

基于 SWAT 模型的涪江流域土地利用变化的水沙响应研究

刘雪妍¹, 张会兰^{1,2}, 罗泽宇¹, 张嘉琪¹, 安妮¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 重庆 400711)

摘要: [目的] 分析涪江流域水沙对土地利用类型变化的响应情况, 为流域水土资源规划管理和生态环境建设提供科学依据。[方法] 应用 SWAT 分布式水文模型, 采用情景模拟方法构建 3 期自然情景以及 3 种极端情景, 分析流域 1990—2010 年的土地利用变化情况以及量化不同土地利用类型对流域水沙的作用程度。[结果] (1) 1999—2010 年, 流域上游以林草地为主, 约占流域总面积的 46%; 中下游主要为农业用地和居民用地, 耕地占流域总面积的 51% 左右; 居民用地与未利用地扩张率分别为 95.86% 和 434.43%。自然情景下, 流域径流变化率小于 5%, 侵蚀产沙变化率小于 15%。(2) SWAT 模型在涪江流域具有较强的适用性, 径流率定期和验证期的 R^2 和 NSE 分别为 0.86, 0.85; 0.80, 0.78, 泥沙分别为 0.68, 0.67; 0.68, 0.43。情景模拟分析得出具体土地利用类型对径流的影响程度: 林地 > 草地 > 未利用地, 相对于基准期, 林地覆被情景减少了 35.66% 的产流量。对流域侵蚀产沙的影响程度: 未利用地 > 林地 > 草地, 未利用地情景下增加了 56.74% 的侵蚀产沙量, 林地和草地情景分别减少了 43.57% 和 30.04%。(3) 基于随机森林算法的自变量影响程度重要性排序结果表明: 影响产流量的前 3 个土地利用类型是耕地、林地、草地, 权重系数分别为 2.057, 2.030, 1.148; 影响侵蚀产沙量的是草地、耕地、林地, 权重系数分别为 1.753, 1.208, 1.003。[结论] 除耕地外, 径流对林地变化的响应最显著, 侵蚀产沙量对草地变化的响应最显著, 当土地利用类型向林草地转化时, 对流域具有显著减水减沙效果。该研究可为涪江流域未来土地利用结构优化和水土资源的合理规划提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; SWAT 模型; 情景分析; 随机森林算法; 涪江流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0079-11

Response of Runoff and Sediment Yields to Land Use Change in Fu River Watershed Based on SWAT Model

Liu Xueyan¹, Zhang Huilan^{1,2}, Luo Zeyu¹, Zhang Jiaqi¹, An Ni¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Chongqing 400711, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to quantitatively analyze the response of runoff and sediment yields to land use change in Fu River Watershed, and to provide scientific evidences for the planning and management of water and soil resources and ecological construction in the river basins. [Methods] The SWAT distributed hydrological model was applied. Three natural scenarios and three extreme scenarios were set up to qualify the variation of land use change during 1990 and 2010 and corresponding contribution rates to watershed runoff and sediment discharge. [Results] (1) From 1999 to 2010, the upper reaches of the watershed was dominated by woodland and grassland, comprising approximately 46% of the total watershed area. The middle and lower reaches of the watershed were primarily composed of agricultural and urban areas, with cultivated land accounting for approximately 51% of the total area. As a result of rapid urbanization, urban land and bare land expanded significantly at rates of 95.86% and 434.43%, respectively.

收稿日期: 2023-05-30

修回日期: 2023-07-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(52279056); “十四五”重点研发项目(2022YFF130009505)

第一作者: 刘雪妍(2000—), 女, 山东泰安人, 硕士, 主要从事流域水文研究。E-mail: lxylxueyan666@163.com

通信作者: 张会兰(1984—), 女, 河北保定人, 博士, 教授, 主要从事气候变化、流域水文和水沙动力过程研究。E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

Under the natural scenarios, the change rate of water yield was less than 5%, and the change rate of sediment yield is less than 15%. (2) SWAT model had strong applicability in Fu River Watershed, the R^2 and NSE values for runoff at calibration and verification periods were 0.86, 0.85 and 0.80, 0.78, respectively, and for sediment discharge were 0.68, 0.67 and 0.68, 0.43, respectively. Scenario simulation analyses illustrated the effects of specific land use types on runoff decreased in the order: woodland > grassland > bare land. Compared with the base period, the woodland cover scenario reduced runoff by 35.66%. Impact of different land use types on sediment yields decreased in the order: bare land > woodland > grassland. Compared with the base period, the bare land scenario increased the sediment yield by 56.74%, and the woodland and grassland decreased sediment yield by 43.57% and 30.04%, respectively. (3) The importance ranking results of independent variables based on random forest algorithm showed that the first three land use types affecting runoff were farmland, woodland and grassland, and the random forest weights were 2.057, 2.030 and 1.148, respectively, while grassland, farmland and woodland affected sediment yield most significantly and the random forest weights were 1.753, 1.208 and 1.003, respectively. [Conclusion] In addition to farmland, the response of runoff to forestland change is the most significant, and the response of erosion and sediment yield to grassland change is the most significant. The conversion of land use type to grassland and woodland significantly reduces water and sediment yields in the basin, while the bare land has a significant impact on sediment yield in the watershed. This research can provide scientific basis for future land use structure optimization and rational planning of water and soil resources in the Fu River Watershed.

Keywords: land use change; SWAT model; scenario analysis; Random Forest; Fu River Watershed

土地利用变化是全球环境变化的重要组成部分^[1],是自然变化与人类活动共同作用下导致的下垫面变化,显著影响流域的生态经济等多方面发展^[2]。土地利用/覆被变化直接影响了流域下垫面粗糙度、植被覆盖率和土壤渗透特性,进而显著影响了流域产流汇流机制、水循环过程与分布^[3]。气候变化影响了土地覆被变化,且土地利用变化又作为人类活动影响生态环境的最直接表现形式^[4-6],故分析土地利用/覆被变化已成为突破气候变化和人类活动之间复杂相互作用的关键因素^[7]。随着人类活动对土地利用作用强度的增加,大量的自然土地已经发生转化^[8],不合理的土地利用方式会导致流域范围内土地利用结构和格局发生显著变化,进而引发流域水土流失等多种生态环境恶化问题。因此研究流域水沙对土地利用变化的响应情况,对流域水资源和水土保持工作的管理、规划与可持续发展具有重要意义^[9]。

国内外学者针对流域土地利用/覆被变化对水文过程影响的研究方法大概归结为试验流域法、水文特征参数时间序列法和流域水文模型模拟法 3 类^[10]。试验流域法可以揭示流域植被—土壤—大气作用机理,但很难应用于中大型流域,即使是相似的小流域也可能在不同阶段发生显著变化^[11],且结果不能外推到其他流域^[12]。水文特征参数时间序列法即分析长时间段上反映土地利用/覆被水文响应的特征参数的变化趋势^[13],但无法体现流域的空间异质性且受多种因素的综合影响。水文模型可以概念化气候变

化、土地利用变化和水循环之间的关系。SWAT 模型被认为是评估具有不同土地利用、土壤和管理条件的流域水、沙和养分响应的最合适模型之一^[14]。

涪江流域是长江上游的多沙区,耕地面积占比大、人类活动频繁^[15]。频繁的农业耕作活动导致了流域地表形态改变和区域性生态环境变化^[16]。在近几十年来城镇化迅速发展的背景下,流域下垫面条件和流域范围内的产流产沙过程发生了改变^[17]。然而现有的研究大多从气候变化和土地利用变化综合影响的角度进行分析,对具体土地利用类型变化下的水沙响应的量化分析较少。因此,以单一土地利用类型变化情况设定极端情景,定量评价土地利用类型对流域水产沙的影响是科学开展及调整流域治理的重要基础和前提。本研究以涪江流域为研究对象,基于 SWAT 模型构建 6 种自然及极端情景,定量分析流域历史自然时期和极端情境下的水沙在时空尺度上的分布以及对土地利用变化的响应,以量化不同土地利用类型影响程度的重要性,以期为涪江流域水土资源管理保护和生态建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

涪江为长江二级支流,是一级支流嘉陵江右岸的最大支流,发源于四川省黄龙乡岷山雪宝顶^[18],集水面积约为 36 400 km²^[19],流域出口控制站为小河坝水文站。流域地跨 103.73°—106.27°E,29.30°—33.05°N,在三

峡大坝的上游,平均比降约为 0.8%。流域高程最高可达 5 465 m,地质条件复杂,最低点高程仅 221 m,地下水污染、土地退化等环境问题严重^[20]。流域属亚热带湿润气候,降雨时空差异大,且汛期降雨集中,洪涝灾害频繁。涪江流域上游山区有较为完整的植被垂直带,中下游耕地面积占 50%以上。涪江是长江上游三峡库区径流、泥沙的主要来源地之一。图 1 为涪江流域地理位置、气象站和流域出口水文站示意图。

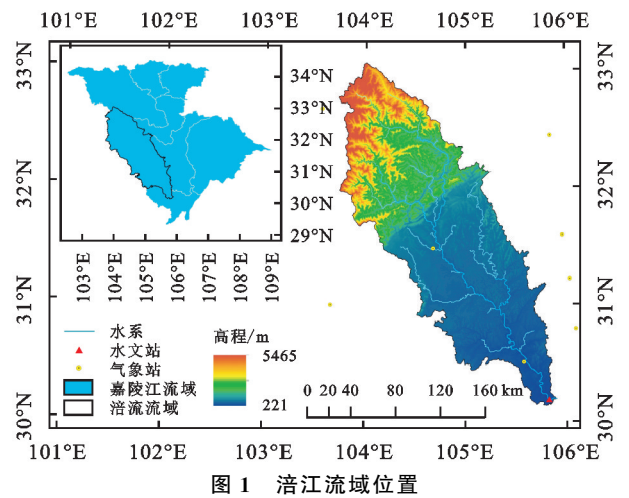


图 1 涪江流域位置

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源 本研究所用水文数据来源于小河坝水文站,是国家基本水文站,一类精度流量站和二类精度泥沙站^[21],是涪江流域的主要控制站。流域周边以及内部 20 个气象站点的 1960—2015 年的逐日降水数据资料来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 90 m,然后重采样至 250 m(图 1)。土地利用来源于中国科学院资源环境科学数据中心资源环境数据云平台 1 km 数据,重采样至 250 m。1 km 的土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)v1.2。

1.2.2 SWAT 水文模型

(1) 模型建模。基于所收集的 SWAT 模型的输入数据,利用 ArcGIS 10.2 软件的 ArcSWAT 平台建立涪江流域的物理计算模型。根据流域数字高程模型(DEM)来获取流域坡度坡向、流向流量、生成河网,确定流域出口,计算子流域。设定集水面积阈值为 10 000 hm²,生成 148 个子流域。加载涪江流域土地利用、土壤及坡度数据将子流域细分为水文响应单元(HRUs),其中划分坡度等级的依据来源于孟铖铖的研究^[22]。由于本文探究的是流域水沙对土地利用变化的响应,故设置土地利用阈值为 0,最后整个流域被划分为 5 634 个水文响应单元。在模型界面逐一输

入气象数据,预热期设置为 2 a,执行 Run SWAT 程序。在设置中分别设定率定期及验证期模拟的开始与结束时间。

(2) 参数的率定与验证。由于 SWAT 模型的模拟值与实测值之间会有较大的误差,所以还需在模型率定和验证前执行参数敏感性分析工作,筛选出对模型模拟结果影响较大的参数,多次调整其取值以减少偏差程度,提高模型的适用性^[23]。采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型进行参数敏感性分析,根据每个参数的统计量 *t*-State 值与显著性指标 *p*-State 值衡量研究区径流、泥沙参数的敏感性。*t*-State 值的绝对值越大,代表该参数越敏感;*p*-State 值越小,参数敏感性程度越显著。参数值率定初始取值范围采用 SWAT-CUP 给出的参考取值范围,经过 SUFI-2 算法多次迭代计算,对参数取值范围进行修正缩小,直到达到预期目标,最终得到参数最优值。然后输入验证期月径流、泥沙数据进行验证。本文采用决定系数(*R*²)、纳什效率系数(NSE)和百分比偏差(PBIAS)作为评价指标,判定模型的适用性。一般来说当 *R*² > 0.85, 0.75 < NSE ≤ 1.00 时,模型模拟效果极好; *R*² > 0.5, NSE > 0.5 时,模型模拟即为满意结果。

1.2.3 情景设定 本研究为定量分析 1990—2010 年近 20 年来水沙对土地利用变化的响应以及具体土地利用类型变化对径流泥沙的影响重要性排序,故而采用极端土地利用情景模拟的方法(表 1)。将 1990 年土地利用现状数据设置为基准期(S1),在此基础上设置草地覆被情景(S2)、林地覆被情景(S3)和未利用地覆被情景(S4)3 种极端情景,设置 1990 年(S1 基准期),2000 年(S5),2010 年(S6)的实际土地利用为 3 种自然情景,进而量化草地、林地和未利用地对流域产流产沙的影响。

表 1 模型情景设定
Table 1 Different scenarios setting in the model

情景	模型设置
基准期情景(S1)	1990 年土地利用
草地覆被情景(S2)	以 S1 为基础,只将所有耕地设置为草地
林地覆被情景(S3)	以 S1 为基础,只将所有耕地设置为林地
未利用地覆被情景(S4)	以 S1 为基础,只将所有耕地设置为未利用地
2000 年自然情景(S5)	2000 年土地利用
2010 年自然情景(S6)	2010 年土地利用

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型适用性评价

2.1.1 参数敏感性分析 本文使用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI2 算法分析参数,分析结果采用显著性指标 *p*(*p*-value)值和统计量 *t*(*t*-State)值进行评价,

p 值越接近于 0, t 值的绝对值越大, 则参数越敏感。本研究选取了 22 个敏感性参数进行模型率定, 对径流和泥沙参数敏感性进行排名和综合分析, 筛选出参数敏感性排名较高的参数。表 2 列出了径流模拟敏感性排名前 10 的参数以及泥沙模拟敏感性排名前 8 的参数。R_CN2 是对流域径流模拟最为敏感的参数, 反映了降雨前期流域特征, CN 是 SCS 径流曲线系数, 在他人研究中也证明是 SWAT 模型模拟径流中最为敏感的参数^[24]。饱和和渗透系数 SOL_K、气温直减率 TLAPS、地下水的时间延迟 GW_DELAY、深层地下水再蒸发系数 REVAPMN 和土壤蒸发补偿系数 ESCO 等参数对径流模拟也很敏感。平均坡长 SLSUBBSN、平均坡度 HRU_SLP, 6 月 21 日的融雪因子 SMFMX、河道侵蚀因子 CH_COV2, 河道覆盖因子 CH_COV1, 泥沙输移指数参数 SPEXP、泥沙输移线性参数 SPCON 和水土保持措施因子 USLE_P 为对流域泥沙模拟较为敏感的参数。

2.1.2 模型模拟结果与分析 本研究依据小河坝水文站月径流、泥沙实测数据对 SWAT 模型进行率定验证。设置 1981—1982 年为预热期, 以 1983—1993 年为模型的率定期, 1994—1999 年为模型的验证期。将 SWAT -CUP 软件率定的 22 个敏感性参数最优值代入 SWAT 模型得到月径流、泥沙最优模拟结果。图 2 与图 3 表明涪江流域实测值和模拟值曲线的拟合程度和峰值对应情况有较好的一致性。但对一些实测值偏大

的点, 拟合效果就比较差。由表 3 可知, 对于径流模拟, 在率定期 R^2 , NSE 和 PBIAS 指标的值分别是 0.86, 0.85, -0.1% , 验证期 R^2 , NSE 和 PBIAS 指标的值分别是 0.80, 0.78, 8.0% , 且其 p -factor 和 r -factor 值均为 0.87, 0.92, 在模型不确定性方面满足要求。对于产沙模拟, 在率定期 R^2 , NSE 和 PBIAS 指标的值分别是 0.68, 0.67, -16.1% , 而在验证期分别为 0.68, 0.43, 23.4% 。这是由于流域的实测数据有限, 且在验证期期间的数据较少、极端值较多导致的指标不高。综上, SWAT 模型能有效模拟涪江流域的水沙趋势, 模型在涪江流域具有较强的适用性。

表 2 涪江径流泥沙模拟敏感参数最佳值

Table 2 Sensitive parameters for streamflow and sediment in Fu River Watershed

敏感性 排序	径流敏感 参数名称	最优值	泥沙敏感 参数名称	最优值
1	R_CN2.mgt	0.6023	R_SLSUBBSN.hru	0.1011
2	R_SOL_K(.,).sol	-0.3809	R_HRU_SLP.hru	0.1828
3	R_TLAPS.sub	-0.8550	V_SMFMX.bsn	16.3383
4	V_GW_DELAY.gw	270.4541	V_CH_COV2.rte	0.4402
5	V_REVAPMN.gw	433.9869	V_CH_COV1.rte	0.2575
6	V_ESCO.hru	0.5815	V_SPEXP.bsn	1.2399
7	V_GWQMN.gw	2667.5854	V_SPCON.bsn	0.0004
8	V_CH_COV2.rte	0.4402	V_USLE_P.mgt	0.6581
9	V_ALPHA_BNK.rte	0.1366	—	—
10	V_SPEXP.bsn	1.2399	—	—

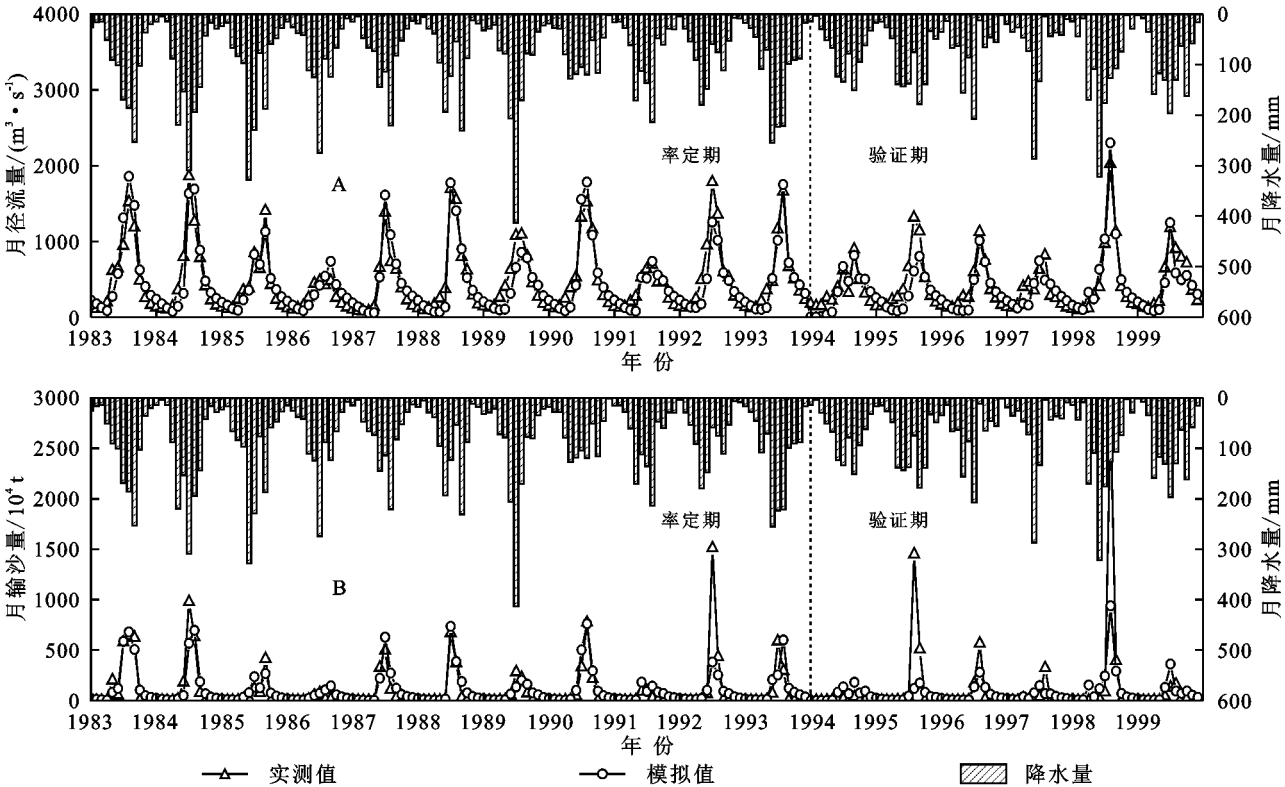


图 2 涪江流域 SWAT 模型的率定与验证

Fig. 2 Calibration and validation of SWAT model in Fu River Watershed

表 3 涪江流域 SWAT 模型月径流、泥沙校准与验证模拟结果

校准期/验证期	R^2	NSE	PBIAS/%	p -factor/%	r -factor
径流率定期(1983—1993)	0.86	0.85	−0.1	87	0.92
径流验证期(1994—1999)	0.80	0.78	8.0	—	—
泥沙率定期(1983—1993)	0.68	0.67	−16.1	17	0.34
泥沙验证期(1994—1999)	0.68	0.43	23.4	—	—

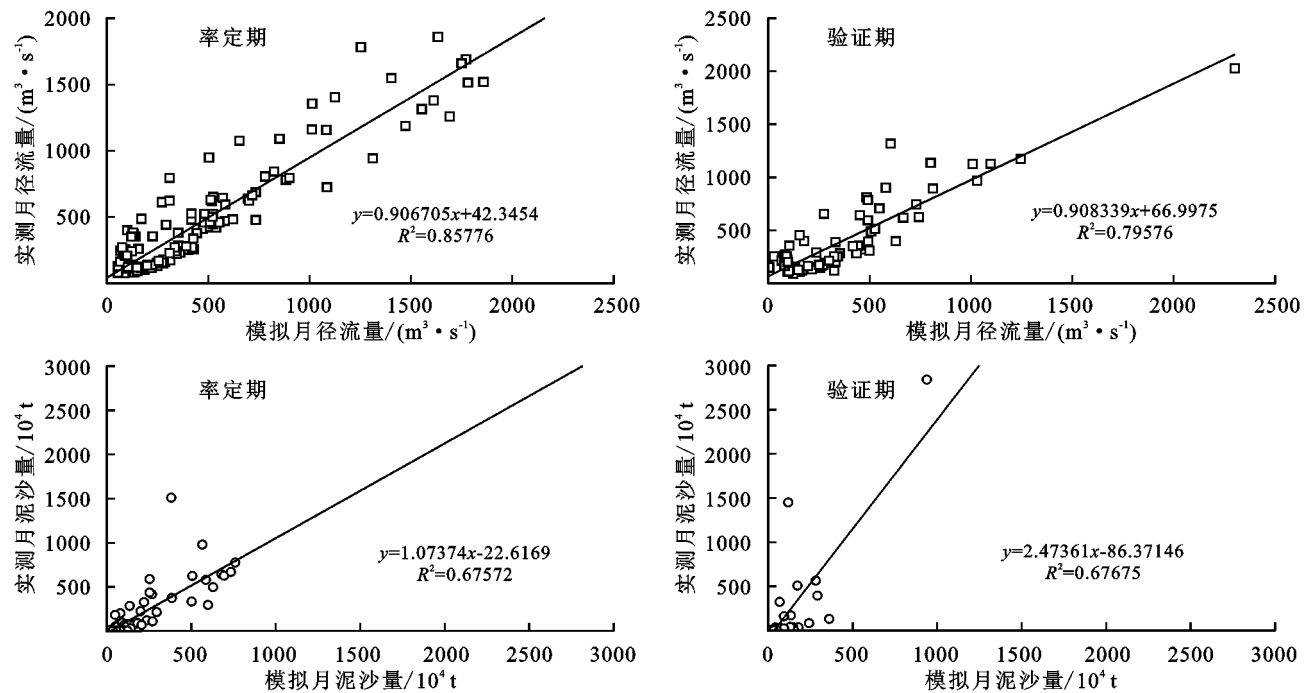


图 3 小河坝水文站实测值与模拟值散点拟合

Fig. 3 Scatter fitting of the observation data and simulation data in Xiaohaba hydrological Station

2.2 土地利用变化分析

2.2.1 历史时期土地利用变化 采用 1990 年、2000 年、2010 年的 6 类一级土地利用现状图代表土地利用变化情况(图 4)。表 4 列出了 1990—2010 年期间涪江流域的土地利用类型变化情况。1999—2010 年,涪江流域上游主要为林草地,约占流域总面积的 46%,其中草地主要分布在林地的边缘;中下游为农业用地和城镇、居民用地的主要分布区,主要沿河道两侧分布,其中耕地面积占流域总面积的 51%左右。涪江流域整体土地利用比例与分布未发生显著改变,耕地、林地和水域面积分别减少 1.04%,6.28%,3.23%;草地面积增加 15.02%;居民用地与未利用地扩张明显,分别为 95.86%和 434.43%,这与涪江沿岸城市经济发展以及迅速城市化有关,其中 1990—2000 年居民用地扩张了 52.68%,未利用地在 2000—2010 年剧烈扩张了 372.72%。由此可知涪江流域内实行了颇有成效的林地还草工程,但是局部地区仍存在着城镇化、工业化和森林砍伐等人类活动导致的林草地破坏以及未利用地扩张现象。

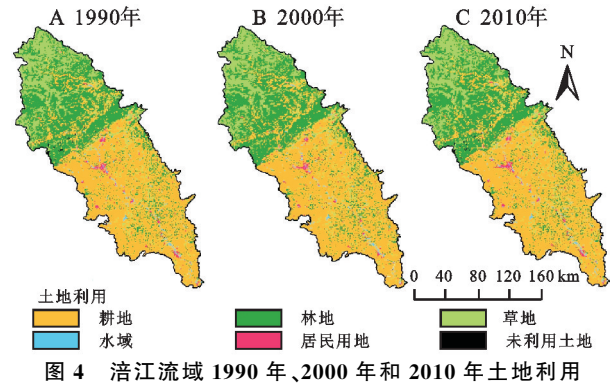


图 4 涪江流域 1990 年、2000 年和 2010 年土地利用

Fig. 4 Land use of Fu River Watershed in 1990, 2000 and 2010

2.2.2 极端变化情景下土地利用变化 土地利用/覆被的变化对流域水循环过程会产生重要的影响。国内外研究者们为了探索不同土地利用/覆被下的水沙变化,大多采用极端情景模拟法模拟,同时结合土地利用类型的变化分布来减少水文过程中单一因素的作用。

本研究基于 SWAT 模型,保持基准期情景(S1) 1990 年的土地利用/覆被情况不变,如表 5 所示,设置将全部耕地转化为草地的草地覆被情景(S2),该

情况下的模拟区域草地覆盖率为 64.36%，与基准期差值为草地引起的流域水沙变化量；设置将全部耕地转化为林地的林地覆被情景(S3)，该情况下的模拟区域林地覆盖率为 85.22%，与基准期差值为林地引

起的水沙变化量；设置将全部耕地转化为未利用地的未利用地覆被情景(S4)，该情况下的模拟区域未利用地覆盖率为 51.49%，与基准期差值为未利用地引起的流域水沙变化量。

表 4 涪江流域 1990—2010 年土地利用变化对比

Table 4 Comparison of land use in Fu River Watershed from 1990 to 2010

土地利用 类型	面积/km ²			1999—2000 年	2000—2010 年	1999—2010 年
	1990 年	2000 年	2010 年	变化率/%	变化率/%	变化率/%
耕地	18729.85	18732.84	18534.63	0.02	—1.06	—1.04
林地	12290.51	11481.80	11518.80	—6.58	0.32	—6.28
草地	4697.67	5392.96	5403.30	14.80	0.19	15.02
水域	443.66	434.09	429.33	—2.16	—1.10	—3.23
居民用地	224.36	342.55	439.44	52.68	28.28	95.86
未利用地	13.94	15.76	74.5	13.06	372.72	434.43

表 5 涪江流域不同情景下土地利用类型占比

Table 5 The proportion of land use types in different scenarios in Fu River Watershed

情景	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用地
S1	51.46	33.77	12.91	1.22	0.62	0.04
S2	—	33.77	64.36	1.22	0.62	0.04
S3	—	85.22	12.91	1.22	0.62	0.04
S4	—	33.77	12.91	1.22	0.62	51.49

2.3 径流对土地利用变化的响应

2.3.1 空间尺度 全流域的年均产流量结果如表 6 所示。在基准期(S1)，涪江流域年平均产流为 484.29 mm。在草地覆被情景(S2)下，流域年均产流为 387.47 mm，相比基期减少了 19.99%(96.82 mm)；林地覆被情景(S3)下，年均产流为 311.60 mm，相比基期减少了 35.66%(172.69 mm)；未利用地覆被情景(S4)的年均产流较基期差别不大。3 种极端土地利用情景对产流量的影响：S3>S2>S4，且自然情景下流域产流情况几乎没有产生变化。

表 6 涪江流域不同情景下流域年均产流情况

Table 6 Water yield change under different scenarios in Fu River Watershed

情景	土地利用 年份	平均值/ mm	变化/ mm	百分比/ %
S1	1990	484.29	—	—
S2	1990	387.47	—96.82	—19.99
S3	1990	311.60	—172.69	—35.66
S4	1990	486.30	2.01	0.42
S5	2000	487.96	3.67	0.76
S6	2010	485.42	1.13	0.23

图 5 反映了空间尺度下不同极端情景的产流量变化情况。基准期情景(S1)、草地覆被情景(S2)、林地覆被情景(S3)和未利用地覆被情景(S4)下的产流量均在 0~700 mm 范围内，空间内呈现中下游多，上游少的趋势。基准期情景的产流量大部分处于

400~700 mm 范围内，流域上游北部的坡度较高，降雨侵蚀力起主导作用，从而导致产流量增加。中下游大部分为耕地，由于农耕区地表覆被面积较小且不能有效缓冲降雨侵蚀力，截流雨水及地表径流，且长期耕作会破坏土壤结构，减弱了蓄水能力，从而产生较多径流。草地覆被情景和林地覆被情景的产流量空间变化大体一致，多数子流域处于 400~500 mm 范围内，林地覆被情景在下游径流量不超过 500 mm。流域中下游地区林地覆被还草后，耕地全部转化为林草地后，拦水拦沙能力变强，因而产流量大大减少，且林地覆被情景的产流量总体低于草地覆被情景。未利用地覆被情景与基准期情景相比，产流量空间分布变化大体一致，变化率仅在 1%左右。

图 6 表示了草地覆被情景(S2)、林地覆被情景(S3)和未利用地覆被情景(S4)与基准期情景(S1)产流量之间的变化率。草地覆被情景和林地覆被情景变化趋势一致，整体的产流量小于基准期情景。其中 S2 情景下流域中游地区径流减少量最高达到 73%；S3 情景下最高减少 85%。南部大部分地区减少 10%~50%。未利用地覆被情景总体产流量变化率仅 1%，且呈现上升趋势，增加量为 2 mm。

2.3.2 时间尺度 在不同土地利用情景下，流域总产流量在季节变化结构上呈现一致性，年内分配极不均衡，均为夏季多，冬季少，四季存在明显差异(图 7)。因此研究径流在年内分布的结构与变化是很有

必要的。模型情景模拟得到草地覆被(S2)、林地覆被(S3)、未利用土地型(S4)3 种极端土地利用情景下的月径流过程,整体上季均产流量为:未利用土地覆被(S4)>草地覆被(S2)>林地覆被(S3),且在夏季变化最大。在 2000 年、2010 年的自然情景下变化量

很小,而极端情景下耕地转化为林草地显著减少了流域产流量。草地、林地使地面粗糙率增加,增加入渗,涵养水分,有效地阻挡和抑制了地表径流的产生和流动,而耕地和未利用地地表覆盖率低且非作物生长季地板贫瘠,阻水能力差。

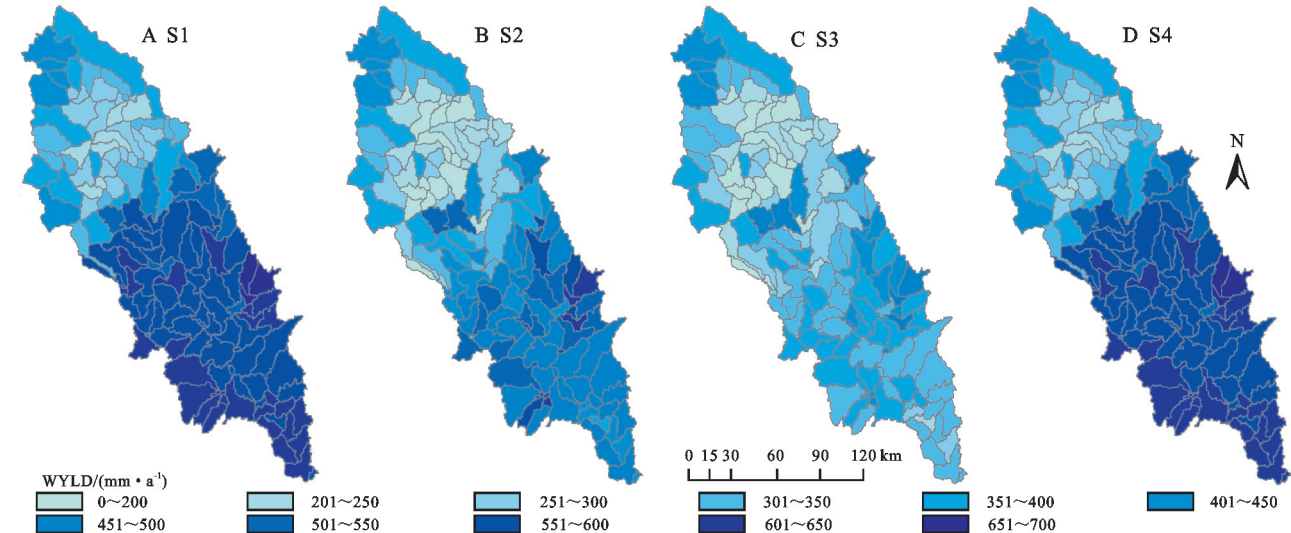


图 5 涪江流域不同情景产流量(WYLD)的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of WYLD under different scenarios in Fu River Watershed

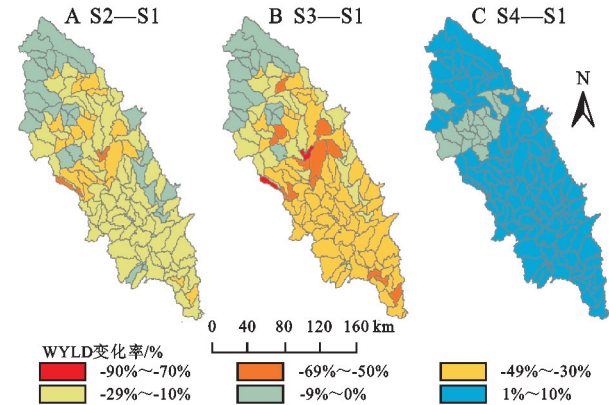


图 6 S2、S3 和 S4 与 S1 产流量变化率

Fig. 6 Water yield differences between S2, S3, S4 and S1

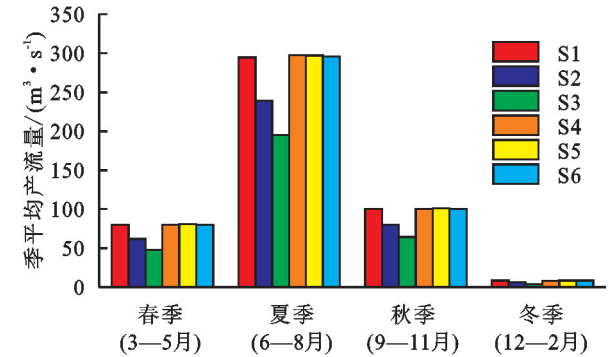


图 7 不同情景下多年季平均产流量分布

Fig. 7 The distributions of multi-year quarterly average WYLD under different scenarios

2.4 侵蚀产沙对土地利用变化的响应

2.4.1 空间尺度 全流域 6 种情景下的年均侵蚀产

沙量如表 7 所示。在基准期(S1),涪江流域年平均侵蚀产沙量为 84.01 t/hm²。在草地覆被情景(S2)下,流域年均侵蚀产沙量为 58.78 t/hm²,相比基期减少了 30.04%(25.24 t/hm²);林地覆被情景(S3)下,年均侵蚀产沙量为 47.41 t/hm²,相比基期减少了 43.57%(36.6 t/hm²);未利用地覆被情景(S4)的年均侵蚀产沙量较基期显著增加了 56.74%(47.67 t/hm²)。3 种极端土地利用情景对侵蚀产沙量的影响:S4>S3>S2,未利用土地面积的大幅度增加对流域泥沙产生了显著增加影响。综上所述,土地利用类型间的转化对流域侵蚀产沙量的影响大于对产流量的影响。

表 7 涪江流域不同情景下流域年均侵蚀产沙情况

Table 7 Sediment yield change under different snenarios in Fu River Watershed

情景	土地利用 年份	平均值/ (t·hm ⁻²)	变化/ (t·hm ⁻²)	百分比/ %
S1	1990	84.01	—	—
S2	1990	58.78	—25.24	—30.04
S3	1990	47.41	—36.60	—43.57
S4	1990	131.68	47.67	56.74
S5	2000	92.72	8.71	10.36
S6	2010	94.28	10.27	12.23

图 8 反映了空间尺度下不同极端情景的流域侵蚀产沙量分布情况。基准期情景(S1)、草地覆被情景(S2)、林地覆被情景(S3)和未利用地覆被情景(S4)下的侵蚀产沙量均在 0~700 t/hm² 范围内。基

准期情景的侵蚀产沙量空间尺度内的变化均在 $1 \sim 25 \text{ t/hm}^2$ 范围内,流域上游的侵蚀产沙量明显高于中下游,大部分处于 $500 \sim 679 \text{ t/hm}^2$ 范围内。上游侵蚀产沙最多的子流域相比其他子流域植被覆盖度较低且坡度较高,土壤粗砂含量较高,土体破碎,易产生土壤侵蚀,从而导致侵蚀产沙量的增加。草地覆被情景和林地覆被情景的侵蚀产沙量空间变化大致相

似,同样也呈现下游侵蚀产沙量的减少以及上游高侵蚀产沙量的现状未改变的分布特征。其中较为明显的是流域中下游区实施退耕后的侵蚀产沙量明显减少。未利用地覆被情景的侵蚀产沙量与其他情景相比明显增大。这是由于未利用地无植被覆盖导致侵蚀产沙量剧增。流域 73% 的子流域较基准期均呈现 100% 以上的增加趋势。

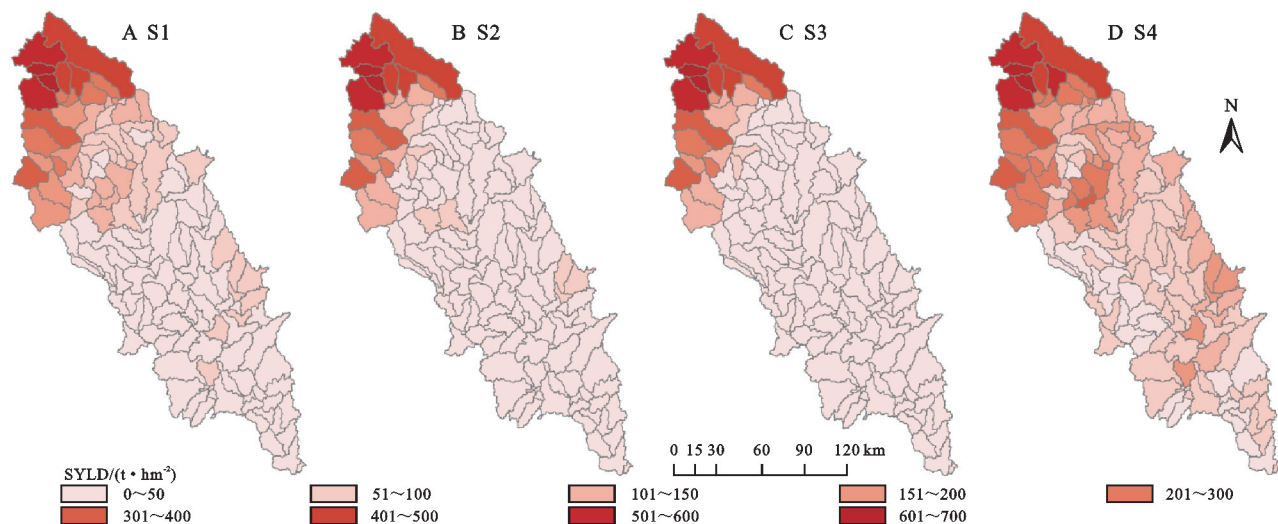


图 8 涪江流域不同情景侵蚀产沙量(SYLD)的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of SYLD under different scenarios in Fu River Watershed

草地覆被情景(S2)、林地覆被情景(S3)和未利用地覆被情景(S4)与基准期情景(S1)流域侵蚀产沙量的变化率如图 9 所示。草地覆被情景总体侵蚀产沙量变化在 30.04%,除了个别子流域侵蚀产沙量不变外,大部分均为大幅度减少。林地覆被情景下的流域总体侵蚀产沙量最低,整体减少了 43.57%,变化率在空间上呈现北部小于南部,上游小于中下游的趋势,绝大部分区域侵蚀产沙率减少在 80% 以上。未利用地覆被情景(S4)侵蚀状况最为严重,与基准期情景相比,S4 整体均呈增加趋势,增加变化率达到 56.74%。最高达到 234%,多数子流域变化率处于 100%~200% 区间,为剧烈侵蚀区。

2.4.2 时间尺度 图 10 显示,在不同土地利用情景下,流域总侵蚀产沙量的季节变化结构规律与产流量呈现一致性,均为春夏季多,秋冬季少,且四季存在明显差异。整体上季均侵蚀产沙量为:未利用土地覆被(S4)>草地覆被(S2)>林地覆被(S3),春季和夏季变化最大。2000 年、2010 年自然情景下侵蚀产沙量略微增加,草地覆被情景与林地覆被情景下流域侵蚀产沙量大幅度减少。林草地可以增加流域下垫面的粗糙度从而固结表土,减轻土壤侵蚀,而耕地、未利用地地表的覆盖度低,无法起到阻沙作用,易造成侵蚀量显著增加。

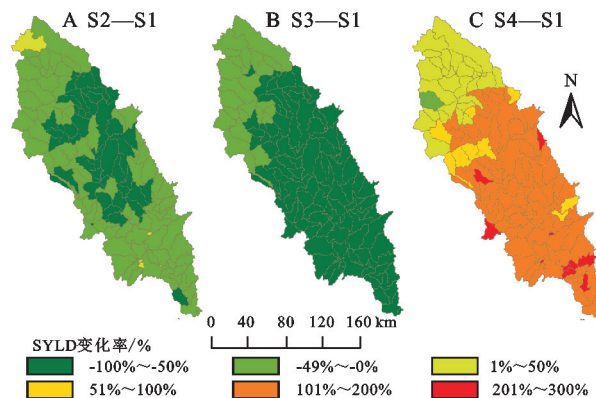


图 9 S2(A)、S3(B)和 S4(C)与 S1 侵蚀产沙量变化率

Fig. 9 Sediment yield differences between

S2(A), S3(B), S4(C) and S1

2.5 基于随机森林算法(RF)的不同土地利用类型对流域水沙影响的相对重要性排序

随机森林模型由分类回归决策树集成,是一种用于分类与回归的现代技术。具有易于使用等优点,越来越广泛地应用于水文学领域^[25]。引起流域径流量和侵蚀产沙量变化的主要影响因素为气候和下垫面因素,下垫面因素主要包括土地利用/覆被情况等,同时也与人类活动密切相关。因此难以直接得出土地利用对流域水沙的影响,但分析其相关性是可行的。故本研究采用随机森林算法(RF)来量化不同土地利用类型对产流量和侵蚀产沙量的影响。以 6 种土地

利用类型作为自变量,预测产流量和侵蚀产沙量的相对重要性排序结果如图 11 所示,与前文情景模拟结果基本一致。影响产流量的前 3 个土地利用类型是耕地、林地、草地,其相对重要性权重系数分别为 2.057,2.030,1.148;影响侵蚀产沙量的前 3 个土地利用类型是草地、耕地、林地,其相对重要性权重系数分别为 1.753,1.208,1.003(表 8)。

3 讨论

SWAT 模型在涪江流域具有较好的适用性。径流曲线系数 R_CN2,饱和渗透系数 SOL_K 和气温直减率 TLAPS 这 3 个参数对涪江流域径流模拟最为敏感;对于泥沙模拟最为敏感的 3 个参数为平均坡长 SLSUBBSN、平均坡度 HRU_SLP 和 6 月 21 日的融雪因子 SMFMX。有研究表明,R_CN2 值反映了流域的土壤类型、土地利用类型和土壤湿润程度以及产流能力,主要受降雨的影响^[26];SOL_K 为饱和渗透系数,影响着土壤含水量,且与径流曲线系数产生交互作用^[27],从而影响流域产流过程。对于泥沙模拟,

HRU_SLP 反映了流域平均坡度等级,其值会影响地表水文过程^[28]。涪江流域上游地形以山体为主,中下游为较为平缓的丘陵,整体坡度的空间异质性较大,故坡长和坡度参数对流域侵蚀产沙具有较大的影响。本研究表明,涪江流域后续的水土保持工作和土地规划管理应对流域的土壤性质、坡度、坡长等方面重点关注。

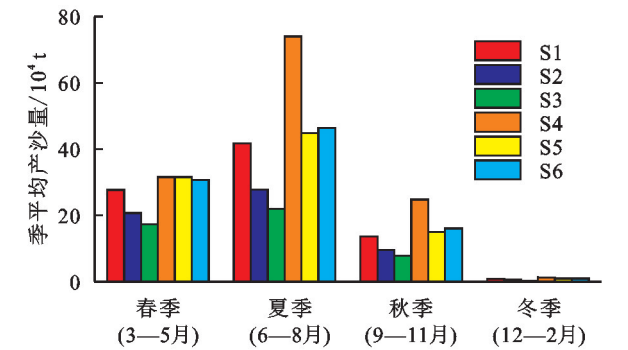


图 10 不同情景下多年季平均侵蚀产沙量分布
Fig. 10 The distributions of multi-year quarterly average SYLD under different scenarios

表 8 各土地利用类型对产流、侵蚀产沙影响的相对重要性权重系数

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用地
产流量	2.057	2.030	1.148	0.931	0.930	0.029
侵蚀产沙量	1.208	1.003	1.753	0.590	0.620	0.032

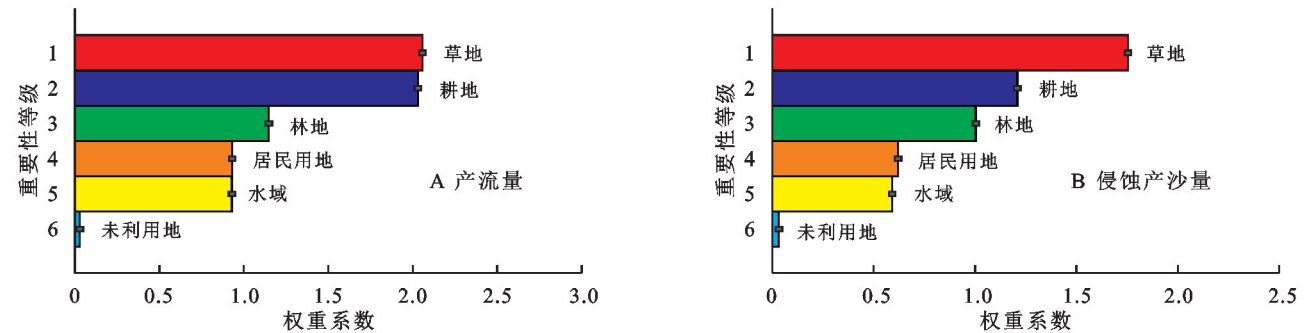


图 11 各土地利用类型对产流量、侵蚀产沙量影响程度的重要性排序

Fig. 11 The order of importance of the influence of land use types on runoff yield and sediment yield

小河坝站模拟径流在率定期和验证期的 PBIAS 分别为-0.1%和 8.0%，表明模型模拟径流的误差较小,实测值和模拟值拟合较好,且峰值对应较好。模拟泥沙的 PBIAS 结果分别为-16.1%和 23.4%，实测值和模拟值拟合情况基本一致,但对于实测产沙量很大的点,拟合效果较差,且验证期实测数据较少、极端值较多,从而导致指标不高,这一结论与郝佳欣^[29]的研究结果一致。

为探究流域水沙对土地利用变化的响应,本文建立了 SWAT 模型,并设置了 3 种自然情景和 3 种极端情景进行模拟结果对比。结果显示,在林草地覆被情景下产流量、侵蚀产沙量显著减少,而未利用地情

景下产流量与基准期差别不大,但是大幅度增加了流域侵蚀产沙量,这说明耕地与未利用地对径流的截留作用差别不大,但未利用地的挟沙能力要远大于耕地。目前已有许多学者运用 SWAT 模型对流域径流泥沙进行模拟,所得结论与之类似。刘卫林等研究表明^[30],高利用城市用地和耕地会促进修河上游流域的产流,林草地起抑制作用,且草地作用更显著。张晔等^[31]发现渭河中上游流域 40 年间土地利用变化对流域产流的影响小于 10%,且草地比林地抑制产流作用更加显著。王磊等^[32]设置 5 种土地利用变化情景分析了张家口清水河流域土地利用类型对流域径流的影响,发现林草地均具能够有效截留径流,且

林地的作用大于草地,耕地对径流起增加作用。不同的研究区研究结果也具有一定的差异性。

流域水文效应受到土地利用类型、分布等多方面因素制约,且未来土地利用状况变化呈现出复杂化和破碎化趋势^[33]。本文仅考虑流域水沙对单一土地利用类型变化的响应,没有考虑径流泥沙对流域空间异质性、土地利用空间格局变化以及其他人类活动等方面的响应。后续将结合流域的空间异质性等特征,细化研究流域土地利用适宜性配置。

4 结论

(1) 涪江流域上游主要为林草地,占流域面积的45%以上;中下游以农业用地和居民用地为主,耕地面积占50%以上。1999—2010年,耕地、林地和水域面积分别减少1.04%,6.28%,3.23%;草地面积增加15.02%;居民用地与未利用地扩张明显,分别为95.86%和434.43%。

(2) SWAT模型在涪江流域具有较强的适用性。自然情景下,径流变化率小于5%,侵蚀产沙量变化率小于15%。极端土地利用情景模拟基于1990年土地利用现状,结果显示不同土地利用类型对产流量的影响:林地>草地>未利用地,相较于基准期,林地覆被情景减少了35.66%的产流量;对流域侵蚀产沙的影响:未利用地>林地>草地,相较于基准期,未利用地情景增加了56.74%的侵蚀产沙量,林地和草地情景分别减少了43.57%和30.04%,当流域土地利用类型向林草地进行转化时,流域的产水产沙量大幅度减少,且减沙能力大于减水能力。未利用地面积的增加促进了流域产流产沙。

(3) 基于随机森林算法(RF)的自变量影响程度重要性排序,影响产流量的前3个土地利用类型是耕地、林地、草地,其相对重要性权重系数分别为2.057,2.030,1.148;影响侵蚀产沙量的前3个土地利用类型是草地、耕地、林地,其相对重要性权重系数分别为1.753,1.208,1.003,与情景模拟得出结论基本一致。

参考文献(References):

- [1] 徐新良,庄大方,张树文.基于3S技术的土地利用/土地覆盖变化野外采样框架设计:以东北地区黑龙江省为例[J].遥感技术与应用,2002,17(3):135-139,177.
Xu X L, Zhuang D F, Zhang S W. Field sampling design for land-use and land-cover changes based on 3S technology: Taking Heilongjiang Province as an example[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(3):135-139,177.
- [2] 史晓亮,李颖,严登华,等.流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J].水土保持研究,2013,20(4):301-308.

- Shi X L, Li Y, Yan D H, et al. Advances in the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4):301-308.
- [3] 邓慧平.气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究[J].地球科学进展,2001,16(3):436-441.
Deng H P. Impacts of climate change and land use-land cover change on hydrology and water resources [J]. Advance In Earth Sciences, 2001, 16(3):436-441.
- [4] Zhang X, Cao W, Guo Q, et al. Effects of landuse change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau[J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3):283-293.
- [5] Schilling K E, Chan K S, Liu H, et al. Quantifying the effect of land use land cover change on increasing discharge in the upper Mississippi River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3/4):343-345.
- [6] 何剑锋,庄大方.长江三角洲地区城镇时空动态格局及其环境效应[J].地理研究,2006,25(3):388-396,562.
He J F, Zhuang D F. Analysis of the relationship between urban dynamic change pattern of the Yangtze River Delta and the regional eco-environment[J]. Geographical Research, 2006, 25(3):388-396,562.
- [7] 杨久春,张树文.近50年来呼伦湖水系土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J].干旱区资源与环境,2009,23(2):41-46.
Yang J C, Zhang S W. Land use/cover change and its eco-environmental effects in Hulun-Lake Basin during the past 50 Years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(2):41-46.
- [8] Yu W, Zang S, Wu C, et al. Analyzing and modeling land use land cover change(LUCC)in the Daqing City, China[J]. Applied Geography, 2011, 31(2):600-608.
- [9] 付金霞.小理河流域径流泥沙对气候和土地利用变化的响应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
Fu J X. Responses of runoff and sediment load to climate and land use changes in XiaoLihe Watershed[D]. Yangling, Shanxi:Northwest A&F University, 2017.
- [10] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 1982, 55(1/4):3-23.
- [11] Li Z, Liu W, Zhang X, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1):35-42.
- [12] 姚允龙,吕宪国,王蕾.流域土地利用/覆被变化水文效应研究的方法评述[J].湿地科学,2009,7(1):83-88.
Yao Y L, Lu X G, Wang L. A review on study meth-

- ods of effect of land use and cover change on watershed hydrology[J]. *Wetland Science*, 2009,7(1):83-88.
- [13] 张蕾娜,李秀彬.用水文特征参数变化表征人类活动的水文效应初探:以云州水库流域为例[J].*资源科学*, 2004,26(2):62-67.
- Zhang L N, Li X B. Assessing hydrological effects of human activities by hydrological characteristic parameters: A case study in the Yunzhou Reservoir Basin[J]. *Resources Science*, 2004,26(2):62-67.
- [14] Arnold J G, Fohrer N. SWAT2000:current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling[J]. *Hydrological Processes*, 2005,19(3):563-572.
- [15] 郝佳欣,张会兰,王云琦,等.涪江流域径流对气候与土地利用的响应[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(1):15-24.
- Hao J X, Zhang H L, Wang Y Q, et al. Responses of streamflow to climate and land use changes in Fu River Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022,20(1):15-24.
- [16] 赵唯茜.涪江流域土地利用/覆被变化及其生态环境效应研究[D].四川绵阳:绵阳师范学院, 2019.
- Zhao W X. Study on land use/cover change and its Eco-Environmental effects in Fujiang Basin[D]. Mianyang, Sichuan:Mian Yang Teachers'College, 2019.
- [17] 王一然,丁文峰,张冠华.基于 SWAT 模型的涪江流域土地利用变化对径流影响研究[J].*水土保持研究*, 2022,29(4):62-67,74.
- Wang Y R, Ding W F, Zhang G H. Study on the impact of land use change on runoff in danjiang watershed based on SWAT Model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):62-67,74.
- [18] 张雪茂,董廷旭,杜华明,等.基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化[J].*生态学报*, 2021,41(10):3940-3951.
- Zhang X M, Dong T X, Du H M, et al. Optimization of landscape pater in Fujiang River Basin based on landscape ecological risk assessment. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(10):3940-3951.
- [19] 冉宇.基于 SWAT 模型的涪江流域面源污染研究[D].武汉:武汉大学, 2018.
- Ran N. Analysis of non-point Source pollution in Fujiang River Basin based on SWAT Model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [20] 杨顺,黄海,田尤.涪江上游泥石流灾损土地特征及典型流域淤积危险性研究[J].*长江流域资源与环境*, 2017,26(11):1928-1935.
- Yang S, Huang H, Tian Y. Characteristics of debris flow deposition land and the research of the risk evaluation on the Fujiang River upstream[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26 (11): 1928-1935.
- [21] 夏绍钦,张会兰,郝佳欣,等.长江涪江小河坝站水沙关系特性及其驱动因素研究[J].*长江流域资源与环境*, 2021,30(7):1603-1613.
- Xia S Q, Zhang H L, Hao J X, et al. Characteristics of runoff-sediment rating curves and corresponding driving factors at Xiaoheba station on Fu River, Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(7):1603-1613.
- [22] Meng C, Zhang H, Wang Y, et al. Contribution analysis of the spatial-temporal changes in streamflow in a typical elevation transitional watershed of Southwest China over the past six decades[J]. *Forests*, 2019,10 (6):495.
- [23] 张田田,陈有超,李潜,等.土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J].*长江流域资源与环境*, 2022,31(8):1797-1811.
- Zhang T T, Chen Y C, Li Q, et al. Effects of land-use change on the Spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022,31(8): 1797-1811.
- [24] 窦小东,彭启洋,张万诚,等.基于情景分析的 LUCC 和气候变化对南盘江流域径流的影响[J].*灾害学*, 2020, 35(1):84-89.
- Dou X D, Peng Q Y, Zhang W C, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in the Nanpan River Basin based on scenario analysis[J]. *Journal of Catastrophology*, 2020,35(1):84-89.
- [25] 王艺璇,刘夏,沈彦军.随机森林模型在径流变化归因分析中的适用性研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2022,30(5):864-874.
- Wang Y X, Liu X, Shen Y J. Applicability of the random forest model in quantifying the attribution of runoff changes [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(5):864-874.
- [26] 林炳青,陈莹,陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J].*自然资源学报*, 2013,28(11):1988-1999.
- Lin B Q, Chen Y, Chen X W. A study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model[J]. *Journal of Natural Resource*, 2013,28(11):1988-1999.
- [27] 陈君来.延河流域水沙参数同步率定与水土保持措施情景模拟[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2021.
- Chen J L. Synchronous calibration of runoff and sediment parameters and scenario simulation of Soil and Water Conservation Measures in Yanhe River Basin[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

- driving forces in Zhifanggou small watershed in recent 70 years[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(3):13-14.
- [25] 张彩霞, 谢高地, 杨勤科, 等. 黄土丘陵区水土保持服务价值动态变化及评价: 以纸坊沟流域为例(英文)[J]. 自然资源学报, 2008, 23(6): 1035-1043.
- Zhang C X, Xie G D, Yang Q K, et al. Assessment of human activities on soil conservation value in hilly and Gully Region of Loess Plateau: A case study of Zhifanggou watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6): 1035-1043.
- [26] 韩鹏, 司今, 王应刚. 生态服务价值计算方法对比分析: 以黄土丘陵区纸坊沟流域为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(S1): 102-112.
- Han P, Si J, Wang Y G. Contrastive analysis of valuation methods of ecosystem services value: A case study of Zhifanggou watershed in a hilly and Gully Region of Loess Plateau[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(S1): 102-112.
- [27] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8152-8168.
- Yang Y, Dou Y X, Wang Y Q, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical small watersheds of the hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [28] 成思敏, 王继军, 李茂森, 等. 退耕区农户生计策略与农业产业—资源系统耦合机制的演化过程分析: 以纸坊沟流域为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 242-249.
- Cheng S M, Wang J J, Li M S, et al. Analysis on the evolutionary process of farmers' livelihood strategy and the agricultural industry-resources system coupling mechanism in de-farming regions: A case study of Zhifanggou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 242-249.
- [29] 江忠善, 郑粉莉. 纸坊沟流域水土流失综合治理减沙效益评价[J]. 泥沙研究, 2004(2): 56-61.
- Jiang Z S, Zheng F L. Assessment on benefit of sediment reduction by comprehensive controls in the Zhifanggou Watershed[J]. Journal of Sediment Research, 2004(2): 56-61.
- [30] 卢宗凡, 曹清玉, 苏敏. 建设水土保持型生态农业十年巨变: 对黄土丘陵沟壑区农户两次调查结果的分析[J]. 水土保持研究, 1996(02): 116-119.
- Lu Z F, Cao Q Y, Su M. The Huge Change of Ten years about the Construction of the Ecological Agriculture with Soil and Water Conservation: Analysing the two investigations of peasant household in loess hilly and Gully Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996(02): 116-119.

(上接第89页)

- [28] 张发民, 杜兰兰, 袁瀛, 等. 土壤侵蚀和沉积对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 161-167.
- Zhang F M, Du L L, Yuan Y, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil physical and biochemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 161-167.
- [29] 郝佳欣. 涪江流域水沙变化及其对气候和 LULC 变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- Hao J X. Effects of climate and land use and land cover change on streamflow and sediment in Fu River Watershed[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [30] 刘卫林, 李香, 吴滨, 等. 修河中上游流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 111-120.
- Liu W L, L X, Wu B, et al. Impact of land use change on runoff in the middle and upper reaches of Xiuhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 111-120.
- [31] 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 231-237.
- Zhang Y, Hou J M, Gong J H, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River Basin during 1980—2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 231-237.
- [32] 王磊, 刘亭亭, 谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 245-251.
- Wang L, Liu T T, Xie J Z. Study on the effect of different land use scenarios on runoff in Qingshuihe Basin of Zhangjiakou Based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 245-251.
- [33] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江流域土地利用/覆被变化的径流响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 167-175.
- Cao C, Sun R, Wu Z X, et al. Responses of streamflow to land use/cover changes in Nandu River Basin Based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 167-175.