

《巴黎协定》排放情景下中亚地区降水变化响应

王芳¹, 张晋韬^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为了应对全球气候变化,《巴黎协定》提出各国将以“国家自主贡献”(INDC)的方式参与全球温室气体减排行动,而在“国家自主贡献”排放目标情景下区域降水变化的格局和特征尚不清楚。中亚地区位于欧亚大陆腹地,是中国“一带一路”倡议发展的关键地区。本文研究了中亚地区的降水变化对全球INDC排放的响应,基于参与国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的33个全球气候模式的模拟。结果表明:在INDC目标情景下,到21世纪末中亚地区的平均年降水量相对现代水平(1985—2005年平均)增加10.6%(4.6%~13.3%),其中高纬度地区的响应大于低纬度地区。进一步看,中亚地区极端强降水事件随着气候变暖而持续增加,但极端持续干旱事件在不同区域呈现不同的变化趋势。考虑极端降水事件相关风险,极端强降水和持续干旱事件的人口暴露度在中亚大部分区域都增加,将全球温升控制在较低水平(如2.0℃或1.5℃)可显著降低暴露度。以上结果有助于增进对未来极端气候事件风险的认识,为中亚这一生态脆弱地区的气候变化的减缓与适应政策提供参考。

关键词: 国家自主贡献(INDC);降水;极端事件;持续干旱;暴露度

DOI: 10.11821/dlxb202001003

1 引言

为了应对全球气候变化,联合国气候变化框架公约于2015年底达成了全球气候变化《巴黎协定》,并于2016年11月正式生效^[1-2]。《巴黎协定》没有强制规定各国的温室气体排放量,而采取各国根据自身情况确定应对气候变化行动目标,以“国家自主贡献”(Intended Nationally Determined Contributions, INDC)的方式参与全球减排行动。截至2019年5月,共有192个国家向联合国提交了各自国家的INDC减排目标。INDC目标是通过自下而上方式,由各国根据自己国情现状和经济发展水平提出的,体现了各国的自主排放意愿,与以往自上而下的分配定额方式相比,该目标更具有可操作性^[3]。

未来几十年的国家温室气体排放是全球气候变化的关键决定因素。近年来有越来越多的研究者关注2.0℃(或1.5℃)温升^①水平下的极端天气气候事件变化趋势,以及将全球平均温升从2.0℃控制到1.5℃以后可以避免的影响^[4-8]。然而此类研究都基于理想化的假设以符合2.0℃(或1.5℃)温控目标^[9-11]。已有的基于国家自主贡献排放目标情景的

收稿日期: 2019-05-21; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20020202); 国家重点基础研究发展计划(2016YFA0602704); 国家自然科学基金项目(41771050) [Foundation: Strategic Leading Science and Technology Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20020202; National Key R&D Program of China, No.2016YFA0602704; National Natural Science Foundation of China, No.41771050]

作者简介: 王芳(1979-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事全球变化研究。E-mail: wangf@igsnr.ac.cn

① 如无特别说明, 本文中的温升均指全球平均温度相对工业革命前水平的升高。

研究结果还较少，且主要关注全球平均温度的响应^[9-12]，目前针对国家自主贡献排放目标情景下区域降水变化响应的研究还较少。

中亚地处欧亚大陆的“心脏地带”，资源丰富，是“一带一路”的关键区域。然而，这里是世界上最干旱的地区之一，常年干燥少雨，受气候变化的影响显著，温升显著高于全球平均水平^[13-14]，未来中亚地区生态环境与社会经济的各个方面均面临气候变化风险的重大威胁^[15-20]。目前针对中亚地区在《巴黎协定》国家自主贡献排放目标情景下区域气候变化响应的研究很少。本文利用参与国际耦合模式比较计划第五阶段（The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5）的33个全球气候模式，采用多模式集合评估的方法，研究中亚地区平均降水及极端降水对于全球国家自主贡献排放的响应，考虑到气候变化可能造成的社会经济方面的影响，本文还预估了国家自主贡献排放情景下中亚地区极端降水事件的风险。

2 数据和方法

2.1 情景

本文分析了两大类排放情景，一类是《巴黎协定》下的温控目标情景，即全球2.0℃和1.5℃温升目标情景；另一类是国家自主贡献排放目标情景，即INDC目标情景。全球2.0℃温升目标情景来自IPCC第五次评估报告情景数据库，全球1.5℃温升目标情景来自IPCC 1.5℃特别评估报告^[21-22]。INDC目标情景则是来自192个国家提交的“国家自主贡献预案（INDCs）”报告^[23]。本文分析了截至2019年5月提交的165项国家INDC报告（其中欧盟成员国作为整体提交了一项），对各国INDC内容按照类别进行梳理，建立各国INDC原始信息数据库，如减排形式、参考年、承诺年、排放量计算方法、覆盖气体范围等，提取出涉及温室气体排放的指标数据，如温室气体绝对排放量、排放强度、基准年排放量等。由于各国给出的减缓指标的形式、目标、覆盖气体等存在较大差异，因此对各类指标进行归一化处理，计算出每个国家截至2030年的温室气体排放量（图1a）。

为进一步推求国家自主贡献方案下整个21世纪的全球温室气体排放量，首先加和上述各国数据得出未来截至2030年的全球温室气体排放量；然后根据国家自主贡献的排放量变化趋势，将INDC目标情景延长至2100年。假设2030年之后各国延续国家INDC承

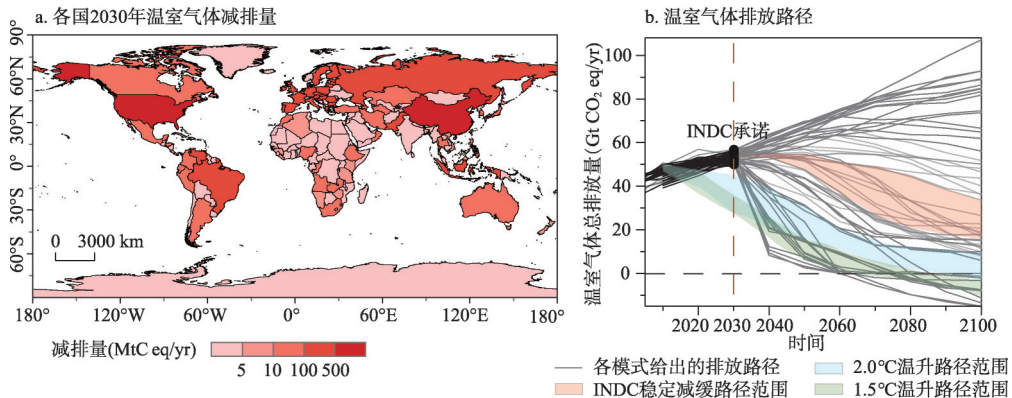


图1 全球自主贡献排放目标情景下温室气体排放路径

Fig. 1 Global greenhouse gas (GHG) emissions for INDC scenarios

诺的减缓力度,全球排放量在2030年之后遵循相对恒定的脱碳率。通过考虑脱碳率、碳捕获和储存技术(carbon capture and storage, CCS)、能源结构改进以及碳中和时间等因素,对IPCC第五次评估报告情景数据库(<https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/>)中28个社会经济模型的未来排放模拟结果进行分析(图1b)。本文选取了符合“2030年温室气体排放水平与INDCs(50~56 Gt CO₂ eq/yr)相一致”这一条件的情景。考虑到未来CCS的难度和不确定性,略去CCS > 15 Gt CO₂ eq/yr的情景。本文重点研究其中的INDCs持续减缓情景(图1b),这与Rogelj等^[10]、Wang等^[24]和CAT^[25]给出的“持续行动”路径相一致。

为求出上述INDCs持续减缓情景下的全球平均温升效应,一方面基于地球系统模式集合模拟的气候敏感度数据集给出了相关评估,具体研究方法见文献^[24, 26];另一方面还综合评估了近期相关研究给出的评估结果,如Rogelj等^[10]采用MAGICC模式给出INDC“持续行动”路径下21世纪末全球温升幅度的中位数为2.6~3.1℃,也有可能达到更高的温度变化。联合国环境规划署的《排放差距报告》认为^[11],如果全面实施国家自主贡献,按照2030年排放水平的估计值,则到2100年全球温升幅度可能在3~4℃(可能性超过66%)。Wang等^[26]基于CMIP5地球系统模式集合的模拟结果,指出INDC持续减缓路径下全球平均变暖可能达到3.2℃(2.6~4.3℃)。综合以上结果,本文确定将2.9~3.3℃(中位数3.1℃)作为INDC目标情景下21世纪末全球平均温升的最佳估计。

2.2 降水极值指数

极端降水事件的定义可基于绝对或相对阈值,前者是某一特定值,而后者是根据统计方法确定。本文对于极端降水的分析采用两个常用的气候极值指数^[33](表1)。其中连续5 d最大降水量(Rx5day)可以较好地表征极端强降水事件的强度,而最长连续无雨日数(CDD)代表着极端持续干期事件,需要指出CDD不能直接表征水文干旱或农业干旱。已有的研究表明在较大的时空尺度上,Rx5day(CDD)的计算结果与复杂的洪涝(干旱)指标相比仍具有较强的一致性,故Rx5day(CDD)在一定程度上也可反映洪涝(干旱)的风险^[34-36]。

为了进一步分析极端事件的变化特征,基于现代气候期的均值和标准差对每一格点的降水极值指数进行标准化,每个情景下区域内各点的标准化Z得分都构成一个分布,可画出概率密度曲线。本文还引入概率比(risk ratio, RR)表征严重极端事件的发生概率:

$$RR = \frac{P_1}{P_0} \quad (1)$$

式中: P_0 表示在现代气候期极端事件发生的概率(统一取5%,表示严重的极端强降水或持续干期事件); P_1 表示未来某情景下现代气候期5%极端事件发生的概率。当 $RR > 1$ 时表示严重极端事件发生的风险增加, $RR = 1$ 表示严重极端事件发生的风险不变, $RR < 1$ 表示严重极端事件发生的风险减少。

2.3 模式数据

气候系统模式是未来气候预估的重要工具,CMIP5代表着当今模式发展的前沿^[27]。本文使用了33个CMIP5全球气候模式的日值模拟结果数据集(Historical历史模拟和RCP 8.5未来预估模拟)(表2)。由于CMIP5的各模式在动力框架、物理过程参数化和空间分辨率等方面均各有特色,模拟结果不尽相同,本文采用等权重的多模式集合平均的

表1 本文所用降水极值指数的定义

Tab. 1 Definitions of extreme precipitation indices used in this study

极值指数名称	定义	单位
极端强降水量(Rx5day)	连续5 d最大降水量	mm
持续干期(CDD)	最长连续无雨日(日降水 < 1 mm)数	d

表 2 本研究使用的 33 个 CMIP5 全球气候模式的基本信息

Tab. 2 Basic information of 33 GCMs in CMIP5

模式名称	机构名称	国家	水平分辨率 (全球网格数)
ACCESS1-0	澳大利亚联邦科学与工业研究组织/气象局	澳大利亚	192×145
ACCESS1-3			192×145
BCC-CSM1-1	中国气象局国家气候中心	中国	128×64
BCC-CSM1-1-m			320×160
BNU-ESM	北京师范大学	中国	128×64
CanESM2	加拿大气候模拟与分析中心	加拿大	128×64
CCSM4	美国国家大气研究中心	美国	288×192
CESM1-BGC			288×192
CMCC-CESM	意大利地中海气候中心	意大利	96×96
CMCC-CM			480×240
CMCC-CMS			192×96
CNRM-CM5	法国气象研究中心	法国	256×128
CSIRO-Mk3-6-0	澳大利亚联邦科学与工业研究组织/昆士兰洲气候变化研究中心	澳大利亚	192×96
EC-EARTH	EC-EARTH 研究联合体	荷兰/冰岛	320×160
FGOALS-g2	中国科学院大气物理研究所	中国	128×60
FGOALS-s2			128×108
GFDL-CM3	美国地球物理流体动力学实验室	美国	144×90
GFDL-ESM2G			144×90
GFDL-ESM2M			144×90
HadGEM2-CC	英国哈德莱气象中心	英国	192×145
HadGEM2-ES			192×145
INM-CM4	俄罗斯科学院计算数学研究所	俄罗斯	180×120
IPSL-CM5A-LR	法国 Pierre Simon 物理学研究所	法国	96×96
IPSL-CM5A-MR			144×143
IPSL-CM5B-LR			96×96
MIROC5	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	日本	256×128
MIROC-ESM			128×64
MIROC-ESM-CHEM			128×64
MPI-ESM-LR	德国普朗克气象研究所	德国	192×96
MPI-ESM-MR			192×96
MRI-CGCM3	日本气象研究所	日本	320×160
MRI-ESM1			320×160
NorESM1-M	挪威气候中心	挪威	144×96

方法以消除单一模式的不确定性,得到更可靠的气候变化的信号^[28-29]。为便于多模式集合分析,各模式在中亚地区的结果都统一用双线性法插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格网上。

研究区域是中亚(CA),包括哈萨克斯坦(KAZ)、乌兹别克斯坦(UZB)、土库曼斯坦(TKM)、吉尔吉斯斯坦(KGZ)和塔吉克斯坦(TJK)五国(图2)。本文涉及的温升阈值均是指全球平均温度相对于工业革命前水平(1861—1900年平均)的升高量,而现代气候期定义为1985—2005年。

为验证上述 CMIP5 模式对中亚地区降水及其极值的模拟能力,选取 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的全球降水气候学中心 (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) 格点化降水观测数据产品^[30]对 CMIP5 模式集合平均历史模拟结果进行检验。结果表明,33 个 CMIP5 模式的集合平均可以较好地再现中亚大部分区域的平均年降水量、Rx5day 和 CDD 变化趋势 (图 3),但在上述指标的绝对数值还存在一些系统性偏差;CMIP5 模式的集合平均可以基本正确地模拟出中亚平均年降水量、Rx5day 和 CDD 的空间格局,但还难以刻画观测结果中的部分细节。

为分析某一温升阈值 (情景) 下的气候响应,本文采用“时间切片法”^[5, 31-32]: 对于每个模式的全球平均温度序列作 21 年的滑动平均 (目的是去除气候系统的内部变率以突出长期变化趋势),每 21 年的平均值看作该时段中心年 (即该时段的第 11 年) 对应温升水平下的气候态,以此计算得各模式相对工业革命前水平的温升值,相应地确定达到某一温升阈值 (本文讨论 INDC、2.0 °C 和 1.5 °C 温升目标情景) 的时段,即可从 CMIP5 模式数据集中截取该温升阈值下的气候响应特征。对每个模式分别计算指定气候态下相对现代的降水变化,再作等权重的多模式集合平均。除了多模式平均的结果,各模式结果之间的分歧程度也在下文的分析中以置信区间表征。对于除温度以外的其他气候变量,作类似的滑动平均处理也可将其与全球平均温升水平联系起来。

2.4 暴露度

根据 IPCC 报告第二工作组提出的分析框架,气候变化 (这里主要指极端天气气候事件) 的风险可以看作是极端事件本身、社会经济系统的脆弱性及其对这种极端事件的暴露度的综合^[37]。极值指数 (例如 Rx5day 和 CDD) 是极端降水事件强度的表征,而那些“危险的”极端事件通常基于重现期来定义: 例如所谓 20 年一遇的暴雨,对应的是一场在历史上出现概率为 5% 的暴雨。极值统计理论有助于分析未来 N 年一遇的极端降水事件出现的可能性大小,即可看作是社会经济系统对于这种“危险的”极端事件的暴露度。

Rx5day 和 CDD 指数的概率分布均可近似地由广义极值分布 (Generalized extreme value distribution, GEV) 表示^[38], GEV 的分布函数为:

$$F(x; \mu, \sigma, \zeta) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right], & \zeta = 0 \\ \exp\left[-\left(1 + \zeta \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\zeta}}\right], & \zeta \neq 0, 1 + \zeta \frac{x-\mu}{\sigma} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为位置参数; σ 为尺度参数; ζ 为形状参数。对于 Rx5day 或 CDD 指数,在每个格点上基于历史时期 (1961—2005 年) 的模拟数据,用最大似然法确定 GEV 分布的参数, N 年一遇极端事件的阈值也随之确定,随后将该阈值与未来时期的指数值模拟结果相比较,根据未来时期指数值超过阈值的格点数目即可估算出未来某情景下超过 N 年重现期阈值的极端事件的区域或人口暴露度。2016 年 Jones 和 O'Neill 发表的不同共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 下的 21 世纪末 (2100 年) 人口分布预测结果

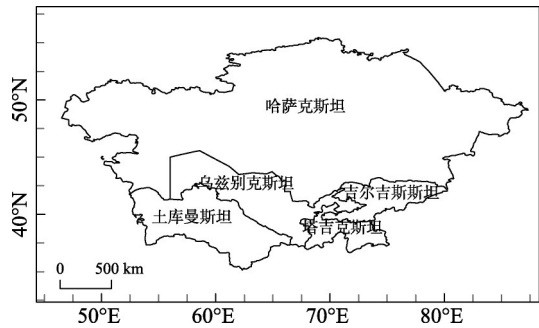
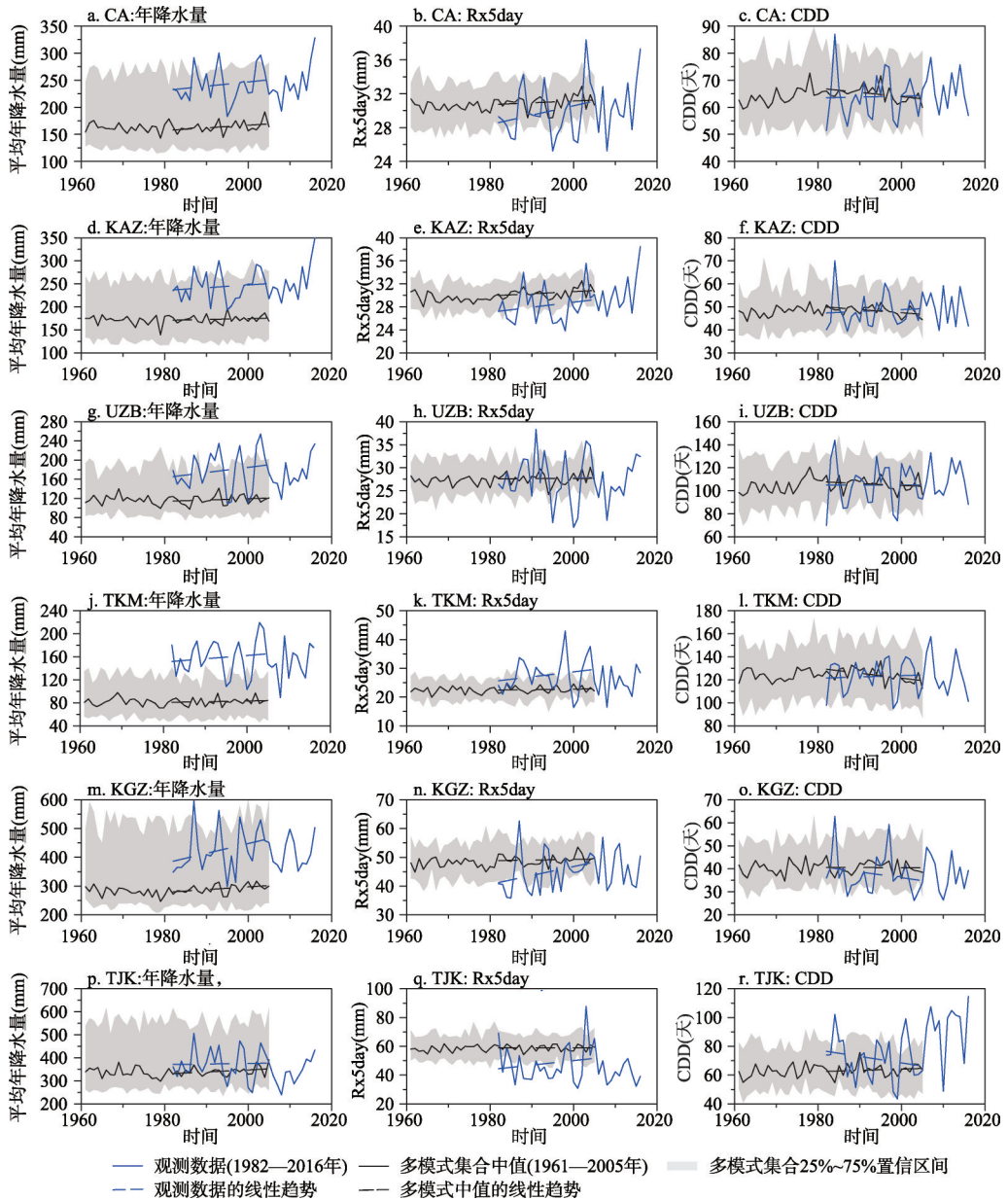


图2 中亚五国地理位置

Fig. 2 Geographic location of the five countries in Central Asia



注：观测数据(1982—2016年)来自GPCC数据集^[30]，计算线性趋势时仅使用两段序列的公共部分(1982—2005年)。

图3 观测与模拟的中亚及各国区域平均的年降水量、Rx5day和CDD时间序列

Fig. 3 Time series of regional mean annual precipitation, Rx5day and CDD over Central Asia and the five countries, a comparison of GPCP observed data and CMIP5 simulated data

在本研究中被用于估算人口暴露度^[39]。

此外，本文还探讨在与不同的减排政策相对应的较低温升水平（例如 2.0 °C 或 1.5 °C）下可避免的影响。首先将这种影响量化为某温升水平 k 与现代气候期之间的暴露度差异，表示为如下的比例：

$$\text{Impacts}(k) = \frac{E_k - E_{\text{present}}}{E_{\text{present}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 表示暴露度; k 表示不同的温升水平 (情景), 即 1.5 °C 温升、2.0 °C 温升和 INDC 目标情景。两种不同情景下的 $\text{Impacts}(k)$ 之差即控制在较低温升水平下可避免的影响。

3 结果分析

3.1 中亚地区平均年降水量的变化

中亚地区的气候干燥, 除东南部边缘山地外, 全区的平均年降水量均小于 400 mm, 乌兹别克斯坦西部和土库曼斯坦大部的沙漠地带是降水量的低值中心, 在中西部平原区, 随着纬度增加, 平均年降水量呈增加趋势 (图 4)。

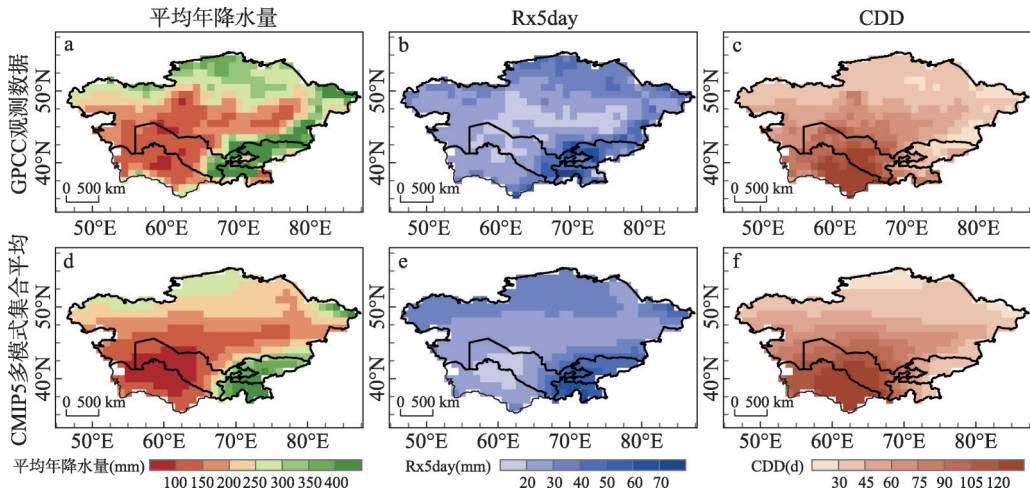


图 4 中亚平均年降水量、Rx5day 和 CDD 现代气候的空间分布

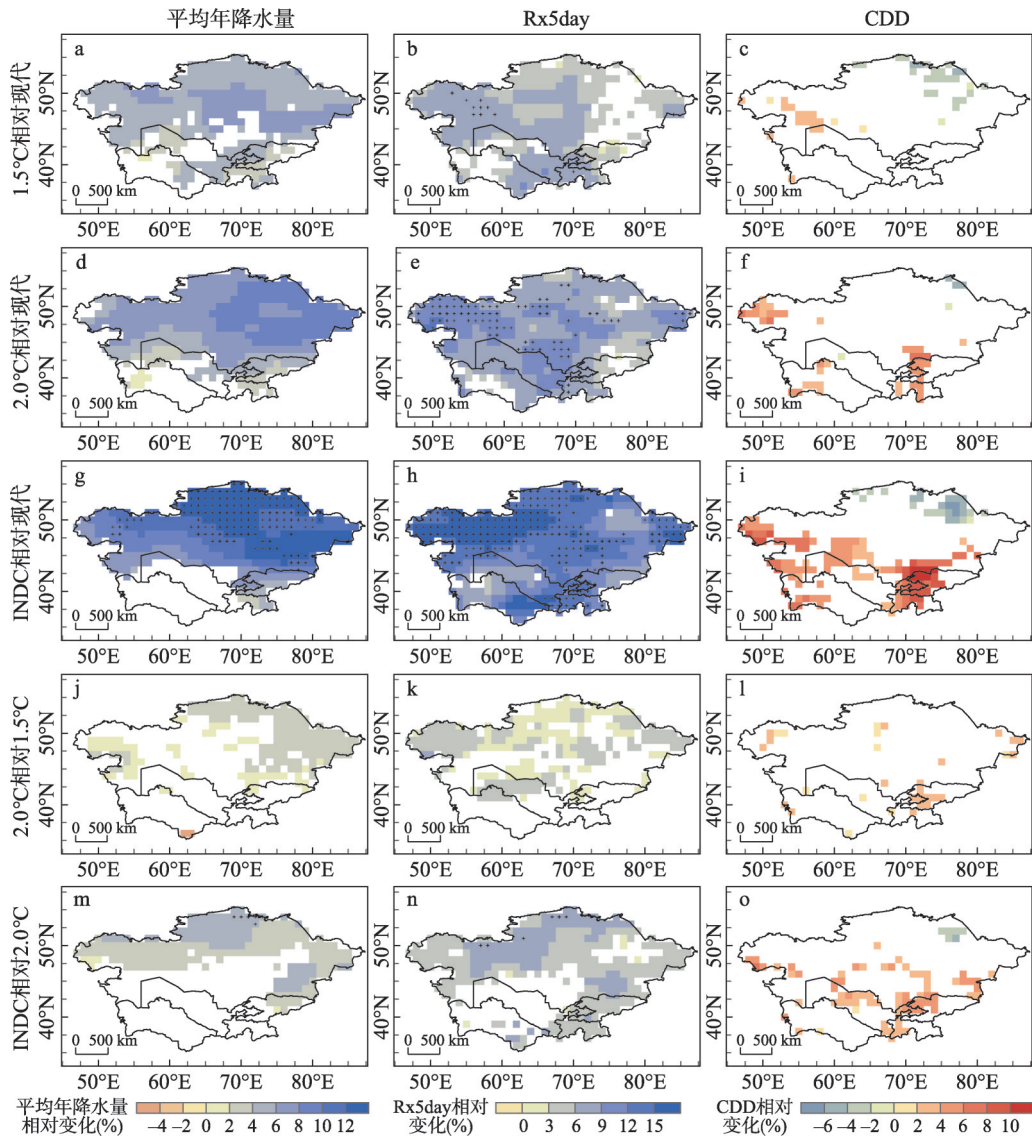
Fig. 4 Spatial pattern of present climatology of annual mean precipitation, Rx5day, and CDD over Central Asia, based on GPCCC data and multi-model ensemble mean from CMIP5

未来各情景下中亚的平均年降水量均增加, 区域内高纬度地区的增加趋势更突出 (图 5)。按国别看, 仅哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦两国的降水量呈持续增加趋势, 其余各国降水量的增减变化尚存在分歧 (图 6)。在 1.5 °C 温升、2.0 °C 温升和 INDC 目标情景下, 全区平均年降水量相对现代气候期分别增加 4.6% (0.9%~7.7%, 25%~75% 置信区间, 下同)、5.8% (1.5%~9.4%) 和 10.6% (4.6%~13.3%), 哈萨克斯坦北部是增加最大的区域, 可达 10% 以上 (INDC 目标情景相对于现代气候期), 而多模式对于乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的未来平均年降水量变化的预估有较大不确定性。除哈萨克斯坦北部外, 2.0 °C 温升与 1.5 °C 温升 (或 INDC 与 2.0 °C 温升) 两情景间的平均降水差异不甚显著。

3.2 中亚地区降水极值指数的变化

降水极值指数的现代气候态分布型与年平均降水较为相似。Rx5day 的高值中心出现在东南部帕米尔高原, 低值中心则位于乌兹别克斯坦与土库曼斯坦两国交界地带的沙漠, 相应地, 该区域也是 CDD 的高值中心。Rx5day 随纬度升高而增大, 而 CDD 呈减小趋势, 以上结果均一致地反映了中亚地区的干湿格局 (图 4)。

相比于平均年降水量, 极端强降水的变化更为显著, 随着全球变暖加剧, Rx5day 也持续增加。在 1.5 °C 温升、2.0 °C 温升和 INDC 目标情景下, 中亚全区 Rx5day 相对现代气候期分别增加 5.5% (2.3%~8.0%)、6.7% (5.0%~9.4%) 和 11.8% (9.5%~15.2%), 各国的



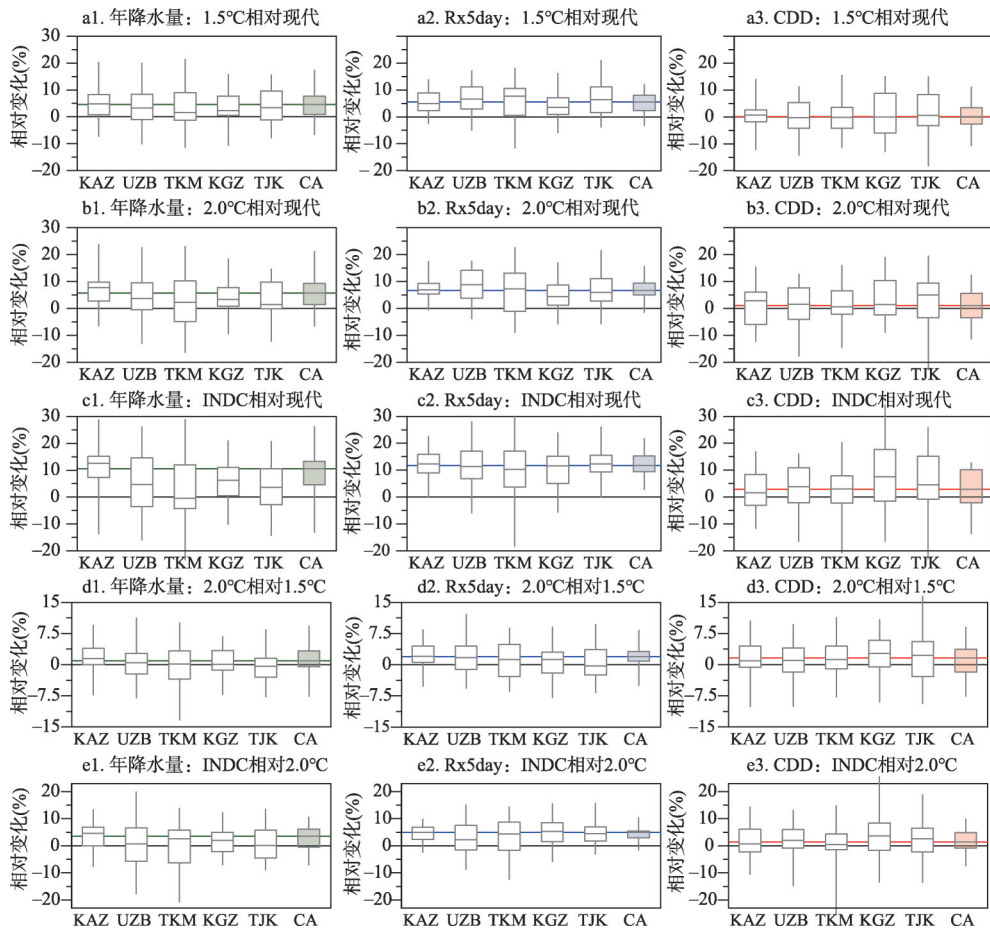
注：有颜色的区域表示至少66%的模式给出相同的变化趋势，加点的区域表示至少90%的模式给出相同的变化趋势。

图5 多模式集合平均的中亚平均年降水量、Rx5day和CDD各情景间的相对变化

Fig. 5 Relative changes in annual mean precipitation, Rx5day, and CDD over Central Asia, based on multi-model mean

Rx5day在未来各情景下也均呈现一致的增加趋势，仅幅度有差异。INDC与2.0℃温升两情景之间的差异比2.0℃与1.5℃温升两情景之间的更显著（图6）。Rx5day相对变化的高值呈多中心分布，哈萨克斯坦西部广大区域、东部边缘，以及区域南部乌兹别克斯坦与土库曼斯坦两国交界地带均有较突出的增加（INDC情景相对现代气候期可达15%以上）。其余区域Rx5day的增加也比平均年降水量的增加更为明显（图5）。

极端干旱事件的间接表征——持续干期的变化则相对复杂且充满不确定性。在区域平均层面，各国的CDD增减变化趋势都不甚显著，模式间的不确定性范围较其他指标更大（图6）。CDD增加比较显著的区域包括区域东部哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦交界地带，以及中西部的咸海、里海部分沿岸地区；而部分高纬度



注: 盒须图给出了多模式集合的25%~75%置信区间和中值、极小值、极大值; 彩色水平线表示整个中亚区域平均值。

图6 中亚区域及各国在不同情景下的平均年降水量、Rx5day和CDD的相对变化

Fig. 6 Regional average differences among different scenarios in the annual mean precipitation, Rx5day, and CDD changes in Central Asia and the five countries

地区CDD显著减小(图5)。CDD增大的热点区对应着中亚比较重要的农业区域(例如天山山麓、费尔干纳盆地), 这些区域人口和经济活动较为聚集, 未来持续干期增加所对应的气象干旱风险具有更严重的影响。

进一步分析极值指数的概率分布, 可以更全面揭示未来极端降水事件的变化情况(图7)。两个极值指数的概率密度曲线在不同情境下均没有显著移动, 但Rx5day的曲线随着全球变暖增强有变宽的趋势, 说明未来Rx5day的标准差增大, 右端高值出现的概率增加(可用RR表征), 中亚地区多模式平均的RR在1.5℃温升、2.0℃温升和INDC目标情景下分别为1.85、2.15和2.92, 各国的RR也都有类似的变化趋势, 仅幅度略有差异(表3)。上述变化在CDD指数上则体现得不甚显著, 各国各情景下RR值仅比1略大。对于那些严重(超过现代气候期5%阈值)的极端事件的概率, 极端强降水的增加比极端持续干期更为显著。

3.3 中亚地区暴露度的变化

为进一步分析与降水有关的极端天气气候事件对社会经济系统的潜在影响, 本文基于重现期(例如20年)定义“危险的”极端事件, 并基于极值统计理论估算未来不同情

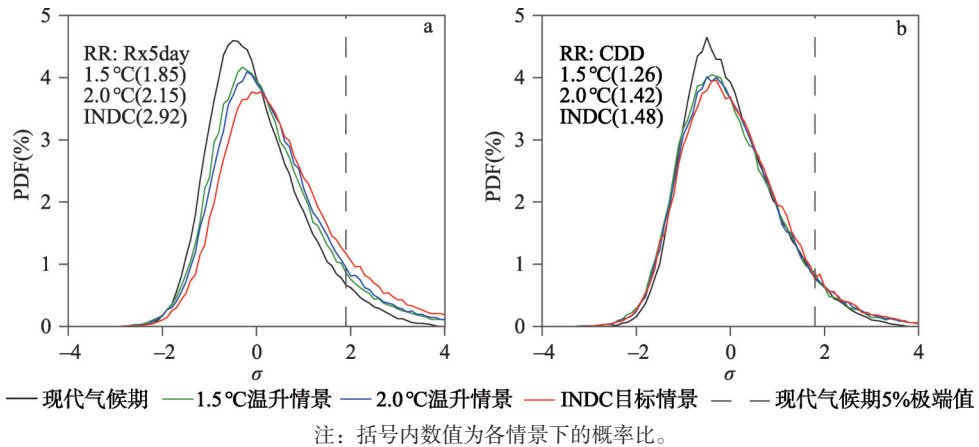


图7 中亚区域Rx5day和CDD的概率密度分布

Fig. 7 Probability density distribution of Rx5day and CDD over Central Asia

表3 中亚五国现代气候期中Rx5day和CDD指数5%事件在各情景下与现代气候期的概率比

Tab. 3 Risk ratio of 5% extreme value for Rx5day and CDD in the five countries of Central Asia

极值指数	目标情景	KAZ	UZB	TKM	KGZ	TJK
Rx5day	1.5 °C温升	1.68	1.87	1.77	1.59	1.75
	2.0 °C温升	2.09	1.94	1.81	1.96	2.02
	INDC	2.96	2.13	2.27	2.59	2.74
	1.5 °C温升	1.28	1.01	1.03	1.01	1.20
CDD	2.0 °C温升	1.41	1.10	1.34	1.32	1.33
	INDC	1.33	1.27	1.61	1.64	1.48

景下社会经济系统（可用人口表征）对这种极端事件的暴露度。这里只给出人口暴露度的结果。基于不同SSP情景的人口预测结果下得出结果都很相似，本文以SSP2（中间路径）情景下的结果为代表。

随着全球变暖的增强，中亚各国对极端强降水和持续干期事件的暴露度均有不同程度增加（图8）。例如，在现代气候期和1.5 °C温升、2.0 °C温升和INDC目标情景下中亚地区对超过20年一遇阈值的极端强降水的人口暴露度分别为6.1%（4.8%~7.5%）、9.9%（8.4%~12.9%）、11.1%（8.6%~14.1%）和14.8%（12.1%~19.2%）。对于超过20年一遇阈值的极端持续干期事件，上述情景下的暴露度分别6.0%（4.7%~7.6%）、6.8%（3.8%~8.6%）、7.7%（5.4%~9.2%）和9.0%（4.9%~13.8%）。两类事件的暴露度随全球平均温升的增加呈近似线性的关系，但极端强降水事件的暴露度的增长速率显著高于极端持续干期事件的，且后者的模式间不确定性范围更宽，表明模式对于极端持续干期事件的模拟能力较差。

如果加强减排行动，控制全球平均温升在较低水平，中亚各国对于极端强降水/持续干期事件的人口暴露度将下降。例如，在1.5 °C温升、2.0 °C温升和INDC目标情景下中亚地区对于超10年一遇阈值的极端强降水事件的人口暴露度分别为现代气候期的150%（126%~186%）、168%（134%~224%）和208%（179%~261%），较低温升水平可避免的影响则估算得21%（-1%~39%）（1.5 °C温升目标情景相对于2.0 °C温升目标情景）和36%（15%~67%）（2.0 °C温升目标情景相对于INDC目标情景）。类似地，对于超10年一

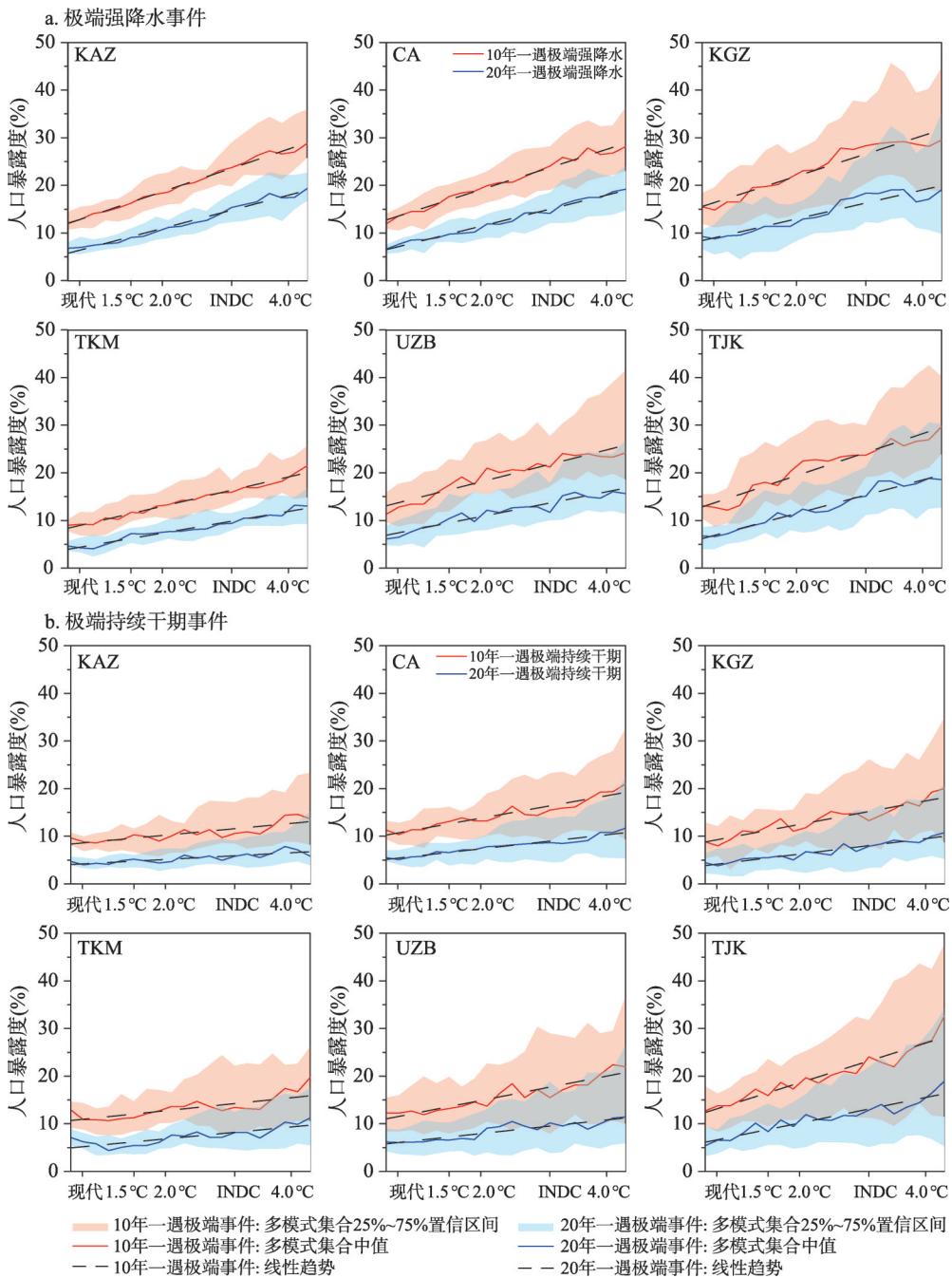
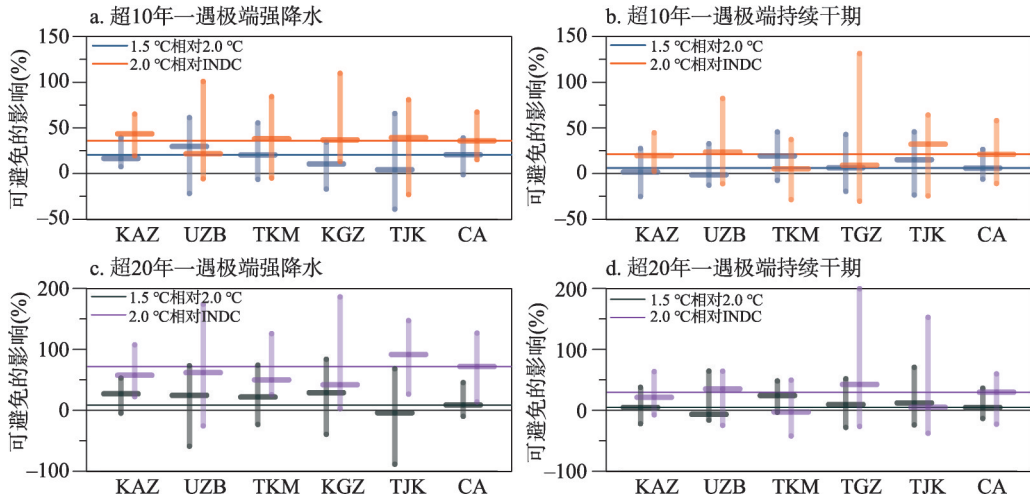


图8 中亚区域及五国在不同升温水平下对不同重现期水平的极端强降水和持续干期事件的人口暴露度
 Fig. 8 Population exposure to heavy precipitation (a) and dry spell (b) events of different RVs, at corresponding warming levels, over Central Asia and the five countries (labelled in top left corner)

遇阈值的极端持续干期事件, 可以估算出较低温升水平可避免的影响分别为6% (-6%~26%) (1.5 °C目标情景相对于2.0 °C温升目标情景) 和21% (-11%~58%) (2.0 °C温升目标情景相对于INDC目标情景)。总体上, 较低温升水平可避免的影响, 对于极端强降水事件更为显著, 而对于极端持续干期事件存在较大不确定性 (估算值的范围跨域正负区

间)。对于更强(即更高重现期水平)的极端降水事件,较低温升水平可避免的影响更加突出,例如对于超20年一遇阈值的极端强降水事件,在中亚地区可避免的影响分别为9%(-10%~45%)(1.5℃温升目标情景相对于2.0℃温升目标情景)和72%(14%~127%)(2.0℃温升目标情景相对于INDC目标情景)。大部分国家的估算结果均能体现出这一差异(图9)。



注:中心线和垂直线分别表示多模式集合中值和25%~75%置信区间。

图9 中亚区域及各国在较低温升水平下可以避免的不同强度的极端强降水和持续干旱事件的影响

Fig. 9 Changes in extreme heavy precipitation and dry spell avoided over Central Asia and the five countries in less warming scenarios

4 讨论

《巴黎协定》框架下的实际减排行动的气候响应是当前气候学领域的重要科学问题,已有的研究大多基于典型浓度路径情景^[40]或2.0℃(或1.5℃)温控目标,但这些都是理想化的假设,不能真实反映各国政府目前谈判达成的减排承诺。而本文是将气候谈判中达成的自主减排承诺作为未来气候预估的出发点。

本文基于33个CMIP5全球气候模式的模拟结果,分析《巴黎协定》框架下的国家自主减排行动的气候响应,发现在INDC目标情景下的气候变暖预计将大大超过《巴黎协定》将全球平均温升稳定在2.0℃(或1.5℃)以内的长期目标。而且在不同气候情景间对极端事件的暴露度的差异要大于气候平均态的差异。本文的分析结果表明,如果进一步加强全球减排力度以实现《巴黎协定》温控目标,可显著地减少区域洪涝和干旱风险。除了分析INDC目标情景下的结果,本文还给出了1.5℃温升目标情景下的结果,这些结果与2018年发布的IPCC 1.5℃特别报告第三章的对应内容相一致^[41]。由于本文的结果只涉及天气气候要素,未来气候变暖情景下的全球水循环如何演变,尤其是旱涝灾害风险和水资源量的变化趋势,仍是亟待解决的重大科学问题。

绝大部分的类似研究都是基于CMIP5模式输出结果,近期有少数针对2.0℃和1.5℃温控目标情景进行模拟试验的模式数据集发表,例如美国国家大气研究中心(NCAR)地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)低排放情景数据集^[42]、半度额外温升及其影响预估(Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts,

HAPPI)数据集^[7],但这些数据并不适用于本文所关注的INDC目标情景。由于已有的气候模式缺乏针对性的试验设计,很难依据现有模式的输出结果准确估计特定温升阈值下的气候平衡响应状态。

全球气候模式对于未来降水预估的不确定性比温度预估更突出^[43]。本文的部分结果显示模式间的不确定性范围较大,甚至跨越正负区间,难以得出可靠的结论。一方面,对于现有的全球气候模式,准确地模拟与降水有关的复杂物理过程仍是巨大的挑战;另一方面,多模式结果间的离散程度并不完全等同于模式结果的不确定性,由于各模式在动力框架、物理过程参数化等方面均有其特色,导致它们在某些方面模拟性能强而另一些方面性能弱,而通常在多模式集合分析的时候都是等权重的。

5 结论

基于33个全球气候模式的模拟结果,本文分析了国家自主贡献(INDC)目标情景下中亚地区未来降水及其极值的变化,同时也相应地给出了2.0℃和1.5℃温升目标情景下的结果。中亚的未来气候变化对不同排放情景的响应存在显著的区域差异,主要结论如下:

(1)相对于现代气候期(1985—2005年),在1.5℃温升、2.0℃温升和INDC目标情景下,中亚地区平均年降水量分别增加4.6%(0.9%~7.7%)、5.8%(1.5%~9.4%)和10.6%(4.6%~13.3%)。总体上随着全球变暖背景下,本区的降水会逐渐增加,高纬度地区的响应较低纬度地区更显著,而南部的乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的未来平均年降水量变化的预估有较大不确定性。

(2)随着全球变暖的增强,中亚地区的极端强降水事件强度将明显增加,其幅度大于平均降水的增加,各区域也均有比较显著的响应。但极端持续干期事件的变化则存在较大不确定性,多模式的结果间存在分歧。部分高纬度地区持续干期显著减少,但全区中部有多个区域持续干期呈增加显著趋势。

(3)中亚地区受“危险的”极端降水事件影响的人口随着气候变暖而增加,未来发生破纪录的极端强降水事件的风险大于极端持续干期事件。将全球平均温升控制在较低水平,对于超过10年一遇阈值的极端强降水事件,暴露度可以减少21%(-1%~39%)(1.5℃温升目标情景相对于2.0℃温升目标情景)和36%(15%~67%)(2.0℃温升目标情景相对于INDC目标情景);而对于相同水平的极端持续干期事件,暴露度仅可以减少6%(-6%~26%)(1.5℃温升目标情景相对于2.0℃温升目标情景)和21%(-11%~58%)(2.0℃温升目标情景相对于INDC目标情景)。对于更强的极端降水事件,这种较低温升水平能避免的影响(暴露度的减少量)将更显著。以上结果可为中亚这一生态脆弱地区的气候变化减缓与适应政策提供参考。

参考文献(References)

- [1] UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement: Proposal by the President. Geneva, 2015.
- [2] UNFCCC. Synthesis Report on the Aggregate Effect of the Intended Nationally Determined Contributions. Paris, 2015.
- [3] Gupta S, Tirpak D, Burger N, et al. Policies, instruments, and co-operative arrangements//Metz O B, Bosch P, Dave R, et al. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2007: 745-807.

- [4] Li Donghuan, Zou Liwei, Zhou Tianjun. Changes of extreme indices over China in response to 1.5 °C global warming projected by a regional climate model. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(4): 446-457. [李东欢, 邹立维, 周天军. 全球1.5 °C升温背景下中国极端事件变化的区域模式预估. *地球科学进展*, 2017, 32(4): 446-457.]
- [5] Hao Ying, Ma Jingjin, An Jingjin, et al. Projected changes in climate and river discharge in the Chaobai River Basin under 1.5 °C and 2.0 °C global warming. *Climate Change Research*, 2018, 14(3): 237-246. [郝莹, 马京津, 安晶晶, 等. 全球1.5 °C和2.0 °C升温下潮白河流域气候和径流量变化预估. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 237-246.]
- [6] Schleussner C F, Lissner T K, Fischer E M, et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(2): 327-351.
- [7] Mitchell D, Achutarao K, Allen M, et al. Half a degree additional warming, prognosis and projected impacts (HAPPI): Background and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(2): 571-583.
- [8] Zhang W, Zhou T, Zou L, et al. Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5 °C less warming in global land monsoon regions. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3153.
- [9] Sanderson B M, O'Neill B C, Tebaldi C. What would it take to achieve the Paris temperature targets? *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7133-7142.
- [10] Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 2016, 534: 631-639.
- [11] UNEP. *The Emissions Gap Report*. Nairobi, 2017.
- [12] Fawcett A A, Iyer G C, Clarke L E, et al. Climate Policy. Can Paris pledges avert severe climate change? *Science*, 2015, 350(6265): 1168-1169.
- [13] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 285-308.
- [14] Zhang M, Chen Y, Shen Y, et al. Tracking climate change in Central Asia through temperature and precipitation extremes. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 3-28.
- [15] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323. [邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [16] Li Xinwu, Zhang Li, Guo Huadong, et al. Space recognition of eco-environment global change response of arid and semi-arid region of the Silk Road Economic Belt. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(5): 559-566. [李新武, 张丽, 郭华东, 等. “丝绸之路经济带”干旱—半干旱区生态环境全球变化响应的空间认知. *中国科学院院刊*, 2016, 31(5): 559-566.]
- [17] Han Qifei, Lu Yan, Li Chaofan. Impact of climate change on grassland carbon cycling in Central Asia. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1351-1357. [韩其飞, 陆研, 李超凡. 气候变化对中亚草地生态系统碳循环的影响研究. *干旱区地理*, 2018, 41(6): 1351-1357.]
- [18] Chen Y, Li Z, Li W, et al. Water and ecological security: Dealing with hydroclimatic challenges at the heart of China's Silk Road. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 881.
- [19] Howard K W F, Howard K K. The new "Silk Road Economic Belt" as a threat to the sustainable management of Central Asia's transboundary water resources. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 976.
- [20] Li P, Qian H, Zhou W. Finding harmony between the environment and humanity: An introduction to the thematic issue of the Silk Road. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(3): 105.
- [21] IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [22] IPCC. *Global Warming of 1.5 °C*. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2018.
- [23] UNFCCC. *National Inventory Submissions*, 2019.
- [24] Wang F, Tokarska K B, Zhang J, et al. Climate warming in response to emission reductions consistent with the Paris Agreement. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 1-9.
- [25] Addressing Global Warming. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>.
- [26] Wang F, Ge Q, Chen D, et al. Global and regional climate responses to national-committed emission reductions under the Paris agreement. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2018, 100(3): 240-253.
- [27] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American*

- Meteorological Society, 2011, 93(4): 485-498.
- [28] Reichler T, Kim J. How well do coupled models simulate today's climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 303-312.
- [29] Pierce D W, Barnett T P, Santer B D, et al. Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(21): 8441-8446.
- [30] Ziese M, Rauthe-Schöch A, Becker A, et al. GPCP Full Data Daily Version. 2018 at 1.0° : Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data [DB/OL]. Doi: 10.5676/DWD_GPCP/FD_D_V2018_100.
- [31] Robert V, Andreas G, Stefan S, et al. The European climate under a 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 034006.
- [32] Huang J, Yu H, Dai A, et al. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 417-422.
- [33] Zhang X, Alexander L, Hegerl G C, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2(6): 851-870.
- [34] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2012, 3: 52-58.
- [35] Prudhomme C, Giuntoli I, Robinson E L, et al. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3262-3267.
- [36] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 816-821.
- [37] Lavell A, Oppenheimer M, Diop C, et al. Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience// Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. *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, USA: Cambridge University Press, 2012: 25-64.
- [38] Cox D R, Hinkley D V. *Theoretical Statistics*. London: Chapman and Hall, 1974: 511.
- [39] Jones B, O'Neill B C. Spatially explicit global population scenarios consistent with the shared socioeconomic pathways. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(8): 084003.
- [40] Vuuren D P V, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1-2): 5-31.
- [41] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, et al. Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H O, et al. *Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2018.
- [42] Sanderson B M, Xu Y, Tebaldi C, et al. Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5 and 2 °C futures. *Earth System Dynamics*, 2017, 8(3): 827-847.
- [43] Jiang D, Sui Y, Lang X. Timing and associated climate change of a 2 °C global warming. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(14): 4512-4522.

Response of precipitation change in Central Asia to emission scenarios consistent with the Paris Agreement

WANG Fang¹, ZHANG Jintao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To limit global mean warming to below 2.0 °C in accordance with the Paris Agreement, countries submitted their Intended Nationally Determined Contributions (INDC) for emission reductions. Those emissions will be the key determinant to the future climate change impacts. However, it remains unclear what the resulting changes in the regional precipitation and its extremes would be under the INDC pledges. Here, we analyze the response of precipitation in Central Asia to emission scenarios under warming resulting from the INDC pledges (as of May 2019), based on an ensemble of comprehensive Earth System Models from the Coupled Climate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Our results show an increase in the mean precipitation in Central Asia by the end of the 21st century by 10.6% (4.6%- 13.3%) for INDC- pledge scenario. However, spatial heterogeneity of precipitation changes reflects the complexity of precipitation responses in future climate projections. Furthermore, heavy precipitation events will strengthen with the enhanced warming, but the trend of dry spell events increases or decreases in different regions. Considering the impacts of precipitation-related extremes, we find that the projected population exposure to heavy rainfall and dry spell events will significantly increase in most Central Asian regions. Limiting warming to lower levels (such as 2.0 °C or 1.5 °C) would reduce the population exposure to heavy rainfall, thereby avoiding impacts associated with more intense precipitation extremes. These results contribute to an improved understanding of future risk from climate extremes, which is paramount for mitigation and adaptation activities for Central Asia, an ecologically fragile area.

Keywords: INDC pledge; precipitation; extreme events; dry spells; extreme precipitation exposure