

基于 SWAT 模型的旬河流域气候变化水文响应研究

梅嘉洺^{1,2,3}, 唐亚男^{3,4}, 李 仪^{3,4}, 刘 洋^{3,4}, 姜庆虎³, 陈 玺⁵

(1. 西藏大学青藏高原生态与环境研究中心, 西藏 拉萨 850000;

2. 西藏大学理学院, 西藏 拉萨 850000;

3. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 湖北 武汉 430074;

4. 中国科学院大学, 北京 100049;

5. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要:径流量是体现流域水量特征的重要指标。旬河作为汉江上游的主要支流,其径流量变化直接关系到丹江口水库(南水北调中线工程水源地)的储水量。以历史时期(1995-2015 年)旬河流域实测径流量数据为基础,选择驱动 SWAT 水文模型,定量探究旬河流域径流量对气候变化的响应。结果表明,校准期和验证期决定系数(R^2)分别为 0.85 和 0.87, Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)分别为 0.85 和 0.84, SWAT 水文模型对旬河流域径流量模拟结果良好。采用英国 Hadley 气候中心预测的未来气候模式 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5,对 2036-2055 年的气象数据进行 4 种未来气候情景模拟,发现在历史气候情景下,三季度降水量对全年径流量贡献度最大,且四季度的径流量对三季度的降水量存在一定滞后效应;在 RCP8.5 情景下,雨季将提前且持续周期延长。研究结果可为政策部门在水资源宏观调控、极端气候预防和防洪减灾等方面提供参考。

关键词:旬河流域;气候变化;SWAT 模型;径流模拟

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)03-0007-07

我国水资源紧缺,且时空分配不均,发生洪涝干旱等自然灾害的频率偏高,严重威胁人民的生命财产安全(张利平等,2009)。当前,全球温度升高问题凸显(秦大河等,2014),在此背景下,我国局部发生极端气候事件的频率将增加,如极端高温、极端干旱和极端降水等,北方地区干旱程度将进一步加深,南方局部区域的气候变化将更加极端(许崇海等,2010;张红丽等,2016)。流域生态水文循环和水资源的时空分布也受到了部分扰动,探究流域径流量在气候变化情景下的响应机理显得尤为重要。

水文模型是当前分析水文循环机制的主要工具,其包括集总式、半分布式和分布式共 3 种模式。分布式水文模型(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)由于其能够将存在空间差异性的生态环节建立联系,提升了模型物理机制,通过模型能够将空间数据信息与属性数据信息相结合,使其模拟流域

径流量变化过程更加贴近实际生态情形,模型运行精度有所提升(Easton et al,2008)。李帅等(2017)利用 SWAT 模型研究发现,宁夏清水河流域气候变化主要通过降水量和温度变化来调控流域径流量;在 RCP4.5 未来气候情景下,长江上游流域未来温度和降水量均有所增加,且径流量峰值有引发山洪的风险(黄金龙等,2016)。将 SWAT 模型运用于瑞士西南部高海拔 Rhone 流域模拟发现,在世界政府间气候变化委员会(Inter-governmental Panel on Climate Chang,IPCC)公布的 A₁B 气候情景下,该流域夏季径流量峰值有所降低,且冰雪融水期将提前(Kazi et al,2015)。将未来气候数据引入 SWAT 模型,定量探究流域未来径流量的变化趋势和规律,对政策部门的水资源科学管理和有效分配具有重要意义。IPCC 在第五次报告中提出了一种新的未来气候情景—温室气体浓度排放模式(Representative Concentration Pathways,RCP),该气候模式对预测我国未来气候变化趋势准确性较高并受到国内外的广泛认可(占明锦等,2013)。

旬河流域位于南水北调中线工程水源地丹江口水库上游,降水量年内分配不均,径流量年内差距大,夏季达到峰值,而冬季较小;该流域径流量的变化直接影响丹江口水库的水资源供给服务,进而影

收稿日期:2019-06-03 修回日期:2020-09-08
基金项目:国家自然科学基金(31600377,31700462);中国科学院水生植物与流域生态重点实验室开放课题基金(Y952031603)。
作者简介:梅嘉洺,1994 年生,男,硕士研究生,研究方向为全球变化生态学。E-mail:mjmdct94@163.com
通信作者:陈玺。E-mail:chenx@cjh.com.cn

响工程沿线城市的社会经济发展(Qi et al,2019)。本研究在旬河流域建立 SWAT 径流模拟系统,将 RCP 模式下 2036-2055 年的 4 种未来气候变化情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)与其结合,模拟预测旬河流域出水口向家坪水文站径流量的变化趋势,分析年内及季度之间气候要素对流域径流量的影响,探究未来气候和径流量之间的关系,旨在为流域沿线城市防洪减灾等方面提供科学的理论依据;同时对丹江口水库保持稳定储水量具有重要的应用价值和实际意义。

1 数据来源

1.1 研究区概况

旬河发源于秦岭南端,是汉江上游的一级支流,全长 218 km,流经陕西省商洛市西南部及安康市东北部(图 1)。集水面积为 6 258 km²,年均径流量 736.8 m³/s,年均降水量 758.8 mm。在 1995-2015 年的 21 年间,旬河流域年均径流量先下降、后上升,突变点为 2003 年,降水量的波动是其变化趋势的主因。流域气候属暖温带与北亚热带过渡区,冬季少雨,平均温度 7.8℃,夏季多雨,平均温度 24.8℃,四季分明。地势西北高、东南低,地形垂直落差大,森

林覆盖率高,植物种质资源丰富。流域内土壤类型以高活性淋溶土和锥形土为主,城建及农业用地主要分布于流域沿线。

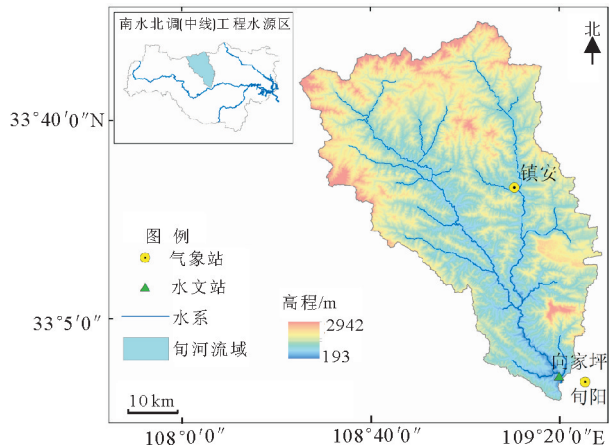


图 1 旬河流域水系及高程示意

Fig.1 Water system and digital elevation map (DEM) of the Xunhe River basin

1.2 数据来源及用途

本次研究使用的旬河流域数字高程图(DEM)、土壤类型图和土地利用分类图定义的投影坐标系均统一为 WGS_1984_UTM_Zone_48N,模型所需数据和用途详见表 1。

表 1 SWAT 水文模型所需数据
Tab.1 Input data for the SWAT model

数据类型	分辨率	数据来源	数据用途
数字高程图(DEM)	30 m×30 m	中国科学院地理空间数据云	生成河网、流域
土地利用类型图	30 m×30 m	Landsat 遥感数据解译	生成 HRU
土壤类型图	1:1 000 000	寒旱区科学数据中心	构建土壤数据库
气象数据	日值	气象科学数据共享服务网	构建气象数据库
水文数据	月值	长江水利委员会水文局	径流校准及验证

2 研究方法

2.1 SWAT 模型原理

本次研究选用美国农业研究局(ARS)于 20 世纪末研发 SWAT 分布式水文模型,该模型可将气候情景和流域下垫面因素相整合,并结合土壤类型、土地利用方式及数字高程信息,可反映流域真实的自然生态特征(White et al,2015);能够模拟较长时间大范围尺度复杂流域的径流、土壤侵蚀和污染输移等物理变化过程(Yin et al,2017)。该模型依据划分的各水文相应单元(HRU)内土地利用方式、土壤类型和数字高程等流域真实生态情境,逐个计算其产流,最终经坡面汇流累加计算主河道的总径流量(Li et al,2009)。

2.2 SWAT 模型构建

2.2.1 空间数据库 利用旬河流域的数字高程数据(DEM)、土壤类型图和土地利用数据构建模型的空间数据库。利用 ENVI5.1 解译出该流域 2015 年 Landsat OLI 遥感影像,将流域土地利用方式划分为林地、农业用地、灌草地、城建用地和水体共 5 种。土壤类型数据采用世界粮农组织(FAO)发布的世界土壤数据库(HWSD),无需进行土壤粒径换算,可直接应用于 SWAT 模型。利用 ArcGIS 10.2 中的重采样法,将流域土壤类型图分辨率统一为 30 m×30 m,划分为简育高活性淋溶土(Lvh)、饱和疏松岩性土(RGe)、石灰性疏松岩性土(RGc)、不饱和锥形土(CMd)、饱和锥形土(CMe)、饱和黏磐土(PLc)和漂白高活性淋溶土(LVa)共 7 种类型。

2.2.2 属性数据库 气象数据库的构建包含两方面:一是利用旬河流域境内及相近的两个国家气象站点(镇安站和旬阳站)1995-2015年共21年间逐日气象数据实测值作为历史气候情景;二是以RCP气候模式构建旬河流域未来气候情景,由于研究区面积范围相较于该气候数据分辨率较低,因此在研究区范围内及附近选取了2个格点气候数据。

2.2.3 模型运行 在模型中将空间数据库与属性数据库相叠加,设置模型预热期为3年(1995-1997年),以月尺度运行模型。

2.3 未来气候情景设置

RCP气候情景来源于英国Hadley气候中心的HadGEM2-ES模型(<http://www.ipcc-data.org/>),通过将4种未来不同气候政策下对应出现的排放情景分别定义为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5。其中,RCP2.6情景下,表示至21世纪末我国年均地表温度将上升2.12℃;RCP8.5反映在未来全球温室气体排放最悲观假设情景下,至21世纪末辐射强迫值(RF)达到8.5 W/m²,届时我国年均地表温度将增加6.55℃。在RCP气候情景下,我国降水量整体呈增加趋势,尤其在南方部分流域,极端降水发生

频率将明显上升(沈永平和王国亚,2013;张莉等,2013)。本研究采用2036-2055年RCP气候数据,构建旬河流域4种未来气候情景。

2.4 数据统计

应用方差分析(ANOVA)法,探究4种未来气候情景下的年均径流量和季度径流量数据差异;利用相关分析法,探究RCP8.5(未来温室气体排放极端情景)和历史气候情景下径流量与气候各要素之间的关系;其中,方差分析及相关分析方法均在IBM SPSS Statistics 21.0软件中实现。

3 结果与分析

3.1 模型校准与验证

评估水文模型校准和验证的标准常采用2个指标,当决定系数(R^2)>0.6且Nash-sutcliffe系数(NSE)>0.5则模型模拟径流结果合格,其值越接近于1,则拟合效果越好(丁洋等,2019)。以流域出水口向家坪水文站的逐月实测径流数据为参照,设置1998-2008年共11年为模型校准期,2009-2015年共7年为模型的验证期。校准期和验证期的月均径流量实测值和模拟值对比结果详见图2。

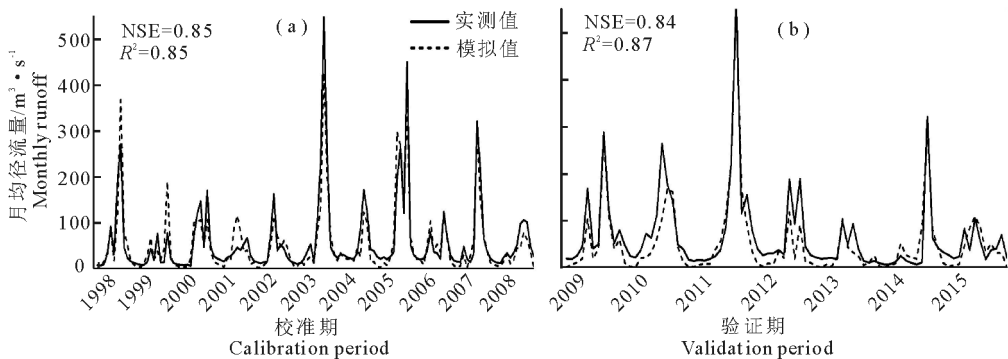


图2 校准期(a)和验证期(b)径流量模拟值与实测值对比

Fig.2 Comparison of measured and simulated runoff values for the calibration period (a) and validation period (b)

校准期模型的决定系数(R^2)为0.85,效率系数(NSE)为0.85,验证期模型的 R^2 达到了0.87,NSE系数为0.84,表明SWAT水文模型在旬河流域径流量的模拟中拟合效果良好,对该流域有较好的适用性。

增加最少,增加约50 mm左右(图3)。

3.2 历史与未来降水量及温度变化

流域水资源直接受降水量的影响。相较于历史气候情景,在未来气候情景下的旬河流域降水量整体呈增加趋势。一季度,降水量整体增加75~100 mm;二季度,RCP4.5和RCP6.0情景下降水量增加值相近;三季度,RCP4.5情景下降水量最丰沛,增加约90 mm左右;四季度,RCP6.0情景下降水量

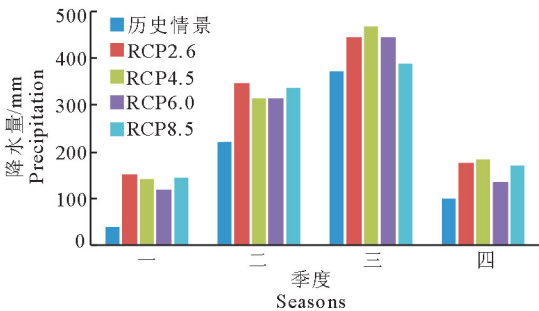


图3 历史气候情景及RCP情景下的各季度降水量

Fig.3 Seasonal precipitation in the historic climate period and for each RCP scenario

温度可通过地表蒸发和散发间接影响流域径流量。旬河流域 1995 - 2015 年平均温度为 11.63℃。在 RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 情景下,旬河流域年均温度整体比历史气候情景下偏高,并有升温趋势。这可能是由于全球温室气体排放持续增多,致使气候变暖情况加剧。在 RCP2.6 情景下,流域年均温度低于历史气候情景,这可能是由于典型浓度排放路径最低情景下,气候数据在研究区存在不确定性造成的(图 4)。

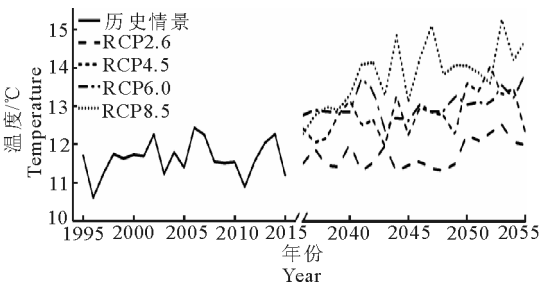


图 4 历史气候情景及 RCP 情景下年均温度变化趋势
Fig.4 Variation of temperature in the historical period and for each RCP climate scenario

3.3 历史与未来径流量

将 RCP 未来气候情景和历史情景下模拟出的月平均径流量经方差分析(ANOVA)后,由图 5 可知,相较于历史气候情景,在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 气候情景下旬河流域的月平均径流量模拟值整体显著偏高,这种差异性可能是由于在 RCP 气候情景下模型径流预测不确定性增加造成的(王书霞等,2019)。表明 4 种未来温室气体排放情景下的气候数据不能够较好地反映该流域的未来气候变化情况。

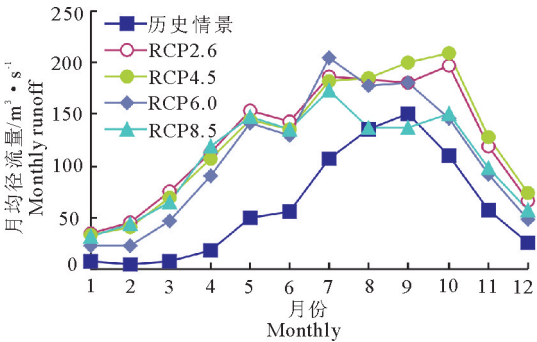


图 5 未来气候情景及历史情景下的月均径流量
Fig.5 Average monthly runoff in the historical period and for each RCP climate scenario

本研究利用 2036 - 2055 年共 20 年的 RCP 情景下 4 种未来气象数据探究其对径流量的影响。经方差分析后,在 4 种未来气候情景下,该流域的年均径流量、二季度和三季度平均径流量皆无显著差异,

这可能是由于 4 种未来气候情景在相应时间段降水量无明显波动造成的。RCP6.0 情景下,一季度平均径流量与其他 3 种情景相比明显偏低,可能是该流域在此种气候情景下,一季度降水量减少所致。四季度,RCP2.6 和 RCP8.5 情景之间径流量变化无明显差异,在 RCP4.5 情景下的平均径流量明显高于其他 3 种情景,而 RCP6.0 情景下明显偏低(表 2)。

表 2 未来气候变化对流域径流量的影响

时间	不同气候情景的流域平均径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
年度	1498±412 ^a	1508±352 ^a	1302±382 ^a	1295±320 ^a
一季度	155±58 ^b	144±48 ^b	92±32 ^a	139±57 ^b
二季度	409±109 ^a	387±100 ^a	361±159 ^a	430±127 ^a
三季度	551±198 ^a	567±209 ^a	562±222 ^a	448±159 ^a
四季度	383±150 ^{ab}	411±132 ^b	287±101 ^a	306±124 ^{ab}

注:相同字母表示不同气候情景间径流量差异不显著。

Note: Same letter within a column indicates no difference in runoff under different climate scenarios.

3.4 径流量对气候条件变化的响应

将年内各季度的径流量与气候条件(降水量和温度)进行相关分析后发现,在历史气候情景下,第三季度的降水量与该季度径流量的相关系数为 0.83,与年均径流量的相关系数为 0.77,并且年均径流量与三季度径流量相关系数高达 0.94,表明三季度(7 - 9 月)的降水量对该流域年径流量的贡献率是最大的,这说明年均径流量的大小主要受三季度径流量变化的影响,随着该季降水量的增加,流域径流量随之增加;该结果与唐雄朋等(2018)在雅鲁藏布江探究 RCP 气候情景对径流量的影响结论一致。第三季度的降水量与四季度径流量之间也存在极显著的正相关关系,反映出在四季度该流域的径流量对前三季度的降水量存在滞后效应。温度与径流量呈负相关关系,三季度,随着温度的升高,径流量随之降低(表 3)。

在 RCP8.5 气候情景下,各季度内的径流量与降水量皆呈显著正相关关系,其中与二季度的相关性系数最高,达到 0.90。三季度径流量的高低,直接关系到全年径流量的丰欠。在历史气候情景下,仅有三季度降水量与年均径流量呈正相关关系;而在 RCP8.5 模式下,一、二、第三季度的降水量与年均径流量均呈显著正相关关系,表明在未来温室气体高排放情景下,研究区一、二季度降水量将有所增加,雨季有提前趋势且持续周期延长(表 4)。表明雨季极有可能引起流域径流量陡升,进而引发洪涝等灾害,该结论与富强等(2016)对浙江兰江流域的相关结论

相同;同时,还要注意雨季过后流域径流对降水的滞后效应所带来的二次洪峰危害(邵霜霜等,2015)。在未来气候情景下,提示相关政策管理部门需要提前做好防洪排涝的准备,减少春汛时期提前及极端降水事件的出现给流域沿线居民造成的经济损失及人身危害。

表 3 历史气候情景下气候和径流量相关系数检验

Tab.3 Significance testing using correlation coefficients for climate and runoff with historical climate data

指标	一季度	二季度	三季度	四季度	年均	三季度	年均	年均
	平均降水量	平均降水量	平均降水量	平均降水量	降水量	平均温度	温度	径流量
年均径流量	0.08	-0.15	0.77**	0.32	0.88**	-0.60**	-0.55*	1.00
一季度平均径流量	0.45	-0.22	0.15	-0.35	0.02	-0.11	-0.23	-0.12
二季度平均径流量	-0.11	0.80**	-0.41	-0.08	-0.10	-0.20	-0.21	-0.01
三季度平均径流量	0.19	-0.28	0.83**	0.05	0.82**	-0.51*	-0.43	0.94**
四季度平均径流量	-0.12	-0.29	0.64**	0.73**	0.76**	-0.43	-0.44	0.81**

注:*表示相关关系通过 0.05 显著水平检验,**表示相关关系通过 0.01 显著水平检验。
Note:* significant difference ($P<0.05$); ** highly significant difference ($P<0.01$).

表 4 RCP8.5 气候情景下气候和径流量相关系数检验

Tab.4 Significance testing of correlation coefficients for climate and runoff with the RCP8.5 climate scenario

指标	一季度	二季度	三季度	四季度	年均	三季度	年均	年均
	平均降水量	平均降水量	平均降水量	平均降水量	降水量	平均温度	温度	径流量
年均径流量	0.64**	0.61**	0.51*	0.39	0.97**	-0.29	-0.20	1.00
一季度平均径流量	0.85**	0.44	0.01	0.08	0.45	-0.14	-0.48*	0.54*
二季度平均径流量	0.81**	0.90**	0.08	0.21	0.64**	0.08	-0.36	0.73**
三季度平均径流量	0.40	0.32	0.77**	-0.03	0.80**	-0.49*	-0.08	0.83**
四季度平均径流量	-0.07	0.04	0.41	0.78**	0.61**	-0.15	0.17	0.52*

注:*表示相关关系通过 0.05 显著水平检验,**表示相关关系通过 0.01 显著水平检验。
Note:* significant difference ($P<0.05$); ** highly significant difference ($P<0.01$).

4 结论

(1)以南水北调中线工程水源地丹江口水库上游的旬河流域为研究区构建的 SWAT 水文模型,拟合结果精度较高,模型具有良好的适用性。

(2)未来气候情景 RCP 模式下的降水量和温度整体高于历史气候情景。年内三季度降水量的增多,不仅会使该季度径流量升高,还可促进全年径流量上升。由于四季度的径流量受三季度降水量滞后作用的影响,应防范四季度河流径流量陡升可能导致的冬汛等自然灾害。

(3)相较于历史气候情景,在未来气候情景 RCP8.5 模式下,一、二季度的降水量对全年径流量的变化同样影响深远,反映出在未来全球变暖进一步加剧的大背景下,该流域雨季有提前趋势且持续周期将延长。

(4)旬河流域年内径流量分配较不均匀,土地下垫面和水利工程对径流量也有较大影响,需要加大水利设施的建设,在时空尺度上加强对水资源的宏观调控。

参考文献

丁洋,赵进勇,徐征和,等,2019. 基于 SWAT 模型的平原河

湖水网区小流域径流过程模拟[J]. 水生态学杂志,40(2):7-13.

富强,马冲,张徐杰,等,2016. 气候变化下兰江流域未来径流的变化规律[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),37(5):22-27.

黄金龙,王艳君,苏布达,等,2016. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. 气象,42(5):614-620.

李帅,魏虹,刘媛,等,2017. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报,37(4):1252-1260.

秦大河,Thomas S,259 名作者和 TSU,2014. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展,10(1):1-6.

邵霜霜,张毓涛,师庆东,等,2015. 乌鲁木齐河流域径流与气候变化的年内相关性分析[J]. 安全与环境学报,15(1):350-354.

沈永平,王国亚,2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,35(5):1068-1076.

唐雄朋,刘艳丽,张建云,等,2018. 气候变化下雅鲁藏布江拉孜以上流域径流过程模拟与预测[J]. 水文,38(6):24-30.

王书霞,张利平,李意,等,2019. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究[J]. 气候变化研究进展,15(1):23-32.

许崇海,罗勇,徐影,2010. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估[J]. 气候变化研究进展,6(6):398-404.

占明锦,殷剑敏,孔萍,等,2013. 典型浓度路径(RCP)情景下未来50年鄱阳湖流域气候变化预估[J]. 科学技术与工程,13(34):10107-10115.

张红丽,张强,刘骞,等,2016. 中国南方和北方气候干燥程度的变化特征及差异性分析[J]. 高原气象,35(5):1339-1351.

张利平,夏军,胡志芳,2009. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,18(2):116-120.

张莉,丁一汇,吴统文,等,2013. CMIP5模式对21世纪全球和中国年平均地表气温变化和2℃升温阈值的预估[J]. 气象学报,71(6):1047-1060.

Easton M,Fuka R,Walter T,et al,2008. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (swat) model to predict runoff from variable source areas[J]. Journal of Hydrology,348(3/4):279-291.

Kazi R,Ana G,Enrique M,et al,2015. An independent and combined effect analysis of land use and climate change in the upper Rhone River watershed, Switzerland[J]. Applied Geography,63:264-272.

Li Z,Liu W,Zhang X,et al,2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the loess plateau of China[J]. Journal of Hydrology,377(1):35-42.

Qi W,Li H,Zhang Q,Zhang K, 2019. Forest restoration efforts drive changes in land-use/land-cover and water-related ecosystem services in China's han river basin[J]. Ecological Engineering,126:64-73.

White D,Easton M,Fuka R,et al,2015. Development and application of a physically based landscape water balance in the SWAT model[J]. Hydrological Processes,25(6):915-925.

Yin J,He F,Xiong J,Qiu Y,2017. Effect of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in Northwest China [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 21:1-23.

(责任编辑 万月华)

Simulation of the Hydrological Response of Xunhe River Basin to
Climate Change Using the SWAT Model

MEI Jia-ming^{1,2,3}, TANG Ya-nan^{3,4}, LI Yi^{3,4}, LIU Yang^{3,4}, JIANG Qing-hu³, CHEN Xi⁵

(1.Research Center for Ecology and Environment of Qinghai-Tibetan Plateau,
Tibet University, Lasa 850000,P.R.China;

2.College of Science,Tibet University, Lasa 850000,P.R.China;

3.Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology,Wuhan Botanical Garden,
Chinese Academic of Sciences, Wuhan 430074,P.R.China;

4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,P.R.China;

5.Bureau of Hydrology, Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010,P.R.China)

Abstract: Runoff is important for characterizing the water resources of a watershed and the climatic factors primarily affecting runoff are precipitation and temperature. The frequency of extreme climate events such as extreme precipitation and extreme drought has been increasing in some parts of China, seriously threatening economic development and the security of local residents. Xunhe River is one of the main tributaries of the upper Hanjiang River and variation of runoff from the basin has important impacts on water input to Danjiangkou Reservoir, consequently affecting source water in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project. It is therefore necessary to conduct a systematic, quantitative study of the response of basin runoff to anticipated climate change scenarios. To begin, a SWAT hydrologic model was constructed to simulate runoff in Xunhe River basin, based on monthly runoff data (1995 – 2015) recorded at the Xiangjiaping Hydrological Station. Data from 1998 – 2008 was used for calibration and data from 2009 – 2015 was used for validation. The correlation coefficient (R^2) was 0.85 for the calibration period and 0.87 for the validation period, and the respective Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NSE), indicating the reliability of the SWAT model, were 0.85 and 0.84. Runoff was then simulated in the Xunhe River basin for the period 2036 – 2055 using four climate scenarios predicted by the UK Hadley Climate Center (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5). Under the RCP climate scenarios, precipitation and temperature are both higher than historically and runoff presented an increasing trend. Precipitation during the third quarter contributed most to the annual runoff, while runoff in the fourth season decreased. Under climate scenario RCP8.5, the rainy season comes earlier and lasts longer. The simulation results for these scenarios can be referenced by policymakers for regulating water resources, mitigating extreme climatic events, flood control and disaster reduction.

Key words: Xunhe River basin; climate change; Soil and Water Assessment Tool; runoff simulation