

气候变化对天山地区极端径流的影响——以开都河为例

郑 鹏^{1,2}, 陈亚宁^{2*}, 王怀军³, 杨余辉¹

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2.中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

3.淮阴师范学院 地理科学与规划学院, 江苏 淮安 223300)

摘 要:【目的】揭示天山地区极端径流演变规律, 预估不同气候变化情景下天山地区极端径流特征。【方法】基于 Sen slope、MK 检验、Pettitt 检验、概率分布函数、SWAT 模型和 GCM 模式分析极端径流演变特征。【结果】1959—2018 年, 开都河流域年、夏、秋和冬季径流呈不显著增加趋势, 春季径流呈显著增加趋势, 径流变化与降水的相关性大于与同期气温的相关性。极端径流频率、强度和持续时间呈增加趋势, 初洪时间呈显著推迟趋势。Log-Pearson3 函数对极端径流的模拟表现最优, 50 a 重现期洪水次数、高流量最长持续时间、平均峰值流量重现水平分别为 7.09 次、79.04 d 和 180.04 m³/s。未来气候变化情景下, 洪水次数增加, 极端强度(平均年最大流量)增大, 持续时间(高流量最长持续时间、高流量平均持续时间)和平均强度(平均极端径流流量、平均峰值流量)减小, 初洪时间呈提前趋势, 且最高和最低极端径流强度(平均极端径流流量、平均峰值流量、平均年最大流量)重现水平分别发生在 SSP245 和 SSP370 情景。【结论】气候变化对天山极端径流具有重要影响, 未来该地区将经历更频繁的极端径流事件和更为严重的单次特大洪水, 研究结果对制定气候变化适应策略和水资源管理方案具有重要的指导意义。

关键词: 气候变化; 极端径流; SWAT 模型; 天山; 开都河

中图分类号: P333; P467

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023353

郑鹏, 陈亚宁, 王怀军, 等. 气候变化对天山地区极端径流的影响: 以开都河为例[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 105-112.
ZHENG Peng, CHEN Yaning, WANG Huaijun, et al. The impact of climate change on extreme runoffs in the Tianshan region: Taking Kaidu River as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 105-112.

0 引言

【研究意义】IPCC 第五次报告指出, 随着全球平均地表温度的升高, 极端降水事件的发生强度和频率在中纬度地区、湿润热带地区呈增加趋势^[1]。最新的 IPCC 第六次评估报告强调, 在全球气候变暖背景下, 中国高温、干旱、暴雨等气象灾害频繁发生, 这些极端事件与社会经济系统相互叠加后会引发严重的生态环境风险^[2]。全球变化导致水循环加速, 使得极端水文事件的发生频率和强度急剧增加, 这在干旱区尤为突出^[3]。因此, 深入研究气候变化对干旱区极端径流演变的影响, 对水资源规划管理和防灾减灾具有重要意义。

【研究进展】当前, 预估未来气候变化及其影响是全球变化研究的热点。众多学者采用不同的模

式数据进行预估研究。何朝飞等^[4]基于 CMIP6 模式研究发现, 多模式融合方法能够综合考虑各模式的优势, 可提高气候模式的模拟精度。伊明启等^[5]研究发现, 在 CMIP6 气候情景模式下, 未来拉萨河径流变化显著但不同情景模式差异较大。王政琪等^[6]利用 RegCM4 区域气候模式研究新疆未来气候变化, 结果表明新疆的“暖湿化”并不会改变其干旱半干旱的气候本质。李博渊等^[7]和向竣文等^[8]研究结果均表明, 降水强度随着排放情景的增大而加强。Li 等^[9]基于广义极值分布和水文模型研究新安江流域极端洪水事件的气候变化响应, 结果表明未来极端径流峰值将持续增加。

【切入点】天山地区呈暖湿化趋势, 主要是由气温上升, 降水增多和冰雪消融加速所导致^[10]。气候变化导致天山山区的冰川积雪加速消融, 使得以冰雪融水为主要补给的河流径流量增加, 引发洪涝灾害, 给当地居民的生产生活及社会经济发展造成严重威胁。开都河是天山地区最为典型的河流之一, 以往水文过程研究大多集中在对径流特征变化的描述^[11]和降水变率对径流的影响^[12], 缺乏对极端径流

收稿日期: 2023-08-08 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130512)

作者简介: 郑鹏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事气候变化与干旱区水文水资源研究。E-mail: 954266410@qq.com

通信作者: 陈亚宁(1958-), 男, 研究员, 博士。主要从事干旱区水资源与地表过程研究。E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

的多指标综合描述。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究基于开都河流域水文观测数据，采用 SWAT 水文模型，大气环流模式、多个极端径流指标、Sen slope、MK 检验、Pettitt 检验和概率分布函数对极端径流的演变趋势进行分析，以期为流域防灾减灾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天山地区降水稀少，年蒸发量大，属于典型的大陆性干旱气候。由于其独特的地理位置和气候特征，天山地区也是气候变化响应的敏感区和生态脆弱区。本研究选择天山地区典型流域开都河为研究

区（图 1）。开都河是塔里木河的四大源流之一，地处新疆巴音郭楞蒙古自治州境内，发源于天山中部海拔 5 000 m 的萨尔明山，最终汇入博斯腾湖，河流全长 610 km，流域面积约 $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域地形复杂，高山、峡谷和盆地交错，流域在山区的平均海拔高程为 3 100 m。开都河为雨雪混合补给型河流，是博斯腾湖最大的入湖河流，开都河入湖水量占博斯腾湖总水量的约 85%。开都河为库尔勒市居民生活提供了重要的水源保障，也对塔里木河下游生态环境保护具有重要作用。开都河以大山口水文站为出山口，该水文站位于出山口源流，受人类活动影响较小，能较准确地记录河流天然径流量。

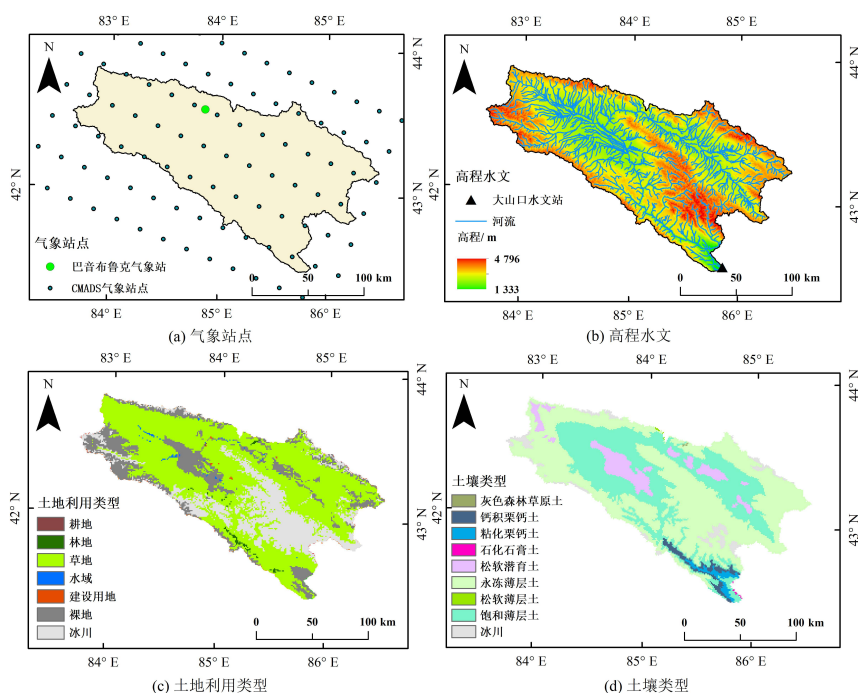


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

数字高程（DEM）数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（<https://www.resdc.cn>），经过 ArcGIS 投影转换、流域界限划分等步骤，得到研究区的 DEM 图，空间分辨率为 90 m。2010 年土地利用数据（LUCC）来源于中国科学院资源环境科学数据中心（<https://www.resdc.cn>），空间分辨率为 1 km。土壤数据来源于世界土壤数据库（HWSD），HWSD 是一个全球性土壤数据库，提供了各个格网点的土壤类型、土壤相位、土壤理化性状信息，下载于联合国粮食及农业组织（FAO）官网（www.fao.org），空间分辨率为 1 km。中国大气同化数据集（CMADS）来源于“国家青藏高原科学数据中心”（<http://data.tpdc.ac.cn>）。采用 CMADS 1.1 提供的逐

日气象数据，时间尺度为 2008—2018 年，主要包括降水、气温、风速、相对湿度和日照时间，空间分辨率为 25 km。NEX-GDDP-CMIP6 数据来源于 NNSA NCCS（<https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>）。该数据集是 NASA 基于偏差校正技术（BCSD）将 CMIP6 21 个全球气候模式数据降尺度为 25 km 高分辨率逐日数据，包括历史阶段（1950—2014 年）及 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 排放情景（2015—2100 年）下的日平均气温、日最高气温、日最低气温和日降水量。基于以往涉及天山地区的模式评估结果^[13-18]，选取 5 种常用且对该地区模拟效果较好的模式，主要为 BCC-CSM2-MR（中国）、GFDL-ESM4（美国）、IPSL-CM6A-LR（法国）、

MPI-ESM1-2-HR（德国）和 MRI-ESM2-0（日本），取上述 5 种模式的平均值作为未来气候的集合平均数据。大山水文站日径流数据来源于新疆维吾尔自治区水文局，巴音布鲁克站日气象数据来源于中国气象数据共享网，时间尺度为 1959—2018 年。

1.3 研究方法

SWAT 模型是美国农业部农业研发中心开发的流域尺度半分布式水文模型。该模型可用于模拟并预测中长时间尺度流域径流、泥沙和面源污染过程。与集总式水文模型相比，SWAT 模型对流域下垫面非均质的描述更符合实际情况，也适用于干旱区。基于开都河流域 DEM、LUCC 和土壤数据，选择 CMADS1.1 数据作为 SWAT 模型的气象数据，采用

Surf-2 算法进行参数率定。由于 CMADS 数据时间跨度为 2008—2018 年，本文以 2008—2009 年为预热期，2010—2014 年为率定期，2015—2018 年为验证期，采用纳什效率系数（NSE）和决定系数（ R^2 ）来进行模型率定和验证。以 $R^2>0.5$ 且 $NSE>0.5$ 作为 SWAT 模型精度准则^[19-20]。

采用 Sen slope 计算时间序列的趋势^[21]，采用 MK 检验分析趋势的显著性^[22]，采用 Pettitt 检验对极端径流进行趋势检验^[23-24]。采用极端指数法和 R 包“hydroTSM”对极端径流进行提取，洪水的定义为 1959—2018 年 95%分位数所对应的流量。指数定义见表 1。

表 1 极端径流指标

Tab.1 Extreme runoff indicators			
极端径流指标	定义	极端径流特征	单位
初洪时间	每年发生第一次洪水的时间	开始时间	d
洪水次数	每年发生洪灾的次数	频率	次
高流量平均持续时间	每年最大流量的平均持续时间	持续时间	d
高流量最长持续时间	每年最大流量的最长持续时间	持续时间	d
极端径流平均流量	每年超过 95%分位数的极端径流的平均流量	强度（平均强度）	m ³
峰值流量平均值	每年超过 95%分位数的极端径流平均值	强度（平均强度）	m ³ /s
平均年最大流量	每年平均流量的极大值	强度（极端强度）	m ³ /s

选择 8 个常用的概率分布函数作为候选函数，具体包括 Normal、Gamma、GEV、General-logistic、Log-logistic、Log-Pearson3、Lognormal、Weibull。计算过程如下：①分别用这 8 个概率分布函数拟合开都河流域的极端径流；②采用矩估计技术对 8 个概率分布函数的参数进行估计；③采用 Kolmogorov-Smirnov（K-S）法对拟合优度进行检验，依据 K-S 值最小函数拟合优度最佳原则，选择最适合水文极值的概率分布函数作为描述统计特性的最佳函数；④利用选择的概率分布函数计算 10、30、50、70 a 和 100 a 重现期对应的重现水平。

2 结果分析

2.1 平均径流变化与气温和降水的关系

开都河年、季节尺度径流量均呈增加趋势，春季径流量显著增加，年、夏、秋和冬季径流量变化不显著（表 2）。基于巴音布鲁克站气象观测数据，年和季节平均气温均呈显著增加趋势。年、夏、秋和冬季降水呈不显著增加趋势，春季降水量呈显著减小趋势。开都河流域年平均径流量与气温和降水量均显著相关，说明流域径流量受气温和降水双重因素的影响。年和季节尺度上（除秋季外）径流量变化与降水量的相关性强于与同期气温的相关性，

说明降水量变化是该地区径流量变化的最主要原因。

表 2 开都河流域径流量与气温和降水趋势及相关性

Tab.2 Trends and correlations between runoff, temperature, and precipitation in the Kaidu River basin					
时间尺度	趋势			相关系数	
	径流量	气温	降水	气温	降水
年	0.22	0.02	0.73	0.40	0.69
春	0.01	0.02	-0.08	-0.26	0.38
夏	0.36	0.03	0.55	0.17	0.64
秋	0.30	0.02	0.09	0.40	0.18
冬	0.12	0.01	0.11	0.14	0.12

注 黑体表示在 0.05 显著水平上显著。

2.2 极端径流演变特征

开都河初洪时间平均发生在一年中的第 146 d，初洪时间整体呈显著增加趋势（图 2（a））。极端径流发生次数无显著变化趋势（图 2（b））。高流量平均持续时间整体表现为不显著增加趋势，且从 1986 年后表现为高位震荡态势（图 2（c））。高流量最长持续时间呈不显著增加趋势，且以 1986 年为突变点，1986 年后以高位震荡为主（图 2（d））。极端径流平均流量呈不显著增加趋势（图 2（e）），且在 1986 年后保持高位震荡。峰值流量平均值和年平均最大流量的变化趋势一致，表现为不显著增加趋势，且突变年份均为 1986 年，1986 年之前呈减少趋势，1986 年之后呈增加趋势（图 2（f）—图 2（g））。

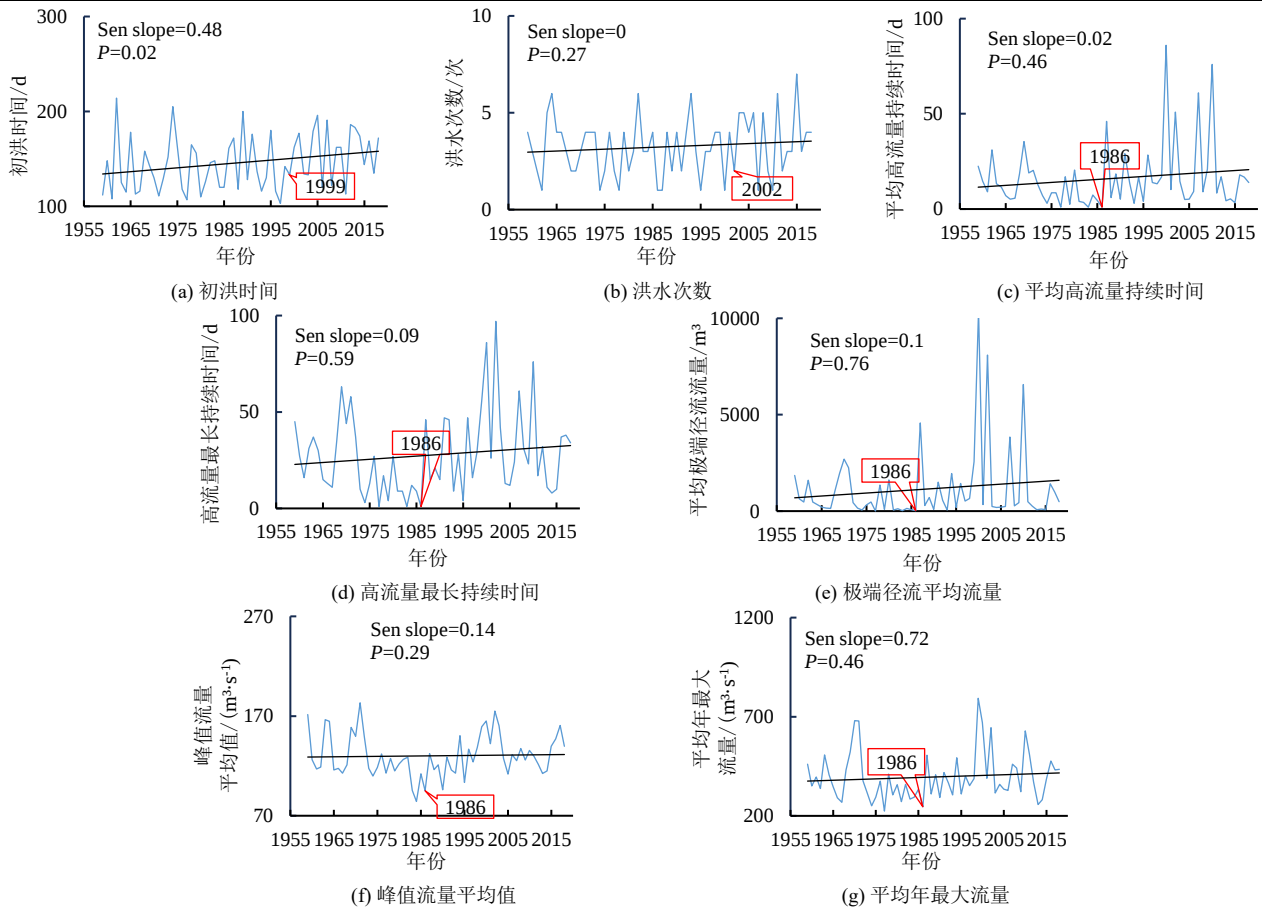


图 2 极端径流时间演变

Fig.2 Time evolution of extreme runoff

2.3 极端径流重现水平

初洪时间由于不适用于重现水平分析, 所以未纳入计算。概率分布函数的选择依据是 K-S 值越小, 该函数拟合优度最佳, 根据该原则, 选用 Log-Pearson3 函数 (表 3) 来研究开都河流域极端径流 10~100 a 重现期的重现水平。研究区重现期 10、50、100 a 各指标重现水平如下: 洪水次数分别为 5.47、

7.09、7.65 次; 高流量平均持续时间分别为 35.44、68.15、84.90 d; 高流量最长持续时间分别为 58.18、79.04、85.11 d; 极端径流平均流量分别为 280.8、838.1、1 224 m³; 峰值流量平均值分别为 158.27、180.04、188.51 m³/s; 平均年最大流量分别为 550.74、735.8、822.61 m³/s (表 4)。

表 3 极端径流指标 K-S 统计量

Tab.3 Kolmogorov-Smirnov (K-S) statistics of extreme runoff indices

极端径流指标	Normal	Gamma	GEV	General-logistic	Log-logistic	Log-Pearson3	Lognormal	Weibull
洪水次数	0.157 8	0.198 1	0.163 4	0.183 3	0.213 2	0.172 3	0.203 0	0.165 3
高流量平均持续时间	0.220 2	0.129 3	0.082 1	0.077 4	0.113 1	0.076 6	0.093 0	0.078 2
高流量最长持续时间	0.143 7	0.077 9	0.094 1	0.110 2	0.129 0	0.082 8	0.119 4	0.103 9
极端径流平均流量	0.279 3	0.230 5	0.098 7	0.103 5	0.085 9	0.064 7	0.068 8	0.099 9
峰值流量平均值	0.107 5	0.095 3	0.094 9	0.079 9	0.095 5	0.093 8	0.091 2	0.122 5
平均年最大流量	0.137 1	0.097 5	0.048 4	0.051 7	0.061 2	0.049 9	0.076 1	0.117 3
平均值	0.154 4	0.122 4	0.090 7	0.096 8	0.108 6	0.086 2	0.100 4	0.111 3

注 黑体表示极端径流指数在候选函数中对应的最优概率分布函数。

表 4 基于 Log-Pearson3 函数的极端径流重现水平

Tab.4 Return levels of extreme runoff based on Log-Pearson3 function

极端径流指标	$T=10$ a	$T=30$ a	$T=50$ a	$T=70$ a	$T=100$ a
洪水次数/次	5.47	6.63	7.09	7.37	7.65
高流量平均持续时间/d	35.44	59.11	68.15	76.57	84.90
高流量最长持续时间/d	58.18	74.77	79.04	82.34	85.11
极端径流平均流量/m³	280.8	616.4	838.1	1012	1224.0
峰值流量平均值/(m³·s⁻¹)	158.27	173.54	180.04	184.19	188.51
平均年最大流量/(m³·s⁻¹)	550.74	687.27	735.8	779.83	822.61

2.4 基于 SWAT 模型和 NEX-GDDP-CMIP6 数据的径流模拟预估

基于 CMADS 和 SWAT 模型对开都河流域日径流过程进行模拟，率定期和验证期的 NSE 和 R^2 均大于 0.5，达到评定标准，说明该模型适用于开都河流域（图 3 和表 5）。与历史时期相比，未来不同情景下洪水次数和极端径流强度（平均年最大流量）重现水平呈增加趋势，持续时间（高流量最长持续时间、高流量平均持续时间）重现水平呈减小趋势，平均强度（极端径流平均流量和峰值流量平均值）重现水平呈减小趋势（除极端径流平均流量 10 a 重现期外）（图 4）。

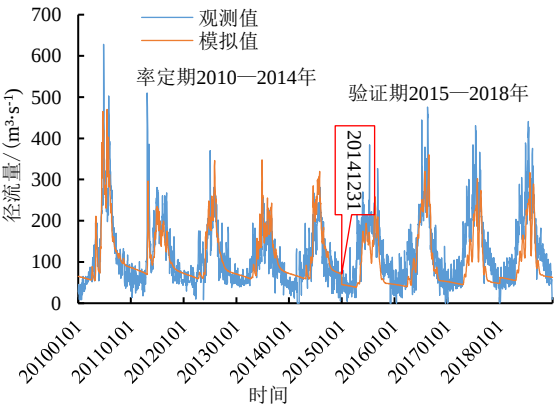


图 3 开都河 SWAT 模型日径流模拟结果

Fig.3 Daily runoff simulation of SWAT model for the Kaidu River

表 5 开都河 SWAT 模型模拟评价结果

Tab.5 Evaluation results of the SWAT model

simulation for the Kaidu River			
阶段	评定标准	月尺度	日尺度
率定期（2010—2014 年）	NSE	0.69	0.61
	R^2	0.78	0.63
验证期（2015—2018 年）	NSE	0.73	0.57
	R^2	0.77	0.67

未来初洪时间提前，SSP245 情景下的波动变化最强，SSP126 和 SSP585 情景下的波动较小（图 5（a））。洪水次数重现水平最高发生在 SSP370 情景，且其余 3 种情景下的变化较为接近（图 5（b））。高流量平均持续时间、极端径流平均流量、峰值流量平均值和平均年最大流量变化趋势一致（图 5（c）、图 5（e）—图 5（g）），重现水平由高到低依次为 SSP245 中低排放情景、SSP126 低排放情景、SSP585 高排放情景和 SSP370 中高排放情景。高流量最长持续时间由高到低对应的情景依次为 SSP126 低排放情景、SSP370 中高排放情景、SSP245 中低排放情景和 SSP585 高排放情景（图 5（d）），SSP245 和 SSP370 情景最为接近。总体来看，在未来 4 种气候变化情景下，初洪时间呈提前趋势，重现水平以 30 a 重现期为拐点，10~30 a 重现期下的重现水平增幅大于 30~100 a 重现期重现水平（图 5）。

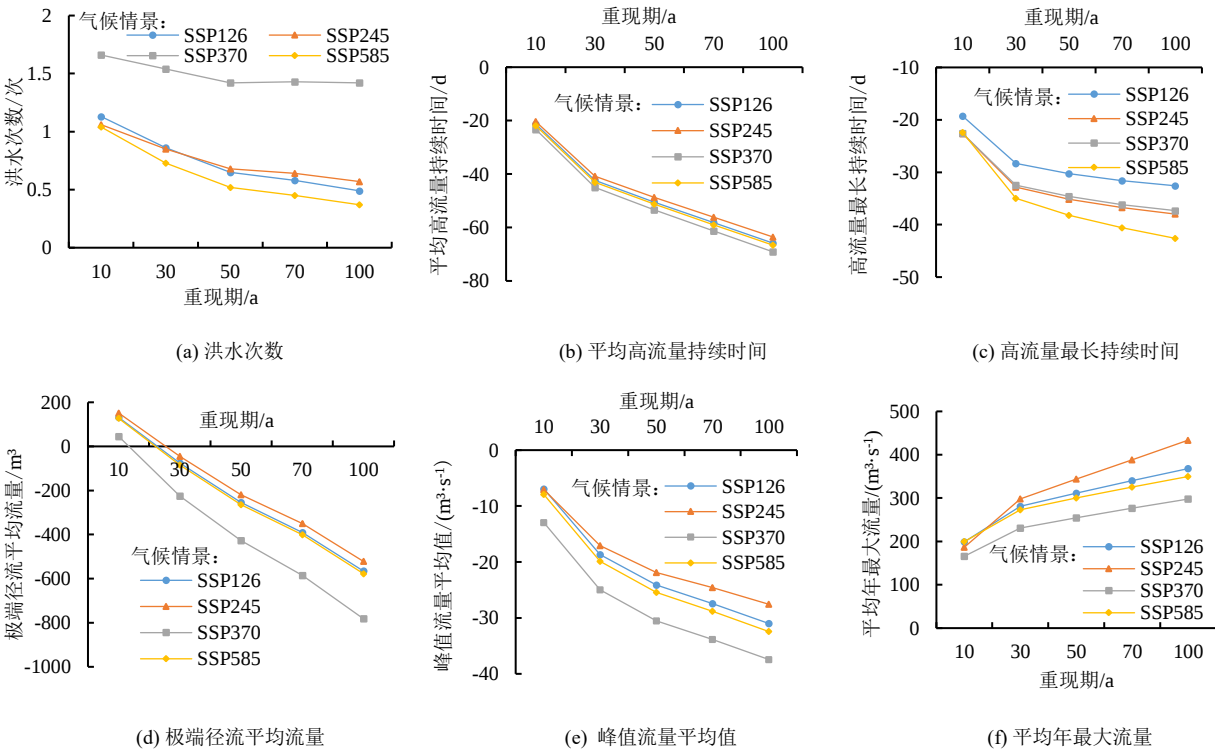
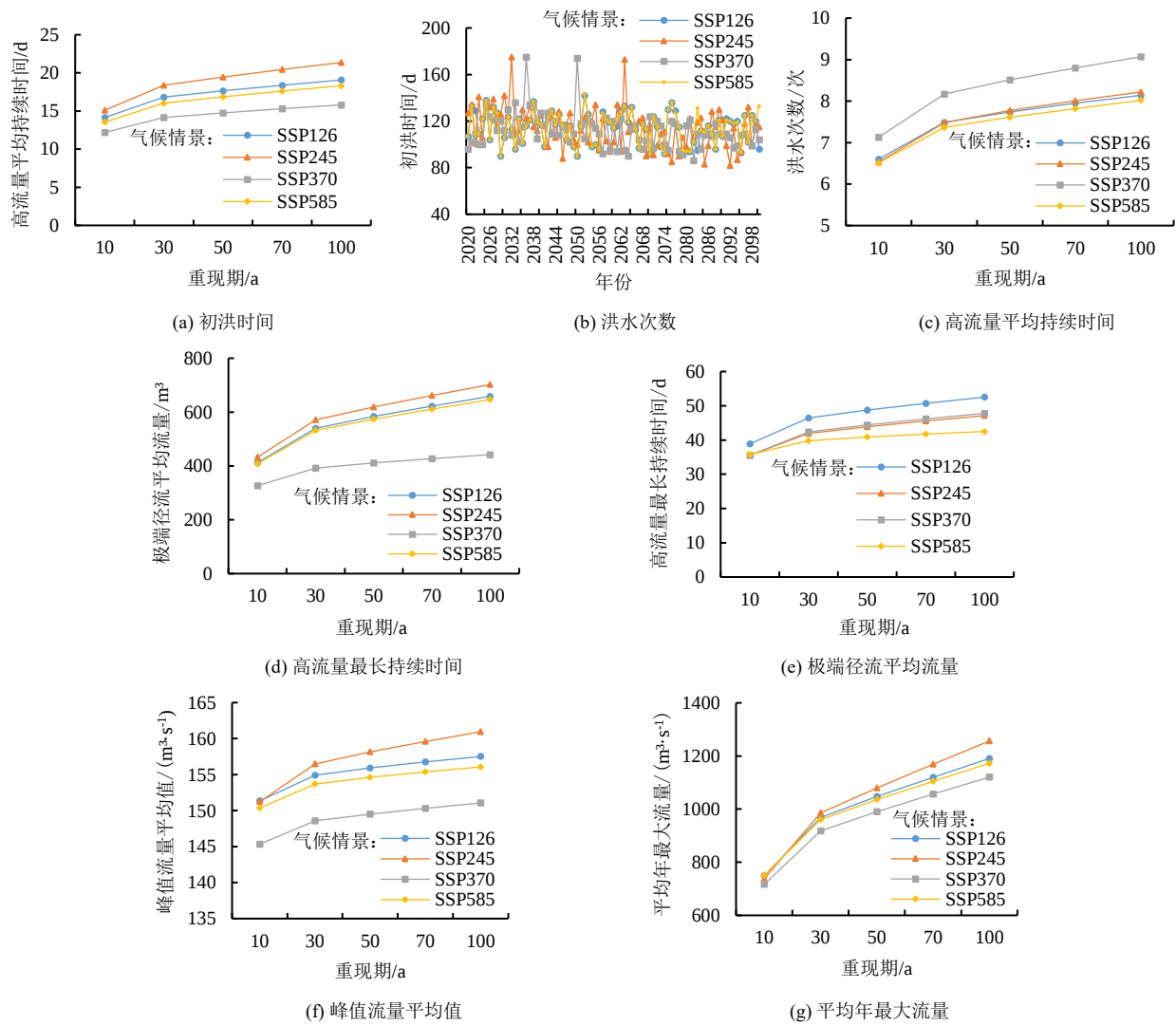


图 4 不同情景下极端径流重现水平变化（未来重现水平与历史重现水平之差）

Fig.4 Changes in return level of extreme runoff under different scenarios (future return level minus historical return level)



注 a 为径流初洪时间未计算重现水平, 其他指标为重现水平。

图 5 未来不同重现期下极端径流指标重现水平变化

Fig.5 Changes in return levels of extreme runoff under different return periods in the future scenarios

3 讨论

开都河流域极端径流的频率、强度和持续时间均呈增加趋势。在全球气候变化背景下, 以天山地区为主体的我国西北干旱区增温幅度远超全球平均水平。增温导致天山地区冰雪消融加速, 极易引发极端径流。气候变化导致更频繁和更强烈的极端降水事件, 进一步增加了极端径流发生的概率^[25]。本研究发现, 初洪时间呈推迟趋势, 这与之前的研究结果不一致^[26], 这可能与洪水阈值的差异有关。此外, 土壤含水率增加、融雪水的延迟排放等因素也可能推迟初洪时间^[27]。极端径流持续时间和强度在 1986 年发生了突变, 这可能与最低气温和极端降水在 1986 年发生突变有关^[3]。研究指出^[28-29]20 世纪 80 年代中期以来, 新疆洪水峰量和频次均呈增大态势, 这进一步佐证了本研究结果。

未来气候情景下, 极端径流表现为洪水次数增

加, 持续时间和平均强度减小, 极端强度增大的趋势, 这说明流域会经历更频繁的洪水事件, 但单个洪水事件的持续时间较短, 平均强度较低, 同时也面临着更为严重的单次特大极端事件。未来开都河流域洪水次数和高流量最长持续时间重现水平增加最高的情景分别为 SSP370 和 SSP126, 最低的情景均为 SSP585。最高和最低的极端径流强度(极端径流平均流量、峰值流量平均值和平均最大流量)及高流量平均持续时间分别对应于低排放情景(SSP245 和 SSP126)和高排放情景(SSP370 和 SSP585)。预估未来极端径流是一个复杂过程, 不同指标在不同情景下的重现水平会有较大差异, 这些结果基于模型模拟, 对于特定水文系统的适用性可能受模型选择和参数设定的影响。此外, 研究区缺少翔实的观测数据, 气候模式数据本身存在系统误差, 水循环过程的蒸散发难以准确计算, 特别是本研究未来径流预估并未考虑下垫面(如冰川)的变

化，这对研究结果造成了一定的不确定性。后续需要进一步采用多种模式数据进行验证对比，并考虑下垫面变化对水循环的影响，以进一步增强结论的可靠性。

4 结论

1) 1959—2018年，开都河流域年、夏、秋和冬季径流呈不显著增加趋势，春季径流呈显著增加趋势，径流变化与降水的相关性大于与同期气温的相关性。

2) 极端径流频率、强度和持续时间呈增加趋势（1986年发生突变），初洪时间呈推迟趋势。Log-Pearson3函数对极端径流的模拟表现最优，50 a重现期洪水次数、高流量最长持续时间、平均峰值流量重现水平分别为7.09次、79.04 d和180.04 m³/s。

3) 未来气候变化情景下，洪水次数增加，极端强度增大，持续时间和平均强度减小，初洪时间呈提前趋势。

（作者声明本文无实际或潜在利益冲突）

参考文献：

- FIELD C B, BARROS V R, DOKKEN D J, et al. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability[M]. England: Cambridge University Press, 2014.
- 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
ZHOU Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.
- 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1-9.
CHEN Yaning, WANG Huaijun, WANG Zhicheng, et al. Characteristics of extreme climatic/hydrological events in the arid region of northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 1-9.
- 何朝飞, 骆成彦, 陈伏龙, 等. 基于 CMIP6 多模式的和田河流域未来气候变化预估[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 515-528.
HE ChaoFei, LUO Chengyan, CHEN Fulong, et al. CMIP6 multi-model prediction of future climate change in the Hotan River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 515-528.
- 伊明启, 唐元智, 霍军军, 等. 未来气候变化下拉萨河流域径流变化趋势研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(1): 95-107.
YI Mingqi, TANG Yuanzhi, HUO Junjun, et al. Study of runoff trends in the Lhasa River Basin under future climate change[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 95-107.
- 王政琪, 高学杰, 童尧, 等. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 407-423.
WANG Zhengqi, GAO Xuejie, TONG Yao, et al. Future climate change projection over Xinjiang based on an ensemble of regional climate model simulations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(2): 407-423.
- 李博渊, 胡琴. 基于 CMIP6 模式评估结果对未来青藏高原降水多情景预估[J]. 高原气象, 2024, 43(1): 59-72.
LI Boyuan, HU Qin. Multi-scenario projection of future precipitation over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau based on CMIP6 model assessment results[J]. Plateau Meteorology, 2024, 43(1): 59-72.
- 向竣文, 张利平, 邓瑶, 等. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1): 46-57, 81.
XIANG Junwen, ZHANG Liping, DENG Yao, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(1): 46-57, 81.
- LI G H, CHEN Z N, LI J, et al. Hydrological response to future precipitation extremes under climate change[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 612(1): 012 063.
- 李奇虎. 西北干旱区气候变化及其对水文过程的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
LI Qihu. Climate change spatiotemporal features and impact on hydrological processes in northwest arid area of China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- 向燕芸, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1 855-1 865.
XIANG Yanyun, CHEN Yaning, ZHANG Qifei, et al. Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1 855-1 865.
- 陶辉, 王国亚, 邵春, 等. 开都河源区气候变化及径流响应[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 413-417.
TAO Hui, WANG Guoya, SHAO Chun, et al. Climate change and its effects on runoff at the headwater of Kaidu River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 413-417.
- THRASHER B, WANG W L, MICHAELIS A, et al. NASA global daily downscaled projections, CMIP6[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 262.
- JAIN S, SALUNKE P, MISHRA S K, et al. Advantage of NEX-GDDP over CMIP5 and CORDEX data: Indian summer monsoon[J]. Atmospheric Research, 2019, 228: 152-160.
- DEEPTHI B, SIVAKUMAR B. General circulation models for rainfall simulations: Performance assessment using complex networks[J]. Atmospheric Research, 2022, 278: 106 333.
- XU L L, WANG A H, YU W, et al. Hot spots of extreme precipitation change under 1.5 and 2°C global warming scenarios[J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 33: 100 357.
- 王倩之, 刘凯, 汪明. NEX-GDDP 降尺度数据对中国极端降水指数模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 31-43.
WANG Qianzhi, LIU Kai, WANG Ming. Evaluation of extreme precipitation indices performance based on NEX-GDDP downscaling data over China[J]. Climate Change Research, 2022, 18(1): 31-43.
- 李金洁, 王爱慧, 郭东林, 等. 高分辨率统计降尺度数据集 NEX-GDDP 对中国极端温度指数模拟能力的评估[J]. 气象学报, 2019, 77(3): 579-593.
LI Jinjie, WANG Aihui, GUO Donglin, et al. Evaluation of extreme temperature indices over China in the NEX-GDDP simulated by high-resolution statistical downscaling models[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(3): 579-593.
- SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6): 1 559.
- 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7 114-7 127.
MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Simulation, validation, and analysis of the hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7 114-7 127.
- 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2 105-2 114.

- LI Ming, GE Chenhao, DENG Yuying, et al. Meteorological and agricultural drought characteristics and their relationship across the Loess Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(12): 2 105-2 114.
- [22] 陈莹, 尹义星, 陈兴伟. 19 世纪末以来中国洪涝灾害变化及影响因素研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2 110-2 120.
- CHEN Ying, YIN Yixing, CHEN Xingwei. Change of flood disasters in China since the 1880s and some possible causes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2 110-2 120.
- [23] PETTITT A N. A non-parametric approach to the changepoint problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [24] VILLARINI G, SERINALDI F, SMITH J A, et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): W08 417.
- [25] 高爽, 迺超普, 汤水荣, 等. 长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 4 853-4 862.
- GAO Shuang, NI Chaopu, TANG Shuirong, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 4 853-4 862.
- [26] 蒋军新, 蔡明, 徐永军, 等. 新疆阿克苏河流域洪水演变趋势研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1 200-1 209.
- JIANG Junxin, CAI Ming, XU Yongjun, et al. Evolution trend of flood in the Aksu River Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1 200-1 209.
- [27] DUDLEY R W, HODGKINS G A, MCHALE M R, et al. Trends in snowmelt-related streamflow timing in the conterminous United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 208-221.
- [28] CHEN Y N, XU C C, CHEN Y P, et al. Response of glacial-lake outburst floods to climate change in the Yarkant River Basin on northern slope of Karakoram Mountains, China[J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 75-81.
- [29] 吴素芬, 王志杰, 吴超存, 等. 新疆主要河流水文极值变化趋势[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 1-7.
- WU Sufen, WANG Zhijie, WU Chaocun, et al. Variable tendency of hydrological extreme of the main rivers in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(1): 1-7.

The impact of climate change on extreme runoffs in the Tianshan region: Taking Kaidu River as an example

ZHENG Peng^{1,2}, CHEN Yaning^{2*}, WANG Huaijun³, YANG Yuhui¹

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

3. School of Geography and Planning, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

Abstract: 【Objective】Climate change is anticipated to lead to increased frequency of extreme weather events such as droughts and floods, which have significant implications for water availability in catchment areas. In this paper, we analyze extreme runoff events in the Tianshan region in northwestern China and their correlation with climate change. 【Method】The analysis was based on data measured over the past 60 years from the Kaidu River Basin in the region. The variation in its runoff events was analyzed using the Sen slope, MK test, Pettitt test and probability distribution function, coupled with the SWAT model and the GCM model. 【Result】① Annual runoff and seasonal runoff, except in spring in which the runoff has seen a significant increase, in the basin have been increasing, albeit not at significant levels. Runoff changes are correlated to precipitation more than to temperature. ②Over the past 60 years, frequency, intensity and duration of extreme runoff events have been increasing, and there is a delay in the occurrence of the first flood in each year. ③ The Log-Pearson3 function is optimal for modelling extreme runoff events. The returning times of floods was 50 years, the maximum duration of flooding events and average peak flow rate of floods were 7.09 times, 79.04 days and 180.04 m³/s, respectively. ④ Under projected climate change scenarios, the frequency of flooding events will increase, average annual maximum flow rate in the floods will amplify, maximum duration and average duration of floods, as well as average intensity of floods will all increase. The first flooding in each year will arrive early, and extreme runoff intensity is the highest under the SSP245 scenario and the lowest under the SSP370 scenario. 【Conclusion】Climate change significantly influences extreme runoff events in the Tianshan region, resulting in increased frequency and severity of both extreme runoff events and single large flood. These findings have important implications for improving management strategies to mitigate the adversary impact of extreme weathers induced by climate changes.

Key words: climate change; extreme runoff; SWAT model; Tianshan; Kaidu River

责任编辑: 韩 洋