

黄水沟流域水资源变化特征及其未来趋势预估

程 勇¹, 方功焕², 周洪华^{2*}

¹新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局, 新疆 库尔勒

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, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年1月12日; 录用日期: 2022年2月16日; 发布日期: 2022年2月28日

摘 要

本文分析了黄水沟流域1961~2019年间的水文过程变化特征, 并采用GCM模型和分布式水文模型(SWAT模型)预估了流域内的未来气候和来水量变化: 在1961~2019年间径流呈增加趋势, 年均增长率为 $0.0226 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年内径流主要分布在夏季, 占全年径流的57.1%。模拟结果表明, 在RCP4.5和RCP8.5情景下, 到21世纪末(2066~2099)黄水沟流域最高气温将分别升高2.8°C和5.0°C; 降水量总体呈上升的趋势, 2066~2099年间将增至251 mm和265 mm; 黄水沟径流呈现出先升高再下降的趋势, 最高年径流分别达 $3.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$, 黄水沟未来年径流在夏季变化幅度最高。研究结果可为黄水沟流域水资源合理开发利用, 提供科学基础和依据。

关键词

水文过程, 气候变化, 分布式水文模型, 趋势预估, 干旱区

Characteristics of Runoff in Huangshuigou River Basin and Its Future Change Trend

Yong Cheng¹, Gonghuan Fang², Honghua Zhou^{2*}

¹Bayinguoleng Water Resources Management Department of Xinjiang Trarim River Basin Authority, Korla Xinjiang

²State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang

Received: Jan. 12th, 2022; accepted: Feb. 16th, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

Annual runoff change characteristics of the Huangshuigou River during 1961~2019 were analyzed, and

作者简介: 程勇, 高级工程师, 1971年出生, 主要从事流域水资源管理。

*通讯作者 Email: zhouhh@ms.xjb.ac.cn

文章引用: 程勇, 方功焕, 周洪华. 黄水沟流域水资源变化特征及其未来趋势预估[J]. 水资源研究, 2022, 11(1): 42-49.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.111004

its future change trends were evaluated using GCM and SWAT model. The results show that annual runoff is increased from 1961 to 2019, with an annual increasing rate of $0.0226 \times 10^8 \text{ m}^3$. The annual runoff is mainly concentrated on summer, which accounts for 57.1% of the annual runoff. The simulation results show that under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario, the maximum temperature of Huangshuigou River basin will increase by 2.8°C and 5.0°C in the end of the 21st century (2066~2099), respectively; the total precipitation shows an increase trend that the average annual precipitation will increase to 251 mm and 265 mm in 2066~2099; the runoff of Huangshuigou River shows an increasing trend first and then decreasing, which the highest is $3.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The change degree of annual runoff in Huangshuigou River is the highest in summer. Our research could provide the basis for the rational utilization and scientific management of water resources in Huangshuigou River basin.

Keywords

Hydrological Process, Climate Change, Distributed Hydrological Model, Trend Estimation, Arid Area

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

在降水稀少、气候干旱的西北干旱区，水是经济、社会和生态可持续发展的基础资源和“命脉”[1]。水资源的多寡限制着西北干旱区社会经济的发展进程和前进步伐，水资源短缺已成为了西北干旱区持续发展的关键限制因素[2]。IPCC 第五次评估报告(AR5)预估未来全球气候变暖仍将持续，气候变化加剧了西北干旱区水资源的不确定性[3]。一方面，全球气候变化加速了干旱区冰川、积雪的萎缩[4]，温度的升高也使得降水率增加、降雪率下降[5]；另一方面，气候变暖背景下，极端高温事件将进一步增加，全球陆地气象干旱趋势可能进一步加剧[6]，全球气候变化还将因蒸发增强导致干旱区的干旱程度加剧[7]。同时，气候变化也可能诱发降水量增加，尤其是极端降水的增加[8]。未来西北干旱区的冰川、积雪、蒸发和降水的不确定性为未来水资源变化披上了层层迷雾。因此，如何有效预测未来气候变化条件下，流域水文水资源的变化已成为当今的研究热点。

黄水沟流域隶属于博斯腾湖流域，水资源主要来源于山区降水和冰川积雪融水，属雨雪混合补给河流。黄水沟发源于中天山的天格尔山南坡，流域中部巴伦台镇以上有两条支流，西支巴音沟，东支乌拉斯台沟，汇合后成为黄水沟的主流。河流自北向南进入焉耆盆地西北部，流经和静县、和硕县、焉耆县，洪水时有部分水量流入博斯腾湖。黄水沟承担着和静县、和硕县和焉耆县的生产、生活和生态用水重担，还是改善博斯腾湖水质的主要水源供给之一。因此，开展黄水沟的水文过程研究，预估未来水资源变化，不仅对焉耆盆地的社会、经济、生态发展有重要的指导意义，还对博斯腾湖未来水资源管理与水质改善措施的制定有着积极的作用。

2. 研究区概况

黄水沟发源于中天山的天格尔山南坡，自北向南流入焉耆盆地西北部，流域呈扇状，属雨雪混合补给河流(图 1)。流域中部巴伦台镇以上有两条支流，西支巴音沟，东支为乌拉斯台沟，发源于中天山支脉的艾尔宾山南坡。乌拉斯台沟为黄水沟主流，东西支流汇合后成为黄水沟。黄水沟出山口以上河长 110 km，为产流区，盆地内河长 52 km，流域集水面积约 4311 km^2 ，多年平均径流量约 $2.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。黄水沟沿干流公路为南、北疆的交通要道，是暴雨频发区域，河流径流年际变化和年内变化都很大，汛期 6~9 月径流量占年径流量的 66.7%。黄水沟防洪闸将黄水沟河道分为东西两条支流，东支最后注入博斯腾湖大湖；西支最后汇入乌拉斯台河老河道(现

在变为受工程控制的灌溉和输水河道)。在乌拉斯台河老河道和黄水沟西支汇合口下游 0.38 km 处为乌拉斯台河协比乃尔布呼渠进水闸，大部分水流被引入灌区，下泄水量经过 3.95 km 后汇入开都河。

黄水沟流域中上部为天然草地，植被覆盖率较高，对水源有一定的涵养作用；流域中部至山口多为风化岩石山脉，缺乏土壤覆盖，基本无植被生长，水源涵养能力极差。该流域地势落差大，河流源头与黄水沟水文站河段处高差约为 2000 m，河流表现出典型的山溪性河流特点。黄水沟流域属于典型的大陆性气候，冬冷夏热，日温差较大。流域内年平均降水量为 64.2 mm，6~8 月降水量占年降水量的 60.9%，年平均蒸发量 2177.0 mm。

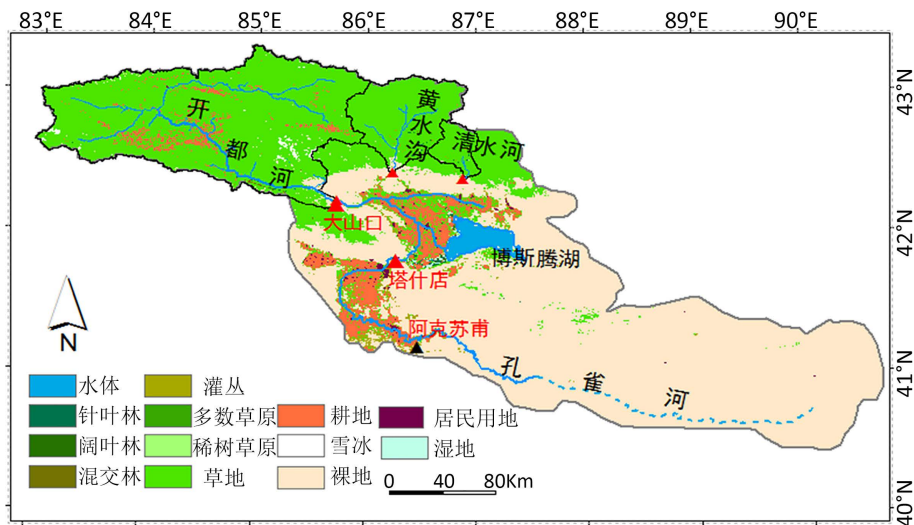


Figure 1. Sketch map of study area
图 1. 研究区示意图

3. 数据收集与研究方法

3.1. 未来气候变化预估

本文采用 GCM 气候模型进行未来气候变化预估。为避免仅用一个气候模型带来的偏差，我们采用了 CMIP 5 的 21 个 GCM 组成 GCM 集，对气温和降水进行校正后，用各模式的平均值作为 GCM 的预测结果。气候资料主要来自于黄水沟流域的巴伦台气象站长期监测数据(1975~2019 年)，包括：逐日最高气温(℃)、最低气温(℃)、降水(mm)、太阳辐射量(KJ/m²·day)、日平均风速(m/s)和相对湿度等。考虑到巴伦台气象站的高程在 2500 m 下，流域内 2500 m 高程以上没有气象观测站点，因此本研究设置不同的高程带并假设降水随着高程的增加以速率 Plaps 均匀增加，而温度以 Tlaps 的速率减少。由于区域气候模式均存在一定的偏差，尤其是在资料稀缺地区，因此，本文以气象站点的观测数据为基准，对 CORDEX 的数据进行校正。我们选择在干旱区校正效果较好的线性比例缩放(LS, Linear Scaling)和局部比例缩放(LOCI, Local Intensity Scaling)分别对 CORDEX 输出的气候模式数据进行校正[9]。在本研究中，所有这些模式选择的基准数据为 1976~2005 年的日气温和降水数据，以月为校正单位。

1) 气温的线性缩放(LS)

线性缩放可以校正模拟的多年月均气温与观测的多年月均气温相同。它根据模拟的变量与观测变量之间的偏差进行校正，通常，通过加上或者减去一个因子进行校正。

$$T_{cor,m,d} = T_{raw,m,d} + \mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{raw,m}) \quad (1)$$

式中： $T_{cor,m,d}$ 是校正后第 m 月的第 d 天的气温值； $T_{raw,m,d}$ 是模拟的第 m 月的第 d 天的气温值。 $\mu(\cdot)$ 代表求平均符号，如 $\mu(T_{obs,m})$ 为第 m 月的观测气温。

2) 降水的局部缩放(LOCI)

LOCI 方法可以校正湿日频率和湿日降水强度。通常 LOCI 方法分为两步：第一，对第 m 月定义一个湿日阈值 $P_{thres,m}$ ，保证校正后的降水序列中超过这个阈值的降水日数和观测的降水日数相等；第二，计算缩放因子

$S_m = \frac{\mu(P_{obs,m,d} | P_{obs,m,d} > 0)}{\mu(P_{raw,m,d} | P_{raw,m,d} > P_{thres,m})}$ ，以保证校正后的降水总量和观测的降水总量相等。有了这两个校正参数，就可以用下面的公式进行校正：

$$P_{cor,m,d} = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{raw,m,d} < P_{thres,m} \\ P_{raw,m,d} \times S_m, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

3.2. 未来径流变化预估

分布式水文模型，如 VIC (Variable Infiltration Capacity)模型、MIKE-SHE 模型、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)等，广泛用于流域水文水资源模拟，其中 SWAT 可用于干旱半干旱区[10] [11] [12] [13]。因此，本文采用 SWAT 模型预测黄水沟流域未来径流变化。考虑到黄水沟流域水文资料相对比较稀缺，且 SWAT 模型不具备冰川动态模块，本研究采用改进的适宜在新疆区域且扩展了冰川融雪模块和冰湖溃决洪水模拟的 SWAT 模型，改进后的模型具体见文献[14] [15]。SWAT 模型中采用 Penman-Monteith 方法计算潜在蒸散发；河道演算采用可变存储系数法或马斯京根法；冰川数据来自于第二期中国冰川目录；气候数据采用巴伦台的实测数据和 GCM 模拟结果；水文数据来自于黄水沟水文站的逐日监测数据；数字高程数据来自于国际科学数据平台 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)，分辨率为 90 m；土壤数据采用中国科学院新疆 1:100 万土壤类型图；土地利用数据来自中国西部环境与生态科学数据中心 2000 年新疆 1:10 万土地利用数据。

采用 SCE-UA 方法率定模型参数[16]；采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)、相对偏差(PBIAS)和确定性系数(R^2)验证模型的精度[14] [15]。模拟结果显示，模型率定值效果良好，与前人研究一致[14] [15] [17]；NS、PBIAS、 R^2 分别是 0.81、2.94%、0.81，模拟的月流量指标高达 0.86、1.31%、0.87，达到了 Moriasi 等提出的模型效果为优的标准[18] (表 1)。

Table 1. Model validation results
表 1. 模型验证参数结果

模型率定验证结果			模型模拟验证结果		
NS	PBIAS (%)	R^2	NS	PBIAS (%)	R^2
0.81	2.94	0.81	0.86	1.31	0.87

3.3. 数理统计方法和作图

径流突变检测采用 Pettitt's 检测法。GCM 和 SWAT 模型在 R 软件下运行，作图采用 R 软件和 Sigmaplot 12.5。

4. 结果与分析

4.1. 黄水沟水文过程变化特征

黄水沟 1961~2019 年间年径流量呈增加趋势，多年平均年径流量为 $2.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加趋势为 $0.0226 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图 2A)。从年代际来看(图 2B)，20 世纪 60~80 年代，黄水沟站年径流均为负距平，而 90 年代以后，年径流均为正距平。进入 21 世纪以来，黄水沟进入丰水期，尤其是 2000~2009 年间年径流量较多年平均水平增加了 $0.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。基于 Pettitt's 检验方法对黄水沟 1961~2019 年年径流时间序列进行了突变检验，发现年径流于 1989

年发生了由低到高的突变,黄水沟在分界点前的平均径流量为 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$; 分界点之后的平均径流量为 $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比分界点之前径流增加了 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 2A)。

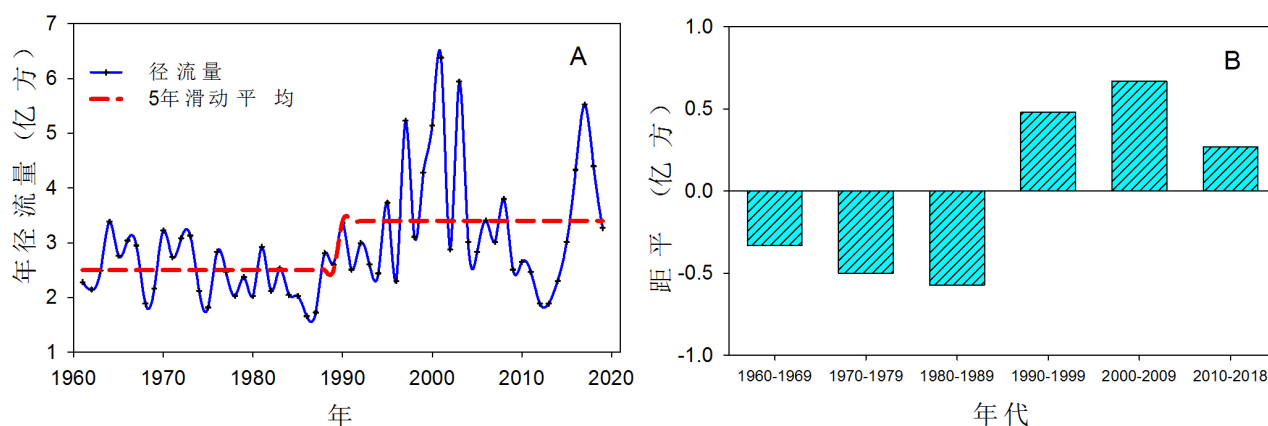


Figure 2. Annual runoff (A) and anomaly (B) from 1951~2019 in Huangshuigou River
图 2. 黄水沟 1951~2019 年径流量变化(A)及其距平(B)

从年内分布来看(图 3),黄水沟的年径流量主要集中在夏季,其中春季(3~5 月)径流量占全年径流量的 13.3%,夏季(6~8 月)径流量占全年径流量的 57.1%,秋季(9~11 月)径流量占全年径流量的 19.4%,冬季(12 月至次年 2 月)径流量占全年径流量的 10.2%。这可能是流域产汇流特征所致,高山区冰雪融水占比较高,夏季山区冰雪融化,导致了径流量的增加。

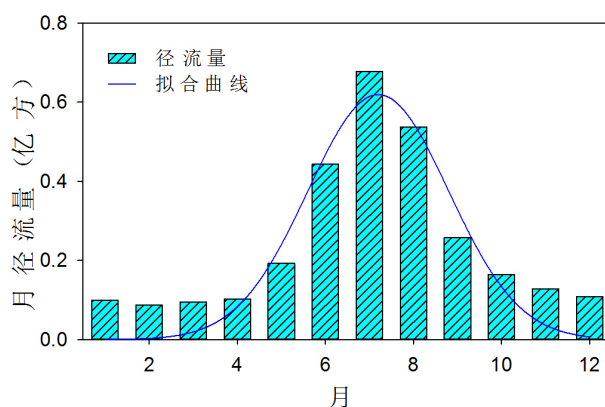


Figure 3. Annual distribution of runoff in Huangshuigou River
图 3. 黄水沟径流量年内分布

4.2. 黄水沟未来气候变化预估

为避免一个气候模型的预测存在偏差,本文利用 CMIP5 的 21 个 GCM 气候模式组成 GCM 集,采用气温校正方法和降水校正方法,得到未来黄水沟流域的气候变化情况,用各模式的平均值作为 GCM 的最终预测结果(图 4)。黄水沟流域在 RCP4.5 和 RCP8.5 下,温度均将持续升高,但是在 RCP8.5 下温度增加幅度更大(图 4)。在 RCP4.5 情景下,到 21 世纪末(2066~2099)最高气温和最低气温将分别升高 2.8°C 和 2.9°C ,温度的年平均变化速率为 0.03°C/a 。在 RCP8.5 情景下,气温升高更加剧烈,在 2006~2035、2036~2065 和 2066~2099 时期,最高温度将分别升高 1.1°C 、 2.7°C 和 5.0°C ,最低气温的升高幅度略高于最高气温。

未来黄水沟水量总体将呈上升趋势(图 5)。在 RCP4.5 情景下,黄水沟流域的年平均降水量 2066~2099 年将

增加至 251 mm, 降水增加量为 37.2 mm, 年均降水量变化率为 0.37 mm/a。在 RCP8.5 情景下, 年平均降水量 2066~2099 年将增加至 265 mm, 降水增加量 51.6 mm, 年均降水量变化率为 0.53 mm/a。

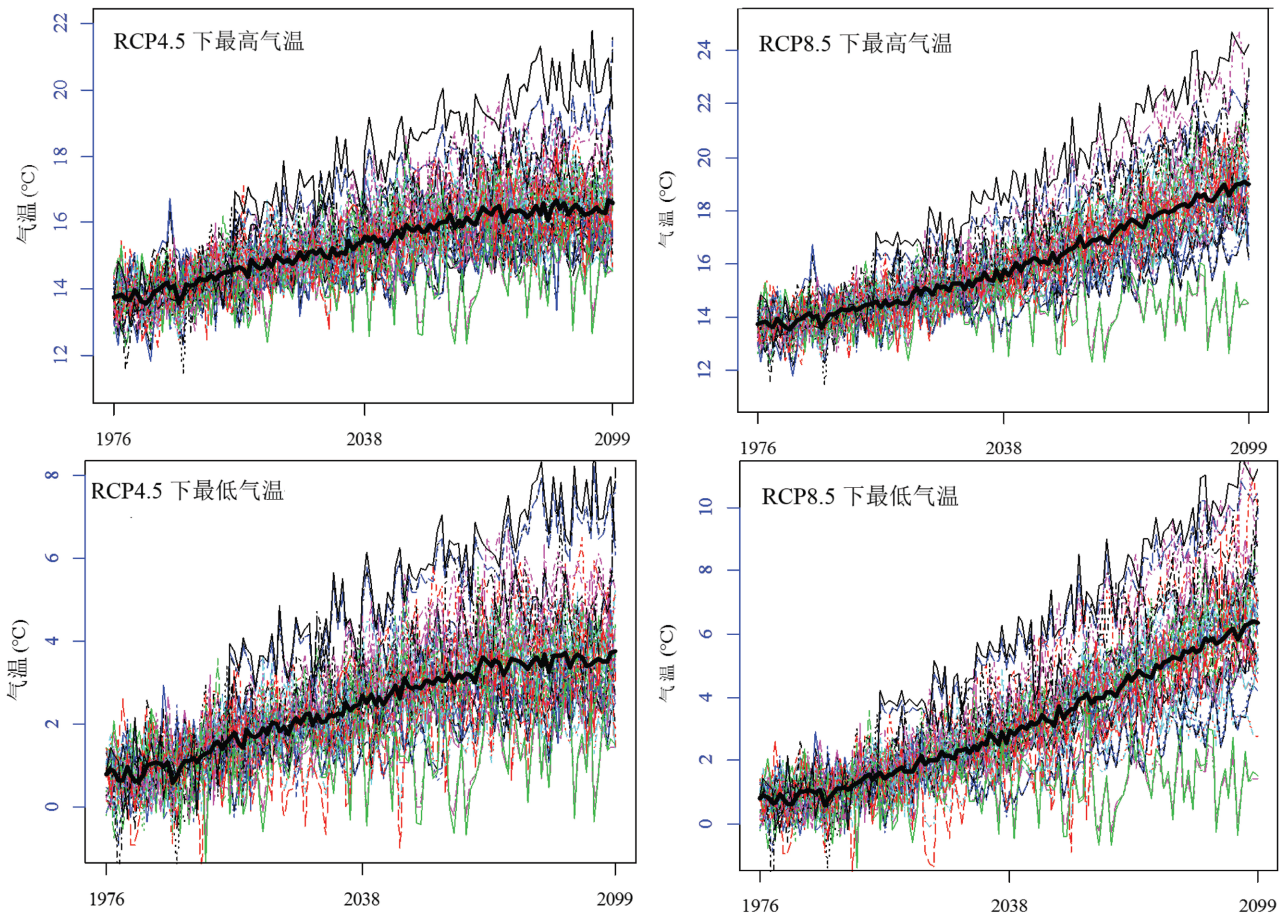


Figure 4. Temperature changes of Huangshuigou River under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario

图 4. RCP4.5 和 RCP8.5 情景下黄水沟流域气温变化

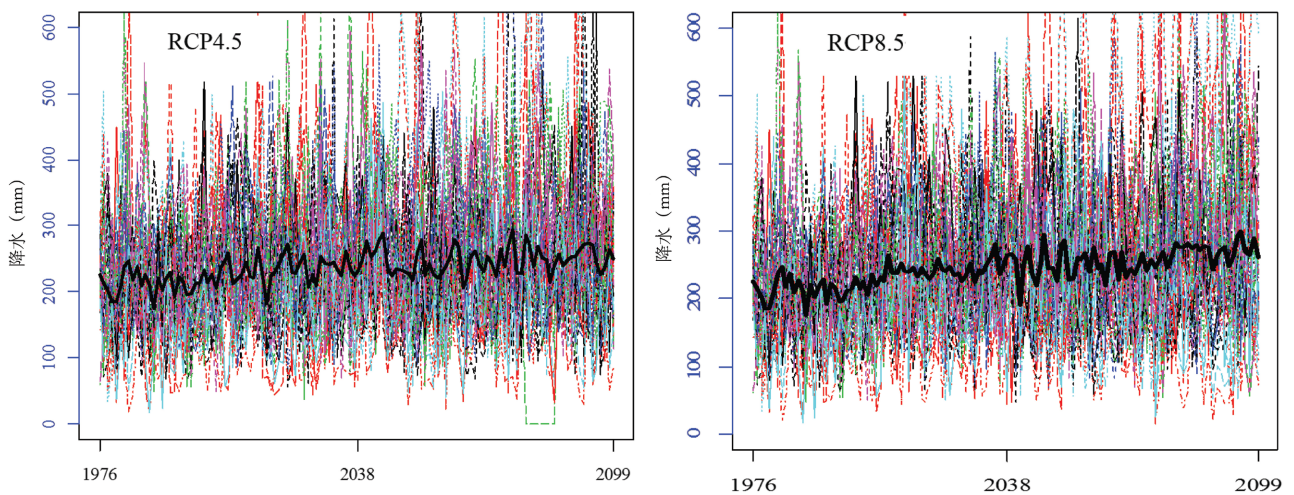


Figure 5. Precipitation changes of Huangshuigou River under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario

图 5. RCP4.5 和 RCP8.5 情景下黄水沟流域降水变化

4.3. 黄水沟未来径流预估

用气候变化情况来驱动水文模型，在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候变化情景下，分别得到 252 组模拟结果，采用模拟结果的中位数值来表征最终流域的模拟结果(图 6)。RCP4.5 情景下，在年际尺度上，黄水沟流域的径流量总体呈下降趋势。在 RCP4.5 情景下，黄水沟流域的径流量从 1986~2005 的 $3.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 开始波动变化，在 2020~2039 年达到最高，达 $3.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，然后下降到 2080~2099 的 $3.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；在年内尺度上，各个月份的流量总体上均有一定程度的下降，但夏季是径流量下降幅度一年中最高的时期。在 RCP8.5 情景下，在年际尺度上，黄水沟流域的径流量总体也呈下降趋势，从 1976~2005 的 $3.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，先增加到 2020~2039 的 $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，然后下降到 2080~2099 的 $3.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在年内尺度上，各个月份的流量总体上均有一定程度的下降，但夏季是径流量下降幅度一年中最高的时期。

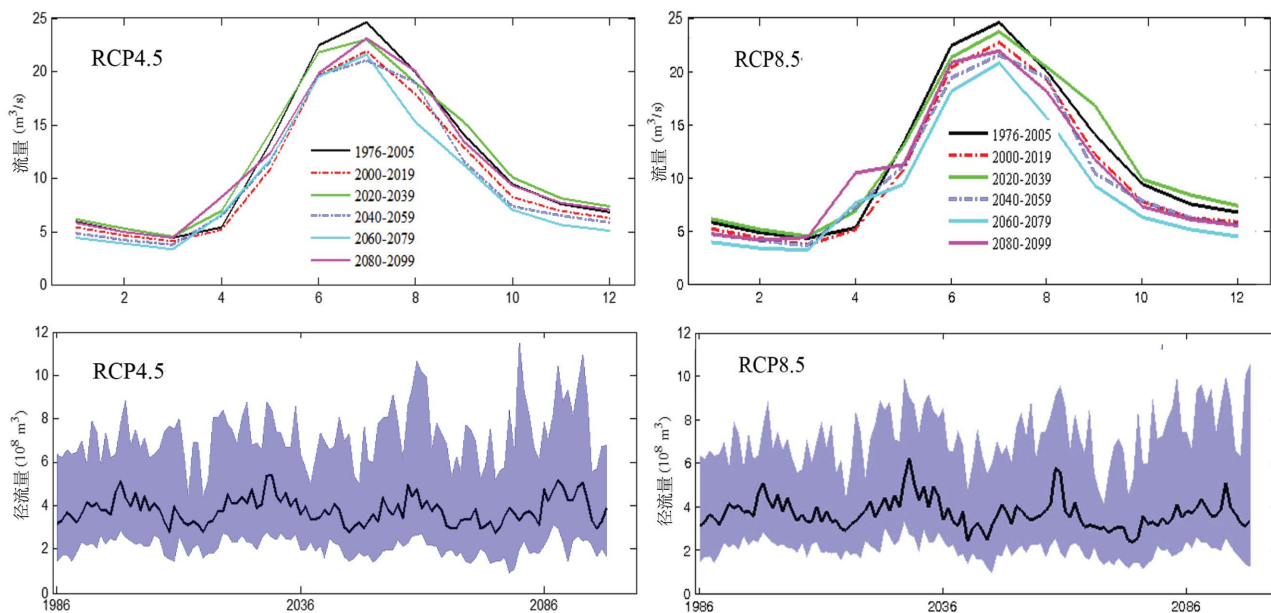


Figure 6. Interannual and seasonal variation of Huangshuigou River under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario. The shaded area is the 10% and 90% uncertainty interval of the model

图 6. 黄水沟流域在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，未来出山口径流量的年际变化和季节变化。阴影区域为模型的 10% 和 90% 不确定性区间

5. 结论

本文利用黄水沟水文站 1961~2019 年的径流数据及巴伦台气象站的逐日气象资料，运用 GCM 气候模型、分布式水文模型 SWAT 等气候水文模型和数理统计方法，对黄水沟流域的径流过程变化及未来气候和径流量的变化趋势进行了分析，主要结论如下：

- 1) 黄水沟 1961~2019 多年平均径流量为 $2.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年径流量呈增加趋势，增加率为 $0.0226 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其突变时间为 1989，突变后(1990~2019)较突变前(1961~1989)平均增加了 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。
- 2) 黄水沟年内径流量主要分布在夏季(6~8 月)，春、秋和冬季的径流量占比较少，夏季径流量解释了全年径流量的 57.1%。
- 3) 黄水沟流域未来气温在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下都将呈现升温趋势，其中 RCP4.5 情景下，2099 年最高温度将升温 2.8°C ；未来流域降水在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下也将呈增加趋势。RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，2039 年未来年径流量分别增加至 $3.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，随后将呈下降趋势，至 2099 年未来年径流量将分别

达到 $3.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。年内分布来看, 径流量变化最大的时间主要集中在夏季。

基金项目

本研究由国家自然科学基金项目(42130512)和新疆兵团第九师科技局科技计划项目(2020JS016)资助。

参考文献

- [1] CHEN, Y. N., LI, Z., LI, W. H., *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. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5385-z>
- [2] CHEN, Y., LI, B., LI, Z., *et al.* Water resource formation and conversion and water security in arid region of Northwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 939-952. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1308-x>
- [3] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 1-8. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20211124.1931.002.html>, 2021-11-25.
CHEN Yaning, LI Zhi and FANG Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 1-8. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20211124.1931.002.html>, 2021-11-25. (in Chinese)
- [4] KRAAIJENBRINK, P. D. A., BIERKENS, M. F. P., LUTZ, A. F., *et al.* Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature*, 2017, 549: 257-260. <https://doi.org/10.1038/nature23878>
- [5] LI, Y. P., CHEN, Y. N., WANG, F., *et al.* Evaluation and projection of snowfall changes in high mountain Asia based on NASA's NEX-GDDP high-resolution daily downscaled dataset. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba926>
- [6] LI, H., LI, Z., CHEN, Y., *et al.* Drylands face potential threat of robust drought in the CMIP6 SSPs scenarios. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(11): 114004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2bce>
- [7] YAO, J. Q., ZHAO, Y., CHEN, Y. N., *et al.* Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.200>
- [8] MA, Q., ZHANG, J., MA, Y., *et al.* How do multiscale interactions affect extreme precipitation in eastern Central Asia? *Journal of Climate*, 2021, 34(18): 7475-7491. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0763.1>
- [9] FANG, G., YANG, J., CHEN, Y., *et al.* Impact of GCM structure uncertainty on hydrological processes in an arid area of China. *Hydrology Research*, 2018, 49(3): 893-907. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.227>
- [10] LUO, Y., ARNOLD, J., ALLEN, P., *et al.* Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(4): 1259-1267. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1259-2012>
- [11] LEVESQUE, E., ANCTIL, F., Van GRIENSVEN, A., *et al.* Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(5): 961-976. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.961>
- [12] ARNOLD, J., MUTTIAH, R., SRINIVASAN, R., *et al.* Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River basin. *Journal of Hydrology*, 2000, 227(1-4): 21-40. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00139-0)
- [13] SHI, P., CHEN, C., SRINIVASAN, R., *et al.* Evaluating the SWAT model for hydrological modeling in the Xixian watershed and a comparison with the XAJ model. *Water Resources Management*, 2011, 25(10): 2595-2612. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9828-8>
- [14] JI, H., FANG, G., YANG, J., *et al.* Multi-objective calibration of a distributed hydrological model in a highly glacierized watershed in Central Asia. *Water*, 2019, 11(3): 554. <https://doi.org/10.3390/w11030554>
- [15] FANG, G., YANG, J., CHEN, Y., *et al.* How hydrologic processes differ spatially in a large basin: Multisite and multiobjective modeling in the Tarim River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 7098-7113. <https://doi.org/10.1029/2018JD028423>
- [16] DUAN, Q., AJAMI, N. K., GAO, X., *et al.* Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5): 1371-1386. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.11.014>
- [17] ZHAO, C., SHI, F., SHENG, Y., *et al.* Regional differentiation characteristics of precipitation changing with altitude in Xinjiang region in recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1203-1213.
- [18] MORIASI, D., ARNOLD, J., VAN LIEW, M., *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>