

甘肃黄河流域水沙动态及其归因分析

王逸飞¹,武磊^{1,2},杨致远³,高祖桥¹,申娜¹,李美静¹,张旭阳¹,刘源文¹,李常斌¹

(1. 兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000; 2. 山西师范大学地理科学学院,山西 太原 030031;
3. 甘肃省城乡规划设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730070)

摘要:以甘肃黄河流域中洮河、祖厉河和泾河流域 3 个支流典型流域为研究区,基于 SWAT 模型对典型流域的水沙过程进行模拟。采用双累积曲线划分水沙变化特征时段,通过对比分析各特征时段 SWAT 模型的模拟结果,进行气候和下垫面因素对 3 个典型流域水沙过程影响的贡献分离。结果表明:SWAT 模型对 3 个典型流域水沙模拟精度较好,不同典型流域径流深和输沙模数空间分异显著,洮河流域水多沙少,祖厉河和泾河流域水少沙多;3 个典型流域降水-径流和径流-泥沙双累积曲线的斜率存在明显变化,以斜率表征的径流系数和输沙量均呈减小趋势;1980—2020 年,3 个典型流域水沙俱减,气候和下垫面因素对各特征时段水沙变化的贡献存在差异,前期气候因素影响显著,后期下垫面因素贡献有所提升;人类活动参与改造的下垫面因素是甘肃黄河流域水沙俱减的主要原因。

关键词:水沙动态;SWAT 模型;双累积曲线;气候因素;下垫面因素;甘肃黄河流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)01 - 0131 - 09

Runoff and sediment dynamics and attribution analysis in the Yellow River Basin of Gansu Province//WANG Yifei¹, WU Lei^{1,2}, YANG Zhiyuan³, GAO Zuqiao¹, SHEN Na¹, LI Meijing¹, ZHANG Xuyang¹, LIU Yuanwen¹, LI Changbin¹ (1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 3. Gansu Urban & Rural Planning and Design Institute Company Limited, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the SWAT model, the runoff and sediment processes in three typical tributaries of the Tao River, Zuli River, and Jing River basins in the Yellow River Basin of Gansu Province were simulated. By using double accumulation curves to divide the characteristic periods of runoff and sediment changes, and comparing and analyzing the simulation results of SWAT models in each characteristic period, the contributions of climate and underlying surface factors to the runoff and sediment processes in three typical watersheds were separated. The results show that the SWAT model has high accuracy in simulating runoff and sediment in three typical watersheds, with significant spatial differences in runoff depth and sediment transport modulus among different typical watersheds. The Tao River Basin has more runoff and less sediment, while the Zuli River and Jing River basins have less runoff and more sediment. The slopes of the precipitation-runoff and runoff-sediment double accumulation curves in three typical watersheds show significant changes, with a decrease trend in the runoff coefficient and sediment transport represented by the slopes. From 1980 to 2020, the runoff and sediment in three typical watersheds decreased, and there were differences in the contributions of climate and underlying surface factors to the changes in runoff and sediment during each characteristic period. The influence of climate factors was significant in the early stage, while the contribution of underlying surface factors increased in the later stage. The underlying factors of human activities participating in the transformation are the main reasons for the reduction of runoff and sediment in the Yellow River Basin in Gansu Province.

Key words: runoff and sediment dynamics; SWAT model; double accumulation curves; climate factors; underlying surface factors; the Yellow River Basin of Gansu Province

气候变化和人类活动深刻影响着流域径流输沙过程^[1]。气候因素,如降水变化,是地表产、汇流及土壤侵蚀发生发展的直接因素^[2-3];人类活动,如对于下垫面的改造,在多种尺度对径流和泥沙产生调节,

基金项目:国家自然科学基金项目(42371024);甘肃省科技重大专项计划项目(20ZD7FA005, 21ZD4FA008);兰州大学双碳专项计划项目(lzujbky-2021-sp70);甘肃省哲学社会科学规划重点项目(2021ZD004)

作者简介:王逸飞(1997—),男,硕士研究生,主要从事区域水源涵养功能变化研究。E-mail:1974584253@qq.com

通信作者:李常斌(1976—),男,教授,博士,主要从事寒旱区流域科学与水资源领域研究。E-mail:licb@lzu.edu.cn

是陆表水沙过程时空异质性提升的重要原因^[4-5]。在流域或区域尺度,水沙过程发生变异的环境因由归结为气候因素和下垫面因素两类,有助于厘清多变量复杂体系影响下的水沙变化机制,可对区域水土资源保护和可持续利用提供理论和数据方法支撑^[6-7]。

数理统计和模型模拟是流域水沙动态归因的两种常见方法。数理统计方法,如线性回归、双累积曲线等,通过径流、泥沙和降水等因子之间的数据关联估计自然因素和人类活动对水沙变化的相对贡献^[8-9]。模型模拟方法的机制表达相对复杂,但参变量体系较为完备,常用于定量评估多种时空尺度及情景下,气候变化和人类活动对水沙过程的影响^[10]。分布式水文模型 SWAT (soil and water assessment tool) 因其完备的水沙过程表达,在流域水沙运移模拟及其影响分析领域具有很好的适用性,在全球范围内被广泛使用^[11-13]。因长时间观测序列获取有难度,加之模型率定的复杂性,基于特征时段划分进行 SWAT 情景模拟的多流域对比研究目前还较少。

甘肃黄河流域是黄河流域的甘肃部分,指甘肃省除内陆河流域和长江流域以外的其他区域。按黄河上、中游区位,可大致分为甘南高原、陇中和陇东黄土高原(黄土高原西缘)等三大地貌区间。甘南降水较丰,地表覆被总体良好,水沙关系相对协调;陇中和陇东下垫面较为脆弱,降雨多以“短历时、高强度”模式发生,是严重的水力侵蚀区^[14-15]。总体来看,甘肃黄河流域地貌和覆被类型多样,水文循环过程复杂,水沙关系呈机制性差异^[16]。加之大部分区域降水较少,人工植被成活率低,亦有很多沟道坝系水土保持措施存在年久失修等问题,水沙关系愈显复杂,造成水土流失防治的群体性、系统性和全局性功能受损^[17-18]。

鉴于此,本文以甘肃黄河流域的 3 个支流典型流域(洮河、祖厉河和泾河流域)为研究区,构建 SWAT 模型,对流域水沙过程进行模拟并分析其时空变化特征,利用双累积曲线划分研究区流域水沙关系发生变化的特征时段。基于特征时段划分和 SWAT 模型率定成果,模拟研究区流域水沙过程情景并进行分析,分离气候和下垫面因素在上述流域水沙过程变化的贡献,以期为区域水土流失防治和甘肃省水土保持工作高质量发展提供理论支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洮河流域(34°03′N~36°01′N、101°36′E~

104°20′E)发源于甘肃、青海和四川交界的西倾山北麓,于永靖县刘家峡水库汇入黄河,干流全长 673 km,流域面积 25 527 km²,海拔为 1 002 ~ 4 866 m^[19]。根据红旗水文站观测资料,洮河多年平均径流量约为 41.63 亿 m³,年均含沙量为 3.56 kg/m³,年输沙量为 1 482.03 万 t。祖厉河流域(35°17′N~36°36′N、104°11′E~105°34′E)发源于甘肃省会宁县华家岭,于靖远县汇入黄河,干流长度为 224 km,流域面积 10 653 km²,海拔为 1 380~2 822 m^[20]。根据靖远水文站观测资料,祖厉河多年平均径流量为 8 340 万 m³,年均含沙量 317.65 kg/m³,年输沙量为 2 649.20 万 t。泾河属渭河一级支流,发源于宁夏六盘山,自西向东流经甘肃平凉、泾川后进入陕西省境内,本文涉及主要位于甘肃省境内的泾河上游段(35°49′N~36°29′N、106°11′E~107°46′E),域内干流长度为 120 km,流域面积 14 124 km²,海拔为 932 ~ 2 890 m^[21]。根据杨家坪水文站资料,泾河上游多年平均径流量 6.55 亿 m³,年均含沙量为 49.60 kg/m³,年输沙量为 3 246.63 万 t。研究区概况见图 1。

1.2 数据来源

SWAT 模型数据库构建是其运行和模拟的基础,涉及环境要素空间数据、属性数据以及河道断面观测数据等 3 类,具体包括高程、土壤、土地利用、水文气象、径流、泥沙等。根据各类数据契合程度,水沙动态研究时段设为 1980—2020 年,具体见表 1。

表 1 SWAT 模型数据
Table 1 Data of SWAT model

数据类型	分辨率	时间	数据来源
DEM	30 m×30 m	2019 年	地理空间数据云
河流水系	1 : 25 万	2018 年	全国水系图
土壤	1 : 100 万	2013 年	世界土壤数据库
土地利用/覆被	1 km	1980—2020 年	中国土地利用现状 遥感监测数据库
气象(降水、气温、 辐射等)	日均值	1980—2020 年	中国气象数据中心
水文(径流量、 输沙量)	月均值	1980—2020 年	甘肃省水文站

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

2.1.1 水文模拟

SWAT 模型基于水量平衡进行水文过程模拟^[22-23]。地表径流量计算采用径流曲线数 SCS(soil conservation service)法^[24],该方法假设降雨-径流过程中实际入渗量与实际地表径流量之比等于当时潜在滞蓄量与潜在径流量之比,则有:

$$F/S = Q_s / (P - I_a) \tag{1}$$

其中 $Q_s = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$

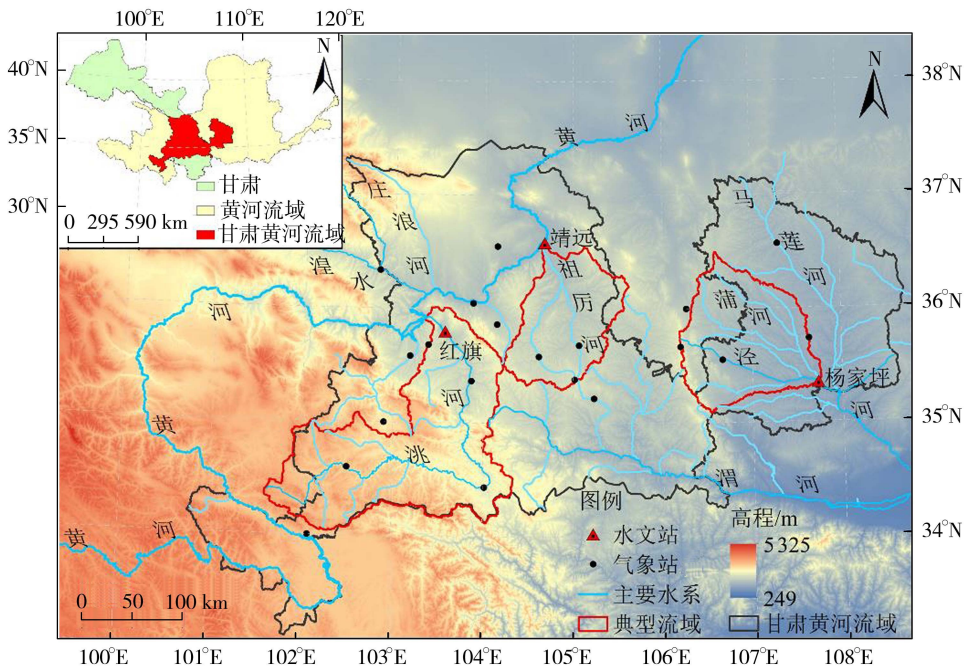


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

$$S = 25.4(100/C_N - 10)$$

式中: F 为实际入渗量; S 为滞蓄量; Q_s 为累积径流量或超渗雨量; P 为降水深; I_a 为降雨初损量, 通常近似为 $0.2S$; C_N 为径流曲线数。当 $P > I_a$ 时, 产生地表径流。

2.1.2 泥沙模拟

SWAT 模型的泥沙模拟部分包括土壤侵蚀、河道演算等模块^[25]。其中, 土壤侵蚀模块采用了改进的土壤流失方程, 对每一个水文响应单元分别进行侵蚀量计算。

2.1.3 模型评价

通过模拟值与实测值的对比, 采用决定系数 (R^2) 和纳什效率系数 (NSE) 两个指标对 SWAT 模拟精度进行评价。 R^2 表征两变量相关性高低, 取值范围为 $0 \sim 1$, 越接近 1, 说明模拟结果越接近实测值。NSE 描述模拟序列和实测序列的拟合程度, 是一个标准化的无量纲统计参数, 用来度量极值的模拟效果, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。一般认为, 当 R^2 和 NSE 均高于 0.55 时, 模型能够较好反映研究区实际水文过程, 指标值越接近 1, 模拟效果越好^[26]。

2.2 水沙动态归因

2.2.1 特征时段划分

特征时段划分是气候和下垫面因素对水沙动态贡献量化分离的基础。采用双累积曲线检测降水、径流和泥沙序列的关系变化^[27]。双累积曲线由两个序列的同期累积值构成, 斜率变化表示变量之间关系的变化, 间接反映环境因素驱动效应的变化。

协方差分析方法可消除协变量对因变量的影响, 并通过 F 检验判定序列变化是否显著。采用协方差分析诊断双累积曲线斜率变化的显著性, 以此确定两个变量关系发生突变的年份, 突变年份之间即为关系相对稳定的特征时段。

2.2.2 归因分析

基于特征时段划分, 进行 SWAT 模型情景设计, 据此定量评估气候和下垫面因素对径流和泥沙过程的影响。计算公式为

$$\Delta X_c = X_c - X_{c0} \quad (2)$$

$$\Delta X_H = X_H - X_{H0} \quad (3)$$

式中: ΔX_c 、 ΔX_H 分别为气候变化和下垫面变化导致的径流、输沙变化量; X_c 、 X_H 分别为变化期的径流量、输沙量; X_{c0} 、 X_{H0} 分别为基准期的径流量、输沙量。进而计算不同因素对径流和输沙变化的贡献率, 计算公式为

$$\mu_c = \Delta X_c / (|\Delta X_c| + |\Delta X_H|) \times 100\% \quad (4)$$

$$\mu_H = \Delta X_H / (|\Delta X_c| + |\Delta X_H|) \times 100\% \quad (5)$$

式中 μ_c 、 μ_H 分别为气候和下垫面因素对径流或输沙变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 水沙模拟

3.1.1 模型率定及验证

SWAT 模型率定、验证期分别设为 1986—2005 年和 2006—2020 年。图 2 为 3 个典型流域径流和输沙过程的模拟与实测序列对比。由图 2(a)

(c)(e)可见,3个典型流域在率定期和验证期径流量的实测和模拟序列趋势均对应较好。率定期洮河流域径流量的 R^2 和NSE分别为0.77和0.81,验证期分别为0.83和0.76;率定期祖厉河流域径流量的 R^2 和NSE分别为0.73和0.67,验证期分别为0.69和0.64;率定期泾河流域径流量的 R^2 和NSE分别为0.79和0.79,验证期分别为0.82和0.77。结果表明SWAT模型对径流量总体模拟精度较好,但对径流序列极值的模拟能力较低。由图2(b)(d)(f)可见,3个典型流域在率定期和验证期输沙量的实测和模拟序列趋势也对应较好,但评价指标值总体低于径流量模拟效果。率定期洮河流域输沙量的 R^2 和NSE分别为0.68和0.60,验证期分别为0.57和0.59;率定期祖厉河流域输沙量的 R^2 和NSE分别为0.71和0.68,验证期分别为0.66和0.55;率定期泾河流域输沙量的 R^2 和NSE分别为0.73和0.69,验证期分别为0.68和0.63。可见,输沙量模拟的评价指标值率定期高于验证期,主要原因是模拟后期输沙量显著下降,模型参变量体系对输沙量骤变的模拟精度降低。总体来看,3个典

型流域的径流量和输沙量模拟的 R^2 和NSE均高于0.55,表明所构建的SWAT模型对研究区流域径流和输沙的整体模拟较好,水沙动态较符合实际,精度能够满足研究需求^[28]。

3.1.2 水沙空间分布特征

图3为3个典型流域1980—2020年平均径流深和输沙模数的空间分布。由图3(a)(b)(c)可见,洮河流域径流深自上游至下游逐渐减小,高值主要分布在上游,最高可超过200 mm;低值主要分布在下游,径流深多为50~80 mm。祖厉河流域的径流深分布与洮河流域类似,上、中游地区径流深较大,多为11~14 mm;下游径流深多为2~8 mm。泾河流域西南部径流深较大,上游北部(左岸)子流域的径流深偏小。模拟期间,洮河、祖厉河、泾河流域平均径流深分别为133.85、10.39、37.29 mm,洮河流域产流较丰,祖厉河流域最少。由图3(d)(e)(f)可见,洮河流域输沙模数的空间分布格局与径流深成相反态势,上游输沙模数较小,一般在20 t/hm²以下;中下游输沙模数渐增,大多在30 t/hm²以上。祖厉河流域输沙模数呈东高西低和中部高、南北低的

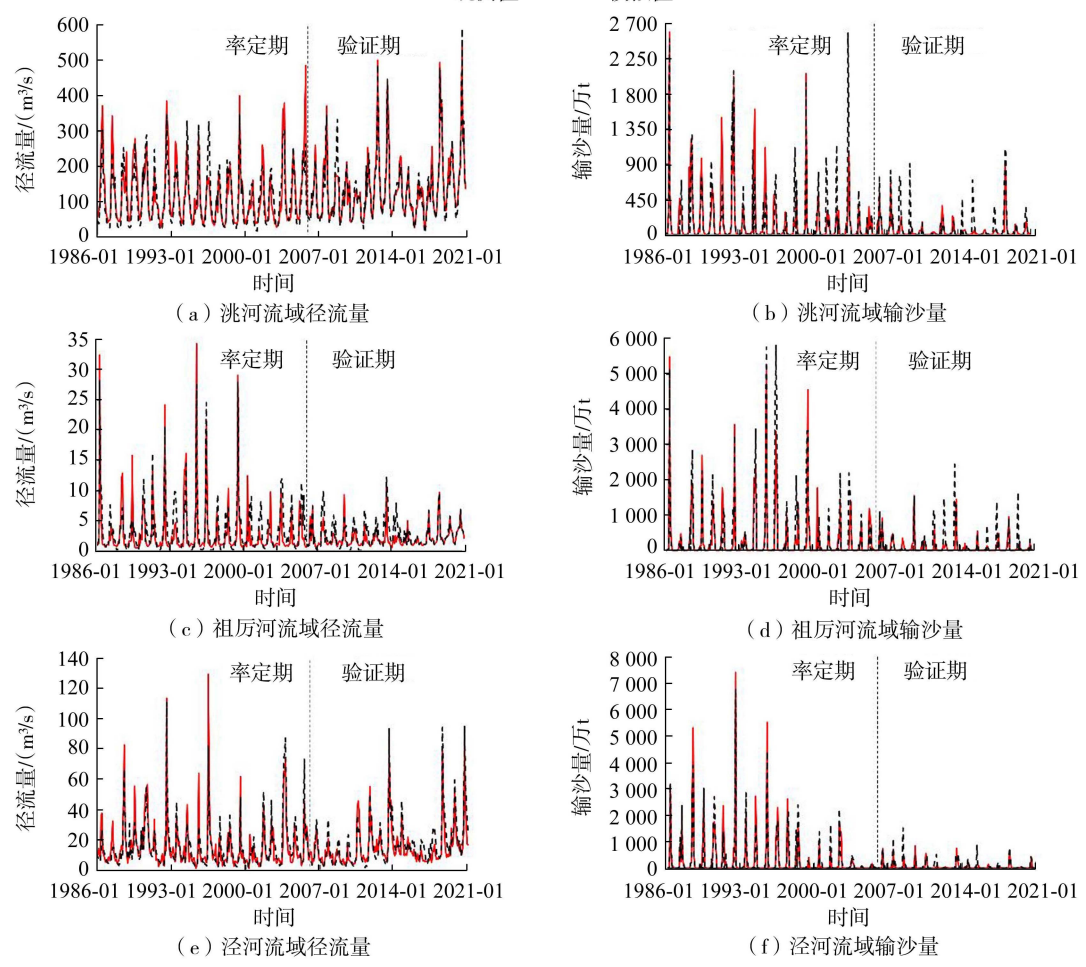


图2 3个典型流域径流和输沙过程的模拟与实测序列对比

Fig. 2 Comparisons between simulations and observations for river discharge and sediment processes in three typical basins

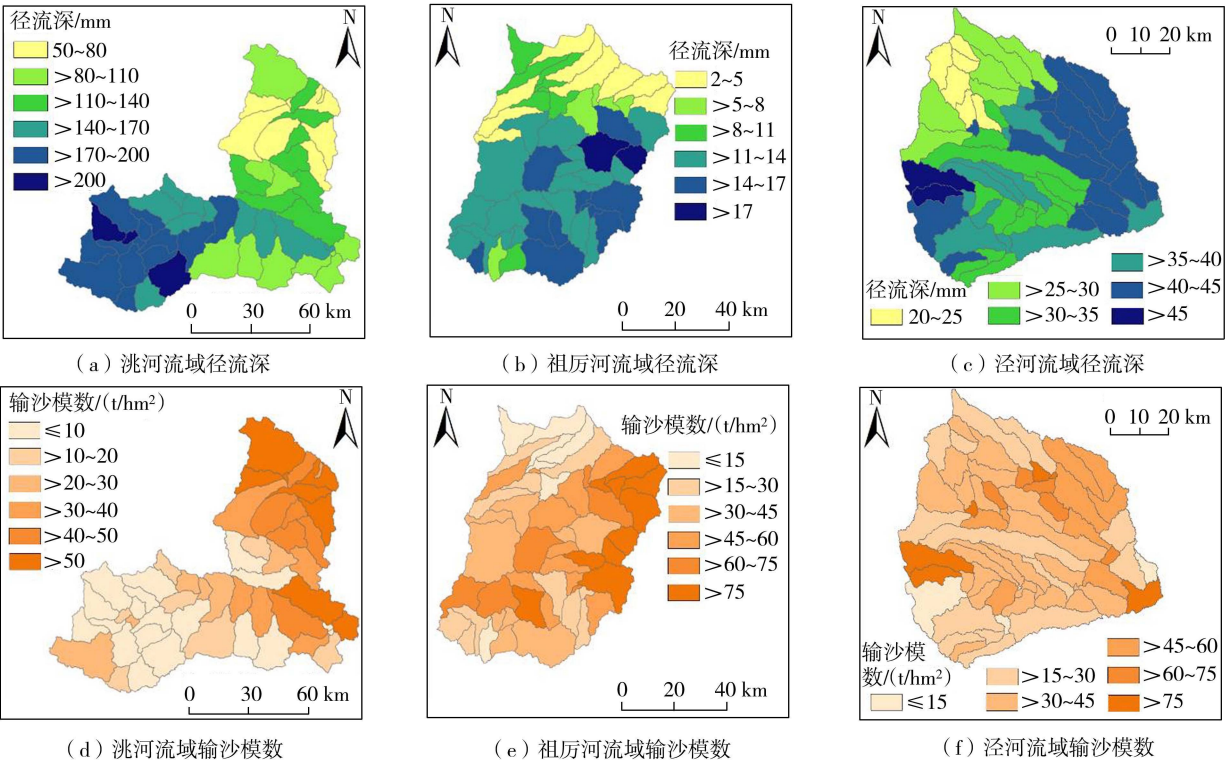


图3 3个典型流域多年平均径流深和输沙模数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of multi-year average runoff and sediment modulus in three typical basins

空间格局,流域南部上游和北部下游地带输沙模数相对较小。泾河流域输沙模数的空间分异显著,泾河干流上游地带和下游出口断面输沙模数较大,多在 45 t/hm^2 以上;上游以北和中游以南的子流域输沙模数相对较小。模拟期间,洮河、祖厉河、泾河流域平均输沙模数分别为 21.77 、 46.53 、 40.13 t/hm^2 ,洮河流域最小,祖厉河流域最大。

3.2 水沙关系特征时段划分

分别绘制降水-径流和径流-输沙双累积曲线,并将降水-径流斜率单位转换为 1 m/mm 、径流-输沙斜率单位转换为 kg/m^3 ,根据曲线斜率 k 的变化,进行研究区流域水沙关系特征时段划分,如图4所示。通过协方差分析,将斜率发生显著变化时的年份确定为两个变量关系发生突变的年份,突变年份之间即为关系相对稳定的特征时段。洮河流域划分为4个特征时段:1980—1990年、1991—1998年、1999—2008年、2009—2020年;祖厉河流域划分为3个特征时段:1980—1998年、1999—2009年、2010—2020年;泾河流域划分为4个特征时段:1980—1990年、1991—1998年、1999—2009年、2010—2020年。假设各特征时段内两个变量之间的关系(影响机制)相对稳定,即认为各特征时段间累积曲线斜率的变化是由于在原来关系基础上,因环境要素变化而产生了新的变化。

3.3 基于情景模拟的水沙动态归因

根据特征时段划分,采用情景分析方法模拟得

到多个水沙序列,通过与基准期进行对比,分离气候因素和下垫面因素对流域水沙过程变化的贡献。以洮河流域为例,第一时段为基准期,第二时段为(第一个)变化期,保持基准期下垫面因素不变,将变化期水文气象数据输入SWAT模型,模拟得到前后两个时段气候因素影响下的水沙变化;同理,保持基准期水文气象要素不变,通过变化期下垫面因素设置,实现下垫面因素影响的量化分离;其他时段采用同样方法进行参变量体系互换设置和贡献分离。

3.3.1 气候和下垫面因素对流域径流量变化的影响

表2为气候和下垫面因素对3个典型流域径流量变化的贡献分离。由表2可见,3个典型流域气候和下垫面因素对径流量变化影响整体呈负向驱动。分特征时段来看,3个典型流域内气候和下垫面的叠加变化影响量均表现为逐期减少趋势,下垫面因素对径流量影响在各特征时段始终为负,洮河和祖厉河流域在第二变化期内下垫面因素影响值达到最大,泾河流域在第三变化期内下垫面因素影响值达到最大。气候因素在3个典型流域内的影响均表现为先负后正,且正值均在最后一个变化期内,一定程度反映了该期降水等关键气候因素的正向促增效用。

1980—2020年,洮河径流量总计减少了 7.73 亿 m^3 ,气候与下垫面因素导致径流的减少量分别为 2.76 亿 m^3 和 4.97 亿 m^3 ,贡献率分别为

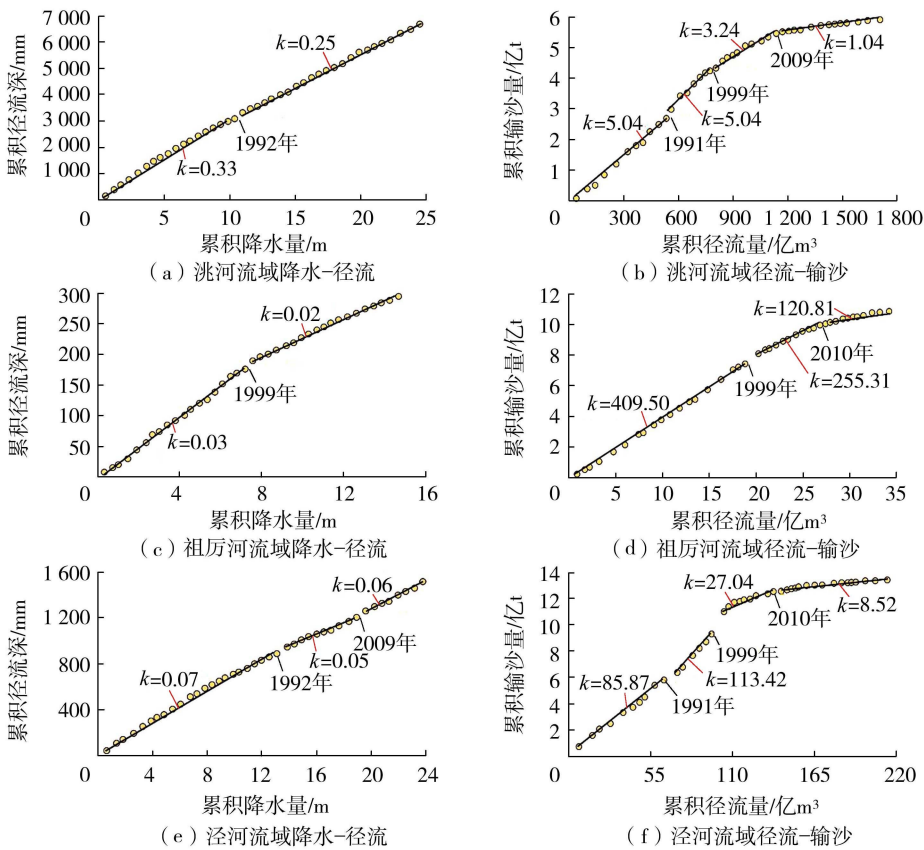


图 4 3 个典型流域降水-径流和径流-输沙的双累积曲线

Fig. 4 Double accumulation curves of precipitation-runoff and runoff-sediment in three typical basins

表 2 气候和下垫面因素对 3 个典型流域径流量变化的贡献分离

Table 2 Contribution separations of climatic and underlying surface factors to river runoff variations in three typical basins

典型流域	特征时段	径流量/ 亿 m ³	变化量/ 亿 m ³	气候因素 影响/亿 m ³	下垫面因素 影响/亿 m ³
沱河流域	1980—1990 年	45.85			
	1991—1998 年	34.71	-11.14	-6.01	-5.13
	1999—2008 年	35.66	-10.19	-3.92	-6.27
	2009—2020 年	43.98	-1.87	1.63	-3.50
	1980—2020 年	38.12	-7.73	-2.76	-4.97
祖厉河流域	1980—1998 年	1.08			
	1999—2009 年	0.96	-0.12	-0.05	-0.07
	2010—2020 年	1.00	-0.08	0.04	-0.13
	1980—2020 年	0.98	-0.10	-0.01	-0.09
	1980—1990 年	7.80			
泾河流域	1991—1998 年	4.92	-2.88	-1.69	-1.19
	1999—2009 年	4.98	-2.82	-1.53	-1.29
	2010—2020 年	6.17	-1.63	0.20	-1.83
	1980—2020 年	5.36	-2.44	-1.01	-1.43

-35.78%和-64.22%;祖厉河流域径流量减少 0.10 亿 m³,气候与下垫面因素导致径流量的减少量分别为 0.01 亿 m³ 和 0.09 亿 m³,贡献率分别为 -4.76% 和 -95.24%;泾河流域径流量减少 2.44 亿 m³,气候与下垫面因素分别导致径流量减少 1.01 亿 m³ 和 1.43 亿 m³,贡献率分别为

-41.39%和-58.61%。

3.3.2 气候和下垫面因素对流域输沙量变化的影响

表 3 为气候和下垫面因素对 3 个典型流域输沙量变化的贡献分离。由表 3 可见,不同于径流量的变化趋势,3 个典型流域气候和下垫面因素对输沙

表 3 气候和下垫面因素对 3 个典型流域输沙量变化的贡献分离

Table 3 Contribution separations of climatic and underlying surface factors to river sediment variations in three typical basins

典型流域	特征时段	输沙量/ 万 t	变化量/ 万 t	气候因素 影响/万 t	下垫面因素 影响/万 t
沱河流域	1980—1990 年	2 332.99			
	1991—1998 年	1 876.45	-456.54	-398.5	-58.04
	1999—2008 年	1 795.44	-537.55	-309.92	-227.63
	2009—2020 年	823.68	-1 509.31	192.74	-1 702.05
	1980—2020 年	1 498.53	-834.46	-171.89	-662.57
祖厉河流域	1980—1998 年	4 758.85			
	1999—2009 年	1 974.81	-2 784.04	-1 294.68	-1 489.36
	2010—2020 年	1 632.51	-3 126.34	537.32	-3 663.66
	1980—2020 年	1 803.66	-2 955.19	-378.68	-2 576.51
	1980—1990 年	5 764.28			
泾河流域	1991—1998 年	4 843.99	-920.29	-545.23	-375.06
	1999—2009 年	1 658.15	-4 106.13	-1 794.94	-2 311.19
	2010—2020 年	626.84	-5 137.44	-953.43	-4 184.01
	1980—2020 年	2 376.33	-3 387.95	-1 097.87	-2 290.08

量的叠加影响均表现为逐期增加趋势,所对应的气候和下垫面因素影响存在显著差异,流域输沙过程机理也更为复杂。气候因素对洮河和祖厉河流域输沙量的影响在后期变为促增,但在泾河流域始终为负。下垫面因素对3个典型流域各特征时段的输沙量始终为抑减效应,且随着时间推移,其贡献逐渐增大,一定程度反映出典型流域下垫面因素后期变化更显著。

1980—2020年,洮河流域输沙量减少834.46万t,气候与下垫面因素导致的减少量分别为171.89万t和662.57万t,贡献率分别为-20.60%和-79.40%;祖厉河流域输沙量减少2955.19万t,气候与下垫面因素导致的减少量分别为378.68万t和2576.51万t,贡献率分别为-12.81%和-87.19%;泾河流域输沙量减少量为3387.95万t,气候与下垫面因素导致的减少量分别为1097.87万t和2290.08万t,贡献率分别为-32.41%和-67.59%。可见,典型流域输沙量的减少均以下垫面因素的影响为主。

4 讨论

基于SWAT模型模拟得到的水沙空间分布格局,反映出下垫面因素对流域水沙过程影响的差异,3个典型流域的径流量空间分布存在类似之处,即靠近主河道的子流域径流深较大。3个典型流域的径流量空间分布模拟结果与马亚丽等^[29-31]的研究较为吻合,反映出SWAT模型对典型流域径流模拟的适用性较强。3个典型流域的输沙量空间分布存在差异,洮河流域输沙量的空间分布格局与径流量呈相反态势,形成上述格局差异的原因主要在于上游林草植被好,下垫面抗蚀性强;下游农耕分布广,面域侵蚀较易发生;且随着河川径流量增加,下游河道的泥沙输送能力也有所提升。祖厉河流域在研究时段内径流量与输沙量均呈减少趋势,与该流域降水量在研究期内逐渐减少、雨力侵蚀能力降低有关^[32];流域南部上游地带输沙模数相对较小,与该区较好的植被覆盖(如华家岭等)有关;流域北部下游的输沙模数相对较小,与该区降水较少以及20世纪80年代以来的水土保持措施有关。泾河流域东北部多为15~25°坡度地带,耕地和草地面积占比高,汛期降水以大雨和暴雨形式为主^[33],雨力侵蚀较易发生,且该区域靠近蒲河主河道,故该区域输沙模数较大;泾河干流上游输沙模数较大,与该地区建筑用地和耕地分布较广、植被覆盖较差有关。总体上,SWAT模型对输沙量空间分布的模拟结果与黄晨璐等^[34-35]的研究基本一致。

对3个典型流域降水-径流、径流-泥沙的双累

积曲线斜率进行协方差分析,发现人类活动通过影响下垫面进而影响流域水沙过程的效用越往后期越明显,一定程度契合了各类覆被改良和水保工程控制和影响流域水沙动态的累积效应。降水是影响径流量和输沙量的关键因素。对甘肃黄河流域1980—2020年降水量的分析结果表明,3个典型流域的降水量均在2010年前发生减少,之后则有所增加,与气候变化背景下典型流域径流量先减后增相对应。1980—2020年,3个典型流域的土地利用类型均以农田减少、林草增加为主要特征^[36],林草恢复改变土壤蓄渗条件,同时增加了蒸腾耗散,于河川径流变化产生负向效应,特别在干旱黄土区,这一情形更加突出^[37]。归因分析表明,3个典型流域径流量减少的下垫面效应存在增大趋势,与双累积曲线分析结果相吻合。特别是统计后期,下垫面因素对径流变化的影响超过了气候因素,两个黄土区流域更为突出,反映了人类活动对下垫面的改造及其水资源效用。

3个典型流域输沙量变化大体与径流量相对应,一定程度反映出人类活动通过改造下垫面影响径流,进而影响输沙过程。研究后期,泾河流域气候因素正向促增河川径流,却对流域输沙产生负向抑减,究其原因,应该是气候、植被、径流等因素对输沙量变化的直接、间接影响及其机制交互所致^[38]。气候因素的直接效应是通过雨力促发土壤侵蚀和增加输沙物源,间接效应是通过影响植被、风化和冻融等对土壤可蚀性产生影响^[39],进而改变输沙能力。上述效应在不同时空尺度发生交互,共同导致流域水沙过程的复杂化。降水量的增加有利于地表产水,坡面侵蚀的风险提升;但充足的水分供应支撑植被生长,覆盖好转有助于遮蔽保湿固土,降低各种形态(细沟、冲沟、河道等)侵蚀的发生,最终对河道输沙形成抑减^[40]。从3个典型流域的对比来看,气候因素对泾河流域输沙量的负向抑减最显著,下垫面因素对祖厉河流域输沙量的负向抑减最显著,反映出不同水文气象和地理生态区间水土流失发生发展的自然和人工应对差异。

5 结论

a. SWAT模型在洮河、祖厉河和泾河流域的水沙模拟精度较好,各典型流域径流深和输沙模数空间分异显著,洮河流域水多沙少,祖厉河和泾河流域水少沙多。

b. 3个典型流域降水-径流和径流-泥沙的双累积曲线斜率存在明显变化,以此进行特征时段划分,洮河和泾河划为4个特征时段,祖厉河划为3个特征时段;以斜率表征的典型流域径流系数和输沙量

均发生减少。

c. 以第一时段为基准期,其余时段为变化期进行情景分析,发现气候和下垫面因素对流域水沙过程的影响存在差异,前期气候影响显著,后期下垫面贡献提升;总体来看,气候因素对洮河、祖厉河、泾河流域径流量减少的贡献率分别为-35.78%、-4.76%、-41.39%,下垫面因素对3个典型流域输沙量减少的贡献率分别为-79.40%、-87.19%和-67.59%;下垫面因素是甘肃黄河流域水沙俱减的主导因素。

参考文献:

[1] WEI Danmeng, LIU Shuguang, WU Yiping, et al. Impacts of human activities and climate change on water and sediment evolution in four large subtropical river basins in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 110958.

[2] ZHAO Dongmei, XIONG Donghong, ZHANG Baojun, et al. Long-term response of runoff and sediment load to spatiotemporally varied rainfall in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129154.

[3] CHEN Yulan, LI Jianjun, ZHANG Ziqi, et al. Modeling soil loss under rainfall events using machine learning algorithms [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 352: 120004.

[4] 王延贵, 吴钰川, 刘焕永, 等. 南方主要河流水沙变化及人类活动的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 16-22. (WANG Yangui, WU Yuchuan, LIU Huanyong, et al. Variations of water and sediment and impact of human activities in major rivers in southern China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (5): 16-22. (in Chinese))

[5] 吴志勇, 侍恒, 何海, 等. 岔巴沟流域植被变化特征及其对水沙的影响 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (1): 31-37. (WU Zhiyong, SHI Heng, HE Hai, et al. Characteristics of vegetation change and impact on runoff and sediment in Chabagou Watershed [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1): 31-37. (in Chinese))

[6] 薛帆, 晁智龙, 何亮, 等. 近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应 [J]. 生态学报, 2023, 43 (8): 3247-3260. (XUE Fan, CHAO Zhilong, HE Liang, et al. Hydrologic and sediment responses to ecological restoration in different geomorphological and vegetation type areas in past 70 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (8): 3247-3260. (in Chinese))

[7] ZHOU Yajun, BATELAAN O, GUAN Huade, et al. Evaluation of the contributions of climate change and overgrazing to runoff in a typical grassland inland river basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 52: 101725.

[8] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于 Budyko 假设和微分方程的

淮水上中游径流变化归因分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (5): 25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (5): 25-32. (in Chinese))

[9] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, GOU Jiaojiao, et al. Sediment reduction in the middle Yellow River basin over the past six decades: attribution, sustainability, and implications [J]. Science of The Total Environment, 2023, 882: 163475.

[10] DAS S, JAIN M K, GUPTA V. An assessment of anticipated future changes in water erosion dynamics under climate and land use change scenarios in South Asia [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637: 131341.

[11] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 9-17. (in Chinese))

[12] SON N T, LE HUONG H, LOC N D, et al. Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam [J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24 (3): 3091-3109.

[13] NKWASA A, CHAWANDA C J, VAN GRIENSVEN A. Regionalization of the SWAT model for projecting climate change impacts on sediment yield: an application in the Nile basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 42: 101152.

[14] 魏健美, 李常斌, 武磊, 等. 基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 31-37. (WEI Jianmei, LI Changbin, WU Lei, et al. Study on soil erosion in northwestern Sichuan and southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (2): 31-37. (in Chinese))

[15] 范德政, 梅雪梅, 张晓明, 等. 宁夏黄土丘陵沟壑区产流产沙特征及其影响因素量化 [J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45 (4): 833-843. (FAN Dezheng, MEI Xuemei, ZHANG Xiaoming, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in the loess hilly and gully region of Ningxia, China and quantification of their influencing factors [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45 (4): 833-843. (in Chinese))

[16] 杨媛媛. 黄河河口镇-潼关区间淤地坝拦沙作用及其拦沙贡献率研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[17] 梁海燕. 黄河流域甘肃段生态保护和高质量发展的现实问题与推进路径 [J]. 开发研究, 2023, (5): 61-71. (LIANG Haiyan. The practical problems and promoting paths of ecological protection and high-quality development

- in the Yellow River Basin of Gansu section[J]. Research on Development, 2023, (5): 61-71. (in Chinese))
- [18] 蒋云信. 新中国成立以来甘肃省水土保持建设研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2022.
- [19] 马亚丽, 牛最荣, 张芮, 等. 洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 90-97. (MA Yali, NIU Zuirong, ZHANG Rui, et al. Relationship between the evolution of runoff and sediment and rainfall and rainfall erosivity in the Taohe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 90-97. (in Chinese))
- [20] 黄晨璐. 祖厉河流域水沙演变规律及其成因分析[J]. 水文, 2021, 41(2): 101-108. (HUANG Chenlu. Analysis of water and sediment evolution law and its causes in Zuli River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2): 101-108. (in Chinese))
- [21] 康燕楠, 降亚楠. 降雨时空变化对泾河流域水沙的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 10-13. (KANG Yannan, JIANG Yanan. Impacts of spatial and temporal rainfall variation on runoff and sediment transport in Jinghe River Basin [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 10-13. (in Chinese))
- [22] ARNOLD J G, ALLEN P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1996, 176(1/2/3/4): 57-77.
- [23] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [24] Soil Conservation Service. National engineering handbook, Section 4: hydrology [R]. Washington, D. C.: USDA, 1972.
- [25] BUSICO G, COLOMBANI N, FRONZI D, et al. Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266: 110625.
- [26] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137-144. (in Chinese))
- [27] 戴中山, 李海峰. 2011—2020 年赣江上游主要支流水沙变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 178-186. (DAI Zhongshan, LI Haifeng. Variation of runoff and sediment in the main tributaries of the upper Ganjiang River in the period from 2011 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 178-186. (in Chinese))
- [28] BRIGHENTI T M, BONUMA N B, GRISON F, et al. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 103-113.
- [29] 马亚丽, 牛最荣, 王兴繁, 等. 缺资料地区产流径流时空特性分析及其关系研究: 以洮河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 58-65. (MA Yali, NIU Zuirong, WANG Xingfan, et al. Spatio-temporal characteristics of water yield and runoff and their relationship in regions with scarce data: a case study of Taohe River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 58-65. (in Chinese))
- [30] 鄂刚. 基于 SWAT 模型土地利用多情景变换下的径流模拟: 以祖厉河流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [31] 安宇廷. 泾河流域水循环要素演变规律及生态基流保障研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [32] 张富, 赵传燕, 邓居礼, 等. 祖厉河流域降雨径流泥沙变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 74-82. (ZHANG Fu, ZHAO Chuanyan, DENG Juli, et al. Change characteristics of the precipitation, runoff and sediment discharge in Zulihe River Basin [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 74-82. (in Chinese))
- [33] 路志强. 基于 RUSLE 模型及泥沙连通性指数的蒲河流域水土流失研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [34] 黄晨璐. 近 40 年黄土高原土壤侵蚀时空变化及其主控因子研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [35] 张忠扬, 吕明侠, 王一博, 等. 基于 WaTEM/SEDEM 模型的洮河源区土壤侵蚀产沙模拟及其空间驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 27-36. (ZHANG Zhongyang, LYU Mingxia, WANG Yibo, et al. Simulation and space driving force analysis of soil erosion and sediment production in Taohe source area based on WaTEM/SEDEM model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 27-36. (in Chinese))
- [36] 武磊. 基于流域对比的水沙时空动态及其归因分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [37] TAN Xingyan, JIA Yangwen, YANG Dawen, et al. Impact ways and their contributions to vegetation-induced runoff changes in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101630.
- [38] HOU Xiaoning, ZHANG Shanghong, RUAN Qiongyao, et al. Synergetic impact of climate and vegetation cover on runoff, sediment, and nitrogen and phosphorus losses in the Jialing River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 361: 132141.
- [39] SUN Baoyang, LIU Jigen, REN Feipeng, et al. Effects of seasonal freeze-thaw and wind erosion on runoff and sediment yields of three loamy slopes of Loess Plateau, China [J]. Catena, 2022, 215: 106309.
- [40] WANG Jing, LU Pingda, VALENTE D, et al. Analysis of soil erosion characteristics in small watershed of the loess tableland Plateau of China [J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108765.