



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.008

张俊龙, 李永平, 曾雪婷, 等. 基于 EFAST 方法的寒旱区流域水文过程参数敏感性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 43-48. ZHANG Jur long, LI Yong ping, ZENG Xue ting, et al. Hydrological parameter sensitivity analysis for a cold and arid watershed based on EFAST[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 43-48. (in Chinese)

基于 EFAST 方法的寒旱区流域水文过程参数敏感性分析

张俊龙¹, 李永平¹, 曾雪婷², 尤立³, 刘静¹

(1. 华北电力大学 能源与环境研究中心, 北京 102206; 2. 首都经贸大学 劳动经济学院, 北京 100070;
3. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 寒旱区流域受降雨径流和融雪径流联合补给, 坡面产流和融雪过程可能对流域水文产生重要影响。以分布式水文模型 SWAT 为平台, 选取模型多个参数为关键因子, 借助 EFAST 方法探索融雪期(3月-5月)、非融雪期(6月-次年2月)的径流峰值以及全时段径流均值的参数敏感性, 这些参数涉及降雨径流、积雪消融、蒸散发、下渗、地下水补给和壤中流等多种水文过程。同时, 结合流域特征及参数物理意义, 深入分析参数敏感的原因, 并揭示参数背后的水文过程对开都河流域产汇流的重要影响。研究发现, 坡面产流、下渗以及积雪消融等水文过程对开都河流域水循环具有重要影响。此外, 对于寒旱区流域重要的融雪过程参数, 其总敏感性显著而一阶敏感性不显著, 表明通过 EFAST 方法得到的水文模型参数总敏感性更为合理。结果揭示了流域水文敏感因子及关键过程, 为探索水循环机理, 水文科学预测、管理流域水资源奠定了基础。

关键词: EFAST; 地表产流; 寒旱区; 积雪消融; 敏感性; SWAT

中图分类号: P334.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1633(2017)03-0043-06

Hydrological parameter sensitivity analysis for a cold and arid watershed based on EFAST

ZHANG Jur long¹, LI Yong ping¹, ZENG Xue ting², YOU Li³, LIU Jing¹

(1. *Sino-Canada Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*
2. *School of Labor Economics, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;*
3. *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*)

Abstract: In cold and arid watersheds, streamflow is mainly contributed by snowmelt runoff in the ablation period and rainfall runoff during summer. Surface runoff and snowmelt may have important influence on the water cycle. In this study, the extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method was employed for SWAT model parameter sensitivity analysis. The test involved hydrological parameters that describe multiple processes including rainfall runoff, snowmelt, evaporation, percolation, baseflow, and lateral flow. Peak flows in non melting and snow melting periods as well as average annual flow were all considered in the sensitivity analysis. In addition, the reasons for the sensitivity of the parameters and the associated hydrological processes that affect the water cycle in the watershed were analyzed. Results showed that the surface runoff, percolation, and snowmelt have significant influence. Besides, the total order sensitivity of the parameters related to snowmelt process was significant whereas the first order sensitivity was not significant, indicating that the total order sensitivity obtained using EFAST is more reasonable. The findings will help hydrological models improve their capability for simulating/predicting water resources during different seasons for snowmelt precipitation driven watersheds.

Key words: EFAST; surface runoff; cold and arid watershed; snowmelt; sensitivity; SWAT

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-07-20 网络出版时间: 2017-05-06
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1113.002.html>
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS69)
Fund: Special fund for Basic Scientific Research of Central University (2014XS69)
作者简介: 张俊龙(1988-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: zjunlong0801@163.com

参数对水文模型描述物理过程的能力至关重要,但大部分参数值只能通过经验或率定的方式获得。然而,水文模型参数众多,优化所有参数耗时费力,故需要根据不同的研究需求,筛选对输出影响显著的参数,从而有针对性地进行参数率定和估计。参数敏感性分析正是针对上述问题展开的^[1]。

参数敏感性分析方法主要包括局部和全局敏感性分析^[2,3]。局部敏感性分析用来反映单个参数的改变对模型输出结果的影响^[4]。然而,该分析方法孤立各个参数,参数取值也局限于部分参数空间。实际上,模型参数的敏感性还会受到其它参数的影响。全局敏感性分析可以处理上述问题,其中,扩展傅里叶振幅敏感性分析 EFAST(Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test)方法通过计算单个参数及不同参数间交互作用引起模型输出的方差,从而充分考虑参数间的耦合作用对模型结果的影响,具有巨大的理论优势和应用潜力^[5,6]。

寒旱区开都河流域受降雨径流和融雪径流联合补给,坡面产流和融雪过程可能对流域水文产生重要影响。本文以开都河流域为关键研究区域,以分布式水文模型 SWAT 为平台,构建流域水文模拟模型,并借助 EFAST 方法探究寒旱区流域水文模型参数敏感性,研究结果将被用来揭示流域水文敏感因子及关键过程,为探索水循环机理,水文科学预测、管理流域水资源奠定基础。

1 流域概况

开都河(图 1)流域位于中国新疆焉耆盆地北部、天山南麓(42°14'N-43°21'N, 82°58'E-86°05'E),河流发源于天山中部,全长 610 km,最终流入博斯腾湖^[7-10]。流域面积 22 000 km²,年径流量 33.62 × 10⁶ m³^[11]。流域内山间盆地平均海拔 2 400~2 600 m,山区平均海拔 4 000~5 500 m^[12]。流域干旱少雨、高蒸发,年平均气温-4.3℃,极端低温-48.1℃,年均降雨量 500 mm,年均蒸发量 1 157 mm^[13]。草甸土、冻土和沼泽土为流域主要的土壤类型,土地利用类型以草原为主(占 73.8%)。开都河水源区有着较长的降雪期(11月至次年 3月),平均每年有 139.3 d 被积雪覆盖,平均厚度 12 cm^[14]。开都河受降雨径流和融雪径流综合补给,导致每年两次地表径流峰值,第一次峰值主要受融雪影响,发生在 3月至 5月,第二次峰值主要受降雨影响,发生在 7月至 8月。

为构建流域水文模型并开展水文参数全局敏感性分析,本文收集了 1995 年至 2001 年胜利道班、水

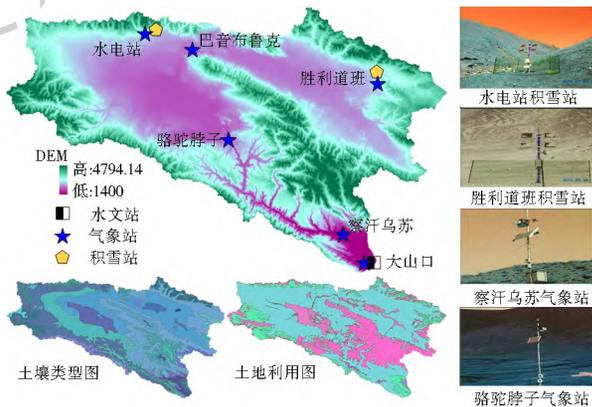


图 1 流域及观测站点

Fig. 1 Topographic characteristics of the Kaidu watershed and distribution of gauge stations

电站、骆驼脖子、库车打板、巴音布鲁克、大山口观测站点的融雪、水文和基本气象资料。融雪资料包括雪深以及 10、20、30 和 40 cm 雪层温度,由激光雪深仪(SHM30)和温度传感器测得,观测时间间隔为 1 h;大口水文站位于流域出口,该站水文资料包括流速和水位,时间步长为天;气象站点在流域内各高程均有分布,每个站点装备自动气象观测仪(Vantage Pro2),气象资料主要涉及降雨量、温度、风速和湿度,每半小时观测一次。相关站点位置及图件数据见图 1。本文还收集了流域地形、土地利用和土壤类型数据。为了分析降雨融雪混合产流机制下水文参数的敏感性,我们选取 SWAT 模型多个参数为关键因子,这些参数涉及降雨径流、积雪消融、蒸散发、下渗、地下水补给和壤中流等多种水文过程,模型参数见表 1。

表 1 模型参数介绍

Tab. 1 Description of SWAT model parameters

参数	参数描述	参数范围	
		最小值	最大值
CN2	平均土壤湿度条件下径流曲线系数	35	98
SNO50COV	50% 积雪覆盖下的雪量分数	0	1
ESCO	土壤蒸发补偿系数/(mm·h ⁻¹)	0	1
SOL_K	土壤饱和导水率	0	2 000
SOL_AWC	土壤有效含水量/(mm·mm ⁻¹)	0	1
ALPHA_BF	基流 alpha 因子/d	0	1
CH_K2	主通道冲积层有效渗透系数	-0.01	500
TIMP	积雪温度迟滞系数	0	1
SURLAG	地表径流迟滞系数	0.05	24
GW_REVAP	地下水上升系数	0.02	0.2
LAT_TTIME	侧向流流动时间/d	0	180
HRU_SLP	平均坡度/(m·m ⁻¹)	0	0.6

2 原理和方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型具有物理机制, 可进行以日为步长的长时段模拟^[15]。SWAT 模型综合考虑水情、地形、植被、土壤特性、土地管理措施等流域信息, 可用于模拟流域水循环、泥沙运动和氮循环。模型水量平衡可由下式得到^[16]

$$SW_i = SW_{0,i} + \sum_{i=1}^i (R_i - Q_{surf,i} - E_{a,i} - w_{sep,i} - Q_{gw,i}) \quad (1)$$

式中: SW_i 是第 i 天最终土壤含水量 (mm); $SW_{0,i}$ 是第 i 天起始土壤含水量 (mm); R_i 是第 i 天降雨量 (mm); $Q_{surf,i}$ 是第 i 天地表产流量 (mm); $E_{a,i}$ 是第 i 天蒸散发水量 (mm); $w_{sep,i}$ 是从土壤下渗至包气带的水量 (mm); $Q_{gw,i}$ 是回流量 (mm)。SWAT 模型基于度日因子法模拟融雪过程, 当输入的温度小于模型设定的开始下雪温度时, SWAT 启动融雪径流模块^[17]

$$SNO_{milt} = b_{milt} \cdot sno_{ov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{milt} \right] \quad (2)$$

$$sno_{ov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot$$

$$\left[\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}}) \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: SNO_{milt} 是某一天的融雪量 (mm); b_{milt} 是某一天的融雪系数 (mm/(d·°C)); sno_{ov} 是水文响应单元中的积雪覆盖率; T_{snow} 是某一天的雪堆温度 (°C); T_{mx} 是某一天的最高温度 (°C); T_{milt} 是积雪开始融化的温度 (°C); SNO_{100} 是积雪覆盖率为 100% 时的最小雪水当量 (mm); cov_1 和 cov_2 是面积折损曲线的形状参数。

2.2 EFAST 方法

EFAST 方法稳健、计算高效并且需要的样本数较低, 是综合 Sobol's 法和傅里叶振幅灵敏度测试法 (FAST) 的优点的全局敏感性分析方法^[3, 18-19]。EFAST 认为模型参数的敏感性可以通过输出结果的方差来反映, 即^[20]

$$Sensitivity_x = \frac{\text{var}_x [E(Y|X)]}{\text{var}(Y)} \quad (4)$$

式中: Y 是模型的输出值; x 为输入参数; $E(Y|X)$ 是在 X 为某值时 Y 的期望, var_x 是 x 遍历 x 取值范围时的方差。现有模型 $Y = f(x)$, 输入参数为 $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。我们将 X 看作随机变量, 满足概率分布 $P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 从而 X 遍历 X 的取值范围, 那么 Y 的 r 阶距 $y^{(r)}$ 满足:

$$\langle y^{(r)} \rangle = \int_{K^n} f^r(x_1, x_2, \dots, x_n) P(x_1, x_2, \dots, x_n) dx \quad (5)$$

借助转换函数 G , 将模型 $Y = f(x)$ 转换为 $Y = f(s)$:

$$x_i(s) = G_i(\sin w_i s) \quad (6)$$

其中: s 是标量, 且 $s \in (-\infty, +\infty)$, $\{w_i\}$ 是由参数 x_i 定义的整数频率。对 $f(s)$ 进行傅里叶变换得

$$y = f(s) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \left\{ A_j \cos j s + B_j \sin j s \right\} \quad (7)$$

$$\text{其中, } A_{wi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos w_i s ds,$$

$$B_{wi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin w_i s ds.$$

进而, 由第 i 个参量引起的方差变化为

$$\text{var}_{x_i} [E(Y|x_i)] = \sum_{p \in z_0} (A_{pw_i}^2 + B_{pw_i}^2) \quad (8)$$

因此, 参数的一阶敏感性 (不考虑参数 i 与其他参数的交互作用对结果方差的影响) 可表示为

$$S_i = \frac{\text{var}_{x_i} [E(Y|x_i)]}{\text{var}(Y)} \quad (9)$$

参数总敏感性充分考虑参数之间的交互作用, 可表示为

$$S_{Ti} = 1 - \frac{\text{var}_{x_i} [E(Y|x_{-i})]}{\text{var}(Y)} \quad (10)$$

其中, $E(Y|x_{-i})$ 是 $E(Y|x_i)$ 的余补集。本研究 EFAST 敏感性分析实验是借助 R 程序包 spartan 实现的。

3 结果与讨论

本研究借助开都河流域的胜利道班、水电站、骆驼脖子、库车打板、巴音布鲁克、大山口观测站点收集流域水文资料和基本气象资料, 建立模型。本研究将 1995 年至 1999 年作为率定期, 2000 年至 2001 年为验证期, 借助 SWAT 模型开展开都河流域水文过程模拟, 结果见图 2, 纳什系数在率定期和以验证期分别为 0.663 和 0.734, 决定系数在两个时期分别为 0.710 和 0.746, 相对误差在率定期和验证期分别为 17.7% 和 11.8%, 这些数据表明 SWAT 模型在开都河流域有着令人满意的模拟效果。

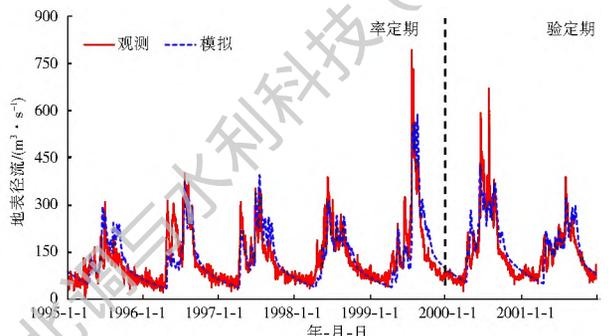


图 2 率定期和验证期的水文模拟结果

Fig. 2 Hydrological simulation in calibration and validation periods

本文基于 1995 年-1999 年 (率定期) 的大山口河道径流数据, 针对该时段融雪期 (3 月-5 月)、非

融雪期(6月-次年2月)的径流峰值以及全时段径流均值三个变量,借助 EFAST 方法探索参数敏感性(包括一阶敏感性和总敏感性)。图 3 展示了基于 EFAST 方法的参数敏感性分析结果(非融雪期径流峰值)。总敏感性结果表明,在模拟非融雪期径流峰值过程中,参数 CN2、CN_K2 以及 SNO50COV 最为敏感。参数 CN2 用来表征坡面产流过程发生的倾向性,受到土壤渗透性、前期土壤水分条件、土地利用类型、植被密度以及水土保持设施等流域下垫面因素的影响。该参数敏感的原因可能是由于开都河流域地形陡峭,夏季暴雨频发,容易诱发超渗产流过程,为夏季径流提供了重要的水源。参数 CN_K2 较为敏感的原因可能是开都河流域内高山寒漠土和高山草甸土分布广泛,上述两种土壤介质组成中粉土和沙土占 73%~86%,该土壤具有良好的渗透性,这导致流域内尤其在地势较平坦的尤尔都兹盆地和焉耆盆地地下水和地表水的转化非常频繁,对开都河地表水量有着重要影响。

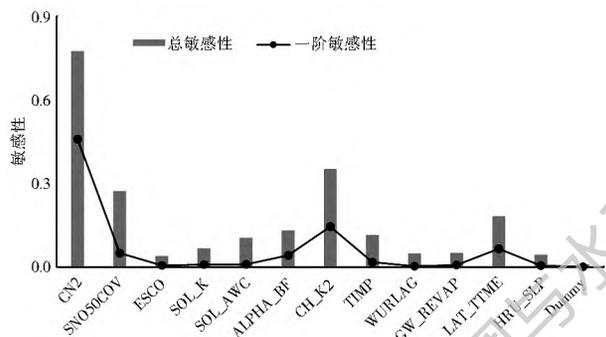


图 3 模拟非融雪期径流峰值的参数敏感性

Fig. 3 Parameter sensitivity for peak flow in non-melting period

图 4 展示了融雪期径流峰值的参数敏感性。总敏感性结果表明,参数 CN2、SNO50COV、CH_K2 以及 LAT_TTIME 对开都河流域融雪期径流最为敏感。参数 CN2 对融雪期径流有着重要影响的原因在于开都河流域多山地,地势陡峭,坡面产流是春季地表径流是重要的水源。参数 CH_K2 具有较高的敏感性,说明春季融雪期开都河流域地表水和地下水交换仍然显著。参数 SNO50COV 用来描述融雪水与积雪覆盖之间的关系,该参数较为敏感的原因可能在于开都河流域春季融雪产流是地表径流的重要来源。从图 1 展示的结果中可以发现,尽管 SNO50COV 描述了春季积雪消融的过程,该参数对夏季径流过程仍然具有较高的敏感性,原因可能在于地表水和地下水交换导致积雪融水下渗到非承压含水层和承压含水层,地下水漫长的汇流过程导致了流域上游山区积雪消融与流域出口径流观测之间

的迟滞效应,从而,春季融雪参数影响了夏季的降雨径流过程。参数 LAT_TTIME 用来表征壤中流汇入河道的迟滞效应。开都河流域地表产流易于下渗,渗入土壤中的水量,一部分由土壤直接蒸发和通过植物散发到空中,另一部分以壤中流形式补给河流。该参数较为敏感可以证明壤中流对开都河流域汇流过程具有重要作用。

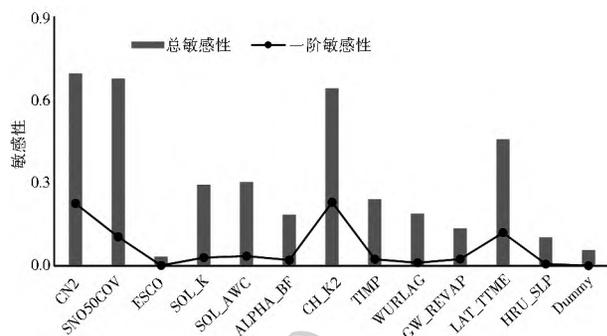


图 4 模拟融雪期地表径流峰值的参数敏感性

Fig. 4 Parameter sensitivity for peak flow in snow melting period

图 5 展示了模拟整个时期(1995年-1999年)地表径流量均值的参数敏感性。不难发现,参数 CN2、SNO50COV、SOL_K、ALPHA_BF、TIMP、GW_REVAP、LAT_TTIME 以及 HRU_SLP 对开都河流域径流量均值具有显著影响。上述参数表征流域内多种水文过程,包括地表产流、积雪消融、地下水与地表水交换、壤中流以及流域地形坡度。这表明,上述水文过程及因子对开都河流域产汇流具有重要影响。

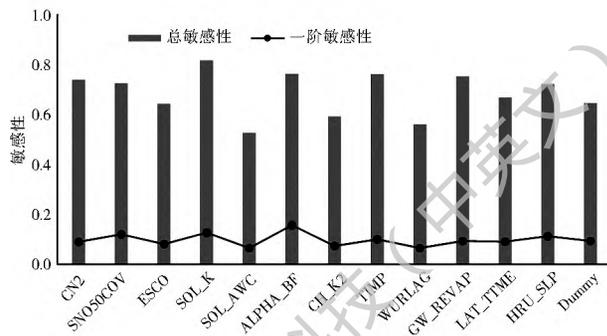


图 5 模拟全年径流均值的参数敏感性

Fig. 5 Parameter sensitivity for average annual flow

值得注意的是,借助 EFAST 方法得到的一阶敏感性与总敏感性分析结果具有一致性,相互印证,说明 EFAST 方法在寒旱区流域分析水文模型参数敏感性具有可行性。然而,对于某些参数则存在较为显著的差异,特别是与积雪消融过程相关的参数(即, SNO50COV 和 TIMP),上述两个参数的总敏感性非常显著,而一阶敏感性并不高。实际上,流域积雪主要分布于河源地区海拔 4 000~4 500 m 的

艾尔宾和科克铁克等山脉,高山融雪是该河流重要的补给水源,从理论上讲,融雪参数应该较为敏感。造成分析结果显著差异的原因主要在于EFAST一阶敏感性分析并未充分考虑参数交互作用对方差的贡献,从而导致敏感性分析的误差。这从侧面证明,在参数敏感性研究中,考虑参数之间的交互作用是非常必要的。

4 结论

本研究借助EFAST方法探究了寒旱区流域水文过程参数的敏感性,揭示参数背后的水文过程对开都河流域产汇流过程的重要影响。研究发现,坡面产流、积雪消融以及下渗过程对夏季径流峰值有重要影响;坡面产流、下渗、积雪消融以及壤中流对春季峰值影响显著;从全年平均流量看,地表产流、积雪消融、地下水与地表水交换、壤中流以及流域地形坡度是流域重要的水文过程和因子。此外,借助EFAST方法得到的一阶敏感性与总敏感性分析结果具有一致性,印证了该方法在寒旱区流域分析水文模型参数敏感性的可行性;而在某些参数上却存在差异,与流域融雪过程相关的参数的敏感性并不能通过一阶敏感性反映。这表明在参数敏感性研究中,考虑参数之间的交互作用是非常必要的,这也说明,借助EFAST方法得到的水文模型参数总敏感性更为合理。

参考文献(References):

- [1] 田雨,雷晓辉,蒋云钟,等.水文模型参数敏感性分析方法研究评述[J].水文,2010,30(4):9-12. (TIAN Yu, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Comment on parameter sensitivity analysis of hydrological model[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 9-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2010.04.003
- [2] 李红祺.随机平衡设计傅里叶振幅敏感性分析方法和拓展傅里叶振幅敏感性分析方法在陆面过程模式敏感性分析中的应用探索[J].物理学报,2015,64(6):069201. (LI Hongqi. Applications of random balance design Fourier amplitude sensitivity test and extended Fourier amplitude sensitivity test in the parameter sensitivity analysis of land surface process model[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(6): 069201. (in Chinese)) DOI: 10.7498/aps.64.069201
- [3] 李艳,黄春林,卢玲.基于EFAST方法的SEBS模型参数全局敏感性分析[J].遥感技术与应用,2014,29(5):719-726. (LI Yan, HUANG Chunlin, LU Ling. Global sensitivity analysis of SEBS model parameters based on EFAST method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(5): 719-726. (in Chinese)) DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.5.0719
- [4] 黄清华,张万昌.SWAT分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J].南京林业大学学报,2004,28(2):22-26. (HUANG Qinghua, ZHANG Wannchang. Improvement and application of GIS based distributed swat hydrological modeling on high altitude, cold, semiarid catchment of Heihe River Basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(2): 22-26. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.02.005
- [5] 何维,杨华.模型参数全局敏感性分析的EFAST方法[J].遥感技术与应用,2013,28(5):836-843. (HE Wei, YANG Hua. EFAST method for global sensitivity analysis of remote sensing models parameters[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 836-843. (in Chinese))
- [6] Wang J, Li X, Lu L, Fang F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48: 171-182. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.06.007
- [7] 张一驰,李宝林,包安明,等.开都河流域融雪径流模拟研究[J].中国科学: D辑:地球科学,2006,36(S2):24-32. (ZHANG Yichi, LI Baolin, BAO Anming, et al. Snow runoff simulation for hydrological process in the Kaidu watershed[J]. Science China: Earth Science, 2006, 36(S2): 24-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2006.z2.004
- [8] Zhang F Y, Li L H, Ahmad S, Li X M. Using path analysis to identify the influence of climatic factors on spring peak flow dominated by snowmelt in an alpine watershed[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11, 990-1000. DOI: 10.1007/s11629-013-2789-z
- [9] Wang Y, Chen Y N, Li W H. Temporal and spatial variation of water stable isotopes (^{18}O and ^2H) in the Kaidu River basin, Northwestern China[J]. Hydrological Process, 2014, 28: 653-661. DOI: 10.1002/hyp.9622
- [10] Kalra A, Li L H, Li X M, et al. Improving streamflow forecast lead time using Oceanic Atmospheric Oscillations for Kaidu River Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18: 1031-1040. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000707
- [11] Fu A H, Chen Y N, Li W H, et al. Spatial and temporal patterns of climate variations in the Kaidu River Basin of Xinjiang, Northwest China[J]. Quaternary International, 2013, 311: 117-122. DOI: 10.1016/j.quaint.2013.08.041
- [12] Ma Y G, Huang Y, Chen X, et al. Modelling Snowmelt Runoff under Climate Change Scenarios in an Ungauged Mountainous Watershed, Northwest China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 808565. DOI: 10.1155/2013/808565
- [13] Wang C X, Li Y P, Zhang J L, et al. Development of an inexact variance hydrological modeling system for analyzing interactive effects of multiple uncertain parameters[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 94-107. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.004
- [14] Chen Z S, Chen Y N. Effects of climate fluctuations on runoff in the headwater region of the Kaidu River in northwestern China[J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(2): 309-318.

DOI: 10.1007/s11707-014-0406-2

- [15] 李慧, 靳晟, 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——以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 79-82. (LI Hui, JIN Sheng, LEI Xiaoyun, et al. Study on the importance of sensitivity analysis and auto calibration of SWAT model: Taking the case study of Manasi Watershed[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(1): 79-82. (in Chinese))
- [16] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 8-15. (HUANG Qinghua, ZHANG Wan chang. Application and parameters sensitivity analysis of SWAT model[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 8-15. (in Chinese))
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009[M]. Grassland, Soil and Research Service, 2009.
- [18] 宋明丹, 冯浩, 李正鹏, 等. 基于 Morris 和 EFAST 的 CERES-Wheat 模型敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 124-166. (SONG Ming dan, FENG Hao, LI Zheng-peng, et al. Global sensitivity analyses of DSSAT-CERES-Wheat model using Morris and EFAST methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 124-166. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.020
- [19] Reusser D E, Buytaert W, Zehe E. Temporal dynamics of model parameter sensitivity for computationally expensive models with the Fourier amplitude sensitivity test[J]. Water Resources Research, 2011, 47: W07551. DOI: 10.1029/2010WR009947
- [20] 王建栋, 郭维栋, 李红祺. 拓展傅里叶幅度敏感性检验(EFAST)在陆面过程模式中参数敏感性分析的应用探索[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 050202. (WANG Jiandong, GUO Weidong, LI Hongqi. Application of extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method in land surface parameter sensitivity analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 050202. (in Chinese)) DOI: 10.7498/aps.62.050202

(上接第 42 页)

- [21] 蒋惠, 李云华. 新疆阜康市平原区地下水开发利用现状及对生态环境的影响[J]. 水利水电快报, 2008, 29(S1): 50-52. (JIANG Hui, LI Yunhua. Utilization and impact on ecology for groundwater in Fukang plain areas[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(S1): 50-52. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2008.s1.006. (in Chinese))
- [22] 向伟玲. 阜康市地下水时空动态变化及生态影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学生态学, 2007. (XIANG Weiling. Temporal and spatial dynamic variation of groundwater ecological impact research of Fukang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007 (in Chinese))
- [23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Jianguo. Mathematical methods in contemporary geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese))
- [24] 熊黑钢, 付金花, 王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1382-1387. (XIONG Heigang, FU Jinhua, WANG Kailong. Evaluation of water resource carrying capacity of Qitai Oasis in Xinjiang by entropy method[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2012, 20(10): 1382-1387. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2012.01382. (in Chinese))
- [25] 阜康市水利局. 阜康市水资源基本情况[E/OL]. <http://swj.fk.gov.cn/swj/fksl/szygk/2015/221299.htm>, 2015/10/11. (Fukang Water Resources Bureau. The basic information of water resources in Fukang[E/OL]. <http://swj.fk.gov.cn/swj/fksl/szygk/2015/221299.htm>, 2015/10/11. (in Chinese))