal distribution of Co-authorship Networks in the field of extreme precipitation of China co-authored in (a) CNKI core journals and (b) WOS database during 2016-2023 (The node size represents the frequency, with the larger the node indicating the higher the frequency, the same hereinafter. The line between nodes represents mutual relationships, and the color of the line represents the time of initial cooperation. The color changing from yellow to fuchsia indicates the time of initial cooperation to be increasingly later)

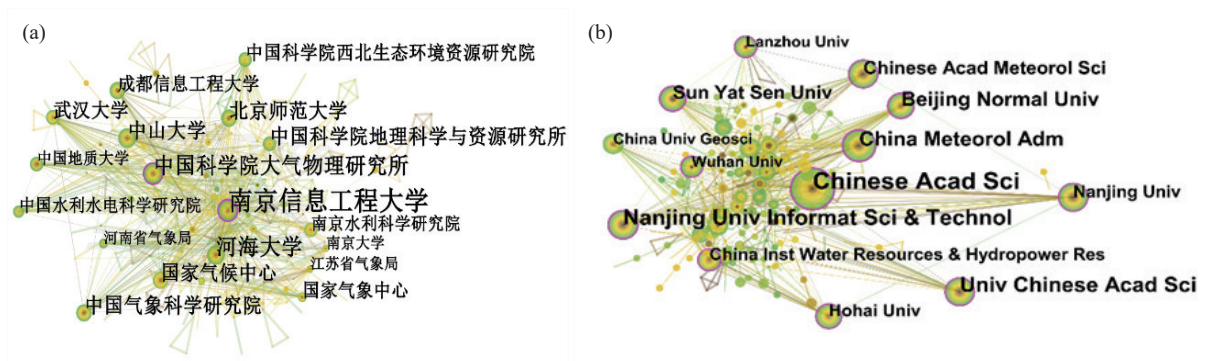


图 4 2016—2023 CNKI 核心期刊 (a) 和 WOS 数据库 (b) 中极端降水选题的主要机构共现图 (节点外包围紫色的圆圈, 表明该节点在机构合作网络中具有重要的连接能力。节点连线由棕色到绿色渐变, 表明初始合作时间越来越晚)

Fig. 4 Co-occurrence network of major institutions on the topic of extreme precipitation from (a) CNKI core journals and (b) WOS database during 2016-2023 (Nodes encircled by purple outlines indicate significant connectivity within the institutional collaboration network. The gradient of node connections from brown to green signifies progressively later initial collaboration times)

的研究热点 (何金廖等, 2023)。本文基于 CiteSpace 软件绘制了中国极端降水领域 CNKI 和 WOS 数据库的关键词聚类图谱, 如图 5 所示。

CNKI 和 WOS 数据库的聚类图谱的模块值分别为 0.64 和 0.74 (参考标准为 0.3), 平均轮廓值为 0.90 和 0.87 (参考标准为 0.7), 表明此聚类具有较高的可信度 (陈悦等, 2015)。从图 5 可以看出, CNKI 核心期刊论文的关键词形成 7 个聚类: #1 时空变化、#2 时空分布、#3 气候变化、#4 全球变暖、#5 降水、#6 空间分布、#7 极端气候。WOS 数据库中的关键词也形成了 7 个聚类: #1 Yangtze River Basin (长江流域)、#2 southwest monsoon (西南季风)、#3 spatiotemporal variation (时空变化)、#4 summer monsoon (夏季

风)、#5 precipitation extremes (极端降水)、#6 numerical simulation (数值模拟)、#7 performance evaluation (表现评估)。

根据中英文论文关键词聚类内容进行文献回顾和扩展, 结合频次较高的关键词属性, 本文将研究领域进一步划分为极端降水产品适用性评估、极端降水时空演变特征和极端降水形成机制 3 个方向。

2.3.1 极端降水产品适用性评估

当前, 许多研究采用气象站点观测数据分析极端降水时空特征, 从而揭示历史时期内极端降水事件的演变规律。该类极端降水数据由气象站布设的雨量筒或雨量计采集所得, 具有较高的准确性。然而, 降雨过程在空间上存在较大分异, 且当前复杂地

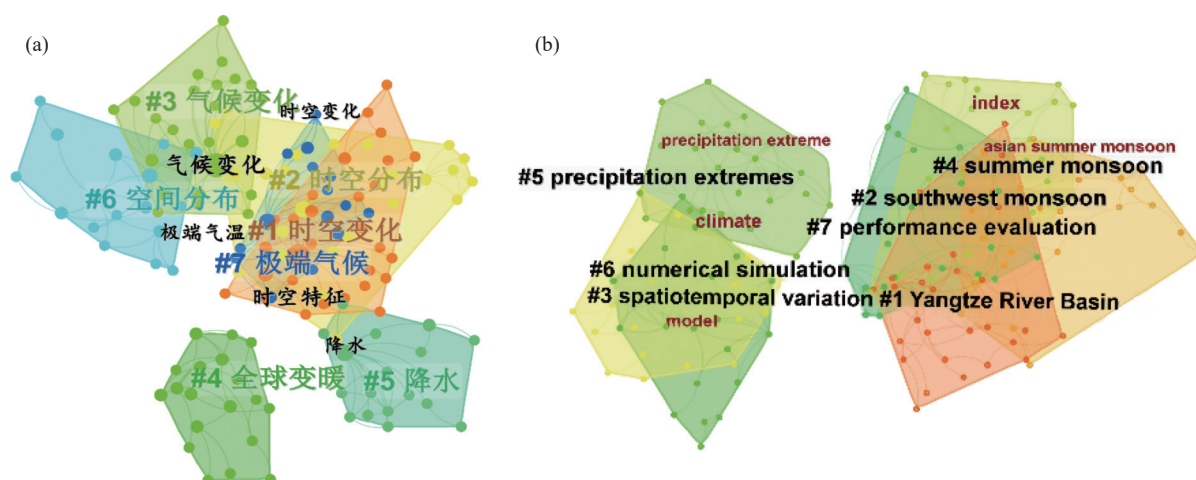


图5 2004—2023 CNKI 核心期刊 (a) 和 WOS 数据库 (b) 中极端降水研究关键词聚类图谱

Fig. 5 Keyword clustering mapping of extreme precipitation research from (a) CNKI core journals and (b) WOS database during 2004-2023

形下的气象站分布不均、站点覆盖密度有限,在空间上实现无缝实测极端降水量仍然是一项具有挑战性的任务。此外,评估极端降水通常需要超过 30 a 的观测数据,然而,由于受地形地貌影响和社会经济条件限制,不少气象站点难以满足这一数据时长要求(尹俊凯等, 2022; 成泽伦等, 2023)。随着遥感技术的飞速发展,不少研究开始聚焦卫星数据的极端降水信号捕捉能力(Prakash et al., 2016; 丁明泽等, 2022; Yu et al., 2022)。通过筛选相关文献,本文收集该方向的中英文文献共 155 篇,主要分为数据反演和模式模拟评估两大类。

徐珺等, 2022 在数据反演方面,研究者们主要利用遥感卫星探测、数据同化等方法生产降水数据集这句话改成在数据反演方面,研究者们主要利用遥感卫星探测、数据同化等方法生产降水数据集(徐珺等, 2022; Li et al., 2022; Shen et al., 2022; 于航等, 2022; 胡庆芳等, 2022)。根据使用频率的高低,本文总结出目前常用的降水数据集如表 1 所示,包括 GPM 下的 IMERGE、GSMaP、TMPA 的 3B42-V7 卫星降水产品、ECMWF 的 ERA5、ERA Interim 再分析降水数据、卫星降水产品 PERSIANN-CDR、FNL 分析资料、MSWEP 降水数据以及多源卫星降水数据 CHIRPS。基于以上数据集,国内外学者(李伶杰等, 2018; 杜懿等, 2021; Wang et al., 2021; He et al., 2021; 于航等, 2022)开展了降水量反演精度评估以及对极端降水事件捕捉能力的区域适用性研究。例如,丁明泽等(2022)在对中国区域内极端降水指标和反演精度研究中发现,总体上 IMERG 的表现优于 GSMaP 数据。Zhang 等(2019)对广州的案例研究表明, GPM 准实时降水产品在监测极端强降水的精度仍有不足。总体而言,不同数据集的空间分辨率差异较大,数据误差也存在明显的区域特征。受地形、降水强

度和反演算法等因素的影响,基于遥感数据和 AI 技术的高时空分辨率降水产品研制成为未来极端降水数据反演研究中的难点。

由于复杂地形、东亚季风、人口分布等因素,中国地区易受全球变暖的影响,对极端降水事件未来变化进行准确预估至关重要(Wu et al., 2016; 向竣文等, 2021)。气候模式是预测未来气候变化的主要工具(刘博等, 2023)。目前气候预测主要依赖全球气候模式(GCM),但由于其空间分辨率通常为几百公里,因此在模拟区域气候时常产生较大的误差。为了生成高分辨率气候情景,通常采用在 GCM 的大网格中嵌套子模式,利用区域气候模型(RCM)对 GCM 进行降尺度处理(吕哲敏等, 2016)。表 2 为“中国极端降水”研究中高频使用的气候模式,按照出现频率从高到低排列是 CMIP 系列、WRF 模式、RegCM4 模式和 PRECIS 模式。值得注意的是,研究较多地集中在 CMIP5 和 CMIP6, 分别有 22 和 31 篇文献。国内外众多学者基于这些开展模式对极端降水模拟能力的评估(Wu and Huang, 2016; Tian et al., 2018; 徐同等, 2019; Zhu et al., 2020; Tang et al., 2020; Dong et al., 2021; 王予等, 2021; 向竣文等, 2021; Gao et al., 2022a; Zhao et al., 2022b; Gao et al., 2022; 刘博等, 2023; Qin et al., 2023)。例如, Zhu 等(2020)对 CMIP5 和 CMIP6 模式进行了比较,结果表明 CMIP6 在对流参数化方案和云物理方面的改进,对中国南方降水预估的显著改进提供了部分解释。由于我国地形复杂多样,研究者可综合利用区域气候模式和高分辨率全球气候模式,通过耦合多模态方法,降低极端降水预测的不确定性。

2.3.2 极端降水时空演变特征

作为水循环的关键组成部分以及大气环流中最活跃的变量,降水的时空分布为天气和气候研究、水

表 1 2016—2023 年基于 CNKI 核心期刊和 WOS 数据库的“中国极端降水”研究高频使用数据

Table 1 High-frequency use of data for the study of "Extreme precipitation in China" during 2016-2023

数据名称	数据介绍	使用频次
GPM降水产品 (IMERGE、GSMaP)	IMERG时间范围: 2014年3月至今, 覆盖范围: 全球, 时间分辨率0.5 h, 空间分辨率0.1°; GSMaP时间范围: 2014年3月起, 覆盖范围: 60°N—60°S, 时间分辨率1 h, 空间分辨率0.1° (Ning et al., 2017)	35
TRMM (TMPA的 3B42-V7卫星降水产品)	非实时TMPA 3B42-V7时间范围: 1998年1月至今(王兆礼等, 2017), 覆盖范围: 50°N—50°S, 空间分辨率0.25°, 时间分辨率3 h (Zhang et al., 2021; Yu et al., 2019; Nie et al., 2020)	23
ECMWF再分析降水数据 (ERA5, ERA Interim)	ERA5 (第五代)时间范围: 1950年1月至今(王新志和陈发源, 2023), 空间范围: 全球, 时间分 辨率1 h, 空间分辨率0.25° (姚飞等, 2022; An et al., 2023; 牛怡莹等, 2023); ERA Interim (第四 代)时间范围: 1979年1月至今, 空间范围: 全球, 时间分辨率为6 h, 空间分辨率为0.75° (Bucchignani et al., 2017; Wan et al., 2021; 胡增运等, 2013)	16
卫星降水产品 PERSIANN-CDR	PERSIANN-CDR时间范围: 1983年至今, 空间范围: 60°S—60°N, 时间分辨率3 h, 空间分辨率0.25° (于航等, 2022)	13
融合降水产品CMORPH	CMORPH, 时间范围1998年至今, 空间范围: 60°S—60°N (Lin et al., 2022; Su et al., 2017), 时间分辨率3 h, 空间分辨率0.25°	11
NCEP的FNL分析资料	FNL分析资料时间范围: 1999年7月至今, 垂直层为26层, 该资料每日4次, 分别为00、06、 12和18时(世界时), 水平分辨率为1.0° (约100 km) (陈红, 2017; Huang et al., 2018; 程胡华等, 2019)	8
MSWEP降水数据	MSWEP是卫星、雷达和地面数据融合的降水数据, 时间范围: 1979年1月至今, 空间范围: 全 球, 空间和时间分辨率为0.1°和3 h (尹俊凯等, 2022)	7
CHIRPS	CHIRPS是地面降雨观测和基于卫星的红外冷云持续时间测量结合的产品, 时间范围1981年 1月至今, 空间范围: 50°S—50°N, 时间分辨率1 d, 空间分辨率0.05°和0.25° (Du et al., 2022)	5

表 2 2016—2023 年基于 CNKI 核心期刊和 WOS 数据库的“中国极端降水”研究高频使用模式介绍

Table 2 High-frequency usage patterns for the "Extreme Precipitation in China" study during 2016-2023

模式名称	模式网站	频次
CMIP系列模式(周天军等, 2019) (CMIP5, CMIP6)	https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/ ; http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/	53
WRF(孙晨等, 2022; Gao et al., 2020) (包括CWRF)	https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model	19
RegCM4模式(陈颖等, 2022)	http://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/	12
PRECIS模式	https://www.metoffice.gov.uk/research/applied/international/precis	7

资源管理和其他相关应用提供了重要的信息 (Fang et al., 2019)。分析极端降水的时空变化规律, 进而预测未来极端降水的变化趋势, 对于我国应对气候变化和灾害天气应急风险管理措施具有重要意义。中国的极端降水事件在时间上具有明显的区域性和次区域性特征 (孔锋等, 2019)。不少研究 (Shi et al., 2018; Peng et al., 2018; 郑小华等, 2019; Wang et al., 2020; 杨军勇等, 2021; 白大勇等, 2022; 陈琦等, 2022; 商守卫等, 2023; 贺晓露, 2023) 对区域极端降水事件的时空演变特征进行了深入探讨。连续 5 日最大降水量 (Rx5day)、强降水量 (R95p) 等极端降水指数被广泛用于时间趋势、突变和周期分析, 常见的方法主

要包括 Mann-Kendall 趋势检验法、Morlet 小波变换法 Hurst 指数等。相关研究结果普遍显示, 中国极端降水事件的发生频率呈逐渐增加趋势, 并且存在较强的空间差异性, 城镇化地区更易发生强度更大的极端降水 (Shi et al., 2018; Peng et al., 2018; 黄国如等, 2021)。此外, 部分研究还关注极端降水时空变化规律的时间尺度效应问题, 小时、日、月、年等不同时间尺度上的极端降水时空变化特征具有显著差异 (邓彪等, 2022; 周北平等, 2016)。

在未来研究中, 综合地形特征、时间尺度、局地环流等多种影响因素开展精细时空尺度上的极端降水时空演变研究是趋势之一。

2.3.3 极端降水形成机制

极端降水事件形成机制较为复杂,其影响因素众多,厘清其发生发展规律和过程对于极端降水及其引发的山洪、泥石流等次生灾害的预测预报都十分关键(张灵等, 2022)。本文对 2016—2023 年间中国极端降水成因方面的文献开展分析后发现,极端降水事件的成因可分为自然和人为因素两大类。

自然因素主要包括水汽输送、大尺度环流和陆面过程等。例如,水汽能改变极端降水的时空分布,充足的水汽输送为大范围强降水提供了有利条件(方浩等, 2019)。西太平洋副热带高压和东亚西风急流等大气环流对水汽输送具有重要影响。此外,厄尔尼诺(ENSO)对我国极端降水有调节作用,在 ENSO 事件发生年和次年,长江中下游区域性极端降水事件增多(张辛等, 2023)。大尺度环流与区域极端降水密切相关,还受海陆热力性质、气温等因素影响(陈金明等, 2016; Zhao et al., 2019; 常军等, 2022; Fang et al., 2023)。这些自然因素相互作用,共同影响极端降水事件的发生过程。

人为因素主要包括温室气体、气溶胶排放和城市化进程等。温室气体排放通过加剧地表蒸发,增加大气的保水能力,及加快区域水循环,造成部分区域降水增多(孔锋等, 2017)。人为气溶胶通过动力作用来调控季风环流的变化,从而影响极端降水(周天军等, 2021; Guo et al., 2023)。城市化进程则通过增强城市热岛效应和大气垂直混合,导致边界层变厚、逆温层减弱,改变下垫面条件,促进对流发展,从而有利于极端降水的发生(Gu et al., 2019; Huang et al., 2022)。总体上看,对自然成因的研究主要集中于大尺度分析,而对人为成因的研究更侧重于局地尺度。在下一步研究中,将自然、人为因素相结合并在区域研究中提升结果的一致性,对于科学理解区域极端降水事件的发生发展机制及其制定防灾减灾规划是至关重要的。

3 结论与展望

本文基于 2004—2023 年间中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)两个平台上的文献资料,对中国极端降水的研究产出情况、研究力量分布和研究热点方向进行了系统梳理。主要结论如下:

(1) 从总体论文发表情况来看,2004—2023 年中国极端降水领域中英文期刊的发文量持续增长,尤其自 2018 年起,英文论文发表量超过了中文论文。这一趋势表明极端降水正迅速成为国际学界研究的研究热点。

(2) 北京师范大学张强、南京水利科学研究院王小军、南京信息工程大学尹义星、中山大学陈晓宏以及菏泽学院高涛等是中国极端降水领域的主要贡献学者,其中张强和王小军团队与其他团队的合作更为密切。此外,南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所以及中国气象科学研究院等的科研机构是该领域研究的主力军。

(3) 研究热点主要集中于中国极端降水产品适用性评估、时空演变特征以及形成机制三个方面。考虑到极端降水形成机制的复杂性,融合时空高精度降水数据集和高分辨率气候模式进行多模态耦合分析,对于精确预估极端降水变化、理解其成因及制定防灾减灾措施至关重要。

综上,中国极端降水相关研究已取得显著进展,并积累了丰富的学术成果。然而,相关研究在地形复杂地区气象资料覆盖度、气候模式和模型的极端降水捕捉能力与极端降水形成机制的理论认知等方面仍有待进一步提升。基于极端降水机制科学认知、多源数据产品深度融合与 AI 技术加持下的气象大模型等开展极端降水时空高精度监测与评估是本领域未来研究的主要趋势之一。

参考文献(References):

- 白大勇,曹喬,张勇.2022.近 60 年青海省极端降水时空分布特征分析[J]. *人民长江*,53(10):59–64. Bai D Y, Cao J, Zhang Y. 2022. Characterization of spatial and temporal distribution of extreme precipitation in Qinghai Province over the past 60 years [J]. *Yangtze River*, 53(10):59–64 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.10.009
- 陈红.2017.长江中下游夏季极端降水事件频次的统计降尺度模拟与预估[J]. *长江流域资源与环境*,26(5):771–777. Chen H. 2017. Statistical downscaling simulation and prediction of the frequency of summer extreme precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,26(5):771–777 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj201705015
- 陈金明,陆桂华,吴志勇,等.2016.1960—2009 年中国夏季极端降水事件与气温的变化及其环流特征[J]. *高原气象*,35(3):675–684. Chen J M, Lu G H, Wu Z Y, et al. 2016. Change properties of summer extreme precipitation events and temperature and associated large-scale circulation in China during 1960–2009 [J]. *Plateau Meteorology*, 35(3):675–684 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000.0534.2015.00072
- 陈琦,毛方杰,杜华强,等.2022.中国亚热带极端降水时空演变及其对潜在净初级生产力的影响[J]. *生态学杂志*,41(11):2117–2127. Chen Q, Mao F J, Du H Q, et al. 2022. Spatiotemporal variations of subtropical extreme precipitation and its influence on potential net primary productivity in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 41(11):2117–2127 (in Chinese). doi:10.13292/j.1000-4890.202210.015

- 陈颖,张冬峰,王林,等.2022. RegCM4 对华北区域 21 世纪气候变化预估研究[J]. *干旱气象*,40(1):1-10. Chen Y, Zhang D F, Wang L, et al. 2022. Estimation of climate change in the 21st century in North China by RegCM4 [J]. *Journal of Arid Meteorology*,40(1):1-10 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-01-0001
- 陈悦,陈超美,刘则渊,等.2015. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*,33(2):242-253. Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, et al. 2015. Methodological functions of CiteSpace knowledge graph [J]. *Studies in Science of Science*,33(2):242-253 (in Chinese). doi:10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009
- 陈悦,刘则渊,陈劲,等.2008.科学知识图谱的发展历程[J]. *科学学研究*,33(3):449-460. Chen Y, Liu Z Y, Chen J, et al. 2008. The development of scientific knowledge graph [J]. *Studies in Science of Science*,33(3):449-460 (in Chinese). doi:10.16192/j.cnki.1003-2053.2008.03.025
- 常军,王君,吴璐,等.2022.黄河流域夏季 6—8 月极端强降水的主要环流型[J]. *暴雨灾害*,41(5):536-543. Chang J, Wang J, Wu L, et al. 2022. Characteristics of the synoptic conditions of summer extreme heavy precipitation in the Yellow River Basin [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(5):536-543 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-028
- 成泽伦,谢作威,布和朝鲁,等.2023.中南半岛和华南地区极端降水时空特征[J]. *大气科学*,47(4):957-974. Cheng Z L, Xie Z W, Bueh C H, et al. 2023. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in the Indochina Peninsula and South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,47(4):957-974 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21120
- 程胡华,王益柏,闻斌,等.2019.基于 NCEP FNL 资料的山西岚岚地区雨雪天气诊断可信度分析[J]. *气象与环境学报*,35(2):23-31. Cheng H H, Wang Y B, Wen B, et al. 2019. Confidence analysis of rainy and snowy weather diagnosis in Kelan, Shanxi province based on NCEP FNL data [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,35(2):23-31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2019.02.004
- 邓彪,王春学,孙蕊,等.2022.四川省近 10 年极端小时降水时空分布特征[J]. *高原山地气象研究*,42(4):115-120. Deng B, Wang C X, Sun R, et al. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme hourly precipitation in Sichuan Province in recent 10 years [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,42(4):115-120 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2022.04.016
- 丁一汇.2024.东亚旱涝事件驱动因素的新视角[J]. *中国科学:地球科学*,54(12):4005-4007. Ding Y H. 2024. New insights on driving factors of East Asian droughts and floods [J]. *Science China Earth-Sciences*,54(12):3957-3959 (in Chinese). doi:10.1360/N072024-0191
- 丁明泽,雍斌,杨泽康.2022.全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的极端降水监测潜力研究[J]. *遥感学报*,26(4):657-671. Ding M Z, Yong B, Yang Z K. 2022. Extreme precipitation monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of Global Precipitation Measurement (GPM) mission [J]. *National Remote Sensing Bulletin*,26(4):657-671 (in Chinese). doi:10.11834/jrs.20220240
- 杜懿,王大洋,张智,等.2021. GPM IMERG 降水产品在珠江流域的适用性分析[J]. *水文*,41(6):1-6. Du Y, Wang D Y, Zhang Z, et al. 2021. Applicability analysis of GPM IMERG precipitation products in the Pearl River Basin [J]. *Journal of China Hydrology*,41(6):1-6 (in Chinese). doi:10.19797/j.cnki.1000-0852.20200318
- 方浩,乔云亭.2019.中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景[J]. *热带气象学报*,35(4):517-527. Fang H, Qiao Y T. 2019. Spatial and temporal distribution of extreme summer precipitation and circulation background in eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,35(4):517-527 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.047
- 甘露,刘睿,冀琴,等.2021.四川省极端降水事件时空演变特征[J]. *山地学报*,39(1):10-24. Gan L, Liu R, Ji Q, et al. 2021. Spatio-temporal evolution characteristics analysis of extreme precipitation in Sichuan province, China [J]. *Mountain Research*,39(1):10-24 (in Chinese). doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.000572
- 高涛,谢立安.2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. *地球科学进展*,29(5):577-589. Gao T, Xie L. 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. *Advances in Earth Science*,29(5):577-589 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.05.0577
- 何金廖,汪明峰,席广亮,等.2023.数字化转型背景下中国网络信息地理研究进展与展望[J]. *热带地理*,43(4):567-580. He J L, Wang M F, Xi G L, et al. 2023. Research progress and prospects of Chinese cybergeography against the background of the digital transition [J]. *Tropical Geography*,43(4):567-580 (in Chinese). doi:10.13284/j.cnki.rddl.003667
- 何书金,刘昌明,袁振杰.2019.从《地理学报》创刊 85 年载文审视中国地理学发展特征[J]. *地理学报*,74(11):2209-2229. He S J, Liu C M, Yuan Z J. 2019. Examining the development characteristics of Chinese geography from the articles contained in the 85th year of the founding of the Acta Geographica Sinica [J]. *Acta Geographica Sinica*,74(11):2209-2229 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201911002
- 贺晓露,郝元甲,祁海霞,等.2023.湖北“8·12”极端降水特征及成因初探[J]. *暴雨灾害*,42(1):13-23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al. 2023. Analysis of characteristics and causes of “8.12” extreme precipitation in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(1):13-23 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-109
- 胡庆芳,张野,李伶杰,等.2022. GPM 近实时反演数据对河南省 2021 年“7·20”极端暴雨的比较分析[J]. *水科学进展*,33(4):567-580. Hu Q F, Zhang Y, Li L J, et al. 2022. Comparative analysis of GPM near-real-time inversion data for the “7-20” extreme rainstorm in Henan Province in 2021 [J]. *Advances in Water Science*,33(4):567-580 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.005
- 胡增运,倪勇勇,邵华,等.2013. CFSR、ERA-Interim 和 MERRA 降水资料在中亚地区的适用性[J]. *干旱区地理*,36(4):700-708. Hu Z Y, Ni Y Y, Shao H, et al. 2013. Applicability of CFSR, ERA-Interim and MERRA precipitation data in Central Asia [J]. *Arid land Geography*,36(4):700-708 (in Chinese). doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.04.011
- 黄国如,陈易偲,姚芝军.2021.高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. *水科学进展*,32(2):161-170. Huang G R, Chen Y S, Yao Z J. 2021. Spatial and temporal evolution of extreme rainfall in the Pearl River Delta region under the background of high urbanization [J]. *Advances in Water Science*,32(2):161-170 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.001
- 蒋竹青,彭辉.2021.基于文献计量学分析土壤氮素矿化研究进展[J]. *土*

- 壤通报,52(4):975-987. Jiang Z Q, Peng H. 2021. Review on the progress of soil nitrogen mineralization based on bibliometrics analysis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,52(4):975-987 (in Chinese). doi:10.19336/j.cnki.trtb.2020102101
- 景丞,姜彤,王艳君,等. 2016. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. 气象学报,74(4):572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al. 2016. A Study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China [J]. *Journal of Meteorology*,74(4):572-582 (in Chinese). doi:10.1676/qxb.2016.037
- 孔锋,史培军,方建,等. 2017. 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,32(2):165-174. Kong F, Shi P J, Fang J, et al. 2017. Advances and prospects of spatio-temporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change [J]. *Journal of Catastrophology*,32(2):165-174 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.029
- 孔锋,方建,乔枫雪,等. 2019. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征 (1961~2013 年)[J]. 长江流域资源与环境,28(12):3051-3067. Kong F, Fang J, Qiao F X, et al. 2019. Perspective on the spatial and temporal characteristics of hourly extreme precipitation intensity and frequency in China (1961-2013) [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,28(12):3051-3067 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj201912024
- 孔锋,孙劭. 2021. 基于 SSPs 的未来全球陆地极端降水强度的空间分异特征预估[J]. 灾害学,36(4): 107-112,118. Kong F, Sun S. Prediction of spatially differentiated characteristics of future global extreme precipitation intensity over land based on SSPs [J]. *Journal of Catastrophology*,36(4):107-112,118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.018
- 蓝曼,林爱文,金添,等. 2020. 中国自然资源核算评估研究知识图谱量化分析[J]. 资源科学,42(4):621-635. Lan M, Lin A W, Jin T, et al. 2020. Quantitative analysis of knowledge maps of natural resources accounting and assessment research in China based on CiteSpace [J]. *Resources Science*,42(4):621-635 (in Chinese). doi:10.18402/resci.2020.04.03
- 李伶杰,胡庆芳,黄勇,等. 2018. 近实时卫星降水数据对南京“20170610”极端性强降水过程的监测分析[J]. 高原气象,37(3):806-814. Li L J, Hu Q F, Huang Y, et al. 2018. Monitoring and analysis of the extreme heavy rainfall process on June 10, 2017 in Nanjing using five near real time satellite rainfall estimations [J]. *Plateau Meteorology*, 37(3):806-814 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00080
- 李前正,易斯倚,武俊梅,等. 2022. 基于 CNKI 数据库的人工湿地文献计量分析[J]. 水生态学杂志,43(3):63-69. Li Q Z, Yi S Y, Wu J M, et al. 2022. Bibliometric analysis of artificial wetlands based on CNKI database [J]. *Journal of Hydroecology*,43(3):63-69 (in Chinese). doi:10.15928/j.1674-3075.202010100289
- 梁丰,刘丹丹,王婉昭,等. 2016. 1961-2013 年东北地区夏季极端降水事件变化特征[J]. 干旱区地理,39(3):565-572. Liang F, Liu D D, Wang W Z, et al. 2016. Characterizing the change of extreme summer precipitation events in Northeast China from 1961 to 2013 [J]. *Arid Land Geography*,39(3):565-572 (in Chinese). doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.013
- 刘博,陈活泼,华维. 2023. 基于 RegCM4 模式的我国西南地区极端降水变化预估研究[J]. 大气科学学报,46(2):180-192. Liu B, Chen H P, Hua W. 2023. Future changes in precipitation extremes over Southwest China based on RegCM4 model simulations [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,46(2):180-192 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220927005
- 吕哲敏,李志,李京京,等. 2016. 区域气候模式 (PRECIS) 对黄土高原降水模拟能力的评估[J]. 生态学报,36(20):6618-6627. Lu Z M, Li Z, Li J J, et al. 2016. Verifying the applicability of PRECIS-simulated precipitation on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*,36(20): 6618-6627 (in Chinese). doi:10.5846/stxb201504170788
- 牛怡堂,李春兰,王军,等. 2023. 内蒙古 ERA5 再分析降水数据性能评估与极端降水时空特征分析[J]. 干旱区地理,46(9):1418-1431. Niu Y Y, Li C L, Wang J, et al. 2023. Performance assessment of ERA5 reanalyzed precipitation data and spatial and temporal characterization of extreme precipitation in Inner Mongolia [J]. *Arid Land Geography*,46(9):1418-1431 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2022.607
- 潘欣,尹义星,王小军. 2017. 1960-2010 年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势[J]. 长江流域资源与环境,26(3):436-444. Pan X, Yin Y X, Wang X J. 2017. Spatial and temporal evolution and future trends of extreme precipitation in the Yangtze River Basin from 1960 to 2010 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,26(3): 436-444 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj201703014
- 彭飞,富宁宁,胡伟,等. 2020. 国内外海洋资源研究知识图谱解析及启示[J]. 资源科学,42(11):2047-2061. Peng F, Fu N N, Hu W, et al. 2020. Analysis and enlightenment of knowledge map of marine resources research at home and abroad [J]. *Resources Science*,42(11): 2047-2061 (in Chinese). doi:10.18402/resci.2020.11.01
- 商守卫,王磊之,王银堂,等. 2023. 1960-2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,39(3):195-204. Shang S W, Wang L Z, Wang Y T, et al. 2023. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019 [J]. *Water Resources Protection*,39(3):195-204 (in Chinese). doi:10.3880/j.issn.10046933.2023.03.024
- 史培军,孔锋,方佳毅. 2014. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. 地理科学,34(11):1281-1290. Shi P J, Kong F, Fang J Y. 2014. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall [J]. *Scientia Geographica Sinica*,34(11):1281-1290 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs.2014.11.001
- 史培军. 2024. 大力提升对全球变化系统性风险防控的能力[J]. 中国减灾, (1):14-15. Shi P J. 2024. Vigorously improving the ability to prevent and control systemic risks of global change [J]. *China Journal of Disaster Reduction*, (1):14-15 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002-4549.2024.01.006
- 孙晨,汪方,周月华,等. 2022. CWRf 模式对长江流域极端降水气候事件的模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展,18(1):44-57. Sun C, Wang F, Zhou Y H, et al. 2022. An assessment on extreme precipitation events in Yangtze River basin as simulated by CWRf regional climate model [J]. *Climate Change Research*,18(1):44-57 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.132
- 王新志,陈发源. 2023. FY-4A GIIRS 数据与 ERA5 再分析资料融合的中国区域大气加权平均温度模型[J]. 测绘学报,52(6):904-916. Wang X Z, Chen F Y. 2023. Using FY-4AGIIRS data and ERA5 reanalysis data to build a regional atmospheric weighted mean temperature

- model in China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(6): 904–916 (in Chinese). doi:10.11947/AGCS.2023.20210717
- 王予, 李惠心, 王会军, 等. 2021. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. *气象学报*, 79(3):369–386.
- Wang Y, Li H X, Wang H J, et al. 2021. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):369–386 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.031
- 王兆礼, 钟睿达, 陈家超, 等. 2017. TMPA 卫星遥感降水数据产品在中国大陆的干旱效用评估[J]. *农业工程学报*, 33(19):163–170. Wang Z L, Zhong R D, Chen J C, et al. 2017. Evaluation of drought utility assessment of TMPA satellite-remote-sensing-based precipitation product in mainland China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(19):163–170 (in Chinese). doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.021
- 向峻文, 张利平, 邓瑶, 等. 2021. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 54(1):46–57, 81. Xiang J W, Zhang L P, Deng Y, et al. 2021. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 54(1):46–57, 81 (in Chinese). doi:10.14188/j.1671-8844.2021-01-007
- 徐珺, 李如梦, 张庆红, 等. 2022. 从大尺度环流解读河南“21·7”特大暴雨事件的极端性[J]. *中国科学: 地球科学*, 52(10):1873–1886. Xu J, Li R M, Zhang Q H, et al. 2022. Interpretation of the extremity of the “21·7” rainstorm event in Henan from the large-scale circulation [J]. *Science China Earth Sciences*, 65(10):1847–1860 (in Chinese). doi:10.1360/N072022-0025
- 徐同, 杨玉华, 李佳, 等. 2019. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. *气象*, 45(8):1065–1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al. 2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in southwest China [J]. *Meteorological Monthly*, 45(8):1065–1074 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.003
- 薛媛, 薛晓萍. 2022. 极端降水与干旱同步频发的研究进展[J]. *海洋气象学报*, 42(1):61–73. Xue Y, Xue X P. 2022. Research advances in simultaneous frequency of extreme precipitation and drought [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 42(1):61–73 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.007
- 姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. 2022. ERA5 再分析降水数据在长江三角洲的性能评估[J]. *水土保持学报*, 36(4):178–189. Yao F, Yang X Q, Liu M J, et al. 2022. Performance evaluation of ERA5 reanalysis precipitation data in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(4):178–189 (in Chinese). doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.04.02.023
- 姚俊强, 曾勇, 李建刚, 等. 2020. 中亚区域干湿及极端降水研究综述[J]. *气象科技进展*, 10(4):7–14. Yao J Q, Zeng Y, Li J G, et al. 2020. A review of regional wet and dry and extreme precipitation in Central Asia [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 10(4): 7–14 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.002
- 杨军勇, 苏爱芳. 2021. 河南省暖季小时极端降水时空分布特征[J]. *暴雨灾害*, 40(2):153–159. Yang J Y, SU A F. 2021. Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(2):153–159 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.006
- 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等. 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. *暴雨灾害*, 42(5):508–520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(5):508–520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-187
- 尹俊凯, 李国芳, 王路, 等. 2022. MSWEP 降水数据在信江流域极端降水估算中的应用[J]. *水电能源科学*, 40(7):1–4. Yin J K, Li G F, Wang L, et al. 2022. Application of MSWEP precipitation data in estimating extreme precipitation in the Xinjiang River Basin [J]. *Water Resources and Power*, 40(7):1–4 (in Chinese). doi:10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20211773
- 于航, 杨娜, 张叶晖. 2022. 基于 PERSIANN-CDR 产品的淮河流域极端降水的反演性能评估[J]. *水电能源科学*, 40(10):1–4, 9. Yu H, Yang N, Zhang Y H. 2022. Evaluation of inversion performance of extreme precipitation in Huaihe River basin based on PERSIANN-CDR product [J]. *Water Resources and Power*, 40(10):1–4, 9 (in Chinese). doi:10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212592
- 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[J]. *地理学报*, (S1):1–10. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the Second half of the 20th Century [J]. *Acta Geographica Sinica*, (S1):1–10 (in Chinese). doi:10.11821/xb20037s001
- 翟盘茂, 李蕾, 周伯铨, 等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*, 27(5):631–640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al. 2016. Research progress on persistent extreme precipitation and forecasting methods in the Jianghuai Basin [J]. *Journal of Applied Meteorological science*, 27(5):631–640 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20160511
- 张灵, 熊开国, 周悦. 2022. 湖北夏季日极端降水事件的气候特征及环流分型[J]. *长江流域资源与环境*, 31(6):1393–1401. Zhang L, Xiong K G, Zhou Y. 2022. Climatic characteristics and circulation patterns of daily extreme precipitation events in Hubei [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 31(6):1393–1401 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj202206019
- 张辛, 张凌云. 2023. 我国极端降水时空分布及大气环流背景研究进展[J]. *气象研究与应用*, 44(4):70–77. Zhang X, Zhang L Y. 2023. Progress in the study of spatio-temporal distribution of extreme precipitation and its atmospheric circulation background in China [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 44(4):70–77 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.11
- 周北平, 史建桥, 李少魁, 等. 2016. 近 53 年长三角地区极端降水时空变化分析[J]. *长江科学院院报*, 33(9):5–9. Zhou B P, Shi J Q, Li S K, et al. 2016. Spatio-temporal variations of extreme precipitation in the Yangtze river Delta during 1960–2012 [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 33(9):5–9 (in Chinese). doi:10.11988/cjkyb.20150639
- 周天军, 任俐文, 张文霞. 2021. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 51(10):1637–1649. Zhou T J, Ren L W, Zhang W X. 2021. Anthropogenic influence on extreme Meiyu rainfall in 2020 and its future risk [J]. *Science China Earth Sciences*, 64(10):1633–1644 (in Chinese). doi:10.1360/SSTe-2020-0325
- 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6)

- 评述[J]. *气候变化研究进展*, 15(5):445–456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L. 2019. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 15(5): 445–456 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2019.193
- 郑小华, 娄盼星, 刘环, 等. 2019. 陕西极端降水时空变化特征研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 13(4):9–16. Zheng X H, Lou P X, Liu H, et al. 2019. Characterization of spatial and temporal variability of extreme precipitation in Shaanxi [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 13(4):9–16 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.04.002
- An P, Li Y, Ye W, et al. 2023. How well does weather research and forecasting (WRF) model simulate storm rashmi (2008) itself and its associated extreme precipitation over the Tibetan Plateau at the same time? [J]. *Atmosphere*, 14(10):1479. doi:10.3390/atmos14101479
- Bucchignani E, Zollo A L, Cattaneo L, et al. 2017. Extreme weather events over China: assessment of COSMO - CLM simulations and future scenarios [J]. *International Journal of Climatology*, 37(3): 1578–1594. doi:10.1002/joc.4798
- Chen C. 2006. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3): 359–377. doi:10.1002/asi.20317
- Du Y, Wang D G, Zhu J X, et al. 2022. Intercomparison of multiple high-resolution precipitation products over China: Climatology and extremes [J]. *Atmospheric Research*, 278:106342. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106342
- Dong T, Dong W. 2021. Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models [J]. *Climate Dynamics*, 57(7):1751–1769. doi:10.1007/s00382-021-05773-1
- Fang H, Qiao Y, Jian M. 2023. Dynamic and thermodynamic causes of summer extreme precipitation over South China [J]. *Atmospheric Research*, 293:106894. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106894
- Fang J, Yang W, Luan Y, et al. 2019. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China [J]. *Atmospheric Research*, 223:24–38. doi:10.1016/j.atmosres.2019.03.001
- Gao L, Wei J, Lei X, et al. 2022a. Simulation of an extreme precipitation event using ensemble-based WRF model in the southeastern coastal region of China [J]. *Atmosphere*, 13(2):194. doi:10.3390/atmos13020194
- Gao S. 2020. Dynamical downscaling of surface air temperature and precipitation using RegCM4 and WRF over China [J]. *Climate Dynamics*, 55(5-6):1283–1302. doi:10.1007/s00382-020-05326-y
- Gao S, Huang D, Du N, et al. 2022b. WRF ensemble dynamical downscaling of precipitation over China using different cumulus convective schemes [J]. *Atmospheric Research*, 271:106116. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106116
- Gu X, Ye L, Xin Q, et al. 2022. Extreme precipitation in China: A review on statistical methods and applications [J]. *Advances in Water Resources*, 163:104144. doi:10.1016/j.advwatres.2022.104144
- Gu X, Zhang Q, Li J, et al. 2019. Impact of urbanization on nonstationarity of annual and seasonal precipitation extremes in China [J]. *Journal of Hydrology*, 575:638–655. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.070
- Guo Y, Dong B, Zhu J. 2023. Anthropogenic impacts on changes in summer extreme precipitation over China during 1961–2014: roles of greenhouse gases and anthropogenic aerosols [J]. *Climate Dynamics*, 60(9):2633–2643. doi:10.1007/s00382-022-06453-4
- He Q, Yang J, Chen H, et al. 2021. Evaluation of extreme precipitation based on three long-term gridded products over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 13(15):3010. doi:10.3390/rs13153010
- Huang D, Gao S. 2018. Impact of different reanalysis data on WRF dynamical downscaling over China [J]. *Atmospheric Research*, 200: 25–35. doi:10.1016/j.atmosres.2017.09.017
- Huang X, Wang D, Ziegler A D, et al. 2022. Influence of urbanization on hourly extreme precipitation over China [J]. *Environmental Research Letters*, 17(4):044010. doi:10.1088/1748-9326/ac59a6
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers[M]/IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Li Y, Pang B, Ren M, et al. 2022. Evaluation of performance of three satellite-derived precipitation products in capturing extreme precipitation events over Beijing, China [J]. *Remote Sensing*, 14(11): 2698. doi:10.3390/rs14112698
- Lin Z, Yao X, Du J, et al. 2022. Refined evaluation of satellite precipitation products against rain gauge observations along the Sichuan-Tibet railway [J]. *Journal of Meteorological Research*, 36(5): 779–797. doi:10.1007/s13351-022-1226-z
- Madsen H, Lawrence D, Lang M, et al. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 519:3634–3650. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.003
- Nie Y, Sun J. 2020. Evaluation of High-Resolution Precipitation Products over Southwest China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 21(11): 2691–2712. doi:10.1175/JHM-D-20-0045.1
- Ning S, Song F, Udmale P, et al. 2017. Error analysis and evaluation of the latest GSDMap and IMERG precipitation products over eastern China [J]. *Advances in Meteorology*, (1):1803492. doi:10.1155/2017/1803492
- Peng Y, Zhao X, Wu D, et al. 2018. Spatiotemporal variability in extreme precipitation in China from observations and projections [J]. *Water*, 10(8):1089. doi:10.3390/w10081089
- Prakash S, Mitra A K, Pai D S, et al. 2016. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? [J] *Advances in Water Resources*, 88: 1–7. doi:10.1016/j.advwatres.2015.11.008
- Qin P, Xie Z, Jia B, et al. 2023. Performance of regional climate model RegCM4 with a hydrostatic or non - hydrostatic dynamic core at simulating precipitation extremes in China [J]. *International Journal of Climatology*, 43(15):7152–7169. doi:10.1002/joc.8257
- Shen L, Wen J, Zhang Y, et al. 2022. Performance evaluation of ERA5 extreme precipitation in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmosphere*, 13(9):1416. doi:10.3390/atmos13091416
- Shi J, Wei P, Cui L, et al. 2018. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in East China from 1961 to 2015 [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(5):377–390. doi:10.1127/metz/2018/0849
- Su J, Lu H, Wang J, et al. 2017. Evaluating the applicability of four latest satellite-gauge combined precipitation estimates for extreme precipitation and streamflow predictions over the upper Yellow River Basins in China [J]. *Remote Sensing*, 9(11):1176. doi:10.3390/

- rs9111176
- Tang X L, Lyu X, Zhang Y W. 2020. Estimation of future extreme precipitation changes in Xinjiang based on RegCM4.4 simulations [J]. *Natural Hazards*,102(1):201–218. doi:10.1007/s11069-020-03920-1
- Tian L, Jin J, Wu P, et al. 2018. High-resolution simulations of mean and extreme precipitation with WRF for the soil-erosive Loess Plateau [J]. *Climate Dynamics*,54(7-8):3489–3506. doi:10.1007/s00382-020-05178-6
- Wan Y, Chen J, Xie P, et al. 2021. Evaluation of climate model simulations in representing the precipitation non - stationarity by considering observational uncertainties [J]. *International Journal of Climatology*,41(3):1952–1969. doi:10.1002/joc.6940
- Wang Q, Xia J, She D, et al. 2021. Assessment of four latest long-term satellite-based precipitation products in capturing the extreme precipitation and streamflow across a humid region of southern China [J]. *Atmospheric Research*,257:105554. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105554
- Wang T, Tang G. 2020. Spatial variability and linkage between extreme convections and extreme precipitation revealed by 22 - Year Space - Borne precipitation radar data [J]. *Geophysical Research Letters*,47(12):e2020GL088437. doi:10.1029/2020GL088437
- Wu C, Huang G. 2016. Projection of climate extremes in the Zhujiang River basin using a regional climate model [J]. *International Journal of Climatology*,36(3):1184–1196. doi:10.1002/joc.4412
- Wu Y, Wu S Y, Wen J, et al. 2016. Future changes in mean and extreme monsoon precipitation in the middle and lower Yangtze River Basin, China, in the CMIP5 Models [J]. *Journal of Hydrometeorology*,17(11):2785–2797. doi:10.1175/JHM-D-16-0033.1
- Yu J, Liu Y, Ma T, et al. 2019. Impact of surface potential vorticity density forcing over the Tibetan Plateau on the south China extreme precipitation in January 2008. Part II: Numerical Simulation [J]. *Journal of Meteorological Research*,33(3):416–432. doi:10.1007/s13351-019-8606-z
- Yu L, Leng G, Python A. 2022. A comprehensive validation for GPM IMERG precipitation products to detect extremes and drought over mainland China [J]. *Weather and Climate Extremes*,36:100458. doi:10.1016/j.wace.2022.100458
- Zhang A, Xiao L, Min C, et al. 2019. Evaluation of latest GPM-Era high-resolution satellite precipitation products during the May 2017 Guangdong extreme rainfall event [J]. *Atmospheric Research*,216:76–85. doi:10.1016/j.atmosres.2018.09.018
- Zhang T, Yang Y, Dong Z, et al. 2021. A multiscale assessment of three satellite precipitation products (TRMM, CMORPH, and PERSIANN) in the three gorges reservoir area in China [J]. *Advances in Meteorology*,1(1):9979216. doi:10.1155/2021/9979216
- Zhao Y, Xu X, Li J, et al. 2019. The large - scale circulation patterns responsible for extreme precipitation over the north China plain in midsummer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,124(23):12794–12809. doi:10.1029/2019JD030583
- Zhao Y P, Yang K, Wang C H. 2022. Impacts of cumulus parameterizations on extreme precipitation simulation in Semi-Arid region: A case study in northwest China [J]. *Atmosphere*,13(9):1464. doi:10.3390/atmos13091464
- Zhu H, Jiang Z, Li J, et al. 2020. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J] *Advances in Atmospheric Sciences*,37(10):1119–1132. doi:10.1007/s00376-020-9289-1

(责任编辑 闵爱荣)