

SWAT 模型敏感性分析模块在云州水库流域的应用

张丽娟, 秦富仓, 岳永杰, 张艳杰, 苏江

(内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: SWAT 模型是基于水文过程的, 具有很强物理机制的流域分布式水文模型。介绍了 AVSWAT 2005 敏感性分析模块, 并在华北土石山区云州水库流域得到较好的应用与验证。通过敏感性分析, 辨析出影响该流域产流模拟结果精度的主要参数因子。SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、土壤饱和导水率(SOL_K)的影响是显著的, 敏感性等级高; 平均坡度(SLOPE)、浅层地下水径流系数(GWQMN)有一定影响, 敏感性等级中; 依据上述结论调整参数值, 采用连续 10 a 的实测月流量数据对模型进行了校准和验证。结果表明, 模型对月流量模拟的相对误差在模型校准期和验证期均小于 15%, Nash-Sutcliffe 系数 Ens 高于 0.7, SWAT 模型对云州水库流域产流的模拟结果良好。因此, 敏感性分析模块的应用极大地提高了模型在华北土石山区的可用性, 具有一定的推广意义。

关键词: SWAT 模型; 敏感性分析; 参数因子; 云州水库流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)03-0122-06

中图分类号: S157.1

Application of Sensitivity Analysis Module of SWAT Model in Yunzhou Reservoir Basin

ZHANG Li-juan, QIN Fu-cang, YUE Yong-jie, ZHANG Yan-jie, SU Jiang

(College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: The soil and water assessment tool (SWAT) is a physically-based continuous event hydrologic model. This paper mainly introduces the sensitivity analysis model of the AVSWAT2005 and its verification in Yunzhou Reservoir basin. Based on the sensitivity analysis, the main parameters affecting the simulated values in the watershed are determined. Results show that the CN2, SOL_AWC, and SOL_K parameters have the most significant influence on the simulated values of runoff from Yunzhou watershed, the sensitivity being in a high level; and the SLOPE and GWQMN have the more significant influence on runoff, the sensitivity being in a general level. The parameters are adjusted based on the above analyzed results and the model is verified using over 10 years data of monthly runoff. Satisfied simulation results are obtained with the relative error under 15% and Nash-sutcliffe coefficient (Ens) more than 0.7. The simulation result of SWAT model for Yunzhou Reservoir basin is good. Therefore, the application of sensitivity analysis module of SWAT model in the soil-gravel area of North China may improve the accuracy of simulation dramatically.

Keywords: SWAT model; sensitivity analysis; parameter; Yunzhou Reservoir basin

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是分布式水文模型, 迄今为止已经推出了多个版本^[1-3]。AVSWAT 是 ArcView 3. x GIS 软件的扩展, 以支持 SWAT 2005, 界面效果好, 便于操作, AVSWAT 提供了参数敏感性分析模块, 复杂的水文模型往往需要通过引入大量的参数来描述。然而, 参数的获取通常存在空间变异性、测量误差等问题致使模拟值与观测值之间吻合程度不高。一个灵敏参数的不确定性将会显著

影响模型的预测结果, 在模型验证期和校准期, 对模型灵敏性参数的适当调节是非常重要的^[4]。模型参数的灵敏性分析正是基于上述情况而提出的。

灵敏性分析的目的在于分析判断哪些输入参数值的变化对输出结果的影响很重要, 所以将通过灵敏性分析所确定的最为敏感的参数作为参考, 选择重要的参数因子进行调整, 既使影响模拟结果的参数因子更加简明、清晰, 又节省了调整参数的时间。从而提

收稿日期: 2009-09-21

修回日期: 2009-12-28

资助项目: 国家“十一五”科技计划课题“华北土石山区中尺度流域防护林体系优化配置”(2006BAD03A0201)

作者简介: 张丽娟(1984—), 女(汉族), 内蒙古呼伦贝尔市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究工作。E-mail: zhanglijuan1984@163.com。

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要研究方向为水土保持与土地资源利用。E-mail: qinfc@126.com。

高模型的可用性。随着 SWAT 模型应用的深入,很多国外研究者已经注意到模型参数灵敏性的问题^[5-8],并尝试对其进行了分析。我国在模型参数灵敏性问题上也做了大量研究,在黄土丘陵沟壑区^[9]、东北平原区^[10]、三峡库区^[11]和 华北平原^[12]等区域进行分析,并分别从产流、潜在蒸发量、非点源污染和气候、土地覆被等方面进行研究。但是 SWAT 模型参数灵敏性分析在华北土石山区产流量的研究还较少,所以本文主要应用 AVSWAT 2005 模型的灵敏性分析模块,研究了华北土石山区云州水库流域影响产流模拟结果精度的主导参数因子,以提高模型在华北土石山区的可用性。

1 研究区概况

云州水库地处密云水库上游集水区,该流域隶属河北省张家口市,地跨 3 个县,即赤城县、崇礼县和沽源县,其中赤城县部分占流域面积的 62%。研究区地处山区,地貌类型复杂,具有明显的山地特征,山地面积约占总面积的 80%,山区不仅岩层破碎、土质松散、沟壑纵横,而且水土流失严重,水土流失面积达

85%。流域面积约 1 254.94 km²,属大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量 370 mm,降水多集中于 7—8 月份,10 有效积温 1 600 ~ 3 200,无霜期 90 ~ 135 d。土壤类型丰富,以棕壤及褐土分布为主,并有石质土及栗钙土等土壤类型。植被组成以中生、旱中生或中旱生、旱生的多年生灌木和草本植物为主,流域内森林覆盖率为 13%。

2 研究方法

2.1 流域基本数据获取

采用云州水库流域 1:10 万地形图,经过数字化处理得到研究区 DEM 图,投影为 Albers 等面积圆锥投影,椭球参数为 Krasovskii。利用云州水库流域的 1:10 万土地利用图和土壤类型图,在 GIS 支持下,建立该流域土地利用属性和土壤属性的空间数据库。降水数据利用流域内 4 个降雨测站 1998—2007 年的逐日降水数据。气象资料采用云州水库气象站 1998—2007 年的气象数据。水文数据采用该流域 1998—2007 年逐月经流数据。该流域 SWAT 模型试验研究基础数据见图 1—4。



图 1 云州水库流域雨量站分布图

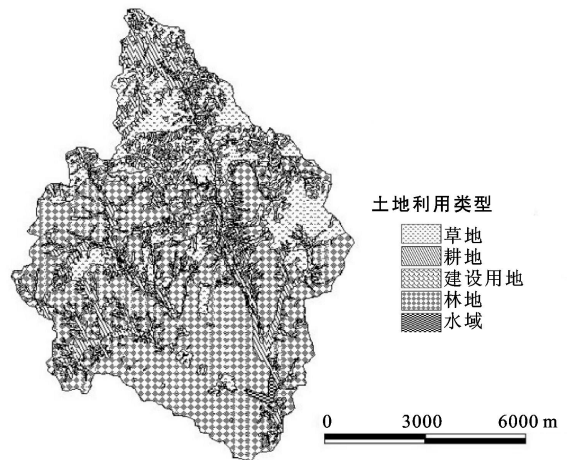


图 2 云州水库流域 2000 年土地利用图

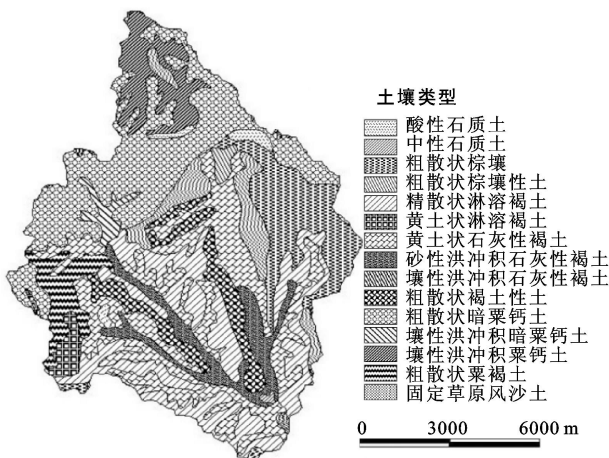


图 3 云州水库流域土壤类型图

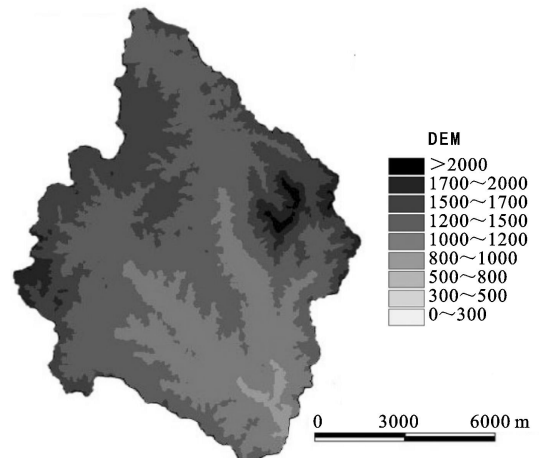


图 4 云州水库流域 DEM 图

2.2 LH-OAT 灵敏性分析方法

灵敏性分析的目的在于分析判断哪些因素的值的精确度更重要,并可以了解模型行为,提高模型的可用性。

在 AVSWAT 2005 中采用的是 LH-OAT (latin hypercube one-factor-at-a-time) 敏感度分析方法,是由 Morris 于 1991 年提出的^[13]。它是结合了 LH (latin hypercube) 采样法和 OAT (one-factor-at-a-time) 敏感度分析的一种新的方法,吸收了 LH 采样法和 OAT 敏感度分析法的优点。LH-OAT 灵敏性分析方法对每一抽样点(LH 抽样法)进行 OAT 灵敏性分析^[6],灵敏性最终值是各局部灵敏性之和的平均值。该方法既保证

了所有参数的所有区间都能够采样,又保证了模型每次的输出结果的变化能够确切地归因于输入的变化,从而保障了灵敏性分析的充分和有效性。SWAT 模型可用于灵敏性计算的模型参数见表 1。

3 AVSWAT2005 模型模拟

3.1 模型灵敏性分析

在 ArcView 3.2 平台上,运行 AVSWAT2005,自动生成格式化的模型参数和输入数据。在此基础上,经过 AVSWAT2005 模拟计算,运行灵敏性分析模块,得到影响云州水库流域产流模拟结果精度的 16 个重要参数见表 2,灵敏性赋值见表 3。

表 1 参数定义表

变量	定义	变量	定义
ALPHA_BF	基流系数	ESCO	土壤蒸发补偿系数
GW_DELAY	地下水滞后系数	EPCO	植物蒸腾补偿系数
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	SPCON	泥沙输移线性系数
RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	SPEXP	泥沙输移指数系数
REVPMPN	浅层地下水再蒸发系数	SURLAG	地表径流滞后时间
QWQMN	浅层地下水径流系数	SMFMX	6月21日雪融系数
CANMX	最大冠层蓄水量	SMFMN	12月21日雪融系数
GWNO3	地下水中硝酸盐含量	SFTMP	降雪气温
CN2	SCS 径流曲线系数	SMTMP	雪融最低气温
SOL_K	饱和水导电率	TIMP	结冰气温滞后系数
SOL_Z	土壤深度	NPERCO	氮下渗系数
SOL_AWC	土壤可利用水量	PPERCO	磷下渗系数
SOL_LABP	土壤初始易变磷含量	PHOSKD	土壤磷分离系数
SOL_ORGN	土壤初始有机氮含量	CH_EROD	河道可侵蚀系数
SOL_ORGP	土壤初始有机磷含量	CH_N	主河道曼宁系数值
SOL_NO3	土壤初始硝酸盐含量	TLAPS	气温下降率
SOL_ALB	潮湿土壤反射率	CH_COV	河道覆盖系数
SLOPE	平均坡度	CH_K2	河道有效水导电率
SLSUBBSN	平均坡长	USLE_C	USLE 中植物覆盖度因子最小值
BIOMIX	生物混合效率系数	BLAI	最大潜在叶面积指数
USLE_P	USLE 中水土保持措施因子		

表 2 重要参数灵敏性重要性

参数代码	参数含义	重要性	灵敏性值	灵敏性等级
SMFMX	6月21日雪融系数	13	0.00 168	
SMFMN	12月21日雪融系数	14	0.00 153	
ALPHA_BF	基流系数	11	0.00 220	
ESCO	土壤蒸发补偿系数	7	0.00 862	
CH_K2	河道有效水导电率	16	0.00 073	
CN2	SCS 径流曲线系数	1	0.53 800	
SOL_AWC	土壤可利用水量	2	0.35 200	
SURLAG	地表径流滞后时间	15	0.00 145	
SMTMP	雪融最低气温	12	0.00 170	
TIMP	结冰气温滞后系数	10	0.00 400	
CANMX	最大冠层蓄水量	6	0.03 260	
SOL_K	土壤饱和导电率	3	0.33 600	
SOL_Z	土壤深度	9	0.00 512	
RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	8	0.00 550	
GWQMN	浅层地下水径流系数	5	0.06 245	
SLOPE	平均坡度	4	0.14 062	

表 3 参数敏感性等级赋值

分类	因子值	灵敏性
	< 0.05	低
	0.05 ~ 0.2	中
	0.20 ~ 1.0	高
I	> 1.0	很高

参数敏感性的重要性排序:排序越靠前说明灵敏性越强,对流域产流模拟结果影响越大。由表 2 和表 3 分析可以看出,(1) SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、土壤饱和导水率(SOL_K)的影响是显著的,是最敏感因子,按灵敏性等级划分原则定为 I 级,灵敏性因子值分别为:0.538,0.352,0.336,均在 0.2~1 范围内,灵敏性等级高,即对径流的输出结果影响程度高。(2) 平均坡度(SLOPE)、浅层地下水径流系数(GWQMN),按灵敏性等级划分原则定为 II 级,灵敏性因子值分别为 0.141 和 0.06,在 0.05~0.2 范围内,灵敏性等级中,即对径流的输出结果影响程度中等。(3) 6 月 21 日雪融系数(SMFMX),12 月 21 日雪融系数(SMFMN),地表径流滞后时间(SURLAG),河道有效水导电率(CH_K2)等因子,按灵敏性等级划分原则定为 III 级,其灵敏性因子值均 < 0.05,灵敏性等级低,即对径流的影响轻微或没有影响。有针对性地适当调整相应敏感参数因子取值,可有效地提高模型模拟精度。

3.2 模型校准验证

本文选用相对误差 R_e 和 Nash—Suttcliffe 系数 Ens 评价模型的适用性^[14-16]。

(1) 相对误差 R_e

$$R_e = \frac{P_t - O_t}{O_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_e ——模型模拟相对误差; P_t ——模拟值; O_t ——实测值。若 R_e 为正值,说明模型预测或模拟值偏大;若 R_e 为负值,模型预测或模拟值偏小;若 $R_e = 0$,则说明模型模拟结果与实测值正好吻合。

(2) 确定性效率系数 Nash—Suttcliffe 系数 Ens

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

式中: Q_m ——观测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——观测的平均值; n ——观测次数。

当 $Q_m = Q_p$ 时, $Ens = 1$;如果 Ens 为负值,说明模型模拟值比直接使用测量值的算术平均值更不具有代表性。确定性系数的评定标准见表 4,一般认为确定性系数达到 0.7 以上为比较准确^[17]。

本文选用 1998—2007 年的水文资料进行模拟,其中 1998—2002 年数据用作校准阶段(calibration),年均降雨量为 402.9 mm,2003—2007 年数据用作验证阶段(validation),年均降雨量为 413.3 mm。两个阶段的年均降雨量变化幅度不大。

由于云州水库流域 10 a 来的土地利用类型和土壤类型变化幅度不大,所以在校准期和验证期均采用 2000 年的土地利用图和土壤类型图进行模拟,其变化对径流的模拟值影响较小。运行模型,通过调整灵敏性参数值使径流模拟值与实测值吻合,要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,Nash—Suttcliffe 系数 > 0.5。

表 4 确定性系数的评定标准

等级	甲等	乙等	丙等
标准	> 0.9	0.7~0.9	0.50~0.69

如图 5,6 所示,校准期的 R_e 为 0.08, R^2 为 0.80, Ens 为 0.76,符合要求(要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,Nash—Suttcliffe 系数 > 0.5)。

如图 7,8 所示,验证期的 R_e 为 0.10, R^2 为 0.85, Ens 为 0.81,符合要求(要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,Nash—Suttcliffe 系数 > 0.5)。

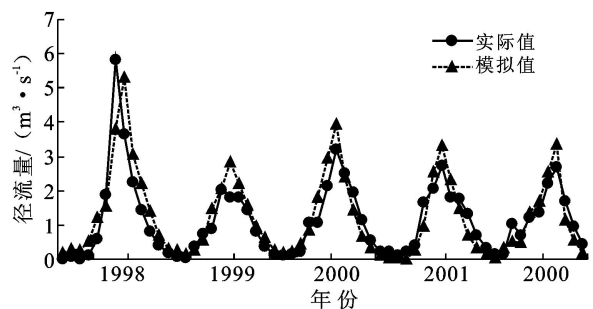


图 5 校准期月流量模拟值与实测值对比

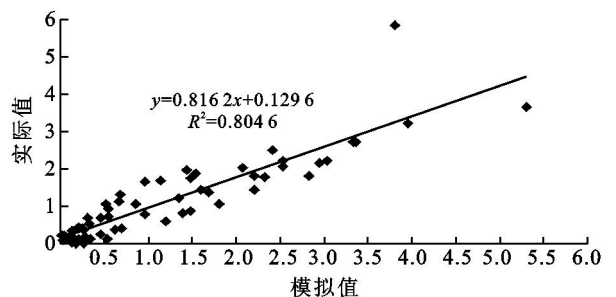


图 6 校准期月流量模拟值与实测值相关关系

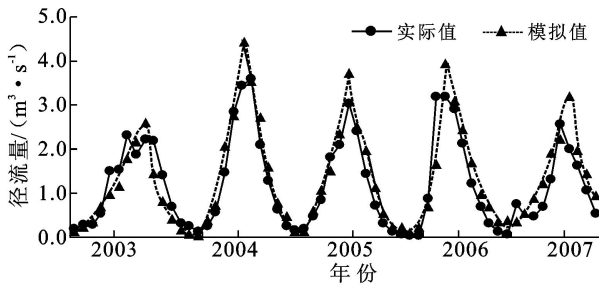


图 7 验证期月流量模拟值与实测值对比

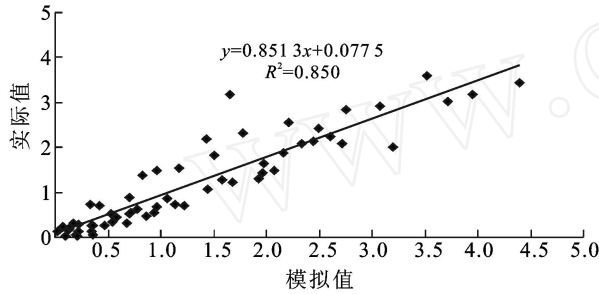


图 8 验证期月流量模拟值与实测值相关关系

如表 5 所示,本研究的校准结果完全符合要求,径流的模拟值与实测值的拟合效果较好,模型能够比较准确地模拟径流量。

表 5 月径流模拟评价结果

时期	月均值/ m^3		R_e	R^2	Ens
	实测值	模拟值			
校准期	1.13	1.23	0.08	0.80	0.76
验证期	1.20	1.32	0.10	0.85	0.81

4 结论

通过 SWAT 模型敏感性分析模块在华北土石山区云州水库流域的应用,依据敏感性分析结果,可以清楚分析出对模拟产流结果产生重要影响的主要模型参数,即:SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、土壤饱和导水率(SOL_K)、平均坡度(SLOPE)及浅层地下水径流系数(GWQMN)5 个参数。相关文献根据敏感性分析结果^[18-19],均对模拟产流结果产生重要影响的主要模型参数进行调整,与本文研究结果相似。在校准期和验证期,通过敏感性分析,明确地确定哪一个参数改变了模型结果的输出,减少了需要调整的参数数目,提高了计算的效率,从而提高了模型的可用性。

同时,本文采用连续 10 a 的实测月流量数据对模型进行了校准和验证,校准期年均降雨量为 402.9 mm,验证期年均降雨量为 403.3 mm。校准期 $R_e = 0.08$, $R^2 = 0.80$, Ens = 0.76;验证期 $R_e = 0.10$, $R^2 =$

0.85, Ens = 0.81;结果表明,模型对月流量模拟的相对误差在模型校准期和验证期均小于 15%, Nash — Suttcliffe 系数 Ens 高于 0.7,完全符合要求。文献[19]所得的出校准期和验证期的研究结果与本文研究结果相似。考虑实测的输入数据和率定的数据可能存在很多潜在的误差,本研究得出这个模拟结果也是令人满意的。SWAT 模型存在的潜在误差可能包括实测数据中产生的误差,降雨量、土地利用类型和土壤类型的误差,与 Santhi 等^[20]的研究结果一致。所以结果表明 SWAT 模型对华北土石山区云州水库流域产流的模拟结果良好,可以在该地区进一步推广应用。

[参 考 文 献]

- [1] 孙庆艳. 华北土石山区典型流域森林植被水文生态过程响应研究[D]. 北京:北京林业大学,2008:23-25.
- [2] 李峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电,2008(3):24-28.
- [3] 梁犁丽,汪党献,王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):125-131.
- [4] Chu, Tzyy-Woei. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in Piedmont physiographic region [D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2003:185-193.
- [5] Huisman J A, Breuer L, Fredr H G. Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(11/12):749-758.
- [6] Vanclooster M, Rounsevell M, Romanowicz A A, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle Catchment, Belgium [J]. Ecological Modelling, 2005, 187(2):27-39.
- [7] Klaus E, Lytz B, Hans-Georg F. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects [J]. Journal of Hydrology, 2003, 273(1):164-176.
- [8] 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, 2005, 30(8):518-526.
- [9] 宋艳华, 马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例 [J]. 生态学报, 2008, 28(2):636-644.
- [10] 基于 SWAT 模型的岔路河星星哨水库以上流域径流模拟 [D]. 吉林:吉林大学,2007.
- [11] 许其功, 席北斗, 何连生, 等. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究 [J]. 环境工程学报, 2008, 2(3):299-303.
- [12] 姚琴, 雷玉平, 李红军, 等. 气候与土地覆被变化下的水

- 文响应模拟:以太行山八一水库流域为例[J]. 节水灌溉, 2008(3):19-23.
- [13] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2):123-131.
- [14] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):133-137.
- [15] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4):38-42.
- [16] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2):238-242.
- [17] Popov E G. Gidrologicheskie Prognozy (Hydrological Forecasts) [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979:126-135.
- [18] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6):88-93.
- [19] 胡淑萍. 北京山区典型流域防护林体系对位配置研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008:214-222.
- [20] 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.

(上接第 116 页)

- [11] Molnár, Julien P Y, ASCE M. Grid-Size Effects on Surface Runoff Modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2000, 5(1):8-16.
- [12] 任希岩, 张雪松, 郝芳华, 等. DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1):1-4.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 径流模拟对 DEM 分辨率的敏感性分析[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1):32-35.
- [14] Zhang Q, Li L J. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China [J]. Quaternary International, 2009, 208(1/2):102-108.
- [15] 张奇. 湖泊集水域地表—地下径流联合模拟[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5):1-10.
- [16] 刘健, 张奇. 一个新的分布式水文模型在鄱阳湖赣江流域的验证[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(1):20-27.
- [17] 刘健, 张奇, 左海军, 等. 鄱阳湖流域径流模型[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4):469-478.
- [18] Zhang Q, Werner A D. Integrated surface-subsurface modeling of Fuxianhu Lake catchment, Southwest China [J]. Water Resources Management, 2009, DOI 10.1007/s11269-008-9377.
- [19] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2):411-424.
- [20] El Maayar M, Chen J M. Spatial scaling of evapotranspiration as affected by heterogeneities in vegetation, topography, and soil texture [J]. Remote Sensing Environment, 2006, 102:33-51.
- [21] Braun P, Molnar T, Kleeberg H B. The problem of scaling in grid-related hydrological process modelling [J]. Hydrological Processes, 1997, 11:1219-1230.
- [22] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1):143-154.