

未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对^{*}

周佰铨 翟盘茂

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要

人类活动造成的气候变化已经影响到全球每个地区的极端天气气候和水文事件。全球变暖每一分增量都会伴随极端事件更大的变化, 如果没有全球性的碳中和行动, 极端高温事件的增多增强以及极端冷事件的减少减弱趋势将贯穿整个 21 世纪, 强降水以及一些地区的农业和生态干旱的强度和发生频率也会明显增加。当代的儿童和后代在未来更容易受到气候变化和相关极端事件风险的影响, 即使是在相对于工业化以前 1.5°C 温升水平下, 到本世纪末遭受的极端天气气候和水文事件的数量将增加近 4 倍。针对日益严峻的气候变化与极端事件灾害风险, 亟需积极推进“双碳”行动, 并大力减少甲烷等其他温室气体排放。同时, 亟需做好防灾减灾相关政策与措施制定, 推进极端事件监测与早期预警系统及恢复力建设, 加强对复合极端事件与小概率高影响事件的预防, 保障未来几代人的福祉安康和可持续发展。

关键词: 全球变暖、极端天气气候事件、极端水文事件、防灾减灾、未来预估

The Future Projections of Extreme Weather, Climate and Water Events and Strategic Responses

ZHOU Baiquan, ZHAI Panmao

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081

Abstract: Climate change induced by human activities has already been affecting many weather, climate and water extremes in every region across the globe. Every additional increment of global warming will lead to larger changes in extreme events. If there is no action on global carbon neutralization, further increases in the intensity and frequency of hot extremes and decreases in the

^{*}国家自然科学基金项目(41905082)资助

第一作者: 周佰铨, 主要从事极端事件检测归因与预估研究. E-mail: zhou bq@cma.gov.cn

通讯作者: 翟盘茂, 主要从事气候变化与极端事件研究. E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

intensity and frequency of cold extremes will occur throughout the 21st century around the world. And the intensity and frequency of heavy precipitation as well as agricultural and ecological drought in some regions will also undergo a significant increase. Today's children and future generations are more vulnerable to the risk of future climate change and extremes. They are projected to experience nearly four-fold increase in extreme weather, climate and water events by the end of this century even at 1.5 °C of warming relative to pre-industrial levels. In view of the increasingly severe risk of climate change and extreme events, it is urgent to actively pursue the carbon peaking and carbon neutrality goals and strong reductions in the emissions of methane and other greenhouse gases. At the same time, it is urgent to formulate policies and measures related to disaster prevention and mitigation, and promote the construction of extreme event monitoring and early warning system and resilience. Additionally, it cannot be neglected to enhance the prevention of compound extreme events and small probability-high impact events to ensure the well-being and sustainable development of future generations.

Key Words: global warming, weather and climate extremes, extreme hydroclimatic event, disaster prevention and mitigation, future projection

引言

自 1850-1900 年以来,全球地表平均温度已上升超过了 1°C。人类活动造成的气候变化已经影响到全球每个地区的很多极端天气气候和水文事件(IPCC, 2021)。观测到的热浪、强降水、干旱和热带气旋等极端事件的变化,特别是将其归因于人类影响的证据,进一步增强。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告第一工作组报告(以下简称 WGI AR6 报告)指出,1950 年代以来,全球大部分陆地区域热浪发生频率和强度增加、寒潮频率和强度减弱;海洋热浪在 1980 年代以来发生频率几乎翻番;极端强降水在大部分数据完备的陆地区域增强、增多;由于气候变暖造成陆地蒸散增加,一些区域的农业和生态干旱有所增强。与 20 世纪中期或更早时期相比,所有区域的产生影响的气候因子(Climatic Impact-Driver)都发生了明显的变化,造成了相关气候指数的强度、发生频率、季节性、空间范围偏移(IPCC, 2021; 翟盘茂等, 2021)。

未来全球变暖的每一分增量，都会使得高温热浪、强降水、干旱等极端天气气候事件进一步增强增多。在气候变暖的背景下，除了单一类型的极端事件出现了显著的变化外，能够造成更大影响的复合型极端事件也越来越频繁地发生。复合型极端事件包括多个（类）事件在同一地区或者不同地区，同时或者相继发生。例如高温-干旱同时发生的复合型极端事件（余荣和翟盘茂，2021）。这类事件发生后往往还会诱发山火，北美以及欧洲地区近年来频繁的山火就与此类事件有关系。这样的复合型极端事件实际上形成了一条灾害链，导致自然灾害-社会经济影响的叠加和连锁反应。随着全球变暖，类似的复合型极端事件或者历史上从未发生的复合型极端事件类型发生的概率将增加，对人类社会和生态系统的适应能力提出了新的挑战。此外，虽然目前关于小概率-高风险事件发生的证据还很少，但这些小概率事件带来的严重后果，例如冰盖崩塌、海洋环流突变、以及一些远超评估的可能性范围的一些复合型极端事件并不是完全不可能发生，是风险评估中需要考虑的重要一环。由于这类事件的发生概率低、科学理解不到位，容易被学界和决策者忽视，所以在防灾减灾政策中易被忽视。

2022 年夏季，高温热浪再次席卷我国和北半球许多其他地区，欧洲大部、北非、北美和我国长江流域等地区持续出现 35℃ 以上高温天气。6 月中下旬，美国加州的死亡谷气温达到 50℃，打破了维持了 100 年的记录；7 月中旬，英国出现了自有气象记录以来的首个 40℃ 以上高温，欧洲大部分地区气温高达 40-43℃。热浪导致了欧洲超过两千人死亡并引发德国和西班牙等地山火蔓延，美国超过一亿人遭受高温带来的健康影响。我国大范围地区也经历有完整气象记录以来最强的高温热浪事件，此次事件持续时间长、强度大、范围广，先后有 70% 的国家级地面气象观测站经历了超过 35℃ 高温天气。高温炙烤导致长江流域“汛期反枯”，造成水资源短缺。在全球变暖仍将持续的情景下，更频繁更强盛的极端天气气候以及水文事件可能会在可见的未来接踵而至，对后代的生存与福祉造成巨大挑战。2023 年世界气象日的主题是“天气气候水，代代向未来”，这一主题深刻体现了认识极端天气气候与水文事件未来变化特征，及时采取气候适应和减缓行动，实现“双碳”目标的重要性。

1 极端天气气候与水文事件的未来变化特征

从 IPCC WGI AR6 报告考虑的五种共享社会经济路径情景来看（SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5，代表极低、低、中、高、极高排放情景），无论是哪种排

放情景，到 21 世纪中期全球地表温度都将继续上升。在近期（2021-2040 年），所有排放情景下，预估的全球温升的最佳估计值均为 1.5°C 左右。到了中期（2040-2060 年），不同排放情景下全球温升的幅度已经有较为显著的差别。在极低排放情景（SSP1-1.9）下，全球温升的非常可能范围为 1.2~2.0°C；而在中等（SSP2-4.5）和极高（SSP5-8.5）排放情景下，全球温升的非常可能范围分别为 1.6~2.5°C 和 1.9~3.0°C。到远期（2081-2100 年），除了在极低排放情景（SSP1-1.9）全球平均温度有所下降外，在其排放他情景下温度将进一步升高。21 世纪末在 SSP1-1.9 情景下温升可能控制在 1.5°C，而在 SSP1-2.6 情景下可能控制在 2°C 以内，但在极高（SSP5-8.5）排放情景下温升将突破 4°C。在这些排放情景下，随着全球升温的加剧，极端天气气候和水文事件频次强度等特征也将发生显著变化。

1.1 极端温度事件

从 IPCC 第一工作组第五次评估报告 (WGI AR5) 到第六次评估报告周期发布的 1.5°C 特别报告，在全球尺度上极端高温事件在未来将增多增强而极端冷事件减少减弱的评估结论一直是高度一致的。WGI AR6 报告根据全新一代的耦合模式比较计划 (CMIP6) 模式以及对众多新研究的评估，包括一些运用了观测约束方法的预估研究 (Borodina et al, 2017; Vogel et al, 2017)，进一步证实了上述结论。总的来说，预估得到的陆地上极端温度事件变化的幅度整体大于全球平均温度变化的幅度，特别是中纬度陆地区域 (图 1)。即使是全球温升 1.5°C 时，极端高温和低温事件也出现了大幅度的增暖。与第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 模式预估结果一致，CMIP6 模式的模拟表明 0.5°C 全球平均温度的升高将显著提升极端高温事件的频次和强度并显著降低极端低温事件的频次和强度。

年最低温度 (TNn) 随全球变暖而升高的幅度更大并且展现出显著的由赤道向极地的增强，这与北半球冬季平均温度的升高型态是一致的。与此不同的是，年最高温度 (TXx) 的升高在陆地区域更为均匀 (图 1)。全球和区域尺度上极端温度事件趋向于随着全球平均温度的升高而线性的增暖。在中纬度地区，极端高温事件增暖的速率能够达到全球升温速率的两倍之多。在北极地区的冬季，最冷夜温度的升高速率能够达到全球升温速率的约三倍 (IPCC, 2021)。从概率上来说，随着全球变暖，超过某一极端高温阈值的概率将增加，而低于某一极端低温阈值的概率将降低 (Lewis et al, 2017; Suarez-Gutierrez et al, 2020)。这样的发生概率变化往往与全球变暖水平呈非线性关系，更罕见的极端事件发生概率变化更大 (Fischer and Knutti, 2016; Kharin et al, 2018)。例如，CMIP5 模式预估得出，当前气候态下 20 年一遇最高

温度的发生频率在全球 1.5℃ 温升水平下将增加 80%，在 2.0℃ 温升水平下将增加 180%。当前气候态下百年一遇最高温度的发生频率分别在 1.5℃ 和 2.0℃ 温升水平时增加 200%和 700%以上（Seneviratne et al, 2021）。基于 CMIP6 模式模拟试验预估得出的结论是类似的。未来全球温升每增加 0.5℃，不同重现期的极端高温事件的频次和强度均会相应增大。而且，越极端的高温事件其频次和强度变化的幅度越大，比如 50 年一遇的高温事件在不同温升水平下频次和强度增大的幅度均要大于 10 年一遇的高温事件（Li et al, 2021）。

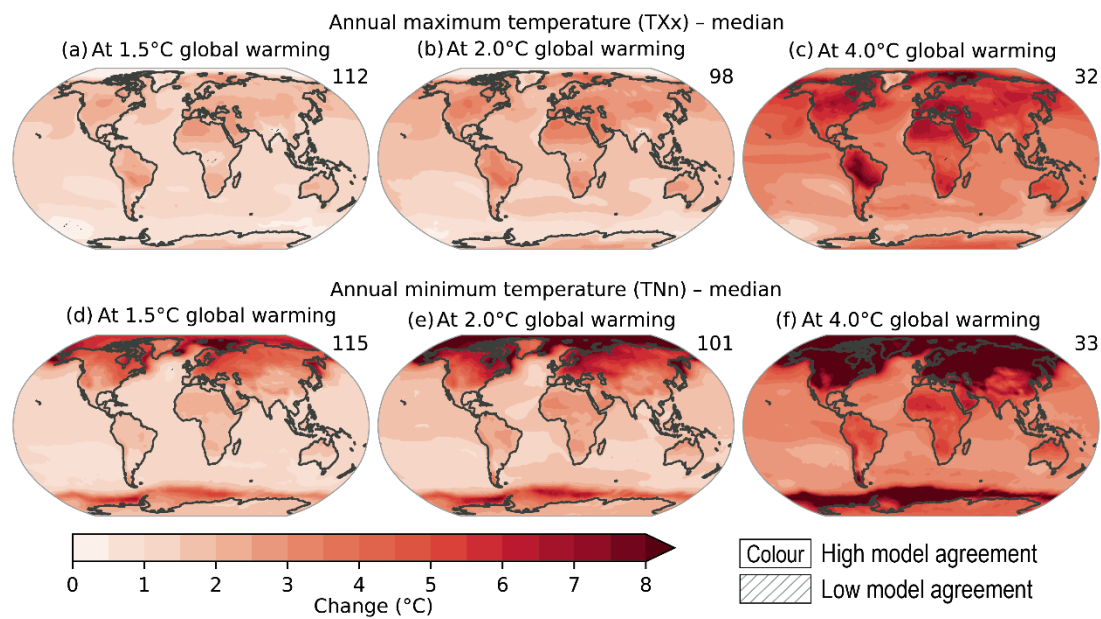


图 1. 基于五种排放情景下（SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5）的 CMIP6 多模式集合的模拟预估得到的全球温升（a,d）1.5℃、（b,e）2℃和（c,f）4℃时（a-c）年最高温度（TXx）和（d-f）年最低温度（TNn）变化

（基准期为 1850-1900 年；右上角数字：集合模拟的数量；无斜线覆盖：模式集合一致性高的区域，其中≥80% 的模拟显示一致的变化；有斜线覆盖：模式集合一致性低的区域，其中<80% 的模拟结果一致显示同样的变化；下同。图片源自 WGIAR6 报告第十一章图 11.11）

Fig. 1 Projected changes in (a–c) annual maximum temperature (TXx) and (d–f) annual minimum temperature (TNn) at (a,d) 1.5 °C, (b,e) 2 °C and (c,f) 4 °C global warming levels relative to the 1850–1900 baseline [Results are based on simulations from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) multi-model ensemble under the Shared Socio-economic Pathways (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) scenarios. The numbers in the top right indicate the number of simulations included; no diagonal line coverage indicates regions with high model agreement, where ≥80% of models agree on the sign of change; diagonal lines indicate regions with low model agreement, where <80% of models agree on the sign of change.

1.2 极端降水与洪涝事件

IPCC WGI AR5 评估得出极端降水事件在全球继续变暖的情况下在中纬度陆地及潮湿热带的绝大多数区域将更加频繁且强度更强 (Collins et al, 2013)。之后的观测、归因以及模式模拟研究均提供了更多有力的证据支持 WGI AR5 的评估结论。CMIP6 模式模拟表明年最大日降水量随全球升温的变化速率是不依赖于强迫情景或强迫机制的, 这与基于 CMIP5 模式得出的结论是一致的 (Sillmann et al, 2019; Li et al, 2021)。所有 SSP 情景及所有模式预估的中位数显示, 全球每升温 1°C , 50 年一遇的年最大日降水量增加接近 7%。当前 50 年一遇的连续 5 日最大降水量在全球温升 1.5°C 和 2°C 时多模式集合预估的重现期的 90% 范围在所有陆地网格都是不重合的, 这说明全球温升幅度即使小到 0.5°C 极端降水的变化也会是非常显著的 (Li et al, 2021)。

预估得到的不同温升水平下极端降水变化的空间型态基本是一致的。区域尺度上极端降水随升温呈线性增加更证实了上述空间型态一致的结论 (Seneviratne and Hauser, 2020)。气候系统内部变率对极端降水的变化也有调制作用, 导致区域上不一致的变化。随着全球进一步变暖, 极端降水在大部分陆地区域都将增加, 且增加幅度随气候变暖幅度增大而增大 (图 2)。极端降水仅在很少区域是随升温而减少的, 例如低温升情景下地中海周边的南欧地区; 除此以外, 极端降水量的减少主要局限于亚热带海洋区域, 并且与风暴路径变化导致的平均降水量减少高度相关。

模式预估得到的固定量级极端降水发生概率的变化也是非线性的, 且越极端的事件变化幅度越大。CMIP5 模式预估的 1.5°C 至 2°C 温升情景下特别极端的 (第 99 和 99.9 百分位) 降水的概率增加与基于观测预期的变化 (Fischer and Knutti, 2016) 是一致的。CMIP5 模式预估表明, 目前 20 年一遇极端降水的发生频率预计在全球温升 1.5°C 水平下增加了 10%, 在全球温升水平 2.0°C 下增加 22%。但在 1.5°C 和 2.0°C 的温升水平下, 目前 100 年一遇极端降水的发生频率预计将分别增加 20% 和 45% 以上 (Kharin et al, 2018)。CMIP6 模式预估表明, 在 4°C 的极高全球温升水平下, 10 年和 50 年一遇极端降水事件的发生频率将分别增加约一倍和三倍 (Li et al, 2021)。

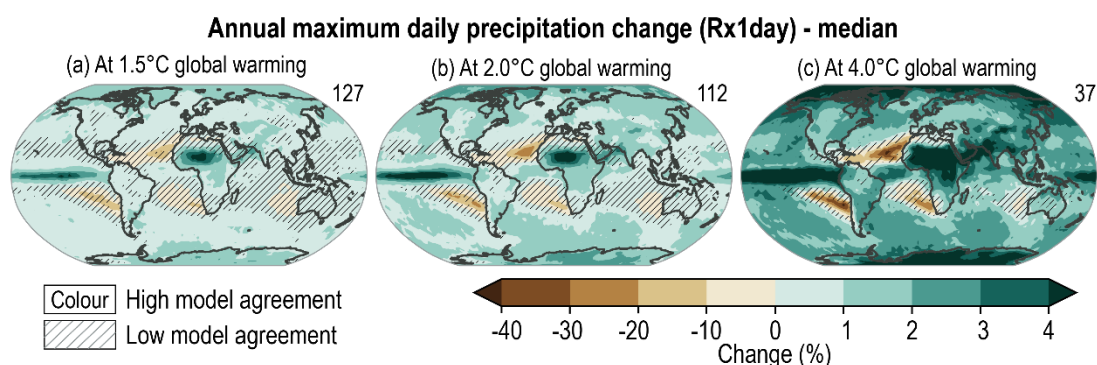


图 2. 预估得到的全球升温 (a) 1.5°C、(b) 2°C和 (c) 4°C时年最大日降水的变化

(图片源自 WGIAR6 报告第十一章图 11.16)

Fig.2 Projected changes in annual maximum daily precipitation at (a) 1.5 °C, (b) 2 °C and (c) 4 °C global warming levels relative to the 1850–1900 baseline

(Source: WGI AR6 Chapter 11 Fig.11.16)

由于区域尺度上洪水事件的形成机制十分复杂,且全球气候模式与水文模型之间的耦合仍存在一定的不确定性,目前针对洪涝未来预估结论的信度仍不是很高。与 AR5 以及 1.5°C 特别报告一致的是,在全球尺度上,洪水预估的相关结论信度为中等,但在区域尺度上洪水预估相关结论的信度仍然较低。全球尺度上,最新的研究指出随着全球温度的升高洪涝灾害的频次将增多 (Alfieri et al, 2017; Paltan et al, 2018)。在大洲和区域尺度上,预估的世界不同地区的洪水变化并不均匀,但在 21 世纪,洪水增加的地区要多于减少的地区 (Arnell and Gosling, 2016; Döl et al, 2018)。亚洲东南部和北部以及印度、非洲东部和热带地区以及北美高纬度地区的洪水发生频率或强度有所增加,而中欧和东欧以及地中海、南美洲部分地区、北美南部和中部以及非洲西南部的洪水发生频率或强度将会下降。在南美洲,大多数基于全球和区域水文模型的研究表明,亚马逊河西部和安第斯山脉的洪流强度和发生频率将会有所增加。

总结而言,全球水文模型预估表明,受河流洪水增加影响的陆地面积比受河流洪水减少影响的土地面积更大。区域尺度上,亚马逊河西部、安第斯山脉以及东南亚和北亚河流洪水将增多。

1.3 干旱事件

干旱通常覆盖大片地区，干旱期间，水资源不足会对自然系统 and 经济部门的各个组成部分产生负面影响(Wilhite and Pulwarty, 2017; Ault et al, 2014)。根据用于描述干旱的变量和受影响的系统或部门，干旱可分为不同类型，如气象干旱（降水不足）、农业干旱（如作物减产或歉收，通常与土壤水分不足有关）、生态干旱（与导致树木死亡的植物水分缺失有关）以及水文干旱（溪流或如水库、湖泊、泻湖和地下水等库存水的水量少）。WGIAR6 报告对包括气象干旱、农业生态干旱及水文干旱在内的多种干旱的未来变化特征均进行了评估。以土壤湿度界定的干旱为例，图 3 展示了不同全球变暖水平（1.5℃、2℃、4℃）下干旱区域平均的以土壤湿度定义的干旱强度和发生频率相对于 1851-1900 年基准线的变化。在全球变暖 2℃ 时，农业和生态干旱增加的幅度至少达到中等。预估得到的土壤湿度干旱强度和发生频率变化的 90%不确定性范围都在零以上，表明在全球干旱区干旱的强度和发生频率总体上都有显著增加。

对多种类型干旱的综合评估表明，随着未来全球变暖的加剧，更多地区将受到农业和生态干旱增加的影响。预计在全球变暖 2℃ 时，相比 1.5℃ 温升，全球更多地区将受到严重农业和生态干旱的影响。当然，也有一些地区的农业和生态干旱会减少，比如非洲东北部以及南亚。预估的气象干旱的变化总体上比农业和生态干旱的影响范围要小，但也会影响一些 AR6 划分的区域，即使是在全球变暖 1.5℃ 和 2℃ 的水平下。而随着全球变暖加剧，一些地区也将在未来受到水文干旱的影响，例如欧洲北部、中西部和东部、地中海、澳大利亚南部、中亚西部和南部、南美北部、南美季风区、南美西南部和南部、北美西部、非洲西南和东南部以及马达加斯加（Seneviratne et al, 2021）。

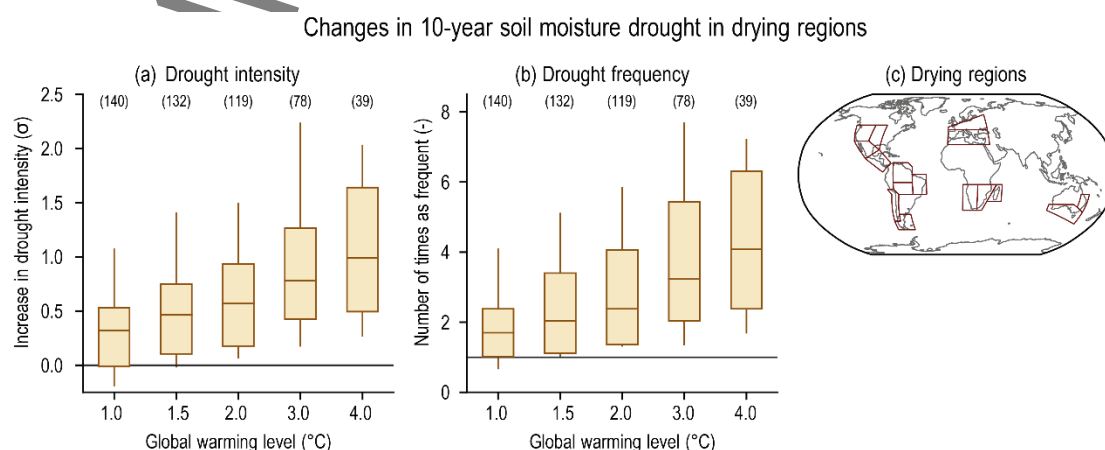


图 3. 预估得到的全球升温 1.5℃、2℃和 4℃时全球干旱区域十年一遇干旱（a）强度和（b）发生频率的变化

（基准期为 1850—1900 年；图 3c 中棕色实线框定的 2℃升温水平下农业和生态干旱有中等信度增加的区域即为干旱区域；旱事件定义为十年一遇的干旱事件，其年平均土壤湿度低于 1850—1900 基准期的第 10%分位值，对于每个盒须图的矩形框，水平线和框分别表示多模型集合中发生频率或强度变化的中值和中心 66%的不确定性范围，盒须图的须则延伸 90%不确定性范围；图片源自 WGI AR6 报告第十一章图 11.18）

Fig.3 Projected changes in (a) intensity and (b) frequency of drought at 1 °C, 1.5 °C, 2 °C, 3 °C and 4 °C global warming levels relative to the 1850–1900 baseline

（‘Drying regions’ are indicated by brown solid lines in Fig. 3c where there is at least medium confidence in an increase in agriculture/ecological drought at the 2 °C global warming level. A drought event is defined as a 10-year drought event whose annual mean soil moisture is below its 10th percentile from the 1850–1900 baseline. For each box plot, the horizontal line and the box respectively represent the median and the 66% of central uncertainty range of the frequency or the intensity changes across the multi-model ensemble, and the ‘whiskers’ extend to the 90% uncertainty range. Source: WGI AR6 Chapter 11 Fig.11.18)

1.4 复合型极端事件

气候变暖使得以往被认为不太可能出现的极端事件之间的组合变得越来越有可能出现。随着全球变暖加剧，许多地区发生复合型极端事件的可能性会增加，其中高温干旱复合型极端事件可能会变得更加频繁（Hao et al, 2018; IPCC, 2021）。欧亚大陆北部、欧洲、澳大利亚东南部、美国大部分地区、中国西北部和印度的高温干旱复合型极端事件都将增加；地中海和中国大兴安岭等野火（森林和草原火灾）多发地区，未来高温干旱事件发生频率的增加可能会导致野火的增加区（Tian et al, 2017）。全球气候进一步变暖的影响下极端强降水增加和海平面上升将导致复合型洪水风险加大，特别是在大西洋沿岸和北海地区；在全球范围内，到 2100 年，高排放情景下复合洪水的概率将平均增加 25%以上（Bevacqua et al, 2020）。由于海平面将继续上升，其与风暴潮以及河流洪水之间的相互作用将导致沿海地区发生更频繁且更严重的复合洪水事件。

研究指出在过去 2000 多年的时间里，50 年一遇的洪涝和 50 年一遇的高温从未在一周之内出现碰头的情况，但这类事件出现的可能性将随着变暖的加剧而持续增加，到 21 世纪末将在我国东南地区频繁出现，并对基础设施和居民健康构成前所未有的威胁（Liao et al,

2021)。夏季高温-高湿条件组合而成的“桑拿天”，容易突破人类能够忍受的生理极限，预估证据表明随着气候变暖这种极限情况发生的可能性越来越大 (Li et al, 2020)。今年重庆地区的多种极端事件并发和继发的特征也提醒我们需要警惕“高温-干旱-山火-强降水-山洪/泥石流”等链式灾害在我国发生的可能性。在全球变暖背景下，山区冰川融化或融雪和强降水叠加形成复合洪涝/山洪（2022 年 6 月美国黄石公园发生过）的可能性也持续增加。

ENSO（厄尔尼诺-南方涛动）期间，受到大尺度海洋-大气相互作用的影响，在全球不同区域极易造成共发性极端事件。例如，2015/2016 年超强厄尔尼诺期间，印度尼西亚、澳大利亚、亚马逊地区、埃塞俄比亚、南非和欧洲受到干旱的严重影响，并给引发森林火灾、水资源短缺和农业灌溉困难等重大影响。受到印度尼西亚、亚马逊等地区严重干旱的影响，森林火灾排放了大量的 CO₂，同时干旱的影响又减少了陆地碳汇能力，加剧了大气 CO₂ 浓度增长。

2 气候变化及极端事件对后代的影响

世界所有地区都越来越真切的感受气候变化及极端事件的影响，水的供应、粮食生产和数百万人的生计面临着越来越大的挑战。虽然 AR6 报告中评估的中期（2041-2060 年）和长期（2081-2100 年）两个时段似乎离我们还很遥远，但 2020 年出生的孩子 2040 年将年满 20 岁，2100 年将年满 80 岁。离本世纪末还有不到一辈子的时间。此外，到 2050 年世界上近 70%的人口将生活在城市地区，其中许多人将居住在非规划或非正式的居住区。因此，当代的儿童和后代在未来成长过程中将更容易受到气候变化和相关极端事件风险的影响，如洪水、热浪、缺水、贫困和饥饿。立即迅速的采取大幅减少温室气体排放和适应气候变化的行动将对当代的儿童以及他们下一辈的生活质量以及健康、福祉和安全产生深远影响 (IPCC, 2022)。

如果不限制全球温升在远低于 2°C，根据 IPCC 第二工作组报告 (WGII AR6) 的评估，全球变暖的影响将在未来几十年加剧，对世界各地人类生活的各个方面产生深远影响。粮食和水供应、城市、基础设施和经济以及人类的健康和福祉都将受到影响。例如：在全球温升 1.5°C 的情景下，2020 年 10 岁或以下的儿童预计到 2100 年所经历的极端事件将增加近 4 倍，在 3°C 温升情景下将增加 5 倍。在任何气候变暖的情景下，2020 年 55 岁的人在余下的生命旅程中都绝不会经历这样的暴露度增加。

全球范围内，暴露于致命热浪的人口比例预计将从今天的 30%增加到本世纪末的 48-76%，这取决于未来的温升水平和区域。如果到 2100 年全球变暖超过 4°C，到本世纪末，

南亚部分地区、撒哈拉以南非洲热带地区以及中美洲和南美洲部分地区的户外工作者面临巨大气候环境压力的天数将每年增加 250 个工作日。这将导致负面后果，如粮食产量减少和粮食价格上涨。在欧洲，与 1.5℃ 的温升水平相比，全球温升 3℃ 时，面临热浪风险的人数将增加 2 至 3 倍。

由于洪水和干旱，气候变化将影响水质和卫生、粮食生产和生态系统的可用水量。在全球范围内，预计有 8 亿至 30 亿人将因全球 2℃ 温升水平下的干旱而长期缺水，而在 4℃ 温升时，仅考虑气候变化的影响，就目前的人口而言，约有 40 亿人将长期缺水。在南美洲长大的儿童将面临越来越多的缺水和用水受限的日子，尤其是那些生活在城市以及依赖冰川水源的农村的儿童。随着安第斯山脉的冰川和雪盖持续融化，冰川萎缩或完全消失，可用水量减少。中美洲国家将经历更频繁、更强的风暴以及强降雨，导致河流洪涝。

当代的年轻人和后代也将目睹气候变化对粮食生产和供应的更大负面影响。气候变暖越加剧，种植、生产、运输、分配、购买和储存粮食就越困难，预计这一趋势对贫困人口的打击最大。根据未来的政策以及采取的气候和适应行动，2050 年遭受饥饿的人数将从 800 万到 8000 万不等，受影响最严重的人口集中在撒哈拉以南非洲、南亚和中美洲。在高脆弱性高温升情景下，预计到 2050 年，低收入国家将有 1.83 亿人因气候变化而营养不良。

所有这些预计的影响不仅会降低可持续发展的前景，而且 WGII AR6 报告还预估，由于气候变化，贫困和不平等现象会增加，人口的非自愿迁徙也会增加。这些被迫迁徙是对野火发生频率和强度增加、洪水和干旱增加，以及与温度相关的疾病增加的响应。此外，多种气候危害在未来将更频繁地同时发生。它们可能会相互加强，从而增加对自然和人类的影响和风险，使其更加复杂和难以应对。例如，由于高温和干旱导致的作物产量下降，加上农业工人的高温压力导致的生产力下降，这将加剧粮食价格，降低家庭收入，并导致营养不良带来的健康风险，以及与气候相关的死亡，特别是在热带地区。

而积极的信息是，通过采取紧急行动限制全球变暖，加强我们的适应的行动与投入，例如保护自然以及改善城市的规划和管理，可以大幅降低所有上述气候变化及极端事件风险。青年运动与许多非政府组织一起，使得全球公众对气候变化及其致命影响的相关认识不断上升。为了成功地保障我们自己的未来和未来几代人的未来，气候风险必须纳入每一项决策和规划中。

3 防范应对未来极端事件灾害风险的思考与建议

未来的气候变化以及极端天气气候和水文事件发生频率和强度的增加引发的灾害对我国及世界各地人民的生产生活、社会经济以及生态系统造成了巨大威胁。与全球极端事件未来变化特征类似的是，我国未来极端高温和极端降水事件也将增多增强，极端低温事件减少减弱，极端干旱时间在中国北方将减少，南方将增多（《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会，2022）。近年来，我国针对极端事件灾害风险的防范与应对能力快速提升，但鉴于在可预见的未来气候变化导致的极端事件风险仍将继续增大，我国又是人口大国，在对极端灾害风险严峻性认识与风险防御等方面需要进一步提高和加强，亟需从子孙后代的角度考虑和部署，把气候变化对极端天气气候事件影响的最新科学认识结合到防灾减灾的规划和行动中。为此，提出以下几点思考和建议：

第一、以 CO₂ 为主的温室气体排放为主的人类活动对极端事件影响的认识提醒我们，要从根本上控制极端事件加剧的风险，迫切需要努力减少温室气体排放。为了将人为原因导致的全球变暖控制在一定水平，并将其影响降至最低，必须限制二氧化碳排放，至少要达到净零排放，实现碳中和。为此，我们应该通过能源结构改变，化石燃料使用量控制，可再生能源比例扩大，能源使用效率提升等具体措施积极推进“双碳”行动。同时，还要大力减少其他温室气体排放，把实现“温室气体中和”列入气候变化应对日程中。

第二、面对日趋加重的极端事件影响，我们必须尽快做好防灾减灾的准备并加强适应行动和恢复力建设。考虑到全球表面温度上升将至少继续至本世纪中叶，并将在未来 20-30 年内跨越 1.5°C，许多极端事件加强、频发的趋势将进一步加剧，对经济社会发展的冲击和人民生命财产的威胁进一步加大，建议从以下三方面加强防御：

第一、因地制宜地制定极端事件防御规划和对策。为了防止和减轻一些影响巨大的极端天气事件带来的风险和引起的破坏，需要在经济社会建设中进行气候的可行性论证和风险评估，在充分考虑气候变化背景下精心做好防灾减灾规划，根据极端事件演变的规律、致灾特征、因地制宜地制定适应性对策，可针对特定区域及特定极端事件制定相应的防范、抵御及减缓策略。

第二、加大极端事件监测与早期预警系统的建设力度，加强极端事件及其风险的监测和预警。要进一步极端事件监测能力，提高其预测的提前量和准确性，加强其灾害风险预警，努力降低极端事件造成的生命财产损失；加强科学素质培养和科普宣传，提高公众对极端天

气候事件的风险防范意识。

第三、充分认识气候变化对不同类型极端事件的影响，加强恢复能力建设。气候变化对高温热浪和强降水影响更加直接和密切，而对于干旱加剧的影响主要是区域性的。高温热浪事件影响加剧对人群健康的影响需要引起高度重视，极端强降水事件频发将给城市运营、水利工程运行和应急管理带来新的挑战，北方和西南地区频繁出现的干旱灾害常常对水资源、农业生产和生态系统领域带来重大风险。面对快速的气候变化，需要进一步加强适应行动。例如，对于洪涝灾害，需要强化生态系统保护与修复，通过修复湿地和河流并合理规划国土空间利用方式加强自然保水。对于像 2022 年夏季我国发生的破纪录的热浪，需要加强城市特别是超大城市水、电力等能源资源供应，推进交通、防灾减灾基础设施的升级和改造。总的来说，需要将极端事件变化的科学认识结合高敏感部门、区域和人群的影响，综合考虑暴露度、脆弱性条件，有针对性地提高极端事件的适应和恢复的能力。

第三、需要进一步加强科学研究，提高复合型极端事件和小概率高影响事件研究。复合型极端事件已成为国际气候学界公认的前沿科学问题和重大科学挑战，多个国际组织（如世界气象组织、世界卫生组织、国际红十字会）和多国政府（如澳大利亚、加拿大、德国和美国）也强烈建议将复合型极端事件列为未来防灾减灾工作的重点。我国《“十四五”国家综合防灾减灾规划》中指明了“多灾种集聚和灾害链特征日益突出，灾害风险的系统性、复杂性持续加剧”的新形势。《国家适应气候变化战略 2035》也要求“开展重大极端天气气候事件归因分析，发展极端天气气候事件和复合型灾害预测预警技术”。然而，我国复合极端事件研究起步较晚，基础较为薄弱，技术力量储备不足。传统的用于研究单一极端事件的研究方法并不完全适用于复合型极端事件研究，更有针对性的全新方法体系亟需建立；虽然复合型极端事件的发生具有偶然性，但气候变化背景下此类事件的增多是由其驱动因子之间相互作用紧密有关的。例如，中国高温与干旱事件之间的相互作用在气候变暖背景下是不断加强的，但人类活动引起的气候变化如何通过高温与干旱之间的相互作用影响复合型极端事件变化问题需要深入研究。相对而言，以往极端事件的研究，多关注于单类极端事件独立的变化，而复合型极端事件受多个驱动因子的组合影响，复合型极端事件所导致的影响远大于单个因子造成影响的总和，需要加强多因子相互作用机理、归因、预估与风险的综合研究。IPCC WGI AR6 报告中也关注了小概率高影响事件，这些这类事件发生概率极小甚至不被人们广为所知，但对人类经济社会和生态系统的潜在影响极大，在未来的气候风险评估中不能轻易排除。我国在此方面研究和认识严重不足，不要轻易否定目前出现小概率极端事件与气候变化的联

系。建议加强小概率高影响的极端事件研究，并在极端事件风险防范中予以考虑。

参考文献

- 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2022. 第四次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社: 90-116. The Writing Committee of the Fourth National Assessment Report on Climate Change, 2022. The Fourth National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press: 90-116 (in Chinese).
- 余荣, 翟盘茂, 2021. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. 大气科学学报, 44(5): 645-649. Yu R, Zhai P M, 2021. Advances in scientific understanding on compound extreme events[J]. Trans Atmos Sci, 44(5): 645-649 (in Chinese).
- 翟盘茂, 周伯铨, 陈阳, 等, 2021. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 17(6): 629-635. Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al, 2021. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Res, 17(6): 629-635 (in Chinese).
- Alfieri L, Bisselink B, Dottori F, et al, 2017. Global projections of river flood risk in a warmer world[J]. Earth's Future, 5(2): 171-182, doi: 10.1002/2016ef000485.
- Arnell N W, Gosling S N, 2016. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale[J]. Climatic Change, 134(3): 387-401, doi: 10.1007/s10584-014-1084-5.
- Ault T R, Cole J E, Overpeck J T, et al, 2014. Assessing the risk of persistent drought using climate model simulations and paleoclimate data[J]. J Climate, 27(20): 7529-7549, doi: 10.1175/jcli-d-12-00282.1.
- Bevacqua E, Voudoukas M I, Zappa G, et al, 2020. More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change[J]. Commun Earth Environ, 1(1): 47.
- Borodina A, Fischer E M, Knutti R, 2017. Potential to constrain projections of hot temperature extremes[J]. J Climate, 30(24): 9949-9964, doi: 10.1175/jcli-d-16-0848.1.
- Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al, 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 1029-1136, doi: 10.1017/cbo9781107415324.024.
- Döll P, Trautmann T, Gerten D, et al, 2018. Risks for the global freshwater system at 1.5 °C and 2 °C global warming[J]. Environ Res Lett, 13(4): 044038, doi: 10.1088/1748-9326/aab792.
- Fischer E M, Knutti R, 2016. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models[J]. Nat Climate Change, 6(11): 986-991, doi: 10.1038/nclimate3110.
- Hao Z C, Hao F H, Singh V P, et al, 2018. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas[J].

-
- Environ Res Lett, 13(12): 124022.
- IPCC, 2021. Summary for policymakers[M]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. 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: 3-32, doi: 10.1017/9781009157896.001.
- IPCC, 2022. Summary for policymakers[M]//Pörtner H O, Roberts D C, Poloczanska E S, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 3-33, doi: 10.1017/9781009325844.001.
- Kharin V V, Flato G M, Zhang X, et al, 2018. Risks from climate extremes change differently from 1.5 °C to 2.0 °C depending on rarity[J]. Earth's Future, 6(5): 704-715, doi: 10.1002/2018ef000813.
- Lewis S C, King A D, Perkins-Kirkpatrick S E, 2017. Defining a new normal for extremes in a warming world[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(6): 1139-1151, doi: 10.1175/bams-d-16-0183.1.
- Li C, Sun Y, Zwiers F, et al, 2020. Rapid warming in summer wet bulb globe temperature in China with human-induced climate change[J]. J Climate, 33(13): 5697-5711, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0492.1.
- Li C, Zwiers F, Zhang X B, et al, 2021. Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models[J]. J Climate, 34(9): 3441-3460, doi: 10.1175/JCLI-D-19-1013.1.
- Liao Z, Chen Y, Li W, et al, 2021. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China[J]. Geophys Res Lett, 48(18): e2021GL094505.
- Paltan H, Allen M, Haustein K, et al, 2018. Global implications of 1.5 °C and 2 °C warmer worlds on extreme river flows[J]. Environ Res Lett, 13(9): 094003, doi: 10.1088/1748-9326/aad985.
- Seneviratne S I, Hauser M, 2020. Regional climate sensitivity of climate extremes in CMIP6 versus CMIP5 multimodel ensembles[J]. Earth's Future, 8(9): e2019EF001474, doi: 10.1029/2019ef001474.
- Seneviratne S I, Zhang X, Adnan M, et al, 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate[M]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. 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: 1513-1766, doi: 10.1017/9781009157896.013.
- Sillmann J, Stjern C W, Myhre G, et al, 2019. Extreme wet and dry conditions affected differently by greenhouse gases and aerosols[J]. npj Climate Atmos Sci, 2(1): 24, doi: 10.1038/s41612-019-0079-3.
- Suarez-Gutierrez L, Müller W A, Li C, et al, 2020. Hotspots of extreme heat under global warming[J]. Climate Dyn, 55(3-4): 429-447, doi: 10.1007/s00382-020-05263-w.
- Tian X R, Shu L F, Wang M Y, et al, 2017. The impact of climate change on fire risk in Daxing'anling, China[J]. J For Res, 28(5):

997-1006.

Vogel M M, Orth R, Cheruy F, et al, 2017. Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks[J]. *Geophys Res Lett*, 44(3): 1511-1519, doi: 10.1002/2016gl071235.

Wilhite D A, Pulwarty R S, 2017. Drought as hazard: understanding the natural and social context[M]//Wilhite D A, Pulwarty R S. *Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press: 3-22.

《气象》
《待刊》