

极端气候事件的观测、模拟与预测综述

程 鑫

成都信息工程大学 四川成都

【摘要】极端气候事件是指发生概率极低但影响巨大的气象异常现象，包括极端降水、干旱、高温、寒潮、风暴等。这些事件不仅对自然生态系统造成严重影响，还对农业生产、水资源管理、城市基础设施及社会经济安全带来显著威胁。随着全球气候变化的加剧，极端事件的频率和强度呈现上升趋势，科学监测、精确模拟及可靠预测已成为应对气候风险的重要手段。近年来，观测技术不断进步，卫星遥感、地面气象站网络及再分析数据提供了高分辨率、长时间序列的数据支持；同时，全球和区域气候模式的发展，使得对极端事件的形成机制、时空演变及未来趋势的研究更加深入。统计学方法、动力学模式及人工智能技术的结合，为极端事件预测提供了新的思路。本文综述了极端气候事件的观测方法、模拟技术及预测手段，分析了不同研究方法的优势与局限，并讨论了极端事件对生态系统、农业、城市环境及社会经济的综合影响。最后，提出了未来研究的关键方向，包括多源数据融合、多模式集合预报及跨学科协同研究，以期科学决策和风险管理提供理论依据和技术支撑。

【关键词】极端气候事件；观测；模拟；预测；气候变化

【收稿日期】2024 年 11 月 14 日 **【出刊日期】**2024 年 12 月 18 日

【DOI】10.12208/j.jesr.20240003

A review of observation, simulation, and prediction of extreme climate events

Xin Cheng

Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan

【Abstract】Extreme weather events refer to meteorological anomalies with extremely low probability but great impact, including extreme precipitation, drought, high temperature, cold wave, storm, etc. These events not only have a serious impact on natural ecosystems, but also pose a significant threat to agricultural production, water resources management, urban infrastructure and social and economic security. With the aggravation of global climate change, the frequency and intensity of extreme events show an upward trend. Scientific monitoring, accurate simulation and reliable prediction have become important means to deal with climate risks. In recent years, observation technology has been continuously improved, satellite remote sensing, ground weather station network and reanalysis data provide high-resolution, long-time series data support; at the same time, the development of global and regional climate models makes the formation mechanism, spatio-temporal evolution and future trends of extreme events more in-depth research. The combination of statistical methods, dynamic models and artificial intelligence technology provides new ideas for extreme event prediction. This paper summarizes the observation methods, simulation techniques and prediction methods of extreme weather events, analyzes the advantages and limitations of different research methods, and discusses the comprehensive effects of extreme weather events on ecosystems, agriculture, urban environment and social economy. Finally, the key directions of future research, including multi-source data fusion, multi-model ensemble forecasting and interdisciplinary collaborative research, are proposed to provide theoretical basis and technical support for scientific decision-making and risk management.

【Keywords】Extreme weather events; Observation; Simulation; Prediction; Climate change

1 引言

1.1 极端气候事件的定义与分类

极端气候事件是指在特定时间和空间尺度上出现的超出历史统计分布范围的气象异常现象,通常具有低概率、高强度和显著破坏性的特征。在印度,极端降雨事件频发,对农业生产和社会经济造成严重影响。中国西南地区的极端气候指数研究表明,该地区高温和暴雨事件的频率呈上升趋势。土壤湿度是干湿事件演变的重要指标,其异常变化可导致长期干旱或湿涝事件。嘉陵江流域的研究显示,极端气候事件在空间和时间上具有明显的异质性,其频率和强度随气候变化而改变。青海湖流域的水资源对极端气候事件高度敏感,降水和蒸发异常对流域水平衡产生重大影响。

1.2 极端事件对农业与生态的影响

极端天气事件对粮食生产和生态系统有直接影响。亚洲中高纬度植被对极端气候的响应显著,其生产力和生长周期均会受到影响。东亚冬季风变化对区域气候模式和极端事件的模拟提供了重要参考。中国极端天气事件的时空变化研究表明,未来几十年内高温和干旱事件可能进一步增加。冬油菜物候和产量对气候变化和极端事件非常敏感,其适应性管理策略对于保障粮食安全至关重要。城市环境中的香樟光合特性研究表明,高温和干旱事件对城市植被生长及碳循环有明显影响。

1.3 模式评估与未来预测

基于CMIP6模式的复合极端事件研究提供了中国未来极端事件趋势的科学依据。全球范围内,快速归因分析已被用于解释2021年太平洋沿岸极端热浪的形成机制。黄河流域极端事件的模式优选研究提高了区域预测精度。渭河流域基于WRF模式的降水模拟研究为极端降水预测提供了技术支持。东部地区极端气候变化及青藏高原加热作用的研究显示,高原地形对区域气候模式具有显著调制作用。陆地生态系统总初级生产力对极端事件的响应表明,生态系统碳通量受到气候异常的显著影响。小兴安岭地表物候特征对极端事件的响应研究揭示了季节性气候变化对植被生长的重要作用。

1.4 水资源与区域响应

黄河三角洲湿地生态系统CO₂交换对水位变化敏感,极端降水和干旱事件对湿地碳循环产生直接

影响。对流允许尺度下东部中国未来极端降水变化的研究显示,局地强降水事件可能增强。华北地区极端气候事件对农作物生长的影响表明,区域农业生产受气候风险的显著制约。青藏高原多模式模拟评估显示,该地区极端事件模拟能力在模式选择上存在差异。巴基斯坦极端气候指数的观测、模拟和投影研究揭示了南亚地区气候变化的潜在风险。

1.5 社会感知与应对

北部俄罗斯公众对气候变化的感知研究显示,社会认知在适应策略中具有关键作用。公众对极端事件的感知不仅影响地方管理政策,也决定了社区应对能力和灾害风险管理的效率。

1.6 研究挑战与目标

尽管已有大量研究,但极端事件的观测、模拟和预测仍面临诸多挑战:观测数据在空间和时间上存在不连续性和稀疏性;模式在模拟极端事件时存在系统偏差;复合极端事件和跨学科综合评估仍缺乏系统研究。未来研究应重点关注多源数据融合、多模式集合预报及AI和大数据技术在极端事件分析中的应用。本文旨在系统综述极端气候事件的观测方法、模拟技术及预测手段,分析其优势与局限,讨论对生态、农业、城市及水资源的综合影响,并提出未来研究方向。

2 气候模拟方法

气候模拟是极端气候事件研究的重要工具,通过数值模式可以再现气候系统的物理过程、分析事件形成机制,并预测未来极端事件的可能趋势。模拟方法包括全球气候模式、区域气候模式、土地-大气耦合模式以及其他多尺度模拟技术。合理选择和应用模拟方法,不仅有助于理解极端事件发生的物理机理,也为政策制定和风险管理提供科学依据。本节将从模式分类、模式原理、模式配置、极端事件指标、模式验证及应用案例几个方面详细介绍。

2.1 全球气候模式(GCM)

全球气候模式(Global Climate Model, GCM)是研究气候系统长期变化和大尺度环流的重要工具。GCM通常基于三维大气和海洋流体动力学方程,结合辐射、云物理、降水、地表和海洋过程,能够模拟地球气候系统的整体演变。GCM输出包括温度、降水、风速、湿度、辐射通量等关键气象要素,可以用于评估极端事件的历史趋势和未来变化。全球气候

模式（GCM）是研究大尺度环流和极端事件长期趋势的重要工具，其在印度极端降雨事件研究中的应用揭示了区域气候响应的复杂性^[1]。

GCM 在极端事件研究中的优势主要体现在其覆盖范围广、物理过程完整，并能够提供从过去到未来的连续模拟结果。通过多模式集合方法，可以降低单一模式的不确定性，提高极端事件模拟的可靠性。GCM 也为区域气候模式提供边界条件，是区域模拟和预测的基础。模式评估至关重要，例如对中国西南地区极端气候指数的评估与预估研究，为判断 GCM 在复杂地形区域的模拟性能提供了依据^[2]。

然而，GCM 存在空间分辨率较低的问题，通常为几十到上百公里，这使得对局地强降水、城市热岛效应及复杂地形的极端事件再现能力有限。因此，GCM 常与区域气候模式结合，以获得更精细的空间信息。

2.2 区域气候模式（RCM）

区域气候模式（Regional Climate Model, RCM）是对特定区域气候进行高分辨率模拟的工具。RCM 通过在较小区内嵌套 GCM 边界条件，可以提供 1~10 公里级的高分辨率输出，从而更好地捕捉地形、海陆分布以及局地环流对极端事件的调制作用。

RCM 能够模拟强降水、局地干旱、高温热浪及寒潮的空间分布和时间演变。其应用包括流域水资源管理、农业气象服务和城市气候适应策略。RCM 可通过多模式集合方法增强模拟的稳健性，同时支持极端事件指标的计算，如年最大日降水量、连续干旱天数或极端高温日数。

RCM 的配置通常包括区域网格划分、物理参数化方案选择、边界条件输入及初始场设置。高分辨率的 RCM 输出为极端事件的预估和短期气候服务提供重要参考。

2.3 土地-大气耦合模式

土地-大气耦合模式（Land-Atmosphere Coupled Model）强调地表过程与大气过程的相互作用。在极端事件研究中，土壤湿度、植被覆盖、地表径流和蒸散作用对干旱、高温及暴雨事件的形成具有关键影响。耦合模式通过动态模拟地表能量和水分通量，能够再现极端事件的局地演变过程，并分析生态系统响应。土地-大气耦合模式特别关注地表过程，基于土壤湿度的极端干湿事件演变研究突显了土壤水

分异常在驱动和加剧干旱或洪涝事件中的关键反馈作用^[3]。

例如，在干旱事件模拟中，土壤水分的减少会反馈影响地表温度和蒸散量，进而加剧高温和水分胁迫。耦合模式可以量化这种反馈效应，为区域农业管理和生态系统适应策略提供科学依据。耦合模式还可与 RCM 和 GCM 结合，形成多尺度模拟体系，提高模拟极端事件的精度。

2.4 模拟极端事件指标与方法

极端事件模拟需要使用标准化指标来量化事件的强度、频率和持续时间。常用指标包括：日最大降水量、年极端高温日数、连续干旱天数、热浪持续时间及极端风速等。在区域尺度上，对嘉陵江流域极端气候事件时空演变特征的研究，展示了如何利用极端事件指标来揭示气候变化条件下局地事件的异质性^[4]。这些指标可基于原始气象要素直接计算，或者通过重采样、统计分析得到。

在模拟中，极端事件指标的应用包括：

（1）历史事件再现，通过模式输出验证模式的再现能力；

（2）未来趋势分析，通过多模式集合预测评估极端事件的变化趋势；

（3）不确定性分析，通过敏感性实验或参数扰动量化模拟结果的置信区间。

此外，统计下采样方法和偏差校正技术常用于 GCM 或 RCM 模拟结果的精细化处理，以提高局地极端事件模拟的准确性。

2.5 模式验证与不确定性分析

模式验证是确保模拟结果可靠性的关键环节。验证方法包括：

（1）与地面观测或再分析数据对比，检验温度、降水及风速等要素的时空分布一致性；

（2）极端事件指标对比，如模拟年最大日降水量与观测年值的偏差；

（3）多模式集合分析，通过统计方法量化模式间的不确定性。

不确定性主要来源于模式结构、物理参数化方案、初始条件和边界条件等。通过多模式集合和情景分析，可识别模拟结果的稳健性，并为预测提供概率信息。

2.6 模拟应用案例

在实际应用中, GCM 和 RCM 已被广泛用于极端事件研究。全球模式用于分析大尺度环流变化对极端降水和热浪的驱动机制; 区域模式用于预测局地洪涝、干旱及高温事件; 耦合模式用于评估土壤湿度、植被覆盖及水文反馈对极端事件的影响。模拟结果可为农业生产调度、水资源管理、城市热浪防护和生态系统保护提供科学依据。模拟的最终目的是服务于应用, 例如, 通过定量评估模型分析极端气候事件对青海湖流域水资源的影响, 可为脆弱生态区的水资源管理提供科学依据^[5]。

此外, 多模式输出和高分辨率模拟可支持灾害风险评估、应急管理和长期适应策略制定。例如, 通过模拟未来几十年的极端降水和高温趋势, 可规划防洪工程布局、农作物种植调整和城市绿地设计, 实现科学防灾和气候适应。综合来看, 理解极端事件对农业的影响是模拟应用的核心方向之一, 极端天气事件对粮食生产的影响研究强调了进行此类影响评估的必要性^[6]。

2.7 小结

气候模拟方法在极端气候事件研究中发挥核心作用。全球气候模式提供大尺度长期趋势分析, 区域气候模式提供高分辨率局地模拟, 土地-大气耦合模式揭示地表反馈机制。区域气候模式 (RCM) 可提供更精细的模拟, 亚洲中高纬植被对极端气候的响应研究即利用了 RCM 来评估生态系统对气候胁迫的敏感性^[7]。通过指标计算、模式验证及多模式集合分析, 可定量评估极端事件的时空特征和未来变化趋势。模拟方法不仅有助于理解极端事件形成机制, 也为预测和决策提供科学基础。对特定气候系统模式的评估与改进是提升模拟能力的基础, 例如对 FGOALS-g3 模式模拟东亚冬季风性能的分析, 有助于提高对相关极端冷事件的预测能力^[8]。随着高分辨率计算能力的提升和数据同化技术的发展, 气候模拟在极端事件研究中的精度和应用价值将进一步增强。综合来看, 理解极端事件对农业的影响是模拟应用的核心方向之一, 极端天气事件对粮食生产的影响研究强调了进行此类影响评估的必要性^[6]。

3 极端事件预测与预估

极端气候事件预测是气候科学与灾害管理的重要研究方向, 其核心目标是提前识别潜在极端事件的发生、强度、持续时间及空间分布, 为减灾和应对

提供科学依据。预测方法主要包括统计方法和动力学方法, 也可结合多源数据和人工智能技术提高预测精度。本节将从预测方法分类、统计预测、动力学预测、预测指标与评价、不确定性分析及应用案例几个方面展开讨论。

3.1 预测方法分类

极端事件预测方法可分为统计预测和动力学预测两大类。统计预测基于历史观测数据, 通过分析事件频率、持续时间及强度等特征, 建立经验模型预测未来事件。可靠的预测始于对历史规律的准确把握, 对中国极端天气事件时空变化及未来趋势的预估研究, 为统计预测方法提供了重要的背景场和变化基准^[9]。其优点是方法简单、计算量低, 但受限于历史样本和事件可重复性, 难以应对气候非线性变化。动力学预测基于数值模式, 通过模拟大气、海洋及陆地系统物理过程, 预测未来气候状态和极端事件。动力学预测能够反映物理机制, 但受模式不确定性和初始条件误差影响。

此外, 统计与动力学方法可以融合形成混合预测方法, 例如通过统计模型校正动力学模式输出, 或者利用人工智能方法结合模式输出和观测数据进行预测。这类方法能够兼顾物理过程解释能力和数据驱动精度。

3.2 统计预测方法

统计预测方法主要通过历史观测数据建立数学模型或经验公式, 常用方法包括回归分析、时间序列分析、极值理论及概率分布拟合。极端事件通常以概率密度函数和累积分布函数描述, 通过拟合极值分布可以估计事件发生的频率和强度。在农业气象领域, 统计预测方法应用广泛, 例如研究气候变化与极端事件对冬油菜物候和产量的影响, 可为农业适应性种植提供预测依据^[10]。例如, 极端降水事件可通过 Gumbel 分布或广义极值分布进行预测, 得到百年一遇、五十年一遇等指标。干旱事件预测常基于标准化降水指数 (SPI) 或降水-蒸发指数 (PDSI) 的统计模型, 结合历史变化趋势预测未来干旱概率。

时间序列分析则利用历史序列的自相关性和季节性特征预测近期事件。近年来, 人工智能方法如机器学习和深度学习在统计预测中得到应用, 通过模式识别和非线性拟合提高预测精度。例如, 随机

森林、支持向量机和长短期记忆网络（LSTM）可对极端高温或暴雨事件进行短期预测，适用于小时到日尺度的预警。

3.3 动力学预测方法

动力学预测方法基于数值模式模拟大气、海洋及陆地系统的演变过程。全球和区域气候模式在预测未来极端事件中发挥重要作用。模式通过求解流体动力学方程、热力学方程及水循环过程方程，预测未来几天至几十年的气候状态和极端事件概率。

短期预测通常依赖区域气候模式和高分辨率数值天气预报模式，可提供日尺度或小时尺度的极端事件信息，如暴雨路径、高温热浪持续时间等。长期预测基于 GCM 或 RCM 的情景模拟，结合多模式集合方法评估未来几十年极端事件的趋势和可能变化范围。动力学预测的优点是能够反映物理机理，适合分析异常天气形成原因及跨尺度传递过程。

3.4 预测指标与评价方法

极端事件预测需要量化指标以评估事件的发生概率、强度和空间分布。常用指标包括：

- 日最大降水量或持续降水量
- 极端高温或低温日数
- 连续干旱天数或湿润天数
- 风暴强度和持续时间
- 热浪或寒潮持续日数

预测精度评价方法包括：

- 统计误差指标，如均方根误差（RMSE）、偏差（Bias）和相关系数
- 概率指标，如命中率（Hit Rate）、虚警率（False Alarm Rate）和威力指数（Threat Score）
- 空间评价指标，通过空间重叠率和格点比较评估预测事件的地理一致性

通过这些指标可以定量评估预测方法的性能，并进行模型优化或方法改进。

3.5 预测不确定性及其处理

预测不确定性主要来源于以下几个方面：

（1）模式结构不确定性：不同模式在物理参数化、网格分辨率和边界条件上存在差异，导致预测结果差异明显；

（2）初始条件不确定性：观测数据的不完整性和初始场误差会影响短期预测精度；

（3）情景假设不确定性：长期预测依赖温室气

体排放情景、土地利用变化等假设，不同情景会产生不同预测结果；

（4）数据处理和指标选择：数据插值、极值指标定义及统计方法的差异也会影响预测结果。

处理不确定性的方法包括多模式集合预测、初始条件扰动实验和统计校正。多模式集合方法通过组合多个模式输出，降低单模式偏差，提高预测稳健性。初始条件扰动实验可评估短期预测敏感性和不确定性范围。统计校正方法通过历史误差分析和概率调整，提高预测结果的可靠性和可应用性。

3.6 极端事件预测应用案例

极端事件预测在实际应用中具有重要价值。短期预测可用于洪涝预警、城市热浪防护和农业生产调度，通过提前发布风险信息减轻灾害损失。预测的最终价值体现在应用层面，城市环境中香樟光合特性对极端高温干旱的响应研究，为城市绿地规划和林木养护应对热浪提供了生理生态学依据^[11]。长期预测可用于规划防洪设施布局、制定干旱应对策略、优化作物种植结构以及水资源管理。通过多模式集合输出和概率预测，可以为政府部门提供决策支持，降低极端事件带来的社会经济风险。

例如，在干旱事件预测中，统计方法可结合降水指数分析未来干旱发生概率，而动力学模式模拟可揭示大尺度环流异常导致干旱的机制。在高温热浪预测中，短期动力学预测可提前数天发布预警，而长期趋势分析可评估未来几十年热浪强度和频率变化，为城市规划和公共健康管理提供参考。

3.7 小结

极端事件预测是减灾和气候适应的重要工具。统计方法利用历史数据快速量化事件概率和强度，基于 CMIP6 多模式集合进行复合极端事件的未来预估，是动力学预测方法在长期气候风险评估中的典型应用^[12]。动力学方法通过数值模式揭示物理机制和趋势，快速归因分析等新方法有助于理解和减少预测的不确定性，例如对 2021 年北美极端热浪的快速归因，深化了对此类事件发生机理和预测可能性的认识^[13]。多方法结合能够提高预测精度。预测指标、评价方法和不确定性处理为科学评估提供基础。对特定流域（如黄河流域）进行气候模式优选，是提高区域极端气候变化预测可靠性的关键步骤^[14]。未来，随着数据同化、人工智能和高性能计算的发展，

极端事件预测将更加精准，为社会防灾、生态保护和农业调度提供更可靠的科学支撑。

4 极端事件影响评估

极端气候事件不仅具有显著的气象特征，还对农业生产、水资源、生态系统、城市环境及社会经济产生广泛影响。科学评估这些影响对于制定适应策略、减轻损失和保障可持续发展具有重要意义。本节将从农业、水资源、生态系统、城市环境及社会经济几个方面展开详细分析。

4.1 农业影响

农业是最直接受极端气候事件影响的部门。高温、干旱、暴雨和冰雹等事件均可能对作物生长、产量和质量产生显著影响。高温热浪可加速作物生长周期，缩短营养积累期，导致产量下降；同时，干旱事件降低土壤水分供应，使作物光合作用受限，生长受阻。高分辨率的数值模拟是精确评估极端降水对农业影响的基础，基于 WRF 模式对渭河流域极端降水的模拟研究便是一例^[15]。过量降水或暴雨可能造成作物淹水、根系损伤以及土壤养分流失，从而降低产量和品质。

不同作物对极端事件的敏感性存在差异。粮食作物如小麦、水稻和玉米在关键生育期遭遇高温或干旱，产量损失尤为显著；经济作物如油菜、棉花和果树对降水和高温的敏感性较高，但受灾影响常具有区域特征。此外，极端事件还可能影响农业病虫害的发生规律，进一步加剧生产风险。农业影响评估通常结合作物模型、气象数据和历史产量信息，通过量化产量变化和风险概率，为农业调度和灾害防控提供参考。

4.2 水资源影响

极端气候事件对水资源系统产生直接和间接影响。干旱事件可导致地表水位下降、地下水储量减少、水库蓄水能力降低，严重时甚至引发用水紧张和生态用水不足。暴雨和洪涝事件则可能引发河道超标、堤防决口和城市内涝，对水资源管理构成挑战。

流域尺度的水资源影响评估通常涉及降水-径流模型、水库调度模拟和地下水动态分析。通过模拟不同极端事件情景下的水量分布和水质变化，可以识别关键风险区域和敏感用水环节。例如，在干旱事件期间，农业用水需求与供水能力可能严重不

匹配，而洪涝事件则对城市排水系统提出高要求。科学评估有助于优化水资源配置，提高系统韧性。

4.3 生态系统影响

极端气候事件对生态系统的影响涉及物种生理、生长周期及生态功能。大尺度地形热力作用（如青藏高原加热）是影响区域极端气候的重要因子，相关研究为理解我国东部极端气候变化的成因提供了动力学解释^[16]。高温和干旱会增加植物蒸散强度，降低生物生产力，甚至导致植被死亡；暴雨和洪涝可能引发土壤侵蚀、植物倒伏及营养元素流失。评估极端气候对陆地生态系统碳循环的影响至关重要，总初级生产力（GPP）对极端气候的响应研究量化了气候变化对生态系统功能的影响程度^[17]。湿地和河流生态系统对水位波动高度敏感，干旱事件会影响湿地湿润度和碳循环，洪涝事件则可能改变栖息地结构和生物多样性。候是生态系统响应气候变化的敏感指标，小兴安岭地表物候特征对极端气候的响应研究揭示了北方森林对气候变暖的反馈机制^[18]。

极端事件还会改变生态系统的碳通量和能量平衡。湿地是碳循环的热点区域，水位变化对黄河三角洲湿地 CO₂ 交换影响的模拟研究，阐明了极端干湿事件通过改变水文条件影响生态系统碳汇功能^[19]。热浪和干旱可能抑制植被光合作用，增加呼吸作用，从而降低净初级生产力；洪涝和冰雪事件可能破坏植物覆盖层，改变地表能量通量。生态系统影响评估结合遥感数据、地面监测和生态模型，可以量化事件对生物生产力、物候特征及生态服务功能的影响，为生态保护和气候适应提供科学依据。

4.4 城市环境影响

城市是极端气候事件的高风险区域。高温热浪在城市中会加剧热岛效应，增加居民健康风险和能源消耗；暴雨和洪涝事件可能导致道路积水、交通中断和建筑物损坏；风暴和冰雹事件则对基础设施和建筑安全造成威胁。城市人口密集、硬化地表比例高，使得城市极端事件的暴露度和敏感性显著高于乡村地区。

城市影响评估通常结合气象监测、城市地理信息系统和社会调查数据，分析事件对人群健康、能源系统、交通网络和基础设施的影响。通过模拟不同极端事件场景，可优化城市规划、防洪排水系统和绿地布局，提高城市韧性。

4.5 社会经济影响

极端气候事件对社会经济的影响广泛且深远。直接经济损失包括农业减产、基础设施破坏、能源供应中断和保险赔付增加；间接影响则包括供应链中断、价格波动和社会生产活动延迟。长期频繁的极端事件还可能影响居民生活习惯、迁徙模式和区域经济发展。

社会经济影响评估通常结合损失评估模型、灾害事件数据库和经济统计数据，通过量化直接与间接损失，为风险管理和政策制定提供依据。评估结果可用于制定灾害补偿机制、优化资源配置和指导城市及区域适应策略。

4.6 综合影响评估方法

综合影响评估强调多领域、多尺度的分析，结合农业、水资源、生态、城市和社会经济数据，建立跨部门的评价体系。常用方法包括：

(1) 指标体系法，通过构建多维指标量化极端事件影响；

(2) 模型耦合法，将气象模式、作物模型、水文模型和经济模型联动模拟；

(3) 场景分析法，通过不同极端事件情景评估潜在风险和损失。

综合评估可揭示极端事件的连锁反应和跨系统影响，为决策者提供全面的信息支持。通过量化各类影响及其不确定性，可优化防灾减灾资源配置，提高社会和生态系统的韧性。

4.7 小结

极端气候事件对农业、水资源、生态系统、城市环境及社会经济均产生深远影响。在对流允许尺度下对中国东部未来极端降水变化的预估，为评估未来洪涝风险和水资源规划提供了更精细的科学依据^[20]。高温、干旱、暴雨和洪涝事件不仅影响作物生长和水资源分布，还会改变生态功能、增加城市风险并造成社会经济损失。科学、系统的影响评估结合多源数据和模型模拟，为风险识别、应急管理和长期适应提供科学依据。华北地区极端气候事件对农作物生长的影响研究，是影响评估直接服务于农业生产风险管理的典型案例^[21]。未来，随着观测和模拟技术的发展，综合评估方法将更加精细，为社会可持续发展和灾害防控提供更有有力支撑。

5 极端事件适应与减缓策略

应对极端气候事件的策略包括适应和减缓两个方面。适应策略旨在增强社会、生态和经济系统的韧性，以应对已发生或未来可能发生的极端事件；减缓策略则通过降低温室气体排放和优化资源管理，减少极端事件发生频率和强度。综合应用适应和减缓策略，可以最大程度降低极端事件的社会和生态风险。本节将从农业、城市、生态、水资源和政策层面详细分析应对措施。

5.1 农业适应策略

农业是极端事件受害最直接的部门，适应策略包括作物调控、管理优化和技术创新。制定有效的适应策略需基于可靠的模拟评估，对多模式产品在青藏高原极端气候模拟能力的评估，是制定该生态脆弱区适应策略的科学前提^[22]。

(1) 作物调控：调整作物种植结构和品种，选用耐旱、耐涝、耐高温或耐盐碱品种，可增强作物对极端事件的抵御能力。例如，在干旱多发地区种植耐旱玉米和小麦，在暴雨频发地区选用根系发达、抗涝能力强的作物。

(2) 管理优化：包括改进耕作制度、优化灌溉方案和施肥管理。合理灌溉不仅缓解干旱，还可调节土壤湿度，减轻高温对作物生长的影响；轮作和间作制度可改善土壤结构，提高抗逆能力。

(3) 技术创新：应用气象预测信息进行农事调度，如根据极端事件预警调整播种、施肥和收获时间；利用精准农业技术，如土壤湿度传感器、无人机监测和智能灌溉系统，提高资源利用效率和风险管理能力。

5.2 城市适应策略

城市适应策略主要针对高温、暴雨、洪涝和风暴等极端事件，重点在基础设施、规划和公共服务。

(1) 基础设施改造：建设高效排水系统、洪水控制设施和防风建筑，以减少城市洪涝和风暴带来的损害；推广绿色建筑材料和节能设备，缓解热岛效应。

(2) 城市规划优化：增加城市绿地、水体覆盖和透水铺装，提高地表水调蓄能力和降温效果；合理布局道路和建筑密度，改善风环境和空气流通。

(3) 公共服务与预警系统：建立完善的气象预警和应急响应系统，提供及时的热浪、暴雨和风暴警报；开展居民教育，提高应对极端事件的防范意

识和自救能力。

5.3 生态系统适应策略

生态系统适应策略旨在维持生态功能和生物多样性,提高生态系统韧性。

(1)生态保护与恢复:保护湿地、森林和草原,恢复受损生态系统,可增强水文调节能力和碳储存能力;通过河道疏浚和湿地湿润度管理,缓解洪涝和干旱风险。

(2)物种管理:选育或引入适应极端气候的本地植物和动物物种,增强生态系统自我恢复能力;监测和管理外来物种入侵,减少生态压力。

(3)生态工程:构建缓冲带、植被防护林和生态水库,提高生态系统对极端事件的缓冲能力;在城市周边建立生态廊道,增强生态连通性。

5.4 水资源适应策略

水资源管理是应对极端气候事件的核心领域。

(1)储水与调度优化:建设多功能水库和蓄水设施,合理调度水量应对干旱和洪涝;采用地下水补给和雨水收集技术,提高水资源利用效率。

(2)节水与循环利用:推广节水农业、工业和生活用水技术,实现水资源循环利用;采用再生水和雨水回用,缓解用水压力。

(3)水文风险预警:结合气象预报和水文模型,对极端干旱和洪涝事件进行预测和预警,提高水资源管理的科学性和应急响应能力。

5.5 政策与社会层面策略

政策支持和社会参与是适应与减缓策略的保障。

(1)政策制定:制定极端事件应对规划、土地利用政策、农业和水资源管理法规;建立灾害补偿机制和风险分担体系,提高社会韧性。

(2)科技支撑:推广气象监测、模式模拟和数据共享,支持科学决策;鼓励研发极端事件适应技术,如抗逆作物、智慧城市系统和生态恢复工程。

(3)公众参与与教育:开展极端气候风险教育,提高公众防范意识和自救能力;鼓励社区参与生态保护、水资源管理和灾害应对,形成全社会协同防灾体系。

5.6 综合适应与减缓策略

适应与减缓策略应综合应用,形成多层次、多领域的防控体系。农业、城市、生态和水资源策略可以相互协同,例如,通过改善土壤水分管理减少干

旱风险,同时建设蓄水设施应对洪涝;通过生态恢复缓解城市热岛效应,同时增加碳汇实现减缓目标。政策与社会层面的支持确保技术和管理措施有效落地,形成科学、系统的极端事件应对框架。在全球范围内,对巴基斯坦极端气候指数的观测、模拟和投影研究,展示了如何通过系统研究为不同国家和地区提供气候变化风险评估和适应规划参考^[23]。

未来,随着数据融合、智能预测和高性能计算的发展,适应与减缓策略将更加精准和高效。通过科学规划和技术创新,社会、经济和生态系统可以在面对频发极端事件时保持较高韧性,实现可持续发展。

5.7 小结

极端气候事件的适应与减缓策略涵盖农业调控、城市规划、生态保护、水资源管理及政策支持等多个方面。通过调整作物结构、优化管理措施、建设韧性基础设施、恢复生态系统、优化水资源调度,以及政策和公众参与,可以显著降低极端事件带来的风险和损失。综合应用适应与减缓策略,不仅增强系统韧性,还为社会可持续发展提供长期保障。未来,随着科技进步和社会协同能力提升,极端事件应对策略将更加科学、精准和高效。

6 结论与未来展望

极端气候事件的观测、模拟、预测及影响评估,是理解气候系统变化和制定科学应对策略的重要环节。本研究围绕极端气候事件的观测技术、气候模拟方法、事件预测与预估、影响评估以及适应与减缓策略进行了系统综述,揭示了当前研究的成果、存在的问题及未来发展方向。

6.1 主要结论

6.1.1 观测技术与数据发展

观测是极端事件研究的基础。现代观测技术包括地面气象站网、雷达观测、卫星遥感、再分析数据及新兴物联网和无人机观测系统。这些技术能够提供不同时间和空间尺度的气象要素信息,实现对极端降水、高温、干旱、风暴及冰雹事件的多维监测。多源数据融合和高精度观测,为极端事件特征分析、模式验证和预警系统提供了可靠支撑。

尽管观测能力持续增强,但数据覆盖不均衡、历史观测缺失以及复杂地形地区数据不足仍是主要挑战。未来,需要进一步提高数据精度、空间分辨率

及实时性，特别是加强对偏远地区和城市微气候的观测能力，以支撑多尺度研究和应用。

6.1.2 气候模拟方法与多模式应用

气候模拟是理解极端事件机制和预测未来变化的重要工具。全球气候模式提供大尺度趋势分析，区域气候模式提供高分辨率局地模拟，土地-大气耦合模式揭示地表反馈机制。通过极端事件指标计算、模式验证和多模式集合方法，可以定量评估极端事件的时空特征和变化趋势。

然而，模拟仍面临空间分辨率限制、物理参数化不确定性和边界条件误差等问题。未来，应加强高分辨率模拟、多模式耦合及数据同化技术，提高极端事件的再现能力和预测精度。

6.1.3 极端事件预测与预估

预测是实现风险预防和减灾的关键环节。统计方法利用历史数据快速量化事件概率和强度，动力学方法通过数值模式揭示物理机制和趋势。指标化评估和不确定性分析提高了预测科学性。多方法融合、人工智能应用以及高性能计算，为短期预警和长期趋势预测提供了新的途径。

尽管预测能力不断提高，但不确定性仍然存在，特别是在极端事件频率增加和非线性反馈增强的背景下。未来，需要结合大数据分析、机器学习和多源观测，提高预测的空间精度、时间提前量和概率可靠性。

6.1.4 极端事件影响评估

极端事件对农业、水资源、生态系统、城市环境和社会经济均产生广泛影响。农业受到产量下降、品质下降及病虫害变化的影响；水资源系统面临供需失衡和洪涝风险；生态系统出现生物生产力下降、栖息地破坏及碳通量变化；城市环境承受热浪、暴雨、风暴等风险；社会经济则面临直接损失与间接连锁影响。

综合影响评估强调跨领域、跨尺度分析，通过多源数据和模型耦合揭示极端事件连锁效应，为灾害管理、风险预防和适应策略制定提供科学依据。

6.1.5 适应与减缓策略

应对极端事件的策略涵盖农业调控、城市规划、生态保护、水资源管理以及政策与社会层面。农业调控包括作物结构调整、管理优化和技术创新；城市策略涵盖基础设施改造、规划优化和公共服务；

生态策略通过保护、恢复和物种管理提高系统韧性；水资源策略强调储水调度、节水技术和风险预警；政策层面通过法规制定、科技支持和公众参与保障策略落实。

综合应用适应与减缓策略，有助于增强社会和生态系统韧性，降低极端事件风险，实现可持续发展目标。

6.2 研究存在问题

尽管近年来极端事件研究取得显著进展，但仍存在若干问题：

(1) 观测数据不均衡：偏远地区和城市微气候观测数据不足，影响事件分析和模式验证。

(2) 模式模拟精度有限：高分辨率模拟计算量大，参数化方案存在不确定性。

(3) 预测不确定性高：事件频率增加和非线性反馈增强，使短期和长期预测具有显著不确定性。

(4) 影响评估方法尚不完善：跨领域综合评估模型需要进一步优化，尤其是在社会经济与生态系统耦合分析方面。

(5) 适应与减缓策略落实难度大：政策、技术和社会参与之间仍需更好衔接，实现策略科学落地。

6.3 未来发展方向

6.3.1 高精度观测与数据融合

未来应加强多源观测网络建设，包括卫星遥感、地面站、无人机及物联网传感器，提升空间分辨率和实时性。数据同化与融合技术将进一步增强极端事件监测和分析能力，为模型验证和预测提供基础。有效的适应策略必须考虑社会感知因素，北部俄罗斯公众对气候变化的感知研究提示我们，政策制定需与公众认知相结合^[24]。

6.3.2 多尺度、多模式耦合模拟

高性能计算将推动全球、区域及局地模式的耦合，实现跨尺度模拟。多模式集合和参数扰动方法可降低模拟不确定性，精细化极端事件的再现和预测。耦合土地、海洋和大气的综合模式有助于揭示非线性反馈和极端事件机制。

6.3.3 人工智能与智能预测

机器学习、深度学习和大数据分析在极端事件预测中将发挥更大作用。通过模式输出、观测数据和社会经济信息融合，构建智能预测系统，提高预警准确性和提前量，实现风险可视化和决策支持。

6.3.4 跨领域综合影响评估

未来研究需强化农业、水资源、生态系统、城市环境和社会经济的耦合分析。开发跨领域评价指标和综合模型,可量化极端事件连锁效应,指导区域规划、灾害管理和资源优化配置。

6.3.5 系统化适应与减缓策略

适应与减缓策略应综合规划,实现技术、管理和政策多层协同。结合农业、城市、生态、水资源和社会政策,构建全社会韧性体系。通过科学规划、技术创新、公众参与和政策支持,提高极端事件应对效率,实现长期可持续发展。

6.4 总结

极端气候事件研究涵盖观测、模拟、预测、影响评估和应对策略等多个方面,是气候科学和社会可持续发展的重要组成部分。高精度观测、多模式模拟、智能预测、综合影响评估以及系统化应对策略,构成了科学理解与应对极端事件的完整框架。未来,随着技术进步和数据资源丰富,极端事件研究将更加精准和高效,为风险管理、政策制定和可持续发展提供坚实的科学支撑。

通过本综述,可以清晰认识到极端事件的复杂性和多尺度特征,以及科学应对的必要性和可行性。强化观测能力、提升模拟精度、优化预测方法、完善影响评估体系和综合应用适应策略,是未来极端气候事件研究和应对的关键方向。最终,所有观测、模拟、预测和评估工作都需服务于社会应对能力的提升,公众对极端事件的感知研究是连接科学与政策、行动的重要桥梁^[25]。

在原有结论基础上,进一步强调极端气候事件研究的重要性,不仅涉及气象科学和环境科学,还与农业、生态、城市规划、水资源管理、社会经济和公共政策密切相关。极端事件的复杂性和多尺度特征要求跨学科协作,通过物理学、生态学、工程学、数据科学和社会科学的综合分析,实现对极端事件的全面理解和有效应对。

从社会应用角度看,极端事件研究不仅能够为短期灾害预警提供技术支持,还能指导长期城市规划、生态保护和区域发展策略。例如,通过预测热浪频率和洪涝风险,城市规划者可以优化绿地布局、排水系统和能源供应,降低居民健康风险;农业部门可以依据干旱和暴雨趋势调整作物结构、改进灌

溉和施肥方案,提高粮食安全保障能力。生态系统管理者则可通过保护湿地、森林和草地,提高生态缓冲能力和生物多样性,从而减轻极端事件对自然系统的冲击。

此外,极端气候事件研究为政策制定提供科学依据。政府和管理部门可以通过综合分析预测、影响评估和风险模拟结果,制定应对和减缓政策,包括灾害补偿机制、土地利用规划、能源调度以及水资源管理策略,从而增强社会整体韧性。公众教育和社区参与同样重要,通过风险意识提升和自救能力训练,能够提高社会适应能力,减少极端事件带来的直接和间接损失。

展望未来,随着高精度观测网络、智能预测系统、人工智能分析和大数据平台的发展,极端气候事件研究将更加精准、高效和可操作。跨学科协作、数据共享和模型集成将成为研究的新趋势,实现从单一学科分析向系统性、综合性应对的转变。最终,科学研究与政策决策的紧密结合,将为社会、生态系统和经济体系提供可持续发展保障,使人类在面对日益频繁和剧烈的极端气候事件时,能够从容应对、有效适应。

参考文献

- [1] Samantray P, Gouda C K. A review on the extreme rainfall studies in India[J]. Natural Hazards Research, 2024, 4(3): 347-356.
- [2] 黄丽华, 何云玲, 阮文洁. 基于CMIP6气候模式的西南地区极端气候指数评估与预估[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2024, 46(04): 686-696.
- [3] 苏韦韬. 基于土壤湿度的极端干湿事件演变和CMIP6模式评估[D]. 南京信息工程大学, 2024.
- [4] 刘柯莹. 气候变化条件下嘉陵江流域极端气候事件时空演变特征研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024.
- [5] 刘彩红. 极端气候事件对青海湖流域水资源影响的定量评估模型. 青海省, 青海省气候中心, 2024-01-08.
- [6] 施宇. 极端天气事件对粮食生产的影响及其缓解途径[D]. 西北农林科技大学, 2023.
- [7] 魏宇晨. 亚洲中高纬植被对极端气候的响应及其模拟评估[D]. 南京信息工程大学, 2023.

- [8] 毛紫怡.气候系统模式 FGOALS-g3 对东亚冬季风的模拟和预估[D].云南大学,2023.
- [9] 严一霖.中国极端天气事件的时空变化及未来趋势预估[D].成都信息工程大学,2023.
- [10] 王燕子.气候变化与极端事件对冬油菜物候和产量的影响[D].西北农林科技大学,2023.
- [11] 王雅青.城市环境中香樟光合特性对极端高温干旱的响应[D].中南林业科技大学,2023.
- [12] 牟莎.基于 CMIP6 的中国复合极端事件时空变化及未来预估[D].华中师范大学,2023.
- [13] Y. S P ,F. S K ,Jan G O V , et al. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021[J].Earth System Dynamics, 2022,13(4):1689-1713.
- [14] 荐圣淇,毛峙闻,温跃修,等. 黄河流域极端气候变化气候模式优选[J].人民黄河,2022,44(09):83-88.
- [15] 雷景春.基于 WRF 模式的渭河流域极端降水模拟研究 [D].西安理工大学,2022.
- [16] 徐浩然.基于 CWRF 对我国东部极端气候变化及青藏高原加热作用的研究[D].南京信息工程大学,2022.
- [17] 袁旻舒.陆地生态系统总初级生产力对极端气候的响应 [D].西北农林科技大学,2022.
- [18] 朱丹瑶.小兴安岭地表物候特征及其对极端气候的响应 [D].哈尔滨师范大学,2021.
- [19] 陈雅文.水位变化对黄河三角洲湿地生态系统 CO₂ 交换影响的模拟研究[D].中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所),2021.
- [20] 陆云.对流允许尺度下中国东部未来极端降水变化的预估[D].南京大学,2021.
- [21] 李彦萌,刘海鹏,张冬峰,等. 华北地区极端气候事件对农作物生长的影响研究[J].种子科技,2021,39(05):3-8.
- [22] 陈虹举,杨建平,丁永建,等. 多模式产品对青藏高原极端气候模拟能力评估[J].高原气象,2021,40(05):977-990.
- [23] Sajjad H ,Ghaffar A . Observed, simulated and projected extreme climate indices over Pakistan in changing climate[J]. Theoretical and Applied Climatology,2019, 137(1-2): 255-281.
- [24] Oleg A ,Robert O . Climate change in Northern Russia through the prism of public perception.[J]. Ambio,2019, 48(6):661-671.
- [25] Anisimov O ,Orttung R . Climate change in Northern Russia through the prism of public perception[J]. Ambio, 2018,1-11.

版权声明：©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS