

漳卫河平原农业水资源高效利用的模拟研究

I. 参数率定和模拟验证

潘登¹ 任理^{2*} 王英男³

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

3 国土资源部 土地整理中心, 北京 100035)

摘要 为了优化漳卫河平原地区的农田灌溉制度,本研究以 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)为工具,首先运用洗牌复形演化(SCE-UA)算法在位于该平原及其比邻地区的 2 个典型试验站率定冬小麦和夏玉米的作物参数,再以遥感监测的蒸散数据为目标,应用拉丁超立方-单次单因素(LH-OAT)方法对 SWAT 中的相关参数进行敏感性分析,选出了对实际蒸散最敏感的参数,并用序贯不确定性(SUFI-2)算法优化参数进行不确定性分析。在此基础上,对冬小麦-夏玉米轮作体系产量的长期模拟结果进行验证。这些参数率定和模拟验证结果为进一步深入研究该地区水分生产函数和优化灌溉制度奠定了基础。

关键词 水资源; ET; 灌溉制度; 生产函数; 漳卫河平原

中图分类号 S 274.1

文章编号 1007-4333(2011)05-0013-07

文献标志码 A

Study on utilization of agricultural water resources with high efficiency in Zhangwei river plain

I. Parameter calibration and validation

PAN Deng¹, REN Li^{2*}, WANG Ying-nan³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Centre of Land Consolidation, Ministry of Land and Resource, Beijing 100035, China)

Abstract As an important river system of Haihe river plain, Zhangwei river plain is among those typical regions with severely water shortage in Northern China. In this paper, in order to optimize irrigation schedule, Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) was used to calibrate the crop parameter of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in two stations which are to be or near the plain. The sensitivity of parameters was analyzed based on actual evapotranspiration by remote sensing (RS), and the most sensitive parameters were chose. The next step was to optimize the parameters and give its uncertainty analysis by using "Sequential Uncertainty Fitting Algorithm" (SUFI-2). Based on the calibrated parameters, under the consideration of uncertainty of the model, the yield of long term simulation of winter wheat and summer maize rotation system were validated. The results of calibration and validation laid a firm foundation for the further research on optimization of water product function and irrigation regime.

Key words water resources; ET; irrigation schedule; production function; Zhangwei river plain

收稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家“973”计划项目(2006CB403406, 2009CB118607)

第一作者: 潘登, 博士研究生, E-mail: ffdou@126.com

通讯作者: 任理, 教授, 主要从事土壤物理学和农业水文学研究, E-mail: renl@mx.cei.gov.cn

海河流域是中国水问题最为突出的地区之一^[1],漳卫河流域作为海河流域的重要水系,水资源供需矛盾、水环境恶化等问题十分突出。据统计,海河流域人均水资源占有量仅 305 m^3 ,仅为全国平均水平的 $1/7$ 和世界平均水平的 $1/27$;而漳卫河流域水资源缺乏状况又居海河流域之首,全流域人均水资源量仅为 240 m^3 ,属于极度资源型缺水地区^[2]。为了流域水资源的可持续发展,建立流域分布式水文模型,是一项亟待解决的工作。

当前国内外已经出现大量的分布式水文模型,如 SHE (System Hydrologic European)、IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 等^[3]。建立在 GIS 基础上的 SWAT 模型具有很强的物理机制,近十年来已在国内外广泛应用^[4-9],在漳卫河流域也有应用实例。朱新军等^[10]基于 SWAT 构建漳卫河流域分布式水文模型,对模型的几个重要参数进行敏感性分析,总结出其取值变化对模拟结果的影响规律。蔡锡填^[11]用遥感监测 ET (evapotranspiration) 对 SWAT 模型所模拟的漳卫南运河流域主要农业耕作区实际 ET 进行了率定分析,并探讨了 SWAT 模型中农业耕作措施设置以及土壤和作物参数的合理取值问题。考虑到漳卫河流域是我国典型农业区,冬小麦-夏玉米轮作体系为其主要的种植模式,本研究针对漳卫河流域的特性,面向流域水资源综合管理和应用的需求,选择国际上应用广泛的 SWAT 模型来建模。首先率定冬小麦和夏玉米的作物参数,然后使用遥感监测 ET 数据对该区域进行模型参数的率定和验证,同时分析参数的不确定性,并对冬小麦-夏玉米轮作体系的产量进行长时间模拟验证。

1 材料与方法

1.1 SWAT 模型原理

SWAT 模型是一个确定性的分布式水文模型^[12],模型的主要组件包括气象、水文、沉积、作物生长、营养物、农药、农业管理以及河道等。本研究主要讨论水文、作物生长和田间管理模块。

SWAT 提供了 3 种方法计算潜在蒸散量,即 Penman-Monteith 方法、Priestley-Taylor 方法以及 Hargreaves 方法,本研究采用联合国粮农组织

(FAO) 推荐的 Penman-Monteith 方法。基于潜在蒸散、土壤和土地利用参数,模型分别计算土壤实际蒸发量和植被实际蒸腾量。

SWAT 模型利用一个单一植物生长模型来模拟所有类型的土地覆被,作物在某一天的潜在生长定义为在理想状态下其生物量的增加,某一天生物量的潜在增长是所截获能量和作物将能量转化为生物量的效率的函数,能量截获量是太阳辐射量和作物叶面积指数的函数。

由于环境限制,作物不可能达到最优的生长状态和产量,模型考虑的胁迫项包括水分、养分和温度,模型依据作物每天受到的胁迫模拟作物的实际生长。

对于任一水文响应单元 (SWAT 模型的最小计算单元,在一个水文响应单元内,只有一种土地利用方式和土壤类型),用户可以定义其管理措施,如定义生育期的开始和结束,确定耕地的时间以及施肥、农药、灌溉的时间和用量。在生育期结束时,生物量可以以产量的形式从水文响应单元移除或以残茬的形式留在地表。本研究考虑的管理措施包括种植、灌溉以及施肥。

关于 SWAT 模型的详细介绍参见 Arnold 等^[12]和 Neitsch 等^[13]的文献。

1.2 研究区概况与资料来源

漳卫河流域位于海河流域南部,是其重要组成水系之一(图 1)。流域面积为 3.77 万 km^2 ,其中山区面积约占 68.3% ,平原约占 31.7% ,本研究区域为漳卫河平原。漳卫河流域属于暖温带大陆性季风气候,流域平原区多年平均降水量为 595 mm ,降水量年际变化大,年内分布极不均匀,多集中在 6—9 月,约占年降水量的 70% 以上。

DEM 图来源于 SRTM 数据库,原始分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$,考虑到模型运行时间和模拟精度,将分辨率转化为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$,投影为 Albers 等面积圆锥投影,椭球参数为 Krasovskii。土地利用图来源于 USGS 数据库,分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,该区涉及 12 种 USGS 分类,将 USGS 分类代码转化为 SWAT 能识别的模型代码后,共分为 11 种。土壤类型图来源于 FAO 数据库,分辨率为 $5' \times 5'$,土壤单元 (soil unit) 是 FAO 土壤图的基本单元,在漳卫河平原原有 4 种土壤单元,每一个土壤单

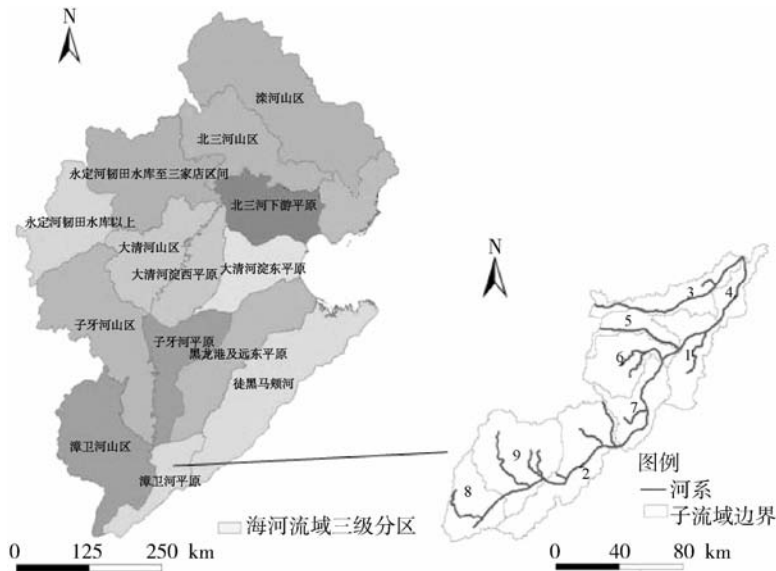


图1 漳卫河平原

Fig. 1 Zhangwei river plain

元包含2层土壤物理化学属性参数,表层(0~30 cm)和底层(大于30 cm)。降水、最高最低气温、相对湿度、风速等气象资料来源于国家气象局气象中心、河北省气象局以及海河流域水文资料提供的14个站的逐日实测数据。冬小麦-夏玉米轮作体系是该地区的主要种植模式,本研究收集了种植制度、灌溉制度和施肥制度等农业管理措施的信息,其中灌溉制度依据《中国主要作物需水量等值线图研究》按照水文年型进行划分。在模型数据处理基础之上,将研究区划分为9个子流域和26个水文响应单元。

1.3 作物参数率定

本研究采用SWAT模型自带的自动率定工具—SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona)算法^[14]率定冬小麦和夏玉米的作物参数,该算法是段青云博士结合遗传算法和下山单纯形算法发展起来的一个复合式演化算法,具有计算速度快,结果稳定的优点,在国内外水文模型参数率定中应用十分广泛。

本研究在漳卫河平原及其比邻地区选择了2个田间试验资料较为丰富的试验站,中国农业科学院农田灌溉研究所洪门试验站位于北纬 $35^{\circ}19'$ 、东经 $113^{\circ}53'$,海拔73.2 m,多年平均气温 14.1°C ,多年

平均降雨量588.8 mm,多年平均蒸发量2 000 mm^[15]。中国农业大学曲周试验站位于北纬 $36^{\circ}52'$ 、东经 $115^{\circ}01'$,海拔约为40 m,属暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温 13.1°C ,多年平均降水量556.2 mm,多年平均蒸发量为1 841 mm^[16]。上述2个试验站所在区域的耕作制度以冬小麦-夏玉米轮作为主,是黄淮海平原的典型代表区域。

本研究收集2005—2006年洪门试验站和1999—2005年曲周试验站上冬小麦和夏玉米的叶面积指数、地上部生物量以及产量观测数据^[16-18],用于率定作物参数。表1列出了洪门试验站和曲周试验站上作物参数的率定值和模型默认值。经过调试后的冬小麦和夏玉米的叶面积指数、地上部生物量的模拟值与实测值的动态趋势较为一致,洪门试验站上冬小麦和夏玉米的模拟产量与实测产量的相对误差分别为0.09%和0.10%,曲周试验站上冬小麦和夏玉米的模拟产量与实测产量的相对误差分别为5.07%和15.04%,由于洪门试验站只有1年的实测数据,所以率定出的作物参数还需要区域上的进一步验证。为了节省篇幅,本研究仅将曲周试验站的冬小麦地上部生物量和产量的模拟结果列出(图2)。

表1 冬小麦和夏玉米作物参数

Table 1 Crop parameters of winter wheat and summer maize

作物参数	参数名称	冬小麦			夏玉米		
		默认值	洪门	曲周	默认值	洪门	曲周
BIO_E	光合辐射利用率	30.00	37.90	33.42	39.00	40.47	42.92
BLAI	潜在最大叶面积指数	4.00	4.50	4.98	3.00	4.84	4.13
FRGRW1	最优叶面积指数曲线上 第一个点对应的积温比	0.05	0.25	0.25	0.15	0.25	0.25
LAIMX_1	最优叶面积指数曲线上 第一个点对应的叶面积比	0.05	0.06	0.14	0.05	0.16	0.05
FRGRW2	最优叶面积指数曲线上 第二个点对应的积温比	0.45	0.45	0.45	0.50	0.45	0.55
LAIMX_2	最优叶面积指数曲线上 第一个点对应的叶面积比	0.95	0.74	0.61	0.95	0.92	0.85
DLAI	叶面积开始衰退时对应的积温比	0.50	0.50	0.52	0.70	0.75	0.90
EXT_COEF	消光系数	0.60	0.60	0.50	0.60	0.55	0.51
HVSTI	最优生长条件下的收获指数	0.40	0.46	0.50	0.50	0.46	0.50

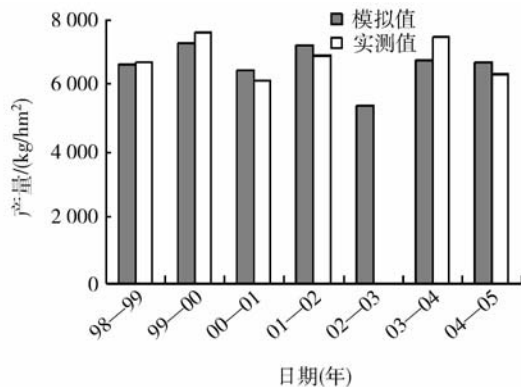
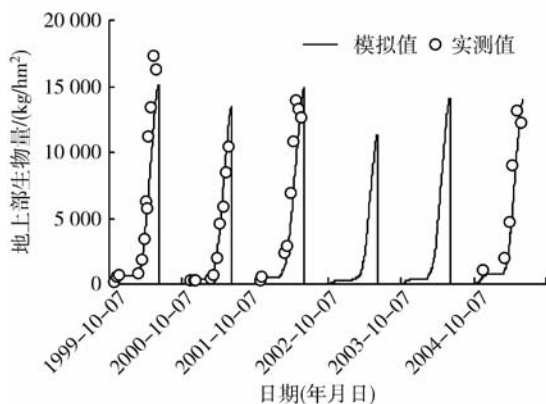


图2 曲周试验站冬小麦地上部生物量、产量模拟值与实测值的对比

Fig. 2 Comparison between simulated aboveground biomass, yield of winter wheat and observed data in Quzhou station

1.4 参数敏感性分析

参数敏感性分析的目的在于分析判断输入参数值的变化对输出结果的影响的重要性程度,一个敏感参数的不确定性将会显著影响模型的预测结果,在模型率定期和验证期,对模型敏感性参数的适当调节是非常重要的^[19-20]。

AVSWAT2005 中采用的 LH-OAT (Latin hypercube one-factor-at-a-time) 方法,由 Morris 于

1991 年提出^[21]。LH-OAT 方法对每一抽样点(LH 抽样法)进行 OAT 敏感性分析,该方法既保证了所有参数在所有区间内采样,又保证了模型每次的输出结果的变化能够确切归于输入参数的变化^[19]。本研究以遥感监测 ET 数据(中国水利水电科学研究院水利研究所刘钰高级工程师提供)为目标,确定出 SWAT 模型中对实际 ET 最敏感的参数。SWAT 模型的敏感性分析工具提供了 25 个参数,

排除河道对实际 ET 的影响,选择了 18 个参数进行敏感性分析,依照敏感性排序确定出最敏感的 6 个参数为土壤有效含水量(AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、植物吸收补偿系数(EPCO)、最大叶面积指数(BLAI)、最大植被截留量(CANMX)、第二干燥条件下 SCS 径流曲线系数(CN2)。

1.5 参数率定与不确定性分析

在水文模型参数率定中,人们发现存在不同参数组合可以达到类似的模拟效果,很难确定一组最优参数,这种现象就是“异参同效”^[22]。这些参数值的组合影响水文模拟的时间序列,从而导致水文模拟的不确定性。为了分析水文模拟的不确定性,水文学家提出了很多方法,如 MCMC(Markov Chain Monto Carlo)^[23], GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)^[24]等。本研究采用 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting Algorithm)^[25]方法,该方法能将不确定性整合到参数中,并获取最小的参数不确定性范围。

依据 SUFI-2 程序的默认输出项,本研究选用 *P*-factor、*R*-factor、决定系数 R^2 、确定性效率系数 Nash-Sutcliffe 系数评价模型的适用性。*P*-factor 定义为观测数据被预测值 95% 的不确定性包含的比例,其余 3 项指标定义如下:

$$R\text{-factor} = \frac{1}{n\sigma_x} \sum_{i=1}^n (X_U - X_L)_i \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (3)$$

式中: Q_m 为观测值; Q_s 为模拟值; \bar{Q}_m 为观测值的平均值; \bar{Q}_s 为模拟值的平均值; n 为观测次数。 X_L 和 X_U 分别为模拟值累积分布的 2.5% 和 97.5%; σ_x 是观测变量 X 的标准偏差。*P*-factor 和 *R*-factor 用于衡量参数的不确定性, R^2 和 NS 由最优模拟结果与观测值计算得出,用于说明模拟精度。*P*-factor 大于 0.6、*R*-factor 小于 1.5、 R^2 大于 0.6、NS 系数大于 0.7 即为满足精度要求。

本研究以 2002—2004 年遥感监测 ET 数据为目标,对 SWAT 模型实际 ET 最敏感的 6 个参数进

行率定。由于遥感 ET 观测数据时间系列较短,本研究利用遥感 ET 监测数据从空间上率定和验证模型,运行时段为 1999—2004 年,其中 1999—2001 年为预热期。

2 结果与分析

2.1 参数率定结果

漳卫河平原分别有 5 个子流域和 4 个子流域参与 ET 的率定和验证。表 2 列出了漳卫河平原子流域尺度上月平均 ET 的 4 项统计指标。67% 子流域的 *P*-factor 大于 0.6,100% 的子流域 *R*-factor 小于 1.5,100% 的子流域 R^2 大于 0.6,22% 的子流域 NS 系数大于 0.7。总的来看,*P*-factor、*R*-factor 和 R^2 3 项指标表现很好,NS 系数表现较差,可能是因为 NS 系数不太适合用来衡量月平均 ET 的误差精度。

表 2 月平均 ET 的统计指标
Table 2 Statistics results of monthly ET

分区	子流域编号	<i>P</i> -factor	<i>R</i> -factor	R^2	NS 系数
率定区域	sub_2	0.58	0.39	0.77	0.65
	sub_6	0.67	0.41	0.7	0.44
	sub_7	0.67	0.40	0.72	0.58
	sub_8	0.58	0.37	0.78	0.56
	sub_9	0.56	0.32	0.70	0.64
验证区域	sub_1	0.75	0.49	0.76	0.69
	sub_3	0.72	0.45	0.85	0.81
	sub_4	0.75	0.47	0.86	0.80
	sub_5	0.69	0.45	0.67	0.43

图 3 显示了部分率定和验证子流域的月平均 ET 模拟值不确定性区间和遥感监测 ET 的对比结果。如图所示,模拟值与遥感监测 ET 的变化趋势较为一致,但是部分月份吻合的不好,可能是模拟输入的灌溉制度与田间实际灌溉制度的差别所致。sub3 的 ET 变化曲线每年出现 2 个高峰期,是因为该子流域以冬小麦-夏玉米轮作的土地利用方式为主,2 个高峰分别对应冬小麦和夏玉米的生长高峰期拔节-灌浆期。Sub 9 的土地利用类型种类较多(农业用地,林地,草地等),因此 ET 变化曲线没有表现出明显的规律。

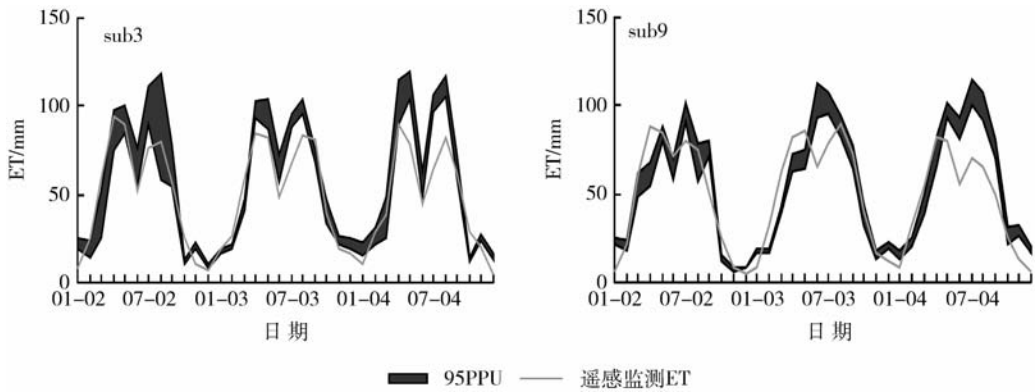


图3 部分子流域月平均ET模拟值的95PPU范围与遥感监测ET值

Fig. 3 Monthly simulated ET for two selected subbasins showing the 95% prediction uncertainty intervals along with the ET monitored by remote sensing

2.2 冬小麦和夏玉米产量验证

为了进一步检验参数率定值在漳卫河平原的适用性,本研究收集了1985—2005年部分县的冬小麦和夏玉米统计年鉴产量数据,尽管由于采样和统计口径的原因,统计年鉴产量可能存在明显偏差,但仍然是验证模拟结果的重要数据^[26]。模拟时段为1982—2005年,其中1982—1984年为模型预热期。

漳卫河平原有5个子流域参与冬小麦和夏玉米产量验证,对于冬小麦产量, P -factor在0.80~0.95之间, R -factor在0.82~1.50之间, R^2 在0.19~0.84之间,其中2个子流域的 R^2 大于0.6,NS系数在0.05~0.78之间,其中1个子流域的NS系

数大于0.70;对于夏玉米产量, P -factor在0.53~0.94之间,其中4个子流域的 P -factor大于0.60, R -factor在0.76~1.46之间, R^2 在0.38~0.86之间,其中3个子流域的 R^2 大于0.60,NS系数在-0.86~0.77之间,其中1个子流域的NS系数大于0.70。总的来看,产量验证结果是较为合理的。图4显示了sub7的冬小麦和夏玉米模拟产量的不确定性区间与统计年鉴产量的对比情况。由图可知,模拟产量与统计年鉴产量的趋势吻合的较好,1985—2000年间产量一直保持增长,2000年以后产量反而略有降低,对于统计年鉴产量中的低值(例如1997年),模拟产量与之差异较大。

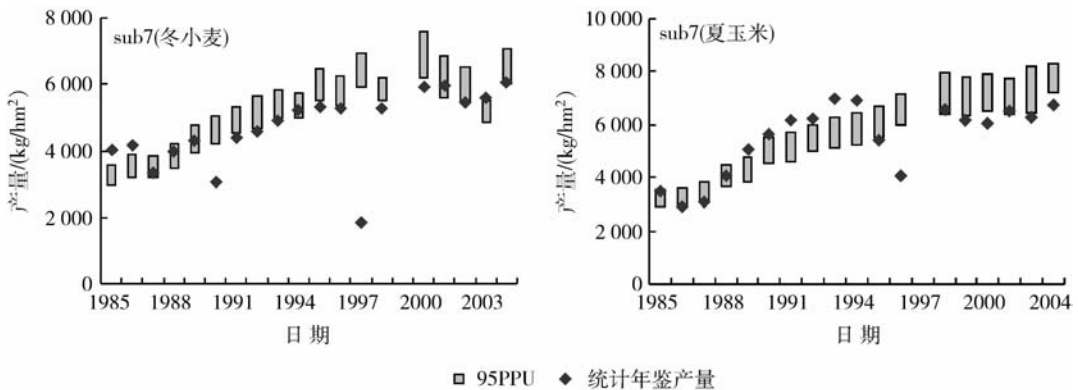


图4 部分子流域产量模拟值的95PPU范围与统计年鉴产量

Fig. 4 Simulated yield for the selected subbasin showing the 95% prediction uncertainty intervals along with the yield of statistical yearbook

3 讨论

漳卫河平原是河南省重要的粮食产区,水资源

短缺问题十分严重,建立该区域的分布式水文模型对未来农业水资源的可持续利用是十分重要的。本研究首先分别在位于和比邻该区的试验资料相对丰

富的洪门和曲周试验站,率定 SWAT 模型的冬小麦和夏玉米的作物参数,率定结果较好。结合遥感监测 ET 数据,用 SUFI-2 方法对参数敏感性分析优选出的参数进行率定以及不确定性分析,该方法评价优化参数模拟精度的同时,能够给出模拟结果的不确定性区间。优化结果表明,除了 NS 系数,其余 3 项指标满足精度要求。在参数率定的基础上,运用 1985—2005 年的统计年鉴产量对 SWAT 模型的模拟产量进行了验证模拟。验证结果表明,模拟产量与统计年鉴产量的趋势卫河的较好。综上所述,采用多目标分步率定的方法,得到的模型参数校正值得在漳卫平原原有较好的适用性,可用于进一步的模拟情景分析^[27]。

致谢 中国水利水电科学研究院水利研究所刘钰教授级高级工程师提供了遥感 ET 的数据、清华大学水利水电工程系杨大文教授提供了 FAO 土壤数据、中国水利水电科学研究院水资源研究所贾仰文总工程师提供了海河流域三级区划图、Swiss Federal institute of Aquatic Science and Technology (Eawag) 的 Dr. Abbaspour 对参数率定中 SUFI-2 算法进行了指导、中国农业大学资源与环境学院土壤和水科学系的毛萌副教授对试验站点输入数据进行了质量控制,谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] 王中根,朱新军,夏军,等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进展,2008,27(4):1-6
- [2] 宋德武. 漳卫南运河水资源开发利用对策[J]. 海河水利,2003,6:9-11
- [3] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报,2003,18(2):168-173
- [4] Tripathi M P, Panda R K, Raghuvanshi N S. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model[J]. Hydrol Process,2005,19:809-826
- [5] Wu K S, Johnston C A. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model[J]. J Hydrol,2007,337:187-199
- [6] Ficklin D L, Luo Y Z, Luedeling E, et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT[J]. J Hydrol,2009,374:16-29
- [7] Moradkhani H, Baird R G, Wherry S A. Assessment of climate change impact on floodplain and hydrologic ecotones [J]. J Hydrol,2010,395:264-278
- [8] 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
- [9] 夏智宏,周月华,许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J]. 干旱区地理,2010,33(1):158-163
- [10] 蔡锡填,徐宗学,苏保林,等. 区域蒸散发分布式模拟及其遥感验证[J]. 农业工程学报,2009,25(10):154-161
- [11] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. J Hydrol,2008,352:30-49
- [12] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment-Part 1: Model development[J]. J Am Water Resour Assoc,1998,34 (1):73-89
- [13] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation[R]. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. TWRI Report TR-191,2002
- [14] Duan Q, Gupta V K, Sorooshian S. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resour Res,1992,28:1015-1031
- [15] 亢连强,齐学斌,马耀光,等. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉对冬小麦生长的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(6):95-100
- [16] 张娟. 河北曲周农田冬小麦和夏玉米水分利用效率研究[D]. 北京:中国农业大学,2006
- [17] 胡克林. 农田尺度下土壤属性的空间变异性及硝酸盐淋失的随机模拟[D]. 北京:中国农业大学,2000
- [18] 亢连强. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉的试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2005
- [19] 张丽娟,秦富仓,岳永杰,等. SWAT 模型灵敏性分析模块在云州水库流域的应用[J]. 水土保持通报,2010,30(3):122-127
- [20] Chu T W. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in Piedmont physio-graphic region [D]. Maryland: University of Maryland, College Park,2003
- [21] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Techno Metrics,1991,33(2):123-131
- [22] 刘艳丽,梁国华,周惠成. 水文模型不确定性分析的多准则似然判据 GLUE 方法[J]. 四川大学学报,2007,41(4):89-96
- [23] Vrugt J A, Gupta H V, Bouten W, et al. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters[J]. Water Resour Res,2003,39(8):1201
- [24] Beven K, Binley A. The future of distributed models-model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrol Process,1992,6(3):279-298
- [25] Abbaspour K C, Johnson C A, van Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone J,2004,3:1340-1352
- [26] 高如泰,陈焕伟,李保国. 黄淮海平原冬小麦生长期土壤水氮利用效率模拟分析[J]. 中国农业科学,2006,39(3):552-562
- [27] 潘登,任理,王英男. 漳卫河平原农业水资源高效利用的模拟研究. II. 水分生产函数的建立和灌溉制度的优化[J]. 中国农业大学学报,2011,16(5):20-25