

# Water Resources Responses to Climate Changes in Xi'an Heihe River Basin Based on SWAT Model\*

Yanman Li, Aidi Huo, Ruichong Liu, Shasha Chen, Xiaofeng Wang, Jidong Li

School of Environmental Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an, China  
Email: 1296552488@qq.com

Received: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2013; revised: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Oct. 25<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** Future Climate changes and its influences on water resources in Xi'an Heihe River concern the drinking water problems of 8 million people in Xi'an City. Therefore, it is very important to analyze the characteristics of water resource in response to climate changes for providing scientific foundation to ground water diversion, dealing adverse effect of climate changes and protecting the water sources areas in Xi'an Heihe River. Years 2005-2011 were set as the base period, and monthly runoffs were simulated using SWAT in the base period in Xi'an Heihe Basin. Based on the accurate runoff simulation of the base period, each possible water resource situation under climate changes scenarios according to the most possible climate change predictions was simulated in Xi'an Heihe Basin. The result shows that in the future, Xi'an Heihe River Basin water resources quantity in the next 40 years showed a trend of increase after the first reduce, the average annual runoff growth is respectively: -11.0%, -6.4%, 7.2%, 190% than benchmark; Especially average flood season runoff reach maximum in the 50s, and the flood control situation is serious in the middle and lower reaches of Heihe region.

**Keywords:** Heihe River Basin; SWAT Model; Runoff Simulation; Response to Climate Change

## 基于 SWAT 模型的城市水源地对 未来气候变化的水文响应\*

李彦漫, 霍艾迪, 刘睿翀, 陈莎莎, 王晓峰, 李继东

长安大学环境科学与工程学院, 西安  
Email: 1296552488@qq.com

收稿日期: 2013 年 9 月 2 日; 修回日期: 2013 年 10 月 22 日; 录用日期: 2013 年 10 月 25 日

**摘要:** 西安黑河流域的气候变化趋势和对水资源的影响, 将直接关系到西安市约 800 万人的饮水问题。因此分析研究西安黑河流域水资源对气候变化的响应特点, 可为地面调水、应对气候变化的不利影响和更好地保护城市水源地的水资源提供科学依据。本研究以分布式水循环模型为基础, 利用西安黑河流域 2005~2011 年过去 7 年的水文站实测数据, 对 2020s~2050s 未来 40 年西安黑河金盆水库入口陈河水文站汛期、非汛期的年径流过程进行了模拟和预测。研究结果表明: 西安黑河流域未来水资源量在未来 40 年内呈现先减少后增加的趋势, 其平均径流量将比基准年均有所增减, 变幅分别为: -11.0%、-6.4%、7.2%、190%; 尤其是在 50s 汛期平均径流量达到最大值, 西安黑河中下游地区防洪形势严峻。

**关键词:** 黑河流域; SWAT 模型; 径流模拟; 水文响应

\*基金项目: 长安大学 2012 年国家级大学生创新创业训练计划(201210710110); 大西安城市建设引起的水循环变化规律研究项目(12120113004800)。  
作者简介: 李彦漫(1990-), 男, 河北人, 长安大学环境科学与工程学院, 主要研究方向: 水文学及水资源。

## 1. 引言

气候变化将对水资源产生重要影响, 评估其潜在影响可为区域可持续发展提供重要的依据。目前, 水源地对未来气候变化的水文响应在国际上越来越受到重视, 尤其是城市水源地对气候变化的响应<sup>[1]</sup>, 因为城市水源地的水质与水量直接关系到数百万市民的健康。由于气候变化会通过多种途径影响城市水源地的水文状况, 但这种综合的影响可以利用分布式水文模型在复杂系统层面上进行很好地评估<sup>[2]</sup>。分布式水文模型如 SWAT(Soil and Water Assessment Tools)<sup>[1,3]</sup>是解决此类复杂问题的有力工具, 因为模型参数与实地观测的地表物理过程有密切联系<sup>[2]</sup>。这也是结合水文模型和气候情景的评估方法被广泛应用的原因。SWAT 模型在国内的研究已取得了很大成果<sup>[4]</sup>。但从 SWAT 模型的国内应用情况来看, 应用研究主要集中在对径流的模拟方面<sup>[5,6]</sup>, 与国外的应用情况类似, 也主要集中在中部湿润区, 在山区城市水源地的应用较少。

近年来, 关于城市供水水源地的研究主要集中在生态监测、气候资源的变化和非点源污染等方面, 认为造成水源地水土流失、草场退化、土地沙化等生态环境问题的原因是人类活动和气候变化的双重作用, 其中气候变化是不可忽视的重要原因<sup>[7,8]</sup>。在气候变化研究方面, 侧重于气候、降水、主要气候因子的时空分布特征、趋势变化等方面, 主要集中在黄土高原地区。陕西省黑河为渭河一级支流, 发源于秦岭太白山主峰, 由西南流向东北。在周至县尚村乡注入渭河。陕西黑河流域又是西安市主要的饮用水的水源地, 其水源区处于秦岭北麓深山区, 区内地形环境复杂。流域内存在多种土壤类型和不同土地利用、植被覆盖方式、流域的不同区域小气候都存在差异。黑河金盆水库建成供水, 大大缓解了西安市由于地下水严重超采导致的地面下沉、地裂缝等环境地质问题, 其水质与水量直接关系到西安市约 800 万市民的健康与西安地区社会经济的可持续发展。

本文将基于分布式水文模型为基础, 根据陕西省黑河流域各个水循环要素特征, 利用数值模拟等手段对 2005~2011 年过去 7 年和 2020s~2050s 未来 40 年黑河金盆水库入口陈河水文站汛期、非汛期和年径流过程进行模拟和趋势检验, 探索气候变化对于水源地水文

循环的影响, 以期对未来气候变化影响下陕西省黑河流域水资源保护、以及我国其它城市水源地水资源规划和管理等工作的实施提供科学指导和支撑。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 研究区域介绍

陕西黑河为渭河右岸的较大支流, 位于东经 E107°43'~E108°24', 北纬 N33°42'~N34°13', 属黄河二级支流, 发源于秦岭太白山南麓, 由西南流向东北, 至周至县马召镇附近的武家庄出峪后由东北的石马村入渭河。总流域面积 2258 km<sup>2</sup>。1999 年在黑河(N34°03'~E108°13')处拦河建成黑河金盆水库水利枢纽, 主要任务为向西安市城市供水及 2.47 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 灌区供水。黑河全河长 125.8 公里, 源头在太白山东南坡二爷海(海拔 3650 m), 南偏东流经厚畛子, 过骆驼脖子直至峪口, 长 91 km, 纳大小支流 34 条, 集水面积约 1500 km<sup>2</sup>。各河流峪口以上流域多年平均降雨量约 810 mm。降雨量在时间分布上差异也较大, 夏季常出现暴雨, 7~10 月降雨量约占全年的 60%以上。该区山高坡陡, 水土易于流失, 人类活动对生态环境的破坏明显。

### 2.2. 数据

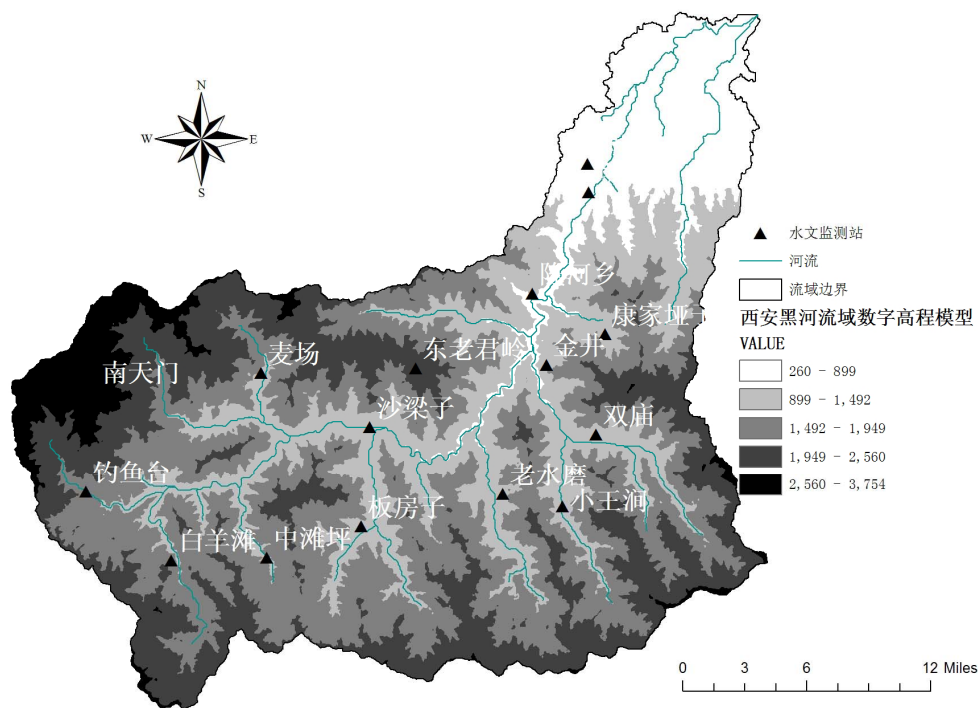
基础资料包括: DEM、河网水系、植被、土壤、气象站点、水文站等 GIS 数据(如表 1 所示); 2005~2011 年坝下、小王涧、双庙、康家埡子、陈河乡、东老君岭、老水磨、沙梁子、板房子、中滩坪、麦场、白羊滩、南天门、钓鱼台、金井等 15 个站点的日降水、最高最低气温、风速、相对湿度等气象资料, 以及 2005~2011 年陈河乡站月径流过程数据。此外, 为了分析气候变化对径流的影响, 还收集了 CSIRO 和 NCAR 两个气候模式 A1B 情景的日气象资料, A1B 情景为温室气体中等排放情景(表 1)。

#### 2.2.1. DEM 数据

DEM(digital elevation model)数据即数字高程模型数据, 它来源于国际科学数据服务平台, 空间分辨率为 30 m。利用 GIS 的空间分析功能提取水流方向、河流网络、划分子流域以及水文模拟单元<sup>[9]</sup>, 计算地形因子, 获取 SWAT 模型所需要的 DEM 如图 1 所示、水系、汇流区域等信息<sup>[10]</sup>。

**Table 1. The database for runoff variation analysis of Heihe Region in Xi'an**  
**表 1. 西安黑河流域径流演变分析的支撑数据**

数据类型	数据属性	尺度	数据来源
DEM	高程, 坡度, 坡长	网格: 30 m	国际科学数据服务平台
土地利用	土地利用分类	1:100 万	西部数据共享中心
土壤类型	土壤分类及其理化数据	1:100 万	西部数据共享中心
气象站	日降水, 最高、最低气温, 辐射强度, 湿度, 风速	15 个(2005~2011 年)	陕西省周至县 15 个气象观测站
水文站	径流(日)	1 个(2005~2011 年)	陕西省周至县陈河水文站
气候模式数据	日降水、最高最低气温等	网格(0.5 × 0.5)	IPCC 气候数据中心



**Figure 1. Digital elevation map in Heihe River Basin**  
**图 1. 黑河流域数字高程图**

**2.2.2. 土地利用/植被覆盖数据**

土地利用和植被类型对流域水文环境、水文过程等都会产生重要影响。本研究所需土地利用数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心,采用的是 1:100 万土地利用矢量数据。根据研究需要,对获取的土地利用类型图裁剪流域边界,并以土地类型代码字段为值(Value)转化为栅格 GRID 格式。根据 SWAT 模型中土地利用/覆盖分类标准的对应转化关系进行重分类,获得符合 SWAT 模型分类标准的 9 种类型:耕地、旱地、有林地、疏林地、城镇用地、居民用地、滩地、灌木地、沙地<sup>[11]</sup>。

**2.2.3. 土壤类型数据**

土壤数据来源于西部数据共享中心,比例尺为 1:1,000,000,在西安黑河流域有 4 种土壤类型,考虑到该流域土壤属性特征以及 SWAT 模型中土壤物理特性的美制标准,在充分采纳前人的经验和知识的前提下<sup>[12,13]</sup>,将一些物理特征近似或者面积较小的类型归为同一类型,在原分类的基础上进行了重分类,重分类后的土壤类型有 4 种,分别是:山土草甸、暗棕壤、棕壤、褐土。

**2.2.4. 气象观测数据**

流域内共有 15 个气象观测站。SWAT 模型需要输

入 2005~2011 年逐日降水, 逐日气温(平均、最高、最低), 风速, 相对湿度等气象要素, 以上资料经手工录入到 Excel 后, 均按模型要求以 DBF 格式文件存贮, 用于驱动 SWAT 水文模型进行径流模拟。

### 2.2.5. 流量数据

流量数据来源于西安市周至县水务局, 包括陈河水文站 2005~2011 年逐月平均径流量, 水文站的分布图。其中 2005~2008 年逐月径流数据用于率定 SWAT 模型的参数, 2009~2011 年逐月径流数据用于检验 SWAT 模型的模拟精度。

### 2.2.6. 未来气候数据的处理

在选择了在未来大气温室气体中等排放情景 A1B 模式下, 根据 IPCC 气候数据中心提供的数据, 模拟黑河流域未来的降水数据, 最高气温、最低气温和日照时间数据。

全球气候模式(GCM)对于预估未来全球气候变化来说, 是目前最重要也是最可行的方法。GCM 能相当好地模拟出大尺度最重要的平均特征, 特别是能较好地模拟高层大气场、近地面温度和大气环流。但是由于目前 GCM 输出的空间分辨率较低, 缺少详细的区域气候信息, 很难对区域气候情景做合理的预测。降尺度法是基于这样一种观点: 那就是区域气候变化受大尺度(如大陆尺度, 甚至行星尺度)气候所控制, 同时也受到区域尺度的因子的调制, 因此应采用降尺度方法, 把大尺度、低分辨率的 GCM 输出信息转化为区域尺度的地面气候变化信息(如气温、降水), 从而弥补 GCM 对区域气候预测的局限。统计降尺度法利用多年的观测资料建立大尺度气候要素(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 GCM 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)<sup>[5]</sup>。本文采用 PCA(Principal Component Analysis, PCA)与逐步线性回归相结合的统计降尺度方法, 并利用历史观测资料, 建立大尺度气候预报因子与地面月平均温度的统计联系。即通过利用 2005~2011 年的历史观测资料, 并采用 PCA 与逐步回归相结合的统计降尺度方法建立了西安黑河流域内 15 个气象观测站站点的统计降尺度模型, 确立模型参数, 并将模型应用与中等排放情景 A1B

模式下, 得到了未来气象观测站逐日最高、最低温度和降水序列。

## 2.3. 分布式水文模型

### 2.3.1. 模型的选择

西安黑河流域属于干旱、半干旱气候, 是一个面积较大的流域, 流域内存在多种土壤类型和不同土地利用、植被覆被方式。

SWAT 模型是 20 世纪 90 年代初由 Jeff Arnold 等开发的具有较强物理机制的大、中尺度流域管理模型<sup>[4]</sup>。模型可以预测复杂流域内不同的气候条件、土地覆被变化等对水量、水质以及作物产量等的长期影响。该模型在结构上考虑融雪和冻土对水文循环的影响, 已在加拿大和北美寒区广泛应用。自 SWAT 模型被引入中国以来, 已经在西北寒旱地区径流模拟、气候变化和土地利用变化影响评估等方面得到了应用<sup>[14]</sup>。这表明 SWAT 模型能够较好刻画寒旱地区降雨径流关系, 将其应用于分析西安黑河流域水平衡机理是可行的。

### 2.3.2. 模型的建立

概括起来, SWAT 模型数据库可以分为空间数据库(又称图数据库)和属性数据库两大类, 空间数据库主要包括流域 DEM 图、土地利用分类图和数字化土壤图。属性数据库主要包括 3 个存储有关土地利用、土壤属性以及气象站参数等的数据库, 本文依据研究区具体情况对这 3 个数据库进行编辑和修改。我们根据研究区 DEM、土壤和土地利用的分布, 我们将西安黑河流域划分为 42 个子流域和 107 个水文响应单元如图 2 所示。子流域面积从 541 km<sup>2</sup> 到 12,583 km<sup>2</sup> 不等。

在建模过程中, 各站点日降水数据通过距离倒数法插值到每个子流域内, 作为该子流域的面降水输入; 而气温等其它气象数据则采用 SWAT 模型自带的方法进行插值。在模型控制文件(basins.cod)的配置中, 产流模块采用 SCS 方程, 潜在蒸散发的计算中, 由于 Priestley-Taylor 公式已成功运用在黑河、黄河源区等高寒地区, 因此本次研究也选该方法。

### 2.3.3. 模型的率定及检验

模型的率定和检验分为两个阶段: 参数率定期为

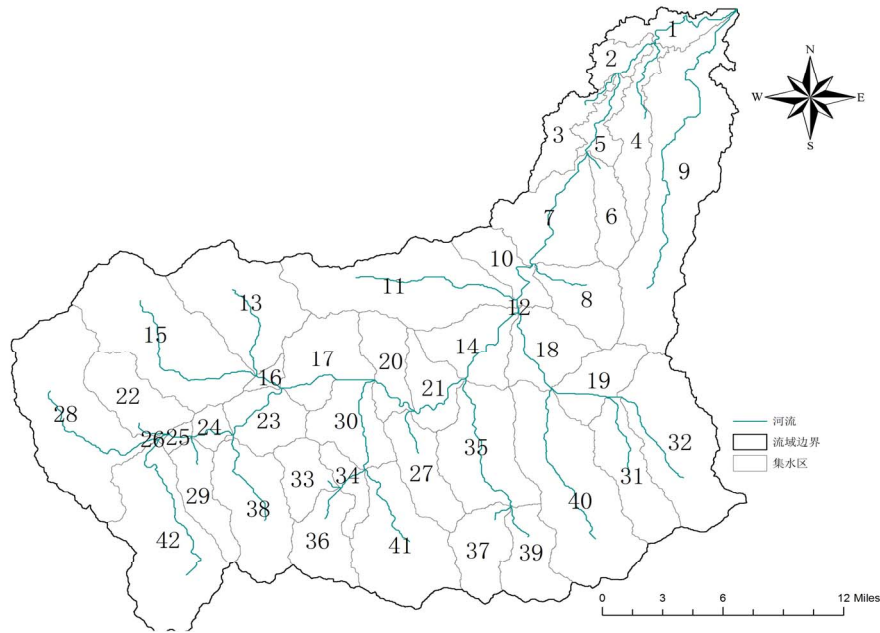


Figure 2. The distribution of digital water system and sub basins in Heihe Region  
图 2. 西安黑河流域数字化河网及子流域划分图

2005~2008 年, 其中 2005 年为模型的预热期; 参数验证期为 2009~2011 年, 其中 2009 年为预热期。水量平衡系数( $r_{Vol}$ ), 相关系数( $r$ )和效率系数( $Ens$ )<sup>[6]</sup>3 个指标用于评价模型模拟结果。如果水量平衡系数( $r_{Vol}$ )大于 0.20 或小于 0.20 而且相关系数和效率系数均小或者等于 0.0, 那么模型的模拟结果是“不可接受的”; 如果水量平衡系数( $r_{Vol}$ )为 0.0, 而且相关系数和效率系数均为 1.0, 那么模型的模拟结果被认为是“优秀”; 如果水量平衡系数( $r_{Vol}$ )被控制在 $\pm 0.20$  以内, 而且相关系数不小于 0.80, 效率系数不小于 0.60, 那么模型的模拟结果被认为是“可以接受的”。

水量平衡系数( $r_{Vol}$ )、相关系数( $r$ )和模型效率系数(NSEC)的计算公式分别为:

$$r_{Vol} = \frac{\sum(Q_o - Q_p)}{\sum Q_o} \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum(Q_o - Q_{avg}) \cdot (Q_p - Q_{pavg})}{\sqrt{\sum(Q_o - Q_{avg})^2 \cdot \sum(Q_p - Q_{pavg})^2}} \quad (2)$$

$$Ens = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_p)^2}{\sum(Q_o - Q_{avg})^2} \quad (3)$$

式中,  $Q_o$  为实测径流,  $Q_p$  为模拟径流,  $Q_{avg}$  为平均实测径流,  $Q_{pavg}$  为模拟径流的平均值。

### 3. 基准期的径流模拟

输入研究区水文气象资料、土地利用、土壤类型资料、DEM 以驱动 SWAT 运行, 在率定模型最佳参数的基础上, 模拟了基准期(2005~2008 年)西安黑河流域的逐月径流。

#### 3.1. 参数敏感性分析及率定

选取 27 个模型输入参数进行参数敏感性分析试验, 设置参数采样间隔为 10, 每次参数变化值为 0.05, 利用 SWAT-CUP 敏感性分析工具进行了 270 次比较判断, 确定对敏感性等级最高的 6 个参数: 土壤层有效含水量(SOL\_AWC), 浅层地下水再蒸发系数, (GW\_REVAP)基流  $\alpha$  因子(ALPHA\_BF), 浅层地下水回流的阈值(GWQMN), (GW\_DELAY)地下水滞后时间等(如表 2 所示)进行模型的率定。利用 2005~2008 年陈河水文站逐月流量序列对月径流模拟进行率定, 首先调整 CN2、SOL\_AWC、ESCO 来拟合地表径流, 再调整 GW\_REVAP、REVAPMN、GWQMN 来调整基流。参数率定结果如表 2 所示。

#### 3.2. 径流模拟的验证

利用陈河站 2009~2011 年逐月流量数据进行模型验证, 并采用 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数  $Ens$ 、水量

Table 2. Main parameters of model calibration  
表 2. 模型率定的主要参数

编号 Number	参数名称 Parameter_Name	解释 interpretation	最佳值 Fitted_Value	最小值 Min_value	最大值 Max_value
1	CH_N2.rte	主河道曼宁粗糙系数	-0.109	-0.145	-0.058
2	SOL_BD(1).sol	土壤容重	-0.968	-1.050	-0.666
3	GWQMN.gw	基流产生的阈值	1.970	1.676	2.049
4	CN2.mgt	半湿润径流曲线系数	-0.127	-0.153	-0.043
5	GW_REVP.gw	地下水蒸发系数	0.005	0.004	0.043
6	ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.893	0.857	0.895
7	SOL_AWC(1).sol	土壤前期含水量	-0.492	-0.622	-0.445
8	SOL_K(1).sol	土壤的传导率	3.353	2.580	3.842
9	GW_DELAY.gw	地下水补给延迟时间	63.049	61.286	202.318

平衡系数( $r_{vol}$ )和相关系数  $r$  对模型的验证结果进行评价。验证期径流模拟效率及拟合情况见表 3 和图 3 所示。其值表明 SWAT 模型适合用于模拟西安黑河流域径流的变化。

### 3.3. 基准期模拟径流的年变化

基准期(2005/1/1~2011/12/31)径流模拟结果由图 3 可以看出, 7 年地表径流量与降水量、基流量的最大值出现的年份一致, 均在黑河流域的丰水年 2011 年。7 年地表径流量与降水量的最小值出现的年份一致, 均在黑河流域的枯水年 2008 年; 而基流量最小值出现在 2008 年。

## 4. 径流对未来气候变化的响应分析

将气候模式各种情景网格降水和气温数据插值到每个子流域上, 驱动 SWAT 模型, 模拟典型断面过去和未来的径流过程, 对比分析气候变化的影响。选取的时间段为基准年 2000 年~2010 年和未来情景 2020s~2050s 4 个阶段<sup>[1]</sup>。

### 4.1. 基准年

从基准年(2000s)陈河水文站出口断面的径流过程来看: 陈河水文站年平均径流量为 17.59 m<sup>3</sup>/s、汛期为 36.04 m<sup>3</sup>/s、非汛期为 8.33 m<sup>3</sup>/s。

### 4.2. A1B 情景

在 A1B 情景下, 以 2010s 的径流量为基准年, 模

拟得到黑河流域出口陈河水文站未来 2020s~2050s 年的平均径流量比基准年均有所增减。由表 4 可以看出, 增幅分别为: -11.0%、-6.4%、7.2%、190%; 从汛期和非汛期径流变化来看, 2020s~2030s 非汛期均减少, 而汛期增加; 2040s 汛期和非汛期径均增加; 2050s 汛期增加, 非汛期减少, 且汛期增幅 2050s 达到最大值(152%)。其原因可能在于 40s~50s 期间, 由于气候变化的原因, 导致全球气温升高, 极端天气气候事件频发, 降雨量增加所致。总之, 从模拟结果来看, 气候变化的背景下, 未来五十年黑河源区径流量与 2010s 相比, 前 20 年处于减少趋势, 后 20 年处于增加趋势。前 20 年将加剧其下游水资源短缺的现象, 甚至会影响西安市的供水。

## 5. 结论和讨论

黑河水源地是西安市一个重要的饮用水源地, 对西安市的人民生活和经济发展起着举足轻重的作用, 同时也是全球气候变化敏感区。本文以分布式水循环模型为基础, 对西安黑河水源地区域水平衡机理进行了分析, 利用 2005~2011 年过去 7 年数据为基准, 模拟了 2010~2050 年未来近 5 年不同气候模式不同情景下流域出口径流变化趋势, 初步探讨了气候变化的影响。研究结果表明:

1) SWAT 模型对西安黑河水源地出口陈河水文站 2005/1/1~2011/12/31 月径流过程模拟精度均是可以接受的。SWAT 模型能够较好地刻画西安黑河水源地“降雨-径流”关系, 将其应用于分析西安黑河水源地水平

Table 3. The simulated runoff results of the Chenhe stations  
表 3. 水文站点径流模拟结果

站名	时间	水量平衡系数	相关系数	效率系数
陈河水文站率定期	20050101~20081231	0.020	0.89	0.86
陈河水文站检验期	20090101~20120430	0.019	0.9	0.82

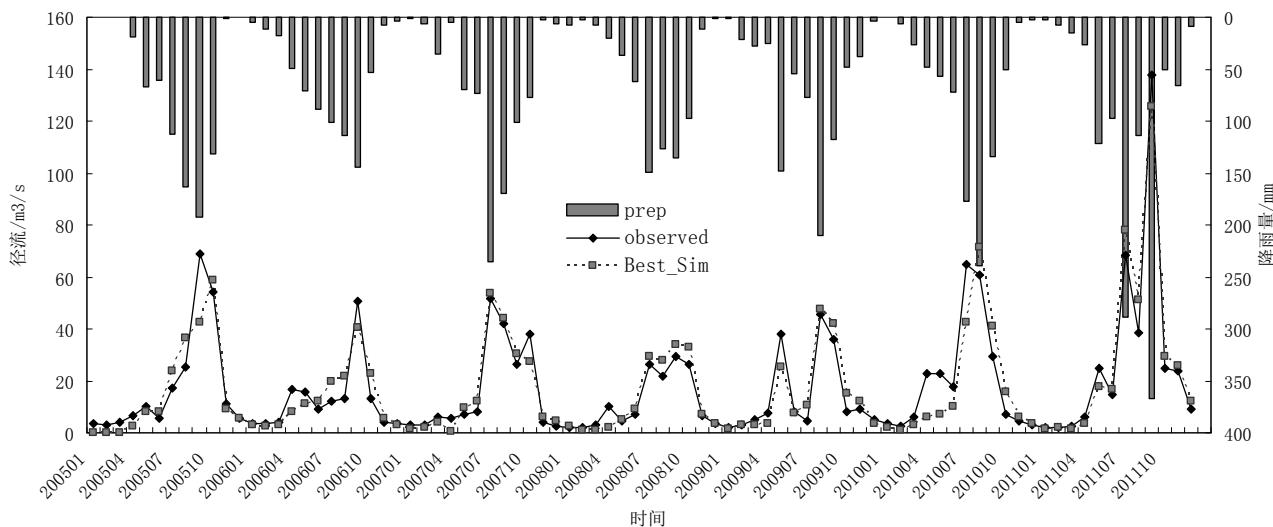


Figure 3. Runoff simulation fit figure validation period  
图 3. 验证期径流模拟拟合图

衡机理分析及气候变化是可行的。

2) 在过去 7 年中, 西安黑河水源出口陈河水文站年径流和非汛期径流过程呈显著减少趋势。

3) 气候变化背景下, 未来 40 年西安黑河水源出口径流量与现状相比有所增减, 尤其是在非汛期, 前 20 年处于减少趋势, 这将持续加剧西安黑河中下游流域水资源短缺的现象; 后 20 年处于增加趋势, 其原因可能在于 2040s~2050s 期间, 由于气候变化的原因, 导致全球气温升高, 极端天气气候事件频发, 降雨量增加所致。这些气候变化影响了流域的水文状况, 导致年径流变化很大。

4) 在 2020s~2050s 的 40 年间周至县境内的黑河流域年均最高气温和最低气温分别增加了 0.6 度和 1.7 度, 这些气候变化对黑河流域的水文影响比较大, 使 50s 径流增幅成倍增长, 可能会引发极端气候事件的发生。

以上结果和分析表明, 黑河流域未来径流量有增有减, 先减后增, 在一定条件下不利于该区的生态建设和农业生产, 同时也可能带来更加严重的水资源短缺或洪涝灾害现象, 从而产生一定的负面效应, 影响

到西安市水源地的供水安全, 需要采取适应性措施。

当然, 本项研究在很多方面还存在很多不确定性, 如气候模式各情景预估气象要素的不确定性、分布式水文模型参数的不确定性、以及实测气象数据和径流数据的匮乏等等, 这些都可能对结论产生一定的影响, 今后还需要进一步加强这一方向的研究, 特别是对土壤数据、气象数据进行长期观测, 使用精度较高的实测数据进行模拟, 以提高模拟和预测的精度。

## 6. 致谢

感谢长安大学环境科学与工程学院陈洵洪教授在数值模拟方法上的指导及周维博、王菊翠等老师们在研究方案与验证数据方面的协助。对周至县水务局的大力支持在此一并致谢!

## 参考文献 (References)

- [1] BATES, B., et al. Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- [2] ZHANG, X.-C., LIU, W.-Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. Ag-

- gricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3): 127-142.
- [3] ARNOLD, J.G., et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development I. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [4] 赵寒冰. 流域地理过程分布式物理模型体系的集成与应用研究[D]. 南京师范大学, 2004.  
ZHAO Hanbing. Basin geography process integration and application research of distributed system of physical model. Nanjing Normal University, 2004. (in Chinese)
- [5] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.  
FAN Lijun, FU Congbin and CHEN Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 320-329. (in Chinese)
- [6] NASH, J., SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [7] 吴景霞. 西安黑河流域水文要素变化特征分析[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(11): 874-875.  
WU Jingxia. Analysis of characteristics of Xi'an Heihe watershed hydrology factors change. Water Science Technology and Economy, 2008, 14(11): 874-875. (in Chinese)
- [8] 莫淑红, 沈冰, 季瑞瑞, 汪志荣. 西安市区地表供水水源径流变化规律分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 183-188.  
MO Shuhong, SHEN Bing, JI Ruirui and WANG Zhirong. Analysis on the periodicity and variance trend of runoff volumes of surface water supply for the urban area of Xi'an City. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 183-188. (in Chinese)
- [9] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173.  
WANG Zhonggen, LIU Changming and WU Xianfeng. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 168-173. (in Chinese)
- [10] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment tutorial. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 邱国玉, 张清涛. 快速城市化过程中深圳的水资源与水环境问题[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 629-633.  
QIU Guoyu, ZHANG Qingtao. Rapid urbanization in the process of water resources and water environment problems of Shenzhen. Journal of Hehai University, 2010, 38(6): 629-633. (in Chinese)
- [12] 丁相毅, 贾仰文, 王浩, 牛存稳. 气候变化对海河流域水资源的影响及其对策[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 604-613.  
DING Xiangyi, JIA Yangwen, WANG Hao and NIU Cunwen. Impacts of climate change on water resources in the Haihe River basin and corresponding countermeasures. Journal of Natural Resources, 2010, 25(4): 604-613. (in Chinese)
- [13] 张利平, 曾思栋, 王任超, 夏军. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 966-974.  
ZHANG Liping, ZENG Sidong, WANG Renchao and XIA Jun. Impacts of climate change on the hydrological cycle in the Luan River Basin. Resources Science, 2011, 33(5): 966-974. (in Chinese)
- [14] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98.  
RUI Xiaofang. Several problems in the study of watershed hydrological model. Water Science Progress, 1997, 8(1): 94-98. (in Chinese)