

DOI: 10.20103/j.stxb.202407021542

雷泽鑫, 罗俊杰, 张文正, 高静, 赵旭强. LUCC 多情景模拟下黄土沟壑区流域径流响应规律及其适应性规划对策——以晋西三川河流域为例. 生态学报, 2025, 45(3): 1090-1101.

Lei Z X, Luo J J, Zhang W Z, Gao J, Zhao X Q. Response pattern of watershed runoff in loess gully area under LUCC multi-scenario simulation and its adaptive planning strategy: a case study of Sanchuan River Basin in west of Shanxi province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1090-1101.

LUCC 多情景模拟下黄土沟壑区流域径流响应规律及其适应性规划对策

——以晋西三川河流域为例

雷泽鑫^{1,2}, 罗俊杰^{3,4}, 张文正⁴, 高 静¹, 赵旭强^{2,*}

1 太原理工大学建筑学院, 太原 030024

2 山西省社会科学院(山西省人民政府发展研究中心), 太原 030032

3 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300

4 天津大学建筑学院, 天津 300072

摘要:黄土沟壑区作为黄土高原水土流失的严重区域,其土地利用与土地覆被变化(LUCC)对水土保持和生态修复具有重要影响。以晋西三川河流域为例,运用 SWAT 和 PLUS 模型,从景观格局的宏观视角,设置了流域上中下游极端土地利用、沟谷川地缓冲区土地利用与未来不同形态生态用地共 3 类 70 个 LUCC 情景,模拟多情景下流域径流响应,并提出适应性空间规划对策。研究发现,上游区域以林地作为土地利用主要方式,能够有效减少地表径流、提高水土涵养能力。相比之下,下游区域土地利用类型对流域的产汇流作用影响较小。河道沿线缓冲区的宽度变化对流域产汇流影响明显具有尺度特征,其中河道沿线 400m 和 900m 范围,是重要的尺度范围。此外,生态用地分布形态对径流控制效果有明显差异,其中,线性分布模式年径流量较低,控制效果较好。基于此,提出“流域空间-河谷空间-生态基础设施”三个尺度层级的流域雨洪安全格局构建对策,旨在塑造流域生态安全格局、提高区域可持续发展能力。本研究为黄土沟壑区水土保持、生态保护与社会经济发展的协调统一提供科学依据和实践指导。

关键词:黄土丘陵沟壑区;景观生态规划;水土保持;SWAT 模型;PLUS 模型

Response pattern of watershed runoff in loess gully area under LUCC multi-scenario simulation and its adaptive planning strategy: a case study of Sanchuan River Basin in west of Shanxi Province

LEI Zexin^{1,2}, LUO Junjie^{3,4}, ZHANG Wenzheng⁴, GAO Jing¹, ZHAO Xuqiang^{2,*}

1 College of Architecture, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2 Shanxi Academy of Social Sciences (Shanxi People's Government Development Research Center), Taiyuan 030032, China

3 College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

4 School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: As a serious area of soil erosion in the Loess Plateau, the land use and land cover change (LUCC) in loess gully area has an important impact on soil and water conservation and ecological restoration. Taking the Sanchuan River Basin in west Shanxi province as an example, using the SWAT and PLUS models, a total of 70 LUCC scenarios in three categories,

基金项目:山西省自然科学基金青年项目(202203021222125);“十四五”国家重点研发计划课题(2022YFC3802801)

收稿日期:2024-07-02; **网络出版日期:**2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxuqiang127@163.com

including extreme land use in the upper, middle and lower reaches of the basin, land use in the buffer zone of the gully and river valley, and different forms of ecological land use in the future, were set up from the macroscopic perspective of the landscape pattern, to simulate the response of the basin's runoff under the multiple scenarios, and to propose the adaptive spatial planning countermeasures. It was found that the upstream area is characterized by forested land as the main land use, which can effectively reduce surface runoff and improve soil and water conservation capacity. In contrast, the type of land use in the downstream area has less influence on the role of watershed yielding sinks. The influence of buffer width changes along the river on watershed yield and sink flow is obviously characterized by scale, of which the 400m and 900m ranges along the river, are important scale ranges. In addition, the distribution pattern of ecological land use has obvious differences in runoff control effects, and the annual runoff volume is lower in the linear distribution scenario, which shows better control effects. Based on this, we propose to construct a rainfall safety pattern in the watershed at three scales of "watershed space-valley space-ecological infrastructure", aiming at shaping the ecological safety pattern of the watershed and improving the capacity of sustainable development in the region. This study provides scientific basis and practical guidance for the harmonization of soil and water conservation, ecological protection and socio-economic development in loess gully areas.

Key Words: loess hilly gully area; landscape ecological planning; soil and water conservation; SWAT model; PLUS model

黄土沟壑区是黄土高原地区乃至全国水土流失最严重的区域。人类活动造成的土地利用与土地覆被变化(land use/cover change, LUCC)是该区域水土问题的重要影响因素之一^[1]。已有研究从淤地坝、梯田等水土保持措施应用^[2],大规模植被恢复^[3],不同土地利用的地形变化^[4]以及流域景观^[5-6]等不同尺度下 LUCC 对径流变化的影响做出科学分析解释。然而,近年来的快速城镇化建设导致原有土地覆被类型快速转变为大量的集中建设用地^[7],这给黄土丘陵沟壑区水土保持与生态修复带来新的压力和挑战。值得注意的是,由于受到地形和空间限制,黄土沟壑区大量快速土地转变带来空间冲突,主要发生在河谷、沟谷、沟道坡地等下切川地^[8]。一方面,这些区域紧邻河道用水、相对地势平坦、开阔,排水便捷^[9],在水资源匮乏、平地面积紧张的黄土沟壑区具有明显的建设发展优势。另一方面,多级支状河流冲刷作用下形成“河谷-沟谷-沟道的下切空间系统(以下统称为“沟谷空间”)是流域中重要水陆生态过渡与交错空间^[10]。沟谷空间发生大规模城镇化,城镇边缘越长,导致流域生态本底上的穿孔(perforation)效应日趋明显,在保护生物多样性、过滤污染物、防止水土流失、防风固沙、调控洪水等方面^[9,11]的负面影响越突出;相应地,与自然生境所需的缓冲区(buffer zone)也越大^[11]。因此,基于景观生态学视角,探究流域沟谷空间 LUCC 与径流变化之间关系是黄土沟壑区水土保持与可持续发展的关键切入点。

已有大量研究从景观廊道的视角,探讨河道及其沿线缓冲区尺度特征在涵养水土^[12]、改善城市热环境^[13]、提供物种栖息^[14]等多个方面的生态影响。同时,河流缓冲区规划也成为蓝绿基础设施构建或区域韧性提升的重要内容^[15-16]。然而,针对黄土沟壑区沟谷空间形成的线性缓冲区研究目前仅集中在国土空间规划背景下对于跨省域^[17]、省域^[18]、县域^[19]等不同尺度生态空间廊道识别与划分以及蓝绿耦合理念下城镇乡村人居环境规划^[20-21]等方面。由于处于多学科交叉领域,黄土高原地区沟谷空间生态水文响应及其尺度影响下的量化特征尚未受到广泛关注。目前,水文学领域已将长时段分布式水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)广泛应用于 LUCC 与径流变化规律研究中^[22]。该模型可进行对流域 LUCC 与水量平衡^[23]、水沙响应^[24]等方面的情景模拟和分析。在生态学领域,随着遥感技术与深度学习算法快速发展,CA-MarKov、FLUS、CLUE-S、PLUS 等模型已成熟应用于 LUCC 的变化分析与预测研究中^[25]。这些模型与水文过程^[24]、生态服务价值^[26]、生境演变^[27]等各类模型耦合应用,成为探究土地利用与生态过程响应的主流研究路径。其中,PLUS 模型模拟精度更高,不仅可集成土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子模型(CARS),而且可以实现与 SWAT 模型耦合^[24]。这种跨学科的模式耦合模式可为探究不同 LUCC 模型情景下水文响应规律提

供科学路径,为区域土地利用与规划提供更加合理依据与对策。

沟谷空间对于黄土沟壑区具有重要的空间战略意义,特别是在应对水土保持、生态修复和快速城镇化等多重挑战时。它不仅是水文生态系统的重要组成部分,还是促进区域可持续发展的关键区域。本研究旨在通过多模型耦合方式模拟分析沟谷空间 LUCC 变化情境下径流响应规律,为适应性空间规划提供依据,以实现流域内的水土保持、生态保护与社会经济发展的协调统一。本研究试图回答以下科学问题:1)沟谷川地空间 LUCC 对流域产流过程的尺度响应规律是什么?2)未来不同发展情景下,沟谷川地空间 LUCC 对流域产流过程影响如何?3)基于此,怎样通过适宜性规划兼顾黄土沟壑区发展与生态保护?

1 研究区概况

三川河流域位于山西省吕梁市西部,属于黄土高原中部水土流失最严重的黄土丘陵沟壑区第一副区,是典型的丘陵沟谷流域,流域面积 4161km²(图 1)。三川河流域早在 1980 年就开始了大规模水土保持建设,是中国 8 个最早的水土保持重点治理流域之一。沿沟坡修建梯田、挖鱼鳞坑以及在沟道建设淤地坝等是该区域水土保持工作的主要措施。经过二十多年持续的大规模水土保持,三川河流域的生态环境迎来了较大的改观,为区域发展打下基础。之后十年城镇快速建设则主要集中在流域中游、下游较为开阔的沟谷、河川。可以说,三川河流域的建设与发展是黄土高原丘陵沟壑地区的缩影。以三川河流域为研究对象,探索沟谷空间系统的土地利用变化,对于黄土高原水土治理与城镇建设发展布局具有一定代表性和现实意义。

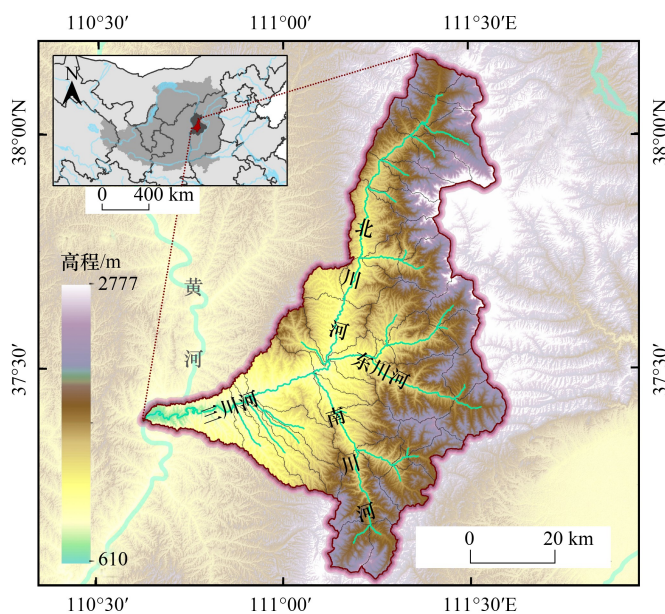


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据获取与处理

研究所需基础数据如图 2 所示。三川河流域 DEM 数据通过国家地理信息公共服务平台 (<http://www.ngcc.cn/ngcc/>) 获取 30m×30m 分辨率 img 格式图像。降水数据以吕梁市水文水资源勘测站提供的 30 个降水监测站 1970—2020 年降水数据为准。1970—2020 年日径流量数据由三川河流域后大成水文控制站提供。年、月、日、平均气压、平均风速、平均气温、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、小型蒸发量、大型蒸发量、日照时数等数据来源于中国气象数据共享网 (<http://www.escience.gov.cn>)。土壤类型数据来源于世界土壤

数据库(Harmonized World Soil Database version 1.2, HWSD V1.2)。其中,中国地区数据源为1995年全国第二次土地调查获得的1:1000000栅格格式土壤数据。土壤分类系统主要为FAO-90。流域土地覆被数据来源于中国科学院30m×30m土地利用/覆被变化的开源数据,其分类方式为包括耕地、草地、林地、水体和建设用地5个一级类型。

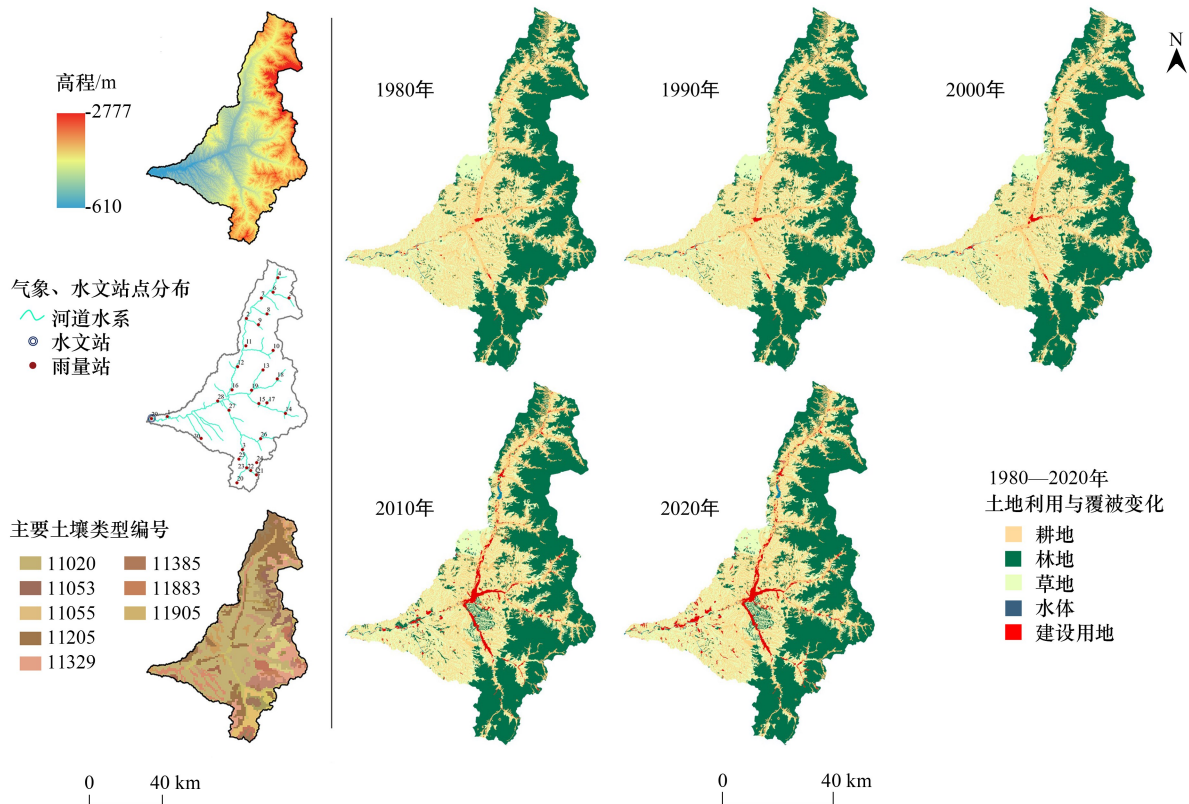


图2 研究区基础数据

Fig.2 Basic data sets for the study area

2.2 SWAT 模型构建与率定

2.2.1 模型构建

SWAT 模型基于地表高程信息、土壤类型情况与地表覆被特征等数据汇总,实现流域河网、子流域及水文响应单元生成,并以水文响应单元的产汇流过程计算构成分布式模型。为了更加精细地捕捉流域地形特征,本研究选择较高精度的集水区阈值设置范围 0.5%—1% (约 21—42km²),经过可视化识别与多次微调后,最终将集水区面积阈值设定为 30km²。根据已有研究成果^[23—24,28]对土地利用、土壤类型和坡度面积的可忽略比重阈值进行设置。由于流域地貌、地质情况在过去半个世纪没有发生较大的变化,因此坡度和土壤类型在不同情景模拟中未作更改。

2.2.2 模型率定与参数敏感性

采用 SWAT-CUP 模型 SUFI-2 算法 (Sequential Uncertainty Fitting version 2) 对三川河流域的 SWAT 模型进行率定和验证。SUFI-2 算法拟合效果以及已校准模型考虑的不确定性程度与不确定性分析效果,引入纳什系数 E_{NS} (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) 和确定性系数 R^2 来判定。

(1) 纳什效率系数 E_{NS}

Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 用于描述水文模型模拟准确性。 E_{NS} 系数越接近于 1,表明模型模拟效果越与实际吻合;系数越接近于 0,则表示模拟值较实测值可信程度越低,模型模拟效果越差。计算公式如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

式中, O_i 为实测值, P_i 为模拟值, $\bar{O}$ 为实测值的平均值。

(2) 确定性系数 R^2

确定性系数 R^2 用来描述模拟计算与实测结果的相关度, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。 R^2 越接近于 1, 表明模拟效果越好; 若取值接近于 0, 则表示模拟值较实测值的拟合度越低, 模型模拟效果越差。其表达式为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

式中, O_i 为实测值, P_i 为模拟值, $\bar{O}$ 为实测值的平均值, $\bar{P}$ 为模拟值的平均值。

2.3 PLUS 模型构建

斑块生成土地利用变化模拟 (Patch-generating Land Use Simulation, PLUS) 模型结合了马尔可夫链和自适应多目标优化策略, 能够精确预测土地利用变化及其空间分布。模型可利用现状历史数据进行校准, 确保模型能够准确反映土地利用变化规律。校准过程则可以通过总体精度与 Kappa 系数, 对比模型预测结果与实际变化结果进行调整。Kappa 系数的计算公式如下:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

式中, P_o 是观察到的一致性比例, P_e 是随机一致性比例。

2.3.1 适宜性概率计算

PLUS 模型利用适宜性概率计算, 通过随机采样机制对土地利用转移规律进行分析, 在土地利用扩张分析策略模块 (LEAS) 中, 用以获取各土地利用类型发展概率, 计算公式为:

$$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^m I[h_n(X) = d]}{m}$$

式中, X 为驱动因子向量组; $h_n(X)$ 为土地利用预测类型; $I[\]$ 为决策树指示函数; m 为决策树数量; d 取值为 0 或 1, 值为 0 表示其他土地利用不向地类 k 发生转变, 值为 1 表示其他土地利用类型向土地利用类型 k 发生转变; P 为在空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长概率。

2.3.2 土地扩展分析策略

自适应多目标优化策略 (Adaptive Multi-Objective Optimization Strategy) 是一种用于解决具有多个目标的优化问题的方法。在土地利用变化模拟中, 通常需要同时考虑多个优化目标, 如生态效益、经济效益和社会效益等。自适应多目标优化策略通过调整不同目标之间的权重和优先级, 寻找一个平衡点, 使得综合效益最大化。具体优化目标可以表示为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i(L)$$

式中, F 表示总目标函数, w_i 表示权重, $f_i(L)$ 表示第 i 个子目标函数, L 表示土地利用。

2.4 试验思路与情景设置

根据已有研究结果, 自 20 世纪 80 年代后, 三川河流域径流及其携沙变化都受到了人类活动引发 LUCC 的强烈影响^[5]。因此, 本研究以 1980 年的土地利用为最接近自然状态的流域下垫面状态构建 SWAT 水文模型, 设置流域上中下游、河道沿线沟谷地的土地利用变化以及基于 PLUS 模型的未来生态用地格局预测的 3 类

LUCC 模拟;再将多情景 LUCC 分别带入 SWAT 模型中,对比分析流域径流对不同土地利用变化的响应特征,从而为黄土沟壑区的流域适应性规划提供科学的参考依据。

2.4.1 不同子流域空间土地利用变化情景

以 1980 年的土地利用为基准,保持建设用地、水体不变。在流域的上游、中游、下游分别设置耕地、林地、草地交替出现土地利用方式,排列组合形成 S_{I1} — S_{I27} 共 27 种子流域土地利用类型的极端情景模拟(图 3)。

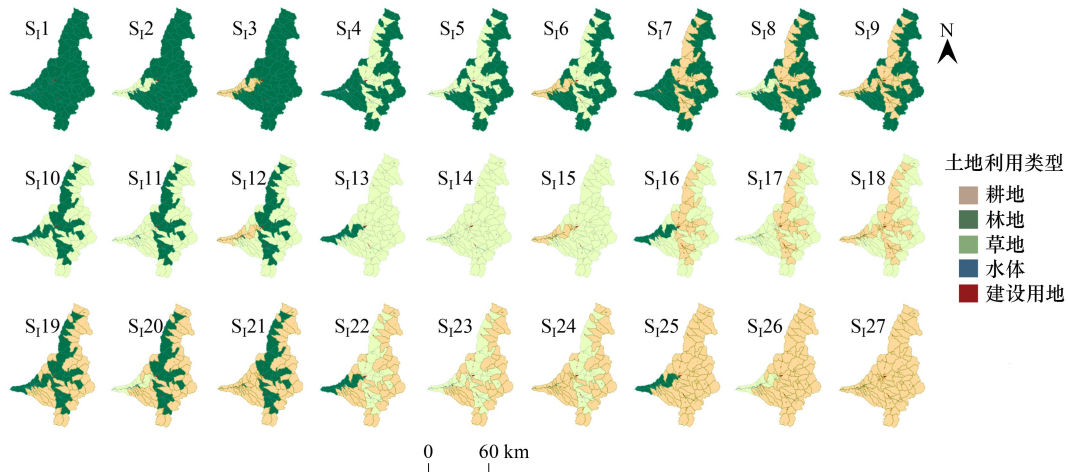


图 3 27 种子流域土地利用情景示意

Fig.3 Illustration of 27 scenarios for land use in sub-basins

2.4.2 河道沿线缓冲区土地利用变化情景

根据三川河流域河谷宽度普遍小于 1000m 的已有统计成果^[29],沿河道、沟道两侧的谷地 0—1000m 的范围内,保持建设用地、水体不变,每隔 100m 设置缓冲范围情景,分别以耕地、林地、草地外加建设用地作为不同宽度缓冲范围的土地利用方式,排列组合形成 S_{II1} — S_{II40} 共 40 种土地利用类型的情景模拟(图 4)。

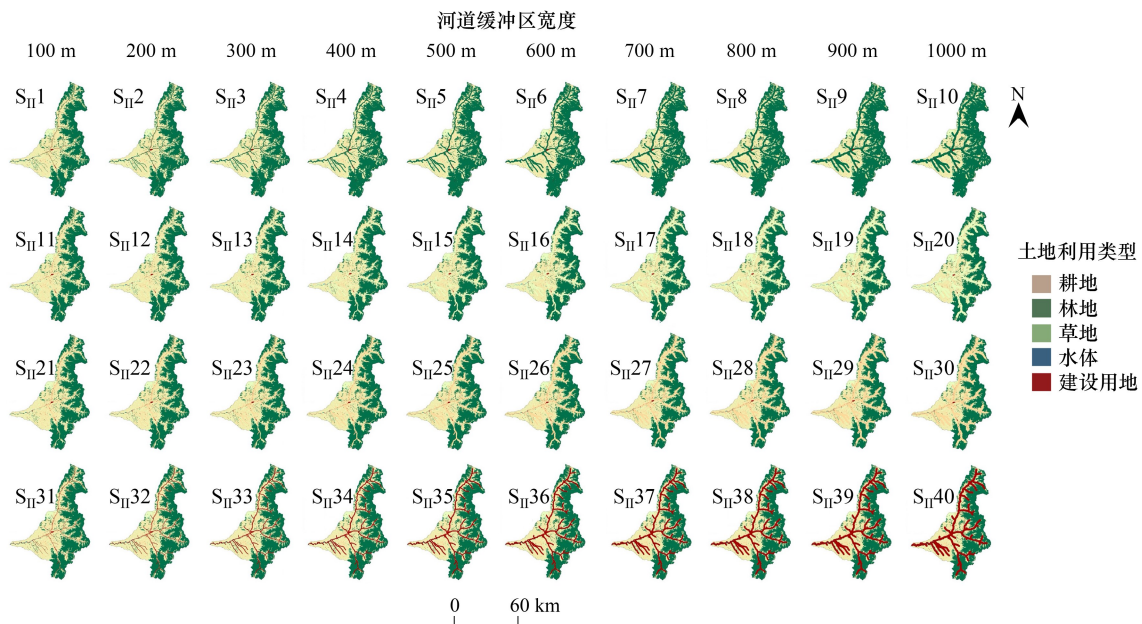


图 4 40 种不同宽度河道缓冲区土地利用情景示意

Fig.4 Illustration of 40 scenarios for land use of different stream buffer widths

2.4.3 基于 PLUS 模型的土地利用变化预测情景

结合《吕梁市离柳方中城镇组团发展规划(2019—2030)》中明确对城市绿地率、林地、草地等指标控制,保证基本农田红线、自然保护区生态红线不动的情况下,对应在 PLUS 模型的土地扩展分析策略中,设定以下三类不同生态用地系统分布情景:

S_{III}1.线性分布情景:生态用地主要沿城镇道路和河流等线性地带分布,优化目标包括最大化生态用地沿道路和河流的分布连续性,生态破碎最小化。

S_{III}2.集中分布情景:生态用地集中在城镇周边的大型区域,优化目标包括最大化生态用地集中区域的面积和位置,边缘效应最小化。

S_{III}3.分散分布情景:生态用地均匀分布在整個流域范围,优化目标包括最大化生态用地均匀分布,提升整体生态效益。

通过自适应多目标优化策略,能够有效地平衡不同情景下的优化目标,生成合理的生态用地分布方案,有效地预测不同分布情景下 LUCC,进而分析不同情景下生态景观格局对径流过程的影响。

3 结果与分析

3.1 模型构建与校验

3.1.1 SWAT 模型构建结果

(1) SWAT 模型构建

基于 GIS 对研究区进行子流域划分,生成河网,以确保划分结果合理性和精度。研究使用最接近自然地表覆被状况的 1980 年土地利用数据,结合土壤数据和气象数据,进入 SWAT 模型的参数调试。在完成模型参数设置后,运行 SWAT 模型,生成研究区内各子流域的径流量、土壤水分和蒸散发等输出结果,为后续参数率定和验证提供模型基础。

(2) 参数率定与准确性检验

本研究对选取的 17 个参数进行 10 次迭代运算,每次迭代运算中对参数率定各 500 次。以 1970—1974 年径流变化为预热期,以 1975—1979 年径流变化为率定期,以 1980—1985 年径流变化为验证期,进行迭代运算后,得到率定期及验证期月径流量模拟值及观测值对比如图 5 所示。根据月径流实测值与模拟值图像可以直观看出实际统计数据与模型计算数据之间的变化规律基本吻合。

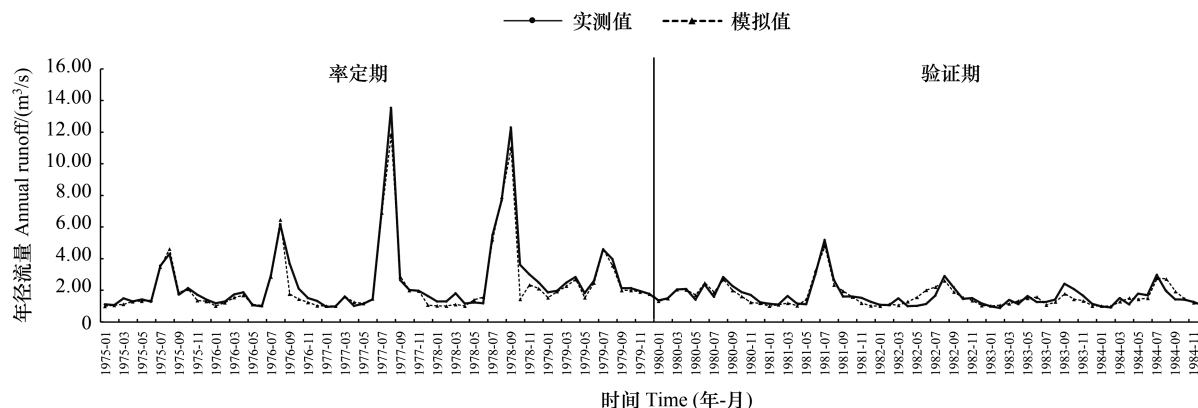


图 5 1975—1984 年月径流实测值与模拟值对比

Fig.5 Comparison of measured and simulated monthly runoff from 1975 to 1984 at the hydrological station in basin

通过 SWAT-CUP 率定校准,率定期月径流量模拟 E_{NS} 为 0.729, R^2 为 0.8255,验证期月径流量模拟 E_{NS} 为 0.701, R^2 为 0.7847,符合“较好”区间的验证,比已有研究成果的精度更高^[28]。这与本次研究基础数据更全

面,子流域划分更精细有关。模型率定参数值再次证明本研究构建三川河流域 SWAT 模型的准确性与有效性。

3.1.2 PLUS 模型构建结果

在基于 1980 年土地利用现状,利用 PLUS 模型模拟间隔 20 年的 2000 和 2020 年 LUCC,并分别与 2000 年 2020 年实际土地利用数据进行对比,以总体精度和 Kappa 系数来评价模型模拟精度。经过计算,PLUS 模型总体精度为 0.7778,Kappa 系数为 0.7097,模拟结果可靠性较高,表明 PLUS 模型在三川河流域的未来土地利用预测具有较好的适用性。继续以 2020 年为初始年份,在保证土地利用占比基本稳定的情况下,进一步生成了三种 2030 年生态用地的空间分布预测(图 6)。

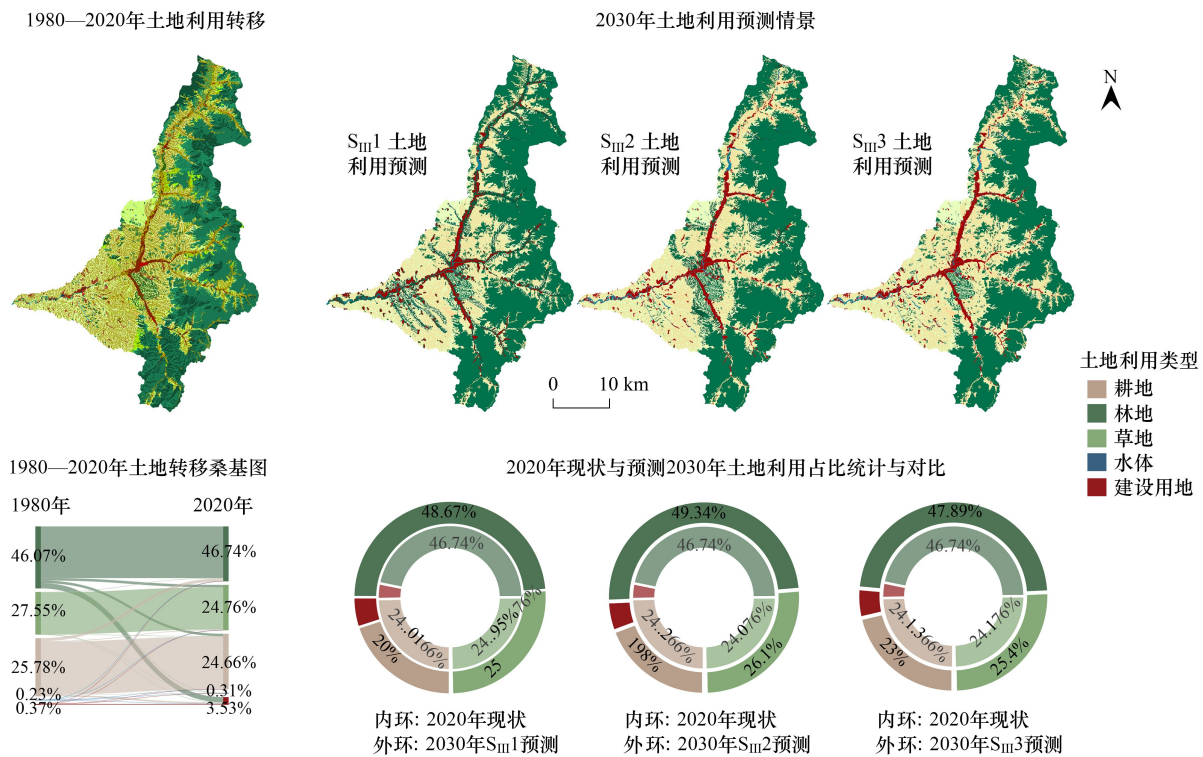


图 6 不同未来预测情景下的土地利用占比统计

Fig.6 Statistics and comparison of land use shares under different future projection scenarios

3.2 情景模拟结果与分析

3.2.1 基于子流域空间 LUCC 情景的径流模拟

在 1980—2020 年降水条件下,对三川河流域 27 种子流域极端土地利用情景进行径流响应模拟。结合试验情景设定(图 3)分析模拟结果可知(图 7):在上游为林地 S_{11} —9 试验情景中,中游为耕地的产流量明显高于中游为林草类用地的产流情况;且前者产流超过后者两倍。当上游为草地(S_{110} —18)时,中游为耕地的产流量约高出中游为林草类生态用地的产流量的一半。此外,上游为耕地的情景(S_{119} —27)中,中游为耕地产流量约高出中游为生态用地产流量四分之一。然而,当上游、下游用地类型一定时,中游土地利用类型变化对径流变化结果差距较小;中游为耕地的模拟情景产汇流量的平均水平,比林草类用地的产汇流量平均水平仅多出 15.8%和 20.9%。相对上游土地利用类型变化,中游的土地利用变化对区域产汇流影响较小。类似地,当上游、中游用地类型一定时,下游区域土地利用类型变化下产汇流平均水平基本持平,可见下游土地利用类型变化对流域产汇流影响能力较弱。

综上,当上游区域为林地时,对流域的水土保持效果最佳。这是因为林地具有较高的植被覆盖率,能够有

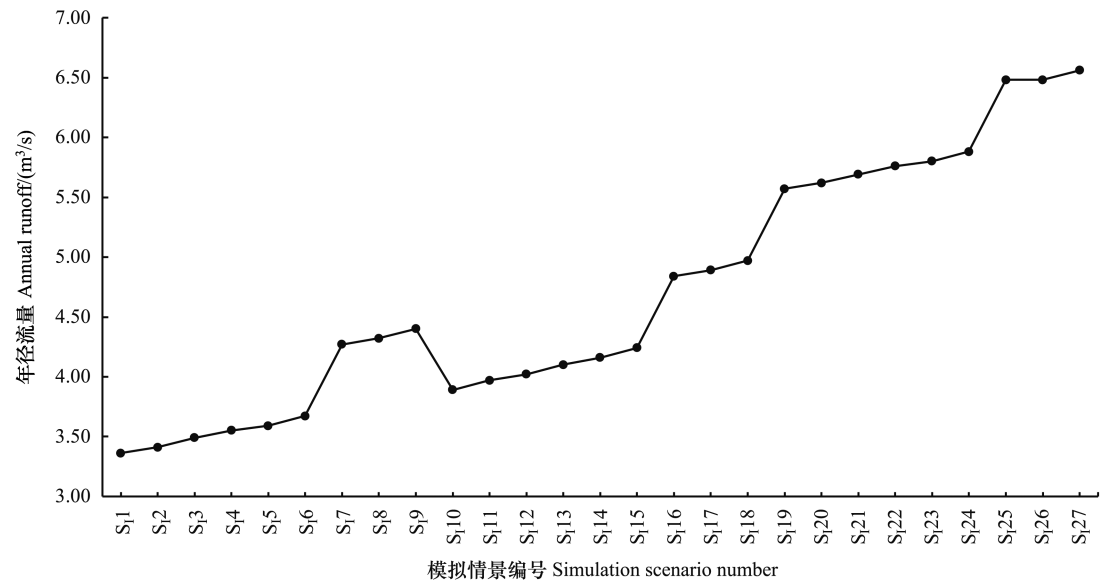


图 7 子流域土地利用变化情景年径流量模拟

Fig.7 Annual runoff simulation for subbasin land use change scenarios

效减少土壤侵蚀,增加土壤的持水能力,从而减少径流量并提高水资源的利用效率^[3,5,30]。此外,已有研究表明上游区域的林草类生态用地不仅有助于减少地表径流,还能够改善区域的生态环境,增强生态系统的稳定性和恢复力^[17,31]。此外,中下游的土地利用对整个流域的径流变化影响较小。因此,从水土保持和生态保护的角度来看,三川河流域的上游区域土地利用应以林草类生态用地为主。

3.2.2 基于河道沿线缓冲区 LUCC 情景的径流模拟

在 1980—2020 年的气候条件下,对三川河流域河道不同缓冲宽度、四类土地利用类型排列组合下的 40 种情景模拟多年径流变化的模拟结果如图 8 所示。结果表明,年径流量随林地、草地缓冲带宽度增加而减少,随耕地与建设用地缓冲带宽度增加而增加。根据年径流量变化趋势线可知,林、草缓冲区加宽百米,每年分别

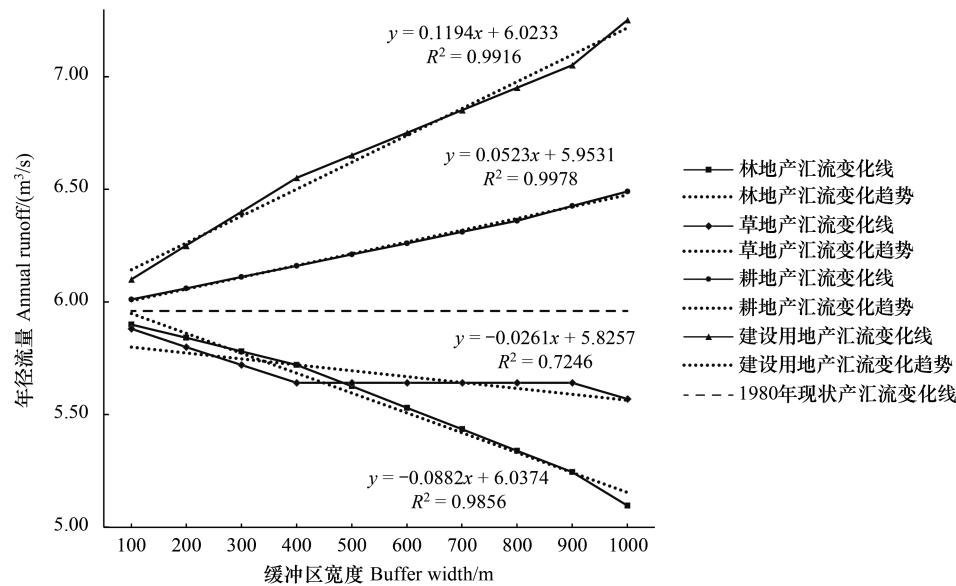


图 8 不同宽度河道缓冲区土地利用变化情景年径流量模拟

Fig.8 Annual runoff simulation for land use change scenarios with different stream width buffers

可有效减少 $0.088\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.026\text{m}^3/\text{s}$ 的产汇流量。相比之下,耕地缓冲区加宽百米,每年多产流 $0.052\text{m}^3/\text{s}$ 。沿河道增加建设用地宽度会带来更大的年径流量:建设用地沿河道两岸每拓宽 100m,年径流量相应增加 $0.12\text{m}^3/\text{s}$ 。

此外,本组试验发现:不同用地类型缓冲对径流的调控能力存在明显的尺度效应,且这种效应因用地类型而异。随着林地缓冲区宽度的增加,其对产汇流过程的控制能力逐渐增强。宽度超过 900m 的林地缓冲带对年径流量的控制能力强于 400—900m 和 0—400m 的缓冲带。草地缓冲带的变化规律略有不同。在 0—400m 范围内,草地缓冲带的雨洪调控能力略优于林地,但在 400—900m 范围内,草地的调控能力几乎为零。当宽度超过 900m 时,草地的产汇流控制能力再次增强,但仍低于同等宽度的林地缓冲带。耕地缓冲带的宽度与径流量呈简单的线性关系,随着宽度增加,径流量逐渐增加。城市建设用地宽度的延展对年径流量的增加影响显著,宽度超过 900m 时作用最强,0—400m 次之,400—900m 相对较弱。然而,宽度为 400—900m 的建设用地对流域径流量的贡献绝对值远超其他三类缓冲区用地类型。这一研究结果与其他研究中生态廊道宽度对径流变化的影响结果相似^[12,32],再次验证了景观生态学中“格局-过程”理论^[14,33]的有效性,即景观空间格局对生态过程具有深刻的影响。生态廊道作为线性景观要素,其宽度对径流的调控能力能够发挥重要作用。

3.2.3 流域未来适宜性 LUCC 情景径流模拟

将三种未来土地利用情景预测 $S_{III}1$.线性分布情景, $S_{III}2$.集中分布情景, $S_{III}3$.分散分布情景生成栅格图像,分别代入到 SWAT 模型进行径流模拟,最终得出不同土地利用模式下径流量变化结果(图 9)。三组未来情景预测的径流响应试验结果表明:生态面积的增加能够有效改善城镇化带来的径流变化。然而,在生态用地面积相同的情况下,不同的生态用地分布形态对径流控制效果存在明显差异。 $S_{III}1$ 情景下年径流量较低; $S_{III}2$ 情景下的年径流量较高,显示出明显增长趋势; $S_{III}3$ 情景下年径流量介于前两者之间,显示出一定增加趋势。这表明生态空间的线性分布模式对径流量的控制效果较好,分散分布模式次之,集中分布的生态空间对径流控制效果最差。不同生态用地分布形态对径流控制效果的差异主要是由于它们在空间上对地表径流的截流和滞蓄作用不同:线性分布形态能够沿水体边缘连续拦截径流,集中分布形态虽然在局部有效但整体作用有限,而分散分布形态则在广泛区域内提供中等程度径流控制。

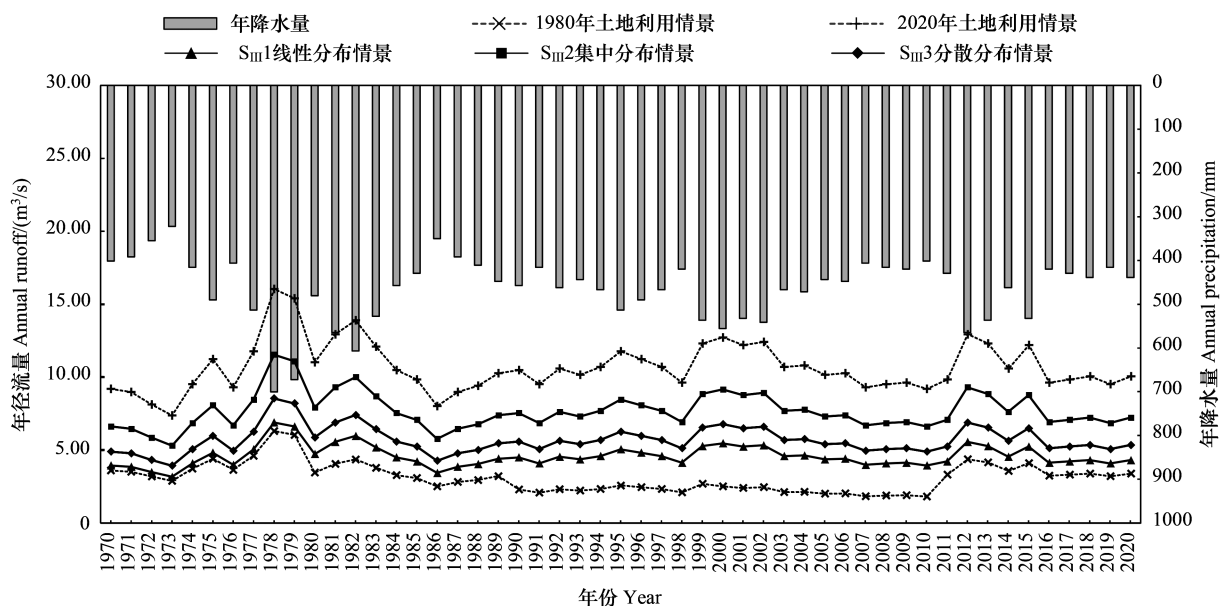


图 9 不同未来土地利用情景下年径流量变化结果

Fig.9 Results of annual runoff volume changes under different future land use scenarios

从景观生态学的角度来看,不同的生态用地分布形态对径流控制效果的差异可以通过景观格局和生态过程的相互作用来解释^[33]。不同生态用地分布形态对径流控制效果的差异主要体现在廊道效应、斑块效应和镶嵌格局上。线性分布(S_{m1})形成的生态廊道有效拦截和缓冲地表径流,边界效应显著,径流控制效果最佳。集中分布(S_{m2})虽然在局部形成大的生态斑块,但由于斑块相对孤立,核心效应和边缘效应限制了整体径流控制能力,导致径流量增加。分散分布(S_{m3})形成镶嵌格局,生态用地均匀分布,虽然在广泛区域内提供径流控制,但单个斑块的局部效力有限,整体效果介于线性和集中分布之间。

3.3 三川河流域安全的适应性规划对策

3.3.1 基于景观生态学的流域雨洪安全规划

景观生态学强调通过优化景观格局、增强生态系统服务功能和提高环境承载能力来提升流域的整体安全性^[11,33]。从景观格局的角度,“斑块-廊道-基质”构成的空间格局是生态要素物质循环和能量流动的载体。本研究通过构建 SWAT 模型,在不同范围、不同用地类型的流域用地情景下的水文模拟试验体现了黄土沟壑区径流控制的“廊道效应”^[14]。三川河流域以河道、沟道为骨架,结合一定宽度的沟谷地缓冲区构建生态廊道,重塑各类生态要素之间的空间“镶嵌”关系,能够有效拦截和缓冲地表径流,其边界效应显著,径流控制效果最佳,形成具有典型空间形态和显著生态价值的景观格局。

3.3.2 多尺度的流域雨洪安全格局构建

(1) 流域尺度

在流域空间尺度上,需要整体考虑流域内上中下游的生态价值和雨洪管理能力。根据情景模拟结果,流域上、中游的土地利用对径流量影响较大,应优先优化这些区域的生态用地布局。在未来规划中,可将流域划分为若干功能区,如上游水源保护区、中游水土保持区和下游洪水缓冲区,根据各区域的特点实施差异化管理。在整个流域范围内建立由河流、湖泊、湿地和林地组成的蓝绿生态网络,增强景观连通性,促进生态系统的稳定性和恢复力。通过建设和完善流域内的水库、堤坝和水闸等工程设施,合理调配水资源,控制洪峰流量,减轻下游洪水压力,确保流域内各区域的水土保持和防洪效果。

(2) 沟谷空间尺度

研究表明,沿沟道、河道 400m 宽度范围内,草地的雨洪管控效果总体由于林地;大于 400m 宽度后,林地雨洪管控效果明显优于草地,其中 400—900m 范围内草地对于雨洪管控效果不佳。建设用地在沿河道 400m 以内的产汇流量明显大于 400m 以外的产流。因此,沟谷空间中,特别是上游区域,宜建立宽度适宜的林地和草地缓冲带,拦截地表径流,减少土壤侵蚀,增强沟谷的水土保持能力。同时,通过人工造林和自然恢复等措施,增加沟谷内的植被覆盖率,提高生态系统的稳定性和水源涵养能力。此外,沿沟道、河道建设小型蓄水池、梯田和沉沙池等工程,调蓄径流,缓解洪峰压力,增加水资源的利用效率,从而进一步增强沟谷雨洪安全。

(3) 生态基础设施尺度

根据情景模拟结果,中下游区域对径流的影响相对较小。从径流调控和可持续发展的角度出发,中下游开阔的河谷地带应成为城乡发展的优先区域。但是在城乡建设区域,仍然要最大价值发挥河流廊道的尺度效应。应尽可能串联流域中的其他生态空间,特别是河道沿线 400m 范围内的绿化用地,共同构成沿河的带状生态空间,并形成具有连通性、贯穿作用的生态廊道。以河流湖泊、滩涂、洼地、农田、林地、草坡等自然斑块为基础,恢复湿地与洪泛区域用地的生态属性,实现截流、净化和调蓄雨洪功能,使城镇区内河道相通并与坑塘、洼地、河口湿地等这些蓄水空间直接相连建设多自然型河道^[34],修建生态河堤,建设人工湿地系统。多功能生态空间的构建既提供休闲娱乐功能,又发挥防洪调蓄作用,增强城市的韧性和适应能力。通过在不同尺度上构建和优化流域的雨洪安全格局,可以有效提高流域的防洪减灾能力,保障区域的生态安全和可持续发展。

4 结语

本研究以晋西三川河流域为对象,通过综合运用 SWAT 和 PLUS 模型,深入分析 LUCC 对黄土沟壑区流域径流响应的影响,并探讨了适应性规划对策。研究表明,流域上、中游区域的土地利用对径流量影响显

著,尤其是上游区域的林地对水土保持效果最佳,显著减少了地表径流,增强了区域水资源的利用效率和生态系统的稳定性。同时,河道沿线不同宽度缓冲区的土地利用变化也对径流量产生重要影响,河道沿线 400m、900m 是重要的缓冲尺度范围,这些区域的土地利用类型对径流控制效果明显。在多尺度的流域雨洪安全格局构建中,流域空间尺度上应优先优化上、中游区域的生态用地布局。沟谷空间尺度上,通过建立适宜宽度的林地和草地缓冲带、建设小型蓄水工程和提高植被覆盖率,可以显著增强沟谷区域的水土保持能力和雨洪安全。生态基础设施尺度上,通过推广绿色雨洪管理设施、建设滨水的多功能生态空间,可以有效减少地表径流量,提高城市和农村地区的防洪减灾能力。本研究为黄土沟壑区流域适应性规划提供了科学依据,通过科学的景观生态规划和管理,可以实现流域内的水土保持、生态保护与社会经济发展的协调统一,为黄土高原地区的可持续发展提供有力支持。

参考文献 (References):

- [1] 李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):95-102,113
- [2] 白璐璐,时鹏,李占斌,李鹏,王雯,赵准,董敬兵.黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应.农业工程学报,2023,39(13):96-104.
- [3] 张慧雯,赵燕,陈怡平.近40年来黄土高原植被变化趋势及其生态效应.地球科学与环境学报,2023,45(4):881-894.
- [4] 廖俊,焦菊英,严增,李建军,张世杰. RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果分析.水土保持学报,2024,38(2):97-108.
- [5] 雷泽鑫,傅健宇,罗俊杰,曹磊.景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析.生态学报,2022,42(12):4946-4958.
- [6] 陈万旭,梁加乐,卞娇娇,曾杰,潘思佩.黄河流域景观破碎化对土壤保持服务影响研究.地理科学,2022,42(4):589-601.
- [7] 梁友嘉,刘丽珊.黄土高原1995—2050年快速城市增长的时空动态模拟. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(3): 567-580.
- [8] 白钰.陕北黄土丘陵沟壑区城镇空间发展模式初探//中国城市规划学会,贵阳市人民政府.新常态:传承与变革——2015中国城市规划年会论文集(13山地城乡规划).2015.
- [9] 刘畅,田野.生态线索·山地城镇化的生态安全保障思考——以陕北黄土丘陵沟壑区延安市为例.中国园林,2015,31(12):22-25.
- [10] 刘迪,陈海,张行,毛南赵,梁小英.黄土侵蚀沟谷土地生态系统健康评价——以杜家石沟为例.水土保持研究,2019,26(2):100-106.
- [11] 赵万民,赵伟.山地流域人居环境建设的景观生态研究——以乌江流域为例.城市规划,2005,29(1):64-67.
- [12] 张微微,李晓娜,王超,赵春桥,史瑞双.密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应.环境科学,2020,41(11):4895-4904.
- [13] 李海峰,李永树,卢正,郭科,彭文甫.河流廊道景观的热环境效应分析.地理与地理信息科学,2015,31(4):51-54,封2.
- [14] 朱强,俞孔坚,李迪华.景观规划中的生态廊道宽度.生态学报,2005,25(9):2406-2412.
- [15] 黄铎,易芳蓉,汪思哲,韦慧杰,王世福.国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究.城市规划,2022,46(1):18-31.
- [16] 袁秋玲,孟凡鑫,李芬,刘耕源,杨志峰.食物—能源—水关联视角下蓝绿基础设施提升城市韧性的概念框架.城市发展研究,2022,29(8):20-27.
- [17] 赵菊花,杨永崇,王涛,杨梅焕,谢艳玲,郭志炜,陈佳旺.黄土高原2000—2020年生态网络演变及关键修复区识别.测绘通报,2023(8):19-23,77.
- [18] 潘竞虎,李磊.利用OWA和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局.农业工程学报,2021,37(3):259-268,封3.
- [19] 张义辉,张杨杨,李兵霞,高玉欣,夏灵溪.晋西北黄土高原县域生态网络构建初探.环境生态学,2023(8):36-45,81.
- [20] 杨建辉,岳邦瑞,史文正,康世磊.陕北丘陵沟壑区雨洪管控的地域适宜性策略与方法.中国园林,2018,34(4):54-62.
- [21] 唐英,史承勇,张瑞超,李侃侃.水-绿双赢的黄土高原半干旱区城市滨河景观设计——以榆溪滨河公园为例.装饰,2017(7):91-93.
- [22] 徐子萱,郑华,马金锋.水文模型在生态系统水文服务评估中的应用综述.水生态学杂志,doi:10.15928/j.1674-3075.202212290515
- [23] 杨智勇,牛健植,樊登星,张卓佩,杜洲,赵春光.基于SWAT和PLUS模型的窟野河流域径流对土地利用变化的响应及预测.水土保持学报,2024,38(1):289-299.
- [24] 刘雪妍,张会兰,罗泽宇,张嘉琪,安妮.基于SWAT模型的涪江流域土地利用变化的水沙响应研究.水土保持研究,2024,31(3):79-89,100.
- [25] 冯权洸,牛博文,朱德海,陈泊安,张超,杨建宇.土地利用/覆被深度学习遥感分类研究综述.农业机械学报,2022,53(3):1-17.
- [26] 任胤铭,刘小平,许晓聪,孙嵩松,赵林峰,梁迅,曾莉.基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响.生态学报,2023,43(11):4473-4487.
- [27] 王春晓,何建华,刘殿锋,于秀波,石青青.土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例.生态学报,2022,42(10):4197-4208.
- [28] 罗睿,徐宗学,程磊. SWAT 模型在三川河流域的应用. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 28-33.
- [29] 张攀.水土保持综合治理对小流域水沙变化的影响定量分析. 郑州:黄河水利出版社,2015.
- [30] 张晔,侯精明,龚佳辉,周聂,韩浩,张兆安,高徐军,刘园,王剑,孙继鑫.1980—2020年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响.水土保持通报,2022,42(5):231-237,246.
- [31] 薛帆,晁智龙,何亮,易海杰,许小明,邹亚东,贺洁,吕渡,张晓萍.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.生态学报,2023,43(8):3247-3260.
- [32] 韩琪,赵进勇,徐征和,王琦,张晶,彭文启.洪泛河流动态生态廊道宽度界定研究——以永定河泛区廊坊段为例.水利水电技术,2020,51(11):171-180.
- [33] 孙然好,孙龙,苏旭坤,陈利顶.景观格局与生态过程的耦合研究:传承与创新.生态学报,2021,41(1):415-421.
- [34] 雷泽鑫,杨冬冬,曹磊.城市河道“近自然化”修复案例研究与启示.景观设计,2019,(03):20-27.