

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.035

基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响

降亚楠¹ 王蕾¹ 魏晓妹¹ 丁星臣²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 在收集、处理大量空间及属性数据资料的基础上, 构建泾河流域 SWAT 模型, 运用流域出口站张家山水文站点 11 年的月实测径流量数据对模型进行率定和验证, 并以 Nash-Sutcliffe 系数 (N_s) 和决定系数 (R^2) 2 个指标综合评价模拟效果, 率定期及验证期的 2 个指标值均大于 0.7, 表明模型对泾河径流量的模拟具有较好的适用性。通过历史降水量数据频率分析计算, 选取 3 个典型水文年作为基准年, 并根据前人对 HadCM3 模式在 A2、B2 情景下的输出数据作统计降尺度处理得到流域未来 3 个时段 (2020s、2050s 和 2080s) 降水量、气温的变化结果, 设定 2 种未来气候变化情景, 并分别输入已验证的 SWAT 模型, 预测未来典型水文年月径流量的变化趋势。结果表明: 相比基准年, 2 种情景下未来 3 个时段典型水文年年径流量均减小, 丰水年在 2 种情景下的减幅分别为 26% ~ 42% 和 25% ~ 35%, 平水年的减幅为 23% ~ 37% 和 21% ~ 25%, 枯水年的减幅为 23% ~ 38% 和 20% ~ 31%; 2 种情景下未来 3 个时段典型水文年内的月径流量分配趋势与基准年大致相同, 且月径流量的变化特征与降水量的变化基本一致, 径流量在月峰值处的变化幅度较大, 在其他月份变幅较小; A2 情景下, 3 个时段的丰水年月径流量在 8 月份减幅分别为 41%、43% 和 61%, 平水年月径流量在 7 月份减幅依次为 15%、23% 和 38%, 枯水年的月径流量在 6 月份减幅依次为 20%、36% 和 46%; B2 情景下, 3 个时段的丰水年月径流量在 8 月份减幅分别为 34%、37% 和 56%, 平水年月径流量在 7 月份减幅依次为 15%、23% 和 38%, 而在 2 月份的径流量分别从 17.71 m³/s 增加到 24.93、38.79、63.63 m³/s, 枯水年的月径流量在 6 月份减幅依次为 24%、31% 和 28%; 2 种情景下, 丰水年的径流量年内分配不均匀系数从 1.06 分别减小到 0.71 和 0.74, 年内分配不均匀程度降低, 而平水年及枯水年的径流量年内分配不均匀系数变化较小; 对比 2 种情景, 无论是典型年的年径流量还是各月径流量, 其在各时段的变化趋势基本一致, 且变幅相差不大。

关键词: 气候变化; 泾河流域; SWAT 模型; 径流量; 典型水文年

中图分类号: P333.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0262-09

Impacts of Climate Change on Runoff of Jinghe River Based on SWAT Model

JIANG Ya'nan¹ WANG Lei¹ WEI Xiaomei¹ DING Xingchen²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: When trying to analyze water resources supply and demand balance under climate change for river basin and irrigation district, the annual runoff of river and its monthly distribution in representative hydrological years are necessary and basic data to evaluate the available surface water supply. In order to predict the impacts of future climate change on runoff of Jinghe River, a SWAT model was developed by collecting and processing large amounts of data such as the hydrological, geological and meteorological data. The model was calibrated and validated by using 11 years monthly runoff data from Zhangjiashan hydrological station and evaluated with two targets (the Nash-Sutcliffe coefficient (N_s) and determination coefficient (R^2)). Values of N_s and R^2 in calibration and validation stages were both greater than 0.7, which meant that the model was capable of simulating runoff responses to climate change. Three representative hydrological years were chosen after analyzing and calculating the

收稿日期: 2016-10-19 修回日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409219、51409222)、水利部公益性行业科研专项(201301016)、西北农林科技大学基本科研业务费项目(2014YB051)和博士科研启动经费项目(2013BSJJ099)

作者简介: 降亚楠(1984—),男,讲师,博士,主要从事水资源合理配置研究, E-mail: yananjia@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 魏晓妹(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事水资源转化理论与调控技术研究, E-mail: weixiaomei57@tom.com

precipitation frequency, which were the wet year (25%), normal year (50%) and dry year (75%). Two future climate change scenarios were developed based on previous study, in which precipitation and temperature trends of future three periods (2020s, 2050s and 2080s) in Jinghe River were predicted by statistically downscaling the output data of HadCM3 under A2 and B2 scenarios, and the river annual runoff and its monthly distribution for representative hydrological years in three future periods were forecasted. The results showed that the annual runoff of representative hydrological years in three future periods of both scenarios were decreased, comparing with base years. The changing rates were 26% ~ 42% and 25% ~ 35%, respectively in wet year, 23% ~ 37% and 21% ~ 25% in normal year, 23% ~ 38% and 20% ~ 31% in the dry year. Under both scenarios, the distributions of monthly runoff of representative hydrological years in three future periods had the same trends as base years. And the changing trends of monthly runoff were basically conformed to the tendencies of monthly precipitation in corresponding scenarios and times. The major amplitudes of monthly runoff were appeared in the peak. In scenarios A2 and B2, the changing rates of peak value in three future periods respectively were 41%, 43%, 61% and 34%, 37%, 56% in August of the wet year, 15%, 23%, 38% and 21%, 18%, 31% in July of the normal year, 20%, 36%, 46% and 24%, 31%, 28% in June of the dry year. But the monthly runoff of February in three future periods under scenario B2 was increased from 17.71 m³/s to 24.93 m³/s, 38.79 m³/s and 63.63 m³/s, respectively. By calculating the nonuniform coefficient of the runoff annual distribution (C_{vy}), it was showed that the value of C_{vy} in wet year was decreased from 1.06 to 0.71 (scenario A2) and 0.74 (scenario B2).

Key words: climate change; Jinghe watershed; SWAT model; runoff; representative hydrological year

引言

气候变化是影响流域径流演变的一个重要因素^[1]。IPCC 的研究表明全球气温在 21 世纪末可能增高 1.1 ~ 6.4℃^[2], 气候变暖加剧了全球、流域及区域尺度的水循环过程, 引起水资源在时空上的再分配; 极端天气事件发生的频率及强度也发生了明显的变化^[3-5], 尤其是我国北方干旱地区, 其降水量和水资源量将明显减少, 且径流量年内分配不均程度也将进一步加剧^[6-7], 这不仅加剧了水资源短缺的情势, 也影响着水资源的合理开发利用^[8]。泾河流域是我国黄土高原水土流失最为严重的区域之一, 近年来, 在以气候变化为主的环境变化因素影响下, 流域水资源短缺的问题愈加严重, 其原本的生态平衡也遭到了一定程度的破坏^[9], 同时径流的变化既改变着水资源的供需关系, 也影响着下游灌区农业的发展, 从而对区域粮食安全造成威胁, 制约了当地的社会经济发展^[10-11]。因此, 进行气候变化对泾河径流量影响的研究, 不但能深入认识未来气候变化条件下径流的演变规律, 也可为流域水资源的综合管理及下游灌区地表水和地下水资源的合理配置提供科学依据与技术支持。

将全球气候模式的输出与目前应用广泛的 SWAT 模型进行耦合是研究气候变化对流域径流及水资源影响的主要方法之一^[12-15]。针对泾河流域, 国内学者多采用统计学方法对降水量、气温及径流量等的历史数据进行分析, 得到时空变化特征^[9, 16-17], 赵姹等^[18-19]利用 SDSM 模型对 HadCM3

模式在 A2 及 B2 情景下的输出数据进行统计降尺度处理, 预测了流域未来时段(2011—2099 年)的降水量和气温; 张鸿雪等^[20]采用逐步回归法对 CanESM2 模式的输出进行了降尺度处理, 并基于 TOPMODEL 模型模拟了未来时段(2010—2049 年)径流量的演变。以上研究虽然对泾河流域径流受气候变化的影响进行了一些探究, 但在一定程度上忽略了水循环的物理机制, 且只得到未来气候变化条件下径流量可能的变化范围, 并未研究典型水文年径流量的变化特征, 而在基于变化环境的流域及下游灌区水资源供需平衡分析中, 典型水文年的径流量及其年内分配是计算地表水可供水量必不可少的基础资料^[21-22]。因此, 本文将具有物理机制且应用广泛的 SWAT 模型引入泾河流域, 在合理再现流域水循环过程的基础上, 将丰、平、枯水年 3 个典型水文年作为基准情景, 依据已有研究结果^[18-19]设定未来的气候情景, 进而预测典型水文年年内径流量的演变趋势, 以期为泾河流域和下游泾惠渠灌区应对气候变化和水资源综合管理等问题提供科学依据。

1 研究区概况

泾河流域地处黄土高原中部, 位于 106°14' ~ 108°42'E、34°46' ~ 37°19'N, 流域面积 45 421 km², 地势西北高, 东南低。流域处于温带半湿润向半干旱气候过渡的地带, 冬季干冷少雨, 夏季多暴雨, 年降水量介于 350 ~ 600 mm 之间, 且由南向北递减, 其北部多年平均降水量小于 400 mm; 多年平均气温 8℃, 最热月平均气温 22 ~ 24℃, 最冷月平均气温

-10 ~ -8℃,同样是由南向北递减。泾河流域水系发达,其干流——泾河发源于宁夏泾源县,流经甘肃,并于陕西省高陵县汇入渭河,全长 483 km,为渭河一级支流、黄河二级支流,流域内河流主要由降水补给,河川径流的丰水期与降水集中期大致相同。流域的总出口水文测站为张家山站,其控制面积占流域总面积的 95% 以上。

2 SWAT 模型构建

SWAT 是由美国农业部农业研究中心针对流域开发的半分布式水文模型,可基于 GIS 及 RS 提供

的空间数据信息,模拟流域在长时段内的水文物理过程,包括水、化学物质、泥沙等的输移和转化过程^[23]。该模型具有很强的物理机制,且模拟功能十分强大,适用于不同气候条件、土壤类型、土地利用方式、地形和管理措施下的复杂大流域系统,因此,已被广泛用于变化环境(气候变化和人类活动)对不同地区或流域水资源的影响研究^[24]。

2.1 数据资料

基于 SWAT 建立泾河流域的分布式水文模型,需要收集、处理大量的数据资料,包括空间数据和属性数据,各类数据的来源及相关说明如表 1 所示。

表 1 泾河流域数据资料清单
Tab.1 Data of Jinghe watershed

数据类型	数据来源	特征说明
DEM	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn	ASTER GDEM 数据分辨率:30 m × 30 m
土壤	寒区旱区科学数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn	HWSD 数据土壤空间分布及属性数据分辨率:30 m × 30 m
土地利用	寒区旱区科学数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn	UMD 数据土地利用空间分布数据分辨率:1 km × 1 km
气象	SWAT 官网气象数据 http://globalweather.tamu.edu	站点位置及各要素 2000—2010 年观测数据,日尺度
水文	张家山水文站	站点位置及径流量 2000—2010 年数据,月尺度

2.2 基础数据库构建

由于本研究的重点是泾河径流量的模拟预测,因此,只需构建土壤、土地利用、气象及空间离散数据库。

2.2.1 土壤数据库

模型所需的土壤数据有土壤类型空间分布和土壤物理属性数据,本文所用的数据来自于联合国粮农组织(FAO)公布的世界协调土壤数据库(HWSD)。选取 HWSD 构建土壤数据库能够避免由转换土壤粒径带来的误差,同时也减少了数据处理的工作量,是一种简易可行的建库方法^[25]。

泾河流域土壤类型空间分布如图 1 所示,流域内土壤共有 57 类,主要以石灰性锥形土和潜育锥形土为主,其面积分别占流域总面积的 70.1% 和 9.7%。

建模所需的土壤物理属性参数较多,按各参数数据的获取方式将其划分为 3 类:第 1 类可直接从 HWSD 中查取,具体见表 2;第 2 类需要利用 SPAW 软件和统计分析方法计算;第 3 类有 ANION_EXCL(阴离子交换孔隙度)和 SOL_CRK(土壤最大可压缩量),两者均取默认值(0.5)。

第 2 类参数中,SOL_BD(土壤湿密度)、SOL_AWC(土层的有效含水量)、SOL_K(饱和水力传导系数)及 TEXTURE(土层结构)4 个参数利用 SPAW 软件计算得到。其他参数^[25]中,SOL_ALB(湿土的反照率)采用前人基于 SWAT 模型自带 SOL_ALB 与 SOL_CBN 数据间的相关关系建立的经验方程来

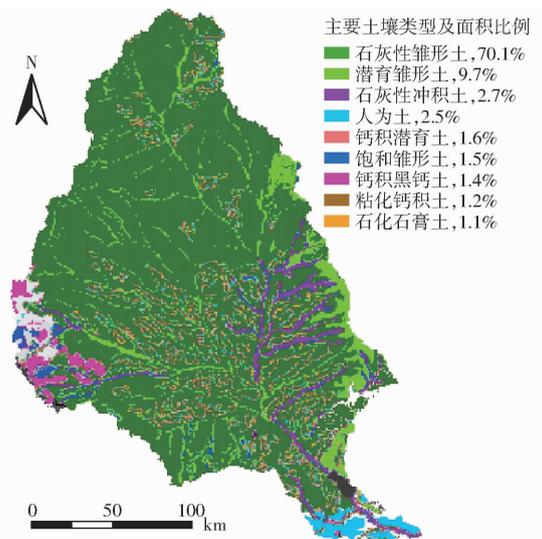


图 1 泾河流域土壤类型空间分布

Fig.1 Soil types distribution of Jinghe watershed

计算;USLE_K(USLE 方程中土壤侵蚀力因子)使用的是 WILLIAMS 等^[26]在 EPIC 模型中的估算方法;对于 HYDGRP(土壤水文分组),首先基于经验公式计算土壤最小入渗率,再查 SCS 模型水文分组表得到流域土壤水文分组。

2.2.2 土地利用数据库

土地利用数据库包括土地利用类型空间分布和属性数据库。由于我国土地利用类型的属性与美国相似,因此不用构建属性数据库,可采用模型自带的相应属性值^[23]。本文采用的土地利用数据为美国马里兰大学提供的 UMD 资料,其栅格分辨率为 1 km × 1 km,泾河流域土地利用空间分布如图 2 所

表 2 第 1 类土壤物理属性参数

Tab.2 The first class soil physical property parameters

SWAT 参数	参数定义	HWSO 对应参数	SWAT 参数	参数定义	HWSO 对应参数
SNAM	土壤名称	SU_SYM90	CLAY	粘土含量	CLAY
NLAYERS	土壤分层数	2	SILT	壤土含量	SILT
SOL_ZMX	土壤剖面最大根系深度	REF_DEPTH	SAND	砂土含量	SAND
SOL_Z	土壤表层到底层深度	第 1 层:300 mm 第 2 层:1 000 mm	ROCK	砾石含量	GRAVEL
SOL_CBN	有机碳含量	OC	SOL_EC	电导率	ECE

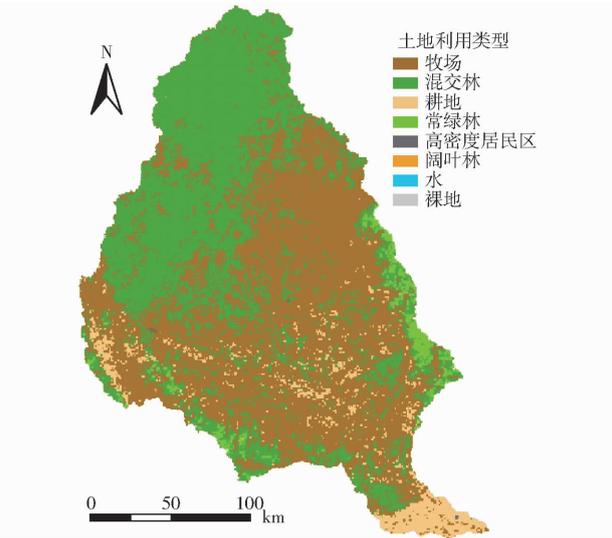


图 2 泾河流域土地利用类型

Fig.2 Land use types of Jinghe watershed

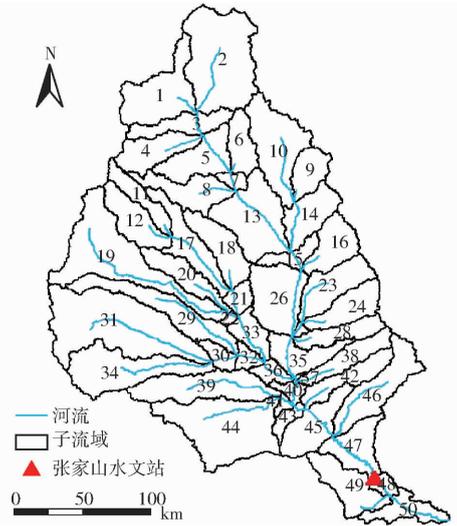


图 3 研究区子流域的空间分布

Fig.3 Subbasins distribution of Jinghe watershed

示,主要土地利用类型为牧场、混交林及耕地,其面积分别占流域总面积的 51.9%、40.6% 和 5.4%。

2.2.3 气象数据库

SWAT 所需气象数据包括气象站点的位置、气象要素(降水量、最高和最低气温、平均风速、太阳辐射及相对湿度)的日观测数据。本研究采用 SWAT 官方网站公布的气象数据,包括泾河流域内部 49 个气象站点的位置信息及各站点 5 种气象要素的日观测数据。

2.2.4 空间离散数据库

SWAT 基于流域的 DEM 提取河网水系并进行子流域划分,再依据土壤、土地利用及坡度等信息将各子流域分割为若干水文响应单元(HRUs)。

泾河流域共划分为 50 个子流域(上游集水面积阈值设为 500 km²),空间分布如图 3 所示。通过分析子流域的划分情况及各子流域内不同土壤、土地利用及坡度所占其子流域面积的比例,分别将土壤、土地利用及坡度类型的阈值设为 10%、20% 及 10%,最终将 50 个子流域分割为 341 个 HRUs。

2.3 模型参数率定与验证

在 SWAT 读取并写入构建的基础数据库之后,对以下水文过程选取合适的计算方法:①地表径流

的演算采用 SCS 曲线数法(模型所用降水数据为日尺度)。②利用 Penman - Monteith 方法计算潜在蒸散发量。③根据植物蒸散发的函数计算日曲线数 ICN^[27]。随后,运行并保存模型。

采用张家山水文站 2000 年 1 月份—2010 年 12 月份的月径流量实测资料对模型进行参数率定和验证,其中 2000—2006 年为率定期,2007—2010 年为验证期。通过分析泾河流域 SWAT 模拟径流的整个水文计算过程,选取 27 个对其有影响的输入参数,并利用 SWAT - CUP 2012 软件的 SUFI2 优化算法对这些参数进行全局敏感性分析和率定。参数的敏感性分析采用 LHS - OAT 法,该方法既可把握全局分析法的整体性,又能充分考虑局部分析法的效率优先原则,准确性较高^[28]。其中, *t* 检验用于确定各参数的相对显著性, *|t|* 越大,参数越敏感; *p* 值决定了敏感性的显著性,其值越接近于 0,表明参数越敏感。通过对径流量的模拟计算,得到对径流量影响较大的 12 个参数的最终率定结果(表 3),可知径流量对各参数具有不同的敏感程度,而其对 TRNSRCH(*|t|* = 5.76) 最为敏感。

选用 Nash - Sutcliffe 系数(*N_s*)和决定系数(*R²*) 2 个指标来综合评价模拟效果,一般来讲, *N_s* > 0.5, 且 *R²* > 0.6,即可认为模拟取得了显著效果^[29]。率

表3 参数敏感性分析及率定的结果

Tab.3 Results of parameter calibration and sensitivity analysis

序号	参数	物理意义	最优值	t	p
1	TRNSRCH. bsn	主河道传播损失量中进入深层含水层的水量所占比例	0.32	5.76	<0.01
2	GW_DELAY. gw	地下水的延迟/d	335.33	3.27	<0.01
3	CN2. mgt	SCS 径流曲线数	49.40	-3.02	<0.01
4	EPCO. hru	植物吸收补偿系数	0.50	-1.75	0.08
5	RCHRG_DP. gw	深层含水层的渗透系数/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.44	1.34	0.18
6	ALPHA_BF. gw	基流因子	0.54	1.30	0.19
7	SLSUBBSN. hru	平均坡长/m	12.61	1.22	0.22
8	ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0.79	-1.19	0.23
9	CH_N(2). rte	主河道的曼宁系数	0.23	1.17	0.24
10	ALPHA_BNK. rte	河岸调蓄的基流因子/d	0.87	1.10	0.27
11	CANMX. hru	最大冠层截留量/mm	3.99	0.94	0.35
12	REVAPMN. gw	发生潜水蒸发或渗入深层含水层所需浅层含水层的水位阈值/mm	66.45	-0.90	0.37

定期和验证期内各月径流量模拟值与实测值的对比如图4所示。模型在率定期的 N_s 和 R^2 值分别为 0.74 和 0.78, 验证期分别为 0.78 和 0.80, 说明 SWAT 在泾河流域具有良好的适用性。

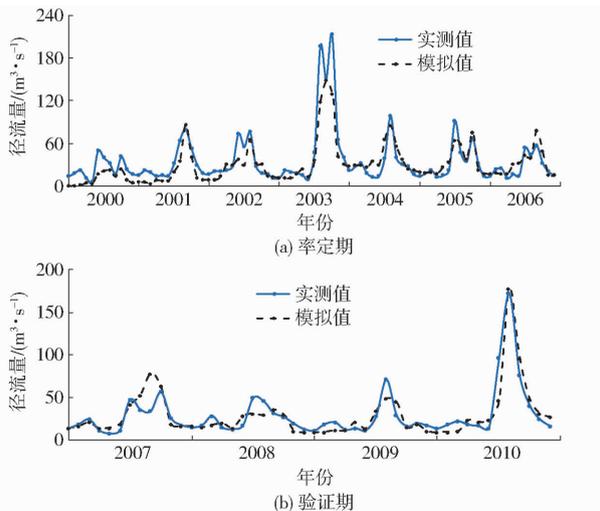


图4 月径流量实测值与模拟值的比较

Fig.4 Comparisons of monthly runoff of Jinghe watershed between measured and simulated values

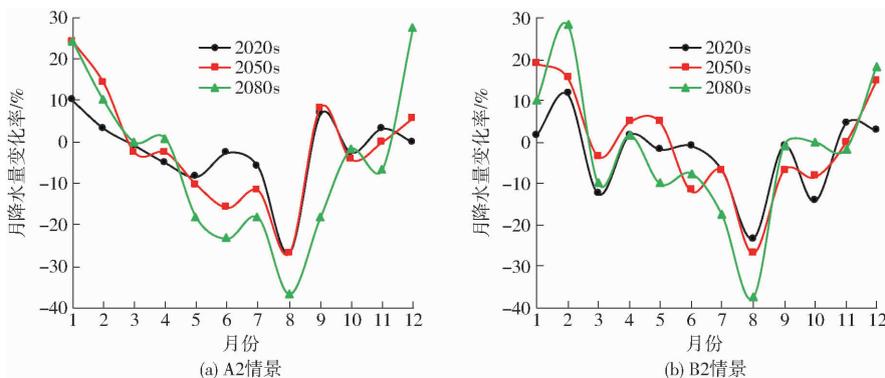
图5 未来三个时段的月降水量变化率^[19]

Fig.5 Variation rates of monthly precipitation in three future periods

3 模型应用

对于地处干旱地区的泾河流域而言,降水和气温是影响其径流变化的最直接且最重要的气候因素^[6]。利用全球气候模式的输出数据,通过统计降尺度处理,可预估区域尺度的气候变化特征。经研究表明,英国哈德莱中心的 HadCM3 全球气候模式对中国区域的气候模拟有较好的适用性^[30],赵妮等^[18-19]根据 HadCM3 在 A2(全球人口持续增长速度与技术创新及人均经济增长速度不协调,温室气体高等排放,未来世界呈极不平衡发展状态)和 B2(全球人口增长及经济发展的速度较 A2 缓慢,温室气体排放量相对较低,未来世界将局部地区的可持续发展作为重点)情景下的输出数据,采用 SDSM 模型对其进行统计降尺度处理,得到泾河流域未来 3 个时段:2020s(2011—2040 年)、2050s(2041—2070 年)及 2080s(2071—2099 年)日降水量和日气温的月平均变化趋势(图 5、6)。本文将以此研究结论作为未来气候情景设定的依据,

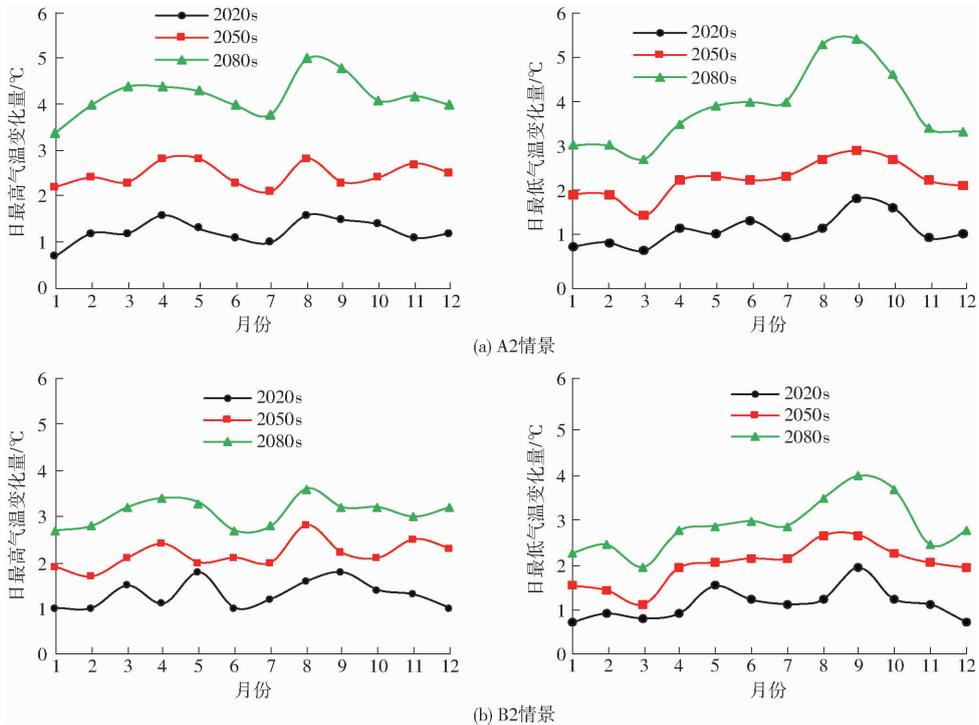


图 6 未来 3 个时段内月平均日最高和最低气温的变化量^[18]

Fig. 6 Changing of daily maximum and minimum temperatures in three future periods

并通过流域历年降水资料频率分析计算,选取 3 个典型年(丰水、平水、枯水年),利用已验证的流域 SWAT 模型来预测未来 3 个时段内典型水文年的径流量变化。

3.1 气候情景设定

对流域 1989—2010 年降水资料进行频率分析与计算,得到 3 个典型水文年:丰水年(25%)、平水

年(50%)及枯水年(75%)对应的年降水量分别为 573.27、495.09、425.31 mm,对比实测数据,选取年降水量与各频率对应的降水量最接近且年内分配具有代表性的年份作为典型年,即 2010 年(25%)、2005 年(50%)和 2000 年(75%),以这 3 个典型年的降水量、气温为基准情景,设置如表 4 所示的未来气候情景。

表 4 未来气候情景的设定

Tab. 4 Set of two future climate scenarios

情景	丰水年			平水年			枯水年		
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
基准情景	2010 年的降水量及气温			2005 年的降水量及气温			2000 年的降水量及气温		
A2 情景	降水量、气温数据按图 5a、图 6a 中的变化进行处理								
B2 情景	降水量、气温数据按图 5b、图 6b 中的变化进行处理								

3.2 径流量模拟预测

将 A2 情景和 B2 情景分别代入已验证好的 SWAT 模型,得到 2 种情景下径流在未来 3 个时段典型水文年内的径流量月分配过程(图 7、8),相应径流量的模拟计算统计结果如表 5 所示。

由图 7、8 及表 5 可知,相比基准年,2 种情景下未来 3 个时段典型水文年年径流量均减小,且除 A2 情景的枯水年(从 2020s 到 2080s,减幅依次增大)及 B2 情景的枯水年(2020s 减幅最大,2080s 次之,2050s 最小)外,其他典型年 2080s 减幅最大,2050s 最小。丰水年在 2 种情景下的减幅分别为 26% ~ 42% 及 25% ~ 35%,平水年减幅为 23% ~ 37% 及

21% ~ 25%,枯水年减幅为 23% ~ 38% 及 20% ~ 31%。

径流量在基准年和丰水年年内分配呈单峰趋势,而在平水年及枯水年均呈双峰趋势。2 种情景下未来 3 个时段典型水文年内的月径流量分配趋势与基准年大致相同,且月径流量的变化特征与降水量的变化基本一致,径流量在月峰值处的变化幅度较大,其他月份变幅较小。对于 A2 情景,相比基准年,3 个时段的丰水年月径流量在 8 月份(月峰值)减幅分别为 41%、43% 及 61%;3 个时段的平水年月径流量在 7 月份(主峰)的减幅依次为 15%、23% 及 38%,次峰(10 月)的减幅为 13%、6% 及 25%;枯

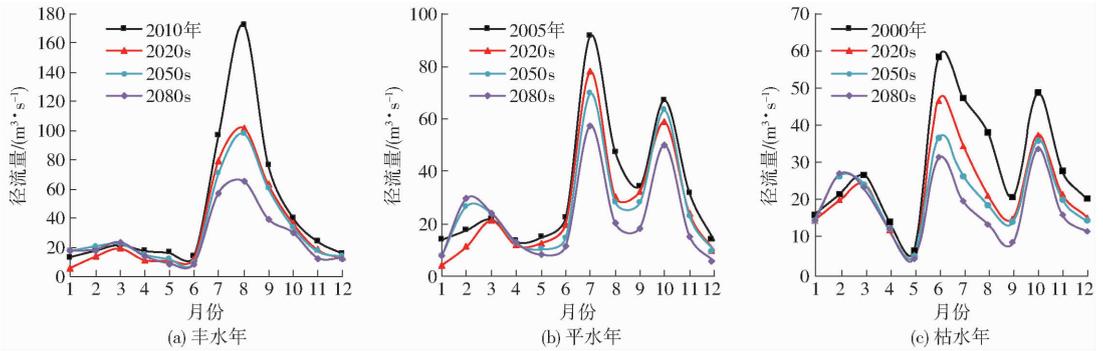


图7 A2情景下径流量在未来3个时期典型水文年内的月分配

Fig.7 Monthly distributions of runoff of representative years in three future periods under A2 scenario

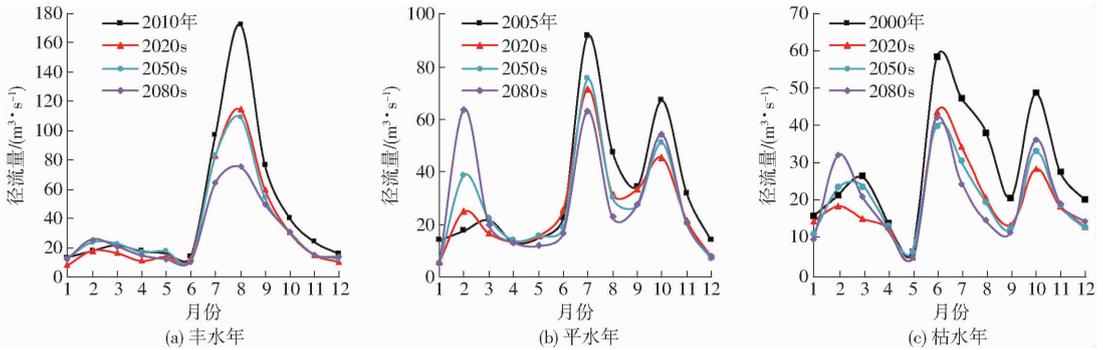


图8 B2情景下径流量在未来3个时段典型水文年内的月分配

Fig.8 Monthly distributions of runoff of representative years in three future periods under B2 scenario

表5 未来3个时段的典型年在2种气候情景下的径流量变化情况

Tab.5 Runoff of representative years in three future periods under two scenarios

情景	典型水文年	时段	径流深/ mm	年径流量减 幅/%	月径流 峰值减 幅/%	年内分 配不均 匀系数
A2	丰水年	2010年	38.51			1.06
		2020s	28.23	27	41	0.94
		2050s	28.68	26	43	0.83
		2080s	22.35	42	61	0.71
	平水年	2005年	30.24			0.74
		2020s	22.95	24	15	0.80
		2050s	23.16	23	23	0.74
		2080s	18.98	37	38	0.73
	枯水年	2000年	25.29			0.53
		2020s	19.51	23	20	0.51
		2050s	18.07	29	36	0.45
		2080s	15.67	38	46	0.50
B2	丰水年	2010年	38.51			1.06
		2020s	28.82	25	34	1.00
		2050s	29.78	23	37	0.90
		2080s	25.09	35	56	0.74
	平水年	2005年	30.24			0.74
		2020s	22.79	25	21	0.67
		2050s	23.82	21	18	0.70
		2080s	23.83	21	31	0.74
	枯水年	2000年	25.29			0.53
		2020s	17.39	31	24	0.52
		2050s	17.95	29	31	0.48
		2080s	17.76	30	28	0.55

水年的月径流量在6月份(主峰)的减幅依次为20%、36%、46%，次峰(10月份)的减幅为23%、27%和33%。而对于B2情景，相比基准年，3个时段的丰水年月径流量在8月份(月峰值)的减幅分别为34%、37%和56%；3个时段的平水年月径流量在7月份(主峰)的减幅依次为15%、23%和38%，次峰(10月)的减幅为33%、24%和19%，而2月份的径流量分别从17.71 m³/s增加至24.93、38.79、63.63 m³/s；枯水年的月径流量在6月份(主峰)的减幅依次为24%、31%、28%，次峰(10月份)的减幅为43%、33%和27%。通过计算基准年及未来3个时段典型水文年的径流年内分配不均匀系数，表明2种情景下，丰水年的径流年内分配不均匀系数从1.06分别减小至0.71和0.74，径流年内分配不均匀程度降低，主要是由于径流量在月峰值处减幅较大引起；平水年及枯水年的径流年内分配不均匀系数变化较小。

对比2种情景，无论是典型年的年径流量还是各月径流量，其在各时期的变化趋势基本一致，且变幅相差不大，究其原因在于A2情景是温室气体高浓度排放，各时期的气温增加值较B2情景大，但2种情景下各时段的月降水量变化幅度差距较小，而降水量对径流量的影响程度要高于气温。

4 讨论

本研究基于半分布式水文模型,通过设定气候情景的方式预测了泾河流域在未来气候条件下不同水平年的月径流量,由于设定情景时采用的 GCM 数据是 SRES 情景的 2 种输出,A2 描述的是未来世界发展的极端情况,B2 虽然较 A2 缓和,但重点仅考虑的是地方和区域一级,因此预测的径流量减少幅度较大。而在 2015 年召开的巴黎气候大会上,《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方已经达成了新的气候协议《巴黎协定》,该协定作为全球应对气候变化的关键一步,已于 2016 年 11 月 4 日正式生效,协定中采用的一系列努力将全球平均气温升幅与前工业化时期相比控制在 1.5 ~ 2.0℃,因此,在后续的研究中,应当在考虑巴黎协定对气候变化的影响后,利用新的气候变化数据进一步评估气候变化对流域径流的影响。

5 结论

(1) 在搜集、处理大量地理、水文及气象数据的基础上,构建了泾河流域 SWAT 模型,并采用流域出口位置张家山水文站 11 年的实测月径流资料对

模型进行率定及验证,结果显示,率定期的 N_s 与 R^2 分别为 0.74 和 0.78,验证期分别为 0.78 和 0.80,表明构建的模型在泾河流域具有良好的适用性。

(2) 通过对降水实测数据的频率分析计算,选取了 3 个典型水文年作为基准年,以未来 3 个时段降水和气温的月平均变化预测结果为依据,设置 2 种未来气候情景并代入已验证的 SWAT 模型,得到未来 3 个时段典型水文年的径流量年内分配过程。结果表明:相比基准年,2 种情景下未来 3 个时段典型水文年年径流量均减小;未来典型水文年内的月径流量分配趋势与基准年大致相同,且月径流量的变化特征与降水量的变化基本一致,径流量在月峰值的变化幅度较大,其他月份变幅较小;2 种情景下,丰水年、平水年和枯水年月径流量分别在 8 月、7 月、6 月份减幅最大;2 种情景下,丰水年的径流年内分配不均匀系数从 1.06 分别减小至 0.71、0.74,径流量年内分配不均匀程度降低,而平水年及枯水年的径流量年内分配不均匀系数变化较小;对比 2 种情景,无论是典型年的年径流量还是各月径流量,其在各时段的变化趋势基本一致,且相对基准年变幅相差不大。

参 考 文 献

- 鞠琴,郝振纯,余钟波,等. IPCC AR4 气候情景下长江流域径流预测[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 462 - 469.
JU Qin, HAO Zhenchun, YU Zhongbo, et al. Runoff prediction in the Yangze River basin based on IPCC AR4 climate change scenarios[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 462 - 469. (in Chinese)
- IPCC. Climate change 2007: the physical sciences basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- BEYENE T, IETIENMAIERD P, KABAT P. Hydrology impacts of climate change on the Nile River basin, applications of the 2007 IPCC scenarios [J]. Climate Change, 2010, 100(3 - 4): 433 - 461.
- ZHANG L, LU W X, YANG Q C, et al. Hydrological impacts of climate change on streamflow of Dongliao River watershed in Jilin Province, China [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 522 - 530.
- 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3 - 8.
DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend [J]. Advance in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3 - 8. (in Chinese)
- 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等. 泾河流域近 50 年来的径流时空变化与驱动力分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 721 - 727.
ZHANG Shulan, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Spatio-temporal variance of annual runoff in Jinghe River basin of northwest China in past 50 years and its main causes [J]. Science Geographica Sinica, 2011, 31(6): 721 - 727. (in Chinese)
- 刘昌明. 中国农业水问题:若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875 - 879.
LIU Changming. Agricultural water issues in China—discussions on research highlights [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875 - 879. (in Chinese)
- CHEN Y, LI B, LI Z, et al. Water resource formation and conversion and water security in arid region of northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 939 - 952.
- 张淑兰,于澎涛,张海军,等. 气候变化对干旱缺水区内尺度流域水文过程的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 70 - 74.
ZHANG Shulan, YU Pengtao, ZHANG Haijun, et al. Impact of climate change on the hydrological process in medium scale basin of arid areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(10): 70 - 74. (in Chinese)
- 李萍,魏晓妹,降亚楠,等. 关中平原渠井双灌区地下水循环对环境变化的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 123 - 131.
LI Ping, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan, et al. Response of groundwater cycle to environmental changes in Guanzhong Plain irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 123 - 131. (in Chinese)

- 11 张晓岚, 刘昌明, 高媛媛, 等. 水资源安全若干问题研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 9-13.
ZHANG X L, LIU C M, GAO Y Y, et al. A study of several issues concerning water resources security[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1): 9-13. (in Chinese)
- 12 MA C K, SUN L, LIU S Y, et al. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River basin, central Asia [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 501-513.
- 13 LI Z, LIU W Z, ZHANG X C, et al. Assessing and regulating the impacts of climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau of China[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(5): 710-720.
- 14 ZHANG Y F, ZHANG S F, ZHAI X Y, et al. Runoff variation and its response to climate change in the Three Rivers Source region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 781-791.
- 15 ACHILLEAS G S, CHRISTOPHER G K. Modeling the impact of climate change on sediment transport and morphology in coupled watershed-coast systems: a case study using an integrated approach[J]. International Journal of Sediment, 2014, 29(3): 304-315.
- 16 党素珍, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 30-34.
DANG Suzhen, DONG Guotao, JIANG Xiaohui, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in the upper reaches of Jinghe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 30-34. (in Chinese)
- 17 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171.
GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe river basin in nearly 50 years[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese)
- 18 赵姹, 李志, 刘文兆. 基于GCM泾河流域未来温度变化的降尺度预测[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 227-234.
ZHAO Cha, LI Zhi, LIU Wenzhao. Projecting the potential changes of temperature in the Jinghe watershed using downscaling [J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 41(6): 227-234. (in Chinese)
- 19 赵姹, 李志, 刘文兆. GCM降尺度预测泾河流域未来降水变化[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 23-28.
ZHAO Cha, LI Zhi, LIU Wenzhao. Downscaling GCMs to project the potential changes of precipitation in Jinghe basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 23-28. (in Chinese)
- 20 张鸿雪, 畅建霞, 韩越. 基于TOPMODEL与统计降尺度模型的泾河流域未来径流变化分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 149-156.
ZHANG Hongxue, CHANG Jianxia, HAN Yue. Analysis of future runoff variation in Jinghe River Basin based on TOPMODEL and statistical downscaling model[J]. Journal of Nature Disasters, 2015, 24(4): 149-156. (in Chinese)
- 21 冯东溥. 灌区供水量对变化环境的响应及农业用水安全评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
FENG Dongpu. Irrigation water supply and demand in response to changing environment and agriculture water safety evaluation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 22 张智韬, 粟晓玲, 党永仁, 等. 泾惠渠灌区作物种植结构变化对灌溉需水量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 122-130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161017&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.017.
ZHANG Zhitao, SU Xiaoling, DANG Yongren, et al. Influence of crop planting structure change upon irrigation water requirement in Jinghuiqu irrigation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 122-130. (in Chinese)
- 23 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese)
- 24 LAI G Y, WU D Y, ZHONG Y X, et al. Progress in development and applications of SWAT model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(3): 243-251.
- 25 姜晓峰, 王立, 马放, 等. SWAT模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 135-138.
JIANG Xiaofeng, WANG Li, MA Fang, et al. Localization method for SWAT model soil database based on HWSD[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(11): 135-138. (in Chinese)
- 26 WILLIAMS J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1990, 329(1255): 421-428.
- 27 ARNOLD J G, KINIRY J R, SRINIVASAN R, et al. Soil and water assessment tool input/output file documentation, version 2012[M]. College Station, TX: Texas Water Resources Institute, 2012.
- 28 陈兵. 基于SWAT模型的沿渡河流域气候及土地利用变化的水文响应研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014: 39.
CHEN Bing. Hydrological response to climate change and LUCC based on SWAT model in Yanduhe basin[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014: 39. (in Chinese)
- 29 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型——理论、方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- 30 施小英, 徐祥德, 徐影. 中国600个站气温和IPCC模式产品气温的比较[J]. 气象, 2005(7): 49-53.