

# SWAT模型在黑河中上游流域的改进与应用

赖正清<sup>1</sup>, 李硕<sup>1\*</sup>, 李呈罡<sup>1</sup>, 南卓铜<sup>2</sup>, 余文君<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 基于物理机制的分布式水文模型是定量化研究人类活动影响下流域水文过程非常有效的工具。使用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 对黑河中上游流域 2000—2009 年的月平均径流过程进行模拟的结果表明, SWAT 模型很好地模拟了黑河上游自然状态下的径流过程, 但对中游地区冬季径流模拟明显偏低。分析表明, 黑河中游地形和农业生产高强度、反复的地下水抽取灌溉—渗透—地下水补给过程可能是导致模拟偏低的主要原因。基于此机制, 论文提出了增加地下水下渗过程的模型修改方案, 来间接模拟黑河中游的这一特定过程。对比模型修改前后的黑河中游的径流过程模拟结果表明, 验证期的模型效率系数  $ENS$  和决定系数  $R^2$  分别从 0.53、0.61 提高到了 0.70、0.75, 取得了较好的模拟结果。结果还表明, 加强对黑河中游人工灌溉过程的模拟研究对于研究黑河中游水资源管理和水循环过程至关重要。

**关 键 词:** 黑河中上游; SWAT 模型; 径流模拟; 灌溉; 地下水

**中图分类号:** P333.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3037(2013)08-1404-10

**DOI:** 10.11849/zrzyxb.2013.08.013

西北内陆黑河流域是典型的寒区、旱区和生态环境脆弱地区, 流域水资源极其匮乏, 中下游用水主要靠上游祁连山区出山径流补给, 20世纪60年代以来, 随着黑河中游耕地面积的急剧扩大, 农业灌溉用水也随之增加, 致使下游生态用水锐减, 导致了下游地区生态环境恶化<sup>[1]</sup>。黑河流域用水矛盾突出, 一方面是“缺水”问题, 另一方面, 水资源不合理利用则是加剧这一矛盾的主要因素<sup>[2]</sup>。因此, 利用遥感、GIS、生态、水文过程模型等多学科集成的定量化流域管理方法, 是黑河流域水资源管理和合理配置的有效途径<sup>[3-4]</sup>。

基于物理机制的分布式水文模型是定量化研究人类活动影响下流域水文循环非常有效的工具, 目前已有诸多水文模型被应用于黑河流域的径流模拟与预测, 这些研究工作大多集中在上游山区流域, 如 HBV 模型<sup>[5]</sup>、TOPMODEL<sup>[6-7]</sup>、VIC-3L 模型<sup>[8]</sup>、SRM 模型<sup>[9]</sup>、改进的 PRMS 模型<sup>[10]</sup>、WASMOD 模型<sup>[11]</sup>、SWAT 模型<sup>[11-12]</sup>, 以及由我国学者构建的分布式时变增益模型(DTVGM)<sup>[13]</sup> 和 WEP-Heihe<sup>[14-15]</sup> 等。其中 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美国农业部下属的农业研究所开发的具有物理基础的流域尺度分布式水文模型<sup>[16]</sup>。其源码的公开使模型在被使用的同时并得到进一步的改进与完善。目前, SWAT 模型在国内外得到了广泛的认可与应用<sup>[17]</sup>, 但其在黑河流域的应用都集中于上游山区流域, 中游尚没有相应的研究。本文将 SWAT 模型应用到黑河中上游流域, 强化对中游绿洲人工灌溉过

收稿日期: 2012-08-10; 修订日期: 2013-01-04。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91125006, 41271382)。

第一作者简介: 赖正清(1989-), 男, 江西南康人, 博士生, 研究方向为遥感、GIS 及分布式流域模拟。E-mail: lzq0129lzq@163.com

\*通信作者简介: 李硕(1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感、GIS 及分布式流域模拟研究。E-mail: lishuo@njnu.edu.cn

程的模拟,建立适应黑河中上游的 SWAT 模型模拟系统和数据库,分别对黑河上、中游流域的月径流量进行模拟和验证,为黑河流域水资源管理和生态保护提供定量支持。

## 1 研究区和基础数据

### 1.1 黑河中上游流域区位和地理特征

黑河是我国第二大内陆河,流经内蒙古、甘肃、青海3省区,流域南高北低。黑河上游地区位于南部祁连山区,海拔高度在1680~5280 m之间,控制点是莺落峡水文站,河道长303 km,流域面积10 009 km<sup>2</sup>。中游为莺落峡至正义峡的区间,海拔高度在1300~1680 m之间,河道长185 km,流域面积25 600 km<sup>2</sup>(图1)。该地区气候属北温带蒙甘区,为大陆性干旱气候。上游祁连山区年降水量为300~500 mm,有冰川融水补给,植被较好,是黑河径流形成区,出山口以上径流量占全流域天然水量的70%~80%以上;中游河西走廊区降水量为100~250 mm,分布着以农田和人工植被为主的绿洲景观,是黑河流域水资源主要消耗区,中上游的水量输送对下游的生态环境改善具有决定性的影响。

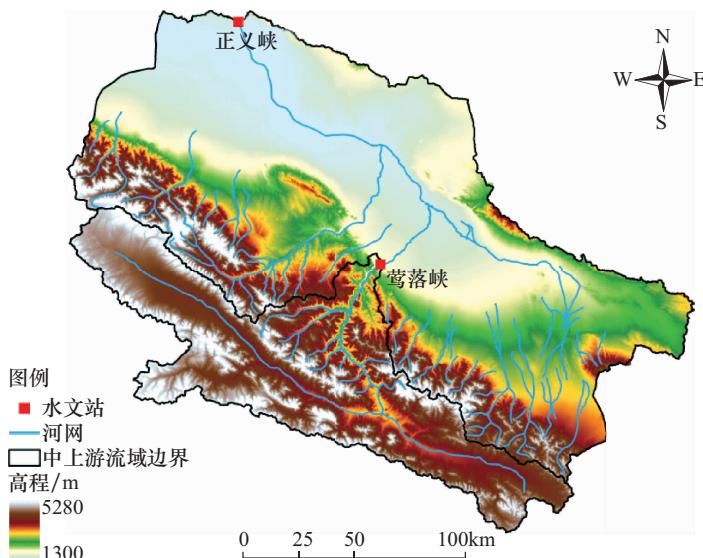


图1 黑河中上游流域DEM、河网与水文站点分布

Fig. 1 A map showing DEM, river network and hydrological stations of the study basin

### 1.2 基础数据

黑河中上游水文模拟需要的基础地理数据包括地形、气象、土地利用、土壤、水文等多种数据类型。其描述和来源如表1所示。

## 2 SWAT模型分布式建模方法

### 2.1 黑河中上游流域的空间离散

为了更好地反映流域地理因子和水文过程的空间差异性,SWAT模型采用流域—子流域—水文响应单元的空间离散方法。黑河中上游流域垂直地带性地貌景观差异明显,流域水文条件复杂。黑河上游流域位于南部祁连山区,是高山冰雪冻土和山区植被带。黑河中游流域地势平坦,为山前绿洲和荒漠带。根据黑河上游、中游不同的地理特征,基于DEM分别在黑河上游流域划分了28个子流域,186个水文响应单元;在中游划分了67个子流域,

表 1 黑河中上游基础地理数据描述

Table 1 Descriptions of basic geographic data for the upper-middle Heihe River Basin

数据类型	数据描述	数据来源
数字高程模型(DEM)	1:10万地形图栅格化,格网25m×25m	甘肃省基础地理信息中心
气象观测数据	研究区内部和周边的9个气象站2000—2009年逐日降水、气温、相对湿度、风速观测数据	中国气象科学数据共享服务网
土地利用图	2009年利用遥感影像更新的黑河流域1:25万土地利用图	中国西部环境与生态科学数据中心
土壤类型图及土壤相关属性数据	1:100万土壤类型图及土壤机械组成、容重、饱和导水率等	中国西部环境与生态科学数据中心,2010年黑河中上游土壤样本采集和野外实测;实验室分析
水文观测数据	莺落峡、正义峡2000—2009年逐日流量观测数据	中国西部环境与生态科学数据中心
流域城镇及农业用水管理	城镇居民、工业、农业生产用水	2000—2009年水利年报及野外实际调查

325个水文响应单元(图2)。莺落峡与正义峡水文站分别为上游、中游流域的出口断面,使用水文站的实测值对模型参数进行率定,对模拟的结果进行精度评价。

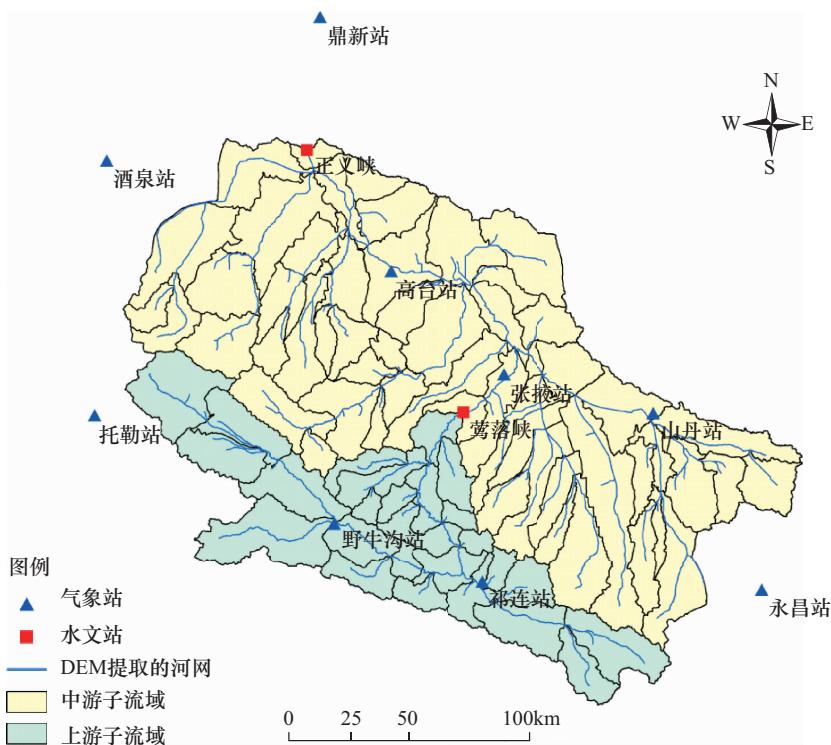


图 2 黑河中上游流域空间离散生成的子流域分布

Fig. 2 Subbasin delineation of the study area

## 2.2 黑河中上游流域的空间参数化

SWAT模型运行所需的输入参数有地形、气象、土地利用、土壤、农业管理措施等多种类型。这些数据是模型运行的重要驱动力参数,也是进行过程机理分析的基础。其中:

(1) 地形参数包括各个子流域面积、平均坡度、平均坡长、子区面积、河道长度等,均由GIS软件根据研究区的DEM提取。

(2) 土地利用数据根据2009年的土地利用现状图进行了大类的归并和SWAT模型自带的土地利用数据库进行了编码转换连接。

(3) 土壤物理和水传导属性采用了野外实测和实验室样本分析的方法,课题组于2010年8月,和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所遥感室科研人员,分成两组,在黑河中上游流域选择不同海拔、典型土地利用类型与土壤类型的地点,进行了39个土壤剖面分层样本的采集和野外实测。获取了土壤饱和导水率、容重、根系深度、紧实度、机械组成等土壤属性数据,建立了黑河中上游流域与土壤类型相对应的属性数据库。

(4) 气象输入数据包括研究区内部和周边的鼎新、酒泉、高台、张掖、山丹、托勒、野牛沟、祁连、永昌9个气象站2000—2009年降水、气温、相对湿度、风速等逐日观测数据,其中,针对单一子流域的气温和降水输入按照回归方法进行了高差梯度的修正。

(5) 黑河中游流域地势平坦、光照充足、土地资源丰富,集中了整个黑河流域约98.5%的耕地。耕地主要分布在民乐、山丹、张掖、高台和临泽。民乐、山丹、张掖种植的作物以春小麦和玉米为主,高台和临泽以玉米为主。农业灌溉是黑河中游水资源消耗的主要因素。通过资料分析和实际调查得知,春小麦一般是在每年的3月8日前后播种,7月12日左右收获,生长期约130 d,生长期灌溉量为 $7\ 500\ m^3/(hm^2 \cdot a)$ 。玉米一般是在4月15日前后播种,9月22日左右收获,生长期约160 d,生长期灌溉量为 $6\ 700\ m^3/(hm^2 \cdot a)$ 。为了保持土壤墒情,每年11月中下旬进行冬季灌溉(俗称冬泡田),灌溉量约 $2\ 500\ m^3/hm^2$ 。城镇和工业用水则通过根据国家统计局发布的2005—2009年张掖市国民经济和社会发展统计公报中工业、生活用水数据,约为 $1.21 \times 10^8\ m^3/a$ 。根据以上数据,按照SWAT模型灌溉模块输入要求,分别设置了农业管理和生活用水的参数。

(6) 水文观测数据采用了上游莺落峡和中游正义峡的逐日流量观测数据,其中黑河上游山区自2000年以后兴建水库,山区流域出口莺落峡的观测数据受水库蓄水等因素影响,不代表自然径流过程,本文采用系统水文模型的方法还原计算出莺落峡的自然径流数据<sup>[18]</sup>,并以此为基础进行上游山区流域的径流模拟验证。

### 2.3 模拟结果的率定和验证

利用建立的SWAT模型运行系统对黑河流域2000—2009年逐日径流过程进行初步的模拟。其中2000—2004年作为模拟的参数率定期,2005—2009年作为模拟的验证期。引用纳什(Nash-Sutcliffe)系数ENS和决定系数 $R^2$ 来反映模型在校正和验证时的模拟效果。

按照SWAT模型的手册,选取对径流、气温模拟产生较大影响的参数进行敏感性分析,并筛选出对径流影响最敏感的CN<sub>2</sub>、Sol\_K、Esco等8个参数进行自动率定。通过比较模拟与实测的径流过程线,对部分参数进行手动率定,最终率定的结果如表2所示。

## 3 结果与讨论

以月为时间步长,对上游莺落峡站模拟值与观测值的流量过程线进行比较分析(图3),2000—2009年模拟的各月流量与实测值在数量和趋势方面的拟合基本一致,2004年和2008年夏季汛期的模拟值偏高,经过分析,发现和上游水库的调控有关。校正期模型效率ENS达到了0.83,决定系数 $R^2$ 为0.86;验证期模型效率ENS也达到了0.81,决定系数 $R^2$

表 2 率定的参数及其取值范围

Table 2 Calibrated parameters and their final values

参数名称	参数涵义	参数变化范围	参数值或变化范围
CN <sub>2</sub>	SCS 径流曲线数	-20% ~ 20%	+6.32%
Sol_K	土壤饱和导水率	-20% ~ 20%	+11.56%
Esco	土壤蒸发补偿系数	0.00 ~ 1.00	0.83
SFTMP	降雪温度	-2.0 ~ 2.0 °C	0.9 °C
Sol_Z	土壤深度	-20% ~ 20%	+3.65%
Sol_Awc	土壤持水系数	-20% ~ 20%	-0.35%
GWQMN	浅层地下水补偿深度	0 ~ 500 mm	306.5 mm
ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 系数	0.00 ~ 1.00	0.07

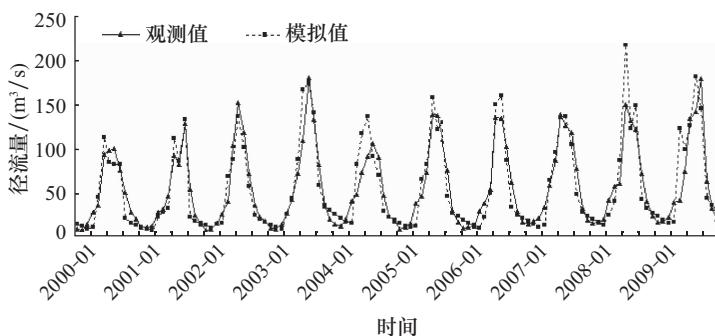


图 3 黑河上游莺落峡月径流模拟值与观测值

Fig. 3 Measured and simulated monthly streamflow of the Yingluoxia station

为 0.85(表 3), 模拟结果较为理想。这个结果和黑河上游其他模拟研究相比, 结论基本一致。其中需要注意的是 SWAT 模型中的坡面汇流长度设定, 利用 ArcSWAT 提取的坡面汇流长度在黑河上游山区流域存在较大误差, 导致冬季径流模拟偏低, 需采用经验公式进行修正<sup>[18]</sup>。

表 3 模型校正期与验证期莺落峡径流模拟的精度评价

Table 3 Model performance assessment during calibration and validation periods of the Yingluoxia station

模拟期	评价目标	ENS	R <sup>2</sup>
校正期(2000—2004 年)	月径流量	0.83	0.86
验证期(2005—2009 年)	月径流量	0.81	0.85

由于莺落峡水库下泄到中游的径流量并非自然状态下的径流量, 为了消除这部分系统误差对中游模拟的影响, 将莺落峡水库 2000—2009 年日观测流量数据, 以点源加入的形式代替上游的模拟结果加入 SWAT 模型模拟中游的径流过程。并按照实际作物种植时序, 设置了播种、灌溉、施肥、收割等参数, 利用 SWAT 模型农业管理模块强化了中游农业用水的模拟。比较正义峡水文站的模拟值与观测值的流量过程线(图 4)可以看出, 模拟值和观测值具有基本一致的变化趋势, 在每年冬季 12 月至次年 3 月这段时间内模拟值要明显低于观测值, 而在其他时段的模拟结果较好。校正期和验证期的模型效率 ENS 和决定系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.59、0.63 和 0.53、0.61, 整体模拟精度不高。

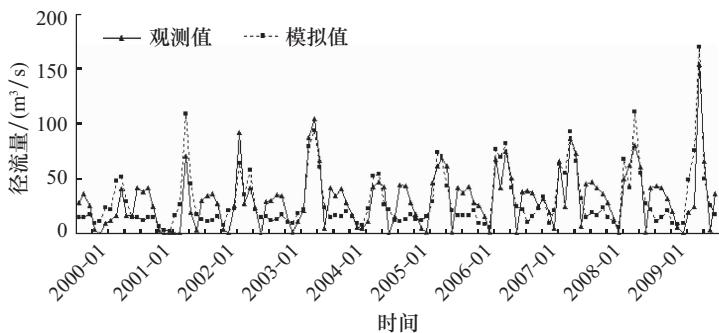


图4 黑河中游正义峡月径流模拟值与观测值

Fig. 4 Measured and simulated monthly streamflow of the Zhengyixia station

将莺落峡水库和正义峡多年月平均径流量进行比较,发现每年12月至次年3月中游的平均径流量要高于上游约 $20\text{ m}^3/\text{s}$ (图5),表明除了上游来水外,中游河道径流在冬季得到了较为明显的水量补给。黑河中游河道的径流补给主要来自流域内降水、其他河流注入和地下水补给三个方面。在每年的12月至次年3月这个时段内中游流域的降水量十分稀少,多年月平均降水量都在5 mm以下(图6),黑河最大支流梨园河在冬季也几乎断流(图7)。因此,黑河中游冬季得到的水量补给的主要来源很可能是地下水补充。

当地表水从出山口进入到山前中游盆地,与地下水转化频繁,在人类活动条件下,中游引水工程、地下水抽取及农业灌溉等改变了地下水的补给条件,使得流域地表水—地下水的转化由自然过程演化为人为干扰为主<sup>[19]</sup>。模型冬季模拟值偏低的原因也在于没有很好地模拟地下径流的变化过程。

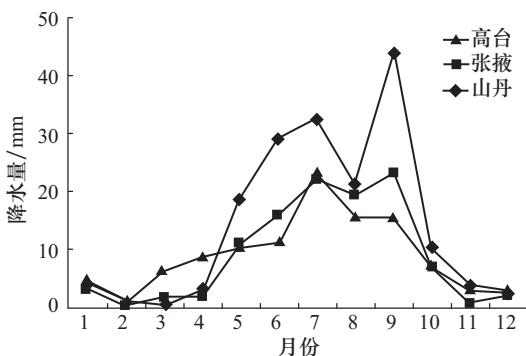


图6 中游流域多年月平均降水量

Fig. 6 The average monthly precipitation changes in the middle HRB

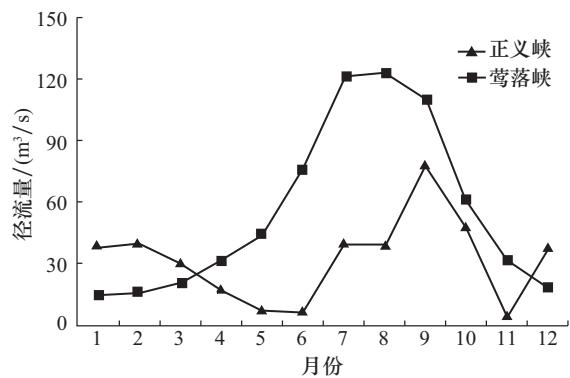


图5 上游莺落峡流量与中游正义峡流量对比

Fig. 5 The average monthly streamflow of the Yingluoxia and Zhengyixia stations

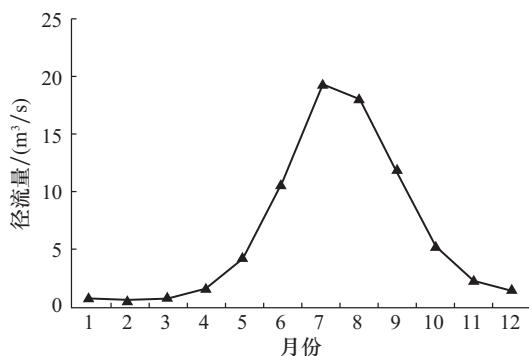
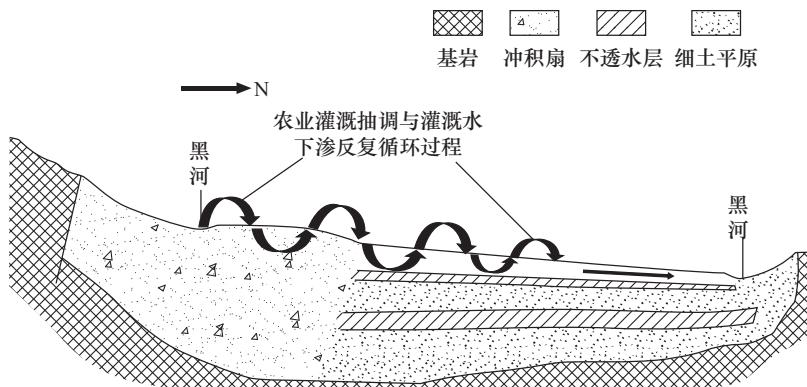


图7 梨园河多年月平均径流量

Fig. 7 The average monthly runoff changes in the Liyuanhe station

黑河中游农业灌溉采用抽水漫灌,过量灌溉水的入渗是地下水的一个重要补给来源<sup>[20]</sup>。中游山前冲积扇的过量灌溉水入渗变成地下水向下游缓慢汇流,在农业种植季节里地下水得到反复的补给同时又被多次利用(图8)。到了每年11月冬季灌溉后,由于农民不再抽取地下水进行灌溉,使得地下水在冬季能缓慢地补给河道径流。SWAT模型采用的是降雨-地下水响应模型中的指数衰减权重函数来计算土壤水补给地下水量<sup>[21]</sup>,地下水在一定时间段后自然补给河道,由于对于黑河中游灌溉水的反复利用机制无法直接反映,进而造成中游地下水模拟值偏小。



注: 黑河中游水文地质剖面图引自文献[20]。

图8 灌溉回流水被循环重复利用示意图

Fig. 8 The cycle reuse diagram for irrigation return flow

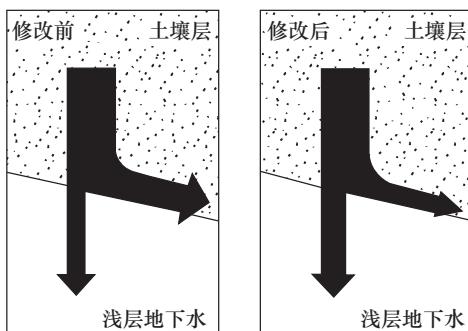


图9 土壤下渗修改原理示意图

Fig. 9 Schematic of the soil water percolation

地形和农业生产特点决定了黑河中游农业灌溉这一水资源利用过程的复杂性。很难用机理方法直接模拟。因此,采用了替代的方法来表达这一过程,将地下水在秋季的快速短期补给过程用增大土壤水的下渗量来实现。根据水量平衡原则,通过减少土壤水方程中土壤水的贮藏量,并将这部分减少的水分增加到土壤水下渗量中(图9),增加土壤水补给地下水量,提高冬季中游径流模拟结果。修改后的 SWAT 模型土壤水计算方程如下:

$$SOL\_SW_t = \sum_{i=1}^n SOL\_SW(i) \times (1 - \alpha) \quad (1)$$

式中: $SOL\_SW_t$  为整个土壤剖面的含水量; $t$  为时间步长; $i$  为土壤层数( $i = 1, \dots, n, n \leq 10$ );  $SOL\_SW(i)$  为第  $i$  层土壤含水量; $\alpha$  为土壤水下渗增加系数,是通过多次模拟得到的一个经验系数,适合黑河中游流域的模拟值为 0.007。

修改后的 SWAT 模型土壤水下渗方程为:

$$W_{perc,bm} = SW\_EX_{bm} \times \left[ 1 - \exp\left( \frac{-\Delta t \cdot K_{sat,bm}}{SAT_{bm} - FC_{bm}} \right) \right] + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n SOL\_SW(i) \quad (2)$$

式中: $W_{perc,bm}$  为整个土壤剖面的下渗量; $\Delta t$  为时间步长; $K_{sat,bm}$  为底层土壤的饱和导水率; $SAT_{bm}$  为底层土壤的饱和田间持水量; $FC_{bm}$  为底层土壤的田间持水量; $SW\_EX_{bm}$  为底层土壤含水量大于田间持水量的值。

利用修改后的 SWAT 模型对中游正义峡 2000—2009 年的径流进行模拟,并与实测值进行比较,结果见图 10。在冬季及 12 月至次年 3 月的模拟值有明显的增加,除个别年份冬季的模拟值稍有偏低外,其他时段模拟值与观测值的吻合度都较为理想,校正期模型效率 ENS 提高到了 0.75,决定系数  $R^2$  为 0.75;验证期模型效率 ENS 达到了 0.70,决定系数  $R^2$  为 0.75(表 5),模拟的精度得到较大的提高,基本解决冬季径流偏低的问题。

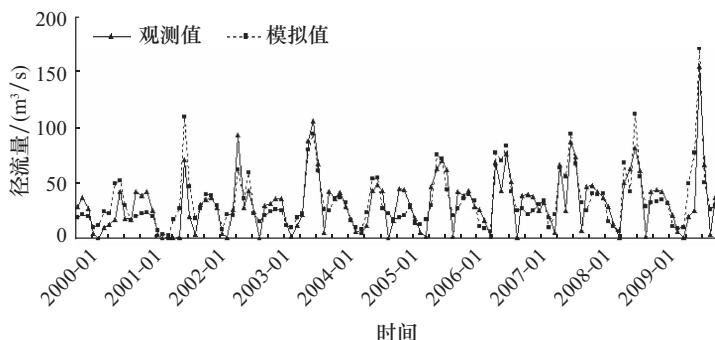


图 10 模型修正后中游正义峡模拟与观测的月径流过程对比

Fig. 10 Measured and simulated monthly streamflow of the Zhengyixia station using modified SWAT model

表 4 模型校正期与验证期正义峡径流模拟的精度对比

Table 4 Model performance assessments during calibration and validation periods of the Zhengyixia station

模拟期	评价目标	模型修改	ENS	$R^2$
校正期(2000—2004 年)	月径流量	修改前	0.59	0.63
		修改后	0.75	0.75
验证期(2005—2009 年)	月径流量	修改前	0.53	0.61
		修改后	0.70	0.75

## 4 结论

基于过程的水文模型是定量研究区域水资源合理配置的有效工具。SWAT 模型在结构上考虑了融雪和冻土对水文循环的影响,使用度日因子法来模拟高海拔地区冰川和积雪融化所形成的融雪径流过程。通过产汇流和融雪径流参数的有效率定,能较好地模拟黑河上游山区流域 2000—2009 年自然状态下的径流过程。

SWAT 模型对壤中流和土壤水入渗自然过程模拟考虑比较全面,但是对黑河中游流域人为调水、农田灌溉等人工干预下的地下水 - 地表水多次转化过程的模拟却不太理想。主要表现为模拟的冬季土壤水下渗量偏低,致使地下径流量偏小。笔者尝试根据水量平衡原则,通过减少土壤水的贮藏量,增加土壤水下渗量对 SWAT 模型进行了改进,模拟精度有了较大的提高,较好地模拟了黑河中游人工干扰下的径流变化过程。

本文的研究丰富了黑河流域水资源研究成果,增强了 SWAT 模型在黑河中上游流域应用的适用性,定量展示了黑河中上游流域径流变化过程,为黑河流域水资源管理和综合利用提供了支持。另一方面,本文本质上采用的是一种经验方法,对于黑河中游人为干扰下的地下水 - 地表水多次转化的过程机理进行深入研究,并构建相应的过程模型,对黑河中游水资源的管理和合理配置具有重要意义。

### 参考文献(References) :

- [1] 侯兰功,肖洪浪,邹松兵,等.黑河流域水循环特征研究[J].水土保持研究,2010,17(3):254-258. [HOU Lan-gong, XIAO Hong-lang, ZOU Song-bing, et al. Study on the features of water cycle in Heihe River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(3):254-258.]
- [2] 肖洪浪,程国栋.黑河流域水问题与水管理的初步研究[J].中国沙漠,2006,26(1):1-5. [XIAO Hong-lang, CHENG Guo-dong. Water issue and management at basin level in Heihe River, Northwestern China. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1):1-5.]
- [3] 李新,程国栋,吴立宗.数字黑河的思考与实践1:为流域科学服务的数字流域[J].地球科学进展,2010,25(3):297-304. [LI Xin, CHENG Guo-dong, WU Li-zong. Digital Heihe River Basin. 1: An information infrastructure for the watershed science. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3):297-304.]
- [4] 李新,程国栋,马明国,等.数字黑河的思考与实践4:流域观测系统[J].地球科学进展,2010,25(8):866-876. [LI Xin, CHENG Guo-dong, MA Ming-guo, et al. Digital Heihe River Basin. 4: Watershed observing system. *Advances in Earth Science*, 25(8):866-876.]
- [5] 康尔泗,程国栋,蓝永超,等.西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型[J].中国科学D辑,1999,29(S1):47-54. [KANG Er-si, CHENG Guo-dong, LAN Yong-chao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of north-west China to climate changes. *Science in China Series D*, 1999, 29(S1):47-54.]
- [6] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等.TOPMODEL模型在黑河干流出山径流模拟中的应用[J].中国沙漠,2003,23(4):428-434. [CHEN Ren-shen, KANG Er-si, YANG Jian-ping, et al. Application of top-model to simulate runoff from Heihe Mainstream Mountainous Basin. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4):428-434.]
- [7] 韩杰,张万昌,赵登忠.基于TOPMODEL径流模拟的黑水水资源探讨[J].农村生态环境,2004,20(2):16-21. [HAN Jie, ZHANG Wan-chang, ZHAO Deng-zhong. TOPMODEL-based simulation of water resources in Heihe River Basin. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2):16-21.]
- [8] ZHAO Deng-zhong, ZHANG Wan-chang. Rainfall-runoff simulation using the VIC-3L model over the Heihe River mountainous basin, China [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005, 6:4391-4394.
- [9] WANG Jian, LI Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in Northwestern China [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006, 49(8):881-888.
- [10] 周剑,李新,王根绪,等.一种基于MMS的改进降水径流模型在中国西北地区黑河上游流域的应用[J].自然资源学报,2008,23(4):724-736. [ZHOU Jian, LI Xin, WANG Gen-xu, et al. An improved precipitation-runoff model based on MMS and its application in the upstream basin of the Heihe River. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4):724-736.]
- [11] 李占玲,徐宗学.黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):344-349. [LI Zhan-ling, XU Zong-xue. Assessment on hydrological models for runoff simulation in the upper reaches of the Heihe River Basin. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2010, 46(3):344-349.]
- [12] 黄清华,张万昌.SWAT分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J].南京林业大学学报:自然科学版,2004,28:22-26. [HUANG Qing-hua, ZHANG Wan-chang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT Modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin, China. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2004, 28:22-26.]
- [13] 夏军,王纲胜,吕爱锋,等.分布式时变增益流域水循环模拟[J].地理学报,2003,58(5):789-796. [XIA Jun, WANG Gang-sheng, LU Ai-feng, et al. A research on distributed time variant gain modeling. *Acta Geographic Sinica*, 2003, 58(5):789-796.]
- [14] 贾仰文,王浩,严登华.黑河流域水循环系统的分布式模拟(I):模型开发与验证[J].水力学报,2006,37(5):534-542. [JIA Yang-wen, WANG Hao, YAN Deng-hua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River basin I. Model development and verification. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5):534-542.]
- [15] 贾仰文,王浩,严登华.黑河流域水循环系统的分布式模拟(II):模型应用[J].水力学报,2006,37(6):655-661. [JIA Yang-wen, WANG Hao, YAN Deng-hua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River basin II. Model application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37( 6):655-661.]

- [16] Neitsch S L, Aronld J G, Williams J R. Soil and Water Assessment Tool User's Manual 99. 2 [M]. 808 East Blackland Rd, Temple, Texas-76502: USDA, Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory, 1999.
- [17] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tool : historical development, applications, and future research directions [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(4):1211-1250.
- [18] 余文君, 南卓铜, 李硕, 等. 黑河山区流域平均坡长的AVSWAT模型模拟分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(6):41-48. [ YU Wen-jun, NAN Zhuo-tong, LI Shuo, et al. The average slope length calculation in the AVSWAT model and its possible solution. *Journal of Geo-information Science*, 2011, 13(6):41-48. ]
- [19] 张光辉, 聂振龙, 刘少玉, 等. 黑河流域走廊平原地下水补给源组成及其变化[J]. 水科学进展, 2005, 16(5):673-678. [ ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, LIU Shao-yu, et al. Characteristic and variation of groundwater recharge resources in the middle reaches of Heihe River basin. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5):673-678. ]
- [20] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中游盆地地下水补给机理分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2):370-375. [ ZHANG Yin-hua, WU Yan-qing. Analysis of groundwater replenishment in the middle reaches of Heihe River. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(2):370-375. ]
- [21] Arnold J G, Muttiah R S, Srinivasan R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 227:21-40.

## Improvement and Applications of SWAT Model in the Upper-middle Heihe River Basin

LAI Zheng-qing<sup>1</sup>, LI Shuo<sup>1</sup>, LI Cheng-gang<sup>1</sup>, NAN Zhuo-tong<sup>2</sup>, YU Wen-jun<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Heihe river basin (HRB) is the second largest inland river basin in China, and it also is a typical water shortage region. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model is applied to simulate the monthly average runoff in the upper and middle reaches of HRB from 2000 to 2009. The results show that the SWAT model can simulate the runoff processes well in the upper reaches of HRB. The Nash-Sutcliffe coefficient ( $ENS$ ) and coefficient of determination ( $R^2$ ) during the calibration period of 2005 to 2009 were 0.81 and 0.85, respectively. But the monthly runoff in the middle reaches of HRB was underestimated in winter. The complex topography and high intensity repeated groundwater irrigation – infiltration – replenishment in the middle reaches of HRB are suggested to be the primary cause. Based on the analyses of hydrological situation in middle reaches of HRB, a empirical method was proposed to simulate the runoff process by increasing the soil water infiltration of the SWAT model. The Nash-Sutcliffe coefficient ( $ENS$ ) and the coefficient of determination ( $R^2$ ) of monthly average runoff simulation for middle reach of HRB during the calibration period increased from 0.53 to 0.70 and 0.61 to 0.75 after the modification of the SWAT model. The results indicated that the simulation of the irrigation processes was important to study the water resource management and the water cycle processes in the middle reaches of HRB.

**Key words:** the upper-middle HRB; SWAT; runoff simulation; irrigation; groundwater