

气候变化对开都河流域径流的影响研究

顾海敏¹, 史建桥^{1,2}, 邹长新³, 白淑英^{1,3}, 郑雪峰²

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 南京 210044;

2. 94783 部队 61 分队, 浙江 长兴 313111; 3. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘 要:利用 SWAT 模型模拟开都河流域的径流变化, 并采用 1990—2009 年的水文站点径流数据进行精度验证, 然后设定气候变化情景, 模拟不同气候条件下径流的响应特征。结果表明: 模拟结果与实测径流较吻合, 剔除异常年份(1994 年、1995 年)后, 校准期(1990—2000 年)效率系数为 0.58, 平均相对误差为 -5.7%, 线性拟合度为 0.8; 验证期(2000—2009 年)的结果与校准期接近, 均达到了模型的评价标准, 说明 SWAT 模型在开都河流域的适用性较好。基于此, 采用任意情景设置方法, 设置了 25 种气候变化(气温和降水)组合情景, 研究了该流域对气候变化的响应, 结果表明, 气候变化对径流量的影响较为显著, 降水增加或气温降低均会导致径流量增加, 流域未来年均径流变化的主要影响因素是降水, 温度的影响相对较弱。

关键词: SWAT 模型; 开都河流域; 径流模拟; 气候变化

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0135-05

Study on the Effect of Climate Change on Runoff in Kaidu River Basin

GU Hai-min¹, SHI Jian-qiao^{1,2}, ZOU Chang-xin³, BAI Shu-ying^{1,3}, ZHENG Xue-feng³

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing 210044, China; 2. Unit 61, No. 94783 of PLA, Changxing, Zhejiang 313111, China;

3. Nanjing Institute of Environmental Science, Environmental Protection Department, Nanjing 210042, China)

Abstract: Based on the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, the streamflow in the Kaidu River Basin and its response to climate change were studied. The simulated results were validated by the runoff data of the hydrologic stations from 1990 to 2000. Finally the hydrological response of runoff to climate change was analyzed under different climate change scenarios. Results showed that the SWAT model could effectively simulate the streamflow in the Kaidu River Basin. The Nash-sutcliffe coefficient, average relative error and linearity for the calibration period (1990—2000, excepted for the abnormal precipitation years of 1994 and 1995) were 0.58, -5.7% and 0.8, respectively. The results for the validation period (2000—2009) were closed to that for the calibration period, suggesting the good applicability of SWAT model in the Kaidu River Basin. 25 climate change scenarios were constructed according to the most possible climate change predictions in this basin to study the hydrological response to climate change. Results indicated that climate change showed significant influence on the streamflow. The runoff in the Kaidu River Basin would increase with the increase of precipitation or the decrease of temperature. Furthermore, precipitation showed higher influence on the variation of annual runoff in the basin than temperature.

Key words: SWAT model; Kaidu River Basin; runoff simulation; climate change

气候变化对水资源的影响及其适应性是国际社会普遍关注的全球性问题。气候变化对我国各地区水资源时空格局变化的影响, 尤其是对水资源工程和规划的影响, 将是气候变化影响评估的重要内容^[1]。

在全球气候变暖背景下, 西北干旱区以山区降水和冰雪融水补给为基础的水资源系统将更为脆弱, 主要表现在极端水文事件增加、水资源不确定性加大、水循环过程和生态需水规律改变等方面^[2]。气候变化对

收稿日期: 2013-03-30

修回日期: 2013-06-08

资助项目: 国家环保公益性行业科研专项经费项目(201209027)

作者简介: 顾海敏(1989—), 男, 江苏启东人, 硕士研究生, 主要研究方向为 3S 集成与气象应用。E-mail: ghm5251@gmail.com

通信作者: 邹长新(1977—), 男, 辽宁朝阳人, 副研究员, 主要从事区(流)域生态效应评估与生态安全预警研究。E-mail: zcxnies@163.com

水量平衡的影响显著,气候变化时,径流的主要影响因素为降水,其次为气温;而影响陆面蒸散的主要气候因子为气温。气候变化对水量平衡的影响程度取决于降水和气温的变化幅度及其组合关系^[3]。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是在 SWRRB 模型基础上发展起来的一个大、中尺度的长时段分布式流域水文模型^[4],该模型具有很强的水文物理机制,可以在不同的土壤、土地利用类型、气候状况和人类活动干扰条件下做出有效的径流模拟预测^[5],在气候变化的水文效应方面,得到了广泛的应用。Cruise 等^[6]应用 SWAT 模型研究了不同气候变化条件下,美国东南部现在和未来水资源的变化情况,结果表明,在未来的 30~50 a,研究区的径流将会持续减少,水质恶化加剧;贺国平等^[7]利用 SWAT 模型分析了北京过去 10 a 径流量剧烈减少的主要原因,结果表明,尽管土地利用方式的变化使北运河年均径流量增加了 10%~20%,但是气候变化却使径流减少了 2/3。顾万龙等^[8]利用 SWAT 模型,针对河南中部农业区的特点,构建了该区域气候变化对水资源(径流)影响的评估模型,结果表明,地表径流、基流年内变化趋势与降水量的变化趋势一致,蒸散发是该地区水量的主要输出项,地表径流是基流的 2 倍左右,地表径流相对于降水有滞后性,基流滞后于降水 3 个月;张利平等^[9]探讨研究了 SWAT 模型在南水北调中线工程水源区的适用性,根据联合国政府间气候变化专业委员会第四次评估报告中大气环流模型多模式输出结果,分析了特别排放情景下 21 世纪降水、气温、径流、蒸发的响应过程。结果表明,与基准期相比,南水北调中线工程水源区 21 世纪气温将持续增高,年降水量将增加,径流量较基准期将会先减少后增大。梁小军等^[10]以 SWAT 模型为工具,建立了不同的土地利用和气候变化情景,模拟岷江上游流域不同情景的径流响应,结果表明,模拟径流量随着降水量的增加而增大,且增加量主要由雨季产生。

近年来,气候变暖趋势愈加严重,我国多处省市发生严重旱情,对人民生活 and 经济发展造成了重创。

由于地理环境因素,西北地区历来水量就相对偏少,是典型的干旱区域。因此,研究气候变化对当地径流的影响,对合理制定和调度水资源,保证当地用水安全具有重要意义。开都河流域是塔里木流域的一个子流域,流域面积 $2.2\times 10^4\text{ km}^2$,是巴州境内最大的一条内陆河,是我国最大的内陆淡水湖博斯腾湖最主要的补给源,是伊犁、巴州等地州经济发展和人类生活的重要水源保障,对塔里木河下游生态系统和环境有着重要作用。鉴于此,本研究以大山口水文站以上区域(面积约 $18\,311\text{ km}^2$)为研究区,拟采用卫星遥感数据、气象水文资料,借助遥感和 GIS 技术,基于 SWAT 水文模型,设定气候变化情景,模拟探讨不同气候条件下径流的响应特征,以为本地区水资源管理、可持续利用与发展和防旱防涝工作提供科学依据。

1 SWAT 模型模拟原理

SWAT 的地表径流模拟过程包括坡地汇流与河网汇流,前者指净雨从坡地表面汇入河网的过程,后者指进入河网的坡地径流向流域出口汇集的过程^[11]。根据水文循环原理,SWAT 的水文模型基于以下水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - Pe_i - QR_i) \quad (1)$$

式中: SW_t ——土壤的最终含水量(mm); SW_0 ——第 i 天可被植被吸收的土壤原始含水量,定义为原始土壤含水量减去凋萎点含水量(mm); t ——时间(d); R_i ——第 i 天的降水量(mm); Q_i ——第 i 天的地表径流量(mm); ET_i ——第 i 天的蒸散发(mm); Pe_i ——第 i 天存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量(mm); QR_i ——第 i 天的地下水回流量(mm)。

2 数据来源

本研究选择 Albers Conical Equal Area 投影,地理坐标选择 WGS-1984。SWAT 模型运行所需数据类型及来源详见表 1。

表 1 基础数据及来源

数据类型	尺度	格式	数据描述	数据来源
地形	90 m×90 m	ESRI GRID	高程、坡度	水文站
水系	1 : 1400 万	shapefile	河道分布	国家基础地理信息系统
土地利用图	30 m×30 m	shapefile	土地利用/土地覆被空间分布	遥感影像目视解译
土壤	1 : 100 万	ESRI GRID	土壤空间分布属性数据	西部环境与生态科学数据中心
气象	日数据	dBase Table	降水、气温、湿度和风速等	新疆气象局
水文	月数据	dBase Table	径流	新疆水文局大山口水文站

3 SWAT模型的建立

3.1 模型构建

研究区域出水口以上的流域面积为 18 311 km²,共提取 45 个子流域,344 个水文响应单元(HRUs)。输入研究区域气象水文资料、DEM 数据、土地利用和土壤数据,确定积雪/融雪参数^[12-14],以驱动 SWAT 模型运行。采用 SCS 径流曲线方法计算地表径流, Penman-monteith 方法计算潜在蒸发,模拟 1988—2009 年开都河流域逐月径流,其中 1988—1989 年为模型预热期,1990—1999 年为模型校准期,2000—2009 年为模型验证期。

3.2 参数率定

经过敏感性分析得出最敏感的 7 个参数依次为 Timp、Alpha_Bf、Gwqmn(mm)、Esco、Cn2、Gw_Delay 和 Ch_K2(mm/h),参数含义及具体数值见表 2。首先采用 SWAT 模型提供的自动参数率定模块对 7 个敏感参数进行自动率定,然后再根据自动率定结果,通过手动率定模块对率定结果进行有针对性的微调,以提高模型的模拟精度,参数率定结果如表 3 所示。

3.3 模拟结果评价

校准期模拟月径流与实测月径流过程比较曲线如图 1 所示,校准期月径流模拟效果较好,模拟径流趋势与实测趋势大致吻合,但是存在一个异常的模拟高值点(1994 年),使得整个时期的模拟精度降低。分析表 4 发现,1994 年的年降雨量明显高于其相邻的年份,年径流量也呈相同的特征,说明该年降雨骤增,是降雨异常高值年。有学者对此类现象进行了研

究,如 Tzyy-Woei^[15]的研究表明,SWAT 模型对降水异常高值年的模拟精度较差,宋艳华^[16]发现对于降水量出现骤增的年份,SWAT 模拟值会出现异常增高的现象,同时这种异常高值年会有延续性,且其后一年受其影响最大。

表 2 参数敏感性分析结果

参数名称	等级	参数值	参数意义
Timp	1	0.78	积雪温度滞后因子
Alpha_Bf	2	0.59	基流回退系数
Gwqmn	3	0.54	浅层蓄水体补偿深度
Esco	4	0.15	土壤蒸发补偿因子
Cn2	5	0.14	SCS 径流曲线数
Gw_Delay	6	0.14	地下水延迟天数
Ch_K2	7	0.12	主渠道有效水力传导率

表 3 研究区 SWAT 模型参数率定最终值

参数名称	输入文件	值域	参数最终值
Timp	*.bsn	0~1	0.97555
Alpha_Bf	*.gw	0~1	0.018
Gwqmn	*.gw	-1000~1000	-510.5
Esco	*.hru	0~1	0.95
Cn2	*.mgt	-25%~25%	24.922%
Gw_Delay	*.gw	-10~10	8
Ch_K2	*.rte	0~150	2.8

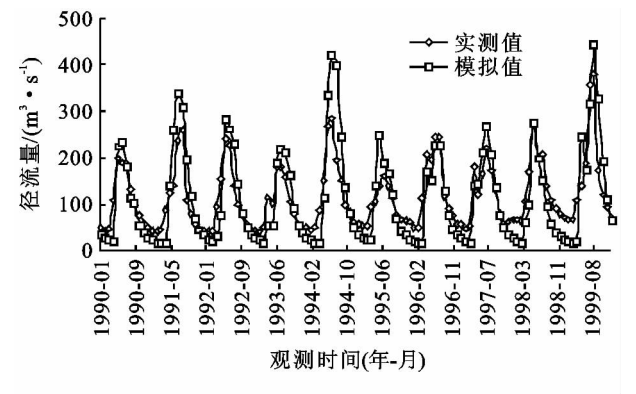


图 1 校准期月径流模拟值和实测值

表 4 1990—1999 年年降雨及年径流

年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
年降雨/mm	229.3	315.8	272.6	260.7	375.5	216.6	280.6	251.4	245.3	413.4
年径流/(m ³ ·s ⁻¹)	102.6	105.8	105.3	96.2	126.5	93.5	125.2	112.1	130.2	152.8

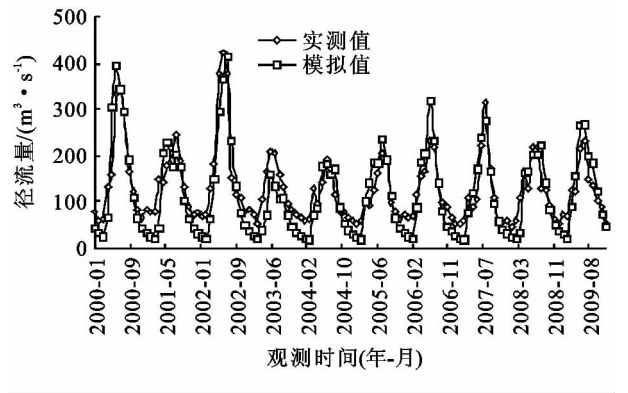


图 2 验证期月径流模拟值与实测值

验证期模拟月径流与实测月径流比较曲线如图

2 所示,模拟径流与实测径流趋势吻合度较高。分析效率系数 Ens、相对误差 RE 和线性拟合系数 R² 3 个评价指标,结果如表 5 所示。验证期(2000—2009 年)的效率系数 Ens、相对误差 RE 及线性拟合系数略好于校准期(剔除降水异常年 1994 年和 1995 年),分别为 0.67、-9.6% 和 0.81,均达到了模型评价标准,说明 SWAT 模型在开都河流域的适用性较好。

4 气候变化情景设计

4.1 情景设定

秦大河等^[17]在《中国西部环境演变评估综合报

告》中指出:2020—2030 年间,我国平均气温将增加 1.7℃,西北更高,将可能增加 1.9℃~2.3℃,到了 2050 年,全国均温将可能达到 2.2℃的增幅,同时不少地区的降雨也将出现不同程度的增加。

表 5 模型评价指标			
评价指标	评价标准	校准期(1990—1999) (剔除 1994 年、1995 年)	验证期 (2000—2009)
Ens	>0.5	0.58	0.67
RE/%	<30	−5.7	−9.6
R ²	>0.6	0.80	0.81

根据我国的气候变化趋势,基于 2000—2009 年气象资料,采用任意情景设置方法,分析气候变化对开都河流域径流的影响。具体建立的未来气候变化情景为:气温在原来的基础上分别变化+2℃,+1℃,0℃,−1℃和−2℃,降水在原来的基础上分别变化

表 7 开都河流域不同气温和降水情景组合下的径流模拟预测

项 目		降水变化				
		P (1+20%)	P (1+10%)	P	P (1−10%)	P (1−20%)
温 度 变 化	T+2℃	137.8	120.4	103.5	88.5	71.5
	T+1℃	144.4	126.7	109.6	94.2	76.7
	T	150.3	132.6	115.4	99.8	85.5
	T−1℃	155.9	138.2	121	105.3	87.6
	T−2℃	160.5	142.8	125.5	109.8	91.9
	T+2℃	22.4	5	−11.9	−26.9	−43.9
	T+1℃	29	11.3	−5.8	−21.2	−38.7
	T	34.9	17.2	0	−15.6	−29.9
	T−1℃	40.5	22.8	5.6	−10.1	−27.8
	T−2℃	45.1	27.4	10.1	−5.6	−23.5

由表 7 可知,开都河流域气候变化对径流的影响比较显著,分析结果如下:

(1) 开都河流域径流与降水呈正相关,与气温呈负相关。当降水 P 不变,温度 T 增加 1℃时,径流量减少 5.8 m³/s,温度 T 增加 2℃时,径流量减少 11.9 m³/s,说明温度越高,径流量越小;当温度 T 保持不变,降水 P 增加 10%时,径流量增加 17.2 m³/s,降水 P 增加 20%时,径流量增加 34.9 m³/s,说明降水越高,径流量越大。这可能是由于降水是径流主要的直接来源之一,降水增加,地表产流增加,径流也增加,而温度升高时,会促使研究区的蒸发量增加,导致径流减少。

(2) 开都河流域的径流变化同时受到气温和降水的影响,在降水和气温的不同情景组合下,流域径流变化显著。包括初始情况在内,本研究采用的 25 种情景组合方式中,能最大程度使研究区径流增大的是情景 S51,在此情景中,温度 T 下降 2℃,降水变化 20%,模拟所得的径流量为 160.5 m³/s,较初始情况

+20%,+10%,0%,−10%和−20%,包括原始情况在内,共有 25 种交叉组合方式,具体的组合方式如表 6 所示,土地利用/覆被数据采用 1990 年的数据。

表 6 开都河流域未来气候变化情景设置

项 目		降水变化				
		P× (1+20%)	P× (1+10%)	P	P× (1−10%)	P× (1−20%)
温 度 变 化	T+2℃	S11	S12	S13	S14	S15
	T+1℃	S21	S22	S23	S24	S25
	T	S31	S32	S33	S34	S35
	T−1℃	S41	S42	S43	S44	S45
	T−2℃	S51	S52	S53	S54	S55

4.2 模拟结果与分析

利用 SWAT 模型,对上述 25 个组合情况进行模拟,得到不同组合条件下的年均径流量、年均径流变化量,结果如表 7 所示。

S33 的径流量增加了 45.1 m³/s,增幅为 39.1%。而使当地径流减少最多的组合是情景 S15,在此情景中,温度 T 增加 2℃,降水 P 变化−20%,模拟所得径流量为 71.5 m³/s,比初始情况减少了 43.9 m³/s,降幅为 38%。

(3) 降雨对年径流的影响大于气温,当温度 T 保持不变,降水 P 增加 10%时,径流量增加 17.2 m³/s,增加了 14.9%。当降水 P 不变,温度 T 减少 2℃时,径流量增加 10.1 m³/s,增加了 8.8%,这表明未来研究区降水是影响年径流量变化的主要因素,气温对年径流的影响较弱,且气温对径流量的影响随降水的增加变化幅度也较小。

降水、气温的变化不仅导致了年均径流量的变化,其年内分布也导致了径流量的年内变化,这对研究区合理制定防旱防涝计划意义重大,因此有必要了解气温、降水对径流年内变化的影响。

由图 3 可知,当温度不变时,随着降水的增大,年内各月径流量呈现与降水相同的变化趋势,但各月的

增幅不同,其中,冬季(12月至次年2月)增幅最小,从春季(3—5月)开始增幅变大,到了夏季(6—8月)增幅达到最大,随后从秋季(9—11月)开始增幅又开始下降。这可能是由于冬季温度较低,降水多为固态降水,不易形成径流,春季冰雪融化,径流增大。

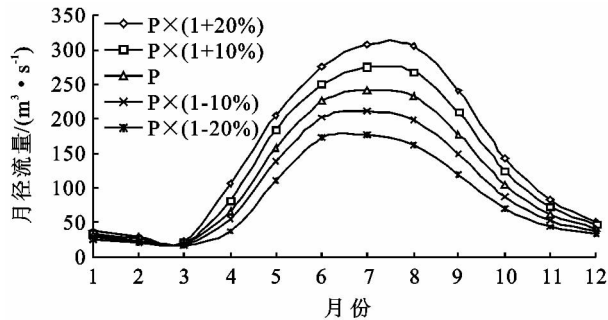


图3 温度不变降水变化条件下径流年内变化曲线

图4表示降水不变温度变化条件下的径流年内变化曲线。在降水不变,温度上升的情况下,除了春季径流略有上升外,其他各月径流都呈减小趋势。造成这种现象的原因很复杂,可能是由于在降水不变的情况下,气温上升导致当地冰川总面积逐年减少,且蒸发也随着温度升高而增加,最终造成径流减少。

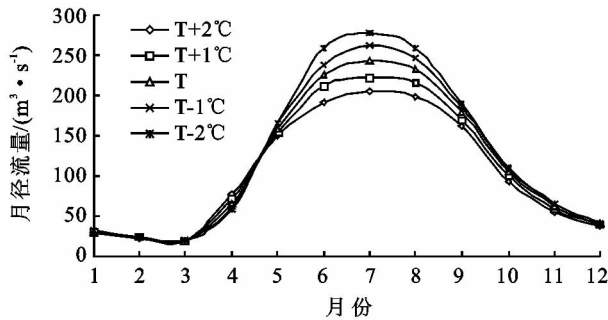


图4 降水不变温度变化条件下径流年内变化曲线

5 结论与讨论

利用 SWAT 模型,结合 RS 和 GIS 技术,以新疆典型的高寒山区开都河流域为例,研究了当地气候变化对流域径流的影响,得到的结论主要有:

(1) 开都河流域的 SWAT 月径流模拟结果与实测径流较吻合,剔除降水异常年 1994 年和 1995 年后,校准期(1990—2000 年)效率系数为 0.58,平均相对误差为 -5.7%,线性拟合度为 0.8,验证期(2000—2009 年)的结果与校准期接近,均达到了模型的评价标准,说明 SWAT 模型在开都河流域的适用性较好。

(2) 通过假定未来的气候变化情景,探讨了开都河流域径流对气候变化的响应,结果表明,开都河流域年均径流与降水呈正相关,与气温呈负相关。降水对年径流的影响大于气温,当温度 T 保持不变,降水

P 增加 10% 时,径流量增加 $17.2 \text{ m}^3/\text{s}$,增加了 14.9%。当降水 P 不变,温度 T 减少 2°C 时,径流量增加 $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$,增加了 8.8%,这表明未来研究区降水将是影响年径流量变化的主要因素,气温对年径流的影响较弱,且气温对径流量的影响随降水的增加变化幅度也较小。

(3) 在不同的降水和气温变化情景组合下,流域年均径流变化显著。其中,能最大程度使研究区径流增大的是情景 S51,在此情景中,温度 T 下降 2°C ,降水变化 20%,模拟所得的径流量为 $160.5 \text{ m}^3/\text{s}$,相较初始情况 S33 的径流量增加了 $45.1 \text{ m}^3/\text{s}$,增幅为 39.1%。而使当地径流减少最多的组合是情景 S15,在此情景中,温度 T 增加 2°C ,降水 P 变化 -20%,模拟所得径流量为 $71.5 \text{ m}^3/\text{s}$,比初始情况减少了 $43.9 \text{ m}^3/\text{s}$,降幅为 38%。

由于人类对复杂气候系统认识的局限性,预测未来气候变化对流域水文循环过程的影响是一个复杂的过程,研究存在着很多的不确定性。SWAT 模型没有考虑未来下垫面变化对径流的影响以及气候变化对流域下垫面条件的影响,但从总体上不会改变未来水文循环要素的变化趋势^[1,18-19]。本文探讨了开都河流域径流过程对未来气候变化的响应,但气候变化背景下极端水文事件的变化、预测结果的不确定性、下垫面影响、模型参数不确定性分析^[20]等问题,还需进一步深入研究和探讨。

参考文献:

- [1] 张利平,曾思栋,王任超,等.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.
- [2] 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.
- [3] 许海丽,潘云,宫辉力,等.1959—2000 年妫水河流域气候变化与水文响应分析[J].水土保持研究,2012,19(2):43-47.
- [4] 丁飞,潘剑君.分布式水文模型 SWAT 的发展与研究动态[J].水土保持研究,2007,14(1):33-37.
- [5] 吴军,张万昌. SWAT 径流模拟及其对流域内地形参数变化的响应研究[J].水土保持通报,2007,27(3):52-58.
- [6] Cruise J F, Limaye A S. Assessment of impacts of climate change on water quality in the southeastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(6):1539-1550.
- [7] 贺国平,张彤,周东.土地覆被和气候变化的水文响应研究[J].北京水务,2006(3):27-31.
- [8] 顾万龙,竹磊磊,许红梅,等. SWAT 模型在气候变化对水资源影响研究中的应用:以河南省中部农业区为例[J].生态学杂志,2010,29(2):395-400.

必要的参考。

(3) 连江流域下游的控制站高道水文站的 Ens、决定系数和相对误差值高于上游的凤凰山水文站和黄麝塘水文站,而高道水文站的集水面积(9 007 km²)明显大于凤凰山水文站(1 555 km²)和黄麝塘水文站(645 km²),在一定程度上表明 SWAT 模型更适合应用于大尺度流域。

参考文献:

- [1] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [2] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation [EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>, 2002-05-16/2012-10-04.
- [3] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of Hydrology,1993,142(1/4):47-69.
- [4] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. Journal of Hydrology, 2001,251(1):103-109.
- [5] Gikas G D, Yiannakopoulou T, Tsihrintzis V A. Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin[J]. Environmental Modeling and Assessment,2006,11(3):219-233.
- [6] 郝芳华,张雪松,程红光,等. 分布式水文模型亚流域合

理划分水平刍议[J]. 水土保持学报,2003,17(4):75-78.

- [7] 王中根,郑红星,刘昌明. 基于模块的分布式水文模拟系统及其应用[J]. 地理科学进展,2005,24(6):109-115.
- [8] 刘昌明,李道峰. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(5):437-445.
- [9] 卢爱刚,索安宁,张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. 水土保持研究,2011,18(2):57-65.
- [10] 肖军仓,罗定贵,王忠忠. 基于 SWAT 模型的抚河流域土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究,2013,20(1):14-24.
- [11] 李佳,张小咏,杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):119-128.
- [12] 甘春英,王兮之,李保生,等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学,2011,31(8):1019-1024.
- [13] 王兮之,甘春英,梁钊雄,等. 粤北岩溶山区连江流域植被覆盖度动态变化研究[J]. 中国岩溶,2010,29(4):425-433.
- [14] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2005,306(1/4):127-145.
- [15] 杨军军,高小红,李其江,等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究,2013,20(1):82-93.
- [16] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006:54-56.

(上接第 139 页)

- [9] 张利平,秦琳琳,胡志芳,等. 南水北调中线工程水源区水文循环过程对气候变化的响应[J]. 水利学报,2010,41(11):1261-1271.
- [10] 梁小军,江洪,朱求安,等. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):30-33.
- [11] 罗巧,王克林,王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2011,19(6):1431-1436.
- [12] 袁长旭,姜卉芳. 天山山区水文模型参数的区域分布规律[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(3):65-69.
- [13] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2010:181-184.
- [14] 马丽娟,赵景峰,张宏俊,等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J]. 干旱区地理,2010,33(2):210-216.

- [15] Tzyy-Woei Chu. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in piedmont physiographic[D]. College Park: University of Maryland, 2003.
- [16] 宋艳华. SWAT 辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[D]. 兰州:兰州大学,2006:57-59.
- [17] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [18] 邱国玉,伊婧,熊育久,等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报,2008,23(2):211-218.
- [19] 吴宇丹. 变化环境下的北京市典型流域径流演变规律[D]. 北京:北京师范大学,2009.
- [20] 杨军军,高小红,李其江,等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究,2013,20(1):82-88.