

近年来，全球极端气候事件频发，如极端热浪、暴雨洪涝和严重干旱，这些现象不仅对人类的生产生活造成重大影响，也威胁到生态平衡和社会经济发展。面对这一紧迫问题，理解极端气候事件的成因机理、评估其影响效应，并探索有效的应对策略显得至关重要。究竟何为极端气候事件？它的形成原因是什么？将如何影响我们，又该如何应对？

极端气候事件的成因机理

极端气候事件是指显著偏离历史气候平均状态的异常天气现象，包括极端高温、持续性干旱、强降水、暴风雪、寒潮及热带气旋等。这类事件往往造成严重的社会经济损失和生态系统破坏，是全球气候变化研究的一个核心议题。在气象学上，极端气候事件通常采用统计学方法界定，一般将超过历史同期第95或第99百分位阈值的气象要素异常判定为极端事件。

极端气候事件的成因可归为自然驱动和人为影响两大因素。自然驱动因素不仅包括气候系统内部变率（如厄尔尼诺—南方涛动、北大西洋涛动等大尺度环流模态的变化），还包括外部自然强迫作用。例如，火山喷发通过向平流层注入气溶胶可导致全球气温短期下降，太阳活动周期变化也可能对地球气候系统异常产生调制作用。这些自然因素是通过改变辐射强迫或大气环流形态，影响极端气候事件的发生频率和强度。

与此同时，人类活动的影响日益显著。工业革命以来，温室气体浓度持续上升导致全球变暖，这直接加剧了极端高温、强降水等事件的发生概率。此外，城市化扩张和土地利用变化等地表改造过程，也在局地尺度上改变极端天气的发生特征，如城市热岛效应加剧高温事件，森林砍伐可能影响区域降水模式。

因此，现代极端气候事件是自然变率（包括内部变率和外部强迫）与人类活动共同作用的结果。理解这些驱动因素的相对贡献及其相互作用机制，对准确预测未来极端气候事件的变化趋势至关重要。

极端气候事件的影响效应

极端气候事件不仅对自然环境造成直接冲击，还通过复杂的连锁反应影响经济社会系统的稳定运行。随着全球气候变化加剧，极端天气的频率和强度持续上升，其多方面影响效应已成为各国面临的重大挑战。

对自然系统的破坏性影响。极端气候事件首先直接作用于自然生态系统。持续高温和干旱会导致森林退化、生物多样性锐减。水文系统同样会遭受冲击，暴雨引发洪水改变河流形态，而长期干旱则导致湿地萎缩、地下水位下降。土地系统方面，极端降水加剧水土流失，高温则加速土壤有机质分解。而且这些自然系统的损害往往具有不可逆性，如海温升高引起的珊瑚礁白化事件后生态系统恢复需要数十年周期。

对社会系统的复合型冲击。农业部门是受极端气候影响最严重的领域之一。全球粮食和农业信息及预警系统特别警报显示，极端天气

极端气候事件的成因、影响与应对

□ 丁一汇



丁一汇，天气与气候学家。2005年当选为中国工程院院士。国家气候中心首任主任，中国气象局气候变化特别顾问，国家气候变化专家委员会顾问。在气候变化、亚洲季风以及中国的灾害性天气等领域取得诸多重要研究成果，是国际上气候变化研究领域中有影响、有贡献的科学家之一。曾获国家科学技术进步奖一等奖、国家自然科学奖二等奖、何梁何利基金科学与技术进步奖、世界气象组织杰出工作成就奖等。

导致全球谷物产量年际波动显著加剧。公共卫生系统承受双重压力：热浪期间，心脑血管疾病的死亡风险显著上升，部分研究显示高达20%；而洪水过后，因水源污染与环境恶化，在卫生条件欠佳或疾病本已流行的地区，部分疾病的暴发风险可上升至数倍。城市基础设施在极端天气面前尤为脆弱，特别是滞后于极端降雨的城市排水系统。更深远的影响在于气候移民问题，世界银行报告指出，到2050年，全球最多可能有超过2亿的人口因气候变化影响被迫在国内迁移。

对经济系统的链式反应。极端气候事件频发对能源系统构成多重挑战。一方面，热浪期间制冷负荷激增，城市用电高峰时段负荷可增加30%至40%；另一方面，国际能源署统计显示，2022年严重干旱导致欧洲水电发电量同比下降19%，创近年来最大跌幅。保险业赔付压力显著攀升，慕尼黑再保险报告指出，2023年自然灾害造成的经济总损失约2500亿美元，保险赔付金额约950亿美元，接近历史高位。全球供应链脆弱性亦凸显：2021年2月美国德州寒潮引发多家半导体工厂因电力中断停产，进一步加剧全球半导体短缺，导致汽车产业链产线停摆与断供危机。尤为值得关注的是，气候灾害经济损失长期快速攀升。数据显示，20世纪70年代至21世纪10年代，全球极端气候直接造成的经济损失增长了约7倍；欧洲环境署报告也显示，2010年代欧洲年均损失较1990年代增长约27%。

历史演变与未来趋势

一是过去百年极端事件的变化趋势。过去一个世纪，全球范围内极端气候事件在频率和强度上总体呈现上升趋势（高置信度）。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告显示，自20世纪中叶以来，人类观测到的极端高温事件发生频率显著增加，极端低温事件则显著减少（高置信度）。多数陆地区域极端高温日数、热浪持续时间和强度均增加，且创纪录高温事件更为频繁（高置信度）。

极端降水事件整体呈增强趋势，尤其是短时强降水的频率和强度增加（高置信度），这与全球大气水汽含量增加密切相关。多个中纬度和热带区域出现百年一遇强降水事件复现频

率提高的现象，城市内涝和山洪风险随之上升。干旱的观测结果显示，尽管区域差异显著，地中海、中亚、西非和澳大利亚等干旱敏感区域的气象干旱及土壤水分减少事件频率和持续时间有所增加，对生态系统和农业构成负面影响（中等置信度）。关于热带气旋，全球总数量变化缺乏显著趋势且置信度较低，但强热带气旋（3级及以上）的比例在过去几十年内显示增加趋势（中等置信度）。另外，热带气旋的最大风速和降水强度也有增强迹象。

总体而言，过去百年全球极端高温、强降水、干旱和强热带气旋事件均表现出更频繁、更剧烈的变化趋势，气候系统的不稳定性正持续提升，对生态系统和人类活动构成越来越严峻的挑战。

二是未来极端气候事件的发展趋势。在全球气候持续变暖的背景下，极端气候事件预计将更加频繁和剧烈。IPCC第六次评估报告指出，随着全球升温水平上升，各类极端气候事件的发生概率和强度都将随之变化，部分事件呈非线性加剧态势，可能对生态系统和人类社会构成更大威胁。

极端高温事件将持续增加。由于人类活动引起的气候变化，极端高温事件的频率、强度和持续时间将在未来几十年持续增加，这一趋势在所有温室气体排放情景下均成立，且在高排放情景下更为显著（高置信度）。评估显示：与1850—1900年基准相比，当全球平均气温升高2℃时，极端高温事件的发生概率约为工业化前的数倍，同时极端高温事件的强度也将显著增强（高置信度）。在某些热带和亚热带地区，地球温度可能在本世纪内接近或超过35℃的人类生理耐受极限，尤其在高排放情景下（中等置信度，部分区域为低置信度）。城市地区由于城市热岛效应，极端高温的局地增强效应更加明显（高置信度），加之许多城市人口密集、基础设施脆弱，使得低适应能力的人口密集体和强度都更高的健康风险和能源需求压力（高置信度）。

极端降水事件增多、强度增强。全球变暖显著增强了大气的持水能力，这一变化遵循克劳修斯—克拉佩龙关系，即每升高1℃，大气可容纳的水汽量增加约7%。这一机制在未来将深刻改变极端降水事件的特征。有关报告显示，极端日降水事件的强度普遍呈现每升温1℃约增加7%的响应关系，而中高纬度地区与

季风区域（如东亚、南亚）对极端降水的增强尤为敏感（高置信度）。此外，短小时尺度的短时强降水事件潜在增强幅度可能超过日尺度，特别是在城市区域，将显著加剧内涝风险与排水系统负荷（中等至高置信度）。尽管不同气候模型对极端降水重现期的预测存在一定不确定性，但基于多模式预测结果，在高排放情景下，北半球高纬度地区原本百年一遇的极端日降水事件，其重现期可能缩短至约50年（中等置信度），意味着极端降水事件将从罕见向常态化转变。这些变化已对城市排水设计标准和山地灾害预警系统构成实质性挑战。

干旱事件范围扩大、强度增强。干旱是另一个未来需高度关注的高风险气候事件。虽然其变化存在较大区域差异，但在许多干旱易发地区，如地中海地区、南非、西南澳大利亚和美国西南部，未来几十年干旱事件的持续时间和强度预计将明显加重（中等至高置信度）。干旱包括气象干旱、农业干旱、水文干旱和生态干旱。其中，农业干旱（即土壤湿度显著下降）将在温带和副热带地区更为常见（中等置信度），直接影响粮食安全。此外，干旱频次的增加常常与极端高温事件叠加出现，两者的复合发生将进一步加剧作物产量波动、水资源紧张与生态退化（高置信度）。

热带气旋强度增加，快速增强事件可能更频繁。热带气旋（包括飓风和台风）在未来的总数量变化存在较高不确定性，但第六次评估报告指出，强热带气旋（即3级及以上飓风/台风）所占比例很可能上升。尤其在西北太平洋、大西洋和印度洋部分区域，模拟结果显示未来热带气旋的最大风速和降水强度将增强，这一结论具有中等至较高置信度。此外，部分研究表明快速增强型气旋的发生频率可能上升，尽管目前对此仍存在较大不确定性（低置信度）。这类气旋常在接近登陆前数小时内迅速加强，增加了预警与应急响应的挑战。热带气旋的降水能力也预计随气温上升而增强，风暴中心附近的降雨强度可能显著高于工业化前水平（高置信度）。

极端气候事件的“复合性”与“系统性风险”增强

IPCC第六次评估报告首次将复合极端事

现，92%的降水变化来自北大西洋（31.9%）与南海—孟加拉湾（39.3%）的外源水汽，只有8%来自本地循环。

西北地区暖湿化的影响

西北暖湿化趋势正深刻改变着区域的自然生态和人类活动格局，呈现出利弊交织的复杂特征，总体看利大于弊。气候暖湿化显著改善了西北大部分生态植被状况，促进了生态系统活力提升与水循环机制调整，主要表现为内陆河径流增加、湖泊面积增大以及高山积雪增多。这些变化不仅缓解了长期以来西北地区水资源紧张的问题，也为农业发展提供了有利条件。气候条件的优化使得农业适宜种植区扩大、作物生长发育季延长和产量增加，为西北地区粮食安全和生态经济发展注入了新动力。

暖干向暖湿的气候转型同时伴随着新的挑战。水循环加快导致早涝急转风险上升，与极端气候事件的幅度和频率增加相关的气候灾害加剧。极端高温的增强使得遭受热浪的影响更严重，极端降水的增多提高了山洪等次生自然灾害的发生概率。此外，尽管水资源总量有所增加，但暖湿化伴随蒸发加强，导致农田蒸发量加剧，水分利用效率降低，水资源调控压力加大。农业系统的不稳定性也在加剧，高温胁迫、病虫害扩散与种植结构波动可能对农作物产量构成威胁。同时，高原山地的冰川和多年冻土加速退缩，进一步增加了生态系统的脆弱性，并可能影响河流源头的长期供水稳定性。

西北暖湿化在改善生态环境、优化农业条件和增加水资源供给等方面带来了显著机遇，但也带来自然灾害风险上升、资源利用效率下降与生态脆弱性加剧等挑战。因此，应以系统思维辩证看待其影响，从生态保护、农业调适、水资源管理和灾害防控等层面同步推进应对策略，实现区域在暖湿背景下可持续发展。

西北地区暖湿化是否持续

西北地区气候变化趋势预估是制定区域适应政策和行动方案的重要科学基础。早在21世

趋势尤为明显。这一转型特征经我国著名地理学家、冰川学家，中国科学院院士施雅风等系统论证后，引起社会各界的高度关注。

西北地区暖湿化现象

暖湿和湿是大气最关键的两种气候属性，变暖通常表现为气温升高，而变湿主要体现在降水增多和蒸发减弱。西北地区的变暖现象已成为一个事实，人类活动产生的温室气体和气溶胶的增加使西北地区明显变暖，这与全球变暖的大背景相一致。学术界对西北地区暖湿化更多聚焦在变湿是否停滞以及是否存在整体“湿化”。一些研究指出，2000年左右西北地区从“变暖变湿”向“变暖变干”转变，这与同期降水和土壤水分减少、陆地储水量下降及植被生长速度下降等自然环境的变化一致。然而，也有研究认为，2000年以后西北地区“变暖变湿”趋势仍在继续，增湿趋势更加明显，且东扩明显。研究结果的不一致主要源于所选时间序列长度和空间跨度的不同以及数据来源的差异性。我国著名自然地理学家和环境变化专家、中国科学院院士陈发虎等基于温度和干旱指数等气候变量发现，暖湿区约占西北地区总面积的41%，且主要分布在西北地区西部的干旱和半干旱地区。

西北地区的变湿现象表现为“西多东少—西早东晚”的空间格局以及季节性特征。具体而言，西北西部地区呈湿润趋势，而东部呈干燥趋势，且夏季降水对西北地区湿化的贡献最大。短历时强降水和极端降水对西北地区降水量亦具有显著贡献。近年来，突发性强降水事件发生的频率和强度均有所增加。从空间分布来看，除西北地区东南部外，其余地区极端降水日数均呈增加趋势，这进一步加大了区域水资源调控和灾害风险防范的难度。总体而言，相较于21世纪初，目前西北地区的变湿幅度已较为明显，且呈现出非线性增强特征。

就气温变化而言，西北地区的增温速率远超全国乃至全球平均水平。1961—2018年间，西北地区年平均增温速率达0.32℃/10年，明显高于全国平均水平（0.23℃/10年）和全球平

均水平（0.12℃/10年）。进入21世纪后，升温趋势加剧，1995年气温发生突变后，增温倾向率提升至0.38℃/10年。从季节特征看，冬季对年均升温的贡献最大，但20世纪90年代开始，春季增温加速，成为主要变暖季节。

导致西北地区暖湿化现象的主要原因

中国气象局兰州干旱气象研究所张强研究团队通过多尺度综合分析发现，西北地区气候暖湿化趋势是多种因子协同作用的结果。研究表明，西北地区降水变化呈现显著的多尺度周期特征，当前正处于准10年、准20年和准60年等多个时间尺度降水周期同步增强的阶段。近20年来，大尺度环流系统发生了两大显著的年代际调整：一方面西风和东亚季风环流由原先的反相位转变为同相位，另一方面东亚季风和南亚夏季风环流从协同变化转为反向变化。在这种环流系统的协同演变过程中，高空急流表现出明显的北移和东扩特征，同时，南亚高压增强并逐渐东扩，西太平洋副热带高压也呈增强和西伸态势，沿副热带高压外围向西北输送更多水汽，增强了蒙古上空的反气旋异常，并导致东亚夏季风减弱，使得西北降水增加。大气垂直运动的增强提升了降水效率，也为降水增长提供了直接动力。

中国气象局国家气候中心、中国工程院院士丁一汇研究团队基于水分循环模型发现，在全球变暖的背景下，西北地区水分循环加快，冰川融水和径流增加。此外，区域灌溉扩张和水库面积增加会增强局地蒸发，进而提升大气水汽—降水转化效率，促进区域降水增加。陈发虎团队通过对比西北地区与华北地区的气候变化发现，西北地区降水显著增加主要受西风带水汽平流增强和欧亚中纬度遥相关波列动力抬升的共同影响。此外，西北地区湿润化趋势存在显著的区域差异。西北西部变湿主要由春季和秋季降水增加驱动，而东部则更多受夏季季风系统的调控。值得注意的是，升温导致西北地区降水形态发生变化，雨雪比例的变化导致融雪径流减少。张强团队通过水汽溯源发

件列为重点关注对象，明确在全球变暖背景下，这类事件的发生频率与强度呈显著上升趋势（高置信度）。所谓复合极端事件，是指两种及以上极端气候事件在时间或空间上重叠、相互作用，或连续发生——例如热浪与干旱同步出现、强降水后伴随风暴雨潮，或是多个极端事件连续冲击同一地区。报告指出，这类事件增多可能突破传统单一灾害管理体系，导致农业、能源、公共卫生、交通等关键基础设施及社会系统联动失效，进而引发系统性风险（中等置信度）。而系统性气候风险不仅是损失的叠加，更体现为不同社会—生态系统间的相互作用、反馈及放大效应（中等置信度），这对未来气候适应与减缓策略形成了多层次、多部门的挑战。

应对极端气候事件的路径

在极端气候事件日益频发的背景下，全球需从“减缓—适应—治理”三大维度统筹应对，构建更具韧性的气候安全体系。

减缓策略。遏制极端事件加剧的根本在于控制温室气体会排放。依据《巴黎协定》目标，即到本世纪末，把全球平均气温较工业化前水平上升幅度控制在2℃以内，并努力控制在1.5℃以内。实现这一目标需各国制定并执行强化的国家自主贡献，推动能源系统低碳转型以及碳定价机制等有效实施。同时，以自然为本的解决方案日益受到重视。这类策略通过恢复森林、湿地与沿海生态系统，提升碳汇能力并增强生态缓冲。例如，红树林修复不仅有助于固碳，还可缓解风暴潮侵袭和海岸侵蚀，具有多重协同效益。

适应策略。即便全球减排取得进展，部分极端事件已不可避免，适应行动因此变得至关重要。首先，应提升多次种早期预警系统的覆盖面与准确性，并投资于关键基础设施的气候韧性建设，如防洪排水、电力系统和医疗服务等设施的抗灾能力。在农业领域，应推广抗逆作物、优化种植结构、发展智慧农业，以减少干旱和热浪带来的产量损失。水资源管理方面，需加强跨流域调配能力与节水技术应用，适应降水不确定性及干旱风险。公共卫生系统也应强化对热浪、洪涝后传染病等的应急响应能力，提升脆弱人群的防护水平。

治理机制与公众参与。极端气候的系统性特征要求各级政府加强政策协同，建立跨部门、跨地区、多尺度的风险治理框架。国家层面应将气候适应纳入发展战略和财政预算，地方层面则需推动风险知情的城市规划和基础设施更新。公众参与同样关键。通过社区共治、基层组织动员和科普教育，可提升居民风险意识和自救能力，构建“最后一公里”的应急响应体系。同时，必须关注气候公正问题，保障低收入群体、边缘社区在气候行动中的知情权、参与权与受益权，避免陷入更不利境地。



我国西北地区是否在暖湿化？

□ 孟宪红



中国西北地区位于欧亚大陆腹地，由于远离海洋和地形的阻挡，水汽输送受到显著抑制。受青藏高原大地形动力和热力作用的影响，该地区成为全球最典型的干旱—半干旱区之一。在全球变暖背景下，西北地区气候经历了显著的气候转型过程。研究表明，自19世纪末的小冰期以来，西北地区一直呈波动暖干化趋势。20世纪80年代中后期开始，西北地区降水呈增加趋势，但东部降水仍持续减少。至90年代，降水增速显著加快，1996年后湿润化