

# 气候变化情景下青海湟水流域径流变化的 HIMS模拟分析

张艳娇<sup>1</sup>,高小红<sup>1</sup>,李其江<sup>2</sup>,陈 强<sup>2</sup>,杨军军<sup>1</sup>

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院/青藏高原环境与资源教育部重点实验室, 西宁 810008;

2. 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810001)

**摘 要:** 基于国产HIMS(Hydro-Informatic Modeling System)模型,以青海湟水流域为研究区域,利用1986-2000年33个雨量站和8个气象站的逐日降水和气温数据,对其径流变化进行模拟;选取流域内6个水文站同期的实测径流数据,进行参数率定及验证。结果表明:HIMS模型日、月率定及验证结果良好,在湟水流域具有良好的适用性。在此基础之上,分析了湟水流域1961-2010年降水及气温的变化趋势,并对不同气候变化情景下的水文响应(径流量)进行模拟分析。结果显示气候变化对湟水流域径流量变化趋势影响显著,随气温升高和降水量的减少,径流量呈明显的减少趋势,反之,呈增加趋势。

**关 键 词:** HIMS模型;径流模拟;气候变化情景;湟水流域;青海省

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00059

## 1 引言

气候变化是全球变化研究的重要内容,IPCC第四次评估报告对气候变化和水资源给予特别关注(Bates et al, 2008)。青藏高原是地球上受到人类活动影响相对较弱的少数地区之一,是全球气候变化的敏感区(赵东升等, 2006),20世纪80年代以来,其增暖幅度较大,气温变幅大于中国东部(莫申国等, 2004)。湟水流域位于青藏高原与黄土高原过渡地带,海拔高、气候寒冷,生态环境敏感、脆弱,水土流失非常严重,相应的水文过程对气候变化的响应也较明显。因此,开展气候变化背景下青藏高原典型流域水文响应过程研究,其科研与实践意义重大。

水文模型是模拟流域水文过程和认识流域水文规律的重要理论基础(冯夏新等, 2010),气候变化对水文水资源影响的研究基本上遵从“未来气候情景设计—水文模型—影响评估”的模式,未来气候

情景设计和水文模型的建立是研究气候变化对水文水资源影响的关键问题(徐宗学等, 2010; 张建云等, 2007),基于模型探讨气候变化背景下径流变化过程是一种有效手段。

HIMS(Hydro-Informatic Modeling System)模型是我国自主研发的水文综合模拟系统,由刘昌明、王中根等针对国内对于水资源领域与其他学科之间的交叉研究较少,在水资源集成研究方面不足等问题而提出(刘昌明等, 2004, 2006, 2008, 2010a; 王中根等, 2004a)。该模型已经在我国黄河流域(包括洛河上游、泾河、无定河)及潮白河等流域、澳大利亚及美国的一些流域中得到成功应用(刘昌明等, 2010b)。

本文基于HIMS水循环模拟系统,以青海湟水流域为研究区域,构建流域分布式水文模型,对其日、月径流进行模拟,并对未来气候变化情景模式下可能产生的径流变化进行模拟和分析。研究气候变化情景下湟水流域的径流变化,对于该区域未

收稿日期:2012-05; 修订日期:2012-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(40861022);中国科学院“西部之光”项目(科发人教字[2006]378号)。

作者简介:张艳娇(1987-),女,河北任丘人,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。

E-mail: zhangyanjiao999@126.com

通讯作者:高小红(1963-),女,陕西白水人,博士,教授,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。

E-mail: xiaohonggao226@gmail.com

来水资源的合理利用及规划管理具有重要意义。

2 HIMS 模型的原理和结构

2.1 模型原理

HIMS 模型是在国产 GIS 软件 SuperMap 的基础上开发的,基于水循环信息平台,集成了 9 大过程 115 个子模块,涉及 600 多个水文变量,是一个功能多样的水资源综合模拟系统(刘昌明等, 2008)。

HIMS 模型的单元产流计算考虑了水循环中的降水、截留、融雪、蒸(散)发、下渗、产流(地表径流、壤中流、地下径流)、坡面汇流、水库(湖泊)调蓄和河道汇流等 9 大水循环过程与水量转化等过程,考虑到超渗产流和蓄满产流两种产流方式(刘昌明等, 2008),采取了类似 TOPMODEL 模型(Beven et al, 1979)的基于地形指数  $\ln(a/\tan b)$  的计算方法(邓慧平等, 2002),即利用地形信息来进行水文响应特征的模拟,根据 DEM 所计算出的地形参数在网格单元或子流域上进行分布式产流模拟。对于流域的日、月过程径流模拟,模型的核心是考虑流域的蒸散发和下渗,并以水量平衡原理为基础(刘昌明等, 2010b)。基于入渗的能量守恒和水量平衡公式为(刘昌明等, 2008):

$$u = \rho g (y + H + h_L) / \nu y \tag{1}$$

$$q_n dt = \omega dy \tag{2}$$

式中:  $u$  为入渗锋面速度;  $\rho$  为水密度;  $g$  为重力加速度;  $y$ 、 $H$ 、 $h_L$  分别为重力水、地表积水与毛管力水头;  $\nu$  为与阻力有关的系数;  $q_n$  为入渗流量;  $\omega$  空隙面积。

潜在蒸散发的计算是基于 Hargreaves 和 Samani 公式:

$$ET_0 = a \left( \frac{RA_{\max}}{L} \right) (T + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^b \tag{3}$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散发;  $a$  为参数,取值 0.0023~0.0032;  $b$  为参数,取值 0.5~0.6;  $RA_{\max}$  为太阳最大可能辐射量 ( $\text{MJ}^{-2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $L$  为汽化潜热 ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $T$ 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  分别为日均、日最高、日最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

实际蒸散发则是在潜在蒸散发的基础之上,根据与土壤蓄水量和潜在蒸发相关的经验模型计算得出,其公式如下:

$$ET_a(t) = ET_0(t) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{W_s(t)}{W_{sm}} \right)^c \right) \tag{4}$$

式中:  $ET_a(t)$ 、 $ET_0(t)$  分别为  $t$  时刻的实际蒸散发和

潜在蒸散发;  $W_s(t)$  为  $t$  时刻的非饱和土壤含水量 (mm);  $W_{sm}$  为土壤最大蓄水量 (mm)。

下渗计算采用经验模型:

$$f = RP^r \tag{5}$$

$$R = 0.8781 \ln r + 1.3422 \tag{6}$$

式中:  $f$  为下渗量 (mm);  $P$  为降水量 (mm);  $R$ 、 $r$  为经验系数。

地表径流量计算基于水平衡方程:

$$Q_d = P - f \tag{7}$$

式中:  $Q_d$  为地表径流量 (mm)。

在河网汇流演算中,计算单元间通过主河道连接成整体系统。HIMS 模型通过编排不同的命令代码,利用河网拓扑关系,控制单元之间的产、汇流过程,实现分布式水循环过程的模拟。HIMS 模型考虑坡面和河道两种汇流方式,采取河道动力波方法和分段马斯京根方法,即根据河网关系从一段河流进入另一段河流,最后汇集到流域出口断面,从而进行各个子流域和整个流域的径流模拟(刘昌明等, 2008)。

2.2 模型结构

HIMS 水循环模拟系统是 HIMS 水资源综合模拟系统中的水循环径流模拟模型,其运行过程为:将处理好的气温、降水及子流域经纬度、高程、面积等数据输入模型;通过模型产汇流模拟中的功能模块(冠层截留模块、融雪模块、蒸散发模块、地表水模块、土壤水模块、地下水模块、河网汇流模块)对流域产流、汇流关系进行演算;最后求得流域各个计算单元及出口断面的径流量(王中根等, 2004b)。

模型主要包括流域水循环的模拟及简单情景模式的设置,其主结构为输入模块、产汇流模块、辅助和输出模块。输入模块包括降水、气温、DEM 空间数据等的输入,数据输入之后通过产汇流模块中的功能模型进行净雨推算;辅助和输出模块包括数据的输出、模型的执行和参数的率定。图 1 为 HIMS 水循环模拟系统产汇流结构示意图。

3 基于 HIMS 的湟水流域分布式水文模型

3.1 研究区概况

湟水流域位于青藏高原与黄土高原过渡地带,地理位置为  $36^{\circ}02' \sim 37^{\circ}28' \text{ N}$ ,  $100^{\circ}42' \sim 103^{\circ}04' \text{ E}$ 。

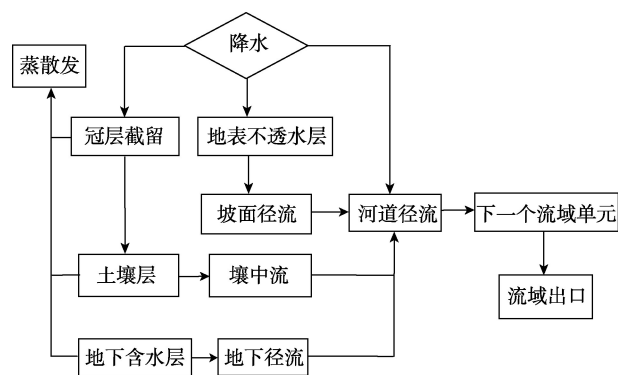


图1 HIMS模型产汇流结构示意图

Fig. 1 Flow chart of runoff-conflux of HIMS model

干流在青海省境内长335 km,从上游到下游依次流经海晏、湟源、湟中、西宁、平安、互助、乐都、民和等县市;流域面积16120 km<sup>2</sup>,年平均径流量21.5亿m<sup>3</sup>,流域地势西北高东南低,海拔高度在1650~4898 m之间,地形复杂多样,地表切割破碎,以黄土丘陵、中高山为主。气候属于典型的温带大陆性气候,终年受大陆气团控制,冬季寒冷,夏季温度较高,年、日温差较大。年平均气温约为3.4℃,最高气温达34.7℃,最低气温-32.6℃。年降水量约为430 mm,降水量时空分布不均匀,自西北向东南递减,降水主要集中在6-9月份,占全年降水的70%左右,流域蒸发与降水相反,呈现自东南向西北递减的趋势,年蒸发量在750~1000 mm之间。湟水流域成土母质主要以第三纪和第四纪的红土、黄土为主,河谷地区多发育灌溉型栗钙土,土壤肥沃,植被覆盖较好,多为四旁林;而山地则以红、黄、灰栗钙土为主,水土流失严重,土壤相对贫瘠,植被覆盖低(李万寿等, 2007; 李威邦等, 2007)。

湟水流域是青海省主要的政治、经济、教育、科技、文化中心及交通枢纽。2011年湟水流域人口约296万,占青海省人口的57%,是青海省人口密度最大的地区,人类活动较为频繁。湟水河是农业灌溉、城镇生活、工业生产用水的主要来源,对湟水流域乃至青海省社会、经济发展至关重要。

### 3.2 数据来源

研究所用数据包括水文数据、雨量数据、气象数据及数字高程模型(DEM)。其中33个雨量站点的逐日雨量数据,6个水文站点的逐日实测径流数据来自青海省水文水资源勘测局,8个气象站点的逐日气温数据来自青海省气象局,1:25万的DEM数据从美国地质调查局网站(<http://www.USGS.com>)获得。

com)获得。

### 3.3 子流域划分和河网结构提取

DEM主要用于提取高程、坡度、河网、流域边界等。用DEM进行流域离散化的方法主要有3种:网格(grid)、山坡(hillslope)和子流域(sub watershed)(王中根等, 2002)。由于自然子流域的划分是基于天然河网进行流域离散化,能够较好地反映河网汇流关系,单元内和单元之间的水文过程十分清晰(王中根等, 2003),因此采用基于子流域的划分方法,通过数字地形分析软件TOPOZ (Garbrecht et al, 1997)对DEM进行处理。TOPOZ软件是基于D8算法,按最陡坡度原则,基于最小面积阈值定义地表河流划分子流域(吴险峰等, 2002)。首先利用ArcGIS软件对DEM进行平滑与填洼处理,得到无凹地DEM,将其输入到TOPOZ软件里,自动完成自然子流域的划分。最终将湟水流域划分为39个子流域(图2),通过在每个子流域上建立物理概念模型来推求净雨,然后进行汇流演算。

河网结构是进行汇流演算的基础:首先,利用ArcGIS软件中的Hydrology模块提取河网;然后将其与划分好的子流域图层进行叠加,获得子流域间的河网关系图;进而确定河流流向,建立河网汇流关系。

### 3.4 模型运行

由于流域雨量站和气象站点分别为33个和8个,而子流域划分为39个,因此对于没有气温和降水数据的子流域,采用最短距离即就近选取的原则,缺乏数据的子流域用距它最近的站点数据进行替代模拟。

在完成子流域划分及河网提取等上述前期工作后,将处理好的39个子流域的逐日降水、气温数据和利用ArcGIS软件计算出的每个子流域的高程、面积、经纬度信息及河网关系信息输入到HIMS模型中进行模型构建,运行模型。模型输出文件包括实际蒸发量、潜在蒸发量、地表径流量等。

## 4 结果分析和讨论

采用1986-1995年峡门、桥头、西纳川、石崖庄、西宁及1989-1995年乐都站点的实测径流数据进行参数日、月率定,用以上6个站点1996-2000年的实测径流数据进行参数验证。模型率定的参数主要有9个,包括7个产流参数和2个汇流参数。它们



分别是:SMSC(土壤最大蓄水容量),实际蒸发参数,基流参数,壤中流计算参数,地下水补给参数,影响下渗的经验系数 $R$ 、 $r$ ,马斯京根模型经验系数 $C_1$ 和 $C_2$ 。HIMS 模型提供了自动优化模块,可对模拟结果自动率定。由于在实际径流产生过程中,降水过程先满足流域产流,产流之后的降水形成汇

流,因此在模型调试过程中先调产流参数,再调汇流参数,最后把产汇流参数结合起来才能达到参数优化的效果,调参顺序依据河网关系从上游子流域到下游子流域逐个进行调试。

模拟结果采用效率系数、相关系数进行评价。表1和表2是湟水流域6个观测站点的日、月率定

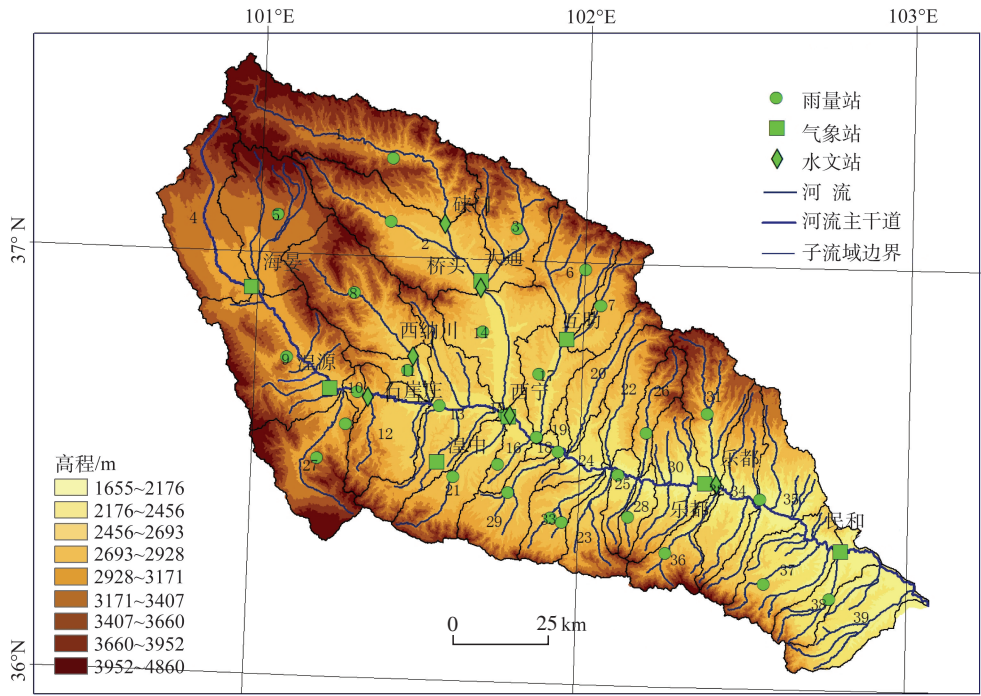


图2 湟水流域气象、水文站点及子流域划分分布图

Fig. 2 Map of meteorological, hydrological stations and sub-basins in the Huangshui river basin

表 1 HIMS 模型参数日率定和验证结果

Tab. 1 Parameters sensitivity analysis and validation of simulated daily results

项目		观测站点					
		硃门	桥头	西纳川	石崖庄	西宁	乐都
率定结果	效率系数	0.70	0.73	0.69	0.55	0.69	0.72
	相关系数	0.70	0.74	0.69	0.61	0.69	0.73
验证结果	效率系数	0.66	0.68	0.52	0.41	0.54	0.62
	相关系数	0.68	0.69	0.68	0.60	0.68	0.73

表 2 HIMS 模型参数月率定和验证结果

Tab. 2 Parameters sensitivity analysis and validation of simulated monthly results

项目		观测站点					
		硃门	桥头	西纳川	石崖庄	西宁	乐都
率定结果	效率系数	0.95	0.95	0.97	0.94	0.91	0.90
	相关系数	0.95	0.96	0.97	0.94	0.91	0.91
验证结果	效率系数	0.95	0.94	0.96	0.94	0.91	0.94
	相关系数	0.96	0.95	0.97	0.94	0.94	0.95

和验证结果。

从表1参数日率定结果可以看出,石崖庄站的效率系数为0.55,而其他5个站点效率系数均达到了0.69以上,相关系数6个站点均达到了0.6以上;验证结果显示:石崖庄效率系数为0.41,其余5个站点效率系数均达到了0.5以上,相关系数所有站点均达到了0.6以上。表2显示湟水流域的月率定及验证结果,均达到了0.9以上,效果较好。图3是对湟水流域6个水文观测站点月验证模拟结果与实测值的比较。

石崖庄站模拟和验证效率系数较低的原因,可能由以下几个因素导致。①石崖庄站位于第10个子流域,处在湟水的中下游,汇入的支流较多,上游子流域的模拟效果是影响下游子流域模拟精度的重要因素。②雨量站和气象站在湟水流域的空间分布也影响着模拟精度。降水是湟水流域径流量的主要来源,雨量站在湟水流域分布不均可能导致模拟结果存在误差。气温对径流有着显著的调控

作用,青海省内的湟水干流流域面积16120 km<sup>2</sup>,参与径流模拟的有8个气象站点,没有气象站点的子流域数据要使用离它最近的站点数据代替模拟。石崖庄站所在子流域内没有气象站点,使用的是离它最近的湟源站点的数据进行模拟,因此,可能存在空间误差。

从图3中可以看出,硃门和桥头站的月模拟径流峰值较低,其原因可能为:硃门和桥头站位于上游子流域,汇入的支流较少,导致地表径流过低,模拟峰值低于实测峰值。

湟水流域受人类活动影响较大,农业灌溉、建坝截流及工业用水等人类活动都对该地区的径流模拟有着较大的影响,影响其最终的模拟精度。

总体来看,各个站点的模拟值与实测值趋势基本一致,模拟结果能够反映湟水流域的基本径流过程,符合水量平衡规律。HIMS模型在湟水流域的模拟结果良好,误差在可以接受的范围之内,具有良好的适用性,其结果基本能进行未来气候变化情

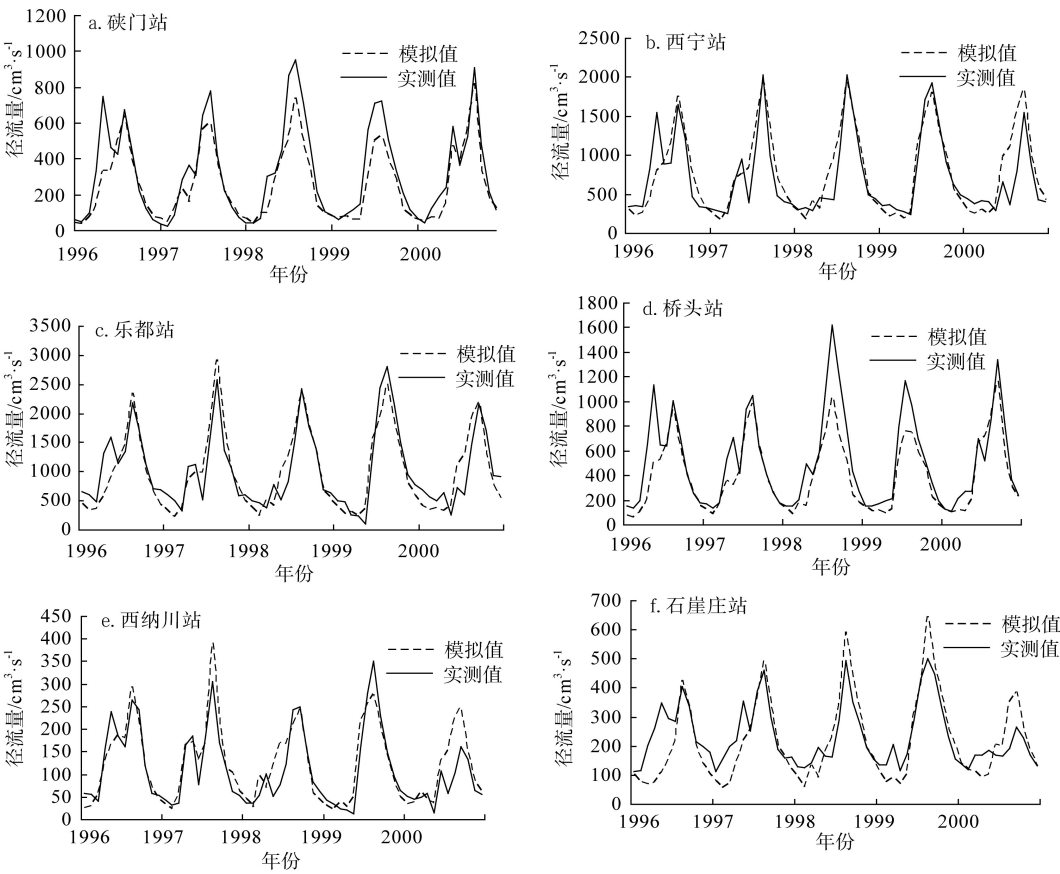


图3 湟水流域6个水文站点月验证模拟与实测值比较

Fig. 3 Comparison of the simulated monthly runoff data to the observed data at six hydrological stations in the Huangshui river basin

景下的水文响应分析。

5 未来气候情景下的径流变化模拟

气候变化情景的设置比较复杂,目前主要有3种方法:直接假定气候情景设置、大气环流模式模拟(GCMs, General circulation model)及长时间序列历史资料分析(Arnell, 1992)。直接假定气候情景设置即任意给定气温、降水等气候要素变化值;GCMs输出方法是利用GCMs的模拟结果生成未来气候变化情景;长时间历史资料方法可通过气候资料记录选取有短期影响意义和异常天气事件或明显的冷暖期,建立未来气候变化情景(张利平等, 2008)。本文采取第3种方法,通过对湟水流域近50年(1961-2010年)来气温和降水的变化趋势进行分析,以近50年来最大年和最小年的降水和气温作为变化阈值,设计未来气候变化的不同情景进行径流模拟。

根据湟水流域海晏、湟中、湟源、大通、互助、西宁、乐都和民和8个气象站点近50年的气候资料,得到8个站点的平均气温和降水变化趋势图(图4)。从图中可以看到,1961-2010年,气温的趋势线方程为 $y=0.0409x+3.3993$ ,日均温近50年大约增加2℃,上升趋势较为显著;降水的趋势线方程为 $y=0.015x+429.58$ ,年降水量近50年仅增加0.75 mm,变化幅度很小,几乎可以忽略不计。而实际上,降水的年际变化非常大,最大年降水量为612 mm,与近50年平均降水量相比,增加幅度约为40%;最小年降水量为296 mm,减少幅度约30%。气温近50年最高值约为5.9℃,最低值约为2.9℃,距平值约为±1.5℃。因此,将最大年和最小年的降水和气温作为变化的阈值,在湟水流域可能的气候变化范围下,设定了9种情景,即气温分别增加1.5℃、减少1.5℃、保持不变,与降水分别增加40%、减少30%、保持不变的两两组合。将不同情景下的气温和降水数据输入到HIMS模型中模拟生成径流数据,具体情景及模拟结果见表3。

由表3可以看出,在不同的情景模式下,径流量变化有着明显差异。当降水不变时,径流量随温度升高而减少,反之增加;当气温不变的情况下,径流量随降水增加而增加,反之减少。当降水

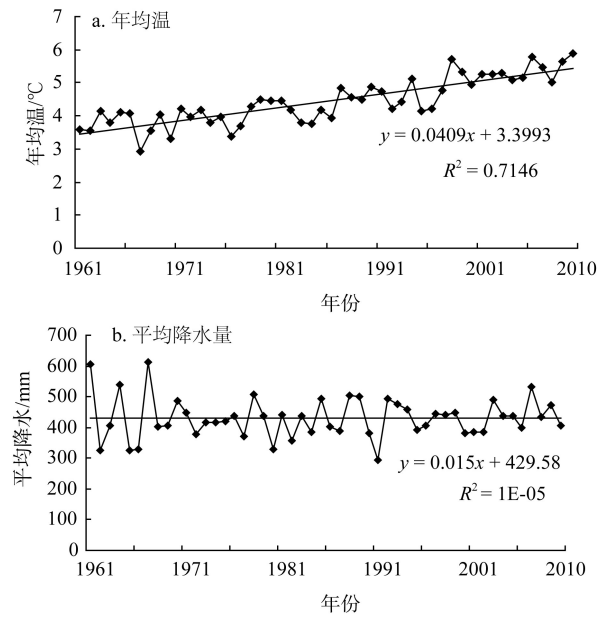


图4 湟水流域年均温和平均降水量变化趋势  
(8个气象站点)

Fig. 4 Trends of the changes of average annual temperature and average annual precipitation in the Huangshui river basin

表3 未来不同情景下的年径流变化率(单位: %)  
Tab. 3 Simulated annual runoff changes in different scenarios (unit: %)

气温变化/℃	降水变化/%		
	-30	0	40
-1.5	-43	7	105
0	-45	0	96
+1.5	-47	-0.4	89

减少30%,气温升高1.5℃,径流量减少47%,减少幅度最为显著;当降水增加40%,气温降低1.5℃,径流量增加105%,增加幅度最为显著。当气温不变,降水增加40%时,径流量增加96%,降水减少30%,径流量减少45%;当降水不变,气温升高1.5℃,径流量仅减少0.4%,降低1.5℃,径流量仅增加7%。以上分析表明:湟水流域降水变化是径流变化的关键因素,径流量对其敏感程度要远远大于气温。

研究表明,湟水流域径流量与气温和降水变化有着密切的关系。近50年增温趋势显著,降水变化幅度比较缓慢,如果气温持续升高,径流量将呈现持续减少的趋势,水资源将面临短缺的情



况。湟水河是黄河上游最大的一级支流,是湟水流域生活用水、工农业用水的主要来源。未来湟水流域通过水资源规划,合理配置水资源,对于社会经济的发展有着重要意义。

## 6 结论

(1) 本文利用青海省境内湟水流域水文、气象等观测资料,在分析HIMS模型原理及结构的基础之上,将湟水流域划分为39个子流域,进行日、月径流模拟研究,并选取了6个水文观测站点进行参数率定和验证。结果表明,除石崖庄站外,其余5个站点日模拟结果效率系数和相关系数均达到了0.5以上,月模拟结果效率系数和相关系数均达到了0.9以上,表明该模型在湟水流域具有良好的适用性,能够进行气候变化下的情景模拟研究,满足水资源管理之需求。

(2) 通过对湟水流域1961-2010年近50年的气候变化趋势分析表明,湟水流域最大年降水量与近50年平均降水量相比,约增加40%,最小年降水量约减少30%;最大年和最小年气温与近50年平均气温相比,分别升高1.5℃和降低1.5℃。

(3) 根据近50年气候变化趋势,设置了9种气候变化情景模式。结果表明,气候变化对湟水流域径流量变化影响显著,随着降水量的减少和温度的升高,径流量呈显著的减少趋势,反之,增加趋势明显;降水变化是湟水流域径流变化的关键因素,对径流量的影响要远远大于气温。

(4) 由于气候系统的复杂性,未来温室气体排放数量的不确定性及自然界变化的多样性,导致未来气候的变化具有不确定性,模拟结果仅适用于文中可能出现的气候情景,并不能十分准确的预测湟水流域的未来径流量的变化。因此,今后还需进行大量的模拟实验研究,才能得到更加准确的结论。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所刘昌明院士和王中根研究员提供了HIMS模型,并在本文完成过程中给予热忱的指导和提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚的谢意!

## 参考文献(References)

Arnell N W. 1992. Hydrology and climate change//Calow P,

- Petts G E. The Rivers Handbook. Oxford, UK: Blackwell: 173-186.
- Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. 2008. Climate change and water. Technical paper of the intergovernmental panel on climate change. IPCC Secretariat, Geneva.
- Beven K, Kirkby M J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Science, 24(1): 43-69.
- Deng H P, Li X B. 2002. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMODEL. Progress in Geography, 21(2): 103-110. [邓慧平, 李秀彬. 2002. 地形指数的物理意义分析. 地理科学进展, 21(2): 103-110.]
- Feng X X, Zhang G X, Yin X R. 2010. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur river basin Based on the SWAT Model. Process in Geography, 29(7): 827-832. [冯夏新, 章光新, 尹雄锐. 2010. 基于SWAT模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应, 地理科学进展, 29(7): 827-832.]
- Garbrecht J, Campell J. 1997. An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Subcatchment Parameterization: TOPAZ User Manual. Oklahoma: USDA-ARS, Grazinglands Research Laboratory.
- Liu C M, Xia J, Guo S L, et al. 2004. Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow river basin. Advances in Water Science, 15(4): 495-500. [刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 2004. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展. 水科学进展, 15(4): 495-500.]
- Liu C M, Zheng H X, Wang Z G, et al. 2006. Distributed simulation of catchment water cycle. Zhengzhou, China: Yellow River Conservancy Press. [刘昌明, 郑红星, 王中根等. 2006. 流域水循环分布式模拟. 郑州: 黄河水利出版社.]
- Liu C M, Wang Z G, Zheng H X, et al. 2008. The development and application of HIMS system and model. Science in China Ser. E: Technological Sciences, 38(3): 350-360. [刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. 2008. HIMS系统及其定制模型的开发与应用. 中国科学: E辑, 38(3): 350-360.]
- Liu C M, Wang Z G, Yang S T, et al. 2010a. Research progress of water cycle integrated simulation system(HIMS). Water Resources Development Research, 8(3): 5-15. [刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 2010a. 水循环多元综合模拟系统(HIMS)的研究进展. 水利发展研究, 8(3): 5-15.]

- Liu C M, Zheng H X, Wang Z G, et al. 2010b. Multi-Scale integrated simulation of hydrological processes using HIMS with verified case studies. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 46(3): 268-273. [刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 2010b. 基于HIMS的水文过程多尺度综合模拟. 北京师范大学学报: 自然科学版, 46(3): 268-273.]
- Li W B, Dong D H. 2007. Discussion on the comprehensive treatment of Huangshui basin ecosystem in Qinghai province. *Qinghai Science and Technology*, 14(1): 11-13. [李威邦, 董得红. 2007. 青海省湟水河流域生态系统综合治理刍议. 青海科技, 14(1): 11-13.]
- Li W S. 2007. Study on the ecological basic discharge in the section of Xining to Minhe of the main stream of Huangshui River. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 18(3): 75-79. [李万寿. 2007. 湟水干流西宁—民和段河道生态基流量研究. 水资源与水工程学报, 18(3): 75-79.]
- Mo S G, Zhang B P, Cheng W M, et al. 2004. Major environmental effects of the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 23(2): 88-96. [莫申国, 张百平, 程维明, 等. 2004. 青藏高原的主要环境效应. 地理科学进展, 23(2): 88-96.]
- Wang Z G, Liu C M, Zuo Q T, et al. 2002. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM. *Process in Geography*, 21(9): 430-439. [王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 2002. 基于DEM的分布式水文模型构建方法. 地理科学进展, 21(9): 430-439.]
- Wang Z G, Liu C M, Wu X F. 2003. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 168-173. [王中根, 刘昌明, 吴险峰. 2003. 基于DEM的分布式水文模型研究综述. 自然资源学报, 18(2): 168-173.]
- Wang Z G, Zheng H X, Liu C M, et al. 2004a. GIS/RS based distributed hydrological modeling 1, model theories and structures. *Advances in Water Science*, 15(4): 501-505. [王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 2004a. 基于GIS/RS的流域水文过程分布式模拟: I模型的原理与结构. 水科学进展, 15(4): 501-505.]
- Wang Z G, Zheng H X, Liu C M, et al. 2004b. Distributed model in Huanghe typical basin and application. *Science in China Ser. E: Technological Sciences*, 34(S1): 49-59. [王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 2004b. 黄河典型流域分布式水文模型及应用研究. 中国科学: E辑, 34(增刊1): 49-59.]
- Wu X F, Wang Z G, Liu C M, et al. 2002. Digital rainfall-runoff model based on DEM: The application to Xiaolangdi-Huayuankou section of the Yellow river basin. *Acta Geographica Sinica*, 57(6): 671-678. [吴险峰, 王中根, 刘昌明, 等. 2010. 基于DEM的数字降水径流模型: 在黄河小花间的应用. 地理学报, 57(6): 671-678.]
- Xu Z X, Cheng L. 2010. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 41(9): 1009-1017. [徐宗学, 程磊. 2010. 分布式水文模型研究与应用进展. 水利学报, 41(9): 1009-1017.]
- Zhang J Y, Wang G Q. 2007. Studies for climate change impacting on hydrology and water resources. Beijing: Science Press. [张建业, 王国庆. 2007. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学技术出版社.]
- Zhang L P, Chen X F, Zhao Z P, et al. 2008. Progress in study of climate change impacts on hydrology and water resources. *Process in Geography*, 27(3): 60-67. [张利平, 陈小凤, 赵志鹏, 等. 2008. 气候变化对水文水资源影响的研究进展. 地理科学进展, 27(3): 60-67.]
- Zhao D S, Li S C, Wu S H. 2006. Progress on climate-vegetation modeling in the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 25(4): 68-78. [赵东升, 李双成, 吴绍洪. 2006. 青藏高原的气候植被模型研究进展. 地理科学进展, 25(4): 68-78.]



## Runoff simulation of climate change scenarios based on HIMS model in the Huangshui river basin

ZHANG Yanjiao<sup>1</sup>, GAO Xiaohong<sup>1</sup>, LI Qijiang<sup>2</sup>, CHEN Qiang<sup>2</sup>, YANG Junjun<sup>1</sup>

(1. Qinghai Normal University/Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Environment and Resources,

Ministry of Education, Xining 810008, China;

2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China)

**Abstract:** It is important for rational water use and water management to study the change of runoff processes in response to climate change. Based on HIMS(Hydro-Informatic Modeling System) model, using daily precipitation data from 33 rainfall stations from 1986 to 2000, and daily maximum and minimum temperature measured at 8 meteorological stations, this paper presents a simulation of runoff processes in the Huangshui river basin in Qinghai province. Parameter sensitivity analysis and validation of the simulation are conducted using the recorded runoff data from six hydrological stations during the same time period. Results indicate that efficiency coefficient and correlation coefficient of the simulated daily data at five stations exceed 0.5, except Shiyazhuang station; the efficiency coefficient and correlation coefficient of the simulated monthly data at five stations exceed 0.9. Daily and monthly sensitivity analysis and validation generates good outcome as well, demonstrating that the HIMS model applies to the runoff processes in the Huangshui River basin very well, and can be used to simulate the scenarios of areal responses to climate change, which meets the requirements of water resources management. Based on this, the changes of precipitation and temperature in recent 50 years(from 1961 to 2010) in the Huangshui River basin are analyzed, and the hydrological responses(runoff) to 9 types of possible climate change scenarios are simulated and analyzed. The results suggest that climate change has significantly effects on the runoff of the Huangshui River basin. If temperature rises and precipitation decreases, then runoff shows a strong tendency to decrease; on the contrary, if changes of temperature and precipitation reverse, runoff shows a tendency to increase. In addition, in the Huangshui river basin, precipitation is the key climatic factor, and the effect of precipitation change on runoff processes is significantly greater than that of temperature change.

**Key words:** HIMS model; runoff simulation; climate change scenario; Huangshui river basin; Qinghai province