2020年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究

周天军^{1,2*}, 任俐文^{1,2}, 张文霞¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

收稿日期: 2020-11-16; 收修改稿日期: 2021-03-01; 接受日期: 2021-04-08; 网络版发表日期: 2021-09-06

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1507701)和国家自然科学基金项目(批准号: 41988101)资助

摘要 2020年夏季我国经历了一场非同寻常的梅雨季, 其持续时间长、暴雨日数多, 为近几十年罕见。梅雨期间从日尺度到月尺度的降水均显著偏多, 特别是持续性强降水(如连续四周最大累积降水量, Rx28day), 较气候平均态偏多94%, 打破了自1961年以来的历史记录。探讨人为强迫对此次梅雨期极端降水的影响及其物理过程, 有助于理解和预估极端气候的风险变化。利用第六次耦合模式比较计划(CMIP6)检测归因模式比较计划(DAMIP), 从事件归因角度, 研究指出, 人为强迫使得2020年夏季长江中下游流域持续性强降水(Rx28day)事件的发生概率减小了46%(22~62%)。其中, 温室气体有利于增加类似极端事件的发生概率(44%), 这由增温引起的可降水量增加导致; 而人为气溶胶则减少了其发生概率(73%), 这与地表降温引起的可降水量减少、东亚夏季风环流减弱有关。未来随着温室气体的排放增加和人为气溶胶的减排, 类似持续性强降水事件的发生概率将持续增加。在不同的共享社会经济路径(SSP)下, 未来温室排放的情景越高, 这类极端降水事件的发生风险越高。在低排放情景SSP1-2.6、中等排放情景SSP2-4.5和高排放情景SSP5-8.5下, 到21世纪末, 其发生概率分别约为当前气候下的4.6、13.6和27.7倍。因此, 采取切实有效的温室气体减排措施, 将有利于减缓极端降水事件的发生风险。

关键词 极端降水, 事件归因, 人为强迫, 温室气体, 人为气溶胶, CMIP6

1 引言

包括热浪、强降水和干旱在内的极端天气和气候事件, 能够影响到社会生产和生活的方方面面。极端天气气候事件的破坏性要显著高于气候平均态变化, 因此, 从政府决策者到利益攸关者, 都高度关注极端天气气候事件的发生机理和预测预估问题(IPCC, 2012)。

在国际社会, 理解极端事件的发生和变化原因、提高极端事件的监测和预报水平, 已经成为世界气候研究领域的挑战性问题。例如, 为了解决人类社会面临的可持续发展问题, 世界气候研究计划(WCRP)联合科学委员会提出了急需投入研究力量来应对的七大科学挑战问题, 其中之一就是极端天气和气候事件(周天军等, 2019)。

中文引用格式: 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. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1637–1649, doi: 10.1360/SSTe-2020-0325

英文引用格式: Zhou T, Ren L, Zhang W. 2021. Anthropogenic influence on extreme Meiyu rainfall in 2020 and its future risk. Science China Earth Sciences, 64(10): 1633–1644, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9771-8>

极端天气和气候事件自身是气候系统的内在特征,但越来越多的观测证据显示,从全球到区域尺度,极端事件的发生频率和强度正在随着气候变化而发生改变(Seneviratne等, 2012). 在中国区域,观测中近50年来中国东部地区日降水分布由弱降水事件向强降水事件偏移,并伴有极端强降水事件频率和强度的增加(Ma等, 2015, 2017; Li H X等, 2017; Lu等, 2020). 从气候变化检测和归因的角度,基于第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)中历史气候模拟分离强迫试验的集合模拟结果,使用“最优指纹”法,研究发现人类活动对近50年中国东部地区日降水量分布向更高日降水强度的偏移这一特征具有可检测和可归因的影响,并且这一特征变化主要源于温室气体强迫的贡献,而人为气溶胶强迫则部分抵消了温室气体强迫的作用(Ma等, 2017). 针对中国地区强降水事件的增加趋势,人类活动和温室气体强迫对此也具有可检测和可归因的影响(Li H X等, 2017; Lu等, 2020).

气候变化检测和归因研究传统上多关注极端事件的长期变化. 近年来,国际上针对重大极端天气/气候事件的归因研究进入了快速发展阶段. 自2012年以来,美国气象学会会刊(BAMS)每年都出版一期专刊,对过去一年全球发生的高影响极端天气/气候事件进行归因分析. 在2012~2016年5期专刊中,约65%的归因研究发现人类活动造成的气候变化对所分析的极端事件频率或强度有显著影响,在这些关注的极端事件中热浪占28%,强降水占23%,干旱占16%(Herring等, 2018). 中国的极端事件归因研究也发展很快,在不到10年间,经历了从无到有、再到快速发展的过程. 例如,关于中国极端降水事件,针对2015年5月中国东南部极端降水事件、2018年夏季中国中西部地区的持续性强降水事件等多个事件的归因研究,均表明人类活动对于不同尺度的极端强降水事件具有不同的、但能够显著检测到的影响(如Burke等, 2016; Sun和Miao, 2018; Zhang等, 2020). 对于持续时间短、日尺度的极端降水事件,人类活动增加了这类极端强降水事件的发生概率,原因是增温引起了大气水汽含量的增加(Burke等, 2016; Zhang等, 2020). 另一方面,对于持续时间长、累积雨量大的强降水事件,人类活动则有可能减少这类事件的发生概率,这与人为气溶胶排放引起的东亚夏季风环流整体减弱有关(Song等, 2014; Zhang等, 2020; 周天军等, 2020). 由此可见,人类活动对中国地区极端强

降水事件的变化具有显著影响,但不同外强迫因子的贡献不同.

2020年,中国经历了非同寻常的梅雨期,导致东部地区出现大范围的洪涝. 该年度的梅雨异常呈现出以下特点(图1): (1) 入梅时间早、持续时间长、暴雨日数多. 江南、长江中下游和江淮6月1日、9日和10日先后入梅,分别比常年偏早7、5和11天. (2) 入梅后南方地区暴雨天气频繁,平均暴雨日数比常年同期偏多40%,为1961年以来历史同期最多. (3) 暴雨过程持续时间长,如6月12~25日的暴雨过程持续两周,6月27日至7月12日的暴雨过程持续时间长达16天. (4) 梅雨期降水具有雨区重叠度高、累计雨量大、单日雨量大、极端性强等特点. 整个梅雨期,长江流域降水量为486.8mm,较常年同期偏多54%,为1961年以来历史同期最多(国家气候中心公众号, <https://mp.weixin.qq.com/s/jDvB-En0vd1PbR6CMKzhaQ>).

2020年梅雨异常因其巨大社会影响而备受关注,关于这次梅雨期降水异常的原因,由于它并非发生在传统上容易出现洪涝且机理认识比较充分的厄尔尼诺衰减年夏季(Wu等, 2009; Song和Zhou, 2014, 2015),因此,迅速成为摆在科学界面前的迫切需要回答的热点话题. 本文的目的是从极端事件归因的角度考察自然变率和人类活动对这次梅雨期极端降水的影响. 本文拟回答的关键科学问题包括: (1) 伴随着梅雨总降水异常,2020年夏季长江中下游极端降水的观测特征如何? (2) 外强迫对这次极端降水事件的发生概率有多少贡献? (3) 在未来气候增暖的背景下,类似事件发生的风险有何变化?

2 资料和方法

2.1 资料

本文用到的观测资料是逐日降水数据,来自中国气象局发布的699个台站观测资料(SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0; <http://data.cma.cn/>),时间跨度为1961年至2020年8月,并在使用前插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点上.

本文所使用的模式数据为第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)“检测归因模式比较计划”(DAMIP)的四组试验(Gillett等, 2016; 钱诚和张文霞, 2019)和“情景模式比较计划”(ScenarioMIP)的预估试验(O'Neill等,

图 1 2020年梅雨期(6~7月)降水异常

(a) 降水异常(单位: mm)和(b)降水异常百分比(单位: %)的空间分布; (c) 从2020年6月1日到7月31日, 梅雨雨带的时间演变. 填色表示110°~120°E纬向平均降水异常(单位: mm), 上、下两条虚线分别表征淮河、长江位置. (a)、(b)中的矩形表示长江中下游的区域定义(28°~32°N, 110°~120°E)

2016; 张丽霞等, 2019), 具体包括:

(1) 历史气候模拟试验(historical), 考虑自然强迫因子(包括太阳辐照度和火山气溶胶)和人为强迫因子(温室气体、气溶胶、土地利用)的变化;

(2) 仅包含自然强迫的历史气候模拟试验(hist-nat), 即只考虑太阳辐照度和火山气溶胶的变化;

(3) 仅包含温室气体强迫的历史气候模拟试验(hist-GHG);

(4) 仅包含人为气溶胶强迫的历史气候模拟试验(hist-aer);

(5) 低排放情景SSP1-2.6(ssp126)、中等排放情景SSP2-4.5(ssp245)和高排放情景SSP5-8.5(ssp585)共享社会经济路径下的预估试验.

在归因分析中, 我们首先通过比较historical和hist-nat试验来考察人为强迫的作用. 其中, 温室气体和人为气溶胶为两种主要的人为强迫因子. 为区分两者的作用, 我们通过比较historical和hist-aer(hist-GHG)试验的差异, 来估算温室气体(人为气溶胶)的影响. 这中间包括两点假设(以估算温室气体强迫为例进行说明): (1) historical和hist-aer两者的差异由温室气体和自然强迫作用主导, 其他外强迫(如臭氧、土地利用等)的作用较小; (2) 自然强迫对几十年时间尺度上强降水的发生概率影响较小. 对于假设(2), 经验证, 在本文所关注的几十年时间尺度上, 自然强迫下强降水并无长期趋势(图略), 因此不会影响强降水的发生概率, 故这一假设是较合理的.

历史气候模拟试验的覆盖时间为1961~2014年, 各单一强迫的历史气候模拟试验(hist-nat/hist-GHG/hist-aer)的覆盖时间为1961~2020年. 为了保证时间长度一致, 我们用SSP5-8.5共享社会经济路径下的预估试验将历史气候模拟试验延伸至2020年. 在分析未来风险变化时, 采用了SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下的远期预估2081~2100年.

基于目前DAMIP的数据提供情况, 本文使用了已经提供以上所有五组试验逐日降水数据的10个模式(表1), 每个模式的每组试验均使用第一个集成员, 并在分析前将所有模式数据插值成 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 格点上.

2.2 分析方法

为表征极端降水事件的特征, 参照Zhang等(2020)的方法, 本文把极端降水指数 $RxNday$ 定义为在夏季6~8月期间连续 N 天($N=1, 3, 7, 14, 21, 28$)的区域平均最大降水量, 计算时先求区域平均, 再求 $RxNday$. 根据持续时间的不同, 将极端降水分成两类事件: 一类是日尺度极端降水事件($Rx1day/Rx3day/Rx7day$); 另一类是持续性强降水事件($Rx14day/Rx21day/Rx28day$). 极端降水指数 $RxNday$ 此前已经在极端降水事件归因研究中得到广泛使用(Sun和Miao, 2018; Yuan等, 2018; Zhang等, 2020).

由于当前的气候模式在对降水量绝对值的模拟上多存在偏差, 因此, 进行归因分析时, 需要使用降水距平百分率, 目的是消除模式系统性偏差带来的影响(Sun等, 2019; Zhang等, 2020). 降水距平百分率为降水距平相对于气候平均态(1961~1990年)的百分比. 此外, 我们通过对观测和模式模拟结果进行Kolmogorov-Smirnoff检验(Wilks, 2006)来评估模式模拟的强降水变率的性能.

我们采用广义极值分布(GEV)来拟合极端降水指数的概率密度分布, 并采用风险比(Risk Ratio, RR)来度量在不同强迫下的极端事件的发生概率比值:

$$RR = P_1 / P_2, \quad (1)$$

其中, P_1 和 P_2 分别表示相应的极端事件在不同外强迫作用下的发生概率. 例如, 为估算人为强迫对观测中这类极端事件发生概率的影响, 令 P_1 和 P_2 分别为全强迫(historical试验)和自然强迫(hist-nat试验)下该事件的发生概率. 为估算这类事件在未来增暖背景下的发

表1 本文分析的10个CMIP6模式的基本信息

模式名称	模式机构/国家
ACCESS-ESM1-5	ACCESS/挪威
BCC-CSM2-MR	BCC/中国
CanESM5	CCCma/加拿大
CESM2	NCAR/美国
CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS/法国
FGOALS-g3	IAP/中国
GFDL-ESM4	NOAA GFDL/美国
IPSL-CM6A-LR	IPSL/法国
MIROC6	MIROC/日本
MRI-ESM2-0	MRI/日本

生风险变化, 令 P_1 和 P_2 分别表示预估和历史气候模拟(historical试验)中该事件的发生概率.

3 结果分析

3.1 2020年梅雨期长江流域异常降水的观测特征

由于此次梅雨过程具有持续时间长、暴雨日数多的特征, 我们从两个角度考察极端降水的特征: (1) 持续性强降水, 以连续数周的累积降水量表征($Rx14day/Rx21day/Rx28day$); (2) 极端日降水($Rx1day/Rx3day/Rx7day$). 如图2所示, 从日尺度到月尺度, 2020年夏季长江中下游流域的降水均显著偏多.

进一步从历史的角度(1961~2020年)考察2020年的异常状况, 我们计算区域平均($28^{\circ} \sim 32^{\circ}N$, $110^{\circ} \sim 120^{\circ}E$)的情况, 结果如图3所示, 观测中持续性强降水这一类指标在今年夏季的表现更为极端, 尤其是 $Rx28day$ 这一指标, 其异常值达到气候平均态的94%, 并且打破了自1961年来的历史观测记录(图3f). 相较于其他持续性降水指数($Rx21day$ 、 $Rx14day$), $Rx28day$ 在时间上基本对应整个梅雨期, 因此能更好地表征梅雨期整体降水的情况; 同时从定义上可以看出, $Rx28day$ 由于持续时间长, 故属于一种非常极端的指数, 更能体现累积雨量带来的影响, 而该极端事件指数破纪录, 则更凸显2020年梅雨降水的非同寻常. 因此, 后文我们重点分析 $Rx28day$ 这一指标的变化.

3.2 极端事件的归因分析

在利用气候模式结果对观测的极端事件进行归因

图 2 2020年夏季长江中下游流域发生RxNday极端强降水时降水异常空间分布

黑色框内为长江中下游流域, RxNday ($N=1, 3, 7, 14, 21, 28$), 即在6~8月期间出现最大连续 N 天区域平均降水量时, 相较于RxNday气候态(1961~1990年平均)的降水异常空间分布(单位: mm)

分析前, 需要针对模式的性能进行评估, 以考察基于模式数据进行归因的结果可信性。我们首先检查模式对夏季平均降水气候态的模拟。如图4所示, 10个CMIP6

模式的多模式集合平均能够较为合理地再现观测的夏季平均降水气候态, 这在空间分布特征和降水量值上都有体现(图4)。在我们重点关注的长江中下游流域,

图 3 1961~2020年长江中下游流域夏季(JJA) RxNday降水异常百分比的时间序列
RxNday ($N=1, 3, 7, 14, 21, 28$)

图 4 长江中下游流域夏季平均降水气候态的模式评估

(a)观测和(b)CMIP6多模式集合平均模拟的长江中下游流域(蓝色框内)夏季平均降水气候态的空间分布(单位: mm d^{-1}). (c) 观测、CMIP6多模式集合平均(MME)以及CMIP6各模式模拟的长江中下游流域区域夏季平均降水气候态(单位: mm d^{-1})

相较于观测值, 10个模式集合平均模拟的区域平均降水仅偏少2.3%.

我们进一步检验模式对夏季极端降水指数 Rx28day 气候态分布的模拟, 结果如图5所示, 10个 CMIP6 模式集合平均能够合理再现观测的 Rx28day 降水气候态的空间分布. 相较于观测, 10个模式集合平均模拟的区域平均 Rx28day 偏少0.24%.

对于此次强降水事件的归因, 本文重点考察人为强迫对极端事件发生概率的影响. 由于对极端事件的发生概率和风险比的估算都依赖于模式模拟的极端事件的概率分布, 因此, 需要进一步考察模式对 Rx28day

统计分布特征的模拟能力. 图6给出了长江中下游流域区域平均夏季 Rx28day 指数的时间序列及其概率密度分布(PDF). 对于距平百分率(即去除了模式模拟降水的气候态偏差), CMIP6 多模式集合能合理模拟出观测中 Rx28day 的概率密度分布, 观测数据和模拟结果的 PDF 服从同一分布(通过 K-S 显著性检验, P 值为 0.41) (图6b).

综上, 多模式集合能够合理模拟出长江中下游地区 Rx28day 的气候态分布及其变率的概率分布特征, 这为本文后面的归因研究奠定了可靠基础.

不同的外强迫对 Rx28day 极端事件的发生概率有

图5 长江中下游流域夏季 Rx28day 气候态的模式评估

同图4, 但为长江中下游流域夏季(JJA) Rx28day 气候平均态(单位: mm)

图6 1961~2020年长江中下游流域夏季Rx28day的时间序列和概率密度分布

(a) 1961~2020年长江中下游流域夏季Rx28day的时间序列, 黑线为观测结果, 红线为历史模拟试验多模式集合平均结果, 粉红色阴影为所有模式成员第5到第95百分位的不确定性范围, 观测和模拟的时间序列均进行了标准化处理(单位: %); (b) 基于GEV分布拟合的1961~2020年观测(黑色)和历史模拟试验(红色)模拟的Rx28day概率密度分布

何影响? 我们首先比较自然强迫和全强迫(即历史模拟试验)下Rx28day的概率密度分布变化(图7a, 红色和深蓝色曲线), 结果表明人为强迫使得PDF整体向左偏移, 即人为强迫使得Rx28day整体减小。在仅有自然强迫的条件下, 类似2020年梅雨期的长江中下游流域持续性强降水事件的发生概率为0.24%; 在人为强迫的影响下, 其发生概率减少到0.13%。因此, 在人为强迫下本次强降水事件的风险比(RR)为0.54。换言之, 人为强迫使得这类持续性强降水事件的发生概率减少了46%(第10到第90百分位不确定性范围22~62%)。

人为强迫主要由温室气体和人为气溶胶强迫构成。那么两者的相对贡献如何? 为定量估算温室气体强迫的影响, 比较historical和hist-aer试验(图7a, 红色和浅蓝色曲线), 前者与后者相比(即增加了温室气体强迫后), 强降水PDF右移, 类似的持续性强降水事件发生概率由0.09%增加到0.13%。换言之, 温室气体强迫使得这类事件的发生概率增加了44%。

为估算人为气溶胶的影响, 比较historical和hist-GHG试验(图7a, 红色和棕色曲线), 前者与后者相比(即增加了人为气溶胶强迫后), 强降水PDF左移, 这类极端事件发生概率由0.48%减少到0.13%。换言之, 人为气溶胶强迫使得这类事件的发生概率减少了73%。

综上, 通过对温室气体和气溶胶两种强迫因子的分离试验结果的分析, 表明温室气体有利于增加Rx28day极端事件的发生概率, 而人为气溶胶则减少了其发生概率, 二者相抵, 最终使得人为强迫下的净效果是这类极端事件发生概率减小。

如何来理解温室气体和人为气溶胶强迫对极端降

图7 基于GEV拟合估算的长江中下游流域夏季Rx28day(距平百分比)的概率密度分布

(a) 不同外强迫作用下历史模拟试验的结果, 包括历史全强迫试验(红色)、自然强迫试验(深蓝色)、气溶胶强迫试验(浅蓝色)、温室气体强迫试验(棕色)。历史模拟试验及各单一强迫试验的结果, 均为10个模式集合成员在1961~2020年的模拟结果, 共600个样本。(b) 全强迫作用下历史模拟试验(黑色)、SSP1-2.6(棕色)、SSP2-4.5(红色)和SSP5-8.5(紫色)情景的2081~2100年预估结果。虚线为2020年长江中下游流域夏季Rx28day的观测值

水的不同影响? 在温室气体强迫下, 全球气温升高, 按照克拉珀龙-克劳修斯方程的关系, 大气水汽含量增加, 增温所引起的大气水汽含量增加将有利于强降水的增加, 这一特征从整层大气水汽含量和Rx28day降水指数气候态变化上都得到清晰的体现, 在东亚区域都表现为增强(图8b、图9b)。人为气溶胶强迫的作用,

主要表现为对持续性强降水发生的抑制作用(图8c), 这与已有研究指出人为气溶胶排放能够减弱东亚夏季风降水是一致的(Jiang等, 2013, 2015; Lau, 2016; 周天军等, 2020)。具体而言, 人为气溶胶对大气有降温作用, 这一方面减少了大气水汽含量(图9c), 从热力角度减小了降水强度; 另一方面, 从动力响应的角度, 局地温

图 8 不同试验中Rx28day降水平均态的差异以及未来不同排放情景下Rx28day降水平均态较之当代气候的变化

(a) 全强迫(historical)与自然强迫(hist-nat)试验中Rx28day降水平均态的差异, 表示人为强迫的影响; (b) 全强迫(historical)与人为气溶胶强迫(hist-aer)试验中Rx28day降水平均态的差异, 表示温室气体的影响; (c) 全强迫(historical)与温室气体强迫(hist-GHG)试验中Rx28day降水平均态的差异, 表示人为气溶胶的影响; (d)-(f) SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5排放情景下Rx28day降水平均态较之当代气候的变化。单位: 均表示为相对于全强迫试验当代气候的百分比, 黑色打点区域表示超过70%的模式与多模式集合平均结果同号

图9 同图8, 但为不同试验以及不同情景下夏季(6~8月)平均大气可降水量(即整层积分的大气水汽含量)的变化
单位: 均表示为相对于全强迫试验当代气候的百分比

度冷距平能够进而通过减弱海陆热力梯度, 使得东亚夏季风环流减弱, 这从动力上也不利于强降水事件的发生(Song等, 2014; 吴国雄等, 2015; Li Z等, 2017; 周天军等, 2020).

此外, 比较图8a~8c, 可以看到温室气体和气溶胶作用的净效果是Rx28day减少, 即气溶胶的强迫作用大于温室气体, 特别是在长江中下游及其以南地区, 这与图7的极端降水发生概率的变化结果相一致. 比

较图9a~9c, 可以看到单就大气可降水量的变化来说, 温室气体的影响其实要大于人为气溶胶, 因为净的效果是大气可降水量表现为正距平, 这意味着热力作用自身不足以来完全解释Rx28day的变化, 人为气溶胶的影响更多地是通过动力作用来调控季风环流的变化而最终影响极端降水。

3.3 极端事件的未来风险变化

上文归因分析表明, 温室气体有利于增加Rx28day极端事件的发生概率。那么, 随着未来温室气体排放的增加和人为气溶胶的减排, 全球温度将继续升高, 在未来增暖背景下, 类似2020年夏季这类极端强降水事件的发生概率会如何变化? 为回答这一问题, 我们进一步考察了低排放情景SSP1-2.6、中等排放情景SSP2-4.5和高排放情景SSP5-8.5预估试验中21世纪末Rx28day的变化(图7b)。结果表明, 在三种不同排放情景下, 随着未来全球温度的升高, 大气水汽含量亦相应增加(图9d~9f), 最终令Rx28day降水强度将增加(图8d~8f), PDF分布将向大值偏移(图7b)。从统计的角度, 在SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下, 到21世纪末(2081~2100年), 长江中下游流域类似2020年夏季这样的持续性强降水事件的发生概率均将显著增加(图7b), 其发生概率分别约为当前气候态下的4.6、13.6和27.7倍(第10到第90百分位不确定性范围分别为2.9~7.3、6.9~21.0和4.6~47.9)。因此, 未来排放情景所对应的温室气体排放越多, 全球升温幅度越强, 则类似2020年夏季的长江中下游流域极端强降水事件的发生风险就越高。

Rx28day表征的是一种非常极端的情况。在观测中, Rx14day指数在2020年也很突出(图3d)。那么从历史归因和未来预估的角度, Rx14day指数的变化与Rx28day有何异同? 对应图7, 我们在图10中给出了Rx14day的结果。可见不管是历史归因还是未来预估, Rx14day的情况和Rx28day类似: 在历史归因中, 人为强迫使得2020年夏季长江中下游流域持续性强降水(Rx14day)事件的发生概率减小了63%。其中, 温室气体的作用是令类似的极端事件发生概率增加2.5%, 而人为气溶胶的作用则是令其发生概率减少67%。在未来预估中, 在SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下, 类似的持续性强降水(Rx14day)事件的发生概率将持续增加, 到21世纪末(2081~2100年), 其发生概率分别约为当前气候态下的5.9、7.2和18.4倍。

图10 基于GEV拟合估算的长江中下游流域夏季Rx14day (距平百分比)的概率密度分布

(a) 不同外强迫作用下历史模拟试验的结果, 包括历史全强迫试验(红色)、自然强迫试验(深蓝色)、气溶胶强迫试验(浅蓝色)、温室气体强迫试验(棕色)。历史模拟试验及各单一强迫试验的结果, 均为10个模式集合成员在1961~2020年的模拟结果, 共600个样本。(b) 全强迫作用下历史模拟试验(黑色)、SSP1-2.6(棕色)、SSP2-4.5(红色)和SSP5-8.5(紫色)情景的2081~2100年预估结果。虚线为2020年长江中下游流域夏季Rx14day的观测值

4 结论

2020年夏季我国经历了一场非同寻常的梅雨季, 其入梅时间早、持续时间长、且暴雨日数多。分析表明, 梅雨期累积降水以及从日尺度到月尺度的极端降水指标, 均较气候平均态显著偏多, 特别是持续性强降水(Rx28day)较气候平均态偏多94%, 打破了自1961年来的历史观测记录。围绕着人为强迫因子对此次梅雨期极端降水的影响, 本文利用CMIP6“检测归因模式比较计划”(DAMIP)的多模式模拟试验, 从极端事件归因的角度, 定量估算了不同外强迫的影响。在此基础上, 分析了不同共享社会经济路径下这类极端事件的未来发生风险变化。主要结论如下:

(1) 人为强迫使得2020年夏季长江中下游流域持续性强降水(Rx28day)事件的发生概率减小了46%(第10到第90百分位不确定性范围22~62%)。其中, 温室气体有利于增加Rx28day极端事件的发生概率(44%), 原因是增温导致大气水汽含量增加; 而人为气溶胶则显著减少了这类强降水的发生概率(73%), 原因是气溶胶的降温效应引起大气水汽含量减少, 同时东亚季风环流减弱。温室气体和人为气溶胶的作用彼此相抵, 最终使得人为强迫下的净效果是这类极端事件发生概率减小。

(2) 未来随着温室气体排放的增多和人为气溶胶的减排, 长江中下游流域类似2020年夏季这样的持续性强降水事件的发生概率将持续增加, 但增加的幅度依赖于发展路径的选择。在低排放情景SSP1-2.6、中等排放情景SSP2-4.5和高排放情景SSP5-8.5下, 到21世纪末(2081~2100年), 其发生概率分别约为当前气候下的4.6、13.6和27.7倍(第10到第90百分位不确定性范围分别为2.9~7.3、6.9~21.0和4.6~47.9)。

本文的事件归因研究表明, 人为强迫对极端降水事件的影响直接依赖于外强迫因子的组成(主要是温室气体和人为气溶胶强迫), 而且这一结论不依赖于极端降水指标的选取, 因为针对Rx14day指数的结果, 都定性地支持Rx28day指数的结果。对不同人为强迫因子的分离有助于更好地理解归因结果, 并基于此来理解未来预估的变化。在不同的气候预估情景下, 由于未来人为强迫因子的构成将发生变化, 故当前气候下的归因结果并不能直接作为未来预估的参考。未来随着温室气体浓度的升高和人为气溶胶的减排, 类似2020年夏季长江中下游流域极端强降水事件的发生风险将持续增加。温室气体浓度越高, 这类极端降水事件的发生风险越高。因此, 采取有效的温室气体减排措施, 早日实现碳达峰和碳中和, 有利于减缓极端降水对社会和经济的影响。

最后需要说明的是, 本文基于CMIP6耦合模式模拟试验的分析具有一定的局限性: 一是本文采用的风险比归因方法中, 采用了1961~2020年的外强迫条件而并非针对2020年; 二是模式的样本数目较为有限。未来有待采用事件归因中经常采用的、基于较高分辨率的大气环流模式的超级集合归因模拟试验, 来进一步开展深入研究。

参考文献

- 钱诚, 张文霞. 2019. CMIP6检测归因模式比较计划(DAMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 15: 469–475
- 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 张小曳, 张人禾, 周天军, 李建平, 李剑东, 周德刚, 武亮, 周连童, 何编, 黄荣辉. 2015. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展. 中国科学: 地球科学, 45: 1609–1627
- 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. 2019. CMIP6情景模式比较计划(Scenario-MIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 15: 519–525
- 周天军, 陈晓龙, 吴波. 2019. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题. 科学通报, 64: 1967–1974
- 周天军, 张文霞, 张丽霞, 张学斌, 钱云, 彭冬冬, 马双梅, 董步文. 2020. 人为气溶胶导致全球陆地季风区降水减少的动力和热力过程. 中国科学: 地球科学, 50: 1122–1137
- Burke C, Stott P, Ciavarella A, Sun Y. 2016. Attribution of extreme rainfall in southeast China during May 2015. *Bull Amer Meteorol Soc*, 97: S92–S96
- Gillett N P, Shiogama H, Funke B, Hegerl G, Knutti R, Matthes K, Santer B D, Stone D, Tebaldi C. 2016. The detection and attribution model intercomparison project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6. *Geosci Model Dev*, 9: 3685–3697
- Herring S C, Christidis N, Hoell A, Kossin J P, Schreck III C J, Stott P A. 2018. Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. *Bull Amer Meteorol Soc*, 99: S1–S157
- IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In: Field C B, Barros V, Stocker T F, Qin D, Dokken D J, Ebi K L, Mastrandrea M D, Mach K J, Plattner G K, Allen S K, Tignor M, Midgley P M, eds. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 582
- Jiang Y, Liu X, Yang X Q, Wang M. 2013. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation. *Atmos Environ*, 70: 51–63
- Jiang Y, Yang X Q, Liu X. 2015. Seasonality in anthropogenic aerosol effects on East Asian climate simulated with CAM5. *J Geophys Res Atmos*, 120: 10,837–10,861
- Lau W K M. 2016. The aerosol-monsoon climate system of Asia: A new paradigm. *J Meteorol Res*, 30: 1–11
- Li H X, Chen H P, Wang H J. 2017. Effects of anthropogenic activity emerging as intensified extreme precipitation over China. *J Geophys Res Atmos*, 122: 6899–6914
- Li Z, Lau W K M, Ramanathan V, Wu G, Ding Y, Manoj M G, Liu J, Qian Y, Li J, Zhou T, Fan J, Rosenfeld D, Ming Y, Wang Y, Huang J, Wang B, Xu X, Lee S S, Cribb M, Zhang F, Yang X, Zhao C, Takemura T, Wang K, Xia X, Yin Y, Zhang H, Guo J, Zhai P M,

- Sugimoto N, Babu S S, Brasseur G P. 2017. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Rev Geophys*, 54: 866–929
- Lu C, Lott F C, Sun Y, Stott P A, Christidis N. 2020. Detectable anthropogenic influence on changes in summer precipitation in China. *J Clim*, 33: 5357–5369
- Ma S, Zhou T, Dai A, Han Z. 2015. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013. *J Clim*, 28: 6960–6978
- Ma S, Zhou T, Stone D A, Polson D, Dai A, Stott P A, von Storch H, Qian Y, Burke C, Wu P, Zou L, Ciavarella A. 2017. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over Eastern China. *J Clim*, 30: 1381–1396
- O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J F, Lowe J, Meehl G A, Moss R, Riahi K, Sanderson B M. 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 9: 3461–3482
- Seneviratne S I, Nicholls N, Easterling D, Goodess C M, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C, and Zhang X. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field C B, Barros V, Stocker T F, Qin D, Dokken D J, Ebi K L, Mastrandrea M D, Mach K J, Plattner G-K, Allen S K, Tignor M, Midgley P M, eds. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 109–230
- Song F, Zhou T. 2014. The climatology and interannual variability of East Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air-sea coupling improve the simulations? *J Clim*, 27: 8761–8777
- Song F, Zhou T. 2015. The crucial role of internal variability in modulating the decadal variation of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship during the twentieth century. *J Clim*, 28: 7093–7107
- Song F, Zhou T, Qian Y. 2014. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 41: 596–603
- Sun Q, Miao C. 2018. Extreme rainfall (R20mm, RX5day) in Yangtze-Huai, China, in June–July 2016: The role of ENSO and anthropogenic climate change. *Bull Amer Meteorol Soc*, 99: S102–S106
- Sun Y, Dong S, Hu T, Zhang X, Stott P. 2019. Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961. *Bull Amer Meteorol Soc*, 100: S79–S83
- Wilks D S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series, Vol. 91*. London: Elsevier Academic Press. 627
- Wu B, Zhou T, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. *J Clim*, 22: 2992–3005
- Yuan X, Wang S, Hu Z Z. 2018. Do climate change and El Niño increase likelihood of Yangtze River extreme rainfall? *Bull Amer Meteorol Soc*, 99: S113–S117
- Zhang W, Li W, Zhu L, Ma Y, Yang L, Lott F C, Li C, Dong S, Tett S F B, Dong B, Sun Y. 2020. Anthropogenic influence on 2018 summer persistent heavy rainfall in central western China. *Bull Amer Meteorol Soc*, 101: S65–S70

(特邀编委: 杨修群)