科学通报 2024 年 第 69 卷 第 25 期: 3686 ~ 3688
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

解密全球河川径流季节性对气候变化的响应机制

刘俊国[1,2*], 王泓[3], 来和鑫[1]

1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046;
2. 河南省水圈与流域水安全重点实验室, 郑州 450046;
3. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055
* 联系人, E-mail: Junguo.liu@gmail.com

Deciphering the response mechanism of global river flow seasonality to climate change

Junguo Liu[1,2*], Hong Wang[3] & Hexin Lai[1]

[1] *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;*
[2] *Henan Provincial Key Lab of Hydrosphere and Watershed Water Security, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;*
[3] *School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*
* Corresponding author, E-mail: Junguo.liu@gmail.com

doi: 10.1360/TB-2024-0348

地球水循环犹如我们身体内不断流动的血液, 为地球上的生灵创造了生机. 河川径流作为水循环的主要环节, 为人类和生态系统提供了宝贵的水资源, 并在调节洪涝灾害方面扮演着重要角色. 河川径流是衡量人类和环境可用水资源量的重要指标. 人类活动通过修建水库等水利工程可以直接调控河川径流, 同时也能通过改变气温、降水、土壤湿度、融雪状况或土地利用方式间接地影响径流.

当前, 气候变化正在全球范围内改变河川径流的流动模式[1~3]. 气候变化对河川径流的影响主要体现在年均值、极值和季节性这三个方面. 自2021年以来, 国际上开始关注全球尺度内河川径流年均值和极值对人为气候变化的响应情况[1]. 然而在河川径流季节性如何受人为气候变化影响方面, 目前学术界尚未形成初步的认识. 因此, 关于全球河川径流响应气候变化的“全景图”仍存在不完整之处.

不同季节的河川径流为淡水生物提供了重要的栖息地. 河川径流季节性描述了径流在一年内的周期性波动. 研究气候变化对河川径流季节性的影响对于维护生态系统功能和促进社会经济发展至关重要. 由于河川径流受大气、海洋和陆地共同调控, 影响因素多, 演变机制复杂. 如何将人为气候变化对河川径流影响从诸多因素中剥离出来仍缺乏合适的方法. 同时, 长期高质量的观测数据匮乏, 证实人为气候变化对河川径流季节性的影响仍然是一个巨大挑战.

一项近期研究[4]以1965~2014年间全球10120个水文站点的月河川径流数据为基础, 采用分配熵作为分析河川径流季节性的方法, 评估了全球河川径流季节性的空间分布格局和历史演变趋势. 结合全球水文站点的观测数据、径流重建和全球水文模型, 综合运用斯皮尔曼相关系数和最优指纹检验两种气候变化检测和归因方法, 揭示了全球河川径流季节性演变的驱动机制. 该研究发现, 人为气候变化导致了北半球高纬度地区的河川径流季节性减弱.

1 全球和区域河川径流季节性演变规律

河川径流季节性在全球2134个水文站点(占全球站点数量的21%)均发生了显著变化. 在这些站点中, 约65%的站点(1380个)年径流没有发生显著变化, 表明全球河川径流季节性变化主要体现为径流的年内再分配; 26%的站点主要由于最低季径流改变而导致年径流发生显著变化; 剩余的9%的站点则主要是由于最高季径流改变而导致年径流发生显著变化. 该研究将最高(低)季径流定义为多年平均最高(低)的三个月径流之和.

在区域尺度上, 着重研究了9个热点地区(包括北美洲北部、北欧、俄罗斯西部、欧洲高海拔阿尔卑斯山区、西伯利亚南部、太平洋西北部、美国中西部上游、美国东北部和巴西东南部)的河川径流季节性变化. 除了巴西东南部外,

© 2024《中国科学》杂志社

在这些区域中, 最低季流量增加的趋势相对于最高季流量更为显著. 为了更清晰地揭示河川径流季节性趋势的潜在机制, 对这9个热点地区进行了更精细的分析. 在融雪主导地区(降雪量占降水量超过20%的区域), 融雪对河川径流季节性的影响大于降水. 高温导致积雪融化, 增加了最低季流量值, 减少了河川径流的年内变化, 从而减弱了河川径流的季节性. 而在非融雪主导地区, 降水对河川径流季节性的影响更为显著. 在太平洋西北部海岸, 降水季节性和河川径流季节性呈正相关(r=0.65). 同样地, 巴西东南部的河川径流季节性与降水季节性的增强密切相关(r=0.93). 与之前研究结果[5,6]不同, 本研究发现太平洋西北部的多数站点在春末和夏季表现出河流流量增加的趋势, 这可能是由于不同研究时期厄尔尼诺南方涛动对降水和融雪影响的差异所致.

2 河川径流季节性变化的气候归因分析

河川径流季节性变化受到气候变化和人类活动的共同影响. 气候变化包括自然气候波动以及人为气候变化. 自然气候波动又分为自然系统内部变率(厄尔尼诺等)和受气候强迫(火山喷发和太阳活动等)而产生的外部变率. 同时, 人为气候变化则主要源自温室气体排放和气溶胶排放等人类活动. 人类活动干扰涵盖了水库流量调控、水资源利用管理以及土地利用变化等因素.

研究通过结合站点观测和全球网格化径流数据, 排除了人类活动干扰, 得出了仅考虑自然气候波动和人为气候变化因素的分配熵观测值. 这些观测值与多个全球水文模型模拟的平均分配熵进行比较后(图1(a)、(b)和(d))发现, 其趋势基本一致, 表明多模型模拟能够准确反映河川径流季节性变化

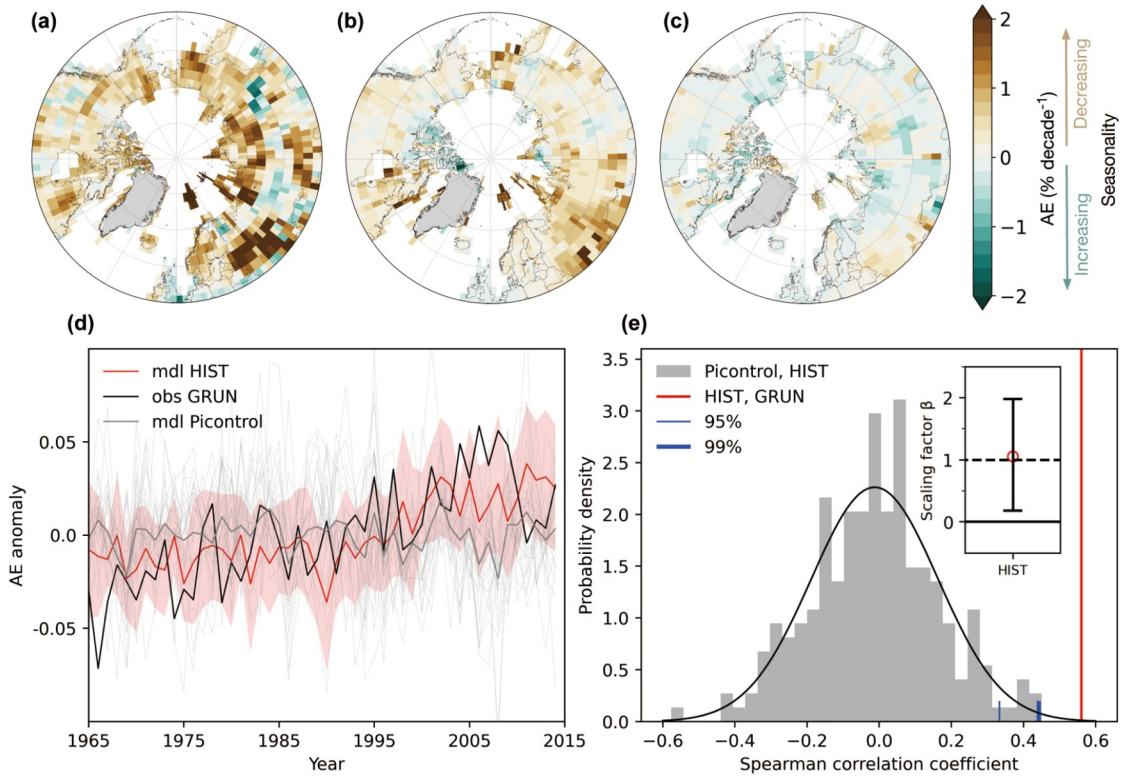


图 1 (网络版彩色) 1965~2014年北半球高纬度地区(纬度在50°N及以上)分配熵趋势的比较与归因分析. (a) 基于全球网格化径流重建数据得出的趋势. (b, c) 基于多模型模拟径流结果得出的趋势, 其中(b)考虑了人为气候变化与人类干扰的影响, (c)考虑了自然气候变化与人类干扰的影响. (d) 基于历史观测数据(GRUN)以及基于HIST和Picontrol两种情景下多模型模拟的分配熵距平. 这里, HIST包含人为气候变化, Picontrol则只包含自然气候变化. (e) 两种情况下斯皮尔曼相关性系数分布: 灰色部分表示考虑与不考虑人为气候变化两种情境模拟结果分配熵距平的斯皮尔曼相关性系数分布, 即$\mathrm{corr}_{\mathrm{temporary}}$(Picontrol, HIST), 红色部分表示考虑人为气候变化的多模型模拟结果平均值和观测之间分配熵距平的斯皮尔曼相关系数, 即$\mathrm{corr}_{\mathrm{temporary}}$(HIST, GRUN). 插图展示了最优指纹检验法中比例因子为0.5%~99.5%的置信区间

Figure 1 (Color online) Comparison of AE trends from observation-based reconstructions and global hydrological models for 1965 to 2014 (% decade^{-1}) in the northern high latitudes (above 50°N). (a) Reconstruction from GRUN. (b) and (c) Simulated changes based on the multimodel mean that account for HWLU under the effects of either HIST (b) or Picontrol (c). (d) Multimodel (mdl) mean time series of annual AE anomalies for HIST&HWLU and Picontrol&HWLU responses and GRUN observations averaged for the northern high latitudes (above 50°N). (e) Correlations of AE anomalies between simulations with and without anthropogenic climate change [$\mathrm{corr}_{\mathrm{temporary}}$(Picontrol, HIST)] or observation-based reconstruction [$\mathrm{corr}_{\mathrm{temporary}}$(HIST, GRUN)] across 50°N to 90°N. The inset shows the confidence interval of the scaling factor plot from optimal fingerprinting method with an uncertainty range of 0.5% to 99.5%

情况. 然而, 在利用受自然气候变化驱动并包含人类干扰因素的全球水文模型进行模拟时, 研究发现模拟得到的分配熵趋势未能正确反映观测值的变化情况(图1(c)和(d)). 这些结果表明, 尽管存在人类活动的干扰, 但其对河川径流季节性变化的影响似乎并不明显, 未能显著影响其变化趋势.

研究采用了斯皮尔曼相关系数和最优指纹检验两种方法对北半球高纬度地区的分配熵进行气候变化和归因分析, 旨在评估人为气候变化对河川径流季节性变化的影响. 根据研究结果, 基于斯皮尔曼相关性检验, 考虑人为气候变化的分配熵模拟趋势与观测到的分配熵趋势之间的空间相关性显著高于仅考虑自然气候变化的分配熵模拟趋势与观测值之间的空间相关性, 置信水平达到95%. 这一发现证实了人为气候变化是导致河川径流季节性空间格局变化的根本原因. 研究将1965~2014年分配熵减去该50 年分配熵的平均值得到每一年的分配熵距平. 在99%的置信水平下, 考虑人为气候变化的分配熵模拟距平与观测到的分配熵距平之间的时间序列相关性显著高于仅考虑自然气候变化的分配熵模拟距平与观测值之间的相关性(图1(e)). 这一结果表明, 人为气候变化减弱了北半球高纬度地区河川径流的季节性变化.

另一种方法是最优指纹法. 最优指纹法最早由2021年诺贝尔物理学奖获得者Klaus Hasselmann提出[7]. 在过去20年中, 该方法是研究气候变化中人为因素检测和归因的基础方法, 并且是政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于气候变化的IPCC报告所采用的基本方法. 该方法主要思路是将观测到的气候变量线性回归到对外部因素的预期气候响应上, 先用气候模式模拟出误差协方差矩阵将原数据进行“漂白”, 再试图利用高斯马尔可夫定理以获得最优性. 该方法在考虑采样误差(v)和自然气候变化(ε)时, 将观测分配熵值(y)与模拟分配熵(x)进行回归: $y=\beta(x-v)+\varepsilon$. 当比例因子β的置信下限大于零时, 表示模拟分配熵捕获到了观测分配熵的变化. 此外, 若β的置信区间包含1, 则模拟分配熵的趋势与观测分配熵一致. 结果发现, 当模拟分配熵考虑气候变化与人类干扰时, β在99%的置信水平上大于零, 捕获到了观测分配熵的变化; 当模拟分配熵仅考虑气候变化时, 比例因子β的置信区间包含1, 意味着模拟分配熵的趋势与观测分配熵一致. 因此, 研究得出人为气候变化导致了北半球高纬度地区河川径流季节性的减弱.

虽然研究使用的多个全球水文模型模拟结果未排除自然气候强迫. 但是, 与人为气候变化相比, 太阳变化微乎其微, 火山喷发极其短暂, 因此自然气候强迫对河流流量的影响非常有限. 值得注意的是, 在北半球高纬度地区没有观测到降水季节性变化的显著趋势, 这表明降水季节性变化并不能解释研究结果. 因此, 升温导致早期融雪增加、冰川面积减少、永久冻土消失、降雪比例减少以及河流冰冻期缩短, 可能是引发河川径流季节性变化的主要机制. 未来, 人为气候变化将对气温上升产生更大的影响, 进一步减弱河川径流季节性, 可能对洪涝灾害防控和河流生态系统健康造成潜在影响.

致谢 感谢中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060402)和河南省水圈与流域水安全重点实验室资助.

推荐阅读文献

1 Gudmundsson L, Boulange J, Do H X, et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. Science, 2021, 371: 1159–1162
2 Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature, 2019, 573: 108–111
3 Blöschl G, Hall J, Parajka J, et al. Changing climate shifts timing of European floods. Science, 2017, 357: 588–590
4 Wang H, Liu J, Klaar M, et al. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality. Science, 2024, 383: 1009–1014
5 Singh N K, Basu N B. The human factor in seasonal streamflows across natural and managed watersheds of North America. Nat Sustain, 2022, 5: 397–405
6 Mote P W, Li S, Lettenmaier D P, et al. Dramatic declines in snowpack in the western US. npj Clim Atmos Sci, 2018, 1: 2
7 Hasselmann K. On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies. Meteorology of tropical oceans. Royal Meteorol Soc, 1979, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:164816613