

关川河流域土地利用变化对径流的影响

赵传普¹, 徐学选^{1,2}, 陈天林³, 张少妮²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 甘肃省水利厅水土保持局, 兰州 730000)

摘 要:土地利用/覆被变化(LUCC)引起的径流响应研究不仅是流域水文学的一个热点,也是评估国家退耕还林战略实施效果的需要。选择黄土高原西部关川河流域为对象,依据流域出口大羊营水文站 1993—2001 年期间 5—9 月的径流资料,对 SWAT 模型进行参数率定。进而利用率定后的 SWAT 模型计算 1980 年、2000 年两期土地利用下的径流量,分析土地利用变化的水文响应。结果表明:模拟率定期和验证期的决定系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为:0.85, 0.78 和 0.86, 0.84, 说明模型对关川河流域汛期径流量模拟具有较高的适用性;关川河流域在实施了退耕还林草后,2000 年较 1980 年耕地大面积减少而草地大面积增加。在气象条件相同的前提下,即气象输入数据不变的情况下,2000 年土地利用下的月径流模拟值相比 1980 年土地利用下的月径流降低,9 a 内年均(5—9 月份)径流量减少 $1.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 。既在气候不变情况下,林草植被恢复将会引起流域径流趋于减少。

关键词:关川河流域;土地利用变化;SWAT 模型;径流模拟

中图分类号:F301.24; S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0083-05

Impact of Land Use Changes on the Streamflow in Guanchuanhe Watershed

ZHAO Chuanpu¹, XU Xuexuan^{1,2}, CHEN Tianlin³, ZHANG Shaoni²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Soil and Water Conservation Bureau, Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Research about the response of runoff on land use/cover change(LUCC) is not only a hotspot of watershed hydrology, but also the need for assessing the effect of the National Strategy of Grain for Green. In this study, based on the nine-year (1993—2001) runoff data from May to September at Dayangying hydrological station which is located in the outlet of Guanchuanhe Watershed, parameters of the SWAT model were calibrated. Then the runoff rates in 1980 and 2000 were simulated using the the calibrated SWAT model, and the impact of land use change on the streamflow was analyzed. The results showed that the correlation coefficients and Nash-Sutcliffe's coefficients in the period of calibration and validation were 0.85 and 0.78, 0.86 and 0.84, respectively, suggesting that SWAT model was well available for simulating flood runoff in this watershed; after the implementation of 'Grain for Green' in the area, compared with 1980, the area of arable land decreased while area of grassland increased greatly in 2000. Under the same climatic condition, the monthly simulated runoff in 2000 decreased compared with that of 1980, and the nine-year annual average runoff (May-September) reduction was $1.39 \text{ m}^3/\text{s}$. The runoff tended to decrease due to vegetation restoration under the condition of same climates.

Keywords: Guanchuanhe Watershed; land use change; SWAT model; runoff simulation

流域水文过程主要受气候与土地利用变化的影响,短时间内流域水文过程变化的主要驱动因素是人为活动引起的土地利用变化^[1-3]。以往研究多采用对比流域法、时间序列分析法^[4-6],自 1970 年以来,土地利用变化的水文响应研究从传统的统计分析方法转

向水文模型方法^[7-8],其中美国农业部开发的 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool),能够充分反映下垫面条件的空间分异性,真实模拟流域水文过程^[8],为土地利用的径流响应研究提供了有效的研究途径。在我国黄土高原地区,已有大量基于 SWAT

收稿日期:2014-07-10

修回日期:2014-08-19

资助项目:甘肃省科技支撑项目“水土保持对西部黄土高原河川径流调控作用研究”(1104FKCA146);中国科学院重点项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03);中国科学院外国专家特聘研究员计划(2013T2Z0027)

第一作者:赵传普(1990—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为流域管理。E-mail:chuanpu2008ok@163.com

通信作者:徐学选(1966—),男,陕西大荔人,博士,研究员,主要从事土壤水分生态研究。E-mail:xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

模型的应用研究。如李星^[9]利用 SWAT 模型对黄土丘陵区燕沟小流域(47 km²)2002—2008 年月径流进行模拟,得到了较好的模拟效果;魏丹^[10]基于 SWAT 模型对陕北秃尾河流域(3 294 km²)进行径流模拟,研究发现汛期(5—10 月)径流模拟效果较好;程磊^[11]在窟野河流域(8 706 km²)应用 SWAT 模型模拟了 1980—1985 年的径流量,并探讨了模型应用中可能存在的问题;宋艳华^[12]以华家岭南河流域(1 125 km²)为研究区,研究了 SWAT 模型在陇西黄土高原的适用性;杨军军^[13]在湟水流域(16 120 km²)构建 SWAT 模型进行流域径流模拟,并对模型参数不确定性进行分析。研究涉及的流域尺度为 47~16 120 km²,且都取得较好的模拟效果,表明 SWAT 模型在黄土高原具有良好的适用性。但已往研究多集中在 SWAT 模型的适用性,基于模型评价土地利用变化对径流影响的研究则较少。

本研究将基于 SWAT 水文模型,构建关川河流域径流模拟系统,比较分析 1980 年、2000 年土地利用下径流变化,旨在定量分析土地利用变化对流域产流的影响,为评价该区前期生态治理效益及后续生态治理措施的调整提供理论依据。

1 研究区概况

关川河流域位于 35°17′—36°14′N,104°12′—105°01′E,属半干旱黄土丘陵沟壑区。关川河发源于甘肃省定西市境内,为祖厉河的一级支流,全长百余千米,流域面积约 3 511 km²。流域海拔为 1 520~2 570 m,属中温带半干旱气候。年平均气温为 7.2℃,多年平均降水量 370 mm,且主要集中于 7—9 月份,年蒸发量 1 400 mm 以上。土壤类型以黄绵土为主,植被覆盖率低。境内沟壑纵横,梁峁起伏,水土流失严重,平均年土壤侵蚀模数为 5 252.7 t/(km²·a)^[14]。自 1987 年,关川河流域就实施了水土保持综合治理工程^[15],1987—1991 年为重点治理年份(世行贷款),治理度达 68%,截至 1991 年就已经奠定了 2000 年土地利用的基础。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

本文采用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的 30 m 分辨率数字高程模型(DEM),利用 ArcGIS 对其进行投影转换、裁剪。由美国地质勘探局(<http://www.glovis.usgs.gov>)下载 1980 年、2000 年 Landsat TM 遥感影像数据,空间分辨率为 30 m。根据我国土地利用现状分类标准(GB-T21010—2007)及 SWAT 模型分类系统,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、居民地、荒地

6 类,耕地、林地、草地占流域总面积 95% 以上(表 1),土地利用类型分布见附图 3。土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)提供的全球土壤数据库(HWSD),分辨率 100 m,中国境内数据源为南京土壤所第二次全国土地调查结果,运用 SPAW 软件计算土壤相关属性参数,该区土壤空间分布见附图 4。由定西市水文水资源勘测局获得流域出口大羊营站 1990—2001 年 5—9 月份的实测逐日径流数据。华家岭、会宁、靖远、临洮、榆中 5 个气象站的气象数据来源于黄土高原生态环境数据库(<http://www.loess.csdb.cn/pdmp/index.action>),包括 1990—2001 年的日降水、气温、风速、相对湿度和太阳辐射数据。

表 1 关川河流域不同年份土地利用对比

土地利用类型	1980 年		2000 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	1981.58	56.44	1304.52	37.15
林地	78.70	2.24	86.29	2.46
草地	1415.64	40.32	2042.92	58.19
水域	1.31	0.04	1.68	0.05
居民地	17.08	0.49	58.37	1.66
荒地	16.73	0.48	17.26	0.49

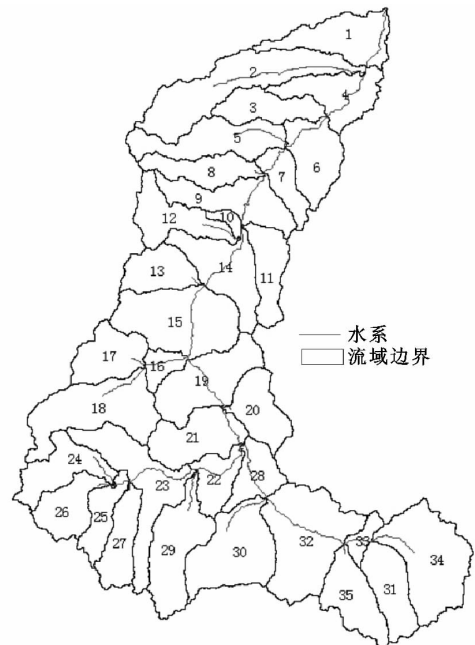


图 1 关川河流域子流域划分

2.2 模型校准和验证方法

以大羊营水文站为流域出口断面,对流域 1990—2001 年的月径流进行模拟,将 1990—1992 年作为模型预热期,1993—1997 年为模型校准期,1998—2001 年为模型验证期。采用 LH-OAT 采样法^[16]进行参数敏感性分析,应用 SUFI-2 算法^[17]对敏感参数进行率定,最后确定模型参数值。采用决定系数(R^2)和 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS 系数),评价模拟径流量和实测径流量的拟合程度。具体计算

公式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})(Q_{p,i} - Q_{p,avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{p,avg})^2} \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})^2} \quad (2)$$

式中: $Q_{m,i}$ ——实测流量; $Q_{p,i}$ ——模拟流量; $Q_{m,avg}$ ——多年实测平均流量; $Q_{p,avg}$ ——多年模拟平均流量; n ——实测时间序列长度。一般认为,当 $R^2 > 0.60$ 且 $NS > 0.50$ 时模型的拟合程度令人满意^[18-19]。

2.3 土地利用变化下的径流模拟方法

基于研究区 DEM 进行河网提取,选取河道最小汇水面积阈值(6 960 hm²),将流域划分为 35 个子流域(图 1),通过叠加研究区土壤图和 2000 年土地利用图,并输入 1990—2001 年期间日气象数据进行径流模拟,用流域出口大羊营站实测径流数据进行校准和验证。当模型校准和验证完成,模型参数值确定后,在其他输入数据相同的条件下,用 1980 年土地利用数据替代 2000 年土地利用数据进行径流模拟。最终,定量分析土地利用变化对整个流域产流的影响。

3 结果与分析

3.1 模型校准与验证

由于模型运行前期,有些变量初始值为 0,对模

型模拟结果影响较大,故本文选择 1990—1992 年作为预热期,合理估算模型参数的初始值。将流域 2000 年的土地利用和 1993—1997 年的气象和水文数据代入模型,通过 LH-OAT 采样法对影响径流的参数进行敏感性分析。选取对流域径流影响较大的 11 个参数,利用 1993—1997 年实测月径流应用 SUFI-2 算法对参数进行率定,率定的最终参数值见表 2。本研究中 CN2 值是影响径流的核心参数,它是土壤渗透性、前期土壤水分状态、土地利用类型等的综合反映,随着 CN2 值的增大,径流量增大而且渗透量减小;第二敏感参数是 SOL_AWC(1),该值反映了土壤的蓄水能力,减小 SOL_AWC(1)的值,可以增加土层间的水分运移;第三敏感参数是 ESCO,ESCO 值对土壤蒸发过程有较大的影响,随着 ESCO 值的减小,土壤水分蒸发则会延伸至更深的土壤层,水分的入渗量会增大,地表径流相应的变小;第四敏感参数是 SOL_K,随着 SOL_K 值的减小,土层中的横向流会减小;第五敏感参数是 ALPHA_BF,该值可以影响基流衰退曲线,数值较大则地下径流的再分配则比较快,是影响流域地下径流参数中最直接的;第六敏感参数是 GWQMN,它可以控制地下水的总量,同时也能够影响地表径流量,GWQMN 如果取低值,可以使地表径流量增大;第七敏感参数是 EPCO,EPCO 是植物蒸腾补偿系数,可以调节深层土壤水;其他参数也对径流有不同程度的影响。

表 2 关川河流域径流模拟敏感参数最佳值

敏感性排序	参数名称	参数含义	范围		最佳值
			初始	最终	
1	r_CN2	SCS 径流曲线系数	-0.25~0.25	-0.17~-0.12	-0.14
2	r_SOL_AWC(1)	表层土壤有效含水量	0.05~0.25	0.20~0.50	0.35
3	v_ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.01~1.00	0.05~0.20	0.17
4	r_SOL_K	土壤饱和导水率	-0.15~0.15	-0.12~0.10	0.08
5	v_ALPHA_BF	基流消退系数	0.00~1.00	0.52~0.73	0.65
6	r_GWQMN	浅层地下水产生基流的阈值深度	0.00~0.50	0.03~0.43	0.36
7	v_EPCO	植物蒸腾补偿系数	0.01~1.00	0.24~0.45	0.40
8	r_CH_N2	主河道曼宁系数	0.00~0.30	0.02~0.06	0.04
9	v_CH_K2	主河道水力传导率	0.00~500.00	32.00~43.00	36.00
10	v_SURLAG	地表径流滞后系数	0.00~24.00	13.25~16.58	15.63
11	v_GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.10~0.20	0.12~0.16	0.15

注:r_表示参数值被赋予原值的若干倍,v_表示参数值被赋予值取代。

在校准期:1994 年、1996 年、1997 年汛期径流模拟值大于实测值,而 1995 年小于实测值,决定系数 R^2 为 0.85,Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.78。在验证期:径流模拟变化趋势与实测值基本一致,1999 年模拟峰值低于观测值外,其余年份均大于观测峰值。决定系数 R^2 为 0.86,Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.84。模型模拟期和验证期的 $R^2 > 0.60$ 且 $NS >$

0.50,说明径流模拟值和实测值拟合程度较好,即 SWAT 模型能较好地模拟该区径流量(图 2)。

3.2 土地利用变化的径流响应

模型参数值确定后,将 1980 年土地利用数据代入已经率定好的 SWAT 模型,应用 1993—2001 年 5—9 月份气象数据对期间的径流量进行模拟,并与 2000 年土地利用下的径流模拟值进行比较(图 3)。

1980 年与 2000 年土地利用下的月径流变化趋势较为一致,且都和降雨量变化趋势相一致;1980 年土地利用下的月径流模拟值一般大于 2000 年土地利用下的径流模拟值,降雨量较大的月份尤为明显,这

主要是由于退耕还林草措施实施后,2000 年土地利用中耕地面积减少而草地面积大量增加(表 1),使 2000 年土地利用下径流量较 1980 年土地利用下径流量减少。

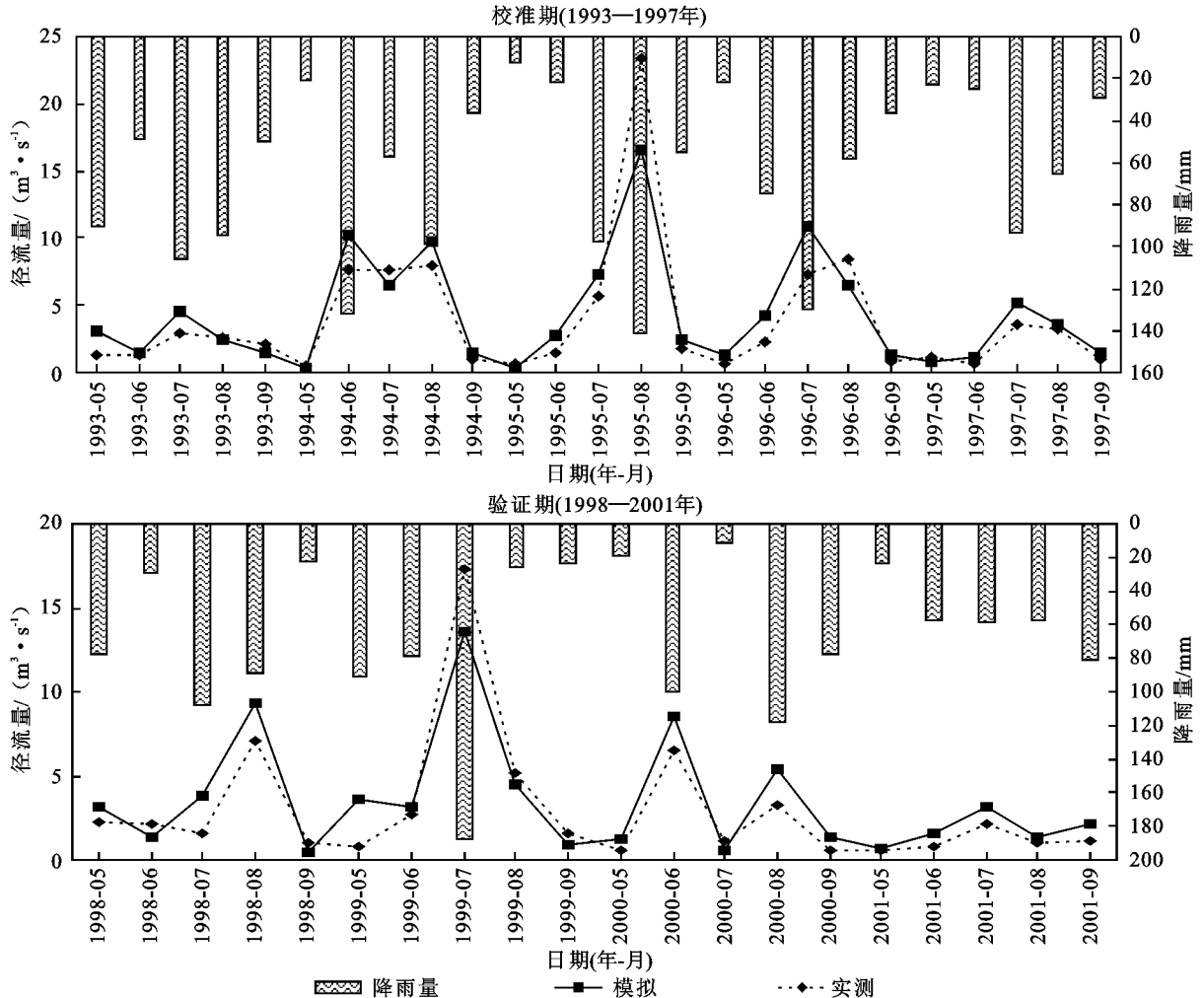


图 2 SWAT 模型对关川河流域月径流模拟的校准和验证

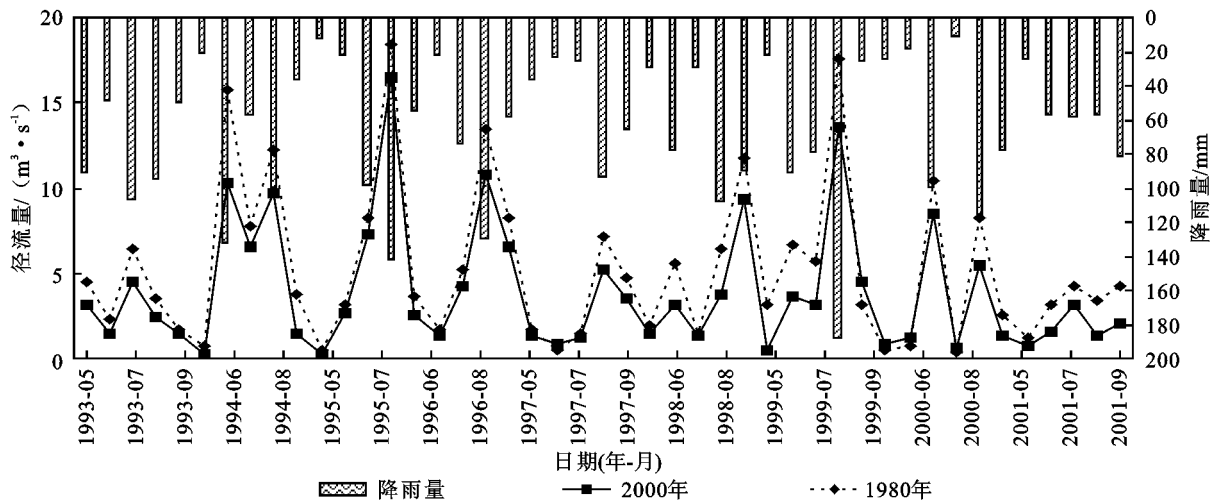


图 3 不同年份土地利用类型下月径流模拟结果

由表 3 可以看出,在模拟期,2000 年土地利用下的径流量小于 1980 年土地利用下的径流量,1994 年

径流变化量达到 $-2.4 \text{ m}^3/\text{s}$,1997 年径流变化量为 $-0.72 \text{ m}^3/\text{s}$,2000 年土地利用下多年平均径流量

较 1980 年减少了 1.39 m³/s。

表 3 1980 年、2000 年土地利用下 5—9 月径流均值					
年份	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)		变化量	变化率/ %	5—9 月 降雨量/mm
	1980 年	2000 年			
1993	3.68	2.60	−1.08	29.35	390.65
1994	8.06	5.66	−2.4	29.78	345.90
1995	6.80	5.86	−0.94	13.82	327.90
1996	6.07	4.84	−1.23	20.26	320.55
1997	3.14	2.42	−0.72	22.93	234.95
1998	5.68	3.60	−2.08	36.62	324.85
1999	6.74	5.16	−1.58	23.44	406.40
2000	4.42	3.40	−1.02	23.08	325.65
2001	3.24	1.77	−1.47	45.37	277.65
平均值	5.31	3.92	−1.39	26.18	328.28

4 结 论

(1) 本文应用 SWAT 模型,定量模拟分析了关川河流域土地利用变化对径流的影响。结果表明,模型率定期和验证期的径流模拟值与实测值拟合程度较高,决定系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为:0.85,0.78 和 0.86,0.84,说明 SWAT 模型对关川河流域径流模拟具有一定适用性。

(2) 径流受降雨量控制明显,径流量曲线与降雨量变化同步性强,2 期土地利用下的径流量变化动态与降雨量变化动态十分相似。

(3) 在 1993—2001 年气候条件下,1980 年土地利用和 2000 年土地利用下的月径流变化趋势较为一致,但后者多年平均(5—9 月)径流量较前者减少 1.39 m³/s。表明黄丘陵区关川河流域大面积坡耕地转化为草地有效减少汛期径流,减少幅度在 20%~46%。该结果对于评价西北生态恢复、调整恢复措施等有参考意义。

致谢:感谢张文帅在 GIS 数据处理方面提供的宝贵意见!

参考文献:

[1] 刘昌明,李道峰,田英. 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.

[2] 傅伯杰,陈利顶,王军,等. 土地利用结构与生态过程[J]. 第四纪研究,2003,23(3):247-255.

[3] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报:自然科学

版,2010,46(3):290-298.

[4] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):388-397.

[5] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(14):236-243.

[6] 徐学选,高朝侠,赵娇娜. 1956—2009 年延河水沙变化特征及其驱动力研究[J]. 泥沙研究,2012(2):12-18.

[7] 张兰影,庞博,徐宗学,等. VIC 模型与新安江模型径流模拟对比研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2):139-144.

[8] 孙立群,胡成,陈刚. TOPMODEL 模型中的 DEM 尺度效应[J]. 水科学进展,2008,19(5):699-706.

[9] 李星,徐学选,宇苗子,等. SWAT 模型在黄土丘陵区燕沟流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2012,32(3):141-144.

[10] 魏丹,刘智勇,李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):200-206.

[11] 程磊,徐宗学,罗睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用:以窟野河流域为例[J]. 地理研究,2009,28(1): 65-73.

[12] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型在陇西黄土高原地区的适用性研究[J]. 干旱区地理,2007,30(6):933-938.

[13] 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.

[14] 万廷朝. 定西市淤地坝建设成效与经验[J]. 水土保持通报,2005,25(6):89-104.

[15] 边作仁,周汉漪,刘瑾. 关川河流域水土保持综合治理工程初见成效[J]. 中国水土保持,1992(2):11-15.

[16] 芮孝芳,朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):56-58.

[17] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2005,30(8):518-526.

[18] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Trans. Asabe,2007,50(3):885-900.

[19] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association,2001,37(5):1169-1188.