

基于混合产流模式的黄土高原流域水沙过程耦合模拟

卢 昂^{1,2}, 田 鹏^{2,3}, 赵广举^{1,3}, 穆兴民¹, 耿 韧³, 张舒羽¹, 杨 林¹, 左巴特¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

3.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210029)

摘要:为深入理解黄土高原干旱半干旱地区复杂地貌条件下流域水沙运移规律。基于垂向混合产流机理和运动波方程,构建分布式流域水文模型,耦合流域土壤侵蚀和泥沙输移过程模拟模块,并考虑梯田对水沙过程的影响,建立适用于黄土高原的分布式流域水沙过程模型。选取黄土高原延河支流西川河流域多年实测场次洪水过程的径流泥沙资料,对模型进行率定和验证。径流模拟的纳什效率系数在 0.56 以上,平均值超过 0.70,模拟次洪过程的峰形、峰值、峰现时间与实测过程具有较好的一致性;侵蚀产输沙模拟精度较低,其纳什效率系数均值率定期为 0.79,但验证期仅为 0.45,模拟结果整体趋势与实测值较一致,但输沙量模拟峰值比实测值偏低。模型可以较精确地模拟黄土高原流域洪水产汇流过程,但输沙量模拟值偏低,一方面由于产汇流模块的误差传递;另一方面,对重力侵蚀考虑不足。因此,未来模型将考虑滑坡、崩塌等重力侵蚀过程,提升模拟精度和效率,为流域水沙过程模拟与流域综合治理提供有效工具。

关键词:黄土高原;混合产流模式;土壤侵蚀;耦合模拟;水沙过程

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0057-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.06.008

Runoff and Sediment Processes Simulation Based on Mixed Runoff Generation Model in the Loess Plateau Watershed, China

LU Ang^{1,2}, TIAN Peng^{2,3}, ZHAO Guangju^{1,3}, MU Xingmin¹,

GENG Ren³, ZHANG Shuyu¹, YANG Lin¹, ZUO Bate¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029)

Abstract: In order to better understand the water and sediment transport characteristics in the arid and semi-arid region of the Loess Plateau under complex geomorphological conditions, a distributed watershed water and sediment process model suitable for the Loess Plateau was constructed based on the vertical mixing production mechanism and kinematic wave equation, coupled with watershed soil erosion and sediment transport modules, and the influence of terraces on water and sediment movement was considered. Measured runoff and sediment data of multiple years of flood events in the Xichuan River basin, a tributary of the Yanhe River in Loess Plateau, were used for calibration and validation of the model. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of runoff simulation were higher than 0.56, with an average value greater than 0.70. The simulated flood peak shape, peak value, and peak time of the simulated floods were in good agreement with the measured floods. However, the model simulation accuracy of soil erosion and sediment transport was relatively low, with a mean Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.79 during the calibration period, but only 0.45 during the verification period. The overall trend of the simulation results was consistent with the measured values, but the peak sediment transport simulation values were lower than the measured values.

收稿日期:2023-03-28

资助项目:国家自然科学基金项目(U2243221,42177323,42077076)

第一作者:卢昂(2001—),男,河南南阳人,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:2021051531@nwafu.edu.cn

通信作者:田鹏(1982—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:pengtian@nwsuaf.edu.cn

The model can simulate the flood runoff process in watersheds in the Loess Plateau with relatively high accuracy, however the simulated sediment transport values were lower than the measured values, and this was due to both the error propagation of the production convergence flow module and the insufficient consideration of gravity erosion. Therefore, in the future, the model will consider gravity erosion processes such as landslides and rockfalls to improve simulation accuracy and efficiency, providing an effective tool for simulating watershed water and sediment processes and integrated watershed management.

Keywords: loess plateau; mixed runoff generation model; soil erosion; coupled modelling; runoff and sediment transport

土壤侵蚀是制约人类生存和社会可持续发展的全球性环境问题之一,对粮食生产和生态安全造成严重威胁^[1]。我国黄土高原地区气候干旱、暴雨集中、植被稀疏、土壤抗蚀性差,水土流失问题突出,是黄河泥沙的主要来源,深刻影响着黄河流域生态保护与经济社会高质量发展^[2-3]。20 世纪 50 年代以来,为防治水土流失,减少入黄泥沙,黄土高原实施大规模的水土保持措施(植树造林种草、淤地坝、梯田等)^[4],改善了区域植被状况,流域下垫面条件发生剧烈的变化^[5-6],黄土高原土壤侵蚀得到有效控制,入黄泥沙显著减少,黄河潼关站输沙量已由 20 世纪早期的 16 亿 t 减少至 2000 年后不足 3 亿 t^[7]。黄土高原下垫面变化导致流域水文、土壤侵蚀、河流输沙过程发生了显著变化。因此,开展流域水沙过程模拟,识别流域侵蚀产沙特征,是深入理解流域水文过程变化的基础,为水土保持措施实施与流域综合治理提供科学支撑。

土壤侵蚀模型是定量研究土壤侵蚀的有效手段,能够复演历史时期土壤侵蚀过程、预测未来土壤侵蚀变化趋势。目前,国内外常用的经验模型包括 USLE、RUSLE、WaTEM/SEDEM 等^[8-9],采用经验方程计算侵蚀量,具有参数少、输入数据简单的优点,已被广泛应用于土壤侵蚀评价研究中;而分布式水文—泥沙模型,如 EUROSEM、LISEM、WEPP、SWAT 等^[10]能够描述不同时空尺度的水文、土壤侵蚀过程,但由于参数多,所需数据难以获取,其应用受到一定的限制。近年来,国内针对黄土高原水土流失特点开展了大量的模型开发与应用,如清华大学数字流域模型^[11]、黄河水利科学研究院的分布式水土流失模型^[12]、中国水科院 WEP—SED 模型^[13]等,均基于水文泥沙动力学原理,实现水文、侵蚀、输沙过程的分布式模拟,为流域综合治理提供技术支撑。然而,黄土高原地区水沙过程复杂,大规模的退耕还林草措施改变流域产汇流机制和输沙过程,流域新时期水文情势特征在已有的模型中未能有效表达,模型精度仍难以满足实际流域治理需求^[14]。

因此,为深入了解黄土高原干旱半干旱地区复杂地貌条件下流域水沙运移规律,基于垂向混合产流机理和

运动波方程,构建流域水文模型,耦合流域土壤侵蚀和水沙输移过程模拟模块,建立具有物理意义的分布式流域水沙过程耦合模型。选取黄土高原延河支流西川河流域多年实测场次洪水过程的径流泥沙资料,对模型进行自动率定和验证,为黄土高原流域水文模拟、土壤侵蚀与泥沙输移定量评估提供有效工具。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西川河是延河的一级支流(图 1),河长 65.3 km,流域面积约 801 km²,河道比降 5.7‰,于延安市宝塔区石佛沟附近汇入延河。流域地势西高东低,坡面陡峭,河床比降大,流域内土地利用以草地为主,植被较少,土壤以黄绵土为主,少部分为红黏土和黑垆土。流域属半干旱季风气候区,多年平均降水量 520 mm,平均气温 9.4 ℃,降水主要集中在 5—9 月,以短历时、强降雨为主。流域内枣园水文站控制面积 719 km²。流域多年平均径流量为 2.17×10^7 m³,年均径流深 30 mm,多年平均输沙量为 3.16×10^6 t,年均输沙模数 4 399 t/km²。流域内淤地坝分布数量较少,对水沙过程影响有限,适于进行模型的验证。

1.2 数据来源

西川河流域次洪事件的降雨、径流、含沙量数据来自水利部黄河水利委员会发布的《黄河水文年鉴》^[15],收集和整理 1980—1989 年和 2007—2018 年 2 个时期共 86 次洪水要素摘录资料。流域内共有 7 个雨量站(图 1),气象站使用延安气象站资料。由于各时期雨量站和水文数据记录事件精度、间隔不同,为保证降雨记录与洪水、泥沙要素在时间上匹配对应,分别对其进行 30 min 重采样,具体方法参照 Tian 等^[16]。为保证数据监测的一致性和模拟结果的精度,在遴选场次洪水事件时,考虑雨量站雨量与洪水产水量的关系及时间的一致性,选择其中 9 场典型次洪过程。

根据所选择的场次洪水时间段,使用最大合成法获取对应时间点的 NDVI 数据,包括 1986 年和 1990 年(来自 Landsat 5 TM)、2014 年和 2015 年(来自 Landsat 7 TM)夏季影像数据,所有影像均来自地理空间数据云

(<https://www.gscloud.cn>)。土地利用数据来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),获取 1990 和 2010 年 2 期数据,包括森林、草地、裸地或未利用地、耕地、水体、城市用地 6 种土地利用类型。梯田数据基于 Landsat 影像结合土地利用数据,使用目视识别法^[6]获取 1990 年和 2010 年 2 期数据。DEM 来源于 1 : 10 万地形图等高线数字化,采用 ArcGIS 中

Kriging 法^[17]插值生成。土壤类型地图根据黄土高原数据共享中心提供 1 : 50 万土壤数据,使用重采样获取 30 m 分辨率土壤属性图。将 7 个雨量站数据通过反距离权重法^[17]插值获取流域面雨量地图。根据气象数据的时间分辨率,模拟时间步长为 30 min。为保证数据的一致性,部分数据重采样至 30 m,以此作为模型模拟的空间分辨率。

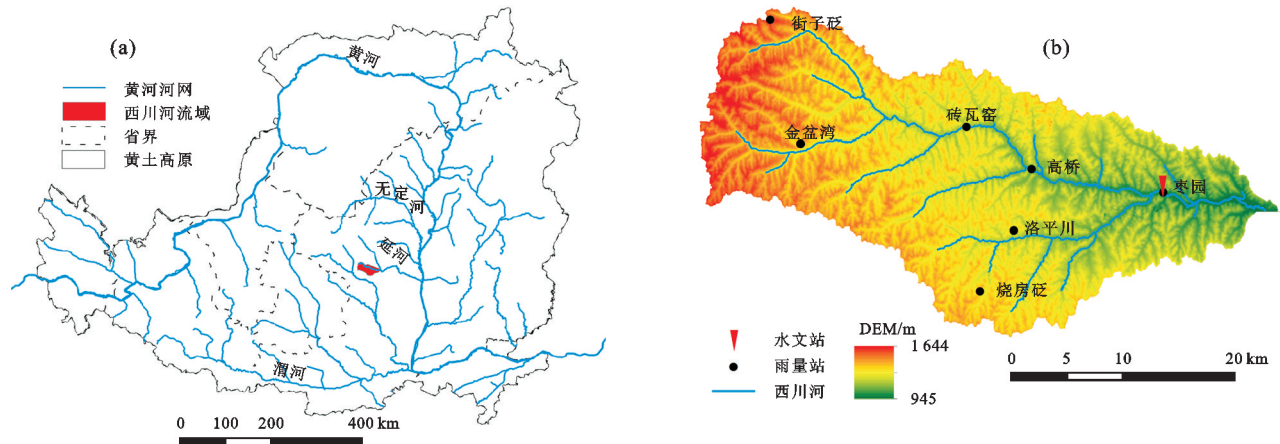


图 1 西川河流域概况

1.3 流域水沙耦合模型

1.3.1 模型概述 分布式流域水沙过程模型包括产汇流、产输沙 2 个模块。模型采用 GIS 技术实现栅格图层计算。根据流域水沙运动物理过程,产汇流模块产流的计算采用垂向混合产流模式^[18],并考虑蒸散发和冠层截留耗损,坡面与河道地表汇流通过运动波方程^[19]计算,地下汇流选择线性水库法^[20]模拟计算;产输沙模块中土壤侵蚀的计算使用修正的 Morgan-Morgan-Finney (MMF)模型^[21],综合考虑地形、

土壤、植被、水文因素,将坡面侵蚀过程划分为降雨溅蚀和径流冲刷两部分,分别计算坡面和河道的径流挟沙力模拟泥沙输移;并在产汇流和产输沙模块中分别耦合梯田截流和梯田拦沙子模块^[22],模拟梯田对流域水沙过程的影响。模型的基本物理框架见图 2,通过水文模块的物理水文变量,驱动土壤侵蚀和泥沙搬运实现水沙过程的耦合模拟,并考虑植被、地形、土壤、土地利用等对水沙输移过程的影响,构建分布式流域水沙过程模型。

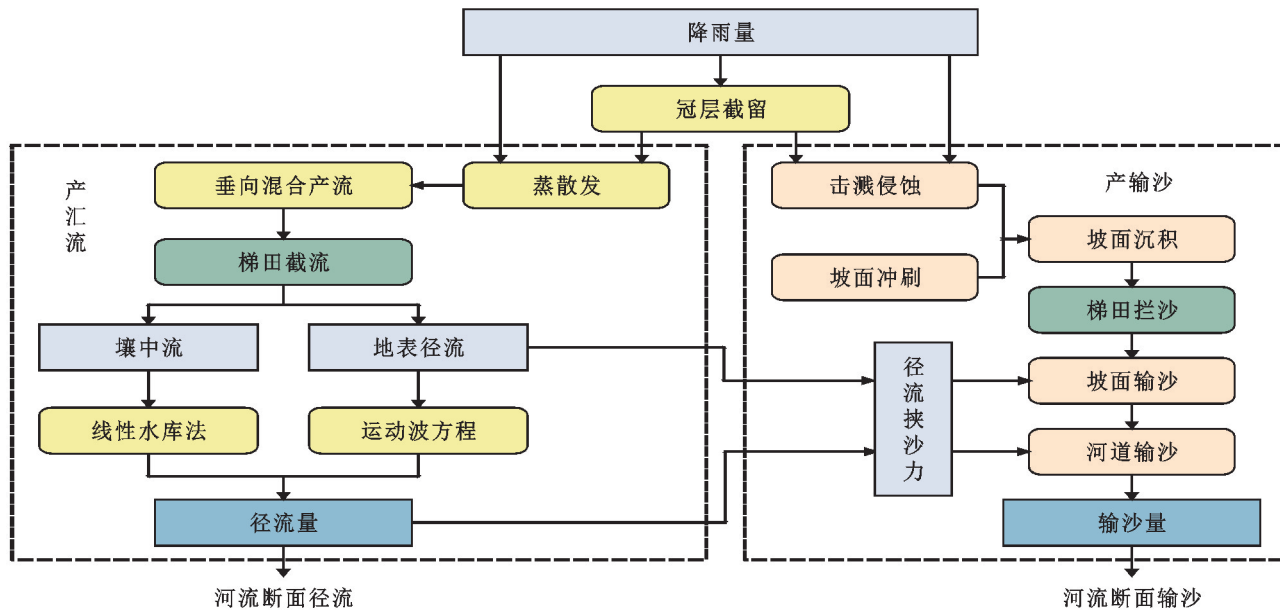


图 2 分布式流域水沙过程模型结构

1.3.2 模型原理

(1)产汇流模块。蒸散发:采用修正的 Har-

greaves 方程计算参考蒸散量(mm/day),并结合特定作物系数得到作物潜在蒸散量(mm/day),考虑土

壤水分胁迫的影响,进而推求作物的实际蒸散量 ET_a (mm/day)^[23]。

冠层截留。通过植被冠层存储量与降雨量、蒸散量之间的动态平衡进行计算^[23],公式为:

$$PE = \max(0, Scan + P - Scan_{\max}) - ET_a / (t / 86400) \quad (1)$$

式中: PE 为净雨量(mm/t); $Scan$ 为植被的冠层存储

能力(mm); P 为降雨量(mm/t); $Scan_{\max}$ 为最大冠层存储能力^[23]; ET_a 为实际蒸散量(mm/day); t 为模型每次运行所模拟的时间(s)。

垂向混合产流: 产流计算采用垂向混合产流模式^[18], 包括超渗产流和蓄满产流 2 种模式, 通过将流域的下渗能力—面积分布曲线和蓄水容量—面积分布曲线进行垂向结合(图 3), 计算得到地表径流和壤中流。

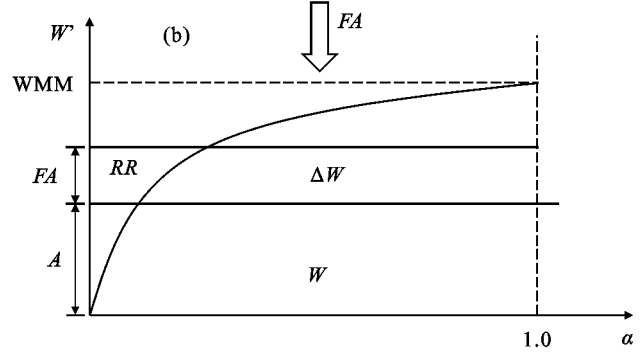
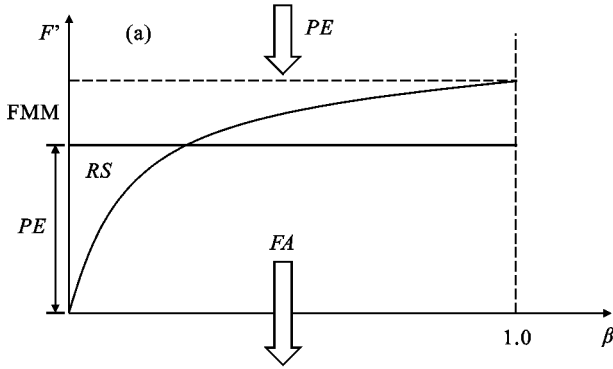


图 3 垂向混合产流模式 (a) 下渗能力—面积分布曲线; (b) 蓄水容量—面积分布曲线

垂向混合产流模式采用下渗能力—面积分布曲线 $\beta = f(F')$ (图 3a) 和流域蓄水容量—面积分布曲线 $\alpha = f(W')$ (图 3b) 进行产流计算。垂向混合产流模式的产流计算步骤为: 净雨量(PE)到达地表, 首先通过下渗能力—面积分布曲线, 将其划分为地表径流(RS)和下渗水流(FA); 其中, 下渗的水流(FA)再根据流域蓄水容量—面积分布曲线, 一部分补充到土壤水分中, 超出土壤蓄水能力的部分产生壤中流(RR)。

因此, 地表径流(RS)超渗产流的计算采用改进的 Green-Ampt 下渗公式, 具体公式为:

$$FM = FC(1 + KF \frac{WM - W}{WM}) \quad (2)$$

$$FA = \begin{cases} FM - FM(1 - \frac{PE}{FMM})^{BF+1} & PE < FMM \\ FM & PE \geq FMM \end{cases} \quad (3)$$

$$RS = PE - FA \quad (4)$$

式中: FM 为流域平均下渗速率(mm/t); FC 为稳定下渗率(mm/t); KF 为土壤含水量对下渗率影响的灵敏度系数(无量纲); FA 为土壤下渗量(mm/t); FMM 为流域最大下渗能力(mm/t), $FMM = FM(BF + 1)$; FM 为流域平均下渗能力(mm/t); BF 为下渗能力曲线指数(无量纲); RS 为地表产流(mm/t)。

壤中流(RR)采用蓄满产流模式进行计算, 公式为:

$$RR = \begin{cases} FA + W - WM + WM(1 - \frac{A + FA}{WMM})^{B+1} & A + FA < WMM \\ FA + W - WM & A + FA \geq WMM \end{cases} \quad (5)$$

$$R = RS + RR \quad (6)$$

式中: RR 为壤中流(mm/t); A 为当前土壤蓄水量 W 对应的曲线纵坐标(mm); WMM 为流域最大蓄水容量(mm), $WMM = WM(B + 1)$; WM 为流域平均蓄水容量(mm); B 为蓄水容量曲线指数(无量纲); R 为总产流量(mm/t)。

梯田截流模块通过梯田水量平衡方程计算梯田区域的出流量, 公式为:

$$V_{\text{store}} = V_{\text{flowin}} + V_{\text{store}} - V_{\text{evap}} - V_{\text{seep}} - V_{\text{dr}} - V_{\text{ov}} \quad (7)$$

式中: V_{store} 为梯田蓄水量(m^3); V_{flowin} 为汇入梯田的水量(m^3); V_{evap} 为梯田蒸散发水量(m^3), 计算时将梯田视为池塘自由水面; V_{seep} 为梯田入渗水量(m^3), 采用垂向混合产流模式计算^[18]; V_{dr} 为梯田渠道排水量(m^3); V_{ov} 为梯田溢出流量(m^3)。

地下汇流采用线性水库法^[20], 地表汇流采用运动波方程^[19], 将圣维南方程组中的动量方程根据运动波理论忽略惯性项和压力项, 并采用矩形渠道假设, 计算公式为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (8)$$

$$A = (\frac{n}{\sqrt{S}})^{0.6} (B + 2WH)^{0.4} \cdot Q^{0.6} \quad (9)$$

式中: Q 为径流量(m^3/s); A 为过水断面面积(m^2); q 为汇入的单宽流量(m^2/s); n 为曼宁粗糙度($\text{s}/\text{m}^{1/3}$); S 为河底比降, 以坡度近似(无量纲); B 为河底宽度(m); WH 为水深(m)。

(2) 产输沙模块。产输沙计算基于修正的 MMF (Morgan-Morgan-Finney) 模型^[21]。

坡面击溅侵蚀主要通过降雨动能进行计算, 计算公式为:

$$F_i=K_i\frac{i}{100}(1-GC)KE\times10^{-3}\tag{10}$$

式中: F 为降雨溅蚀量(kg/m^2); i 为土壤中不同质地所占的百分比(%),分别表示表层土壤黏粒、粉粒和沙粒的百分比含量; K 为土壤可蚀性(g/J); GC 为地表覆盖度(无量纲); KE 为降雨动能(J/m^2),包括冠层截留降雨动能和穿透降雨动能。

坡面地表径流冲刷采用地表径流量的幂函数进行计算,计算公式为:

$$H_i=DR_i\frac{i}{100}Q^{1.5}(1-GC)\sin^{0.3}(\arctan S)\times10^{-3}\tag{11}$$

式中: H 为径流冲刷量(kg/m^2); DR 为土粒分散率(g/mm); Q 为累计地表径流量(mm/t)。

坡面泥沙的沉积采用不同质地土粒沉降比例得到,其中土粒沉降速度通过斯托克斯公式计算,分别根据不同质地通过降雨溅蚀、地表径流冲刷和泥沙沉积计算净产沙量,计算公式为:

$$G=\sum_{c,z,s}(F_i+H_i)(1-DEP_i/100)\tag{12}$$

式中: G 为产沙量(kg/m^2); DEP 为泥沙沉积率(%); i 为粒径级配类别。

梯田拦沙模块根据梯田截流模块模拟的入流量、储水量、出流量等,结合泥沙浓度变化进行模拟,并基于斯托克斯公式的池塘泥沙沉积公式,计算泥沙在梯田中的沉积量^[24]。

泥沙输移通过径流挟沙力计算,计算公式为:

$$TC=\text{flow}_{\text{factor}}q^\beta S^\gamma\tag{13}$$

式中: TC 是径流挟沙力(t/hm^2); $\text{flow}_{\text{factor}}$ 为反映空间异

质性的粗糙度因子(无量纲); q 为单宽流量(m^2/t); β 和 γ 为模型参数(无量纲),取值根据模型校正。其中,坡面泥沙输移过程使用的径流挟沙力根据地表径流量计算,河道泥沙输移过程使用总径流量的径流挟沙力计算。

1.4 模型精度评价

通过对比模拟的径流量和输沙量与实测值来评价模型的模拟精度,采用纳什效率系数 NSE 作为评价指标:

$$NSE=1-\sum_{i=0}^n(\text{Obs}_i-\text{Sim}_i)^2/\sum_{i=0}^n(\text{Obs}_i-\overline{\text{Obs}})^2\tag{14}$$

式中: Obs_i 为径流或泥沙的观测值(m^3/s 或 10^4 t); Sim_i 为径流或泥沙的模型模拟值(m^3/s 或 10^4 t); $\overline{\text{Obs}}$ 为径流或泥沙的观测值的平均值(m^3/s 或 10^4 t); $\overline{\text{Sim}}$ 为径流或泥沙的模型模拟值的平均值(m^3/s 或 10^4 t); NSE 越接近 1,表明模型的精度越高。

2 结果与分析

2.1 模型敏感性分析和参数率定

针对分布式水沙耦合模型参数的率定,本研究将其分为产汇流、坡面和沟道产输沙 2 个步骤进行。首先使用(fourier amplitude sensitivity test, FAST)算法判别待率定参数的敏感性^[25],之后选取较为敏感的参数集,采用(shuffled complex evolution algorithm, SCE-UA)算法对参数进行率定^[26]。产输沙部分进行参数敏感性分析和率定时,使用径流模块率定后的结果作为输入。在 9 场典型次洪过程中选取 4 场洪水联合率定,避免出现参数过拟合现象,模型参数敏感性分析和率定结果见表 1。

表 1 流域参数敏感性分析和率定结果

所属模块	参数	参数含义	取值范围	取值	敏感性
产汇流模块	FC	土壤的稳定下渗率/(mm/h)	5~100	10.55	敏感
	KF	土壤缺水影响下渗率的灵敏度	0.05~1	0.20	不敏感
	WM	流域的平均蓄水容量/ mm	50~200	185.60	敏感
	BF	下渗能力曲线指数的方次	0~0.5	0.10	不敏感
	B	蓄水容量曲线指数的方次	1~2	1.80	不敏感
	n_{surf}	地表曼宁粗糙度系数/($\text{s}/\text{m}^{1/3}$)	0~0.1	0.05118	敏感
	K_g	地下水蓄水常数/ h	40~300	227.00	敏感
产输沙模块	β	MMF 模型参数	0~2	1.395	敏感
	γ	MMF 模型参数	0~2	0.10	不敏感

2.2 模拟结果

由表 2 可知,场次洪水过程径流量和输沙量模拟值与实测值的对比结果。总体而言,径流量模拟值与实测值吻合较好。率定期模拟流量的纳什效率系数为 0.73 以上,平均值达到 0.80,洪峰流量模拟误差为 10% 以内。验证期模拟结果与率定期相比较差,纳什

效率系数均值为 0.61,表明模型精度能够满足场次洪水过程的要求。相比于径流量,输沙量模拟精度偏低。率定期模拟输沙量的纳什效率系数为 0.60 以上,平均值达到 0.79,但 1980-08-20 和 2015-08-01 的 2 次降雨事件的模拟输沙量峰值偏低现象较为严重。验证期模拟输沙量结果相对较差,模拟输沙量较实测

值偏低,平均纳什效率系数约为 0.45,但整体趋势与实测值一致。

为进一步说明模拟结果精度,选取流域 2 场典型场次过程(以 1980-08-20,1988-07-15 为例)展示径流量和输沙量的模拟结果。由图 4 可知,径流过程模拟

与实测较为一致,主要体现在流量、峰形和峰值的拟合上,峰现时间差距在 1 个时间步长以内,但模拟径流过程与实测相比更加平滑,且洪峰偏小;而泥沙过程模拟精度相对不够理想,其峰形一致性较高,但输沙量小于实测值,且峰值出现时间存在一定的偏差。

表 2 模型模拟结果

模拟时期	场次过程/ (年-月-日)	模拟洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	观测洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟输沙量 峰值/(10^4 t)	观测输沙量 峰值/(10^4 t)	流量 NSE	输沙量 NSE
率定期	1980-08-20	198.14	212.50	9.83	14.08	0.73	0.60
	1987-08-25	497.30	531.00	35.55	37.43	0.79	0.92
	1988-07-15	584.45	598.50	44.53	45.39	0.92	0.96
	2015-08-01	97.14	105.00	3.63	6.80	0.76	0.66
验证期	1981-06-29	557.32	565.00	41.68	54.21	0.56	0.73
	1981-07-12	43.64	64.60	1.18	4.48	0.56	0.45
	1982-07-02	129.57	160.80	5.43	16.87	0.65	0.58
	1984-06-04	49.89	124.00	1.43	12.10	0.58	0.23
	2014-07-07	16.18	19.00	0.29	1.26	0.71	0.25

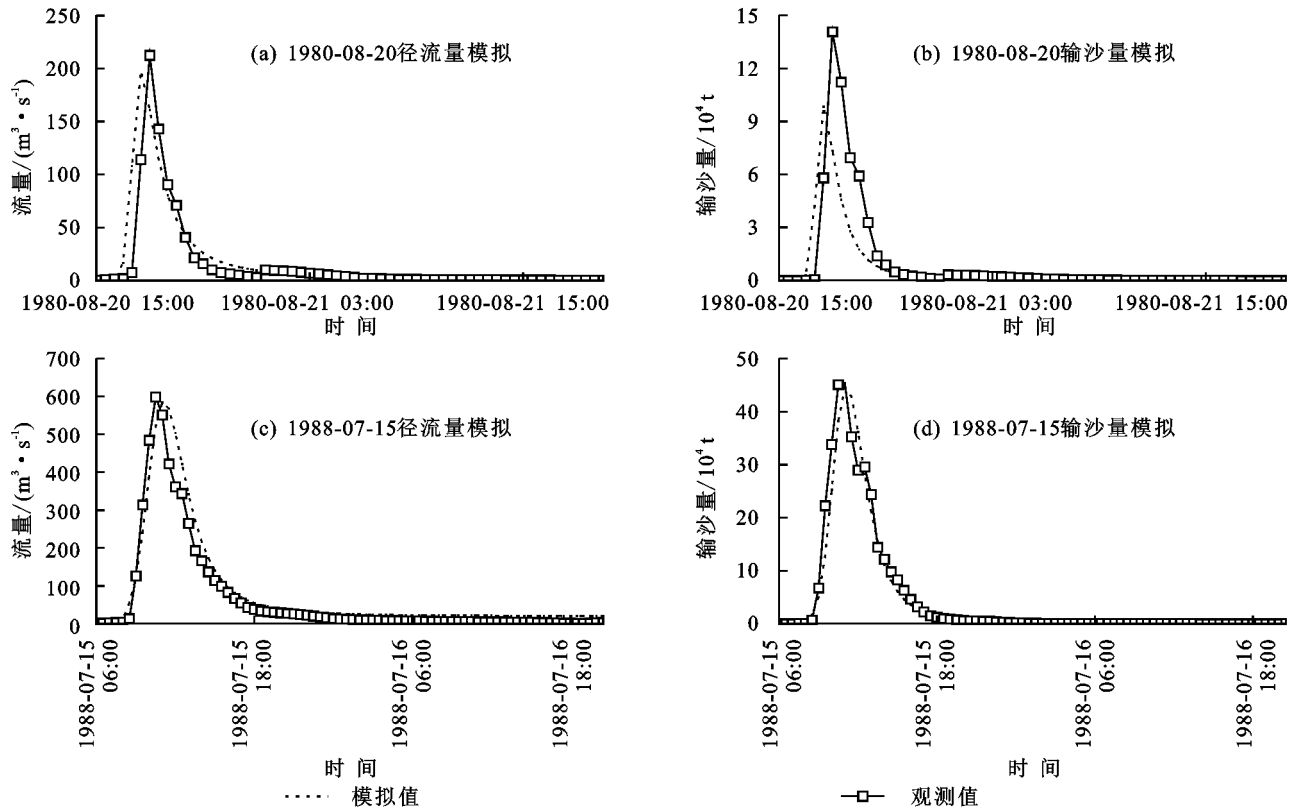


图 4 典型场次洪水过程径流量和输沙量模拟结果

3 讨论

3.1 模型输入数据和参数

本研究构建一个基于物理过程的分布式流域水沙过程耦合模拟模型,能够较为精准地模拟黄土高原地区小流域次洪过程的水沙变化。模型主要输入数据包括数字高程模型(DEM)、土壤属性数据、土地利用、归一化植被指数(NDVI)、降雨量及其他气象数据(如辐射、温度等)。降雨是模型模拟的主要驱动

因素,对模拟结果影响较大,且空间变异性较高,数据精度在时空分辨率上要求较高;而其他气象数据对模拟结果影响相对较小,且空间变异性较低。模型主要需要的参数除表 1 中的待率定参数外,根据研究区的植被覆盖类型结合实地调查进行赋值,如叶面积指数、植株高度、茎粗、茎密度等。如表 1 所示,产汇流模块待率定参数中土壤稳定下渗率(FC)、流域平均蓄水容量(WM)、地表曼宁粗糙度系数(n_{surf})、地下

水蓄水常数(K_g)为敏感参数,与 Li 等^[18]参数敏感性分析结果较为一致。产输沙模块的待率定参数较少,大多为物理参数或土壤、植被特征,其中 β 为敏感参数, γ 为不敏感参数,这2个参数均为输沙过程参数(公式13),表明输沙量对径流量的敏感性远大于对坡度的敏感性。

3.2 模型精度及其适用性

模型产汇流模拟结果具有较高精度,模拟次洪事件的峰形、峰值和峰现时间均与实测洪水过程一致性较好,表明垂向混合产流模式和运动波方程适用于黄土高原地区产汇流过程模拟,与以往研究^[18,20]结果一致。除1984-06-04、1981-07-12的2次降雨事件外,模拟洪峰流量和实测洪峰流量的相对误差均 $<20\%$,大部分洪峰流量模拟结果的误差在合理范围内,但模拟洪峰流量较实际值偏小,主要是受降雨和径流资料时段均化及实测资料观测误差的影响。同时,部分场次过程的降雨和径流资料由于计算步长不一致,在实际应用过程中对这部分数据插补展延对结果也有较大影响。与产汇流模块相比,模型产输沙模块的模拟精度较低。输沙量模拟结果的峰形、峰现时间与实测输沙量相比差距较小,但模拟值明显低于实测值。究其原因,其一是模型的产汇流模拟存在偏差,进而影响输沙过程的计算,在泥沙输移过程中径流挟沙力的计算式中包含 q^β ,导致输沙对径流非常敏感,径流量变化对输沙量结果造成指数级影响,因此,对大部分次洪过程来说,其洪峰流量误差越大,输沙量峰值误差也越大。其二则是模型中没有考虑重力侵蚀对输沙的影响,可能导致输沙量的低估。

4 结论

本研究构建基于物理过程的分布式流域水沙过程耦合模拟模型,能够较为精确地模拟黄土高原地区小流域场次事件的水沙过程。该模型包括降雨、冠层截留、蒸散发、产流、汇流等水文过程,考虑雨滴击溅侵蚀、地表径流冲刷、泥沙的沉积与搬运等产输沙过程,并考虑梯田的影响;产流部分采用垂向混合产流模式,包括超渗产流和蓄满产流2种模式,更符合黄土高原地区产流状况。模型算法简单,物理过程描述清晰,能够模拟黄土高原流域场次降雨的水沙过程。

模型产汇流模块具有较高的模拟精度,洪峰误差大部分在 20% 以内,纳什效率系数均达0.55以上,模型模拟场次洪水事件的峰形、峰值、峰现时间与实测洪水过程具有较好的一致性,模型可以较好地模拟黄土沟壑区小流域径流过程。但模型产输沙模块模拟精度仍不够理想,模拟结果整体趋势与实测值较为一

致,但输沙量模拟峰值比实测值偏低,主要是由于产汇流模块的误差传递以及重力侵蚀考虑不足。

目前,模型结果与参数有待进一步优化,以提高模型的模拟精度,同时仍需考虑滑坡、崩塌等重力侵蚀过程模拟,为深入探讨变化环境下的流域水沙过程机理、流域水土保持措施优化配置和流域综合治理提供有效工具。

参考文献:

- [1] Karlen D L, Rice C W. Soil degradation: Will humankind ever learn? [J]. Sustainability, 2015, 7(9): 12490-12501.
- [2] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 1-11.
- [3] Zhang S Y, Zhao G J, Mu X M, et al. Changes in stream-flow regimes and their responses to different soil and water conservation measures in the Loess Plateau watersheds, China[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(10): e14401.
- [4] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, et al. Decoupling effects of driving factors on sediment yield in the Chinese Loess Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1): 60-74.
- [5] Zhang X P, Lin P F, Chen H, et al. Understanding land use and cover change impacts on run-off and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(4): 576-589.
- [6] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212.
- [7] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733.
- [8] Bezak N, Mikoš M, Borrelli P, et al. Soil erosion modelling: A bibliometric analysis[J]. Environmental Research, 2021, 197: e111087.
- [9] Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: e146494.
- [10] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 393-415.
- [11] Wang G Q, Fu X D, Shi H Y, et al. Watershed sediment dynamics and modeling: A watershed modeling system for yellow river[M]. Advances in Water Resources Engineering, 2015: 1-40.
- [12] 姚文艺, 高航, 王玲玲, 等. 复杂侵蚀环境下分布式土壤流失水动力学模型: 以黄河多沙粗沙区为研究实例[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 17-21.
- [13] Cai J Y, Zhou Z H, Liu J J, et al. A three-process-based distributed soil erosion model at catchment scale on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology,

- 2019,578:e124005.
- [14] Ma H B, Nittrouer J A, Naito K, et al. The exceptional sediment load of fine-grained dispersal systems: Example of the Yellow River, China [J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1603114.
- [15] 中华人民共和国水利部.《黄河流域水文资料》(第 4 卷第 3 册)[R].北京:中华人民共和国水利部,2018.
- [16] Tian P, Feng J H, Zhao G J, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment dynamics at the flood event scale in a Loess Plateau watershed, China[J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(2): e14486.
- [17] Zhao G J, Gao P, Tian P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2020, 185: e104284.
- [18] Li D Y, Liang Z M, Zhou Y, et al. Multicriteria assessment framework of flood events simulated with vertically mixed runoff model in semiarid catchments in the middle Yellow River[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(9): 2027-2037.
- [19] De Roo A P J, Wesseling C G, Van Deursen W P A. Physically based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD model [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(11/12): 1981-1992.
- [20] 包为民,侯露,沈丹丹,等.黄土高原大理河流域水沙耦合模型应用研究[J].*湖泊科学*, 2019, 31(4): 1120-1131.
- [21] Eekhout J P C, Terink W, de Vente J. Assessing the large-scale impacts of environmental change using a coupled hydrology and soil erosion model [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2018, 6(3): 687-703.
- [22] 邵辉.渭河流域水土流失变化对梯田措施响应的模拟研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [23] Terink W, Lutz A F, Simons G W H, et al. SPHY v2.0: Spatial processes in hydrology [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 2009-2034.
- [24] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009 [R]. College Station, Texas: Water Resources Institute, 2011.
- [25] Saltelli A, Bolado R. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST) [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 1998, 26(4): 445-460.
- [26] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 158(3/4): 265-284.
- (上接第 56 页)
- [13] 陈剑南,刘益麟,李朋飞,等.1901—2016 年黄土高原降雨侵蚀力时空变化[J].*水土保持研究*, 2022, 29(4): 39-46.
- [14] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 2010, 4(4): 206-207.
- [15] Römken M J M, Young R A, Poesen J W A, et al. Soil erodibility factor(k)//Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. *USDA agriculture handbook*, 1997, 703: 65-100.
- [16] Torri D, Poesen J, Borselli L. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset [J]. *Catena*, 1997, 31(1/2): 1-22.
- [17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学*, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 吴普特,周佩华,郑世清.黄土丘陵沟壑区(Ⅲ)土壤抗冲性研究:以天水站为例[J].*水土保持学报*, 1993, 7(3): 19-25, 36.
- [19] 周佩华,武春龙.黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J].*水土保持学报*, 1993, 7(1): 29-34.
- [20] 王彬.土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [21] 刘斌涛,陶和平,史展,等.青藏高原土壤可蚀性 K 值的空间分布特征[J].*水土保持通报*, 2014, 34(4): 11-16.
- [22] 杨辰丛海,陈志强.武夷山丘陵茶园红壤土壤可蚀性近似计算初探[J].*水土保持研究*, 2022, 29(1): 21-27.
- [23] 汪邦稳.安徽省土壤可蚀性 K 值及其分布特征[J].*中国水土保持科学*, 2019, 17(6): 132-139.
- [24] 徐文秀,韦杰,李进林,等.三峡库区紫色土坡耕地表土的可蚀性研究[J].*水土保持通报*, 2019, 39(3): 7-11, 18.