

基于 ANUSPLIN 插值法的青海湖流域 数字流域模型研究

王海彬^{1,2}, 刘家宏^{1,2}, 刘希胜³, 王 东^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038; 3. 青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810001)

摘要: 基于青海湖流域 2010—2020 年的降水资料, 利用 ANUSPLIN 插值法反演了青海湖流域的降水时空分布。结合水文气象及地球遥感解译等资料, 构建了青海湖流域数字流域模型, 并对模型参数进行了率定和验证。将模型应用于探究下垫面变化对流域水文过程的影响, 解析了青海湖流域水循环演变规律和驱动机制, 并对关键参数进行了敏感性分析。结果表明: 在率定期和验证期, 布哈河口站纳什效率系数分别为 0.72 和 0.67, 刚察站分别为 0.81 和 0.84, 说明数字流域模型适用于青海湖流域降水长时空序列模拟; 土壤垂向下渗速率和土壤水平渗透速率主要影响径流的峰值, 其中表层土水平渗透速率最敏感; 土壤孔隙率及初始含水量主要影响径流的基流, 其中中层土初始含水量最敏感。

关键词: 数字流域模型; ANUSPLIN 插值法; 下垫面; 敏感性分析; 青海湖流域

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)04-0082-10

Study on digital watershed model of the Qinghai Lake Basin based on ANUSPLIN interpolation method//WANG Haibin^{1,2}, LIU Jiahong^{1,2}, LIU Xisheng³, WANG Dong^{1,2} (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract: Based on precipitation data of the Qinghai Lake Basin from 2010 to 2020, the ANUSPLIN interpolation method was used to invert the spatiotemporal distribution of precipitation in the Qinghai Lake Basin. A digital watershed model of the Qinghai Lake Basin was constructed by combining hydrological, meteorological, and earth remote sensing interpretation data, and the model parameters were calibrated and verified. The model was applied to explore the impact of underlying surface changes on watershed hydrological processes, analyze the evolution laws and driving mechanisms of water cycle in the Qinghai Lake Basin, and conduct sensitivity analysis on key parameters. The results show that during the calibration and validation periods, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of the Buhakekou Station are 0.72 and 0.67, respectively, while those of the Gangcha Station are 0.81 and 0.84, indicating that the digital watershed model is suitable for simulating long-term spatiotemporal sequences of precipitation in the Qinghai Lake Basin. The vertical and the horizontal infiltration rates of soil mainly affect the peak of runoff, with the horizontal infiltration rate of surface soil being the most sensitive. The soil porosity and initial water content mainly affect the base flow of runoff, with the initial water content of the middle soil being the most sensitive.

Key words: digital watershed model; ANUSPLIN interpolation method; underlying surface; sensitivity analysis; Qinghai Lake Basin

青海湖流域位于全球气候变化敏感地区和生态系统典型脆弱地带。近年来,受全球气候变化和人类活动影响,青海湖流域的降水时空分布及水文过

程发生了显著改变,导致一系列生态环境问题,如湿地生态失衡、冻土消融、牧场退化、部分地区盐碱化和生物多样性降低等^[1-3]。为深入了解青海湖流域

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目(2022-SF-143)

作者简介: 王海彬(1996—),男,博士研究生,主要从事数字孪生流域研究。E-mail: wanghaibin@edu.iwhr.com

通信作者: 刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

式中: Z_i 为位于空间 i 点处的待估值; $f(x_i)$ 为待估算自变量 x_i 的未知光滑函数; $\mathbf{b}$ 为 $\mathbf{y}_i$ 的 p 维系数; $\mathbf{y}_i$ 为 p 维独立协变量因子; e_i 为自变量 x_i 的随机误差, 期望值为 0; N 为已知站点数。 $f(x_i)$ 需要通过最小二乘法估计确定:

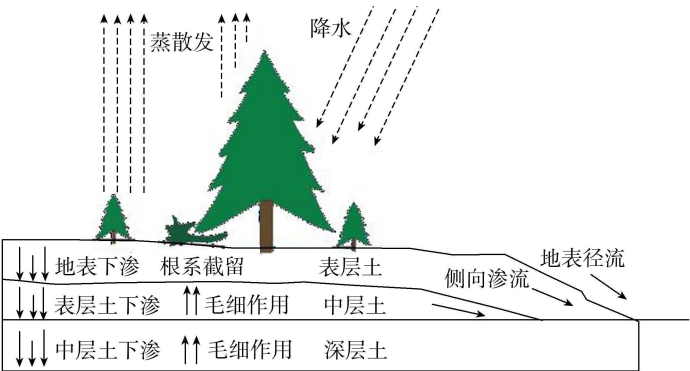
$$\min \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{w_i} \right)^2 + \rho J_m(f) \right] \tag{2}$$

式中: $J_m(f)$ 为函数 $f(x_i)$ 的粗糙度测度函数, 定义为函数 $f(x_i)$ 的 m 阶偏导数; ρ 为平滑参数, 在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用^[36]; w_i 为相对误差的方差。

2.2 数字流域模型

数字流域模型于 21 世纪初开发^[6], 并在后续开发过程中加入坡面产沙、重力侵蚀、沟道输沙等模块, 逐步形成具有多层空间分辨率的全流域级半分布式水文模型。该模型以“坡面-沟道”子流域为基本单元, 降雨在每个坡面上产流并汇集到坡底沟道, 同时所有沟道通过河网形成汇流演进通道。坡面采用如图 2 所示结构^[8], 坡面土体可划分为表层土、中层土及深层土 3 部分, 表层土为裸露于地表的腐殖质土壤, 平行于坡面, 厚度均匀; 中层土为河道水面以上至表层土以下的楔形部分; 深层土为中层土以下一定深度的矩形部分, 具备蓄水及调节能力。为充分考虑不同地质条件对降水的蓄滞作用, 模型将垂向坡面 5 层产流单元(植被截留、地表蓄滞、表层土蓄滞、中层土蓄滞和深层土蓄滞)耦合到 3 层土壤模型中, 使之既能模拟蓄满产流又能模拟超渗产流。数字流域模型的基本水文过程首先是坡面产流, 随后通过坡脚沟道汇入河道, 在河道内采用扩散波法计算水流演进过程, 从而完成全流域降水-径流过程模拟(图 2)。其中, 植被层蓄水及上、中、深层土壤水的水量守恒关系为

$$\partial S/\partial t = P - P_n - E \tag{3}$$



(a) 模型产流剖面结构图

$$\partial W_u/\partial t = A(q_{zu} - q_{zm} - E_u) - Q_{gu} \tag{4}$$

$$\partial W_m/\partial t = A(q_{zm} - q_{zd}) - Q_{gm} \tag{5}$$

$$\partial W_d/\partial t = A q_{zd} \tag{6}$$

式中: S 为植被层蓄水量; P 为降雨强度; P_n 为穿过植被层的净雨强; E 为植被层蓄水蒸发强度; W_u 、 W_m 、 W_d 分别为表层土、中层土、深层土的蓄水量; A 为坡面水平方向投影面积; q_{zu} 为地表水下渗速率; q_{zm} 、 q_{zd} 分别为表层、中层土壤水下渗速率; E_u 为表层土壤水蒸发强度; Q_{gu} 为表层土壤水侧向出流量; Q_{gm} 为中层土壤水侧向出流量。

在冻土区域, 地下冻土层的凝结和融化过程对流域的水文行为具有显著影响。刻画土壤冻融过程是高寒陆地生态系统研究的重要内容, 为了适应这种特殊环境, 模拟流域水文过程时, 数字流域模型通过设置表层土和中层土的参数来模拟冻土冻结和融化的状态。土壤冻结阶段, 下垫面温度降至 0° 以下, 土壤持水能力和导水能力变差, 渗透性降低, 未冻结水分表现为水平及垂向运移速率降低; 土壤融化阶段, 温度升高, 地面热量增加, 部分冻结土壤水由固态释放, 土壤导水能力增强, 渗透性增加, 水平及垂向运移速率提升。

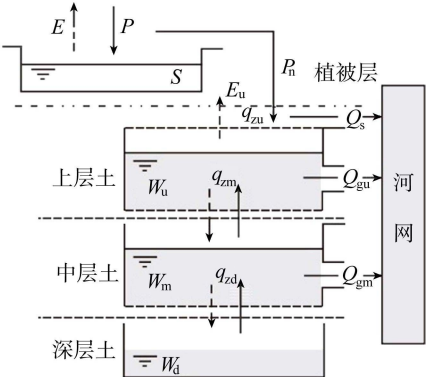
2.3 数据来源

构建青海湖数字流域模型所需要的基础数据包括气象、土地利用、数字高程、植被覆盖、蒸散发以及径流等数据。其中, 气象数据、径流数据来自青海省水文水资源测报中心; 数字高程数据来自地理空间数据云; 土地利用数据、植被覆盖数据、蒸散发数据来自青藏高原数据中心。

3 结果与分析

3.1 ANUSPLIN 空间插值精度验证

以青海湖流域 2010—2020 年月降水资料为数据基础, 添加高程数据为协变量, 选取青海湖内部



(b) 模型产流过程

图 2 数字流域模型产流过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flow generation process in digital watershed model

4 个及周围 19 个共 23 个气象站进行 ANUSPLIN 降水插值。青海湖流域气象系统通常跨越多个地理区域,通过使用流域外围水文气象测站的数据,增加数据点的密度,可以有效提高插值精度。同时,青海湖流域降水受到地形和海拔高程的影响,外围地区的测站可以用来捕捉不同海拔地区的气象情况,以便更全面地插值流域内不同海拔高程的降水。最佳模型判断标准是广义交叉验证及广义最大似然达到最小,信噪比最小,剩余自由度大于站点的 50%^[36]。

为进一步验证青海湖流域 ANUSPLIN 降水插值的精度,采用 22 个气象站降水数据进行空间插值,分别将布哈河口站和下社站作为预留气象站,进行插值数据与观测数据的交叉对比。结果显示基于 22 个气象站,降水量插值数据与预留气象站观测数据呈显著线性相关(图 3),线性回归的决定系数 R^2 为 0.93($p<0.01$),均方根误差为 15.9 mm。图 4 为 2010—2020 年实测降水量与插值降水量出现频次分布,可见频次一致性较好。因此可以看出,通过采用 ANUSPLIN 插值法,将高程作为协变量,可以有效反演青海湖流域降水时空分布,与前人研究结论一致^[37-38]。

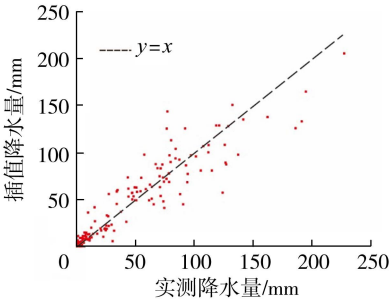


图 3 空间插值数据与预留气象站观测数据散点图
Fig. 3 Scatter diagram of spatially interpolated data and observation data from reserved weather stations

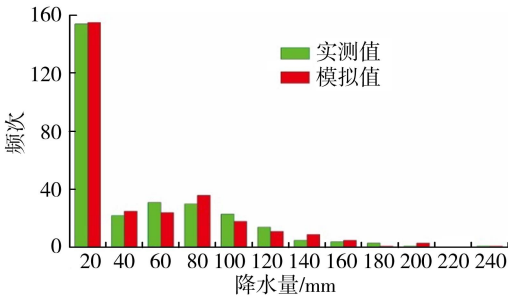


图 4 实测降水量与插值降水量出现频次分布
Fig. 4 Frequency distribution of measured and simulated rainfall values

图 5 为 2010—2020 年青海湖流域多年平均降水量空间分布。从空间分布格局来看,青海湖流域多年平均降水量为 522.24 mm,自西南向东北随海拔的上升呈递增趋势。海晏县和刚察县的北部受地

形抬升影响,在雨季容易成云致雨,年降水量在 600 mm 以上;由刚察向西水汽逐渐减少,至天峻县中部山峰,降水量又有所回升,再向西南降水量达到最低。年降水量最大处出现在海晏县东北部,多年平均降水量为 739 mm,而最低处位于天峻县东南部,年平均降水量低至 393 mm。图 6 为青海湖流域季节降水量空间分布。从季节分布来看,春季高降水量区域(大于 92 mm)主要分布在流域北部及东南部边缘地区,呈带状分布,面积占比 21.7%,流域平均降水量为 85.5 mm,不均匀系数为 0.37;夏季高降水量区域(大于 373 mm)显著增加,主要分布在流域北部高海拔地区,面积占比 29.8%,流域平均降水量为 340.6 mm,不均匀系数为 0.37;秋季高降水量区域(大于 100 mm)主要分布在流域东北部边缘地区,面积占比 21.8%,流域平均降水量为 88.2 mm,不均匀系数为 0.47;冬季高降水量区域(大于 7 mm)主要分布在流域东北部边缘地区,面积占比 22.6%,流域平均降水量为 5.2 mm,不均匀系数为 0.75。

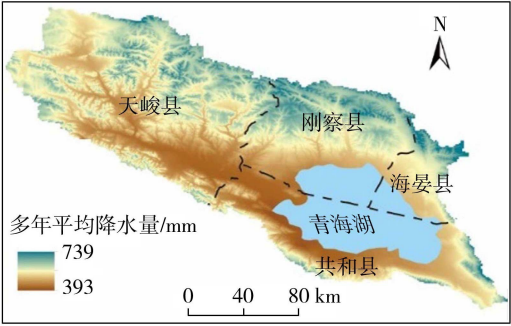


图 5 2010—2020 年青海湖流域多年平均降水量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of annual average precipitation in the Qinghai Lake Basin from 2010 to 2020

数字流域模型内置的降雨插值方法是距离平方反比加权方法,其不考虑地形高程数据,因此稀疏的降水站点分布会造成降水量空间分布的失真,从而造成输入误差。通过 ANUSPLIN 空间插值获取的青海湖流域各栅格点位降水数据可以有效识别降水量时空分布,能够降低后续建模和模拟的复杂程度,减少数据量的同时尽量保持对降水模式的准确描述。本文采用基于 ANUSPLIN 空间插值结果的虚拟插值气象站方法增加雨量站的密度。虚拟插值气象站是一种虚拟的气象观测点,主要作用是模拟或估算实际观测站之间未观测到的气象数据,当实际降水观测站分布不均匀或某些地区缺乏观测数据时,其可用于填补这些数据空白,以便更全面地了解降水分布。在沙柳河子流域设置 4 个虚拟站,为 GC-1~4;在布哈河子流域设置 7 个虚拟站,为 BH-1~7,各个气象站位置见图 7,虚拟插值气象站的降水数据序列通过 ANUSPLIN 空间插值结果进行构建。

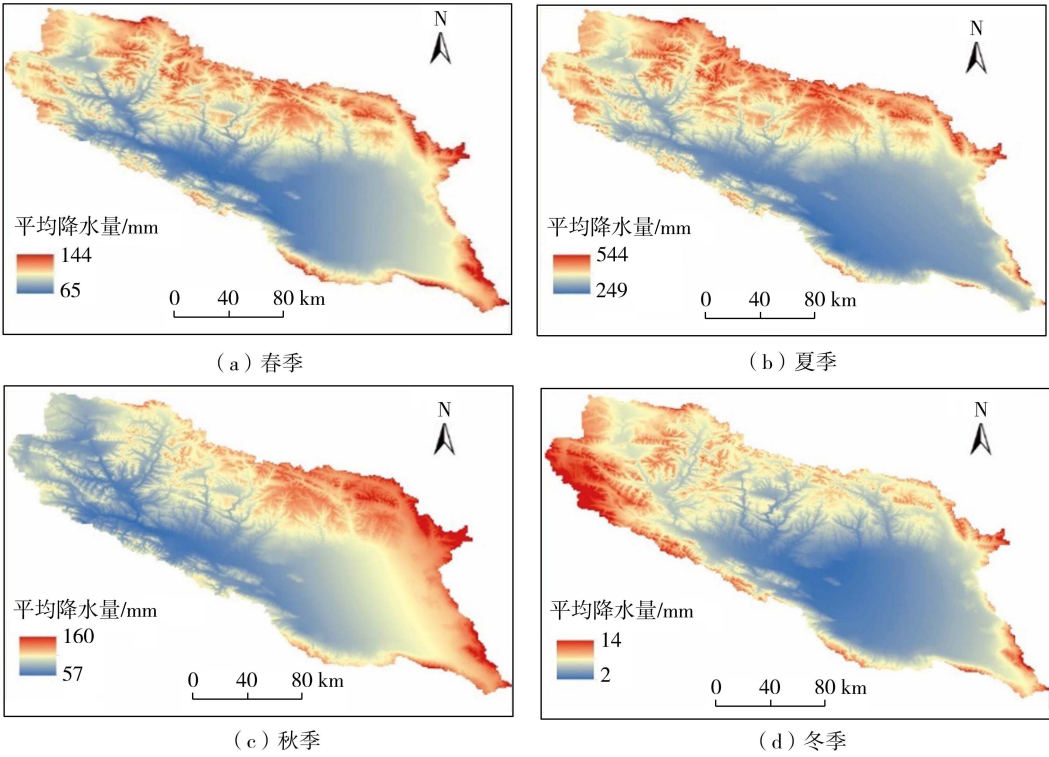


图 6 青海湖流域各季节降水量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of seasonal precipitation in the Qinghai Lake Basin

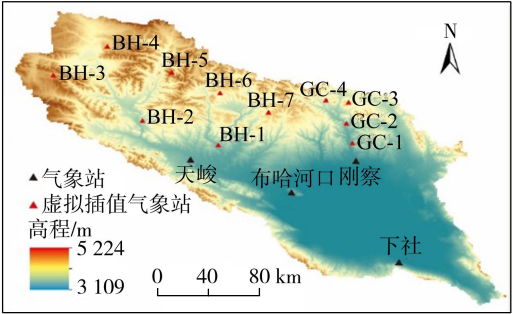


图 7 气象站位置

Fig. 7 Meteorological station location

3.2 数字流域模型参数率定

基于数字高程数据,将青海湖流域划分为 90 658 个基本单元,将河网参数、降水数据、土地利用、土壤、蒸散发等详细信息输入模型。模型预热期为 5 d,不参与参数率定过程。在降雨径流模拟中,影响数字流域模型产汇流的参数较多,可分为两大类:一类是用于描述土地利用和土壤的固定参数,另一类是较为敏感的可调参数,需要利用水文气象站实测径流资料进行率定^[39],表 1 为数字流域模型的关键参数。为准确刻画青海湖流域冻土下垫面特

表 1 数字流域模型关键参数

Table 1 Key parameters of digital watershed model

参数代号	参数名	单位	青海湖流域率定值	
			冻结期	融化期
PKV0	地表下渗速率	m/h	1.0×10^{-4}	6.8×10^{-4}
PKV1	表层土与中层土间垂向饱和导水率	m/h	5.0×10^{-4}	1.3×10^{-3}
PKV2	中层土与深层土间垂向饱和导水率	m/h	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
PKH1	表层土的水平渗透速率	m/h	8.2×10^{-4}	9.7×10^{-3}
PKH2	中层土的水平渗透速率	m/h	5.0×10^{-4}	1.6×10^{-3}
UTHETA1	表层土田间持水量的孔隙率	m/h	0.050	0.150
UTHETA2	表层土自由含水量的孔隙率	m/h	0.075	0.350
MTHETA1	中层土田间持水量的孔隙率	m/h	0.150	0.200
MTHETA2	中层土自由含水量的孔隙率	m/h	0.300	0.325
DTHETA1	深层土田间持水量的孔隙率	m/h		0.200
DTHETA2	深层土自由含水量的孔隙率	m/h		0.315
UPWATERCONTENT	表层土初始含水量	m^3/m^3		0.250
MIDWATERCONTENT	中层土初始含水量	m^3/m^3		0.260
DOWNWATERCONTENT	深层土初始含水量	m^3/m^3		0.289

征,将表、中层土参数按照时间序列分为冻结期及融化期,冻结期为每年 10 月至次年 3 月,融化期为每年 4—9 月。

3.3 数字流域模型模拟结果

青海湖流域人类活动强度较低,且无水库等大型水利枢纽的影响,布哈河及沙流河河口径流的观测数据可有效反映自然条件下青海湖流域的水文特征^[40],因此采用布哈河出口(布哈河口站)及沙流河出口(刚察站)的径流观测数据进行模型率定和验证,选取 2011—2017 年为率定期,2018—2020 年为验证期。图 8 为 2011—2020 年两测站日径流量模拟值与实测值对比,可见在率定期内,大多数年份径流模拟值与水文站的实际观测值较为一致。

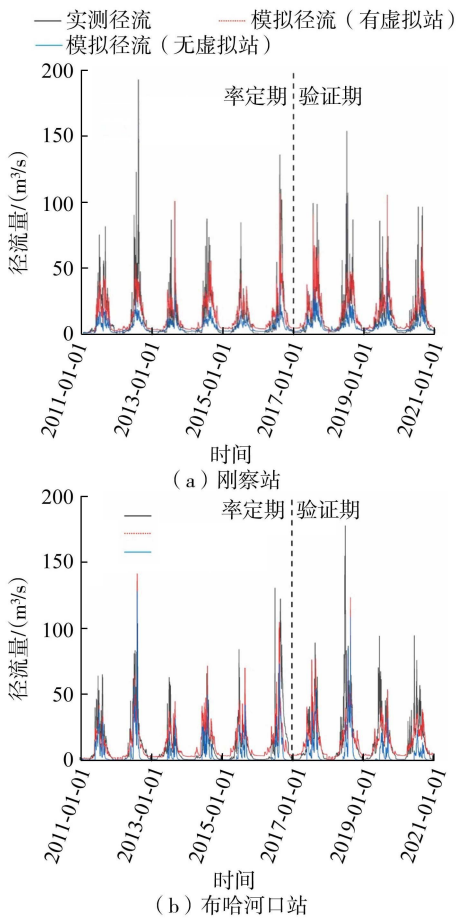


图 8 2011—2020 年两测站日径流量模拟值与实测值对比
Fig.8 Comparison of simulated and measured values of daily runoff at two stations from 2011 to 2020

采用确定系数(R^2)和 Nash-Suttcliffe 效率系数 E_{NS} 评价模拟结果,见表 2。根据计算,无添加虚拟插值气象站的情景下,布哈河口站率定期模型月径流模拟结果的 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.39 和 0.64,刚察站率定期模型月径流模拟结果的 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.19 和 0.50,模拟误差较大。添加虚拟插值气象站的情景下,布哈河口站率定期模型月径流模拟结果的

E_{NS} 和 R^2 分别为 0.72 和 0.74,刚察站率定期模型月径流模拟结果的 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.81 和 0.84,模拟误差较小。布哈河口站验证期 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.67 和 0.71,刚察站验证期 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.84 和 0.86,布哈河口站模拟精度相较率定期略有下降,但仍符合研究对精度的要求。

表 2 数字流域模型径流模拟评价结果

Table 2 Evaluation results of runoff simulation from digital watershed model					
站点	时期	E_{NS}		R^2	
		无虚拟站	有虚拟站	无虚拟站	有虚拟站
布哈河口站	率定期	0.39	0.72	0.64	0.74
	验证期	0.19	0.67	0.50	0.71
刚察站	率定期	0.26	0.81	0.69	0.84
	验证期	0.21	0.84	0.62	0.86

3.4 参数敏感性分析

数字流域模型作为分布式水文模型,可以细致地描绘水文循环中的多个环节,包括蒸发、下渗、地面径流、壤中流以及河道汇流等。但由于流域下垫面因素的不确定性和空间差异性,参数率定难度较大^[41-42]。为了探究下垫面条件改变后流域水文过程的变化特征,并进一步提高参数率定的效率和准确性,基于率定和验证后的青海湖数字流域模型,对表 1 中 14 个下垫面参数进行敏感性分析。本文采取扰动分析方法^[43]评估各个参数对模型输出的敏感性,相对敏感度的计算公式见式(7)。参数扰动范围取 5%、10%、15%、20%,分别对应第 1、2、3、4 次试验。

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{i,2} - y_{i,1}) / y_0}{(x_{i,2} - x_{i,1}) / x_0} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

式中: S 为相对敏感度; $x_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ 分别为第 i 次试验减小和增大参数的输入值; $y_{i,1}$ 、 $y_{i,2}$ 分别为第 i 次试验减小和增大参数后模型输出结果; x_0 、 y_0 分别为未进行扰动的参数输入值及其对应的输出值。

依据 S 的取值划分模型参数的灵敏度: $|S| < 0.1$ 为级别 I,不灵敏; $0.1 \leq |S| < 0.25$ 为级别 II,弱灵敏; $0.25 \leq |S| < 0.5$ 为级别 III,一般灵敏; $0.5 \leq |S| < 1.0$ 为级别 IV,比较灵敏; $|S| \geq 1.0$ 为级别 V,强灵敏。表 3 为数字流域模型参数敏感性分析结果。

地表下渗速率(PKV0)主要控制着表层土的入渗速率;土层间垂向饱和导水率(PKV1、PKV2)对水分在土壤垂向分配具有决定性作用。由表 3 可见,PKV0、PKV1、PKV2 均与径流量呈反比关系。地表下渗速率的增加,有助于水分迅速渗透到土壤中,减少地表径流的产生,有效削弱融化期洪水峰值,促进水分的渗透和基流补给,这与陈瑾哈等^[16]在长江上

表 3 数字流域模型参数敏感性分析结果

Table 3 Sensitivity analysis results of digital watershed model parameters

模型模拟参数	S	灵敏度级别
PKV0	-0.33	Ⅱ
PKV1	-0.15	Ⅱ
PKV2	-0.001	I
PKH1	0.47	Ⅲ
PKH2	0.001	I
UTHETA1、UTHETA2	0.27	Ⅲ
MTHETA1、MTHETA2	-0.25	Ⅲ
DTHETA1、DTHETA2	-0.02	I
UPWATERCONTENT	0.23	Ⅱ
MIDWATERCONTENT	0.39	Ⅲ
DOWNWATERCONTENT	0.03	I

游龙河流域得到的结论相似。而土层间垂向导水率的增加使水分能够快速渗透到更深层土壤中,增加土壤蓄水能力,从而为后续冻结期基流补给提供水源供给。

表层土及中层土水平渗透速率(PKH1、PKH2)与土体之间密实度息息相关,且与径流量和融化期峰值均呈正相关关系。土体水平渗透率越大,水分的扩散和流动能力愈强。降雨过后,表层土壤水分处于短暂饱和状态,土壤水在重力势和基质势作用下快速向下运动,而表层土及中层土较高的水平渗透速度,促进侧向渗流壤中流的形成与传播;同时,快速运动的水分还能够将土壤颗粒推动或悬浮起来,增加土壤颗粒的携水能力,进一步促进壤中流的形成。

表层土孔隙率(UTHETA1、UTHETA2)与径流量和基流呈正相关关系,这是由于青海湖流域表层土水平渗透率(PKH1)较大,孔隙率越大,意味着当有水分输入时,土壤可以更多更快地吸收和传递水分,促进壤中流的形成和传播;而中层土水平渗透率(PKH2)较小,中层土作为流域“地下水库”与土壤水分持水能力息息相关,中层土及深层土孔隙率(MTHETA1、MTHETA2、DTHETA1、DTHETA2)的增大势必导致流域整体基流降低,这主要是由于较高的孔隙度意味着土壤能够更好地吸收降雨水分,减少土壤饱和程度和饱和面积的扩大,并将其储存于土壤深处,增加了土壤的含水量和蓄水能力,提供了更多的水分供植物吸收,减少了径流量。

土壤的初始含水量与径流量呈正相关关系,表层土初始含水量主要影响前期径流量,而中层土及深层土影响模拟期内基流。表层土初始含水量的增加会使表层土壤水更易达到饱和状态。当土壤饱和度接近或达到田间持水量,土壤无法有效保持更多的水分,导致过剩的水在土壤表面形成地表径流。

中层土及深层土作为流域地下水库,中层土壤初始含水量的增加可以提高土壤的初始饱和度,增加土壤中的蓄水量,降雨过后额外的过饱和水分将在中层土壤形成壤中流。深层土与中层土的规律相同,但敏感性较低。

4 结 论

a. 使用 ANUSPLIN 插值法对青海湖流域 2010—2020 年的月降水进行空间插值,并通过交叉对比分析,验证了插值结果的精度。结果表明,采用以高程为协变量的 ANUSPLIN 插值法可以有效反演青海湖流域的降水时空分布,降水量在不同地区呈现出明显的空间差异性,受海拔的影响,从西南向东北递增。通过对 22 个气象站降水数据进行插值,并与观测数据进行对比,插值结果与预留观测数据呈显著线性相关关系,线性回归确定系数 R^2 为 0.93,降水插值数据与观测数据的出现频次一致性较好。

b. 青海湖流域数字流域模型参数率定结果显示通过增加虚拟插值气象站可以显著提升模拟的精度。增加虚拟插值气象站后,率定期布哈河口站的 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.72 和 0.74,刚察站分别为 0.81 和 0.84;验证期布哈河口站的 E_{NS} 和 R^2 分别为 0.67 和 0.71,刚察站分别为 0.84 和 0.86。证明了数字流域模型长时空序列模拟的适用性与构建虚拟插值气象站设置的有效性。

c. 通过改变流域下垫面参数,对青海湖流域数字流域模型关键参数进行敏感性分析,结果表明土壤垂向下渗速率主要影响融化期径流的峰值,两者呈负相关关系,地表下渗速率参数更敏感;土壤水平渗透速率主要影响融化期径流的峰值,两者呈正相关关系,表层土水平渗透速率敏感度为 0.47,影响最为显著;表层土孔隙率与基流呈正相关关系,而中层土和深层土孔隙度与基流呈负相关关系;土壤初始含水量主要影响径流的基流,两者呈正相关关系,且中层土的参数最敏感,其次是表层土和深层土。

参考文献:

[1] 江波,张路,欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (10): 3137-3144. (JIANG Bo, ZHANG Lu, OUYANG Zhiyun. Ecosystem services valuation of Qinghai Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (10): 3137-3144. (in Chinese))

[2] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 199-207. (HAN Yu' na, ZUO Depeng, WANG Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis

- of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2023,39(2):199-207. (in Chinese))
- [3] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 34-42. (in Chinese))
- [4] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(5):46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51 (5): 46-55. (in Chinese))
- [5] 刘家宏,蒋云钟,梅超,等. 数字孪生流域研究及建设进展[J]. 中国水利,2022,950(20):23-24. (LIU Jiahong, JIANG Yunzhong, MEI Chao, et al. Progress of digital twin basin research and construction [J]. China Water Resources, 2022, 950(20):23-24. (in Chinese))
- [6] 刘家宏,王光谦,李铁键. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展,2006,17(2):186-195. (LIU Jiahong, WANG Guangqian, LI Tiejian. Digital watershed model for the Yellow River: construction and application [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2):186-195. (in Chinese))
- [7] 刘家宏. 黄河数字流域模型[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [8] 李铁键. 流域泥沙动力学机理与过程模拟[D]. 北京:清华大学,2008.
- [9] 贺莉. 黄河中游不同区来水来沙变化与下游河道演变的响应分析[D]. 北京:清华大学,2009.
- [10] GUO Dawei, YU Bofu, FU Xudong, et al. Improved Hillslope erosion module for the digital Yellow River model [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20 (6): 1-15.
- [11] 王晨洋,傅旭东,张生,等. 黄土高原植被作用下黄河数字流域模型坡面侵蚀模块改进[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62 (12): 1953-1963. (WANG Chenfeng, FU Xudong, ZHANG Ga, et al. Improved hillslope erosion module of the digital Yellow River integrated model considering the vegetation effects on the Loess Plateau [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62 (12): 1953-1963. (in Chinese))
- [12] XU Baicui, PAN Jinghu. Simulation and measurement of soil conservation service flow in the Loess Plateau: a case study for the Jinghe River Basin, Northwestern China [J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 09072.
- [13] SHI Haiyun, LI Tiejian, WANG Kai, et al. Physically based simulation of the streamflow decrease caused by sediment-trapping dams in the middle Yellow River [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(5):783-794.
- [14] SHI Haiyun, LI Tiejian. Estimating hydrological parameters based on rainfall patterns in river basins with no long-term historical observations [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553:651-661.
- [15] 罗火钱,侯才水,马广恩. 闽江沙溪数字流域模型建立及其应用研究[J]. 水利科技与经济,2018,24(9):7-10. (LUO Huoqian, HOU Yongcai, MA Guang'en. Establishment and application of digital watershed model of Shaxi in Minjiang River [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(9):7-10. (in Chinese))
- [16] 陈瑾晗,夏军强,李铁键,等. 数字流域模型在长江上游龙河流域的应用[J]. 水力发电学报,2019,38(7):1-10. (CHEN Jinhan, XIA Junqiang, LI Tiejian, et al. Application of digital river basin model to Long River basin of upper Yangtze [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(7):1-10. (in Chinese))
- [17] 张金良. 构建黄河流域水网的思考[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 1-5. (in Chinese))
- [18] 张金良. 黄河流域河湖生态环境复苏研究[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 141-146. (ZHANG Jinliang. Eco-environment recovery of rivers and lakes in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 141-146. (in Chinese))
- [19] 刘志红,MCVICAR T R, LI Lingtao,等. 基于ANUSPLIN的时间序列气象要素空间插值[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36 (10): 227-234. (LIU Zhihong, MCVICAR T R, LI Lingtao, et al. Interpolation for time series of meteorological variables using ANUSPLIN [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36 (10): 227-234. (in Chinese))
- [20] 卢家波,向小华,李超,等. GIS中的通用水文模型数据结构研究[J]. 水资源保护,2021,37(5):89-93. (LU Jiabo, XIANG Xiaohua, LI Chao, et al. Research on data structure of general hydrological model in GIS [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):89-93. (in Chinese))
- [21] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等. 黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J]. 水资源保护,2022,38(1):153-159. (ZHU Xiaomei, WEI Jiahua, YANG Haijiao, et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. Water

- Resources Protection, 2022, 38 (1): 153-159. (in Chinese))
- [22] 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究,2004,23 (4):425-432. (ZHU Huiyi,LIU Shulin,JIA Shaofeng. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements [J]. Geographical Research, 2004, 23 (4): 425-432. (in Chinese))
- [23] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (2): 42-49. (LIU Ruiyan, ZHANG Jianhua, LIU Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):42-49. (in Chinese))
- [24] MCKENNEY D W,HUTCHINSON M,PAPADOPAL P,et al. The generation of USDA-equivalent extreme minimum temperature models and a comparison with Canada's plant hardiness zones [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2011,86(2):511-523.
- [25] 李月臣,何志明,刘春霞. 基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J]. 地理科学进展,2014,33(8):1019-1028. (LI Yuechen,HE Zhiming,LIU Chunxia. Review on spatial interpolation methods of temperature data from meteorological stations [J]. Progress in Geography,2014,33(8):1019-1028. (in Chinese))
- [26] 王军邦,王居午,叶辉,等. 2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版),2017,2 (1): 73-80. (WANG Junbang, WANG Juwu,Ye Hui, et al. An interpolated temperature and precipitation dataset at 1-km grid resolution in China (2000-2012) [J]. China Scientific Data,2017,2 (1): 73-80. (in Chinese))
- [27] 陈思静,谢新乔,杨继周,等. 地形复杂山区相对湿度空间插值方法对比研究[J]. 山地学报,2022,40(5):778-786. (CHEN Sijing, XIE Xinqiao, YANG Jizhou, et al. Comparison on spatial interpolation methods of relative humidity in complex mountainous terrain [J]. Mountain Research,2022,40(5):778-786. (in Chinese))
- [28] 刘吉峰. 气候变化和人类活动双重胁迫对青海湖流域水文过程与湖泊水位变化影响的模拟研究 [D]. 南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2006.
- [29] 高黎明,张乐乐. 青海湖流域植被盖度时空变化研究 [J]. 地球信息科学学报,2019,21 (9): 1318-1329. (GAO Liming,ZHANG Lele. Spatiotemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai Lake Basin [J]. Journal of Geo-information Science,2019,21(9):1318-1329. (in Chinese))
- [30] 陶世银,龚梅竹,贺敬安,等. 青海省季节性冻土分布特征及在防雷接地工作中的应用 [J]. 气象与环境科学,2022,45 (5):95-104. (TAO Shiyin,GONG Meizhu,HE Jingan,et al. Distribution characteristics of seasonal frozen soil in Qinghai Province and its application in lightning protection [J]. Meteorological and Environmental Sciences,2022,45(5):95-104. (in Chinese))
- [31] 马晶晶,王佩,邓钰婧,等. 青海湖流域高寒草甸季节冻土土壤温湿变化特征[J]. 土壤,2022,54(3):619-628. (MA Jingjing, WANG Pei, DENG Yujing, et al. Characteristics of seasonal frozen soil temperature and moisture changes in alpine meadow in Qinghai Lake Watershed [J]. Soils,2022,54(3):619-628. (in Chinese))
- [32] 刘扬,王竹,王芳. 青海湖流域气温降水特征分析[J]. 水文,2022,42 (5): 82-88. (LIU Yang, WANG Zhu, WANG Fang. Characteristics analysis of temperature and precipitation in Qinghai Lake Basin [J]. Journal of China Hydrology,2022,42(5):82-88. (in Chinese))
- [33] 王威,赵晓军,周华坤. 近十年青海湖水面面积和水位变化规律及其成因 [J]. 青海科技,2022,29(4):59-62. (WANG Wei,ZHAO Xiaojun,ZHOU Huakun. Changes of water surface area and water level of Qinghai Lake in recent ten years and its causes [J]. Qinghai Science and Technology,2022,29(4):59-62. (in Chinese))
- [34] CRAVEN P,WAHBA G. Smoothing noisy data with spline functions [J]. Numerische Mathematik, 1979, 31: 377-403.
- [35] BATES D M, LINDSTROM M J, WAHBA G, et al. GVCPACK-routines for generalized cross validation [J]. Communication in Statistics-Simulation and Computation, 1987,16(1):263-297.
- [36] HUTCHINSON M F, XU Tingbao. Anusplin version 4. 4 user guide [R]. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University,2013.
- [37] 韩艳莉. 气候与景观格局变化对青海湖流域生态系统服务的影响 [D]. 西宁:青海师范大学,2021.
- [38] 韩艳莉,于德永,陈克龙,等. 2000—2018 年青海湖流域气温和降水量变化趋势空间分布特征 [J]. 干旱区地理,2022,45 (4): 999-1009. (HAN Yanli, YU Deyong, CHEN Kelong, et al. Spatial distribution characteristics of temperature and precipitation trend in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2018 [J]. Arid Land Geography, 2022, 45 (4):999-1009. (in Chinese))
- [39] 张昂,李铁键,傅汪,等. 基于卫星降水融合产品的黄河源区汛期径流模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(1):1-16. (ZHANG Ang,LI Tiejian,FU Wang, et al. Model simulation of flood season runoff in the headwaters of the Yellow River Basin using satellite-ground merged precipitation data [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25 (1): 1-16. (in Chinese))
- [40] 周一飞,陈慧颖,张淑兰,等. 基于 SWIM 模型模拟气候

变化对青海湖布哈河流域水文过程的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(2): 208-214. (ZHOU Yifei, CHEN Huiying, ZHANG Shulan, et al. Simulating the influence of climate change on hydrological processes at Buha River Basin of Qinghai Lake by SWIM [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(2): 208-214. (in Chinese))

[41] 何旭, 缪子梅, 田佳西, 等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiayi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 1-8. (in Chinese))

[42] 郭晨煜, 吕海深, 朱永华, 等. WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 120-127. (GUO Chenyu, LYU Haishen, ZHU Yonghua, et al. Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 120-127. (in Chinese))

[43] 陈建, 梁川, 陈梁. SWAT 模型的参数灵敏度分析: 以贡嘎山海螺沟不同植被类型流域为例[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 41-45. (CHEN Jian, LIANG Chuan, CHEN Liang. Parameter sensitivity analysis of SWAT model: a case study of small watersheds with different land cover types in Hailuoguo Valley [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 41-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-06-27 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 55 页)

[35] 傅春, 林国聪, 黄金燕, 等. 基于 MIKE 模型的湘阴县雨水管网健康度评价[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 103-110. (FU Chun, LIN Guocong, HUANG Jinyan, et al. Health degree evaluation of rainwater pipe network in Xiangyin County based on MIKE model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 103-110. (in Chinese))

[36] ANGELER D G, ALLEN C R. Quantifying resilience[J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(3): 617-624.

[37] YU Shuying, KONG Xuesong, WANG Qi, et al. A new approach of robustness-resistance-recovery (3Rs) to assessing flood resilience: a case study in dongting lake basin [J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 230: 104605.

[38] 刘媛媛, 刘业森, 郑敬伟, 等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295. (LIU Yuanyuan, LIU Yesen, ZHENG Jingwei, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295. (in Chinese))

[39] HE Guanjie, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Coupled model of variable fuzzy sets and the analytic hierarchy process and its application to the social and environmental impact evaluation of dam breaks [J]. Water Resources Management, 2020, 34(9): 2677-2697.

[40] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-09-09 编辑: 王芳)

+++++

• 简讯 •

《水资源保护》入选江苏科技期刊卓越行动计划领军期刊

2024 年 6 月, 江苏省科学技术协会公布了 2024 年江苏科技期刊卓越行动计划入选项目, 《水资源保护》入选首批江苏科技期刊卓越行动计划领军期刊。

江苏科技期刊卓越行动计划是江苏省科协深入贯彻中国科协、中宣部、教育部、科技部《关于深化改革培育世界一流科技期刊的意见》, 认真落实江苏省科协、江苏省委宣传部、江苏省教育厅、江苏省科技厅《关于推进一流科技期刊高水平建设的实施意见》(苏科协发[2024]26 号), 加快推动江苏省科技期刊高质量发展, 组织实施的一项科技行动计划。江苏科技期刊卓越行动计划重点在新兴交叉、战略前沿、共性基础技术领域抢占前沿科技制高点, 培育打造世界一流科技期刊, 服务高水平基础研究、应用研究和产业发展。江苏科技期刊卓越行动计划设置建设领军期刊和培育扶持高起点新刊 2 类项目, 其中, 领军期刊遴选对标国际领先期刊, 明确建设目标, 精准支持, 推动江苏科技期刊跻身国内、国际一流科技期刊行列, 示范引领带动全省科技期刊高水平发展。

(本刊编辑部供稿)