

基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在陕西黑河流域径流模拟中的应用

刘睿翀¹, 霍艾迪¹, Chen X H², 王菊翠¹, 席丹¹

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064;

2. School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68583-0996, USA)

摘要: 参数率定及敏感性分析是用来提高模型精度, 确定模型关键参数及改善模型结构的非常有效的方法。本文基于 SUFI-2 算法, 通过 SWAT 模型对陕西黑河流域进行了模拟, 同时基于 SUFI-2 算法对模型参数进行了敏感性分析, 结果表明: (1) 影响黑河流域径流模拟结果精度的主影响因子是 scs 径流曲线参数; (2) 用 2005 年到 2011 年的实测径流资料对模型进行了率定与验证, 模拟确定性系数 R^2 和模型效率系数 ENS 均高于 0.8; (3) 通过 SUFI-2 算法与 SCE-UA 算法比较, 发现 SUFI-2 算法所需时间短, 精度更高。

关键词: SUFI-2 算法; 径流模拟; 敏感性分析; 参数率定

中图分类号: S273.29 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0213-05

Application of the SWAT model into the runoff simulation based on SUFI-2 Algorithm in Heihe river basin of Shaanxi Province

LIU Rui-chong¹, HUO Ai-di¹, CHEN X H², WANG Ju-cui¹, XI Dan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68583-0996, USA)

Abstract: Parameter calibration and sensitivity analysis are very effective methods to improve the accuracy of the model, to determine the key parameters of the model and improve the model structure. Through the SWAT model, this paper simulated the Heihe River Basin, meanwhile carried out the sensitivity analysis for the model parameters based on the SUFI-2 Algorithm. The results shown that: (1) The main factor affecting the accuracy of the runoff simulation results in the Heihe River Basin was the parameter of the scs runoff curve. (2) The model was calibrated and validated by using the measured runoff data of 2005 to 2011, the simulated determination coefficient (R^2) and model efficiency coefficients (ENS) were total higher than 0.8. (3) By comparing the SUFI-2 Algorithm with SCE-UA Algorithm, we can find out the SUFI-2 Algorithm with higher accuracy and using short time.

Keywords: SUFI-2 Algorithm; runoff simulation; sensitivity analysis; parameter calibration

水文模拟是水文科学研究中重要的手段和方法之一, 与传统的集总式水文模型相比, 分布式水文模型能够反映水文要素在空间上的变化, 能够进行下垫面变化条件下的计算, 而且具有更多的模拟功能, 能够把单一水量变化的模拟扩大到广泛的水文水资源与生态环境变化的模拟, 并且可通过尺度转换与大气环流模式耦合来预测全球变化对水资源的影响, 因此分布式水文模型被纳入到全球气候变化条件下水文研究的前沿^[1]。虽然分布式水文模型拥有较多优点, 但模型参数众多且难以获取, 如何选取合

适的参数值以提高模型精度, 是困扰分布式水文模型应用的重要问题^[2]。

由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tools)模型是一个典型的物理机制的流域分布式水文模型, SWAT 模型能够模拟不同的土地利用和多种农业管理措施对流域内水、泥沙、营养物质等输送迁移的影响, 在世界各地得到了广泛的应用。SWAT 模型的参数有 200 多个, 其绝大部分参数都有明确的物理意义, 可以通过实测数据来确定^[3]。但在实际应用中仍然有

很多参数需要率定。比如在径流模拟中就需要对比较敏感的产、汇流参数,产流计算等多种参数进行率定。而造成这种状况的原因在于模型的不确定性、模型的基本假设以及输入数据的误差和分辨率带来的模型参数计算真值的偏差。因此,模型参数的合理取值对于提高模型精度有重要作用^[4]。

目前对于模型的参数率定有遗传算法(Genetic Algorithm)、贝叶斯方法(Bayesian Method)、RSA 方法(Regionalized Sensitivity Analysis)等多种方法。任秀文,姜国强^[5]对 SWAT 模型的参数进行敏感性分析并在增江流域进行运用。朱丽,秦富仓等^[6]将 SWAT 模型敏感性分析模块在红门川流域进行应用。以上应用虽然都达到了提高模型精度的目的,但对于 SWAT 模型的参数取值往往依赖于建模人的经验和对于模型的理解程度,并没有形成一套完整的敏感性分析方法。

SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting, ver. 2)算法是分析水文模型不确定性研究的常用方法之一,对于模型精度和运算效率都有很大的提高。本文运用 SUFI-2 算法以西安市黑河流域为靶区,对 SWAT 模型模拟结果数据进行参数敏感性分析和率定。并与模型自带 SCE-UA 算法进行对比分析,以期获得典型区域范围内效率更高、精度更好的方法。

1 研究方法

SUFI-2 算法是 Abbaspour KC 等于 2007 年开发的一种综合优化和梯度搜索方法,不仅可以同时率定多个参数,而且具有全局搜索的功能,同时还考虑了输入数据、模型结构、参数及实测数据的不确定性^[7-9]。

SUFI-2 算法开始时先假设一个比较大的参数补缺空间,使实测数据被包含在 95PPU 范围内,然后逐步地缩小不确定性的区间范围,同时关注 P 因子和 R 因子的变化。每一次参数范围的改变,都将重新进行敏感性矩阵和协方差矩阵的计算,然后更新参数,再进行下一步模拟,使模拟值更加接近实测值。最后以 P 因子值是否接近于 1 和 R 因子是否接近 0 来判断校准结果是否精确。然后将以 R^2 和纳什系数作为目标函数进一步模拟^[10]。SUFI-2 结构流程如图 1 所示。

SUFI-2 算法的计算步骤包括以下七步:(1) 确定目标函数。(2) 确定参数的物理意义和区间范围。(3) 根据选定的目标函数,对每个参数进行多次模拟。(4) 参数范围确定后进行 Latin Hypercube 抽样。(5) 进行 Latin Hypercube 抽样后,得到多种参

数组组合,并进行模拟。(6) 对第一步进行评估,模拟,并计算结果。(7) 进行参数的不确定性分析。

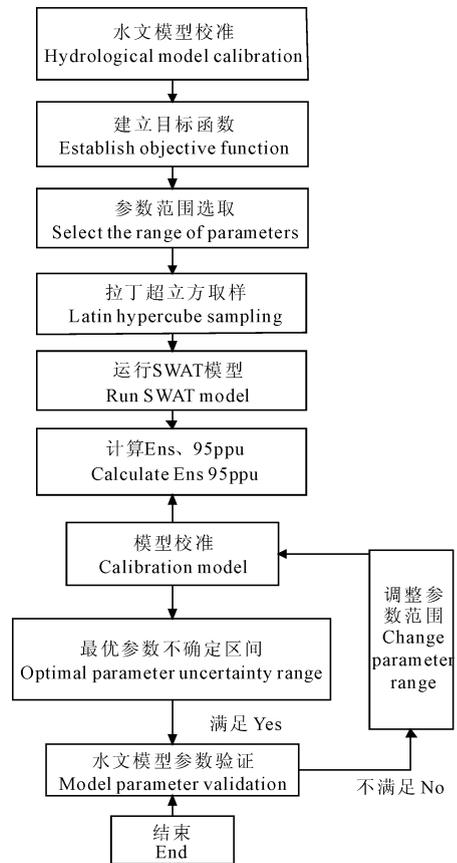


图 1 SUFI-2 方法结构流程

Fig.1 The structure processes of SUFI-2 Method

1.1 参数敏感性分析

敏感性分析是对模型的输入参数进行评估并确定其影响程度,是进行参数率定的前提。本次研究的敏感性参数是通过多元回归模型进行参数敏感性分析,将 LH(Latin Hypercube)抽样生成的参数与目标函数值进行回归分析,计算公式如下:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (1)$$

式中, g 为目标函数; α, β_i 为回归方程的系数; b_i 为参数值; m 为参数数目^[11]。

在本次研究中 T 检验将被用于每个参数的敏感性的检测,其绝对值越大越敏感,P-values 用于确定敏感性的显著程度,其值越接近 0 表明越显著。在 SUFI-2 算法中不确定性分析与模型参数的敏感性分析和率定过程同时进行,参数的敏感性的确定将用于率定模型和进行不确定性分析。参数的初始值根据建模者的经验和 SUFI-2 算法敏感性分析的推荐值确定。同时,SUFI-2 方法每次都会计算适应性评价指标与各参数之间的相关性,为下一次运

行提供新的参数推荐范围。

本研究选择黑河流域径流对模型进行参数敏感性分析,最终选择以下 11 个参数(CN2, ESCO, SOL_AWC 等)进行不确定性分析,在模型率定期和验证

期进行模拟,并对结果进行分析。这些参数的物理意义及初始范围如表 1 所示。其中参数初始范围根据 SUFI-2 方法中的敏感性分析结果确定。

表 1 所选参数的实际意义

Table 1 The actual meaning of the selected parameters

参数名称 Parameter name	物理意义 Physical meaning	初始取值范围 The initial value range
CN2.mgt	scs 径流曲线参数 scs runoff curve parameter	(-0.2,0.2)
ALPHA_BF.gw	基流消退参数 Base flow subsided parameter	(0.0,1.0)
SOL_K(1).sol	饱和水力传导参数 Saturated hydraulic conductivity parameter	(-0.8,0.8)
GW_DELAY.gw	地下水滞后参数 Hysteresis parameters of groundwater	(30.0,450.0)
SOL_BD(1).sol	土壤饱和容量 Soil saturation capacity	(-0.5,0.6)
ESCO.hru	土壤蒸发补偿参数 Soil evaporation compensation parameter	(0.8,1.0)
CH_N2.rte	主河道河床曼宁系数 Manning coefficient of main river bed	(0.0,0.3)
SFTMP.bsn	降雪气温参数 Snowfall temperature parameters	(-5.0,5.0)
SOL_AWC(1).sol	土壤可利用水量参数 Available soil water parameters	(-0.2,0.4)
GWQMN.gw	浅层含水层产生基流的阈值深度 Depth threshold of base flow produced by shallow aquifer	(0.0,2.0)
CH_k2.rte	沟道有效水传导率 Effective water conductivity of ditches	(5.0,130.0)

1.2 模型适应性评价指标的选择

本文主要选取确定性系数 R^2 以及 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Ens) 两个参数来进行模拟适应性评价。确定性系数 R^2 表示模拟值与实测值的吻合程度, R^2 值越小表示吻合程度越差, $R^2 = 1$ 是说明模拟值与实测值十分吻合。模型效率系数 Ens 的计算公式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

式中, Q_0 为实测值, Q_p 为模拟值, Q_{avg} 为实测平均值, n 为数据个数。 Ens 值越接近 1, 说明模型模拟结果越好; 当 $Ens < 0$ 时, 说明使用模型模拟值比直接使用实测平均值的可信度更低。

参数率定是寻找一组参数使模拟值与观测值最为一致。本研究利用 SWAT-CUP 工具对 SWAT 模型模拟的结果进行率定。当模型参数率定完成后, 采用实测的数据对模型进行校验和分析, 评价 SWAT 模型在该流域的适用性。

2 研究区概况及数据来源

黑河流域位于秦岭以北, 渭河以南的陕西省周至县境内。地理位置介于 $N33^{\circ}42' \sim N34^{\circ}13'$ 、 $E107^{\circ}43' \sim E108^{\circ}24'$ 。1999 年在黑河 $N34^{\circ}03' \sim E108^{\circ}13'$ 处

拦河建成黑河金盆水库水利枢纽, 主要负责西安市供水。黑河全长 125.8 km, 集水面积 2 258 km², 径流深 362 mm, 多年平均径流量 8.17 亿 m³。流域内降水量丰沛, 降水量年内分配极不均匀, 汛期降水量大而集中, 冬春两季干旱少雨。汛期 6—10 月降水占全年降水量的 67.4%~78.2%, 尤其以 7—9 月的降水量最为集中, 平均占全年的 50.2%。周至县黑河流域的林区地跨秦岭南北, 南属北亚热带常绿阔叶混交林带, 北属暖温带落叶阔叶林带。该区山高坡陡, 同时又处于黄土高原地区, 水土易于流失。由于过量采伐, 森林面积缩小, 出现大面积裸岩和以草本灌木为主的荒坡。人类活动对于生态环境的破坏明显。黑河流域的地理位置如图 2 所示。

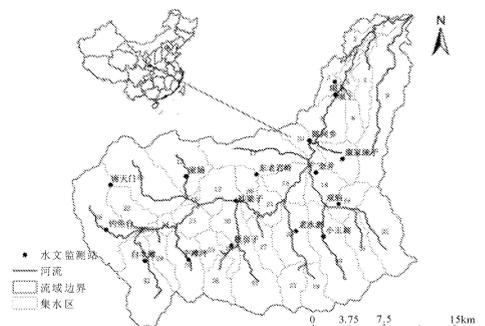


图 2 黑河流域地理位置

Fig.2 Location of Heihe river basin

2.1 数据来源

黑河流域的地形属性数据通过研究区 1:100 万的 DEM 提取,利用黑河流域土地利用图和土壤类型图,在 ArcGis 的支持下,建立该流域的土地利用属性和土壤利用属性的空间数据库。气象数据采用陕西省周至县的坝上、坝下、小王涧、双庙、康家埡子、陈河乡、东老君岭、老水磨、沙梁子、板房子、中滩坪、麦场、白羊滩、南天门、钓鱼台、金井等 15 个站点的 2005—2011 年的日降水、最高最低气温、风速、相对湿度等实测数据。径流数据来源于的陕西省陈河水水库观测站 2005—2011 年的实测资料。

3 参数敏感性分析与率定

本文将陈河乡水库的 2005—2011 年的月径流数据分为两部分,2005—2007 年为模型率定期,2008—2011 年为验证期。其运行结果如图 3、图 4 所示。

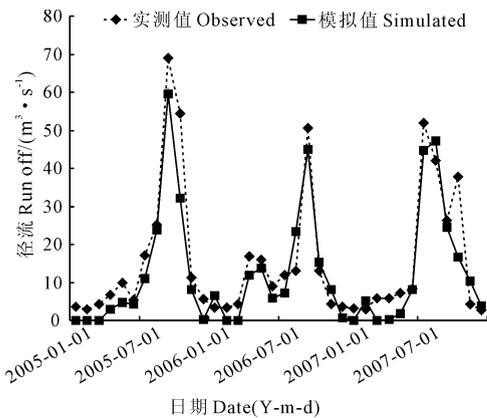


图 3 率定期(2005—2008)月径流实测值,模拟值对比

Fig.3 Comparison between the observed and simulated data in the calibration period

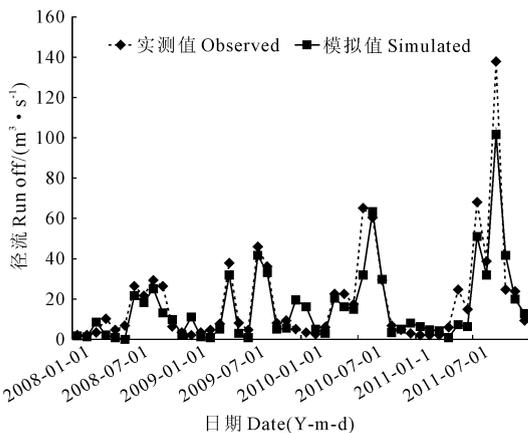


图 4 验证期(2009—2011)月径流实测值,模拟值对比

Fig.4 Comparison between the observed and simulated data in the verification period

本研究对 11 个参数进行敏感性分析,参数的绝对值越大表明参数对模型的预测结果影响越明显,负的状态值表示该参数对预测结果呈负影响,即增加参数值将减小模型的输出结果。从表 2 中可以看出黑河流域径流模拟结果最为敏感的参数依次为:scs 径流曲线参数(CN2.mgt),饱和水力传导参数(SOL_K(1).sol)土壤层有效含水量(SOL_AWC),等。

表 2 参数敏感性分析

Table 2 Parameter sensitivity analysis

参数名称 Parameter name	t - Stat	P - value	敏感性排名 Sensitivity ranking
CN2.mgt	17.3	0	1
SOL_K(1).sol	9.2	0	2
SOL_AWC(1).sol	-6.8	0.14	3
Alpha_BF.gw	2.9	0.16	4
Esco.hru	2.8	0.12	5
CH_N2.rte	-2.6	0.18	6
CH_K2.rte	-2.4	0.33	7
GW_DELAY	-1.3	0.42	8
SFTMP	-1.1	0.40	9
GWQMN	-1	0.36	10
SOL_BD(1).sol	-0.9	0.49	11

由表 3 我们可以看出,率定期月径流的相关系数 R^2 为 0.88,模型效率系数 Ens 为 0.86,P 因子和 R 因子分别为 0.50 和 0.28。当率定完成后,用 2009—2011 年的数据进行径流验证,验证期相关系数 R^2 为 0.92,模型效率系数 Ens 为 0.89,P 因子和 R 因子分别为 0.47 和 0.28。相关系数和模型效率系数都高于 0.8,这表明 SWAT 模型在黑河流域的径流模拟具有良好适用性,但是 P 因子较小,同时 R 因子也较小,表明观测值落在不确定性区间的数量较少,径流模拟的实际不确定性较大,这可能与周围水库运行以及农业用水的影响有关。总体来说 SWAT 模型对黑河流域的月径流模拟效果良好。

SCE - UA 算法(Shuffled Complex Evolution)是 Duan 等^[12]于 1992 年在结合了单纯形法、最速下降法、遗传算法、等方法优点的基础上提出的一种可以一致、有效、快速地搜索水文模型参数全局最优解的算法,在流域水文模型的参数优选中应用十分广泛。该算法^[13-14]可以搜索全部参数的可行空间,找到全局最优参数的成功率是 100%。

SCE - UA 算法也有多个参数,这些参数分为不确定性参数和确定性参数,想要得到算法的全局最优解,就要选择好合适的参数^[15]。

表 3 径流模拟结果评价表

Table 3 Runoff simulation result

时间 Time	模拟变量 Simulation variable	R^2	Ens	P 因子 P-factor	R 因子 R-factor
率定期 Calibration period	月径流 Monthly runoff	0.80	0.86	0.50	0.28
验证期 Verification period	月径流 Monthly runoff	0.91	0.88	0.47	0.28

本文利用模型自带模块进行敏感性分析和参数率定结果如图 5、图 6 所示。

表 4 模拟结果

Table 4 Simulated results

时间 Time	模拟变量 Simulation variable	R^2	Ens
率定期 Calibration period	月径流 Monthly runoff	0.86	0.84
验证期 Verification period	月径流 Monthly runoff	0.77	0.74

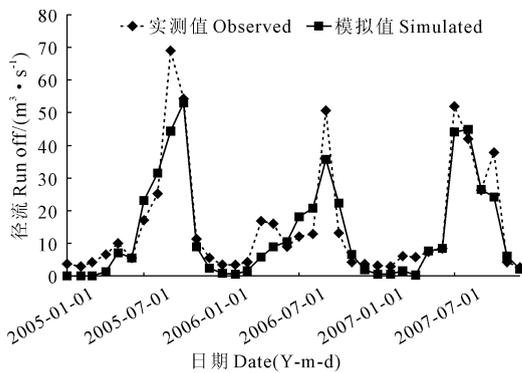


图 5 率定期(2005—2008)月径流实测值与模拟值对比

Fig. 5 Comparison between the observed and simulated data in the calibration period

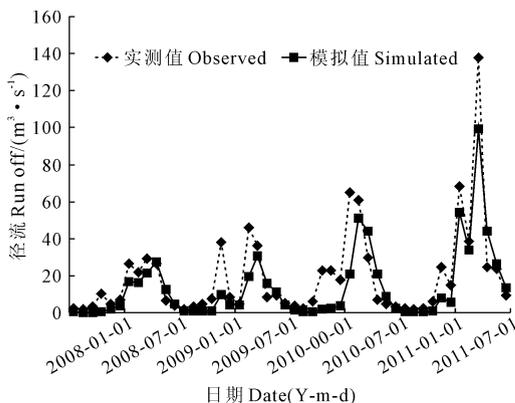


图 6 验证期(2009—2011)月径流实测值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison between the observed and simulated data in the verification period

通过表 3 与表 4 的对比,可以看出 SUFI-2 算法对于模型精度的提高作用更大,相比 SCE-UA 算

法, SUFI-2 算法更加适用于黑河流域这类干旱半干旱地区、小流域、少参数的水文模型,同时在利用 SUFI-2 算法进行率定单次运行时间为 1 min,而利用模型自带算法单次运行所需时间为 3 min 左右,在上百次的迭代运算中可以极大地提高运算效率,可以将 SUFI-2 方法作为一种高效的率定方法进一步的推广应用。

5 结论与讨论

SWAT 分布式模型水文模拟需要大量具有空间分布特征的地表参数和流域地形空间拓扑关系以期实现对流域水文过程及径流的准确模拟。运用敏感性分析,能够更好地理解参数对水文过程的影响程度,筛选出一些重要的参数,避免了模型调参过程中的盲目性。通过在黑河流域进行的基于 SUFI2 算法的模拟,并与 SWAT 模型自带方法做比较,可以得到以下结论:

1) 参数率定是提高模型准确性的重要步骤,优良的率定方法极大地提高了模型的可用性。

2) 根据西安黑河流域 2005—2011 年的实测径流数据对模型进行的校准和验证,月径流模拟结果同实测数据的相关系数 R^2 和 Ens 系数都高于 0.8,表明基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型对于黑河流域径流的模拟结果良好。

3) 将 SUFI-2 算法加入到 SWAT 模型中,进行模型参数自动率定,同 SCE-UA 算法相比,该算法收敛速度快,率定精度高,能够显著提高参数自动率定效率,使得 SWAT 模型自动率定的整体效果大幅提高;尤其是针对较大型流域的多断面参数率定,该方法收敛快、结果稳定的特点将更具有潜力。同时,所得结果简单明了,更具直观性。

致谢: 长安大学何红曼、米海存及马岚同学对此次工作提出了不少宝贵建议,陕西省周至县水务局提供了部分实测资料。部分工作得到了(41072183)基金项目的大力支持,对以上个人及单位的大力支持致以诚挚的感谢。

(下转第 222 页)

合赋权法确定的冬小麦主要生育时期的权重与专家意见确定的权重范围存在一定差异,今后的研究中需进一步分析关中平原的气候条件及冬小麦生长机理,更加准确合理地确定冬小麦主要生育时期的权重范围,并获取更多年份的数据,对模型进行验证。干旱的影响评估涉及农业、气象、水文、生态环境及社会经济等多方面,且评估工作不仅局限于评估它对农业生产造成的影响,还需要综合气候特征、人类活动等多种影响因素,科学评估干旱的综合影响。

参考文献:

- [1] 闫娜,杜继稳,李登科,等.干旱遥感监测方法研究应用进展[J].灾害学,2008,23(4):117-121.
- [2] 陈锡康,杨翠红.农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究[J].系统工程理论与实践,2006,(2):108-112.
- [3] 高峰,孙成权.我国“九五”遥感技术与应用研究发展战略与对策[J].地球科学进展,1995,10(2):123-132.
- [4] Nearing G S, Crow W T, Thorp K R, et al. Assimilating remote sensing observations of leaf area index and soil moisture for wheat yield estimates: An observing system simulation experiment[J]. Water Resources Research, 2012,48(5):1-13.
- [5] 刘良云,王纪华,黄文江,等.利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J].农业工程学报,2004,20(1):172-175.
- [6] 韩绍林.旱作农业与河南旱地小麦栽培[M].郑州:黄河水利出

版社,2010:147-148.

- [7] Richard M W, Sam M, Juan A, et al. Effect of drought and the presence of the 1BL/1RS translocation on grain vitreosity, hardness and protein content in winter wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(3):457-468.
- [8] 宋艳琳,董文杰.1961—2000年干旱对我国冬小麦产量的影响[J].自然灾害学报,2006,15(6):235-240.
- [9] 方建刚,白爱娟.陕西春季干旱的环流特征分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):247-253.
- [10] 陈旭,郝明德,许晶晶,等.干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):159-163.
- [11] Sun W, Wang P X, Zhang S Y, et al. Using vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(17-18):5133-5144.
- [12] 李艳,王鹏新,刘峻明,等.基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价 I. 因子权重排序法和熵值法组合赋权[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):159-163.
- [13] 李艳,王鹏新,刘峻明,等.基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价 II. 改进的层次分析法和变异系数法组合赋权[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):236-239,262.
- [14] 黄弘,王鹏新,李俐.关中平原小麦生育期 VTCI 加权估算及其与小麦产量间的相关性研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):173-178.

(上接第 217 页)

参考文献:

- [1] 刘昌明,郑红星,王中根,等.流域水循环分布式模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [2] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrological modeling and assessment part 1: model development[J]. Journal of The American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [3] 王中根,夏军,刘昌明,等.分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22(4):649-655.
- [4] 李慧,靳冕,雷晓云,等.SWAT模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究[J].水资源与水工程学报,2012,21(1):79-82.
- [5] 任秀文,姜国强,钟满妮,等.SWAT模型参数敏感性分析及增江流域的应用[C]//中国环境科学学会学术年会论文集,2011:262-268.
- [6] 朱丽,秦富仓,姚云峰,等.SWAT模型敏感性分析模块在中尺度流域的应用——以密云县红门川流域为例[J].水土保持研究,2011,18(1):161-165.
- [7] Abbaspour K C. SWAT Calibration and Uncertainty Programs[M]. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag,2007:95.
- [8] Schoul J, Abbaspour K C, Yang H, et al. Modeling blue and green water availability in Africa[J]. Water Resources Research, 2008,

VOL44:W07406. doi:10.1029/2007WR006609.

- [9] Yang J, Reicher 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.
- [10] 刘智勇.基于 SWAT-SUFI 模型的黄土高原典型流域径流模拟及水资源管理系统的开发[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [11] 左德鹏,徐宗学.基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布模拟[J].北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(5):490-496.
- [12] Duan Q, Sorooshian S, Gupta HV, et al. Global optimization for watershed model calibration, in calibration of watershed model[M]. Washington DC, American Geophysical Union, 2003.
- [13] Sorooshian S, Duan Q, Gupta V K. Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting Model[J]. Water Resources Research, 1993,29:1185-1194.
- [14] Duane Q Y, Sorooshina S, Gupta V K. Optimization use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2001,251:103-109.
- [15] 白薇,刘国强.SWAT模型参数自动率定的改进与应用[J].中国农业气象,2009,30(增2):271-275.