

基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊 河流域月径流分布式模拟

宋增芳¹, 曾建军², 金彦兆¹, 胡想全¹, 孙栋元¹, 卢书超¹, 张云亮¹

(1. 甘肃省水利科学研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 揭示石羊河流域径流量对土地利用变化的响应机制, 为旱区水资源的合理配置和优化利用提供理论依据。[方法] 利用石羊河流域 DEM、气象、土壤、1995 与 2000 年 2 期土地利用等数据, 结合 RS 和 GIS 技术, 构建 SWAT 分布式水文模型。基于 SWAT 模型及 SUFI-2 算法, 对石羊河流域 1980—2009 年的月径流过程进行模拟。[结果] 流域内 1995 与 2000 年土地利用均以耕地、林地、城乡工矿居民用地面积显著增加, 草地、水域、未利用地减少为主; 影响 SWAT 模型模拟效果前 3 位的参数分别是 CN_2 , α_{Bf} , T_{imp} ; 校正期和验证期月流量的模拟值和实测值拟合较好, 其 Nash Sutcliffe 系数 E_{ns} 和相关系数 R^2 均大于 0.8, 相对误差 $|R_e|$ 均小于 10%。[结论] 采用 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在石羊河流域月径流模拟中具有一定程度的适宜性。

关键词: 石羊河流域; SWAT 模型; SUFI-2; 径流; 模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)05-0172-06

中图分类号: S273.29

文献参数: 宋增芳, 曾建军, 金彦兆, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 172-177. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.035

Distributed Simulation of Monthly Runoff Using SWAT and SUFI-2 Algorithm in Shiyang River Basin

SONG Zengfang¹, ZENG Jianjun², JIN Yanzhao¹,

HU Xiangquan¹, SUN Dongyuan¹, LU Shuchao¹, ZHANG Yunliang¹

(1. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. College of Resources and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to reveal the response mechanism of runoff to land use changes in Shiyang river, in order to provide theoretical basis for reasonable allocation and optimization of water resources in arid areas. [Methods] Using various data derived from watershed DEM(digital elevation model), land use, soil and meteorology and combined with GIS(geographic information system) and RS(remote sensing) technology, we developed a distributed hydrological model with SWAT(soil and water assessment tool). Based on SWAT Model and SUFI-2 algorithm, we simulated monthly hydrograph in the Shiyang river basin from 1980 to 2009. [Results] The top three sensitive parameters influencing model were CN_2 , α_{Bf} and T_{imp} . The simulated values of calibration and validation periods were in accordance with actual values, Nash-Sutcliffe and R^2 efficiency coefficient E_{ns} were higher than 0.8, the relative errors $|R_e|$ were all less than 10%. [Conclusion] The result of the present work implied that the SWAT model of SUFI-2 algorithm is suitable for the simulation of the monthly runoff in Shiyang river basin.

Keywords: Shiyang river; SWAT model; SUFI-2; runoff; simulation

收稿日期: 2015-11-04

修回日期: 2015-11-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“气候与土地利用变化对石羊河流域水资源影响研究”(51369003), “疏勒河流域中游绿洲生态需水过程与阈值研究”(51369004)

第一作者: 宋增芳(1986—), 女(汉族), 甘肃省甘谷县人, 硕士, 工程师, 主要从事农业水土方面的研究工作。E-mail: szfjiayou@163.com。

通讯作者: 孙栋元(1978—), 男(汉族), 甘肃省民乐县人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的研究工作。E-mail: gsasundy@126.com。

石羊河位于中国西北内陆河流域,全长 300 km,是中国西北用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的地区,也是中国干旱内陆河水资源开发利用程度最高、人口最密集的地区。其和黑河、疏勒河一并被称为甘肃省 3 大内陆河流域。石羊河多年平均径流量 $1.56 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。关于石羊河流域气候与水文的关系,已有专家学者开展了相关研究^[1-3],这些研究多侧重于气候变化对水资源的影响,例如气候变化对石羊河出山口径流的影响研究^[4],石羊河流域水文要素变化特征分析^[5],气候变化趋势分析^[6],极端干旱事件的时空变化特征^[7],径流变化趋势分析^[8]等。然而,目前对该流域的水文过程的研究较少,张若琳^[9]研究了石羊河流域水资源分布特征及其转化规律,探讨了武威和民勤 2 个盆地水资源转化关系,讨论了整个石羊河流域大气水、融雪水、地表水及地下水之间的转化关系。

分布式水文模型是近些年来水文建模领域的热点^[10]。本研究是应用一种基于 GIS 支持下的分布式流域水文模型 SWAT,结合石羊河流域 1980—2009 年气象、水文数据以及土地利用图、土壤图等数据资料,根据石羊河流域的气候、水文、土壤等特点,对 SWAT 模型涉及到的参数进行参数敏感性分析与率定,并对流域内月径流量进行模拟与验证。

1 研究区概况

选择石羊河流域作为研究区域。石羊河流域地理位置为东经 $101^\circ 41'$ — $104^\circ 16'$,北纬 $36^\circ 29'$ — $39^\circ 27'$,位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,东南与甘肃省白银、兰州两市相连,西北与甘肃省张掖市毗邻,西南紧靠青海省,东北与内蒙古自治区接壤,全长 300 km,流域总面积 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11]。石羊河发源于祁连山区冷龙岭冰川,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和西大河等 8 条河流组成,河流以山区大气降水和高山冰雪融水为补给来源,产流面积 $1.10 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量 $1.56 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[12]。流域地势南高北低,地貌格局多样,分为南部祁连山地、中部走廊平原区、北部低山丘陵区及荒漠区 4 大地貌单元。流域内土地利用类型以未利用土地、草地为主,主要土壤类型以半固定风沙土、盐化灰棕漠土为主。石羊河流域属大陆性温带干旱季风气候区,气候干燥,降水稀少,自南向北分为 3 个气候区。南部祁连山高寒半干旱半湿润区,年降水量 300~600 mm;中部走廊平原温凉干旱区,年降水量 150~300 mm;北部温暖干旱区,年降水量小于 150 mm^[13]。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究数字高程模型 DEM 是从地理空间数据云上下载的 30 m 分辨率数据,利用 ArcGIS 进行拼接、剪裁、投影处理后得到该流域的 DEM 图。采用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提供的 1995,2000 年的土地利用数据,根据研究区实际情况经遥感解译获取 6 种土地利用类型,并结合研究区特点和 SWAT 模型分类系统,将石羊河流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地、未利用土地 6 类。

土壤类型数据拟采用中国科学院南京土壤所完成的 1:100 万中国土壤类型图,利用 GIS 软件进行投影转换和切割,得到本研究区的土壤类型图,储存成 grid 或 shape 格式。研究区的土壤共有 12 种土壤类型。研究区土壤类型及分布见表 1。

表 1 石羊河流域内土壤类型统计

土壤代码	面积/km ²	亚类	土类	土纲
23118100	4 076.51	内陆盐土	盐土	盐碱土
23115141	6 610.55	半固定风沙土	风沙土	初育土
23120151	566.52	寒漠土	寒漠土	高山土
23120132	683.55	巴嘎土(亚高山草原土)	冷钙土	
23120102	2 291.08	草毡土(高山草甸土)	草毡土	
23112111	2 467.57	暗栗钙土	栗钙土	钙层土
23111121	1 838.69	灰褐土	灰褐土	半淋溶土
23114104	5 596.65	盐化灰棕漠土	灰漠土	漠土
23114101	4 443.78	绿洲灰土		
23116112	474.53	砂姜黑土	砂姜黑土	半水成土
23113113	3 023.46	草甸灰钙土	灰钙土	干旱土
23112101	3 242.82	黑钙土	黑钙土	钙层土

本次研究主要是针对石羊河流域的径流模拟,因此构建土壤属性数据库^[14-15]主要是确定物理属性数据。SWAT 模型需要的土壤物理属性数据见表 2。

土壤水文学分组 HYDGRP、地表反射率 SOL_ALB、土壤侵蚀力因子 USLE_K 等参数根据经验公式求得,土壤湿密度 SOL_BD、有效持水量 SOL_AWC、饱和导水率 SOL_K 等参数运用 SPAW 软件计算求得,根系最大深度 SOL_ZMX、各土壤层底层到土壤表层的深度 SOL_Z、土壤各层中的黏粒、粉沙、沙粒、砾石含量等数据资料来源于《甘肃土壤志》、《甘肃土种志》及研究区各县区土壤志。

水文数据采用石羊河流域管理局提供的流域出山口 1980—2009 年实测逐日径流数据进行模型敏感性分析和参数率定。气象数据来源于中国气象科学

数据共享服务网,选取 1980—2009 年逐日降水、日最高、日最低气温、辐射、风速和相对湿度等气象观测数据计算模型天气发生器所需的统计参数,用于生

成气候数据以及填补缺测数据。以上数据资料经手工录入到 Excel 后,均按模型要求以 dbf 格式文件储存。

表 2 土壤属性数据库参数

参数名	说 明	获取方式
TITLE/TEXT	位于 .sol 文件的第一行,用于说明文件	资料查询
SNAM	土壤名称	资料查询
NLAYERS	土壤分层数	资料查询
HYDGRP	土壤水文学分组(A,B,C 或 D)	计 算
SOL_ZMX	根系最大深度(mm)	资料查询
AN10 N_EXCL	阴离子交换孔隙度	模型默认值为 0.5
SOL_CRK	土壤空隙化	资料查询
TEXTURE	土壤质地(名称)	可选,SPAW
SOL_Z	各土壤层底层到土壤表层的深度(mm)	资料查询
SOL BD	土壤湿密度(mg/m ³ 或 g/cm ³)	SPAW 计算
SOL_AWC	土壤层有效持水量(mm)	SPAW 计算
SOL_K	饱和导水率/饱和水力传导系数(mm/h)	SPAW 计算
SOL_CBN	土壤层中有机碳含量	查询,计算(一般为有机质含量乘以 0.58)
CLAY	黏土含量,土壤颗粒直径<0.002 mm	资料查询
SILT	壤土含量,土壤颗粒直径 0.002~0.05 mm	资料查询
SAND	砂土含量,土壤颗粒直径 0.05~2.0 mm	资料查询
ROCK	砾石含量,土壤颗粒直径>2.0 mm	资料查询
SOL_ALB	地表反射率(湿)	计算或默认值为 0.01
USLE_K	USLE 方程中土壤侵蚀力因子	计 算
SOL-EC	土壤电导率(dS/m)	默认值为 0

SWAT-CUP 是一种专门为 SWAT 模型提供敏感性分析、校准、验证和不确定性分析的计算机程序^[16]。其模型内镶嵌了粒子群优化算法(PSO)、SUFI-2 算法、马尔科夫链蒙特卡罗法(MCMC)、参数求解方法(ParaSol)、广义似然不确定性估计法(GLUE)等算法。而研究选用 SUFI-2 算法作为参数估计最优化方法^[17],该算法考虑了模型结构、输入数据、参数等因素的不确定性,并将率定后的参数范围通过模拟值与实测值的 95 PPU(95 percent prediction uncertainty)图可视化。用以寻求模型模拟效果最佳的一系列参数最优组合。

2.2 SWAT 模型构建

结合石羊河流域 DEM 与实测水系对子流域进行划分。通过反复试验,当选取河道汇水面积阈值为 50 000 hm²时,SWAT 模型所产生的数字水系与实际水系较为吻合。因此,研究采用基于 50 000 hm²为阈值的水系划分结果建立石羊河流域水文模型。进而提取河网、地形因子及河道参数,共划分 38 个子流域,并根据土壤、土地利用和坡度类型进一步划分出 200 个水文响应单元(HRU)。

2.3 模型参数敏感性分析与率定

参数敏感性分析采用 ArcSWAT 提供的模块 LH-OAT 进行灵敏度分析法量化参数对流域径流模拟的影响程度。表 3 为参数敏感性分析分级标准。经过敏感性分析后,得到影响石羊河流域径流模拟结果精度的 10 个重要参数(表 4)

表 3 参数敏感性分析分级标准

等级	敏感值	敏感性
I	<0.05	低
II	0.05~0.2	中
III	0.2~1.0	高
IV	>1.0	很高

当对模型参数进行敏感性分析之后,采用 SUFI-2 算法对模型参数进行率定及验证。以 1980—1999 年为模型校正期,2000—2009 年为验证期。

选用相对误差 R_e , 相关系数 R^2 和 Nash Sutcliffe 效率系数 E_m 这 3 个指标来评价 SWAT 模型在石羊河流域径流模拟中的适用性。

表 4 参数敏感性分析

参数名称	文件	排序	敏感值	敏感等级
CN2(SCS 径流曲线数)	.mgt	1	4.71	IV
Alpha_Bf(基流回退系数)	.gw	2	2.6	IV
Timp(积雪温度滞后因子)	.bsn	3	0.73	III
SMTMP(融雪的最低气温)	.bsn	4	0.33	III
Esco(土壤蒸发补偿因子)	.hru	5	0.28	III
Sol_Awc(土壤可利用水)	.sol	6	0.23	III
Canmx(最大冠层蓄水量)	.hru	7	0.23	III
Sol_Z(土壤层厚度)	.sol	8	0.23	III
SMFMX(最大融雪因子)	.bsn	9	0.17	II
SMFMN(最小融雪因子)	.bsn	10	0.17	II

指标相对误差 R_e 的计算公式为:

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{m,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \quad (1)$$

式中: $Q_{m,i}$ —— 实测径流量(m^3); $Q_{s,i}$ —— 模拟径流量(m^3); n —— 实测时间序列长度。下同。

指标相关系数 R^2 的计算公式为:

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

式中: $Q_{m,avg}$ —— 多年实测平均径流量(m^3); $Q_{s,avg}$ —— 多年模拟平均径流量(m^3)。下同。

指标 Nash Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 的计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})^2} \quad (3)$$

R_e 反映模拟值与实测值之间的偏离程度,其值越接近 0,表明模型模拟结果与实测值吻合程度越好。 R^2 实测值与模拟值之间的数据吻合程度,其值常介于 0~1 之间,越接近 1,说明实测值与模拟值线性相关程度越高,模拟效果越好。 E_{ns} 评价模型模拟值与实测值之间的拟合程度,其值越接近 1,说明模拟值越接近实测值。综合这 3 个评价指标标准,一般认为 $|R_e| < 20\%$, $R^2 > 0.7$, $E_{ns} > 0.6$ 时模型的拟合程度较好。

3 模拟分析与评价

3.1 石羊河流域土地利用变化特征分析

对 1995,2000 年 2 期流域内各类型土地利用数据分类统计,结果如表 5 所示。1995—2000 年石羊河流域土地类型均以草地、耕地、未利用地为主,该 3 种类型总面积占流域面积的 90% 左右;而林地、水域、城乡居民用地相对较小,其总面积比例不足 7%。流域各土地利用类型面积大小依次为:未利用地 > 草地 > 耕地 > 林地 > 城乡工矿居民用地 > 水域。

表 5 1995—2000 年石羊河流域土地利用变化

土地利用类型	1995 年		2000 年		1995—2000 年		SWAT 中代码
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	变化面积/ km^2	变化幅度/%	
草地	11 547	28.46	10 711.95	26.40	-835.05	-7.23	PAST
耕地	6 439.61	15.87	7 251.35	17.87	811.74	12.61	AGRC
林地	2 653.87	6.54	2 755.03	6.79	101.16	3.81	FRST
水域	278.36	0.69	190.26	0.47	-88.1	-31.65	WATER
城乡工矿居民用地	337.22	0.83	522.39	1.29	185.17	54.91	URBA
未利用土地	19 322.76	47.62	19 147.25	47.19	-175.51	-0.91	SWRN

具体而言,与 1995 年相比,2000 年石羊河流域耕地、林地、城乡工矿居民用地的面积均呈增长趋势。增幅最大的为城乡工矿居民用地,增幅高达 54.91%,增量为 185.17 km^2 ,主要是由于石羊河流域内该土地利用类型的增长规模较大、扩展速度较快,这与研究时期流域内工业化、城镇化进程加快、城镇工矿用地需求量增加是密不可分的。耕地增幅次之,增幅达到 12.61%,增量为 811.74 km^2 ,这是由于近些年流域内农田水利、灌溉工程的兴建,导致一定程度上耕地面积的增加。林地增幅达到了 3.81%,

增量为 101.16 km^2 ,这主要由于近些年石羊河流域加强开展林地保护及造林工程,并且对林产品需求的扩张均使得林地面积不断增加。草地、水域、未利用地面积呈减少趋势,其中减幅较大的是水域,其减幅为 31.65%,其减少面积分别为 88.1 km^2 ,这主要是气候变化和人类活动共同作用的结果。

综上所述,在研究时段内,土地利用类型的变化以耕地、林地、城乡工矿居民用地面积显著增加,草地、水域、未利用地减少为主。

3.2 SWAT 模型结果评价

选用 1980—1999 年为石羊河流域出山口实测的月径流量数据与模拟值进行校正,并将模型校正的所得的参数,应用到 2000—2009 年的实测资料进行模型验证(图 1)。① 石羊河流域的 SWAT 模型模拟值与实测相比,略偏小,但基本反映了径流量的实际变化趋势。② 石羊河流域冬季径流极小,春季过后径流明显增大,这表明冬季气温低,冰川融水极少;春季气

温回升,冰川融水对石羊河流域径流产生了很大影响,是石羊河流域径流量的重要组成部分。③ 夏季 6—9 月径流量最大,表明降水也是石羊河流域夏、秋季节径流量的重要来源,且气温对该径流有显著的调控作用,同时这与参数敏感性分析得出的积雪温度滞后因子(TIMP)最为敏感的结果相吻合。校正期和验证期月流量的模拟值和实测值拟合较好(图 1—2)。

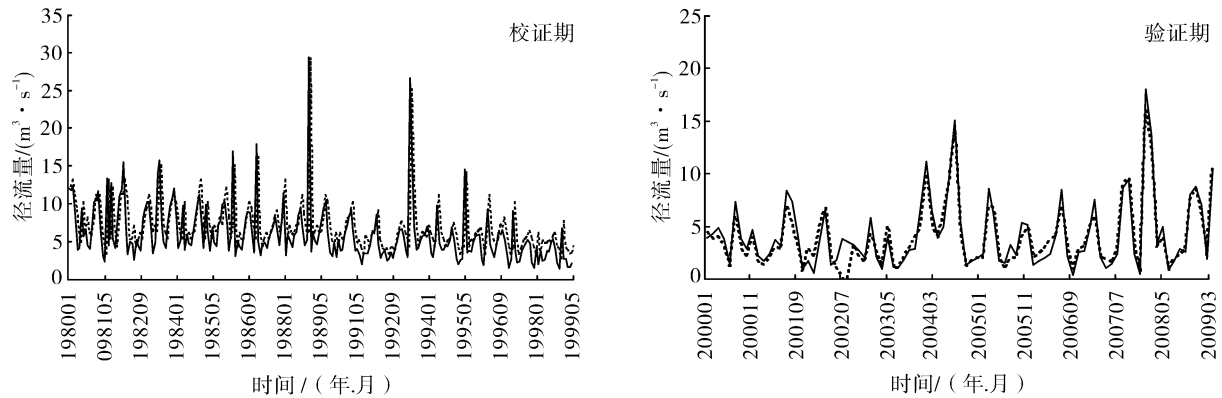


图 1 校正期、验证期月径流量的的模拟值和实测值对比

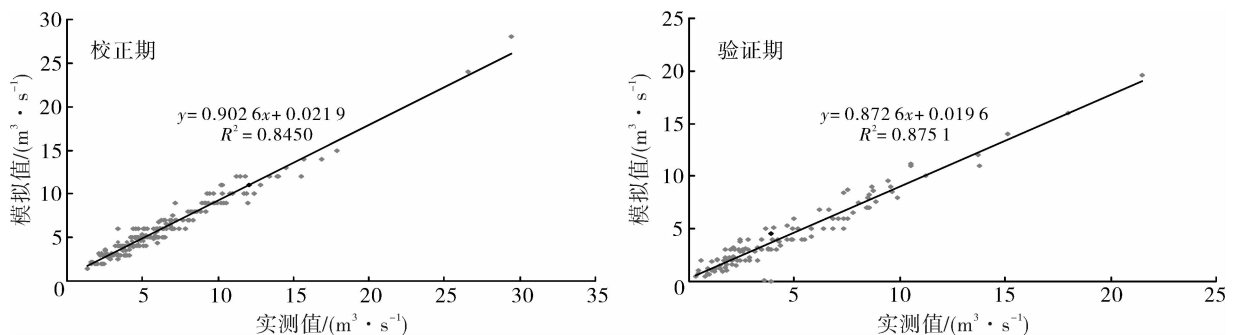


图 2 校正期、验证期模拟值与实测值的相关关系

从表 6 可以看出,校正期内模拟月径流量的值与实测的值相差 $0.243 \text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 -4% ,相关系数为 0.85 , E_{ns} 系数为 0.94 ,模拟值与实测值之间的拟合较好,满足 SWAT 模型校准步骤中的要求,表明模型对流域径流的模拟是符合实际的。验证期内模拟和实测月流量的值相差 $0.287 \text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 -6.4% ,Nash Suttcliffe 系数 E_{ns} 和相关系数 R^2 均大于 0.8 ,表明模型在石羊河流域对径流模拟的适用性较好。

表 6 模拟评价结果

阶段	月流量均值		$R_e/\%$	E_{ns}	R^2
	实测	模拟			
校正期	6.053	5.81	-4	0.94	0.85
验证期	4.547	4.26	-6.4	0.92	0.88

4 结论

(1) SWAT 模型能较好地模拟石羊河流域径流过程。采用 SUFI-2 算法对模型进行敏感性分析、参数率定,得出影响模型模拟效果前 3 位的参数分别为 CN_2 , Alpha_Bf , Timp ;校正期和验证期月流量的模拟值和实测值拟合较好,其 Nash Suttcliffe 系数 E_{ns} 和相关系数 R^2 均大于 0.8 ,相对误差 $|R_e|$ 均小于 10% 。

(2) 1995—2000 年石羊河流域土地类型均以草地、耕地、未利用地为主,该 3 种类型总面积占流域面积的 90% 左右;而林地、水域、城乡居民用地相对较小,其总面积比例不足 7% 。流域各土地利用类型面积大小依次为:未利用地 $>$ 草地 $>$ 耕地 $>$ 林地 $>$ 城乡工矿居民用地 $>$ 水域。

由于研究受到流域气象、土壤等数据时空精度的限制,导致研究存在一定的局限性,在将来的研究中仍需进一步改进与探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 王刚,贾冰.石羊河流域气候变化历史及其对水文水资源的影响[J].甘肃水利水电技术,2008(3):172-173.
- [2] 周俊菊,石培基,师玮.1960—2009年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征[J].自然资源学报,2012,27(1):143-153.
- [3] 范泽华,戚蓝,黄津辉.气候变化对石羊河流域水资源影响分析[J].水利水电技术,2012,43(1):7-11.
- [4] 王文行,段争虎,王建伟.气候变化对祁连山石羊河出山口径流的影响研究[J].冰川冻土,2012,34(2):469-477.
- [5] 李洋,魏晓妹,孙艳伟.石羊河流域水文要素变化特征分析[J].水文,2007,27(3):85-88.
- [6] 丁贞玉,马金珠,张宝军,等.近50a来石羊河流域气候变化趋势分析[J].干旱区研究,2007,24(6):6779-6784.
- [7] 王兴梅,张勃,张凯,等.石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征[J].地理科学进展,2011,30(3):299-305.
- [8] 王贵忠.近50a来石羊河流域出山径流变化趋势分析[J].人民黄河,2010,32(8):45-46.
- [9] 张若琳.石羊河流域水资源分布特征及其转化规律[D].北京:中国地质大学,2006.
- [10] 王书功,康尔泗,李新.分布式水文模型的进展及展望[J].冰川冻土,2004,26(1):61-62.
- [11] 朱发昇.石羊河流域水资源开发与生态环境综合治理探讨[J].水资源与水工程学报,2004,15(3):45-48.
- [12] 刘明春,李玲萍,史志娟,等.石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应:以西营河为例[J].干旱地区农业研究,2013(1):193-198.
- [13] 费生云.石羊河流域综合治理战略性措施与对策研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [14] 袁军营,苏保林,李卉,等.基于SWAT模型的柴河水库流域径流模拟研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):361-365.
- [15] 孙瑞,张雪芹.基于SWAT模型的流域径流模拟研究进展[J].水文,2010,30(3):28-32.
- [16] Abbaspour K C. SWAT-CUP4: A User Manual[S]. Dübendorf: Eawag, 2011.
- [17] Abbaspour K C, Johnson A M, Van Genuchten T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal, 2004,3(1):1340-1352.

(上接第171页)

- [4] Li Minghan, Eddleman K E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2002,60(4):225-242.
- [5] 王梅婷,徐得潜,陈凯.城市河道生态护坡综合评价指标体系研究[J].水土保持通报,2011,31(1):198-202.
- [6] 汪洋.城镇河流生态护坡系统的建立及评价研究[D].江苏扬州:扬州大学,2005.
- [7] 吕晶,高甲荣,张金瑞,等.京郊河溪生态护坡系统评价研究[J].安徽农业科学,2010,38(3):1623-1626.
- [8] 许士国,石瑞花,黄保国,等.平原河道生态护坡工程评价和方案决策方法[J].水利学报,2008,39(3):325-331.
- [9] 刘学毅.德尔菲法在交叉学科研究评价中的运用[J].西南交通大学学报:社会科学版,2007,8(2):21-25.
- [10] 徐联舫.用德尔菲专家调查法对超导量子干涉仪的技术预测[J].科学学研究,1989,7(1):68-86.
- [11] 梁保松,曹殿立.模糊数学及其应用[M].北京:科学出版社,2007:105-120.
- [12] 张鹏.基于主成分分析的综合评价研究[D].南京:南京理工大学,2004.
- [13] 徐泽水.模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J].系统工程学报,2001,16(4):311-315.
- [14] 束波峰.生态混凝土护坡在河堤加固中的应用[J].水利水电技术,2009,40(12):12-13.
- [15] 万阳.基于模糊层次—主成分分析法的供应链质量综合评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.