

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01007

基于SWAT模型的农业干旱评价方法与应用

李燕¹, 梁忠民¹, 赵卫民², 刘晓伟², 刘和昌¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 黄河水利委员会 水文局, 郑州 450004)

摘要: 以渭河上游灞河流域为研究区域, 构建了SWAT分布式水文模型并进行水文过程模拟, 得到土壤含水量模拟数据, 据此计算获取土壤相对湿度。将计算结果作为农业干旱评价指标, 对该流域的旱情等级进行评价。结果显示, 2001年和2002年灞河流域春旱严重, 2003年伏旱明显, 这与流域记载的实际旱情描述大致吻合。研究表明, SWAT模型对于土壤墒情资料缺乏地区的农业干旱评价工作, 具有一定的适用性。

关键词: SWAT模型; 径流模拟; 土壤含水量; 农业干旱评价

中图分类号: S423; TV121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0007-05

Evaluation Method and Its Application of Agricultural Drought Based on SWAT Model

LI Yan¹, LIANG Zhong min¹, ZHAO Wei min², LIU Xiao wei², LIU He chang¹

(1. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The objective of this study is to evaluate the applicability of SWAT model to agricultural drought evaluation for regions without or lack of soil moisture data. For this purpose, the SWAT model was applied to simulate the hydrological process in the Bahe watershed of the upper Weihe River. The soil water content was obtained and it was used to calculate the relative soil moisture. The calculated relative soil moisture was regarded as the evaluation index of agricultural drought. The results showed that severe spring droughts occurred in 2001 and 2002 and summer drought occurred in 2003 in the Bahe watershed, which was in accordance with the actual conditions. Therefore, SWAT model is applicable to agricultural drought evaluation for the area lack of soil moisture data.

Key words: SWAT model; runoff simulation; soil water content; agricultural drought evaluation

近年来,我国干旱灾害频发,严重威胁人们的生产和生活环境,特别是给农业生产造成了重大的影响。资料显示,1950年至2001年间,我国每年因旱损失粮食1413万t,占同期全国粮食产量的4.68%^[1-4]。因此,开展干旱研究,进行客观有效的农业干旱评价,为防旱减灾服务,已成为目前亟待解决的问题。

土壤水是作物水分需求的重要来源,常用来作为农业干旱评价研究的重要指标。然而我国绝大多数地区尚未建立土壤墒情监测站,因此获取准确完整的土壤含水量资料存在一定难度。不过,大多数地区水文站点分布密度相对较大,且水文资料系列较长,所以通过流域水文模型模拟土壤含水量不失为一个有效途径。SWAT模型基于DEM数据和气象水文数据建模,不仅考虑了流域内不同土地利用、土壤类型等情况,而且可以描述灌溉等人工管理措施对土壤水文过

程的影响。因此本文以渭河上游灞河流域为研究区域,采用SWAT模型进行土壤含水量过程模拟,并据此进行研究区农业干旱评价,为该区域的抗旱决策提供支撑。

1 SWAT模型简介及干旱评价方法

1.1 SWAT模型简介

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)开发的流域尺度分布式水文模型,多用于模拟和预测土地管理措施对流域产流、产沙和农业化学物质产量变化的影响^[5]。近年来,SWAT模型在北美、非洲、欧洲和亚洲等地得到广泛推广和应用,并且不断地改进^[6-10]。

SWAT模型包括水文过程、土壤侵蚀和污染负荷三个子

收稿日期: 2013-11-12 修回日期: 2013-12-04 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01010.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB9511); 水利部公益性行业科研专项项目(200901022)

作者简介: 李燕(1987-),女,云南大理人,硕士研究生,主要从事水文不确定性理论及水灾害防治研究。E-mail: hydroliyan@163.com

通讯作者: 梁忠民(1962-),男,辽宁凤城人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

模型,其中对水文过程的模拟分为陆面水文循环模块和汇流演算模块^[1]。SWAT 模型首先基于 DEM 数据将流域划分成若干子流域,然后根据不同的土地利用和土壤类型进一步划分水文响应单元(HRU)。模型在各个 HRU 上独立进行产流计算,汇流到子流域出口^[12],最后通过河道汇流得到流域出口的总径流过程。SWAT 模型采用 SCS 曲线数法以日步长进行降雨径流的模拟,可按年/月/日三种步长输出。

1.2 干旱评价方法

根据《旱情等级标准》(SL 424 2008)中关于干旱评价的指标^[13],本次研究选用 0~40 cm 深的土壤相对湿度来进行研究区域的农业干旱评估。计算公式如下:

$$W = \frac{\theta}{F_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中:W 为土壤相对湿度(%); θ 为土壤平均重量含水量(%); F_c 为土壤田间持水量(%).

SWAT 模型模拟的土壤含水量为毫米水量,需要转化为土壤平均重量含水量,公式如下:

$$\theta = \frac{SW}{dz_{soil} \cdot \rho_{soil} \cdot 10} \quad (2)$$

式中: θ 为土壤平均重量含水量(%);SW 为 SWAT 模型模拟的 40 cm 埋深的土壤含水量(mm); dz_{soil} 为土壤层厚度(cm); ρ_{soil} 为土壤容重(g/cm^3).

结果评价时依据的干旱等级标准见表 1。

表 1 土壤相对湿度干旱等级划分表^[13]

Table 1 Classification of relative

soil moisture based on different drought grades

旱情等级	轻度干旱	中度干旱	严重干旱	特大干旱
土壤相对湿度 W (%)	$50 < W \leq 60$	$40 < W \leq 50$	$30 < W \leq 40$	$W \leq 30$

2 研究区概况

灞河属黄河流域渭河水系的一级支流,发源于蓝田县灞源乡箭峪岭南九道沟,向南流经灞源,出峪口,汇入渭河^[14],全长 104.1 km,流域面积 2 581.0 km²。本研究区域为灞河中上游流域(图 1),控制站点为马渡王水文站(109°09',34'14'),集水面积 1 632.55 km²,海拔范围 410~2 416 m。该研究区域位于关中盆地中部,降雨不丰且年内分配不均,干旱灾害较为频繁。据陕西省文史馆编撰的“近百年旱灾史料”统计,该地区百年来共发生旱灾 75 次。



图 1 灞河流域水系位置

Fig. 1 Location of the Bahe Watershed

3 模型构建

SWAT 模型的构建分以下 6 个步骤进行:基础数据准

备;子流域划分;水文响应单元(HRU)确定;参数敏感性分析;参数率定及不确定性分析;模型验证。

3.1 基础数据准备

SWAT 模型所需基础数据可分为两类:一是支撑模型的空间数据,反映研究区地形、土地利用状况和土壤分布;二是驱动模型的属性数据,反映研究区模拟时段的水文气象情况。

(1) 空间数据。

模型运行需要的空间数据有:流域 DEM 数据、土地利用图和土壤类型图。本文采用 90 m × 90 m DEM 数据、1:10 万的灞河流域土地利用图(Landuse)和第二次全国土壤调查南京土壤研究所提供的 1:100 万土壤类型图(Soil)。这三个空间图均采用统一的 WGS1984 地理坐标系和 Albers 等积圆锥投影,通过 ArcGIS 软件,用流域边界进行切割,转化成栅格大小为 100 m × 100 m 的空间图层,见图 2。

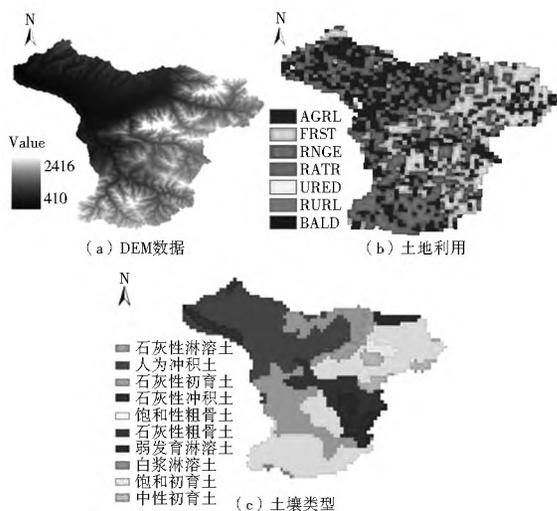


图 2 灞河流域空间数据

Fig. 2 Spatial datum of the Bahe Watershed

(a) DEM; (b) Land use; and (c) Soil

(2) 属性数据。

a. 水文数据。水文数据包括降雨量和径流量。其中,降雨量资料采用研究区内 11 个雨量站逐日降雨过程;流量资料采用流域出口控制站点马渡王水文站年逐日流量过程。资料年限均为 1991 年~2003 年,雨量站与水文站空间位置见图 1。

b. 气象数据。气象数据指 SWAT 模型驱动需要的日均最高/最低气温、日均风速、日均相对湿度和日均太阳辐射。由于研究区无气象站点,因此采用附近与本流域气候、地形条件相似的西安、华山、商县三个气象站的数据,资料年限和时间尺度与水文数据一致。

c. 其他属性数据。其他属性数据包括土地利用类型和土壤属性。

根据土地利用图的属性和 SWAT 模型自带土地利用数据库,利用 ArcGIS 软件将该流域的土地利用类型重新分为 7 类。

SWAT 模型用到的土壤属性数据包括物理属性和化学属性两类。其中物理属性数据决定了土壤剖面中水和气的运动情况,并对 HRU 中的水循环起着重要作用。根据土壤

类型图的属性和中国土种数据库资料, 借助土壤水文特性软件 SPAW 计算得到土壤容重、有机碳等参数, 建立研究区的模型土壤数据库。

3.2 子流域及 HRU 划分

输入前期准备的基础数据, 利用流域 DEM 生成河网, 设定集水面积阈值, 将该流域划分为 34 个子流域。其中子流域划分结果见图 3。采用优势地面覆盖/ 优势土壤类型方法, 分别设定土地利用类型 20% 和土壤类型 10% 的阈值, 将整个流域划分为 162 个 HRU。

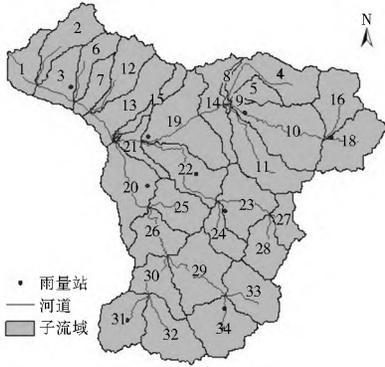


图 3 灞河流域子流域划分

Fig. 3 Sub basins of the Bahe Watershed

3.3 参数率定及不确定性分析

利用 SWAT 模型自带的 LH-OAT 模块进行参数敏感性分析, 参数率定和不确定性分析采用 SWAT-CUP 中 SUFF2 (Sequential Uncertainty Fitting, ver. 2) 算法。SUFF2 方法将模型中所有的不确定性原因均通过参数的不确定性来表现, 如模型概化、驱动变量 (如降雨) 以及实测数据的误差等。不确定性的程度通过 P 因子和 R 因子来量化。 P 因子指的是 95% 预测不确定性 (95PPU) 范围内所包含的实测值百分比^[15], 取值范围是 0~100%。 R 因子是 95PPU 上下限的平均距离与实测值标准偏差的比值^[15], 取值范围是 0~+∞。当 P 因子取 1, R 因子取 0 时, 表示模拟结果完全拟合实测数据。但是由于测量误差和模型不确定性的存在, 这种理想结果不可能达到。通常当 Nash Sutcliffe 系数 (Ens) ≥ 0.6 、确定性系数 $R^2 \geq 0.7$ 、 $P \geq 70\%$ 、 $R < 1$ 时, 认为模型模拟精度较为理想, 对应的参数不确定性范围可以接受^[16]。

通过参数敏感性分析, 最终确定对其中的 10 个参数进行率定和不确定性分析。率定期为 1991 年-2000 年, 其中 1991 年作为模型预热期, 不参与模型适应性评价。根据参数物理意义通过手动调参, 设置了 SUFF2 算法的 2000 次月径流模拟。将最佳模拟流量值与实测流量值对比发现, 模拟结果具有较高的 R^2 和 Ens (表 2), 95PPU 范围内所包含的实测流量值占 87%, 95PPU 上下限的平均距离与实测流量标准偏差的比值为 0.98, 满足 $P \geq 70\%$ 和 $R < 1$ 的要求, 说明模型的不确定性较低, 模型模拟结果较好。最终确定的参数取值范围及最佳参数见表 3。

校准期马渡王水文站的月径流实测值与模拟值对比结果见图 4。由图可见, SWAT 模型对灞河流域的径流模拟结果较好, 除了 1997 年的小流量过程外, 都比较符合流域的实际情况。

表 2 模型适应性评价指标计算结果

Table 2 Calculated results of evaluation indexes for model performance

时段	P 因子	R 因子	Re	R^2	Ens
校准期(1991-2000)	87%	0.98	8.80%	0.88	0.88
验证期(2001-2003)	78%	0.86	7.02%	0.88	0.87

表 3 SWAT 模型径流校准参数结果

Table 3 Results of parameter calibration for runoff simulation of SWAT model

参数	定义	最佳参数	参数取值范围
CN2	SCS 径流曲线系数	20	(20, 90)
CANMX	最大冠层蓄水量/mm	63.700	(0, 100)
SOL_AWC	土壤可利用水量 / mmH ₂ O (mm soil)	0.45	(0, 1)
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.7	(0.6, 0.9)
ALPHA_BF	基流 α 系数/d	0.4410	(0.54, 0.82)
SLOPE	平均坡度 / (m · m ⁻¹)	0.094	(0.6, 1)
SOL_K	饱和水力传导系数 / (mm · h ⁻¹)	62.00	(32, 150)
CH_K2	河道有效水力传导系数 / (mm · h ⁻¹)	82.350	(54, 98)
GWQMN	浅层地下水径流系数/mm	0.5940	(0, 2)
GW_DELAY	地下水滞后系数/d	43.02	(30, 150)

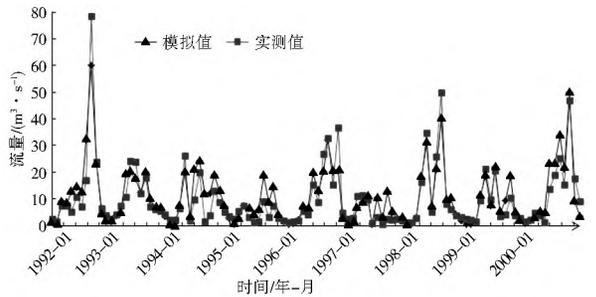


图 4 马渡王水文站校准期月径流模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of monthly simulated and observed runoff values at the Maduwang station during the calibration period

3.4 模型验证

将校准得到的参数值带回 SWAT 模型, 利用马渡王水文站 2001 年-2003 年的月径流数据进行验证, 实测值与模拟值对比见图 5, 二者整体上吻合。验证期的模型适应性指标计算结果见表 2, 相对误差 7.02%, 确定性系数 0.88, Ens 为 0.87。表明 SWAT 模型在该研究区有较好的适应性。因此, 可以认为 SWAT 模型能较好地模拟该流域的水文过程。

由于该流域缺少实测土壤墒情资料, 故只进行了径流过程的校准及验证。在径流校准过程中考虑了参数的物理意义及研究区的土壤等特性, 且径流校准及验证结果满足模型适应性评价指标, 因此可以认为 SWAT 模型及模型参数选择对该流域的土壤水文过程描述合理, 可采用模型模拟的土壤含水量数据进行农业干旱评价。

4 干旱评价结果分析

通过 SWAT 模型模拟计算得到各子流域 0~40 cm 土层的逐日土壤含水量, 再根据 SPAW 软件推求土壤田间持水

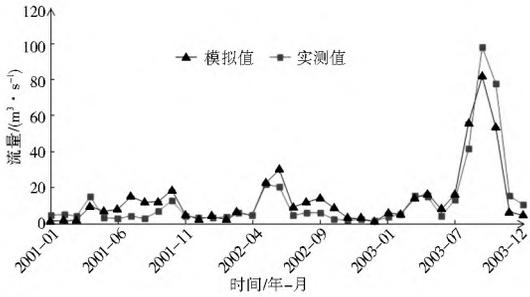


图 5 马渡王水文站验证期月径流模拟值与实测值对比
Fig. 5 Comparison of monthly simulated and observed runoff values at the Maduwang station during the validation period

量, 据此计算得到各子流域的土壤相对湿度, 最后通过面积比加权即可以得到整个流域的土壤相对湿度。流域降雨量采用的是流域面平均降雨量。

(1) 整个时间段的干旱情况。流域 2001 年-2003 年逐日土壤相对湿度情况见图 6。可以看出, 土壤相对湿度变化与同时段的降雨过程相一致。降雨多, 土壤相对湿度大, 说明土壤含水量受降雨影响较大。该流域土壤相对湿度在 20% ~ 70% 之间, 且大多数时间在 30% ~ 50% 间, 处于中等干旱等级和严重干旱等级之间。

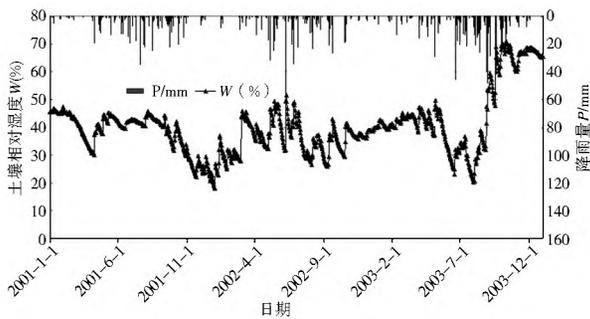


图 6 2001 年-2003 年的土壤相对湿度变化
Fig. 6 Variation of relative soil moisture from 2001 to 2003

(2) 典型干旱时段的干旱情况。根据西安统计年鉴中记载的农业实际受旱情况, 选取 2001 年-2003 年间的三个时段进行干旱评价, 结果见图 7-图 9。这三个时间段的土壤相对湿度变化趋势与同时段的降雨过程一致, 体现了降雨是该地区土壤含水量的主要来源这一特点。此外, 土壤相对湿度值均在 30% ~ 50% 之间, 旱情等级在中等干旱和严重干旱之间变化。

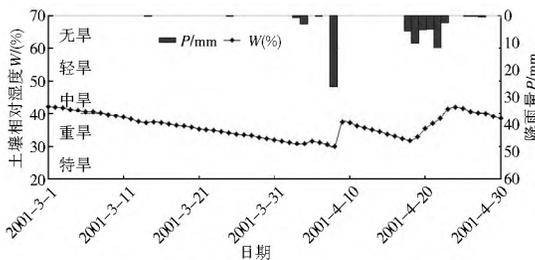


图 7 2001 年 3 月 1 日-4 月 30 日的土壤相对湿度变化
Fig. 7 Variation of relative soil moisture between March 1st, 2001 and April 30th, 2001

据 2002 年-2004 年的《西安年鉴》记载, 与往年比较, 2001 年春季降雨过程明显偏少; 3 月中旬西安市旱象开始显现, 并逐日加剧^[7]; 2002 年整个春季多数县区降水量偏少三

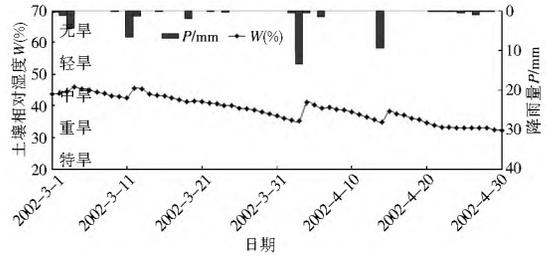


图 8 2002 年 3 月 1 日-4 月 30 日的土壤相对湿度变化
Fig. 8 Variation of relative soil moisture between March 1st, 2002 and April 30th, 2002

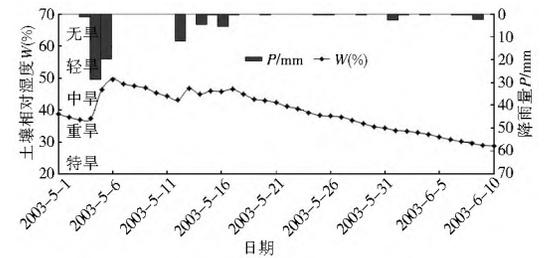


图 9 2003 年 5 月 1 日-6 月 10 日的土壤相对湿度变化
Fig. 9 Variation of relative soil moisture between May 1st, 2003 and June 10th, 2003

成, 春旱明显, 对夏作物的生长产生了不利影响^[18]; 2003 年 5 月下旬至 6 月上中旬特别干旱, 虽然有利于夏收, 但对玉米的播种及出苗造成很大影响^[19]。

综上所述, 通过 SWAT 模型模拟的土壤含水量对研究区 2001 年-2003 年间三个干旱时段进行的旱情评价结果与实际旱情大致吻合, 能反映该地区的旱情变化。可以认为, 基于 SWAT 模型土壤水模拟结果进行灞河流域的农业旱情评价, 具有一定的可行性。但是鉴于研究区历史资料有限, 特别是干旱评价成果过于概化, 难以为基于 SWAT 模型的干旱评价成果提供更有力的验证, 因此需要在未来资料累积的基础上进一步研究。

5 结论

(1) 基于 DEM 数据、土地利用、土壤和植被属性、实测水文气象数据等资料, 利用 SWAT 模型在灞河流域进行径流过程模拟, SWAT-CUP 中不确定性指标 P 因子和 R 因子、相对误差、 R^2 和 Ens 均在容许范围之内, 模拟结果较好, 表明 SWAT 模型对该流域径流过程模拟具有较好的适用性。

(2) 利用 SWAT 模型模拟 2001 年-2003 年的土壤含水量, 结合 SPAW 软件得到的田间持水量, 采用土壤相对湿度指标进行农业干旱评价, 评价结果与研究区实际旱情基本吻合。研究表明, 采用流域水文模型进行土壤含水量模拟, 为缺乏土壤墒情资料地区的农业旱情评价提供了一个有效解决途径。

参考文献 (References):

[1] 李茂松, 李森, 李玉慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 7-10. (LI MAO song, LI Sen, LI Yu hui. Studies on Drought in the Past 50 Years in China. Chinese Journal of Agrometeorology. 2003, 24(1): 7-10. (in Chinese))
[2] 国家统计局, 民政部. 中国灾情报告[M]. 北京: 中国统计出版

- 社, 1995. (National Bureau of Statistics of China, Ministry of Civil Affairs. Report of the Damage Caused by Disaster in China[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 新中国五十年统计资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999. (Comprehensive Statistical Data and Materials on 50 Years of New China[M]. Beijing: China Statistics Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 成福云. 干旱灾害对 21 世纪初我国农业发展的影响探讨[J]. 水利发展研究, 2002, 10(2): 31-33. (CHENG Fuyun. Investigate the Effects of Drought on China's Agricultural Development in the Early 21st Century[J]. Water Resources Development Research, 2002, 10(2): 31-33. (in Chinese))
- [5] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型—理论方法与应用[M]. 北京: 中国科学环境出版社, 2006. (HAO Fanghua, CHENG Hongguang, YANG Shengtian. Nonpoint Source Pollution Model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. (in Chinese))
- [6] R Jayakrishnan, R Srinivasan, C Santhi, et al. Advances in the Application of the SWAT Model for Water Resources Management[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 749-762.
- [7] J G Arnold, R Srinivasan, R S Muttiah, et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development[J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [8] Chanasyk D S, Mafumo E, Willms W. Quantification and Simulation of Surface Runoff from Fescue Grassland Watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59: 137-153.
- [9] F Bouraoui, S Benabdallah, A Jrad, et al. Application of the SWAT Model on the Medjerda River Basin (Tunisia)[J]. Physics and Chemistry of Earth, 2005, 30: 497-507.
- [10] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-351. (PANG Jing-peng, XU Zong-xue, LIU Chang-ming. SWAT Model Application: State of the Art Review[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 31-351. (in Chinese))
- [11] S L Neitsch, J G Arnold, J R Kiniry, et al. Soil and Water Assessment Tool theoretical document version. <http://swat.tamu.edu/documentation/>, 2005.
- [12] 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. (YUAN Junying, SU Baolin, LI Hui, et al. Runoff Simulation in Chaihe Reservoir Catchment Based on Swat Model[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2010, 46(3): 361-365. (in Chinese))
- [13] SL 424 2008, 旱情等级标准[S]. (SL 424 2008, Standard of Classification for Drought Severity[S]. (in Chinese))
- [14] 王战平. 灞河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 176-179. (WANG Zhanping. Hydrologic Characteristics Analysis in Bahe River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5): 176-179. (in Chinese))
- [15] Karim C Abbaspour. SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. <http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/swat/index>, 2013.
- [16] 薛晨. 基于 SWAT 模型的产流产沙模拟与模型参数不确定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011. (XUE Chen. SWAT-aided Surface Runoff and Sediment Yield Modeling and Parameter Uncertainty Analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. (in Chinese))
- [17] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2002[M]. 西安: 西安出版社, 2002. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2002[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [18] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2003[M]. 西安: 西安出版社, 2003. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2003[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [19] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2004[M]. 西安: 西安出版社, 2004. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2004[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2004. (in Chinese))

(上接第 6 页)

- [21] 殷水清, 高歌, 李维京, 等. 1961-2004 年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 256-266. (YIN Shuqing, GAO Ge, LI Weijing, et al. Long-term Precipitation Change by Hourly Data in Haihe River Basin during 1961-2004[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(2): 256-266. (in Chinese))
- [22] 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 829-832. (LI Jian, YU Rucong, WANG Jianjie. Study on the Daily Change Characteristics of Summer Precipitation in Beijing City[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(7): 829-832. (in Chinese))
- [23] Yu R, Wang B, Zhou T. Tropospheric Cooling and Summer Monsoon Weakening Trend over East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22): L22212.