

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.006

# 基于 SWAT 模型的青海省主要流域径流模拟

刘柏君<sup>1</sup>, 权 锦<sup>2,3</sup>, 杨超慧<sup>4</sup>, 雷晓辉<sup>2,3</sup>, 王 浩<sup>2,3</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;  
3. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 4. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**通过划分青海省主要流域并构建相应 SWAT 模型, 模拟流域日、月平均径流变化过程, 根据模型径流模拟值与实测值对比及对模型模拟结果进行评价, 从而探讨所构建模型的模拟精度及其适用性。结果表明: SWAT 模型不适用于柴达木盆地, 而对高寒区或高原区内以降水、冰川、融雪为主要补给的流域的径流模拟效果良好, 且具有较好的适用性。

**关键词:**径流模拟; SWAT 模型; 适用性评价; 青海省

**中图分类号:**TV213.4; P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)06-0039-06

## Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model

LIU Bojun<sup>1</sup>, QUAN Jin<sup>2,3</sup>, YANG Chaohui<sup>4</sup>, LEI Xiaohui<sup>2,3</sup>, WANG Hao<sup>2,3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;  
4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The major basins in Qinghai Province were divided and a SWAT model was built to simulate the change processes of average daily and monthly runoff. The measured values and simulated values of runoff were compared and the model's simulation results were evaluated, in order to analyze the precision and applicability of the model. The results show that the SWAT model is not applicable to the Qaidam Basin. However, it shows a strong performance and applicability in the basins supplied mainly by precipitation, glaciers, and snowmelt in cold regions and plateau areas.

**Key words:** runoff simulation; SWAT model; applicability evaluation; Qinghai Province

径流是表征河流水资源量最直观的因子, 其与社会耦合和驱动机制研究成为国际水文未来 10 年的主要方向。气候变化导致径流发生明显变化, 水资源情况多变, 特别是三江源区, 冰川、积雪和降雨丰富而径流利用较少<sup>[1-2]</sup>, 水资源充盈, 战略地位显著。研究径流变化是为了揭示径流对气候变化、人类活动和生态环境演变的响应规律, 为工程建设、生态保护和径流适应性利用提供依据, 而径流模拟是开展上述研究的基础。以往研究中, 常构建 SWAT 模型模拟单一流域径流过程从而评估气候变

化对径流的影响或分析水文效应对土地利用变化的响应, 也会对 SWAT 模型的参数敏感性与区域适用性进行评价<sup>[3-11]</sup>。贾仰文等<sup>[12]</sup>应用 WEP-L 模型模拟黄河源区年、月径流过程并详细研究了径流过程对气温和降水变化的响应关系。薛天柱等<sup>[13]</sup>通过建立 SWAT 模型, 结合预测的气象数据, 对梨园河流域径流进行模拟预测, 并分别分析了径流对气温和降雨的水文响应的敏感性。宋倩等<sup>[14]</sup>将 SWAT 模型应用到伊犁喀什河流域, 探讨了模型的适用性及其参数的敏感性, 极大地丰富了 SWAT 模型的适

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0400903, 2016YFC0402201); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16\_0739); 2016 年度流域水循环模拟与调控国家重点实验室代表性成果培育课题(2016CG05); 中央高校基本科研业务费专项(2016B40314)

作者简介: 刘柏君(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: bojun\_l689@126.com

用范围。张圣微等<sup>[15]</sup>利用 SWAT 模型模拟拉萨河流域水文过程并研究了流域径流对气候变化和土地利用的响应关系。但以往的研究很少涉及大范围、多流域的区域径流模拟,因此对 SWAT 模型在大范围、多流域区域内的适用性及径流模拟效果的认知十分有限,无法满足气候变化条件下区域径流开发利用与水资源综合管理的需求。青海省是三江源区,也是我国的五大牧区之一,水资源、水能资源、草料资源丰富,地域广,涉及流域多,地理环境复杂,气候多变,冰川、积雪和降雨直接影响流域产汇流,径流状况复杂且多变。本文通过构建青海省主要流域 SWAT 模型,模拟流域径流过程,探讨 SWAT 模型的区域适用性,以期厘清区域径流情势变化与适应性利用问题,为高寒区径流演变规律认知、高原区水资源和水能开发战略潜力评估、生态水文过程变化影响解析和西部水资源战略剖析提供有力的技术支持。

## 1 研究区域概况与数据收集及处理

### 1.1 研究区概况

研究区地处我国西北部,为介于东经 89.58°~103.07°、北纬 31.65°~39.32° 之间的青海省(图 1)。该省地域面积宽广,河流众多,主要有黄河、长江、澜沧江、湟水干流(不含大通河)、格尔木河、香日德河、巴音河、布哈河、黑河 9 条,水系发达,河网密集。青海省地形各异,土壤多样,高山耸立,河流纵横,湖泊星罗棋布,草场丰盛,森林匮乏,84.7% 的地区海拔在 3 000 m 以上。省内包含祁连山地、柴达木盆地、青南高原、青海湖 4 种类型的自然地貌,其中,山区面积占 51%,沙漠、平原(含高原滩地等)占 26%,水域占 15%,丘陵占 8%。省内祁连山、昆仑山、巴颜喀拉山和唐古拉山等高海拔山岭终年积雪,冰川广布,冰川面积占全国冰川总面积的

8.8%,多年融水量达 31.72 亿 m<sup>3</sup>。青海省深居内陆,属高原大陆性气候,具有平均气温低、昼夜温差大、太阳辐射强、日照时间长、水面蒸发强烈、无霜期短、冬长夏短、降雨次数多而强度小、水资源时空分布不均、自然灾害频发等特点。省内年日照数高达 2 500 h,辐射量约为 605 kJ/cm<sup>2</sup>,年均气温在 -5.7~8.5℃ 之间,祁连山区、青南高原年均气温低于 0℃,湟水、黄河谷地在 6~8℃ 之间。

### 1.2 研究区主要流域划分

根据以下 5 条原则进行流域划分:①与水资源分区要求相符;②流域水文、气象、地理、生态环境、水资源开发与利用具有区域代表性;③具备重大工程与重要控制水文站的流域;④流域与区域经济社会发展、生态环境维护紧密相关;⑤保留主要支流水系完整性,将青海省划分为黄河流域(黄河干流、湟水干流和大通河)、长江通天河流域、澜沧江扎曲流域(西南诸河流域)和柴达木盆地、青海湖布哈河流域(西北诸河流域)共 7 个主要流域,划分结果见图 1。

### 1.3 数据收集及处理

地形高程数据(DEM)来自于 SRTM 数据集(<http://strm.csi.cgiar.org/>),空间分辨率为 90 m。土壤类型数据来自于 HWSD(harmonized world soil database)的全球土壤数据集,比例尺为 1:1 000 000。土地利用数据(图 2)由 2010 年城市遥感影像与第 2 次全国土地调查体系陆地覆盖/植被类型图合并后根据青海省土地覆盖特征进行 2 次分类所得<sup>[16-17]</sup>。不同流域采用同一的土地利用数据、土壤类型数据。

气象数据选用由民和、贵德、西宁、同仁等 37 个气象站 1980—2013 年的逐日数据,包含日降雨量、最高/最低气温、太阳辐射、风速、相对湿度、日照时数及平均气压,区域面雨量由模型天气发生器模拟

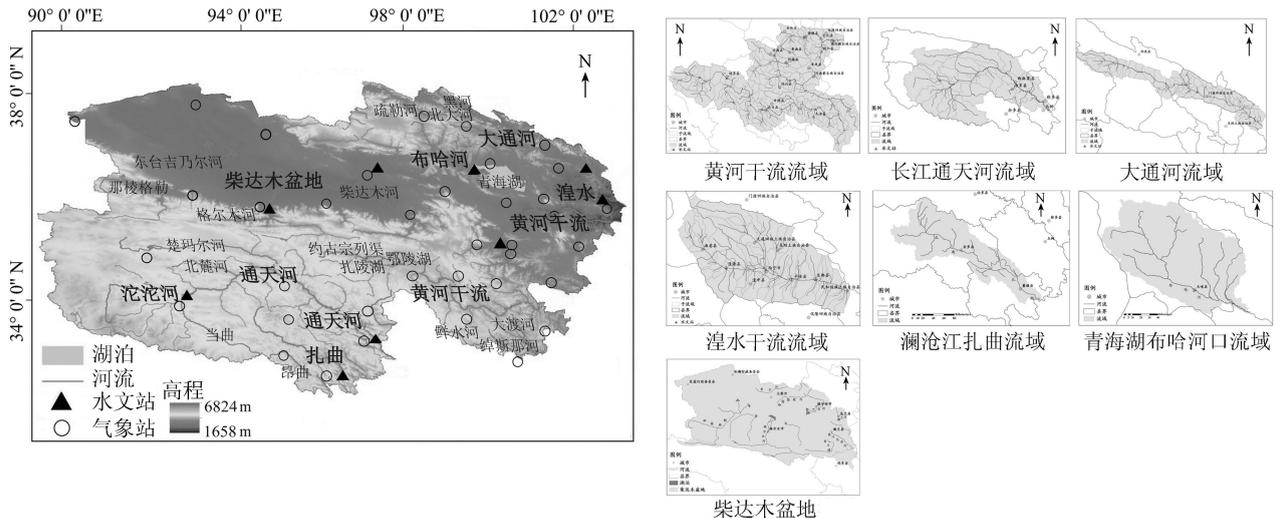


图 1 青海省水系及其主要流域

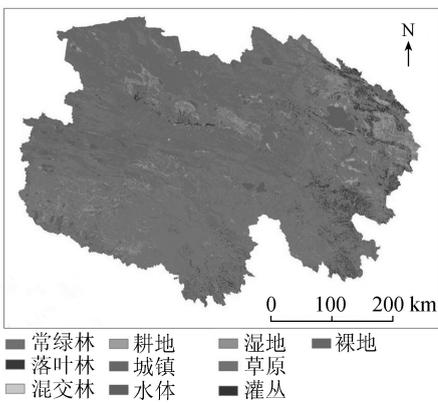


图2 青海省土地利用类型分布

得到。根据水资源主导流域划分结果,水文数据采用唐乃亥、乐都、青石嘴、直门达、沱沱河、香达、布哈河口、德令哈(三)及格尔木(四)水文站日、月实测流量数据(测站分布及详情见图1与表1)。

表1 水文站详情与径流系列

站名	河流	水系	水文系列 (起止年份)	东经/ (°)	北纬/ (°)
唐乃亥	黄河干流	黄河	1961—2013	100.13	35.51
乐都	湟水	湟水	1988—2013	102.41	36.48
青石嘴	大通河	黄河	1994—2013	102.45	37.14
直门达	通天河	金沙江	1980—2013	97.24	33.01
沱沱河	沱沱河	金沙江	1980—2013	92.44	34.22
香达	扎曲河	澜沧江	1961—2013	96.74	33.45
布哈河口	布哈河	青海湖	1980—2013	99.74	37.04
德令哈(三)	巴音河	库尔雷克湖	1980—2013	97.43	37.38
格尔木(四)	格尔木	达布逊湖	1980—2013	94.78	36.31

## 2 模型运行结果分析

### 2.1 模型参数与模型评价

在考虑各流域下垫面特征及河川径流中积雪/融雪量占比的基础上,利用SWAT自带LA-OAT法与Sufi-2法相结合<sup>[18-21]</sup>提取出15个敏感性参数(表2)并采用动尺度搜索算法(MDDS)<sup>[22-23]</sup>对参数进行优化率定。利用纳什效率系数 $E_{ns}$ 、径流总量相对误差 $R_e$ 及95%预测不确定性<sup>[20]</sup>的 $p$ 因子和 $r$ 因子来评价模型的模拟效果。 $E_{ns}$ 越大, $R_e$ 越小,说明模型模拟值越接近实测值,模型模拟效果越好,通

常, $E_{ns}$ 不能低于0.5, $R_e$ 变化范围不能超过 $\pm 20\%$ <sup>[24-25]</sup>。 $p$ 大于0.7, $r$ 小于1,说明模型模拟结果与实测值相符,具有一定的区域适用性。

表2 模型参数

参数	编码	范围
SCS径流曲线数	CN2	35~98
土壤蒸发补偿系数	ESCO	0.01~1 d
土壤有效含水量	SOL_AWC	0~1%
地下水再蒸发系数	GW_REVAP	0.02~0.2 d
地下水滞后系数	GW_DEALY	0~500 d
基流 $\alpha$ 因子	ALPHA_BF	0~1 d
浅层地下水径流系数	GWQMN	0~5000 mm
浅层地下水再蒸发系数	REVAPMN	0~500 mm
主河道有效水力传导度	CH_K2	-0.01~500 mm/h
地表径流滞后系数	SURLAG	0.05~24 d
降雪气温	SFTMP	-20~20°C
雪融最低温度	SMTMP	-20~20°C
6月21日最大雪融度日因子	SMFMX	0~20 mm/(d·°C)
12月21日最小雪融度日因子	SMFMN	0~20 mm/(d·°C)
结冰气温滞后系数	TIMP	0.01~1 d

### 2.2 模型运行结果分析

由图3与表3可知:①除柴达木盆地外,其余6个主要流域的模型日/月均径流模拟值与实测值在率定期与验证期内都具有较好的拟合程度,在日和月不同尺度下模型率定与验证的 $E_{ns}$ 值均大于0.5, $R_e$ 值均在 $[-20\%, 20\%]$ 范围内, $p$ 均大于0.7, $r$ 均小于1,说明模型对此6个主要流域具有良好的适用性,并且满足流域径流模拟的精度要求;②柴达木盆地模型运行结果较差,说明SWAT模型并不适合于此区域,根据模型参数ALPHA\_BF、GWQMN和REVAPMN可知,基流在柴达木盆地径流中占有较大比重,说明河流量主要来源于盆地地下水补给,而SWAT模型仅能用于模拟以降水、冰川、融雪为主的河流的水文生态过程<sup>[26-28]</sup>,因此,针对柴达木盆地的径流过程模拟可采用地表水-地下水耦合模型进行,而如何构建出适合柴达木盆地地表水-地下水耦合模型,是下一步研究的重点;③青海省主要流域分别处于高寒区与高原区内,说明SWAT模型对于高寒区或高原区内以降水、冰川、融雪为主要补给

表3 模型模拟评价结果

水资源 主导流域	站点	水文系列(起止年份)			$E_{ns}$				$R_e/\%$				$p$				$r$			
		计算 预热期	率定期	验证期	日尺度		月尺度		日尺度		月尺度		日尺度		月尺度		日尺度		月尺度	
					率定	验证	率定	验证	率定	验证	率定	验证	率定	验证	率定	验证	率定	验证		
黄河干流	唐乃亥	1961—1963	1964—1998	1999—2013	0.65	0.71	0.78	0.74	4.6	-3.8	4.6	-3.8	0.83	0.83	0.9	0.92	0.84	0.86	0.88	0.90
		1988—1989	1990—2007	2008—2013	0.64	0.63	0.73	0.72	3.1	4.7	3.1	4.7	0.7	0.70	0.72	0.72	0.84	0.83	0.84	0.82
		1994—1998	1998—2007	2008—2013	0.72	0.71	0.91	0.86	2.7	-6.6	2.7	-6.6	0.7	0.72	0.76	0.76	0.78	0.78	0.79	0.81
大通河	青石嘴	1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.74	0.69	0.89	0.85	-4.5	-7.3	-3.3	-4.7	0.77	0.74	0.75	0.76	0.82	0.81	0.82	0.82
		1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.83	0.84	0.89	0.84	-4.5	-7.3	3.4	3.5	0.83	0.89	0.88	0.82	0.78	0.8	0.82	0.86
通天河	直门达	1961—1963	1964—1998	1999—2013	0.72	0.71	0.83	0.77	6.0	-5.9	6.0	-5.9	0.82	0.86	0.88	0.92	0.81	0.85	0.87	0.82
		1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.74	0.69	0.89	0.85	-4.5	-7.3	-3.3	-4.7	0.77	0.74	0.75	0.76	0.82	0.81	0.82	0.82
澜沧江扎曲河	香达	1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.83	0.84	0.89	0.84	-4.5	-7.3	3.4	3.5	0.83	0.89	0.88	0.82	0.78	0.8	0.82	0.86
		1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.83	0.84	0.89	0.84	-4.5	-7.3	3.4	3.5	0.83	0.89	0.88	0.82	0.78	0.8	0.82	0.86
青海湖哈布河	布哈河口	1961—1963	1964—1998	1999—2013	0.72	0.71	0.83	0.77	6.0	-5.9	6.0	-5.9	0.82	0.86	0.88	0.92	0.81	0.85	0.87	0.82
		1980—1983	1984—2005	2006—2013	0.74	0.69	0.89	0.85	-4.5	-7.3	-3.3	-4.7	0.77	0.74	0.75	0.76	0.82	0.81	0.82	0.82
柴达木盆地	德令哈(三)	1980—1983	1984—2005	2007—2013	0.24	0.26	0.29	0.28	43.6	-35.6	43.6	-35.6	0.33	0.26	0.25	0.26	1.13	1.22	1.45	1.06
		1980—1983	1984—2005	2007—2013	0.21	0.24	0.29	0.29	34.6	31.4	42.1	28.5	0.33	0.26	0.25	0.26	1.13	1.22	1.45	1.06

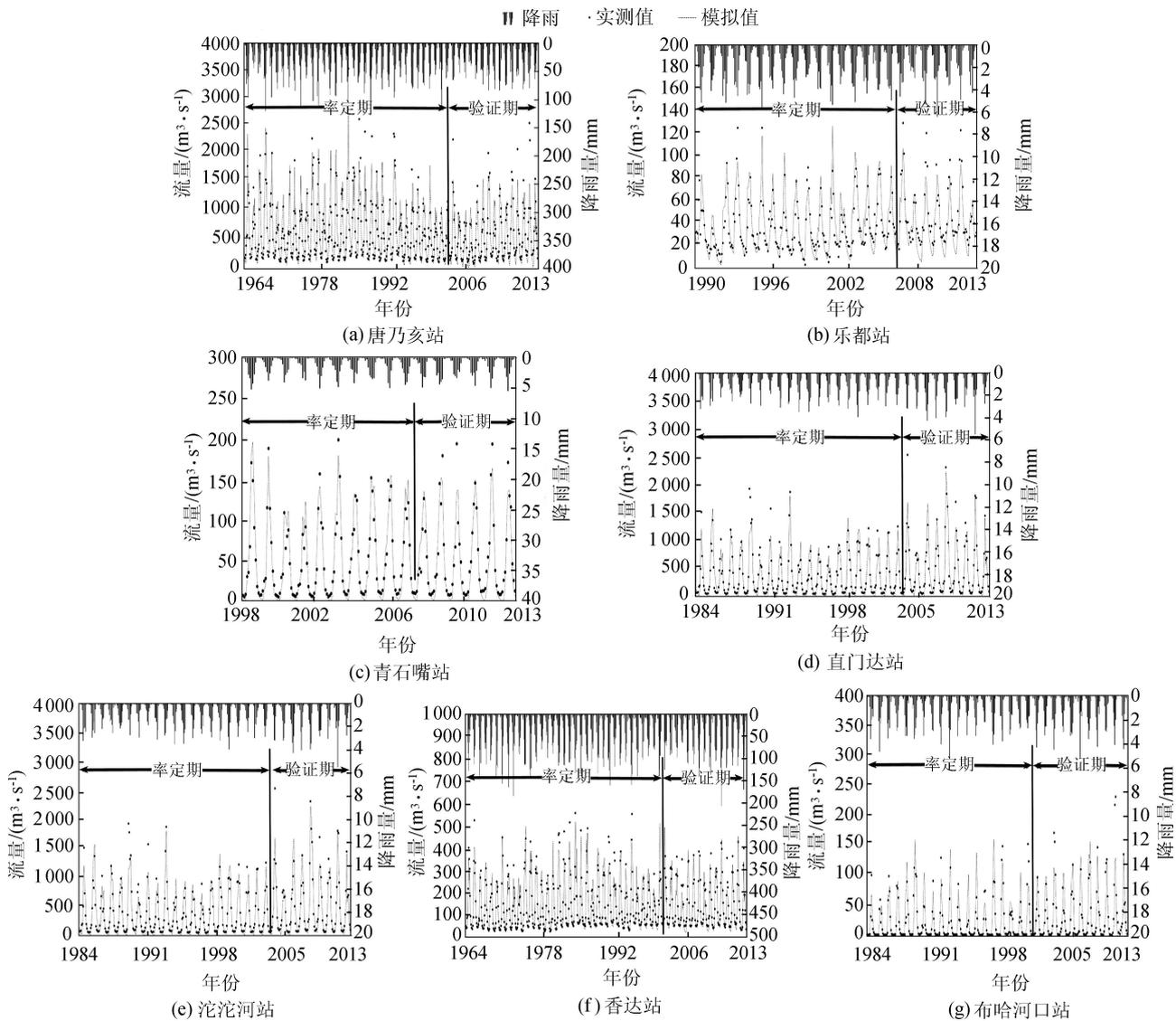


图3 流域月均流量过程对比

的流域的径流模拟具有一定的适用性;④模型验证后得到的15个青海省敏感性参数值(表4)均在合理取值范围内,可以从参数 ESCO、SOL\_AWC、GW\_REVAP、GW\_DEALY、ALPHA\_BF、GWQMN、REVAPMN 中选择与地下水模型相同的参数,以便未来地表水-地下水模型的耦合;可从参数 ESCO、SOL\_AWC、SFTMP、SMTMP、SMFMX、SMFMN、TIMP 中选择与大气模型相同的参数,以便未来水文-气象模型的耦合;也可以选取参数 CN2 与 CH\_K2 值用于非点源污染的研究。综上所述,SWAT 模型不适用于柴达木盆地,而对高寒区或高原区内以降水、冰川、融雪为主要补给的流域/河流的径流模拟效果良好,且具有较好的适用性。

### 3 结论与展望

基于青海省内水文、气象及地理信息数据,通过主要流域划分并构建相应 SWAT 模型,模拟主要流

域日、月平均径流变化过程,根据模型径流模拟值与实测值对比及对模型模拟结果进行评价,从而探讨所构建模型的模拟精度及其适用性。结果表明,SWAT 模型在黄河干流流域、大通河流域、湟水流域、长江通天河流域、澜沧江扎曲流域与青海湖布哈河口流域日、月平均径流模拟方面满足流域径流模拟的精度要求,流域模拟值与实测值拟合程度较好,模型具有良好的适用性。而在柴达木盆地径流模拟结果精度较低,其原因在于基流在柴达木盆地径流中占有较大比重,其河水量主要来源于盆地地下水补给,SWAT 模型在地表水与地下水间互馈模拟上的欠缺,导致模型并不适合于此流域。特别是上述流域分别处于高寒区与高原区内,因此,SWAT 模型对于高寒区或高原区内以降水、冰川、融雪为主要补给的流域的径流模拟具有一定的适用性,以地下水补给为主的流域径流模拟需要构建地表水-地下水耦合模型。

表 4 模型敏感性参数验证结果值

水资源 主导流域	SCS 径流 曲线数	土壤蒸 发补偿 系数/d	土壤有 效含 水量/%	地下水 再蒸发 系数/d	地下水 滞后 系数/d	基流 $\alpha$ 因子/d	浅层 地下水 径流 系数/ mm	浅层 地下水 再蒸发 系数/ mm	主河道 有效水 力传导度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	地表径 流滞后 系数/d	降雪 气温/ ℃	雪融最 低温度/ ℃	6月21日 最大雪 融度日 因子/ (mm·d <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	12月21日 最小雪 融度日 因子/ (mm·d <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	结冰 气温 滞后 系数/ d
黄河干流	39.68	0.14	0.67	0.12	175.55	0.07	486.64	79.89	435.53	2.83	-16.31	5.06	6.11	13.14	0.16
湟水干流	35	0.4	0.06	0.17	121.37	0.09	150.66	288.56	438.67	0.05	-6.59	10.08	11.03	15.12	0.77
大通河	59.93	0.97	0.34	0.17	32.41	0.86	437.95	456.36	433.96	0.14	5.58	9.92	0.26	18.16	0.56
通天河	35	0.96	0.39	0.09	75.74	0.19	120.18	279.89	130.5	24	-9.2	5.82	0.01	17.55	0.68
沱沱河	35	0.93	0.39	0.08	74.57	0.2	120.18	278.67	130.34	24	-9.2	5.79	0.01	17.5	0.65
澜沧江 扎曲河	78.45	0.96	0.56	0.17	189.01	0.14	408.09	414.91	438.67	0.05	-2.65	6.49	10.09	17.72	0.16
青海湖 哈布河	53.42	0.5	0.05	0.08	15.72	0.42	753.6	409.25	251.7	0.05	-8.43	-5.63	15.7	16.75	0.63
柴达木盆地	-8.89	4.56	1.43	-0.1	-1	0.05	2374	251	0	0.03	-40	-40	14	12	0.13

研究青海省主要流域径流模拟问题,能够为针对青海省开展以下多方面的研究奠定良好的模型基础:①径流过程及其对气候变化和人类活动的响应规律研究,即径流多源解析、径流趋势预测、水文过程对土地变化/森林覆被变化的响应、水利工程对流域径流或泥沙的影响评价、人类活动与气候变化对河流径流组分影响、地形与融雪对水量平衡的影响分析等;②径流利用中生态环境作用分析,即生态环境变异对径流利用制约作用评估、径流利用中生态风险评价及降低风险方法研究、河道内生态基流估算等;③径流适应性利用研究,即径流-用水-发电-生态之间的互馈关系和阈值分析、来水-蓄水-用水效益协调及其生态安全边界研究、应对气候变化风险和水库调度不确定性的径流利用方法研究、梯级水库-生态环境-河流三复合系统径流变化规律研究、合理利用径流资源条件下梯级水库调控策略制定、国际河流水量优化配置、河流水资源量计算及变异规律分析、干旱评价等;④基于径流模拟的水蚀对策制定等。

参考文献:

[ 1 ] 李原园,曹建廷,沈福新,等. 1956—2010 年中国可更新水资源量的变化[J]. 中国科学, 2014, 44(9): 2030-2038. (LI Yuanyuan, CAO Jianting, SHEN Fuxin, et al. The changes of renewable water resources in China during 1956—2010 [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 2030-2038. (in Chinese))

[ 2 ] 王政祥,郭海晋,丁志立. 长江和西南诸河近 10 年水资源及利用状况分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 85-87. (WANG Zhengxiang, GUO Haijin, DING Zhili. Water resources and its utilization state of the Yangtze River and the rivers in south-western China in recent 10 years [J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 85-87. (in Chinese))

[ 3 ] CHAVES J, NEILL C, GERMER S, et al. Land

management impacts on runoff sources in small Amazon watersheds [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1766-1775.

[ 4 ] 李泽利,吕志峰,赵越,等. 新安江上游流域 SWAT 模型的构建及适用性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2015(1): 25-31. (LI Zeli, LYU Zhifeng, ZHAO Yue, et al. Construction of SWAT model and its applicability evaluation in upper basin of Xin'an River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015(1): 25-31. (in Chinese))

[ 5 ] KAHYAA E, KALAYEY S. Trend analysis of streamflow in Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2004, 289: 128-144.

[ 6 ] ZHANG X S, SRINIVASAN R, DEBELE B, et al. Runoff simulation of the headwaters of the Yellow River using the SWAT model with three snowmelt algorithms [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(1): 48-61.

[ 7 ] 杨丽萍,邹进,潘锋. 基于 SWAT 模型的盘龙江流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 19-23. (YANG Liping, ZOU Jin, PAN Feng. Runoff simulation of Panlong River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 19-23. (in Chinese))

[ 8 ] 张雪刚,毛媛媛,董家瑞,等. SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 49-52. (ZHANG Xuegang, MAO Yuanyuan, DONG Jiarui, et al. A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 49-52. (in Chinese))

[ 9 ] 刘柏君,周广钰,雷晓辉,等. 海流兔河基流特征及其对气候变化和人类活动的响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 123(5):56-61. (LIU Bojun, ZHOU Guangyu, LEI Xiaohui, et al. Analysis of baseflow characteristics and its responses to climatic change and

- human activities in Hailiutu River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 123(5): 56-61. (in Chinese))
- [10] FONTAINE T A, CRUICKSHANK T S, ARNOLD J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [J]. Journal of Hydrology, 2002, 262(1): 209-223.
- [11] JAYAKRISHNAN R, SRINIVASAN R, SANTHI C, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3):749-762.
- [12] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报, 2009, 39(1): 52-58. (JIA Yangwen, GAO Hui, NIU Cunwen, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 39(1): 52-58. (in Chinese))
- [13] 薛天柱, 马灿, 魏国孝, 等. 甘肃梨园河流域 SWAT 径流模拟与预报[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 61-65. (XUE Tianzhu, MA Can, WEI Guoxiao, et al. SWAT runoff simulation and predictions in Liyuan River basin of Gansu Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(4): 61-65. (in Chinese))
- [14] 宋倩, 穆振侠, 姜卉芳. SWAT 模型在天山西部山区的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 46-49. (SONG Qian, MU Zhenxia, JIANG Huifang. Application of SWAT model in western area of Tianshan Mountain [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(3): 46-49. (in Chinese))
- [15] 张圣微, 雷玉平, 姚琴, 等. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 39-44. (ZHANG Shengwei, LEI Yuping, YAO Qin, et al. Runoff response to land cover and climate change in Lhasa river Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 39-44. (in Chinese))
- [16] CHAPLOT V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO<sub>3</sub>-N loads predictions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1): 207-222.
- [17] TOBIN K J, BENNETT M E. Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(1): 253-271.
- [18] ABBASPOUR K C, JOHNSON A C, Van GENUCHTEN M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure [J]. Vadose Zone Journal, 2004(3): 1340-1352.
- [19] YANG J, REICHERT P, ABBASPOUR K C, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(1/2): 1-23.
- [20] GUPTA H V, BENVEN K J, WAGENER T. Model calibration and uncertainty estimation [M]. New York: Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2006: 2015-2031.
- [21] TOLSON B A, SHOEMAKER C A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration [J]. Water Resources Research, 2007, 43(1): 208-214.
- [22] DIBIKE Y B, COULIBALY P. Validation of hydrological models for climate scenario simulation: the case of Saguenay watershed in Quebec [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(23): 3123-3135.
- [23] GUO Hua, HU Qi, JIANG Tong. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 355(1/4): 106-122.
- [24] NASH J E, SUTTCILIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, part II-A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [25] CHRISTIAENS K, FEYEN J. Use of sensitivity and uncertainty measures in distributed hydrological modeling with an application to the Mike She model [J]. Water Resource Research, 2002, 38(9): 10-18.
- [26] 史晓亮, 李颖, 严登华, 等. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 301-308. (SHI Xiaoliang, LI Ying, YAN Denghua, et al. Advances in the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 301-308. (in Chinese))
- [27] GITHUI F, GITAU W, MUTUA F, et al. Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya [J]. International Journal of Climatology, 2009, 29(12): 1823-1834.
- [28] SINGH J, KNAPP H V, ARNOLD J G, et al. Hydrological modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 343-360.

(收稿日期: 2016-05-12 编辑: 徐娟)

