

未来气候情景下和田河流域日径流过程模拟

罗敏^{1,2}, 刘铁¹, 黄粤¹, 孟凡浩^{1,2}, 刘蛟^{1,2}, 田霖^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:选取具有物理基础的分布式水文模型 MIKE SHE 来模拟典型西北干旱区山区和田河流域的水文过程。并采用 TRMM 遥感数据实现分布式降水的输入。在此基础上利用多模式集合平均法对 CMIP5 中 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5 四种排放情景下地表径流的变化情况进行了评估。结果表明:MIKE SHE 分布式水文模型能在站点稀少、自然环境恶劣的和田河流域进行水文过程模拟,率定以及验证期的结果均在可接受范围之内。在不同气候情景下的模拟结果表明,和田流域降水、温度以及地表径流在未来不同排放情景下的变化均表现出较好的一致性。春、秋、冬三季降水均增加,夏季降水减少;四季温度均升高且夏季增温最大。和田流域地表总径流量增加,而7-8月径流量减少。融雪期进一步提前,且春季融雪量显著增加。

关键词: MIKE SHE; 日径流; 干旱区; 和田河

中图分类号:TV121.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)02-0011-07

Simulation of daily runoff process in Hotan river basin under scenario of future climate

LUO Min^{1,2}, LIU Tie¹, HUANG Yue¹, MENG Fanhao^{1,2}, LIU Jiao^{1,2}, TIAN Lin^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The paper selected a distributed hydrological MIKE SHE model which has physical base to simulate the hydrological process of Hotan river basin in the typical arid region of northwest of China. It used TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) rainfall data so as to realize the input of distributed rainfall. The ensemble mean method were used to simulate the change of surface runoff under the four climate change scenarios of RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 in the future. Results indicate that the distributed hydrological model of MIKE SHE can be used to simulate the hydrological process in the Hotan river basin which has scarce observation sites and harsh natural environments. The results of calibration and validation are in acceptable range. The simulation results show that the changes of precipitation, temperature and surface runoff are in good consistency under different climate change scenarios. The precipitation increases in spring, autumn and winter season, while decreases in summer. The temperature rise in four seasons and that increases the largest in summer season. The total surface runoff increases, while that in July and August decreases. The melting snow period further advances and the melting snow volume in Spring increases significantly.

Key words: MIKE SHE; daily runoff; arid region; Hotan river

1 研究背景

水文水资源研究是内陆干旱区始终关注的热点之一。特别是近年来,由于气候变化的影响,作为全

球气候变化最为敏感的地区之一,西北干旱区以山区降水和冰川积雪融水补给为主的生态系统更加脆弱^[1],主要表现为径流时空分布急剧变化,水资源的不确定性增强。在这种情势下,准确模拟干旱区

收稿日期:2015-11-19; 修回日期:2016-01-10

基金项目:千人计划-新疆项目(374231001);中科院 STS 项目(TSS-2015-014)

作者简介:罗敏(1990-),女,山东省邹城人,博士研究生,主要从事水文水资源和遥感与地理信息系统研究。

通讯作者:刘铁(1977-),男,山东省蒙阴人,博士生导师,主要从事流域水文过程、河道动力学、地下水耦合模拟研究。

流域径流过程,是水资源预测与合理配置的首要前提^[2]。但由于干旱区自然环境的恶劣以及地形条件的复杂,导致气象站网布设稀疏,气象观测数据缺乏,且大部分气象站均在出山口以下,加之山区降水的空间变异性大,这直接影响了降水的垂直分布规律以及山地冰雪累积和消融规律的认识^[3],进而影响到干旱区水资源的正确评价和水文预报^[4]。近年来,随着 RS、GIS 的快速发展以及遥感数据产品在水文和气象中的广泛应用^[5],资料获取以及模型的运行更加方便快捷^[6],使得分布式流域水文模型逐渐成为干旱区水文研究的热点。在中国干旱区应用较多的代表性分布式水文模型主要有 SRM、SWAT 等^[7-9],而 MIKE SHE 模型由于本身结构和输入数据的复杂,目前在国内的应用仍比较少。

和田河是塔里木河的三大源流之一,平均每年向塔里木河干流输水 $10.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。和田河同时也是唯一穿越塔克拉玛干沙漠腹地的河流,其径流的变化直接影响到和田绿洲、“绿色走廊”以及塔里木河干流的生态环境^[10]。目前,有关和田河径流的研究主要是基于长时间序列的历史水文资料,并结合气象数据,得到一些重要的变化规律和响应关系^[11-13]。而利用水文模型定量模拟和田河流域水文过程的研究还很少,仅赵长森等^[14]改进了干旱区平原绿洲耗散水文模型,构建了和田绿洲耗散型水文模型,对和田绿洲进行了水平衡分析计算,但没有涉及山区产流过程且仅在月尺度上进行了模拟。同时,干旱区平原绿洲耗散水文模型属于概念性水文模型^[15],不能很好地考虑和田流域内降雨和下垫面条件的时空分布不均匀的特点。

因此,本文选取和田河为研究区域,以 TRMM 遥感数据为基础,通过分布式降水数据输入,构建基于 MIKE SHE 的干旱区缺资料流域的分布式水文模型,在日尺度进行水文预报。并在此基础上采用 CMIP5 提供的未来不同排放情景下的大气环流模式 (General Circulation Models, GCMs) 的输出结果,模拟和田流域径流相应的变化,进一步探讨气候变化对和田河流域地表径流的影响,对研究气候变化对干旱区水文水资源的影响具有重要的意义。

2 研究区概况

和田河流域位于新疆维吾尔自治区南部,塔里木盆地西部,地理位置在 $77^{\circ}27' - 81^{\circ}43'E$, $34^{\circ}52' - 40^{\circ}29'N$ 范围内^[16],流域海拔在 $1\,192 \sim 6\,858 \text{ m}$ 之间。其源头位于昆仑山与喀喇昆仑山北麓,由玉龙喀什河

和喀拉喀什河两大支流组成,全长 $1\,127 \text{ km}$,自北向南蜿蜒流入塔里木盆地,穿越塔克拉玛干沙漠,汇入塔里木河 (图 1)^[10]。和田河流域面积 $7.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,年径流量 $21.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,河水主要靠冰川融雪以及中高山区降雨补给^[17]。和田河流域属于典型的暖温带大陆性气候,四季分明,冬季气候寒冷干燥,夏季由于难以受到夏季风的影响,高温少雨。平原区的多年平均气温为 12.2°C ,降水量为 $5.4 \sim 89.6 \text{ mm}$,年蒸发量为 $2\,159 \sim 3\,137 \text{ mm}$ ^[13]。和田河流域内没有气象站点布设,仅附近存在一个和田气象站。流域内有 3 个水文站,其中同古孜洛克水文站位于其支流玉龙喀什河出山口,本文将利用同古孜洛克水文站的径流数据进行模型的率定以及验证。

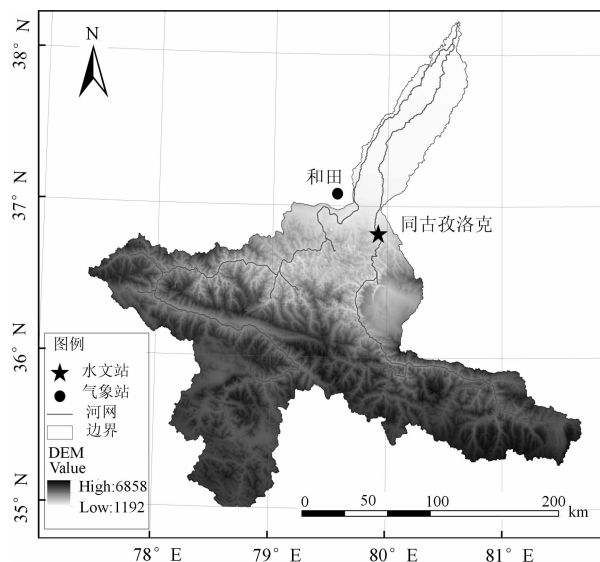


图 1 和田流域地形、河网以及观测站点分布

3 资料与方法

3.1 气候情景数据

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次耦合模式比较计划 (Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5) 于 2013 年发布了新一代的温室气体排放情景 - 典型浓度路径 (Representative Concentration Pathways, RCPs) 排放情景。RCPs 各情景在 2100 年选择不同的辐射强迫目标^[18],主要包括 4 类情景,分别是 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5。本研究选用 CMIP5 提供的大气环流模式 (GCMs) 输出的历史 (1961 - 2000) 和未来 (2021 - 2060 年) 在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5 四种排放情景下的日降水和日温度数据;并通过统计分析方法,得到 2021 -

2060 年相对 1961 – 2000 年间月均降水和月均温度的变化量;考虑到不同 GCMs 模拟结果存在较大的不同,使用 CMIP5 提供的所有的模型可能会导致这种不确定性进一步增加。因此,本研究通过 CMIP5 提供的历史数据与和田站实测数据进行比较,误差过大的模型数据将不被采用;结果表明,温度数据精度较高,各模型模拟温度与实测温度的相对误差绝对值均控制在 10% 以内;降水数据由于本身具有较高的不确定性,误差相对较大。最小误差为 4.81%,最大误差甚至超过 100%。因此,所有模型的温度数据均被采用,而降水数据仅保留误差控制在 40% 以内的模型。在此基础上采用多模式集合平均法,即选取 CMIP5 提供的所有 GCMs 模拟的月均降水和月均温度的变化量的平均值,得到不同情景下和田流域气温和降水变化的平均水平^[19]。通过将变化量的均值输入水文模型,得到未来不同排放情景下,和田河流域地表径流的变化趋势。具体计算公式如下: $\Delta_i = P_{RCP} - P_{HST}$ (1)

$$\overline{\Delta} = \sum_{i=1}^n \Delta_i$$
 (2)
$$P_{FUR} = P_{OBS} + \overline{\Delta}$$
 (3)

式中: P_{RCP} 为未来气候变化情景下的的参数值(降水或温度); P_{HST} 为历史情境情景下的的参数值; Δ_i 为不同气候变化情景下的参数增量; $\overline{\Delta}$ 为不同气候变化情景下的参数增量的平均水平; P_{OBS} 为降水(mm/d)或温度(℃)的实测值; P_{FUR} 为带有气候变化信号的未观测时间序列。

3.2 MIKE SHE 模型

MIKE SHE 模型是由丹麦水力学研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)在 SHE 基础上发展研制的具有完备物理基础的全分布式流域水文模型^[20]。为了充分考虑流域内下垫面条件和气象因子的时空异质性,水平方向上 MIKE SHE 模型通过把流域划分成若干大小相等且相互联系的网格来进行计算,垂直方向上则通过划分多个水平层处理不同土壤剖面的差异^[21],包括冠层、不饱和层以及饱和层等;不同网格采用数值分析来模拟水分运动的时空关系。MIKE SHE 模型对水文过程的模拟主要通过坡面漫流(OL)、河道流(OC)、蒸发/截留(ET)、融雪(SM)、不饱和带流(UZ)以及饱和带流(SZ)6 个系统模块交互进行(图 2)^[22],每个系统模块都针对一个水文过程,用户可根据自身研究目的进行各模块的组合,建立要求的水文过程^[20]。

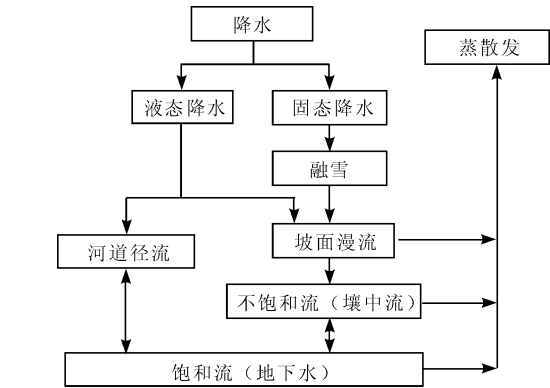


图 2 MIKE SHE 模型结构图

3.3 模型输入数据

MIKE SHE 水文模型建立所需的数据主要包括 DEM、土地利用数据、土壤数据、降水数据、温度数据等(表 1)。DEM 采用 SRTM 比例尺为 1: 25 万的 DEM 数据;并通过 ARCGIS 的水文分析模块利用该数据生成流域边界以及水系。土地利用类型数据采用 2000 年全球土地覆盖计划(GLC2000),并重分类为森林、灌木、低矮草地、河流、冰川、裸地 6 类;叶面积指数(LAI)数据由 MODIS 影像生成;土壤数据采用基于联合国粮农组织(FAO)构建的世界土壤数据库(HWSD)并根据土壤三角形转换成 MIKE SHE 模型内部土壤类型;考虑到和田河流域内没有气象站分布,直接使用流域附近的平原区和田站的观测降水数据,会导致模型山区降水的输入误差极大。为了充分表现降水的空间异质性,模型采用分辨率为 0.25° × 0.25°的 TRMM 卫星 3B42 V6 降水产品,实现分布式降雨输入;并通过和田站降水数据对其进行精度检验,相关系数在 0.6 以上,基本能够达到应用要求。温度以及径流数据均采用观测站实测日数据。其中,温度数据采用和田站的观测时间序列,径流数据采用出山口同古孜洛克水文站径流观测数据。

表 1 和田流域 MIKE SHE 模型构建所需基础数据列表

数据类型	数据来源	属性
地形	1: 250000DEM	90km × 90km 格网
流域边界	DEM 生成	*. shp 文件
河网水系	DEM 提取	*. shp 文件
土地利用数据	GLC2000	1km × 1km 格网
土壤数据	FAO 土壤图	1km × 1km 格网
降水数据	TRMM 数据	0.25° × 0.25°格网
温度数据	观测站	站点数据
径流数据	观测站	站点数据
叶面积指数	MODIS LAI 数据	1km × 1km 格网

3.4 模型参数率定

本研究采用 2004 – 2010 年的连续时间序列进行模拟计算。其中 2004 – 2008 年为模型的率定期, 2009 – 2010 年为模型的验证期。并利用相对误差 (*RE*)^[23]、相关系数 (*CORR*)^[24]、纳什系数 (*NS*) 等评价指标对模拟结果进行评价。各评价系数计算公式如下:

$$RE = \frac{\bar{O} - \bar{S}}{\bar{O}} \tag{4}$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=0}^n (S_i - \bar{S})^2}} \tag{5}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=0}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{6}$$

式中: *O_i* 为第 *i* 天实测径流量, m³/s; $\bar{O}$ 为实测径流量平均值, m³/s; *S_i* 为第 *i* 天模拟径流值, m³/s; $\bar{S}$ 为模拟径流量平均值, m³/s。

4 研究结果

4.1 参数率定结果

本研究主要采用人工试错法对 MIKE SHE 分布式水文模型进行参数率定, 经过模型参数敏感性分析, 并根据实测径流数据对参数进行适当的调整, 寻找参数最优值。

参数率定结果如表 2 所示。其中, 蒸发模块以及饱和流模块参数 (土壤相关参数) 由实测数据推算得到, 在本研究中没有进行率定。融雪模块作

为降水模块的一个选择项目出现, 包含的参数主要有: 度日因子与临界融雪温度, 对融雪径流过程起着很重要的作用。通过率定将度日因子设为 4 mm/(d · °C), 将融雪的最低温度设为 0 °C; 坡面流模块主要包括 5 个参数: 曼宁系数、滞洪系数、初始水深、水平水力传导度、垂直水力传导度; 其中滞洪系数以及初始水深均采用缺省值, 没有参与率定; 曼宁系数主要控制坡面的粗糙度, 值越大, 坡面越光滑, 坡面汇水速度越快; 水平水力传导度以及垂直水力传导度主要影响水平和竖直方向水的运移速度, 值越大, 水运移速度越快; 饱和流模块主要包括单位产水量、单位储水量以及排水水位, 主要控制地下水与地表水的交换条件; 河道流包括河床糙率以及河床透水系数, 主要控制河道内水流速度以及向河床渗漏水量。

4.2 径流模拟结果

分别将率定期 (2004 – 2008) 以及验证期 (2009 – 2010) 的日径流量以及月径流量的实测值与模拟值进行对比验证 (图 3)。结果表明, 通过参数率定, 模型能够比较准确的模拟率定期与验证期的径流量, 率定以及验证的结果均在可接受范围内。在日尺度上, 模型率定期的相关系数达到 0.82, 效率系数达到 0.66, 相对误差为 -0.11; 模型验证期的相关系数达到 0.89, 效率系数达到 0.62, 相对误差为 0.15。在月尺度上, 模型率定期的相关系数达到 0.93, 效率系数达到 0.86, 相对误差为 -0.11; 模型验证期的相关系数达到 0.97, 效率系数达到 0.83, 相对误差为 0.15。验证期及率定期相应评价系数见表 3。

表 2 参数率定结果

模块	参数	率定结果	模块	参数	率定结果
融雪模块	度日因子/(mm · d ⁻¹ · °C ⁻¹)	3	饱和流	单位产水量(-)	0.01
	临界融雪温度/°C	0		单位储水量/m ⁻¹	0.001
	曼宁系数/(m ^{1/3} · s ⁻¹)	3		排水水位/m	-0.2
坡面流	水平水力传导度/(mm · s ⁻¹)	4.0 × 10 ⁻⁵	河道流	河床糙率(-)	10
	垂直水力传导度(mm · s ⁻¹)	2.0 × 10 ⁻⁵		河床透水系数(-)	1.0 × 10 ⁻⁵

表 3 模型结果统计

时间尺度	阶段	相关系数	纳什系数	相对误差
		<i>R</i> ²	<i>NS</i>	<i>RE</i>
日尺度	率定期	0.82	0.66	-0.11
	验证期	0.89	0.62	0.15
月尺度	率定期	0.93	0.86	-0.11
	验证期	0.97	0.83	0.15

4.3 未来气候变化下径流变化预估

图 4 给出了不同气候情景下 2021 – 2060 年相对 1961 – 2000 年的降水和气温的变化情况。对于降水数据, 同样提取和田站的降水变化量, 以便于与实测数据进行对比分析, 并保证降水变化量与温度变化量的同步; 在此基础上将和田站的降水变化

量应用到 TRMM 降水数据之上,得到降水的未来变化趋势。可以看出,不同气候情景虽然变化量有所差别,但趋势基本一致。对于降水而言,4 种气候情景下,和田站夏季降水呈现减少趋势,而其他季节均呈现增加趋势,且降水增量最大值出现在冬季。RCP8.5 排放情景下降水增量明显高于其他 3 种情景,其他 3 种情景波动范围相对较小。对于温度而

言,每月平均温度均呈现升高趋势,且增温最明显的月份出现在夏季,增温最小的月份出现在春季。RCP8.5 排放情景下温度升高明显高于其他 3 种情景,温度增加范围从 2.24 到 2.79℃。其他 3 类情景冬春两季温度变化差别不大,夏秋季开始出现明显的差别,RCP4.5 情景下夏秋季增温相对较大,RCP2.6 次之,RCP6.0 最低。

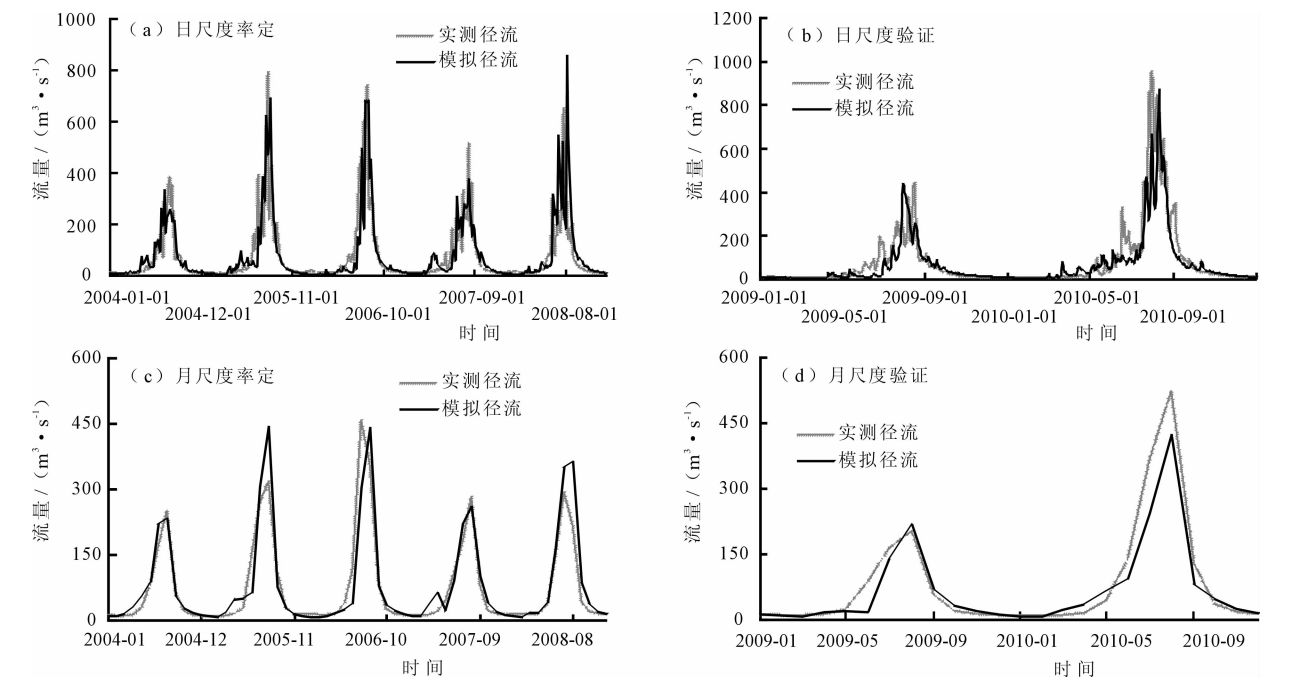


图3 同古孜洛克水文站径流量率定与验证结果值

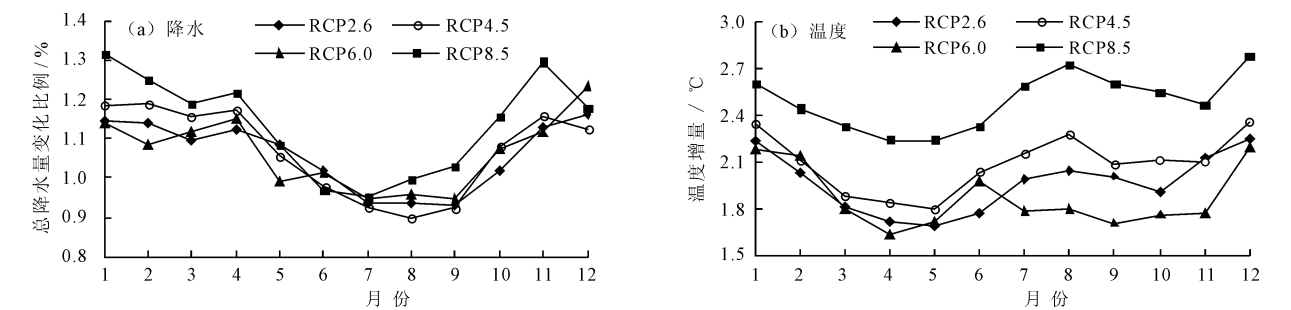


图4 不同气候情景下和田气象站降水和温度的变化量

将 CMIP5 多模式集合 4 个情景下的月均降水和月均温度的平均增量作为模型的输入,驱动 MIKE SHE 模型输出径流量,分析 2021 – 2060 年和田河流域地表径流的变化。不难看出,由于冬季降水的提高,导致融雪期 4 – 5 月融雪量增加,地表径流增加明显(图 5a);而夏季降水的减少同样导致了 7 – 8 月径流有少许下降。就温度而言,温度的升高使融雪期明显提前,也使得融雪期融雪量明显增加。值得指出的是,由于夏季升温比较明显,导致 7 – 8 月蒸发量增加较大,夏季径流反而下降(图 5b)。温度的升高同时也造成前期融

雪量过多,导致了来年 1、2 月份径流量有少许降低。且从图中可以明显发现,温度对径流的影响明显高于降水,且两者对径流影响较大的时期均集中在融雪季。综合降水和温度的影响(图 6),可以发现,不同气候情景对地表径流的影响在量上具有一定差别,趋势却具有高度的一致性。总体而言,4 种排放情景下,和田河流域地表径流均会增加,且 RCP8.5 情景下增加最多,其他 3 种情景在融雪期差别明显,RCP4.5 情景下融雪期径流增加相对较大,RCP2.6 次之,RCP6.0 最低。其他时期差别并不明显。

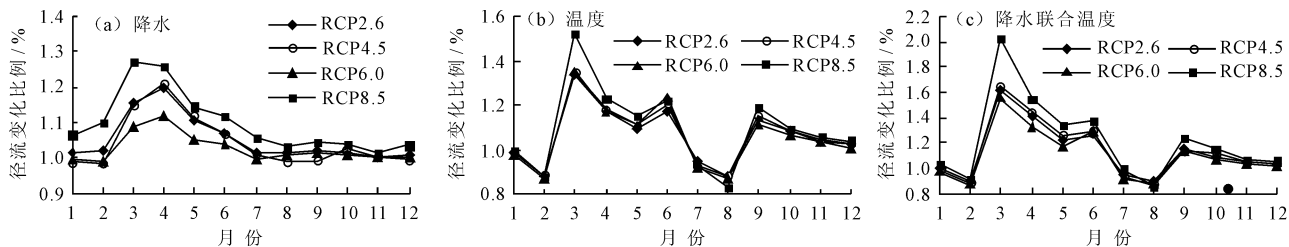


图5 不同气候情景对同古孜洛克水文站径流的影响

5 结论与讨论

MIKE SHE 分布式水文模型由于本身结构比较复杂,对输入数据要求较高,在国内特别是干旱区流域应用都较少;本研究利用气象站点数据结合 TRMM 遥感降水数据,通过 MIKE SHE 分布式水文模型对和田河流域进行水文过程模拟,选择该流域出山口的同古孜洛克水文站实测日径流数据进行模型的率定以及验证,模拟值与实测值拟合较好,并在此基础上分析了未来不同排放情景下和田流域地表水资源的变化,结果说明:

(1) 遥感估算降雨在一定程度上能够反映降水的时空异质性,在站点稀少、资料缺乏的干旱区流域,能够代替站点降水数据应用到水文模型中,实现缺资料甚至无资料地区水文过程的模拟;在资料缺乏的干旱区流域进行水文建模时,遥感数据能够发挥重要的作用,有很好的应用前景。

(2) MIKE SHE 分布式水文模型能够充分考虑下垫面的不均一特性,且采用度日法 (degree-day) 模拟融雪过程,对于以冰川积雪融水补给为主的、地理条件较为复杂的和田流域拟合效果较好,能够充分发挥分布式水文模型的优点,模拟最大限度接近流域实况;说明 MIKE SHE 分布式水文模型在干旱区应用是完全可行的。

(3) 未来不同排放情景下,和田流域降水、温度以及地表径流的变化均表现出较好的一致性。春、秋、冬三季降水均增加,夏季降水减少;温度升高且夏季增温最大。和田流域融雪期会进一步提前,春季融雪量增加,7-8月径流量减少。

近年来,为提高遥感降水的精度,出现了一系列校正遥感降水、提高遥感降水精度的方法;影响一个地区降水量的因素很多,如地形、地貌、海陆位置、地理纬度、大气环流等,随着 3S 技术的进步以及与水文、气象更进一步的结合,综合考虑多种因素,建立完善的校正方法,会进一步提高降水数据的精度,为干旱区水文水资源预报提供新的契机。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [2] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1295-1304.
- [3] 邓铭江,蔡建元,董新光,等. 干旱地区内陆河流域水文问题的研究实践与展望[J]. 水文,2004,24(3):18-24.
- [4] 黄粤,陈曦,马勇刚. 塔里木河源山区径流模拟及不确定性研究[J]. 中国沙漠,2010,30(5):1234-1238.
- [5] 穆振侠,姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水垂直分布规律的研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(10):66-71.
- [6] 尹振良,肖洪浪,邹松兵,等. 祁连山黑河干流山区水文模拟研究进展[J]. 冰川冻土,2013,35(2):438-446.
- [7] 刘晓林,杨胜天,赵长森,等. 多源遥感驱动的 SRM 模型在缺资料地区的研究及应用[J]. 遥感技术与应用,2015,30(4):645-652.
- [8] 程磊,徐宗学,罗睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例[J]. 地理研究,2009,28(1):65-73+275.
- [9] 赵杰,徐长春,高沈瞳,等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟[J]. 干旱区地理,2015,38(4):666-674.
- [10] 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,2007,22(6):974-979.
- [11] 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,2008,31(2):237-242.
- [12] 徐海量,叶茂,宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探[J]. 地理科学,2007,27(2):219-224.
- [13] 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,2008,30(12):1833-1838.
- [14] 赵长森,黄领梅,沈冰,等. 和田绿洲散耗型水文模型 (DHMO) 研究与应用[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(7):72-77.

- [15] 黄聿刚,丛振涛,雷志栋,等. 新疆麦盖提绿洲水资源利用与耗水分析——绿洲耗散型水文模型的应用[J]. 水利学报,2005,36(9):1062–1066.
- [16] Xu Jianhua, Chen Yaning, Li Weihong, 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.
- [17] Chen Yaning, Xu Changchun, Hao Xingming, et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China [J]. Quaternary International,2009,208(1):53–61.
- [18] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature,2010,463(7282):747–756.
- [19] Tie Liu, Willems P, Pan X L, et al. Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim basin in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(11):3511–3527.
- [20] 李静,焦树林,梁虹,等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究——以红水河系六洞河流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(4):388–394.
- [21] Thompson J R, Sorenson H R, Gavin H, et al. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England [J]. Journal of Hydrology,2004,293(1):151–179.
- [22] 郑震,张静,宫辉力. MIKE SHE 水文模型参数的不确定性研究[J]. 人民黄河,2015,37(1):23–26.
- [23] Janssen P H M, Heuberger P S C. Calibration of process-oriented models [J]. Ecological Modelling,1995,83(1):55–66.
- [24] Guo Hao, Chen Sheng, Bao Anming, et al. Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia[J]. Remote Sensing,2015,7(6):7181–7211.

(上接第10页)

- [16] 唐廷,张玉先,黄正杰,等. 福州市东南区水厂原水生物预处理试验研究[J]. 中国给水排水,2010,26(5):84–87+92.
- [17] 徐兵,贺尧基. 嘉兴地区水厂生物预处理与深度处理的生产实践[J]. 中国给水排水,2007,23(8):56–58.
- [18] 黄廷林,魏巍,苏俊峰,等. 贫营养原位生物接触氧化法对微污染水源水的脱氮试验研究[J]. 水处理技术,2010,36(6):95–99.
- [19] 杨卫权,丁卫东. 上海惠南水厂生物接触预处理池的运行[J]. 中国给水排水,2003,19(9):100–102.
- [20] 张东,许建华,刘辉. 微污染原水的生物接触氧化预处理研究[J]. 中国给水排水,2000,16(12):6–9.
- [21] Liu Guojing, Zhang Xiangru, Talley J W, et al. Effect of NOM on arsenic adsorption by TiO_2 in simulated As(III)-contaminated raw waters[J]. Water Research,2008,42(8–9):2309–2319.