

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.031

于坤霞, 闫泽云, 李梦楠, 等. 变化环境下渭河流域土壤水储量模拟及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

YU Kunxia, YAN Zeyun, LI Mengnan, et al. Simulation of soil water storage and analysis of influencing factors in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

变化环境下渭河流域土壤水储量模拟及影响因素

于坤霞¹, 闫泽云¹, 李梦楠^{1,2}, 李占斌¹, 李鹏^{1,3},
赵阳⁴, 贾路¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 国核电力规划设计研究院重庆有限公司, 重庆 401121;
3. 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: [目的] 随着气候变化和人类活动影响加剧, 流域气候和下垫面条件发生改变, 为准确模拟土壤水分变化过程并分析其影响因素对于地区的水资源管理和植被建设的重要意义。[方法] 以黄土高原地区渭河流域为研究对象, 基于 ABCD 水文模型, 采用 EFAST 法分析模型参数敏感性, 构建常参数和时变参数模型, 比较不同参数模型的径流深和土壤水储量模拟精度, 探讨气候变化和植被恢复对渭河流域土壤水储量变化的影响, 明确土壤水储量变化的主导因素。[结果] 土壤水层补给地下水的比例参数 c 最为敏感, 地下水储放系数 d 、流域实际蒸散发量与土壤蓄水量之和的上限参数 b 次之, 表征土壤完全饱和和前径流的倾向性参数 a 最不敏感; 与 ABCD 常参数模型相比, 时变参数模型将率定期径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别提高 19%、10%、19%, 验证期的 NSE、KGE、 R^2 分别提高 7%、7%、9%, 时变参数模型显著改善径流深模拟效果; 基于时变参数模型模拟的渭河流域土壤水储量与 ERA5-Land 0-100 cm 土层土壤水储量的相关关系最强, 二者的变化过程基本相同; 不同影响因素对渭河流域土壤水储量变化的影响程度由强到弱依次为潜在蒸散发 > 降水 > NDVI。[结论] 研究成果为该地区水资源规划和管理、植被建设提供科学依据, 也为其他类似地区的土壤水储量研究提供参考。

关键词: 渭河流域; ABCD 水文模型; 时变参数; 土壤水储量; 影响因素

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

Simulation of Soil Water Storage and Analysis of Influencing Factors in the Weihe River Basin under Changing Environment

YU Kunxia¹, YAN Zeyun¹, LI Mengnan^{1,2}, LI Zhanbin¹, LI Peng^{1,3},
ZHAO Yang⁴, JIA Lu¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Chongqing Co., Ltd. Chongqing 401121, China; 3. China Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] With the intensified influence of climate change and human activities, the climate and underlying surface conditions of the basins have changed. Accurately simulating the process of soil moisture change and analyzing its influencing factors are of great significance for regional water resource management and vegetation construction. [Methods] The Weihe River Basin in the Loess Plateau was taken as the research object. Based on the ABCD hydrological model, the EFAST method was used to analyze the parameter sensitivity of the model, and the constant parameter and time-varying parameter models were constructed. The runoff depth and soil water storage simulation accuracy of different parameter models were compared.

收稿日期: 2023-12-13 修回日期: 2024-01-16 录用日期: 2024-01-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(52079104, U2040208); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLSF-60)

第一作者: 于坤霞(1989-), 女, 河南长垣人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: yukunxia@126.com

通信作者: 于坤霞(1989-), 女, 河南长垣人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: yukunxia@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

The effects of climate change and vegetation restoration on soil water storage changes in the Weihe River Basin were discussed, and the dominant factors of soil water storage changes were clarified. [Results] The proportional parameter of soil water layer recharge groundwater c was the most sensitive, followed by the groundwater storage coefficient d , the upper limit parameter b of the sum of actual evapotranspiration and soil water storage, and the tendency parameter a of runoff that before the soil is completely saturated was the least sensitive. Compared with the ABCD constant parameter model, the time-varying parameter model increased the values of NSE, KGE, and R^2 of the runoff depth simulation results by 19%, 10%, and 19%, respectively, and the NSE, KGE, and R^2 of the verification period increased by 7%, 7%, and 9%, respectively. The time-varying parameter model significantly improved the runoff depth simulation results. The strongest correlation between soil water storage in the Weihe river basin and ERAS-Land 1–100 cm soil layer based on time-varying parameter model simulation, and the change process of the two agreed well. The degree of different influencing factors on the change of soil water storage in the Weihe River Basin from strong to weak was potential evapotranspiration > precipitation > NDVI. [Conclusion] The research results provide a scientific basis for water resources planning and management and vegetation construction in this area and they also provide references for soil water storage research in other similar areas.

Keywords: Weihe River Basin; ABCD hydrological model; time-varying parameters; soil water storage; influencing factors

Received: 2023-12-13

Revised: 2024-01-16

Accepted: 2024-01-31

渭河是黄河第一大支流,在气候变化和人类活动的影响下,渭河流域特征条件和水文循环过程均发生较大变化^[1]。土壤水分作为陆地水文循环过程中的一个关键变量,其动态变化对生态系统具有重要影响^[2]。获取土壤水分的长期变化监测数据成本较大,模型模拟是得到长序列土壤水分变化的重要手段^[3]。由于土壤水分与土壤、气候和植被间的作用关系复杂^[4],其是地球环境和气候系统中最难估计的变量之一,准确估算土壤水分变化过程,并分析气候变化和植被恢复对土壤水储量变化的影响,对于合理利用水资源、维护生态平衡具有重要意义。

目前,国内外学者^[5]建立多种土壤水分动态模拟模型,根据模型原理可分为经验模型、水量平衡模型和水动力学模型。对于区域尺度的土壤水分动态模拟,需要考虑气象、土壤、植被等因素的空间变化,所采用的方法主要是水量平衡分析。SWAT 模型(soil and water assessment tool)、HEC-HMS 模型(hydrologic engineering center—hydrologic modeling system)、WEP 模型(water and energy transfer process)等都是基于水量平衡原理模拟土壤水分动态变化,上述模型的模型结构都较为复杂,对数据要求较高,需要大量准确的输入数据,且模型参数估计不确定性较大。THOMAS^[5]提出仅有 4 个参数的 ABCD 水量平衡模型,参数少且易优化,同时,明确包含主要水文过程;ALLEY 等^[6]将 ABCD 模型推广为

月水量平衡模型,并通过比较几种区域性的月水量平衡模型发现,ABCD 模型具有较强的适用性;LI 等^[7]应用 ABCD 模型模拟汉江上游流域土壤水储量和实际蒸散发的变化,评估气候变化和人类活动对不同季节径流的影响。上述均未考虑在变化环境下流域径流序列的一致性已然发生变化,传统水文模拟中假设流域处于“稳态”,认为模型参数随时间保持不变,受气候变化和人类活动的影响,流域气候、水文、植被覆盖状况等要素发生改变,模型的静态参数不能很好地将流域特征条件的动态变化反映出来^[8],从而无法精准地模拟流域水文变量,如基流、土壤水储量的变化等^[9],而模型参数随时间变化更符合实际。WE-STR 等^[10]将 GR4J 水文模型应用于澳大利亚 Scott Creek 流域,建立模型参数与降水、潜在蒸散发的函数关系式,定量描述模型参数的动态变化;LUO 等^[11]基于 SIMHYD 模型对澳大利亚 12 个流域进行径流预测发现,时变模型参数可提高径流模拟效果。因此,有必要开展模型参数时变研究,改善水文模型在变化环境下的模拟效果。

以黄土高原地区渭河流域为研究对象,基于 ABCD 水文模型,考虑气候变化和植被恢复的影响,建立模型参数与环境表征因子的函数关系,构建常参数和时变参数模型,比较不同参数模型的径流深和土壤水储量模拟精度,检验基于 ABCD 时变参数水文模型模拟土壤水储量的可行性,最后分析不同影响因素

对土壤水储量变化的直接作用和间接作用,探讨气候变化和植被恢复对渭河流域土壤水储量变化的影响,明确土壤水储量变化的主导因素。研究成果可为管理者对流域水资源规划以及制定合理的管理保护措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取的研究区为渭河流域(华县站以上),位于黄河中游($33^{\circ}32' - 37^{\circ}27' N$, $103^{\circ}45' - 110^{\circ}18' E$, 图1)。渭河是黄河第一大支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,自西向东主要流经甘肃东部和陕西中部等县区,于渭南市潼关县港口镇汇入黄河。渭河干流全长818 km,总集水面积13.48万 km^2 ,选取渭河华县站以上流域为研究区域,流域面积10.65万 km^2 ,占渭河全流域面积的79.02%。该地区属于温带大陆性季风气候,渭河流域多年平均降水量523.97 mm(1982—2015年),年内降水分配不均,主要集中在夏秋季,约占全年降水的60%以上。流域多年平均潜在蒸散发量930.19 mm,年中夏季潜在蒸散发量最大,冬季潜在蒸散发量最小,夏季潜在蒸散发量可占年潜在蒸散发量的40%以上。自20世纪90年代以来,全球气候变化异常,渭河流域降水呈减少趋势,且随着社会经济的快速发展,耗水量不断增加,河道径流量大幅衰减。渭河流域生态环境较为脆弱,自1999年实施退耕还林(草)等保护政策以来,植被覆盖恢复明显。

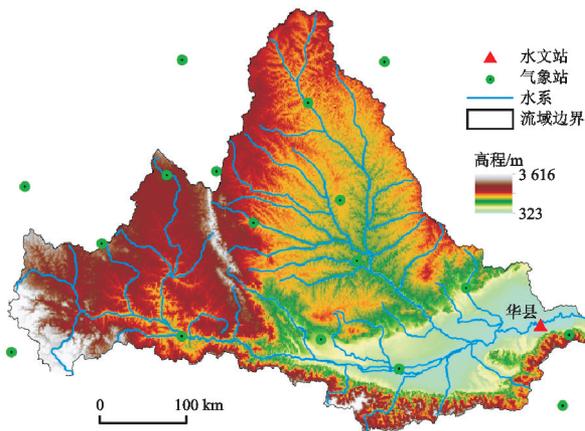


图1 渭河流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Weihe River Basin

1.2 研究数据

使用的数据包括气象数据、水文数据、NDVI数据和土壤水分数据,数据序列长度均为1982—2015年。气象数据收集渭河流域周边17个气象站的降水量、最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、日照时数、近地表风速,时间尺度为日尺度,数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),

采用联合国粮食及农业组织推荐的Penman—Monteith公式计算潜在蒸散发量,利用泰森多边形法计算渭河流域平均降水量、平均潜在蒸散发量;水文数据收集到华县水文站逐日平均流量,数据来源于《中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料》;植被数据采用的是AVHRR GIMMS NDVI 3g数据,空间分辨率为 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$,时间分辨率为15天,数据来源于美国国家航空航天局(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>);采用的土壤水分数据是ERA5—Land再分析数据集中的第1层(0—7 cm)土壤含水量、第2层(7—28 cm)土壤含水量和第3层(28—100 cm)土壤含水量,时间分辨率为月,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,单位为体积百分比(m^3/m^3),数据来源于哥白尼气候变化服务数据平台(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 ABCD水文模型 ABCD水文模型是由THOMAS^[5]在1981年提出,该模型有 a 、 b 、 c 、 d 4个参数,以月降水和月潜在蒸散发作为输入,模拟流域径流量、土壤蓄水量、地下水储量、实际蒸发量的变化,与其他常用的概念性水文模型相比,该模型具有概念清晰、结构简单、参数少、模拟精度高等优点,已在国内外不同气候条件下多个流域得到应用,具有良好的区域适用性^[12]。模型结构见图2。

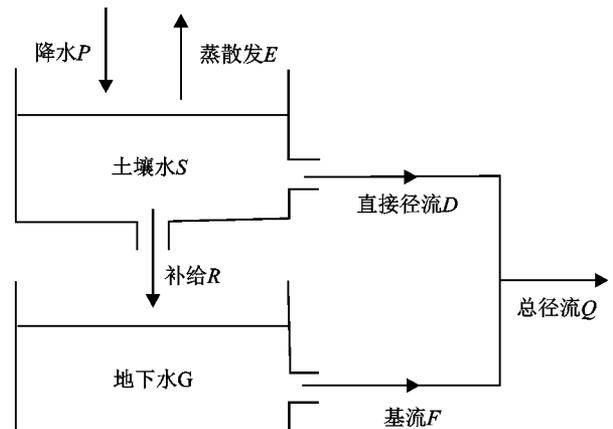


图2 ABCD模型结构

Fig. 2 ABCD structural model

ABCD模型将流域储水空间划分为土壤水和地下水2层,基于水量平衡原理构建土壤水、地下水的均衡方程。在1个时间步长内,土壤水层的水量平衡方程为:

$$S_i - S_{i-1} = P_i - E_i - R_i - D_i \quad (1)$$

式中: S_{i-1} 和 S_i 分别为第 i 个时段初、末的土壤蓄水量(mm); P_i 、 E_i 、 R_i 、 D_i 分别为第 i 个时段的降水量、实际蒸散发量、地下水补给量、直接径流量(mm)。

地下水层的水量平衡方程为:

$$G_i - G_{i-1} = R_i - F_i \quad (2)$$

式中: G_{i-1} 和 G_i 分别为第 i 个时段初、末的地下水储量(mm); F_i 为第 i 个时段内的基流量。

Thomas 在模型中定义 2 个状态变量,有效水量 W_i 和可能蒸散发量 Y_i , 计算公式为:

$$W_i = P_i + S_{i-1} \quad (3)$$

$$Y_i = E_i + S_i \quad (4)$$

式中:有效水量 W_i 是可能蒸散发量与土壤水层的出流量之和,可能蒸散发量 Y_i 是指流域蒸散发的最大水量。假定 Y_i 与 W_i 服从以下非线性函数关系:

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_i + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_i b}{a}} \quad (5)$$

式中: a 和 b 均为模型参数, a 为土壤饱和前形成径流的倾向性; b 为流域实际蒸散发量与土壤蓄水量之和的上限。

模型假设 S_i 与 Y_i 的关系为:

$$S_i = Y_i \exp\left(\frac{-PET_i}{b}\right) \quad (6)$$

式中: PET_i 为潜在蒸散发量;采用 Penman - Monteith 公式计算潜在蒸散发量。

能产生径流的水量 $W_i - Y_i$ 再分配为直接径流量 D_i 和地下水补给量 R_i , 计算公式为:

$$D_i = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (7)$$

$$R_i = c(W_i - Y_i) \quad (8)$$

式中: c 为模型参数,表示土壤水层补给地下水的比例。

模型假定地下水层为线性水库,得到地下水储量 G_i 和基流 F_i , 计算公式为:

$$G_i = \frac{c(W_i - Y_i) + G_{i-1}}{1 + d} \quad (9)$$

$$F_i = dG_i \quad (10)$$

式中: d 为模型参数,表示地下水储放系数。

流域总径流量 Q_i 为直接径流量 D_i 与基流量 F_i 之和:

$$Q_i = D_i + F_i \quad (11)$$

1.3.2 模型参数优化方法

(1)EFAST 方法

扩展傅里叶振幅敏感性分析(extended fourier amplitude sensitivity test,EFAST)是由 SALTELLI 等^[13]在 Fourier amplitude sensitivity test 的基础上结合 SOBOL 法^[14]加以改进的一种定量全局敏感性分析方法,具有计算效率高、鲁棒性好等优点。该方法基于方差分解理论,通过计算每个输入因子对输出方差的总贡献,包括该因子对输出结果的主要影响及涉及该因子的所有交互作用对输出结果的影响,

定量评判各因子的敏感度,是最为高效、稳健的全局敏感性分析方法之一^[15],采用此方法分析 ABCD 水文模型参数敏感性。

(2)SCE-UA 算法

Shuffled complex evolution - university of arizona(SCE-UA)算法是由 DUAN 等^[16-17]于 1992 年开发的一种全局优化程序,该算法在下山单纯形法的基础上,结合受控随机搜索、竞争进化和洗牌算法,在参数估计过程中可有效避免陷入局部极值区,充分利用样本中包含的信息,能够快速高效地搜索出全局最优估计值,在水文模型参数估计以及优化各类工程问题中得到广泛应用,应用 SCE-UA 优化算法率定 ABCD 水文模型参数。

1.3.3 模型时变参数函数构建的理论框架 假设模型参数可以表示为若干个解释变量的函数,即

$$\Theta = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

式中: Θ 为模型参数, $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_p\}$; p 为水文模型参数的个数, $p \geq 1$ 且为整数; F 为模型参数与解释变量间的函数关系; x_1, x_2, \dots, x_n 为描述气候和植被条件的解释变量; n 为解释变量的个数。

基于广义线性模型建立水文模型参数与解释变量间的函数关系,其函数表达式为:

$$\theta_j(t) = \alpha_{0,j} + \sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} g(x_i(t)) \quad (13)$$

式中: $\theta_j(t)$ 为第 j 个模型参数在第 t 时刻的值($j = 1, \dots, p$); $\alpha_{0,j}, \alpha_{i,j}$ 为模型参数回归方程的系数; $x_i(t)$ 为第 i 个解释变量在第 t 时刻的值($i = 1, \dots, n$); $g(\cdot)$ 为连接函数,考虑等式、对数 2 种形式。

采用赤池信息准则^[18](akaike information criterion,AIC)作为模型判别方法,确定时变参数函数中参数的概率分布、连接函数的具体形式以及最优解释变量。

1.3.4 评价指标 采用纳什效率系数^[19](nash - sutcliffe efficiency,NSE)、克林效率系数^[20](kling - gupta efficiency,KGE)和决定系数^[21] R^2 3 个指标,评价 ABCD 水文模型在渭河流域的径流深模拟结果,NSE、KGE、 R^2 越接近于 1,模型的模拟结果越准确。采用皮尔逊相关系数^[22](pearson correlation coefficient)分析不同参数情形模拟的土壤水储量与 ERA5-Land 不同深度土壤水储量之间的相关程度, r 越接近于 1,二者的正相关性越强,通过 t 检验来检测两者相关关系的显著性水平,当 $p < 0.05$ 时,认为通过显著性检验。

1.3.5 通径分析 通径分析(path analysis)是由美国学者 WRIGHT^[23]于 1921 年提出的,用于分析多

个自变量和因变量间的线性关系,定量描述各自变量对因变量的直接和间接作用。采用通径分析,分离气候要素(降水、潜在蒸散发)和植被要素(NDVI)对渭河流域土壤水储量变化的直接和间接作用,探究土壤水储量变化的主导因素。

2 结果与分析

2.1 构建时变参数函数

2.1.1 环境表征因子分析 综合考虑气候和植被条件变化对模型参数变化的影响,参照前人^[24]相关研

究成果并考虑数据的可获得情况,选择降水、潜在蒸散发作为气候表征因子,NDVI 作为植被表征因子,采用 M-K 趋势检验方法,分析 1982—2015 年渭河流域降水、潜在蒸散发、NDVI 的变化趋势(图 3)。在研究时段内,渭河流域降水变化趋势不显著;潜在蒸散发整体呈增加趋势,其中,65% 站点的潜在蒸散发呈显著增加趋势($p < 0.05$);NDVI 变化趋势显著($p < 0.05$),显著增加的面积占比 55.14%,显著减少的面积占比 7.33%。

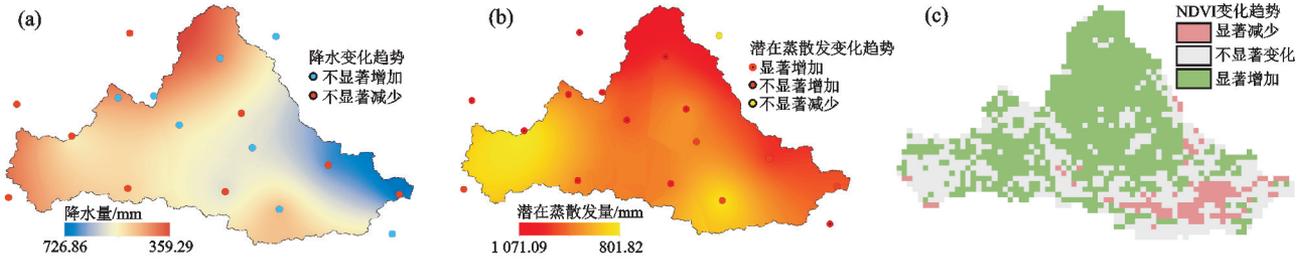


图 3 1982—2015 年渭河流域环境表征因子变化趋势

Fig. 3 Change trend of environmental characterization factors in the Weihe River Basin from 1982 to 2015

2.1.2 模型参数敏感性分析 模型参数敏感性分析是构建时变参数函数过程中的重要步骤,通过敏感性分析筛选出不敏感参数,降低参数维数,为下一步的参数识别减少不必要的计算消耗,提高分析效率。采用 EFAST 方法,利用华县水文站的实测径流数据对 ABCD 水文模型参数进行全局敏感性分析,以纳什效率系数 NSE 为目标函数,设定模型各参数的取值范围,其中, $0 < a \leq 1, 0 < b \leq 1\ 000, 0 < c \leq 1, 0 < d \leq 1$, 随机生成 10 000 组参数,服从均匀分布,进行 10 000 次随机模拟,计算模型参数的一阶敏感性和总敏感性。

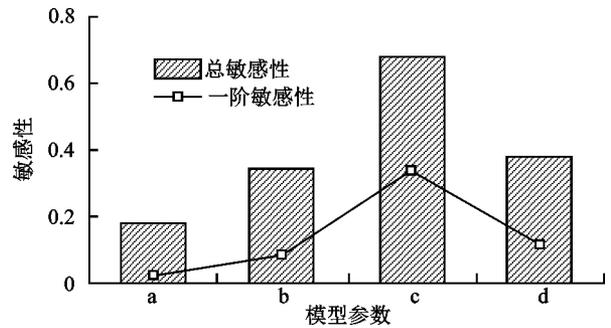


图 4 ABCD 模型参数的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of ABCD model parameters

ABCD 水文模型在渭河流域的参数全局敏感性分析结果见图 4,参数的一阶敏感性由大到小排序为 $c > d > b > a$,总敏感性结果表明,在模拟渭河流域月径流深过程中,参数 c 最为敏感, d 、 b 次之, a 最不敏感,与吴光东等^[25]采用多变量法对 ABCD 模型参数进行敏感性分析的结果相一致。参数 a 、 b 、 c 、 d 分别代表土壤完全饱和前径流的倾向性、流域实际蒸散发量与土壤蓄水量之和的上限、土壤水层补给地下水的比例、地下水储放系数,其中 a 、 b 2 个参数用于调节有效水量 W_i 与可能蒸散发量 Y_i 间的关系,且研究^[26]表明参数 a 的数值通常接近于 1,参数 c 控制着地表径流与地下水补给量间的相互关系,参数 d 控制着地下水排泄与补给量间的关系。QU 等^[27]研究表明,渭河流域地表水和地下水的转化关系密切,部分河段地表水补给地下水的比例高达 50%,可能是参数 c 更为敏感的原因。

2.1.3 模型时变参数函数表达式 选取降水 P 、潜在蒸散发 PET 和植被覆盖指数 $NDVI$ 作为环境表征因子,建立模型时变参数与环境表征因子的函数关系。首先,根据模型参数敏感性分析结果,参数 a 最不敏感,设为常参数,参数 b 、 c 、 d 敏感性较强,作为时变参数。通过模型预热,确定土壤水储量和地下水储量的初始值,以纳什效率系数 NSE 作为模型参数寻优的目标函数,借助 SCE-UA 优化算法率定参数,考虑到渭河流域的气候类型和年内植被覆盖变化情况,以年为单位分段率定模型参数,基于广义线性模型建立时变参数与环境表征因子间的函数关系,并根据 AIC 准则,确定时变参数函数中参数的概率分布、连接函数的具体形式及最优解释变量,最后应用确定的时变参数函数,输入验证期的环境表征因子 P 、 PET 、 $NDVI$,即可得到该时段的参数取值。将研究数据序列总长度的前 2/3(1982—2005 年)作为模型的率定期,后 1/3(2006—2015 年)作为模型的验证期,基于 ABCD 水文模型,以渭河流域 1982—2015 年的月降

水量和月潜在蒸散发量为模型的驱动数据,分别应用常参数、时变参数方案模拟径流,并用同期的月径流深数据对模型模拟结果进行验证。

对于 ABCD 水文模型参数时变研究,设定 2 种情形:(1) ABCD 常参数水文模型,即参数 a 、 b 、 c 、 d 均为常数;(2) ABCD 时变参数水文模型,参数 a 为常数, b 、 c 、 d 为时变参数。通过 SCE-UA 优化算法估计出模型常参数 a 、 b 、 c 、 d 的值分别为 0.96, 246.37, 0.51, $3.2e-4$; ABCD 水文模型时变参数函数及其最优 AIC 值见表 1。

表 1 ABCD 水文模型时变参数函数及其最优 AIC 值

Table 1 Time-varying parameter function and its optimal AIC value of ABCD hydrological model

参数	时变参数函数	AIC
a	0.97	/
b	$b \sim \text{poisson}[\lambda_i = \exp(5.82 - 0.12P - 0.06PET + 0.05NDVI)]$	-60.48
c	$c \sim \text{gamma}(\lambda_i = \exp(-0.51 + 0.07NDVI))$	-55.25
d	$d \sim \text{quasi}[\lambda_i = \exp(-16.07 - 6.82PET - 1.63NDVI)]$	-143.45

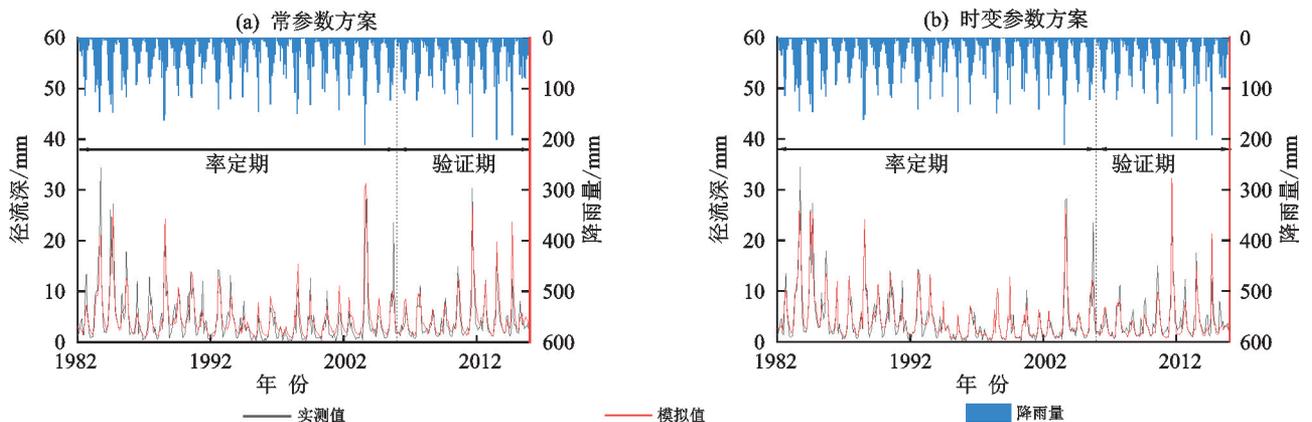


图 5 渭河流域华县站不同参数情形月径流深模拟

Fig. 5 Simulation of monthly runoff depth under different parameter conditions at Hua xian Station in the Weihe River Basin

2.3 渭河土壤水储量模拟结果分析

在径流深模拟良好的基础上,基于 ABCD 常参数水文模型和时变参数水文模型分别模拟渭河流域土壤水储量,由于长时间范围内,流域土壤水储量变化难以监测,缺乏实测数据,以 ERA5-Land 再分析土壤水数据对模型模拟结果进行验证,该数据集将 ECMWF ERA5 模型数据与来自世界各地的土壤水分观测数据结合起来,利用物理学定律形成 1 个全球完整、一致、可靠的数据集,准确描述过去的气候,且已有研究^[28]表明,ERA5-Land 再分析土壤水数据在我国具有良好的适用性,能够很好的反映我国土壤水分的变化。考虑到时间序列数据中存在自相关性,可能影响数据的有效分析,通过回归法消除土壤水数据的自相关性,以提高分析结果的准确性。采用皮尔

2.2 渭河径流深模拟结果分析

由图 5 可知,采用 ABCD 常参数水文模型和时变参数水文模型的渭河流域月径流深模拟效果,整体来看,时变参数模型的模拟效果优于常参数模型的模拟效果,采用纳什效率系数 NSE、克林效率系数 KGE 和决定系数 R^2 3 个指标评价不同参数情形的月径流深模拟结果,在率定期(1982—2005 年),常参数模型的径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别为 0.75, 0.80, 0.75,时变参数模型的径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别为 0.89, 0.88, 0.89,评价指标 NSE、KGE、 R^2 在率定期分别提高 19%, 10%, 19%;在验证期(2006—2015 年),常参数模型的径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别为 0.74, 0.78, 0.75,时变参数模型的径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别为 0.79, 0.84, 0.82,评价指标 NSE、KGE、 R^2 在验证期分别提高 7%, 7%, 9%。总的来说,基于 1982—2005 年的数据建立的 ABCD 时变参数水文模型可用于 2006—2015 年渭河流域的径流深模拟,且较常参数模型,时变参数模型显著改善径流深模拟效果。

逊相关系数分析不同参数情形模拟的土壤水储量与 ERA5-Land 不同深度土壤水储量间的相关性,由表 2 可知,时变参数模型的模拟效果优于常参数模型,其中,基于时变参数模型模拟的渭河流域土壤水储量与 ERA5-Land 0—100 cm 土层土壤水储量的相关关系最强。

通过土壤水储量距平值来表示研究流域内土壤水储量的变化情况(图 6),反映 ERA5-Land 不同深度土壤水储量及基于时变参数模型模拟的渭河流域土壤水储量距平值变化,在 1982—2015 年,渭河流域土壤水储量总体呈略微减少趋势,观察 ERA5-Land 不同深度土壤水储量的变化发现,随着土壤深度的增加,渭河流域土壤水储量变化幅度逐渐增大,基于时变参数模型模拟的流域土壤水储量距平值变化与

ERA5-Land 0—100 cm 土层土壤水储量距平值的变化情况基本一致,模型模拟值可较好地反映渭河流域土壤水储量变化过程。

表 2 1982—2015 年渭河流域不同参数情形模拟的土壤水储量与 ERA5-Land 不同深度土壤水储量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between simulated soil water storage at different parameters and ERA5-Land soil water storage at different depths in the Weihe River basin from 1982 to 2015

ERA5-Land 不同深度 土壤水储量/cm	情形	
	常参数	时变参数
0—7	0.69	0.74
0.75	0—28	0.70
0.79	0—100	0.73

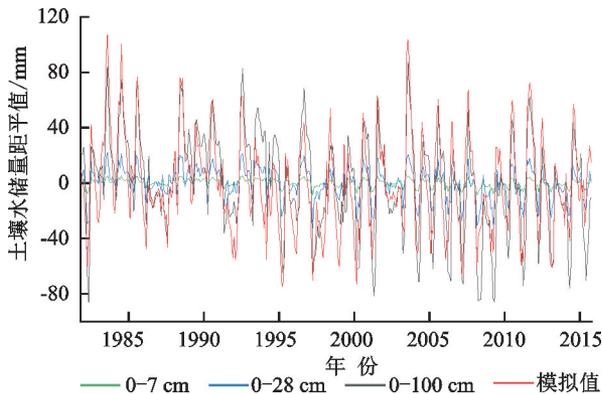


图 6 1982—2015 年渭河流域 ERA5-Land 不同深度土壤水储量距平值与时变参数模型模拟的土壤水储量距平值对比

Fig. 6 Comparison of ERA5-Land soil water storage anomaly at different depths in the Weihe River Basin from 1982 to 2015 with that simulated by a time-varying parameter model

3 讨论

3.1 气候和植被因子对土壤水储量变化的影响

渭河流域土壤水储量的变化受该地区气候变化、植被恢复等多种因素的共同影响,各因素对土壤水储量变化的影响程度不尽相同。降水是该地区土壤水分的主要来源,蒸散发是消耗土壤水分的主要方式,植被覆盖通过植物截留、植被蒸腾等方式影响降水下渗和蒸散发过程,进而影响流域土壤水储量的变化,3 个因素与流域土壤水储量变化均紧密相关。考虑到各因素间的复杂关系及其对土壤水储量变化的直接影响和间接影响,采用通径分析,使用通径系数表示各个因素对土壤水储量变化的直接影响并估计可能存在的间接影响,量化分析不同影响因素(降水、潜在蒸散发、NDVI)对渭河流域土壤水储量变化影响的直接作用、间接作用和总作用(表 3)。通径系数具有

方向性,从各因素的直接和间接通径系数来看,降水对土壤水储量变化为正向作用,潜在蒸散发对土壤水储量变化为负向作用,NDVI 对土壤水储量变化为负向作用。在气候变化和植被恢复的共同作用下,各影响因素对渭河流域土壤水储量变化的影响程度不同,影响程度由强到弱依次为潜在蒸散发>降水>NDVI,其中,潜在蒸散发对土壤水储量变化的影响相对最大。

表 3 不同因素对渭河流域土壤水储量变化影响的通径分析

Table 3 Path analysis of effects of different factors on soil water storage in the Weihe River basin

影响因素	间接通径	直接通径	总作用
	系数	系数	
降水	0.18	0.26	0.44
潜在蒸散发	-0.23	-0.27	-0.50
NDVI	-0.14	-0.23	-0.37

3.2 土壤水储量变化归因分析

通过降水、潜在蒸散发、NDVI 3 个表征因子来探讨气候变化和植被恢复对渭河流域土壤水储量变化的影响。降水是该地区土壤水分的主要输入来源,渭河流域面降水量在 1982—2015 年无显著变化趋势,水分供给较为稳定。蒸散发是消耗土壤水分的主要方式,流域面潜在蒸散发量在 1982—2015 年呈显著增加趋势($p < 0.05$),其增幅较大与该地区大面积的植被恢复有关。近几十年,我国采取多种措施来保护黄土高原地区生态环境,尤其自 1999 年实施退耕还林还草工程以来,该地区植被恢复效果明显,生态环境得到显著改善。渭河流域年平均 NDVI 在 1982—2015 年呈显著增加趋势($p < 0.05$),流域植被覆盖度明显提升,与此同时,植被蒸腾作用增强,增加流域蒸散发,加剧土壤水分消耗。

在 1982—2015 年,渭河流域土壤水储量呈略微减少趋势,但并不显著($p > 0.05$),未有明显的亏损现象。对此进一步分析原因,本研究基于 ABCD 时变参数模型模拟的渭河流域土壤水储量为浅层土壤水储量,而流域内林地的根系普遍较深,能够吸收 10—20 m 深层土壤水分^[29-30],部分深根系的草地(如苜蓿)也能吸收深达 20 m 的深层土壤水分^[31]。郭永强^[32]分析黄土高原 2003—2015 年水储量的变化情况及其对植被覆盖变化的响应表明,在研究时段内黄土高原陆地水储量显著减少,浅层水储量无显著变化趋势,退耕还林还草工程的实施导致黄土高原深层土壤水分过度消耗;吴奇凡^[33]对黄土高原 2005—2014 年陆地水储量变化进行归因分析表明,黄土高原浅层土壤水储量和地下水储量没有显著下降,深根植被过度耗水造成深层土壤水储量以 -4.7 mm/yr ($p <$

0.01)的速率减少。因此,大规模的植被恢复加剧深层土壤水分的消耗,而没有造成浅层土壤水储量显著减少,相对植被因素而言,潜在蒸散发对渭河流域浅层土壤水储量变化的影响更为突出。

4 结论

(1) ABCD 水文模型参数全局总敏感性分析结果表明,土壤水层补给地下水的比例参数 c 最为敏感,地下水储放系数 d 、流域实际蒸散发量与土壤蓄水量之和的上限参数 b 次之,表征土壤完全饱和前径流的倾向性参数 a 最不敏感。建立时变参数 b 、 c 、 d 与环境表征因子降水、潜在蒸散发和 NDVI 的函数关系,其中, $b \sim \text{poisson}[\lambda_i = \exp(5.82 - 0.12P - 0.06PET + 0.05NDVI)]$, $c \sim \text{gamma}[\lambda_i = \exp(-0.51 + 0.07NDVI)]$, $d \sim \text{quasi}[\lambda_i = \exp(-16.07 - 6.82PET - 1.63NDVI)]$ 。

(2) 应用 ABCD 时变参数模型模拟渭河流域径流深,与 ABCD 常参数模型相比,时变参数模型将率定期径流深模拟结果的 NSE、KGE、 R^2 分别提高 19%, 10%, 19%, 在验证期的径流深模拟结果中,评价指标 NSE、KGE、 R^2 分别提高 7%, 7%, 9%, 时变参数模型显著改善径流深模拟效果。

(3) 在渭河流域土壤水储量变化模拟中,时变参数模型的模拟效果同样优于常参数模型,基于时变参数模型模拟的渭河流域土壤水储量与 ERA5—Land 0—100 cm 土层土壤水储量的相关关系最强,二者的变化过程基本相同,模型模拟值可较好地反映渭河流域土壤水储量变化过程。

(4) 不同影响因素对渭河流域土壤水储量变化的影响程度由强到弱依次为潜在蒸散发 > 降水 > NDVI, 潜在蒸散发对浅层土壤水储量变化的影响相对最大。

ABCD 模型是以年或者月为时间步长的概念性水文模型,因此,模拟的渭河流域径流深、土壤水储量无法精细到日尺度。该模型将流域储水空间概化为土壤水层和地下水层,未考虑下垫面特征的空间差异,不能给出水文变量在流域内的空间分布。此外,渭河流域径流深、土壤水储量变化受到气候、植被、人类活动等各要素的影响,尽管在模拟过程中建立模型参数与降水、潜在蒸散发、NDVI 的函数关系,但在人类活动影响较大的区域,还需要进一步考虑人类活动(如工业、农业取用水量)对流域水文模拟的影响。

参考文献:

- [1] JIANG S H, LIU Y T, WANG M H, et al. Quantifying the impact of climate change and human activities on the eco-hydrological regimes of the Weihe River Basin, northwest China[J]. *Hydrology Research*, 2023, 54(1): 49-64.
- [2] YE L, FANG L, SHI Z, et al. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by ‘Grain for Green’ program on the Loess Plateau, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 269: 204-214.
- [3] 王晓学, 沈会涛, 周玥, 等. 半干旱地区不同森林类型土壤水分动态模拟[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6344-6354.
- [4] WANG X X, SHEN H T, ZHOU Y, et al. Modeling soil moisture dynamics in different forest types in semiarid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6344-6354.
- [5] VENKATESH B, NANDAGIRI L, PURANDARA B K, et al. Modelling soil moisture under different land covers in a sub-humid environment of western Ghats, India[J]. *Journal of Earth System Science*, 2011, 120(3): 387-398.
- [6] THOMAS J A. Improved methods for national water assessment[J]. Report WR15249270, US Water Resource Council, Washington, DC, 1981.
- [7] ALLEY W M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(8): 1137-1149.
- [8] LI Z Y, HUANG S Z, LIU D F, et al. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(3): 575-592.
- [9] DE VOS N J, RIJNTJES T H M, GUPTA H V. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(20): 2840-2850.
- [10] WESTERBERG I K, GUERRERO J L, YOUNGER P M, et al. Calibration of hydrological models using flow-duration curves[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2205-2227.
- [11] WESTRA S, THYER M, LEONARD M, et al. A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 5090-5113.
- [12] LUO J M, WANG E L, SHEN S H, et al. Effects of conditional parameterization on performance of rainfall-runoff model regarding hydrologic non-stationarity[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(26): 3953-3961.
- [13] MARTINEZ G F, GUPTA H V. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the “abcd” monthly water balance model for the conterminous United States[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(8): W08507.
- [14] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K P. A

- quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1):39-56.
- [14] SOBOL I. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. *Math Model Comput Exp*, 1993, 1(4): 407-414.
- [15] 马瀚青, 张琨, 马春锋, 等. 参数敏感性分析在遥感及生态水文模型中的研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 286-298.
- MA H Q, ZHANG K, MA C F, et al. Research progress on parameter sensitivity analysis in ecological and hydrological models of remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2):286-298.
- [16] DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(4):1015-1031.
- [17] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1993, 76(3):501-521.
- [18] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6):716-723.
- [19] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I; A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3):282-290.
- [20] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1): 80-91.
- [21] SAUNDERS L J, RUSSELL R A, CRABB D P. The coefficient of determination: What determines a useful R^2 statistic? [J]. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 2012, 53(11):6830-6832.
- [22] KARL P. Notes on the history of correlation[J]. *Biometrika*, 1920, 13(1):25-45.
- [23] WRIGHT S. Systems of mating. i. the biometric relations between parent and offspring[J]. *Genetics*, 1921, 6(2):111-123.
- [24] 孙瑜. 变化环境下流域水文模型参数动态规律研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- SUN Y. Time instability of hydrological model parameters under changing environment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [25] 吴光东, 许继军, GOPTA H, 等. 新安江流域 abcd 水量平衡模型及参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(7):23-27, 40.
- WU G D, XU J J, GUPTA H, et al. The “abcd” water balance model: Application to Xin’an River Basin and sensitivity analysis[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(7):23-27, 40.
- [26] ALLEY W M. Water balance models in one-month-ahead streamflow forecasting[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(4):597-606.
- [27] QU J H, LU S B, GAO Z, et al. Research on hydrogeochemical characteristics and transformation relationships between surface water and groundwater in the Weihe River[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017:1-14.
- [28] WU Z Y, FENG H H, HE H, et al. Evaluation of soil moisture climatology and anomaly components derived from ERA5-land and GLDAS-2.1 in China [J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(2):629-643.
- [29] LI H J, SI B C, WU P T, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(2):320-327.
- [30] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2013, 193/194:300-310.
- [31] WANG Z Q, LIU B Y, LIU G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6):835-842.
- [32] 郭永强. 黄土高原植被覆盖变化归因分析及其对水储量的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- GUO Y Q. Attribution analysis of vegetation coverage change and its impact on water storage on the loess plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [33] 吴奇凡. 黄土高原陆地水储量变化归因分析及区域尺度地下水补给[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- WU Q F. Attribution analysis of terrestrial water storage and estimating groundwater recharge at regional scale on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.