

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0072

尤扬,李朋朋,高云.不同气候情景下和田河上游径流变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):703-713. YOU Y, LI P P, GAO Y. Runoff changes in upper Hotan River under different climate scenarios[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 703-713. (in Chinese)

不同气候情景下和田河上游径流变化

尤扬¹,李朋朋¹,高云²

(1.河北工程大学园林与生态工程学院,河北邯郸056038;

2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京210098)

摘要:位于内陆的和田绿洲,其水资源主要来自上游山区,山地径流的变化将直接影响社会经济活动。基于此,对和田河流域上游1980—2015年的降水、温度、径流的变化趋势以及降水、温度对径流的影响进行分析,构建相应的 soil and water assessment tool(SWAT)模型,结合气候模式对未来6种气候变化情景下的径流进行预测。结果表明:1980—2015年和田河流域上游年均气温和年降水的变化率分别为0.31℃/10a和16.5mm/10a,均呈显著增加趋势,年径流也呈上升趋势;以2009—2011年为基准期,若和田河上游降水量分别增加12.5%、10%和减少10%,则其径流量将分别增加8.19%、6.45%和减少6.23%;若和田上游流域温度分别增加0.3℃、1℃和2℃,则和田河径流量将分别增加1.96%、7.74%和12.99%;预设的6种情景径流量均呈现增加趋势,其中2021—2030年HADG_RCP8.5情景下径流量最小,为51.25亿m³/a;2031—2040年,BCC_RCP4.5情景下径流量最小,为53.06亿m³/a。所得结果可以为当地水资源调配提供理论支撑。

关键词:和田河流域;径流变化;SWAT;预估;情景模拟

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



气候变化已成为21世纪全球最重要的环境挑战之一,气候变化将进一步加剧人类对水资源需求的矛盾,而全球几乎所有地区都将经历气候变化对水资源系统的负面影响^[1-2]。有关气候变化对水文水资源影响的研究已十分广泛^[3-7],尤其是在人类活动较少的地区,有研究^[8-10]表明气候变化是河川径流变化的主要驱动因素。越来越多的证据表明研究变化环境^[12-13]下水文循环过程成为众多学者^[14-16]关注的热点之一。

20世纪80年代以来全球气候变化对新疆地区影响明显,气温升高加快,许多河流径流量增加,部分湖泊水位持续上升^[17]。位于新疆南部荒漠区的和田河是高山冰雪融水与雨水混合补给的河流,且以冰川融水补给为主^[18],气候的变化必将引起其径

流量的改变。同时位于流域内的和田绿洲的水源单一,其水资源主要来自和田河上游山区,山区径流的变化将直接影响社会经济活动,该地区主要因和田河而兴,和田河径流量的变化对于绿洲的稳定发展至关重要,同时也会对流域下方的塔里木河供水及其生态环境产生重要影响,因此研究变化环境下和田河径流变化具有重要现实意义。

和田河是塔里木河的3条主要支流之一。近年来很多研究者对塔里木河流域的径流变化^[19-33]、气候变化^[34-35]等问题进行了一系列的研究。其中一些研究^[36]指出,和田河径流量随着温度和降水量的增加而持续减少,其与塔里木河其他3个水源(开孔河、阿克苏河、叶尔羌河)呈现出相反的情况,但同时另有研究^[38-39]指出,和田河径流随着温度和降水量

收稿日期:2022-02-09 修回日期:2022-06-17 网络出版时间:2022-02-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220222.1636.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)

作者简介:尤扬(1996—),男,河北新城人,主要从事农业水土、园艺研究。E-mail:401271285@qq.com

通信作者:高云(1988—),女,内蒙古呼和浩特人,工程师,主要从事水文水资源研究。E-mail:410330579@qq.com

的增加呈现出增加趋势。基于此,以和田河流域上游区域为研究对象,应用趋势分析方法分别研究降水、温度、径流自 1980—2015 年的变化趋势以及降水、温度对径流的影响;利用 Soil and water Assessment Tool (SWAT)模型对和田河上游径流进行模拟,分析降水和温度对和田河流域上游径流的影响,并得出预设情景模式下和田河上游径流情况,旨在为和田河流域的水资源配置和可持续发展提供科学支持。

1 气候变化对上游径流的影响

1.1 研究区概况

和田河上游为玉龙喀什河和喀拉喀什河,均为山岳区,海拔高度为 1 192~6 858 m,部分山峰终年冰雪覆盖。玉龙喀什河集水面积 21 231.90 km²,在其河流的出山口位置设有同古孜洛克水文站;喀拉喀什河集水面积 14 581.90 km²,在其河流的出山口位置设有乌鲁瓦提水文站。

原始观测数据来源为和田河上游出山口位置处的乌鲁瓦提和同古孜洛克监测站点,其中气温、降水以及径流量的时间系列为 1980—2015 年,共计 36 a。气温及降水数据个别年份出现缺测,由和田气象站观测值代替。径流变化主要由气象因素引起,而气候变化对径流的影响具有多样性和复杂性,其主要是受降水以及气温的变化影响从而影响河流径流的补给、蒸发等,故主要分析降水、气温对径流的影响。

1.2 气候的变化特征

1.2.1 温度变化

1980—2015 年年均温度(T)线性变化趋势见图 1。由图 1 可知 1980—2015 年和田河流域上游年年均气温变化率为 0.31 °C/10 a,且其年平均气温呈显著增加趋势($r=0.42>r_{0.05}=0.33$)。

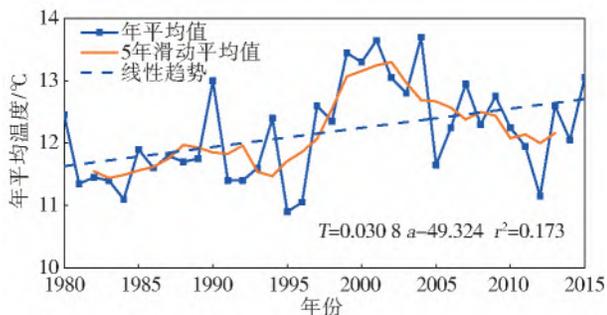


图 1 1980—2015 年年均温度线性趋势

Fig. 1 Linear trend of annual mean temperature from 1980 to 2015

经 5 年滑动平均曲线分析,1980—1997 年年平均气温基本稳定,之后上升;同时从 Mann-Kendall (M-K)突变检验见图 2 来看,其 UF 和 UB 两条曲

线 1993 年出现交点,且交点在临界线之间,表明交点对应的时刻即 1993 年,便是突变开始的时间。

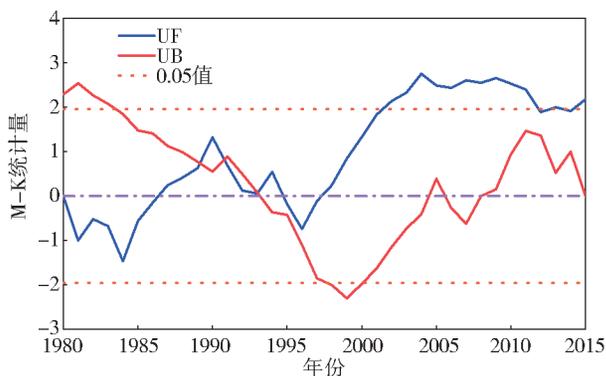


图 2 1980—2015 年年均温度 M-K 检验

Fig. 2 M-K test of annual average temperature from 1980 to 2015

1.2.2 降水变化

1980—2015 年年均降水(P)线性变化趋势图见图 3。由图 3 可知,1980—2015 年和田河流域上游年平均降水量变化率为 16.5 mm/10 a,且其年平均降水呈显著增加趋势($r=0.34>r_{0.05}=0.33$)。

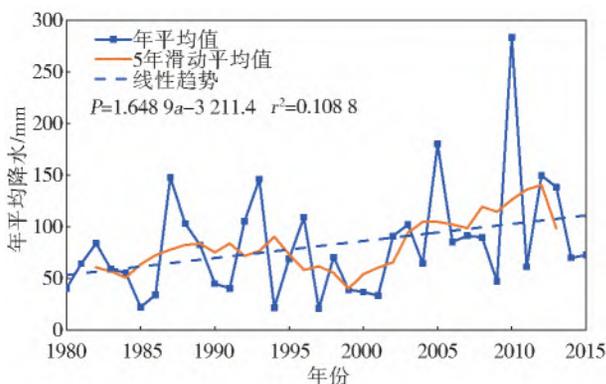


图 3 1980—2015 年年均降水线性趋势

Fig. 3 Linear trend of annual mean precipitation from 1980 to 2015

经 5 年滑动平均趋势分析,年平均降水量的增加趋势开始于 2002 年左右;而由 M-K 突变检验(图 4)来看,其 UF 和 UB 两条曲线 2003 年出现交点,且交点在临界线之间,表明交点对应的时刻即 2003 年便是突变开始的时间。

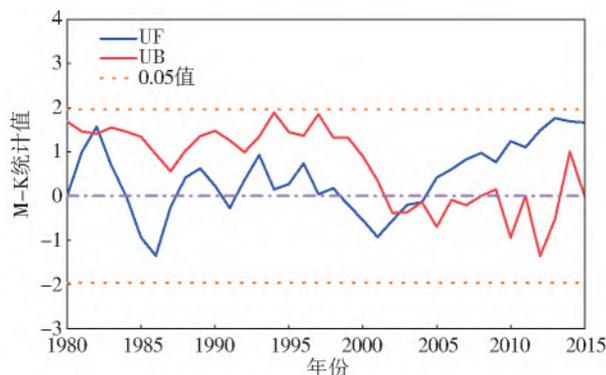


图 4 1980—2015 年年均降水 M-K 检验

Fig. 4 M-K test of annual average precipitation from 1980 to 2015

1.3 气候变化对径流的影响

1980—2015 年年径流量 (R) 线性趋势见图 5。由图 5 可知 1980—2015 年年平均径流量呈增加趋势,但增加趋势不显著 ($r=0.154 < r_{0.05}=0.256$); 和田河上游 1980—2015 年的近 36 年来年平均径流量变化率约 $3.4 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 。此结果与吕继强等^[28]、周晓曦等^[17]的研究结果基本一致。

围不在同一个 3 度带或 6 度带上,故采用 Albers 投影,其相关参数见表 1。

表 1 投影坐标系统参数
Tab. 1 Projection coordinate system parameters

投影	椭球体	北偏移	东偏移	中央经线	标准纬线	标准纬线
Krasovsky_1940_Albers	Albers	0	0	105	25	47

数字高程 (Digital Elevation Model, DEM) 为 SWAT 模型数据库中最为重要的空间数据资料,可用于计算一系列 SWAT 数据库所需的参数,其中包括流域河网水系的提取,子流域范围的确定以及坡度、坡向的提取等。高程数据来自美国国家航空和航天局 (NASA) (<https://www.nasa.gov/>), 栅格精度为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

根据 DEM 数据进行子流域的划分,指定流域的出口分别为上游河流的 2 个出山口同古孜洛克站和乌鲁瓦提站,然后进行河网的划分及相关参数的计算,最终将喀拉喀什河上游和玉龙喀什河上游研究区分别划分为 23 个和 27 个子流域,见图 7。

土地利用是 SWAT 模型的重要数据之一,土地利用变化导致土地覆被发生变化,从而影响降水的截留、下渗、蒸发等陆面水文过程及河道产汇流过程,进而影响流域出口断面的流量过程。土地利用数据来自资源环境数据云平台 (RESDC) (<http://www.resdc.cn>), 时间为 2010 年,栅格精度为 30 m 。根据土地利用数据建立适应 SWAT 模型的土地利用类型索引表。

由于研究区内只有一个气象站即和田站,因此采用 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集 (the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model) CMADSV1.1,数据集的空间分辨率为 $1/4^\circ$,时间分辨率为逐日,时间跨度为 2008—2014 年 (<http://westdc.westgis.ac.cn>)。考虑到山区上游为冰川区,因此将各子流域高程自动划分为 10 类高程带,并按高程带加载冰川水体数据,冰川数据来源为中国第 2 次冰川编目数据集 (V1.0)。

2.2 参数率定与验证

2.2.1 参数率定

综合考虑山区河流的典型水文过程,选取 SWAT 模型提供的与径流模拟相关的 26 个参数进行校准、验证和敏感性分析。利用 SWAT-CUP 进行全局性敏感分析,根据全局性敏感分析 (t -Stat 值

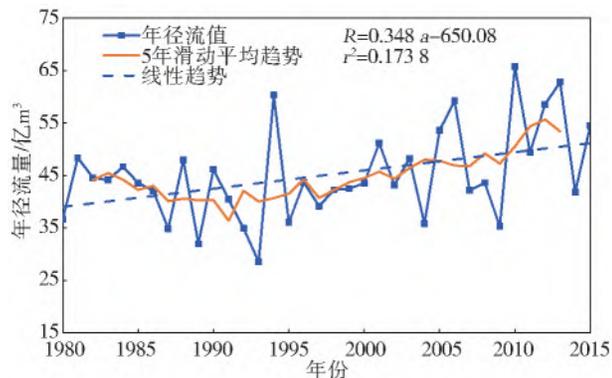


图 5 1980—2015 年年径流量线性趋势

Fig. 5 Linear trend of annual runoff from 1980 to 2015

1980—2015 年年径流的 M-K 突变检验见图 6。由图 6 可知 1985—2005 年径流量呈下降趋势,而在 2004 年开始呈上升趋势,突变点主要集中在 2005 年前后,同时由该图也可以看出近 10 年来径流量明显增加。

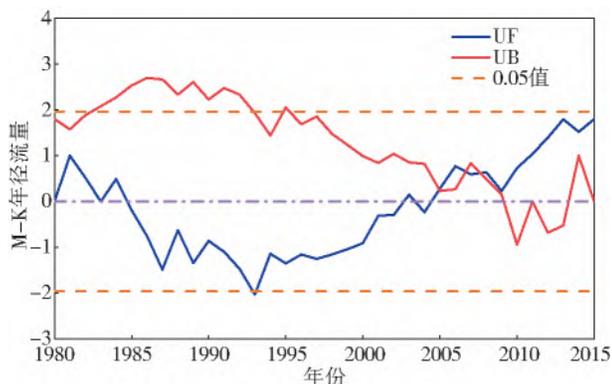


图 6 1980—2015 年年均降水 M-K 检验

Fig. 6 M-K test of annual average precipitation from 1980 to 2015

由以上分析可得,和田河年径流在 1980—2015 年总体呈上升趋势,特别是进入 21 世纪以来,气温升高导致冰川融雪加速,以及降水增加,都导致和田河径流量的增加^[38]。

2 和田河上游 SWAT 模型建立

2.1 和田河上游 SWAT 模型的建立

本文对于不同来源的空间数据,均经过投影变换为统一的投影坐标系统进行分析。由于研究区范

为敏感性程度,绝对值越大越敏感; P -Value 值决定了敏感性的显著性,越接近于 0 越显著),并参考类似流域的径流模拟研究,最终选取 18 个与雪过程、

地下水、入渗、蒸发、土壤和盆地参数变化有关的参数。利用 SUFI-2 算法对本模型进行参数率定,通过迭代运算,得到本模型的最优参数,结果见表 2。

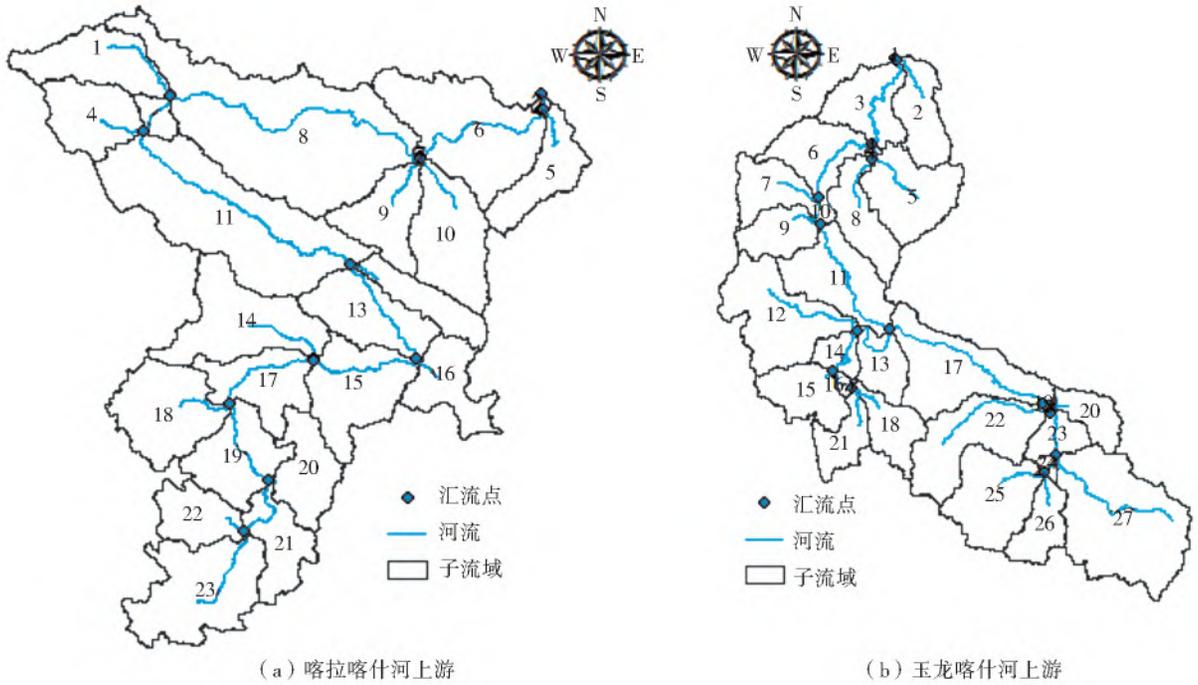


图 7 子流域划分

Fig. 7 Sub-basin division map

表 2 模型参数率定取值

Tab. 2 Model parameter calibration value table

参数名称	描述	取值范围	率定值	
			乌鲁瓦提	同古孜洛克
$v_SFTMP.bsn$	降雪气温/ $^{\circ}C$	$[-5,5]$	-1.65	-0.78
$v_SMTMP.bsn$	融雪气温/ $^{\circ}C$	$[-5,5]$	1.75	2.02
$v_SMFMX.bsn$	最大融雪因子/ $[mm \cdot (^{\circ}C \cdot d)^{-1}]$	$[0,10]$	1.65	3.32
$v_SMFMN.bsn$	最小融雪因子/ $[mm \cdot (^{\circ}C \cdot d)^{-1}]$	$[0,10]$	1.45	1.45
$v_TIMP.bsn$	积雪温度滞后因子	$[0,1]$	0.64	0.088
$v_SNO50COV.bsn$	50% 覆盖度时的 SNOCOV MX 分数	$[0,0.9]$	0.32	0.83
$v_SNOCOV MX.bsn$	雪深阈值/mm	$[0,500]$	257.50	118.75
$v_PLAPS.sub$	降水垂直变率/ $(mm \cdot km^{-1})$	$[-100,500]$	143	141
$v_TLAPS.sub$	气温垂直变率/ $(^{\circ}C \cdot km^{-1})$	$[-10,10]$	-3.50	-4.65
$v_ALPHA_BF.gw$	基流 α 因子/d	$[0,1]$	0.69	0.078
$v_GW_DELAY.gw$	地下水的延迟/d	$[30,450]$	376	329
$v_GWQMN.gw$	发生回归流的浅层含水层的水位阈值/mm	$[0,2]$	1.31	1.22
$v_GW_REVAP.gw$	地下水的再蒸发系数	$[0.02,0.2]$	0.17	0.072
$v_REVAPMN.gw$	发生 REVAP 所需的浅水层的水位阈值/mm	$[0,500]$	87.5	150.01
$v_ESCO.hru$	土壤蒸发补偿因子	$[0,1]$	0.51	0.97
$r_CN2.mgt$	SCS 径流曲线数	$[-0.2,0.2]$	-0.062	0.047
$r_SOL_K.sol$	土壤饱和和下渗率	$[-0.8,0.8]$	0.71	0.29
$v_SURLAG.bsn$	地表径流滞后系数	$[0.05,24]$	13.82	10.41

注: v 表示替换原有值, 直接对参数赋予一个新值; r 表示相乘, 是指模型参数乘以 1 加减率定值。

2.2.2 模型验证

在模型验证中, 分别采用纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, N_{SE})、均方根误差与

标准差的比值 R_{SR} (ratio of root mean squared error to standard deviation)以及百分误差(percentage of bias, P_{BIAS})来进行验证。

$$N_{SE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{mean,sim})^2} \right] \quad (1)$$

$$R_{SR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{mean,sim})^2}} \quad (2)$$

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})}{\sum_{i=1}^n Y_{i,obs}} \times 100 \quad (3)$$

式中: $Y_{i,obs}$ 表示第 i 月的观测值, m^3/s ; $Y_{i,sim}$ 为第 i 月的模拟值, m^3/s 。当 $R_{SR} \leq 0.7$ 、 $N_{SE} > 0.5$ 、 $P_{BIAS} <$

25%时,模拟结果满足要求;当 $0.5 < R_{SR} \leq 0.6$ 、 $0.65 < N_{SE} \leq 0.75$ 和 $\pm 10\% < P_{BIAS} \leq \pm 15\%$ 时,模拟结果好;当 $R_{SR} \leq 0.5$ 、 $0.75 < N_{SE} \leq 1.0$ 和 $P_{BIAS} \leq \pm 10\%$ 时,模拟结果较好。

分别以 2009—2012 年和 2013—2014 年作为模型的预热期、校准期和验证期。乌鲁瓦提水文站和同古孜洛克水文站月径流模拟结果见图 8 和表 3。乌鲁瓦提水文站月径流的 N_{SE} 、 R_{SR} 、 P_{BIAS} 在率定期分别为 0.8、0.44 和 -9.8%,而在验证期分别为 0.80、0.44 和 -6.1%,证明模型模拟效果良好;同理,由表 3 可以看出同古孜洛克水文站月径流模拟效果好。因此,建立的 SWAT 模型在和田河上游区域总体模拟效果较好,具有良好的应用前景。

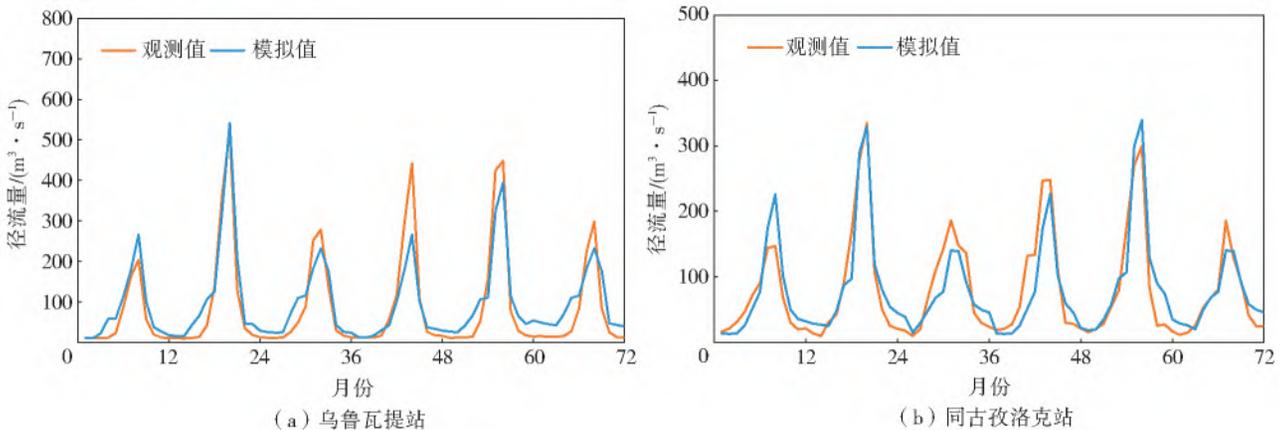


图 8 月径流率定期和验证期模拟结果

Fig. 8 Simulation results of regular and verification period of runoff rate

表 3 模拟指标结果

Tab. 3 Simulation index results

时期	指标	乌鲁瓦提站	同古孜洛克站
率定期 (2009—2011)	N_{SE}	0.80	0.82
	R_{SR}	0.44	0.42
	P_{BIAS}	-9.8%	-2.2%
验证期 (2012—2014)	N_{SE}	0.80	0.71
	R_{SR}	0.44	0.55
	P_{BIAS}	-6.1%	9.6%

2.2.3 温度、降水对径流的影响

目前,用 SWAT 方法量化气候变化对径流的影响有 2 种方法:第 1 种为输入温室气体浓度变化引起的气候变化值;第 2 种方法为输入降水和温度的具体变化量。第 2 种方法应用比较方便、广泛,因此采用第 2 种方法,即直接输入降水和温度的特定增量情景来预估温度和降水变化对径流的影响。以 2009—2011 年的率定期间的降水量、最高温度和最低温度为基准,同时考虑到 1980—2015 年期间降水和气温线性趋势分别上升了 12.5% 和 0.3%,故设置

6 种情景研究气候变化对径流的影响。

由表 4 知,和田河上游流域降水量发生变化 ($P+12.5\%$ 、 $P+10\%$ 和 $P-10\%$),其他参数不变,和田河径流量(同古孜洛克和乌鲁瓦提的总径流量)将分别增加 8.19%、6.45% 和减少 6.23%。同时,若和田上游流域温度变化分别增加 0.3℃、1℃ 和 2℃,其他参数不变,和田河径流量将分别增加 1.96%、7.74% 和 12.99%,径流增加主要为冰川融雪径流。因此,降水和温度变化均对和田河径流产生影响:随着降水的增加,以及温度升高,和田河径流量增加;随降水减少,其径流量减少。

表 4 降水、温度变化对径流的影响

Tab. 4 Effects of precipitation and temperature changes on runoff

序号	降水变化/%	温度变化/℃	径流变化/%
1	12.5	—	8.19
2	10.0	—	6.45
3	-10.0	—	-6.23
4	—	0.3	1.96
5	—	1.0	7.74
6	—	2.0	12.99

3 基于 SWAT 模型的上游径流预测

3.1 未来气候预估

CMIP5 设置了 4 种典型排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5),使用了在中国表现较好的 3 个大气环流模式见表 5,其中包括了 RCP4.5、RCP8.5 排放情景下 21 世纪(2006—2100 年)相关气象因子数据。

然而,气候模式直接输出结果存在着较大的系统性偏差。因此,在使用 GCM 气候模式数据时,需进行降尺度处理。统计降尺度法利用多年的观测资料建立大尺度气候状况(主要是大气环流)和区域气候要素之间的统计关系,并用独立的观测资料检验这种关系,最后再把这种关系应用于全球气候模式

输出的大尺度气候信息,来预估区域未来的气候变化情景(如气温和降水)。

采用等距分位匹配法(the equidistant quantile-based mapping method)进行统计降尺度处理,基于气候模式数据和实测气象数据历史基准期的累积概率分布不同,组合调整未来预测期的气候模式累积概率分布。利用和田河流域 3 个气象站点(和田站、皮山站、于田站)的降水、气温等观测资料,利用等距分位匹配法建立统计降尺度模型,对 BCC_CSM1.1、HadGEM2-ES、MIROC-ESM-CHEM 3 种气候模式的 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下未来气候模式数据进行降尺度,生成降尺度后的流域未来降雨、气温等气象序列。

表 5 气候模式基本信息

Tab. 5 Basic information of climate model

情景模式	空间分辨率	研究机构
BCC_CSM1.1	2.7906°×2.8125°	国家气候中心耦合模式(中国)
HadGEM2-ES	1.875°×1.24°	哈德利气象中心(英国)
MIROC-ESM-CHEM	2.7906°×2.8125°	Frontier 全球变化研究中心(日本)

图 9 和图 10 分别为各情景模式下 2020—2090 年和田河流域年均气温(T)和年降水(P)的预估值(图中方程为各对应模式下线性趋势拟合方程)。由图可知,在 RCP4.5 气候情景下,BCC 模式和 HADG 模式下 2020—2090 年和田河流域气温均呈上升趋势,其气温上升幅度分别为 0.2 °C/10 a 和 0.4 °C/10 a;降水也呈上升趋势,

其上升幅度为 0.5 mm/10 a 和 0.2 mm/10 a;MIROC 模式下气温和降水均呈下降趋势,其降幅分别为 0.4 °C/10 a 和 0.4 mm/10 a。在 RCP8.5 气候情景下,BCC、HADG、MIROC 等 3 种模式下其气温和降水均呈现上升趋势,其上升幅度分别为 0.5 °C/10 a、0.9 °C/10 a、0.9 °C/10 a 和 0.2 mm/10 a、0.6 mm/10 a、0.5 mm/10 a。

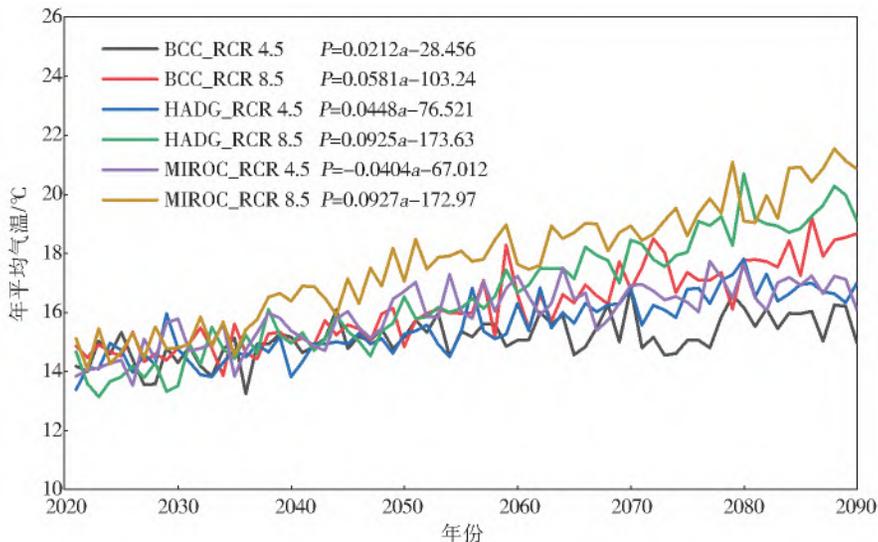


图 9 各情景模式下 2020—2090 年气温预估

Fig. 9 Temperature projections under various scenarios from 2020 to 2090

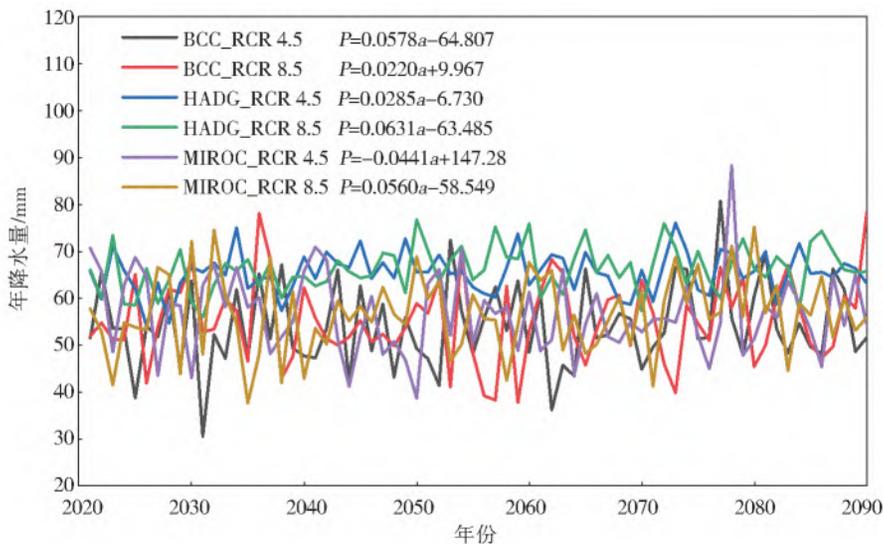


图 10 各情景模式下 2020—2090 年降水预估

Fig. 10 Precipitation projections for under each scenario model from 2020 to 2090

以 SWAT 模型率定期 2009—2011 年的气候值为基准值,研究 2021—2040 年的温度和降水变化情况,结果见表 6。6 种情景模式下 2021—2030 年的年均温度较基准期均升高,升高幅度在 0.31~1.2 °C,其中:在 HADG_RCP8.5 情景模式下温度升幅最小,为 0.31 °C;而 MIROC_RCP4.5 情景模

式下温度升幅最大,为 1.20 °C。6 种情景模式下 2020—2030 年的年降水量较基准期变化幅度为 -0.90%~2.53%,其中:MIROC_RCP8.5 情景模式下年水量减少最大,为 -0.90%;而 BCC_RCP8.5 情景模式下降水量增加最大,为 10.9%。

表 6 和田河流域 2021—2030 年及 2031—2040 年温度、降水变化情况

Tab. 6 Temperature and precipitation changes in the Hotan River Basin from 2021 to 2030 and 2031 to 2040

情景模式	年均温度			年降水		
	基准期/°C	2021—2030 年 变幅/°C	2031—2040 年 变幅/°C	基准期/mm	2021—2030 年 变幅/%	2031—2040 年 变幅/%
BCC_RCP4.5	13.78	+0.58	+0.83	52.55	+2.53	-1.13
BCC_RCP8.5	13.83	+0.84	+1.08	51.99	+10.79	+9.34
HADG_RCP4.5	13.63	+0.83	+0.77	63.72	-0.17	+2.35
HADG_RCP8.5	13.47	+0.31	+1.52	66.54	-0.45	-3.91
MIROC_RCP4.5	13.25	+1.20	+1.85	54.09	+0.81	+9.62
MIROC_RCP8.5	13.80	+1.00	+1.84	61.72	-0.90	-12.79

3.2 不同情景模式下的径流预测

根据建立的 6 种未来气候情景模式,利用 SWAT 模型对这些情景下的和田河上游 2021—2040 的流量进行预测,结果见表 7。由表 7 可知,相较基准期,和田河流域上游年均径流量在 2021—2030 年以及 2031—2040 呈增加趋势。2021—2030 年,6 种情景中 BCC_RCP8.5 情景年均径流量预估值最大,为 56.76 亿 m³;HADG_RCP8.5 情景下年均径流量预估值最小,为 51.25 亿 m³。2031—2040

年,6 种情景中 MIROC_RCP4.5 情景下年均径流量预估值最大,为 60.08 亿 m³;BCC_RCP4.5 情景下年均径流量预估值最小,为 53.06 亿 m³。和田河流域上游在 2006—2015 年年均实际径流量为 51.34 亿 m³,而随着和田绿洲区经济社会的进一步发展,对上游来水的需求会进一步增加,因此对于各情景下 2021—2030 年以及 2021—2030 年的来水配置需作进一步优化研究,确保和田绿洲经济社会稳定发展。

表 7 各情景下 2021—2040 年和田河上游年均径流量预估

Tab. 6 Estimated upstream annual runoff under each scenario from 2021 to 2040

情景模式	2021—2030 年		2031—2040 年	
	年均径流量/亿 m ³	径流变化/%	年均径流量/亿 m ³	径流变化/%
BCC_RCP4.5	53.22	6.03	53.06	5.72
BCC_RCP8.5	56.76	13.09	57.22	14.00
HADG_RCP4.5	53.21	6.02	53.81	7.22
HADG_RCP8.5	51.25	2.12	54.78	9.14
MIROC_RCP4.5	55.00	9.59	60.08	19.70
MIROC_RCP8.5	53.78	7.15	53.36	6.31

注:2009—2011 年年均径流量 50.19 亿 m³。

4 结 论

和田河流域上游年径流在 1980—2015 年总体呈上升趋势,特别是进入 21 世纪以来,气温的升高导致冰川融雪加速以及降水增加,导致和田河径流量增加。为明确气候变化对和田绿洲区可用水资源的影响,利用 SWAT 模型对和田河上游径流进行模拟,分析降水和温度对和田河流域上游径流的影响,并得出预设情景模式下的和田上游径流情况,结果表明:在和田河上游地区具有较好的适用性。以 2009—2011 年为基准期,若和田河上游降水量分别增加 12.5%、10%和减少 10%,则其年均径流量将分别增加 8.19%、6.45%和减少 6.23%;若和田上游流域温度分别增加 0.3℃、1℃和 2℃,则和田河年均径流量将分别增加 1.96%、7.74%和 12.99%,预设的 6 种情景均呈现增加趋势,其中:2021—2030 年 HADG_RCP8.5 情景下年均径流量最小,为 51.25 亿 m³;2031—2040 年,BCC_RCP4.5 情景下年均径流量最小,为 53.06 亿 m³。

参考文献(References):

- [1] UNIYAL B, JHA M K, VERMA A K. Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29: 4767-4785. DOI: 10. 1007/s11269-015-1089-5.
- [2] SHRESTHA N K, DU X, WANG J. Assessing climate change impacts on fresh water resources of the Athabasca River basin, Canada[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 601-602: 425-440. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 05. 013.
- [3] LU E, TAKLE E S, MANOJ J. The relationships between climatic and hydrological changes in the upper Mississippi River basin: A SWAT and Multi-GCM

study[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(2): 437-451. DOI:10. 1175/2009JHM1150. 1.

- [4] FICKLIN D L, BARNHART B L. SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 2081-2090. DOI:10. 1016/j. jhydrol. 2014. 09. 082.
- [5] ZHANG X, XU Y, FU G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515: 205-222. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 04. 064.
- [6] SENENT-APARICIO J, PEREZ-SANCHEZ J, CARRILLO-GARCIA J, et al. Using SWAT and fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River basin (SE Spain)[J]. *Water*, 2017, 9(2): 1-14. DOI:10. 3390/w9020149.
- [7] GRUSSON Y, ANCTIL F, SAUVAGE S, et al. Assessing the climatic and temporal transposability of the SWAT model across a large contrasted watershed[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22(6): 04017004. DOI: 10. 1061/(asce) he. 1943-5584. 0001491.
- [8] LOPEZ-CARR D, DAVIS J, JANKOWSKA M M, et al. Space versus place in complex human-natural systems: Spatial and multi-level models of tropical land use and cover change (LUCC) in Guatemala[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 64-75. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2011. 08. 020.
- [9] JIANG C, XIONG L, WANG D, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 326-338. DOI:10. 1016/j. jhydrol. 2014. 12. 060.
- [10] LI J, LI G, ZHOU S, et al. Quantifying the effects of land surface change on annual runoff considering precipitation variability by SWAT[J]. *Water Resources*

- Management, 2016, 30(3): 1071-1084. DOI: 10. 1007/s11269-015-1211-8.
- [11] 王生霞,丁永建,叶柏生,等. 基于气候变化和人类活动影响的土地利用分析:以新疆阿克苏河流域绿洲为例[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 828-835. (WANG S X, DING Y J, YE B S, et al. Land use analysis based on the impact of climate change and human activities: Taking the oasis of the Aksu River basin in Xinjiang as an example[J]. Glacier Permafrost, 2012, 34(4): 828-835. (in Chinese)) DOI: 000-0240(2012)04-0828-08.
- [12] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C H, et al. Research progress on the impact of climate change and human activities on the hydrological cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 07. 001.
- [13] 冯畅. 变化环境下涟水流域蓝水绿水资源的响应特征分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018. (FENG C. Analysis of response characteristics of blue water and green water resources in Lianshui basin under changing environment[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2018, (in Chinese)) DOI: CNKI; CDMD; 1. 1018. 150143.
- [14] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313: 1068-1072. DOI: 10. 1126/science. 1128845.
- [15] GAO C, RUAN T. The influence of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Huaihe River basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(1): 79-92. DOI: 10. 1007/s11442-018-1460-6.
- [16] 王子玉,许端阳,杨华,等. 1981—2010年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1025-1032. (WANG Z Y, XU D Y, YANG H, et al. Quantitative research on the impact of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia from 1981 to 2010[J]. Advances in Geography, 2017, 36(8): 1025-1032. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 08. 011.
- [17] 周晓曦,阿布都热合曼·哈力克. 气候变化对和田河径流的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 21-25. (ZHOU X X, ABDUL R H. Research on the impact of climate change on the runoff of the Hotan River[J]. China Rural Water Resources and Hydro- power, 2017(3): 21-25. (in Chinese)) DOI: 1007-2284(2017) 03-0021-05.
- [18] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (CHEN Y N. Research on eco-hydrology of Tarim River basin in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)) DOI: https://kns. cnki. net/KCMS/detail/detail. aspx? db-name=SNAD&filename=SNAD000001471753.
- [19] 吴益,程维明,任立良,等. 新疆和田河流域河川径流时序特征分析[J]. 自然资源学报, 2006(3): 375-381. (WU Y, CHENG W M, REN L L, et al. Analysis of the time series characteristics of river runoff in the Hotan River basin in Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 2006(3): 375-381. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2006. 0.
- [20] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响[J]. 干旱区地理, 2008(2): 237-242. (FU L X, CHEN Y N, LI W H, et al. Effects of climate change on runoff in the three source areas of the Tarim River[J]. Arid Region Geography, 2008(2): 237-242. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2008. 02. 015.
- [21] 莫淑红,张高峰,沈冰,等. 新疆和田河流域河川径流混沌特性分析[J]. 干旱区地理, 2008(1): 44-49. (MO S H, ZHANG G F, SHEN B, et al. Analysis on the chaotic characteristics of river runoff in the Hotan River basin in Xinjiang[J]. Geography of Arid Regions, 2008(1): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2008. 01. 005.
- [22] XU J, LI W, JI M, et al. A comprehensive approach to characterization of the nonlinearity of runoff in the headwaters of the Tarim River, western China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 136-146. DOI: 10. 1002/hyp. 7484.
- [23] XU H, ZHOU B, SONG Y. Impacts of climate change on headstream runoff in the Tarim River basin[J]. Hydrology Research, 2011, 42(1): 20-29. DOI: 10. 2166/nh. 2010. 069.
- [24] 张晓伟,沈冰,孟彩侠. 和田绿洲水文气象要素分形特征与R/S分析[J]. 中国农业气象, 2008(1): 12-15. (ZHANG X W, SHEN B, MENG C X. Fractal characteristics and R/S analysis of hydrometeorological elements in Hotan Oasis[J]. China Agricultural Meteorology, 2008(1): 12-15. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZGNY. 0. 2008-01-002.
- [25] 徐宗学,米艳娇,李占玲,等. 和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 资源科学, 2008(12): 1833-1838. (XU Z X, MI Y J, LI Z L, et al.

- Long-term trend and persistence of temperature and precipitation in the Hotan River basin[J]. Resources Science, 2008 (12): 1833-1838. (in Chinese) DOI; CNKI;SUN;ZRZY. 0. 2008-12-009.
- [26] 沈冰,黄领梅,阮本清,等.和田绿洲水循环要素变化特征[J].水利学报,2003(5):78-83.(SHEN B, HUANG L M,RUAN B Q,et al. Variation characteristics of water cycle elements in Hotan oasis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (5): 78-83. (in Chinese) DOI;10. 3321/j. issn:0559-9350. 2003. 05. 014.
- [27] 张晓伟,沈冰,黄领梅.和田河年径流变化规律研究[J].自然资源学报,2007(6):974-979.(ZHANG X W,SHEN B,HUANG L M. Study on the regularity of annual runoff variation of the Hotan River[J]. Journal of Natural Resources, 2007 (6): 974-979. (in Chinese) DOI;10. 3321/j. issn:1000-3037. 2007. 06. 014.
- [28] 吕继强,张晓伟,沈冰,等.和田河年径流序列变化特征及驱动因素分析[J].水力发电学报,2010,29(5):165-169.(LYU J Q,ZHANG X W,SHEN B,et al. Analysis on the variation characteristics and driving factors of the annual runoff sequence of the Hotan River[J]. Journal of Hydroelectric Power Generation, 2010, 29 (5): 165-169. (in Chinese) DOI; CNKI; SUN;GHZH. 0. 2010-11-017.
- [29] 黄领梅,沈冰.和田河汇入塔里木河径流演变及成因分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):26-28.(HUANG L M,SHEN B. The evolution and cause of the runoff from the Hetian River into the Tarim River [J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 26-28. (in Chinese) DOI; CNKI;SUN;XBSZ. 0. 2012-02-007.
- [30] 喻钰,黄领梅,沈冰,等.和田河流域耗水现状分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(6):47-51.(YU Y, HUANG L M, SHEN B, et al. Analysis on the current situation of water consumption in the Hotan River basin[J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 47-51. (in Chinese) DOI;1672-643(2009)06 0047 05.
- [31] 秦胜英,黄领梅,沈冰,等.新疆和田河径流损失辨析[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):85-88.(QIN S Y, HUANG L M, SHEN B, et al. Differentiation and analysis of runoff loss of Hotan River in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(4): 85-88. (in Chinese) DOI; 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2015. 04. 16.
- [32] 赵长森,黄领梅,沈冰,等.和田绿洲散耗型水文模型(DHMHO)研究与应用[J].干旱区资源与环境, 2010, 24 (7): 72-77. (ZHAO C S, HUANG L M, SHEN B, et al. Research and application of dissipative hydrological model (DHMHO) in Hotan oasis [J]. Resources and Environment in Arid Regions, 2010, 24 (7): 72-77. (in Chinese) DOI; CNKI; SUN; GHZH. 0. 2010-07-013.
- [33] ZHAO C, SHEN B, HUANG L, et al. A dissipative hydrological model for the Hotan oasis (DHMHO) [J]. Water Resources Management, 2009, 23 (6): 1183-1210. DOI; 10. 1016/S1002-0160(10)60014-8.
- [34] 罗敏,刘铁,黄粤,等.未来气候情景下和田河流域日径流过程模拟[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):11-17.(LUO M,LIU T,HUANG Y,et al. Simulation of daily runoff process in the Hotan River basin under future climate scenarios[J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27 (2): 11-17. DOI: (in Chinese)). 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2016. 02. 03.
- [35] LUO M, MENG F, LIU T, et al. Multi-model ensemble approaches to assessment of effects of local climate change on water resources of the Hotan River basin in Xinjiang, China [J]. Water, 2017, 9 (8): 584. DOI; 10. 1007/s11269-019-02230-x.
- [36] XU J, CHEN Y, LI W, et al. An integrated statistical approach to identify the nonlinear trend of runoff in the Hotan River and its relation with climatic factors [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25 (2): 223-233. DOI; 10. 1007/s00477-010-0433-9.
- [37] 卢晓菲,任传友,王艳华,等.三个全球气候模式对中国气温季节变化模拟能力的空间差异特征分析[J].干旱区地理,2018,41(5):972-983.(LU X F, REN C Y, WANG Y H, et al. Analysis of spatial differences in the ability of three global climate models to simulate seasonal changes in temperature in China [J]. Geography of Arid Regions, 2018, 41 (5): 972-983. (in Chinese) DOI; CNKI; SUN; GHDL. 0. 2018-05-009.
- [38] XU C, XU Y. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5 (6): 489-494. DOI; 10. 1080/16742834. 2012. 11447041.
- [39] LI H, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2010, 115; D10101. DOI; 10. 1029/2009jd012882.

Runoff changes in upper Hotan River under different climate scenariosYOU Yang¹, LI Pengpeng¹, GAO Yun²(1. *College of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;**2. State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)*

Abstract: With the intensification of global climate change, the contradiction between supply and demand of water resources was becoming increasingly tense. The water resources of Hotan Oasis located inland mainly came from the upstream mountainous areas, the change of mountain runoff will directly affected social and economic activities. This area was mainly prospered by Hotan River, the change of Hotan River runoff was very important for the stable development of the oasis, and will also had an important impact on the water supply and ecological environment of Tarim River below the basin. Therefore, it was of great practical significance to study the runoff change of Hotan River under changing environment. Based on the analysis of the impact of climate change on the runoff of Hotan River, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate the runoff in the upper reaches of Hotan River basin, and simulated the runoff in the future scenario. The trend of temperature and precipitation were increased, and the variation rates of annual temperature and precipitation were 0.31 °C/10 a and 16.5 mm/10 a, respectively. The runoff was also increased over the period of 1980-2015. The annual runoff of Hotan River generally showed an upward trend from 1980 to 2015. Especially since the beginning of the 21st century, with the increase of temperature, the acceleration of glacier snow melting and the increase of precipitation led to the increase of runoff of Hotan River. In particular, the annual average temperature had increased significantly since 2002 and the average annual precipitation had not increased significantly since 2004, which exacerbated the increasing trend of runoff. The SWAT model was used to simulate the runoff in the upper reaches of Hotan River. The results showed that it has good applicability in the upper reaches of Hotan River. Taking 2009-2011 as the base period, if the precipitation in the upper reaches of Hotan River increased by 12.5%, 10% and decreased by 10% respectively, the runoff will increased by 8.19%, 6.45% and decreased by 6.23% respectively; If the temperature of Hotan upstream watershed increased by 0.3 °C, 1 °C and 2 °C respectively, the runoff of Hotan River will increased by 1.96%, 7.74% and 12.99% respectively. The runoff was generally predicted to increase in all six scenarios, with the lowest runoff (5.125 billion m³/a) in HADG_RCP 8.5 scenario in 2021-2030 and the lowest runoff (5.306 billion m³/a) in BCC_RCP 4.5 scenario in 2031-2040. The results could provide decision-making basis for water resources allocation and management in Hotan Oasis in the future.

Key words: Hotan River basin; runoff change; SWAT; forecast; scenario simulation