

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.028

杨智勇,牛健植,樊登星,等.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[J].水土保持学报,2024,38(1):289-299.
YANG Zhiyong, NIU Jianzhi, FAN Dengxin, et al. Response and prediction of runoff to land use change in Kuye River Basin based on SWAT and PLUS models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):289-299.

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

杨智勇^{1,2}, 牛健植^{1,2}, 樊登星^{1,2}, 张卓佩^{1,2}, 杜洲^{1,2}, 赵春光³

(1.北京林业大学水土保持学院,水土保持国家林业和草原局重点实验室,北京 100083;2.林业生态工程教育部工程研究中心,
北京 100083;3.鄂尔多斯市水旱灾害防御技术中心,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要: [目的] 为揭示窟野河流域径流对土地利用变化的响应,并预测未来径流变化。[方法] 以窟野河流域为研究区,基于 SWAT 和 PLUS 模型,通过 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年和预测得到的自然发展情景下 2025 年、2030 年 7 期土地利用数据,定量分析径流在不同土地利用情景下的变化。[结果] (1) SWAT 模型率定期和验证期的 R^2 和 NS 均 >0.7 ; PLUS 模型总体精度为 0.877 4, Kappa 系数为 0.802 1, 2 个模型在窟野河流域适用性较好; (2) 2000—2020 年,窟野河流域林地、建设用地面积分别增加 102.92, 600.90 km^2 , 耕地、草地、水域和未利用地分别减少 277.15, 366.25, 40.44, 19.98 km^2 ; (3) 窟野河流域年平均径流深整体呈现“上游低, 下游高, 西部低, 东部高”的空间分布格局; (4) 在保证其他输入数据不变的情况下, 改变土地利用数据, 情景分析结果表明, 林地、草地面积减少会促进径流, 建设用地面积增加同样会促进径流; (5) 自然发展情景下, 2025 年和 2030 年窟野河流域土地利用空间分布格局未发生显著变化, 仍以耕地和草地为主, 年平均径流量较 2020 年分别增加 3.21%, 5.00%。[结论] 土地利用与径流变化关系密切, 情景分析角度下, 林地、草地对径流起抑制作用, 建设用地对径流起促进作用。未来自然发展情景下, 随土地利用变化, 径流呈增加态势, 研究结果可为窟野河流域的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; 径流模拟; SWAT 模型; PLUS 模型; 窟野河流域

中图分类号: P333.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)01-0289-11

Response and Prediction of Runoff to Land Use Change in Kuye River Basin Based on SWAT and PLUS Models

YANG Zhiyong^{1,2}, NIU Jianzhi^{1,2}, FAN Dengxin^{1,2}, ZHANG Zhuopei^{1,2}, DU Zhou^{1,2}, ZHAO Chunguang³

(1. State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Soil and Water Conservation, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Ordos Flood and Drought Disaster Prevention Technology Center, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] The study is aimed at revealing the response of runoff to land use change in the Kuye River Basin and predicting future runoff change. [Methods] Taking the Kuye River Basin as the study area, based on the SWAT and PLUS models, the changes of runoff under different land use scenarios were quantitatively analyzed by using the land use data of 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 and the data of 2025 and 2030 that were predicted from the natural development scenario. [Results] (1) The R^2 and NS of the SWAT model during the periodic and validation periods were greater than 0.7. The overall accuracy of PLUS model was 0.877 4, and the Kappa coefficient was 0.802 1. The two models had good applicability in the Kuye River Basin. (2) From 2000 to 2020, forest land and construction land increased by 102.92 and 600.90 km^2 ,

收稿日期: 2023-08-11

修回日期: 2023-09-25

录用日期: 2023-10-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-13

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300804)

第一作者: 杨智勇 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林水文与土壤侵蚀研究。E-mail: 3209194423@qq.com

通信作者: 牛健植 (1974—), 女, 教授, 主要从事森林水文与土壤侵蚀研究。E-mail: nexk@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

respectively, while cultivated land, grassland, water area, and unused land decreased by 277.15, 366.25, 40.44 and 19.98 km², respectively. (3) The average annual runoff depth in the Kuye River Basin presented a spatial distribution pattern of “lower in the upper reaches, higher in the lower reaches, lower in the west, and higher in the east”. (4) Changing land use data while ensuring that other input data remains unchanged, the results of scenario analysis showed that the decrease of forest land and grassland area would promote runoff, and the increase of construction land area would also promote runoff. (5) Under the natural development scenario, there was no significant change in the spatial distribution pattern of land use in the Kuye River Basin in 2025 and 2030, and the land use was still dominated by cultivated land and grassland, with the average annual runoff increasing by 3.21% and 5.00%, respectively, compared with 2020. [Conclusion] There was a close relationship between land use and runoff change. From the perspective of scenario analysis, forest land and grassland inhibited runoff, while construction land promoted runoff. Under the future natural development scenario, runoff increased with land use change. The research could provide scientific basis for the optimization of land use structure and rational planning of water and soil resources in the Kuye River Basin.

Keywords: land use change; runoff simulation; SWAT model; PLUS model; Kuye River Basin

Received: 2023-08-11

Revised: 2023-09-25

Accepted: 2023-10-15

Online(www.cnki.net): 2023-12-13

自国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球环境变化人文因素计划(IHDP)将土地利用/覆被变化(LUCC)列为其关键研究课题^[1]后,土地利用变化逐渐成为全球气候与水文响应变化研究的热点,受到众多专家学者的关注。近年来,随着社会发展,土地利用结构不断发生变化,作为影响流域下垫面、气候及水文的重要途径之一,其通过改变流域下垫面状况、水资源循环和水土流失过程等方面,进而对流域径流的形成、运行机制及水文情势产生影响^[2-3]。由此可见,土地利用变化是影响流域地表和地下径流的重要因素,一方面,土地利用变化导致下垫面状况发生变化,直接干预流域植被冠层的降水截留和蒸散发等过程,进而影响地表径流^[4];另一方面,土地利用变化引起的下垫面变化影响流域地下水供给、土壤渗透和蒸发过程等,从而对径流形成过程产生间接影响^[5]。

国内外研究者在径流对土地利用变化的响应研究领域先后开展了大量研究,并取得了丰富的成果。WORKU等^[6]基于SWAT模型,针对土地利用对径流的影响开展了深入研究,发现随林地面积减少、耕地和建设用地面积增加,径流量呈增加趋势。国内关于这方面的研究也不在少数,例如,史培军等^[7]以深圳市作为研究区,探究土地利用变化对地表径流的影响,得出人类活动的加剧会导致径流量增大的研究结论。但上述研究均是利用土地利用现状资料来进行径流模拟及分析,对于未来土地利用变化下的径流变化缺乏考虑。

有多种模型可实现土地利用情景预测,其中使用较为广泛的模型有CA—MarKov模型^[8]、FLUS模

型^[9]和CLUE—S模型^[10]等,但这些模型在斑块尺度上,模拟各土地利用类型用地的时空变化时存在一定局限性,难以解释各土地利用类型间的更深层次关系。而PLUS模型在斑块尺度上处理栅格数据,同时集成土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子模型(CARS),很好地解决了上述模型存在的问题。自LIANG等^[11]提出PLUS模型并进行土地利用模拟后,众多学者相继开展研究。ZHAI等^[12]基于PLUS模型模拟2019年武汉市土地利用空间分布,结果表明,土地利用模拟分布格局与真实情况较接近;蒋小芳等^[13]分别使用PLUS、FLUS和CLUE—S等模型模拟黑河流域中游土地利用,并对比各模型模拟结果,得出PLUS模型效果最优的研究结论。因此,相较于其他土地利用预测模型,PLUS模型模拟精度更高,土地利用分布格局与实际情况更为接近,故本研究选取PLUS模型进行窟野河流域土地利用情景模拟预测。

窟野河是黄河流域水土流失区的典型支流,同时也是黄土高原生态环境脆弱区。作为黄河流域重要的生态屏障之一,为治理水土流失,减少产流产沙量,该流域实施了大量的水土保持措施,如“退耕还林还草”“淤地坝建设”等,同时又因丰富的煤矿资源被大量开采,导致该流域土地利用发生巨大变化,进而对地表径流的变化产生巨大影响。以往虽有学者从自然和社会因子角度分析了窟野河流域径流的变化,但并未阐述各土地利用类型对径流的影响,同时未对未来土地利用及径流的变化做深入研究。本研究基于水文、气象、土壤及土地利用等数据,耦合SWAT与

PLUS 模型,旨在揭示该流域径流对土地利用变化的水文响应规律,为窟野河流域的土地资源和水资源规划管理提供理论依据。

1 研究区概况

窟野河为黄河一级支流,干流长达 242 km,地处黄河中游多沙粗沙区,地理位置 109°28′—110°52′E,38°23′—39°52′N,总面积为 8 706 km²。流域地貌复杂多样,平均比降较大,为 3.44‰^[14]。流域多年平均气温为 8.9℃,多年平均降水量为 386 mm,降水年内变化大,多集中于夏季,在空间上呈东南多而西北少的分布^[15]。

2 研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 数字高程数据 本研究采用的数字高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),

空间分辨率为 30 m,在 ArcGIS 10.2 中经过投影、裁剪等预处理后得到窟野河流域 DEM(图 1)。

2.1.2 气象、水文数据 本研究选取 CMADS V1.1 数据集^[16](<http://www.cmads.org/>)驱动 SWAT 模型进行水文模拟。采用窟野河流域控制水文站温家川站 2009—2016 年逐月流量作为实测数据,用于模型率定与验证,数据来源于《黄河流域水文年鉴》^[17]。

2.1.3 土地利用数据 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m,本研究共收集 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 期土地利用遥感资料。基于一级土地利用分类标准,将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类(图 1)。

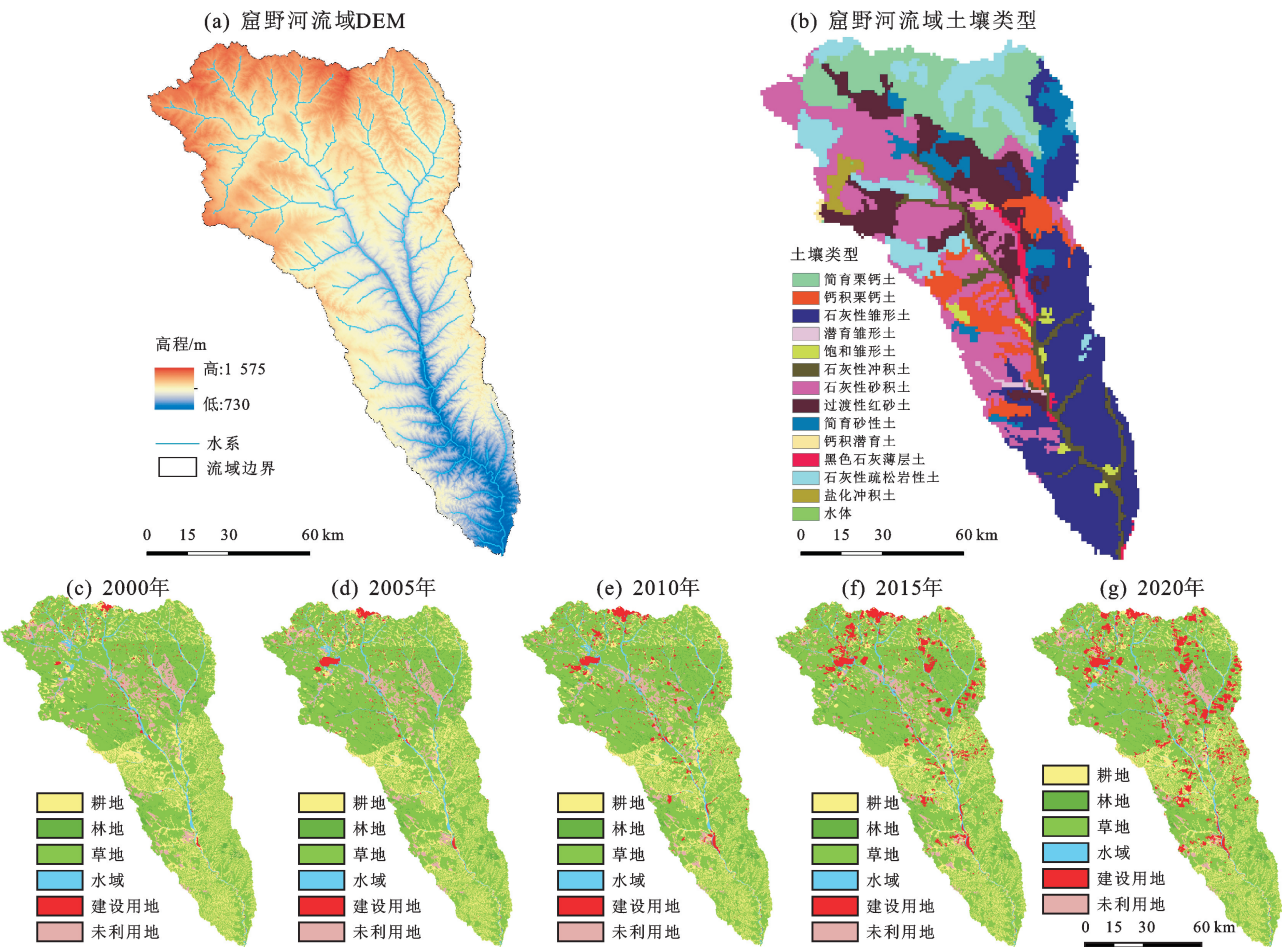


图 1 窟野河流域 DEM、土壤类型和土地利用

Fig. 1 DEM, soil type and land use in the Kuyue River Basin

2.1.4 土壤数据 土壤数据来源于世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD),空间分辨率为 1 km。在 ArcGIS 10.2 中经过预处理后,从 HWSD 中提取窟野河流域土壤数据,并重分类为 14 种不同的土壤类型(图 1)。再运用土壤参数分析软

件 SPAW 计算出 SWAT 模型所需的各种土壤参数,并导入 SWAT 土壤数据库中。

2.1.5 土地利用变化驱动因子 选取 DEM、坡度、坡向、人口、GDP、与道路、铁路、河流和县政府距离等 9 项数据作为土地利用变化的驱动因子。其中人

口和 GDP 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>);与道路、铁路、河流和县政府距离等来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)。

2.2 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型是在 20 世纪 90 年代由美国农业部开发的,适用于长时间序列的分布式水文模型,具有很强的物理机制,可以对流域内一系列复杂的物理过程进行模拟^[18]。本研究应用 SWAT 模型中基于水量平衡方程进行模拟的水文模块,公式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{n=1}^t (R_n - Q_n - E_n - W_n - T_n) \quad (1)$$

式中: SW_t 为第 n 天的含水量(mm); SW_0 为第 n 天的土壤初始含水量(mm); t 为时间(d); R_n 为第 n 天的总降水量(mm); Q_n 为第 n 天的总地表径流量(mm); E_n 为第 n 天的蒸发蒸腾量(mm); W_n 为第 n 天的土壤下渗水量(mm); T_n 为第 n 天的地下水回流量(mm)。

2.2.1 模型构建 基于 ArcGIS 10.2 软件,应用 ArcSWAT 2012 版本对窟野河流域进行水文模拟。输入窟野河流域 DEM,集水面积阈值设置为 100 km²,并以窟野河入黄口作为流域出口,将研究区划分为 47 个子流域,通过阈值设置,共生成 470 个水文响应单元。再将 CMADS V1.1 数据集中的降水、气温、相对湿度、太阳辐射及风速等气象要素输入 SWAT 模型,随后即可运行 SWAT 模型。

综合 CMADS V1.1 数据集和实测径流数据的相应时间区间,本研究将 2008 年设置为模型预热期,2009—2013 年设置为模型率定期,2014—2016 年设置为模型验证期。

2.2.2 敏感性分析 SWAT 模型参数众多,且存在“异参同效”的现象,为提高模型运算效率,本研究基于流域特性,选取 14 个与径流相关的参数,基于 SWAT-CUP 软件内置的 SUFI-2 算法,对 SWAT 模型参数进行敏感性分析,根据参数敏感性水平 t 值和显著性水平 p 值,进行后续迭代计算,不断调整参数范围,直至确认各参数最优值。

2.2.3 模型率定及验证 SWAT 模型成功运行后,需要对模拟结果进行校准并验证其可靠性。在确定敏感性参数后,基于 SWAT-CUP 软件对参数进行率定与验证。本研究选用窟野河流域温家川站 2009—2013 年的径流实测数据进行模型率定,2014—2016 年径流实测数据进行模型验证。

使用决定系数(R^2)和纳什效率系数(NS)评价

SWAT 模型在窟野河流域的适用性水平,计算公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 为实测径流量(m³/s); $Q_{sim,i}$ 为模拟径流量(m³/s); $\bar{Q}_{obs}$ 为实测径流量平均值(m³/s); $\bar{Q}_{sim}$ 为模拟径流量平均值(m³/s); n 为观测值数量。

R^2 用以评价模拟值与实测值之间的相关性,当 R^2 越接近于 1,模拟效果越好;NS 用于评价模拟值与实测值之间的偏离程度,当 NS 越接近于 1,二者接近程度越高。一般认为,当 $R^2 > 0.5$,NS > 0.5 时,模型模拟结果可信^[19-20]。

2.3 PLUS 模型

PLUS 模型是一个基于栅格数据的可用于斑块尺度土地利用/土地覆盖(LULC)变化模拟的元胞自动机(CA)模型,其集成了土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子模型(CARS),能更好地模拟土地利用在斑块尺度上的变化,准确度更高^[21]。具体操作步骤即通过分析 2 期土地利用数据,提取各类土地利用用地扩张面积,基于随机森林算法进行采样计算,获取各类土地利用用地发展概率;最终结合转换成本矩阵和邻域权重等机制,得到土地利用多情景预测。

2.3.1 驱动因子 综合考虑窟野河流域自然、社会经济条件及数据可获取因素,本研究选取表 1 所示的 9 个驱动因子进行土地利用情景预测。

表 1 驱动因子信息

Table 1 Driver information

数据类型	数据名称	数据描述
自然因子	DEM	直接输入
	坡度	DEM 数据计算
	坡向	DEM 数据计算
	距河流距离	欧氏距离
	人口	重采样 30 m
社会因子	GDP	重采样 30 m
	距道路距离	欧氏距离
	距铁路距离	欧氏距离
	距县政府距离	欧氏距离

2.3.2 适宜性概率计算 适宜性概率计算是 PLUS 模型中的重要一环,对于土地利用情景模拟起重要作用。其位于土地利用扩张分析策略模块(LEAS)下,以随机采样机制对土地利用转移规律进行分析,获取各土地利用类型发展概率^[22],公式为:

$$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(X) = d]}{M}$$
 (4)

式中: X 为驱动因子向量组; $h_n(X)$ 为土地利用预测类型; $I[\]$ 为决策树的指示函数; 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。

2.3.3 邻域权重 邻域权重表示土地利用类型的扩张能力,通过设定参数,可以有效控制各土地利用类型的扩张能力,其取值范围为 0~1,数值越大表示该用地类型的扩张能力越强^[23]。通常各土地利用类型的邻域权重值根据专家经验、多次模型调试和各用地类型扩张面积占比来确定。本研究以土地利用扩张面积占比对邻域权重进行赋值,将耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的邻域权重分别设置为 0.11,0.05,0.23,0.03,0.38,0.20。

2.3.4 转换成本矩阵 转换成本矩阵是定义土地利用类型之间是否可以转换的重要方式,能有效约束用地类型之间的转化^[24],其值为 0 或 1,0 表示不能转化,1 表示允许转化。依据 2000—2020 年窟野河流域各土地利用类型的转换情况,再结合退耕还林、退耕还草、土地复垦等相应政策及城镇化发展,对转换成本矩阵进行设置(表 2)。

表 2 转换成本矩阵

Table 2 Transformation cost matrix						
土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水域	0	0	0	1	0	0
建设用地	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	1	1	1

注:0 表示不能转化,1 表示允许转化。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型参数率定与验证

使用窟野河流域温家川水文站 2009—2016 年月平均流量进行模型率定和验证,在 SWAT-CUP 软件里经过 500 次模拟,确定 14 个敏感参数排序,再经多次迭代运算以达到最优参数值(表 3)。

由表 3 可知,对窟野河流域径流模拟结果敏感的 14 个参数中,最敏感参数为 SCS 径流曲线数 CN2;其次为主河道调蓄系数 ALPHA_BNK 和土壤湿容重 SOL_BD;另外土壤蒸发补偿系数 ESCO、土壤有效含水率 SOL_AWC 和主河道水力传导系数 CH_K2 对窟野河径流模拟均较为敏感。

表 3 窟野河流域 SWAT 模型参数敏感性排名

Table 3 Sensitivity ranking of SWAT model parameter in the Kuye River Basin

敏感性排序	参数名称	物理意义	参数范围	最优值
1	r_CN2.mgt	SCS 径流曲线数	-0.5~0.5	-0.399
2	v_ALPHA_BNK.rte	主河道调蓄系数	0~0.8	0.026
3	r_SOL_BD.sol	土壤湿容重	-0.5~0.5	0.281
4	v_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.01~1	0.225
5	r_SOL_AWC.sol	土壤有效含水率	-0.5~0.5	-0.213
6	v_CH_K2.rte	主河道水力传导系数	0~150	4.782
7	v_GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.124
8	r_SOL_K.sol	土壤饱和水力传导系数	-0.8~0.8	0.753
9	v_ALPHA_BF.gw	基流消退系数	0~1	0.728
10	v_EPCO.hru	植物蒸腾补偿系数	0.01~1	0.442
11	v_CH_N2.rte	主河道曼宁系数	0~0.3	0.095
12	v_GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	0~500	395.617
13	v_GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	0~5 000	115.147
14	v_SFTMP.bsn	降雪温度	-5~5	-0.864

注: r 为参数值乘以(1+率定值); v 为参数值由率定值替换。

将参数最优值代入 SWAT 模型后即可得到径流模拟结果(图 2),从时间上看,模拟径流与实际径流变化基本一致,对于峰值捕捉较为准确,模拟较好;而对于年内存在双峰值的情况,模拟较差,仅能模拟夏季汛期峰值。

经计算,模型率定期: $R^2=0.77$, $NS=0.76$;验证期: $R^2=0.87$, $NS=0.85$,表明 SWAT 模型径流模拟结果较好,适用于窟野河流域,可进行后续研究。

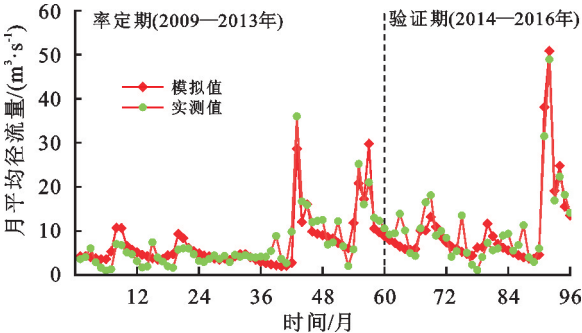


图 2 SWAT 模型径流模拟结果

Fig. 2 SWAT model runoff simulation results

3.2 土地利用变化

通过 ArcGIS 10.2 软件,对 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 期土地利用数据进行统计分析,得到各土地利用类型的面积占比及变化情况(图 3)。窟野河流域在 2000—2020 年主要用地为耕地、林地、草地及未利用地,其中草地占比最大,呈先减少后增加再减少的变化,整体减少 366.25 km²;其次为耕地,呈逐渐减少的趋势,共减少 227.15 km²;林地占比最小,呈现先增加后减少的变化,共增加 102.92 km²;未利用地呈先增加后减少再增加的变

化,整体共减少 19.98 km²。水域面积先减少后增加,共减少 40.44 km²,建设用地面积逐渐增加,共增加 600.90 km²。

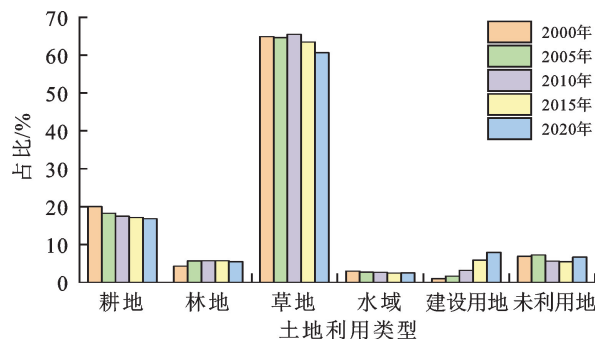


图 3 窟野河流域土地利用类型面积占比

Fig. 3 Area proportion of land use types in the Kuye River Basin

从单一土地利用动态度的角度来看,2000—2020 年,窟野河流域 6 种土地利用类型均有不同程度的变幅,其中年变化幅度最大的土地利用类型为建设用地,达 34.83%,整体呈逐年增加的趋势;其次为林地,年变化幅度为 1.38%;年变化幅度最小的土地利用类型为未利用地,为-0.17%;水域与草地的单一动态度分别为-0.79%, -0.32%,整体呈减少的变化趋势(表 4)。

表 4 2000—2020 年窟野河流域土地利用类型面积变化

Table 4 Change of land use type area in the Kuye River Basin from 2000 to 2020

土地利用 类型	面积/km ²					2000—2020 年单一 土地利用年变化 幅度/%
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
耕地	1 742.67	1 587.11	1 518.33	1 490.47	1 465.52	-0.65
林地	373.69	493.63	498.85	497.11	476.61	1.38
草地	5 645.81	5 623.20	5 698.95	5 523.96	5 279.56	-0.32
水域	257.34	232.45	229.84	211.56	216.90	-0.79
建设用地	86.25	141.04	274.24	511.04	687.15	34.83
未利用地	600.24	628.57	485.79	471.86	580.26	-0.17

为分析窟野河流域各土地利用类型的流转方向与数量,以 2000 年和 2020 年土地利用数据为基础,采用土地利用转移矩阵,通过 ArcGIS 10.2 软件的融合、相交和统计等功能得到窟野河流域 2000—2020 年土地利用的时空变化情况(表 5)。

可以看出,窟野河流域土地利用类型在时空变化上具有可逆性,各类型互有转入与转出。各地类转出量中,草地转出最多,共 701.30 km²,主要转为耕地和建设用地,分别为 128.58, 414.81 km²;其次为耕地,共转出 420.72 km²,主要转为草地和建设用地,分别为 247.77, 98.06 km²;各地类转入量中,建设用地转入最多,主要由耕地和草地转入,面积分别为 98.06, 414.81 km²。总体而言,耕地、林地和草地之

间的相互转化面积较大,建设用地面积增加最大,主要来自于耕地和草地。

表 5 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix from 2000 to 2020 km²

年份	土地利用 类型	2020					
		耕地	林地	草地	水域	建设 用地	未利 用地
2000	耕地	1 321.95	63.71	247.77	5.54	98.06	5.64
	林地	3.57	309.35	26.67	2.47	29.16	2.47
	草地	128.58	86.62	4 944.51	10.06	414.81	61.23
	水域	5.86	8.34	18.43	193.87	24.59	6.25
	建设用地	0.96	0.37	2.55	0.22	81.91	0.24
	未利用地	4.60	8.22	39.63	4.74	38.62	504.43

3.3 径流对土地利用变化的响应

为定量分析土地利用变化引起的径流变化,首先基于 2010 年土地利用数据对 SWAT 模型进行率定与验证,待模型调整完毕后,依次将 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年土地利用数据输入,同时为消除模型带来的计算误差,始终保持气象、土壤数据输入及各阈值等其他设置不变,进而得到 5 期土地利用情景下的年平均径流量(表 6)。

表 6 5 期情景下年平均径流量变化与实际对比

Table 6 Comparison between the change of average annual runoff and the actual situation under the five scenarios

年份	m ³ /s					
	2000	2005	2010	2015	2020	实际
2009—2013	6.92	6.99	7.06	7.33	7.63	7.05
2014—2016	10.05	10.15	10.22	10.62	10.99	10.77
2009—2016	8.09	8.18	8.25	8.57	8.89	8.44

从表 6 可以看出,5 期土地利用变化情景下,窟野河流域 2009—2016 年的年平均径流量总体上呈增加趋势,模拟径流与实测径流之间一致性较好,并且 5 种情景下的年平均径流量的变化趋势基本相同,表明所采用的模型参数能够代表窟野河流域。

2000—2020 年模拟的年平均径流量呈增加趋势,将研究时段内年平均径流量变化与土地利用的变化情况结合分析,在 2000—2020 年,随着城镇化进程不断加快,耕地和草地不断被建设用地所占用,导致面积不断减少,而流域内不透水面积则不断增加,减少地表径流的入渗效率和入渗量,从而直接造成地表径流增加。

基于 SWAT 模型模拟结果,用多年平均径流深来分析窟野河流域空间尺度下径流分布特征。首先对 SWAT 模型输出的子流域文件(output.sub)中的 WYLD 字段进行统计计算,再与子流域结合,得到子流域尺度上的年平均径流深,并基于 ArcGIS 10.2 软件得到窟野河流域年平均径流深空间分布(图 4)。

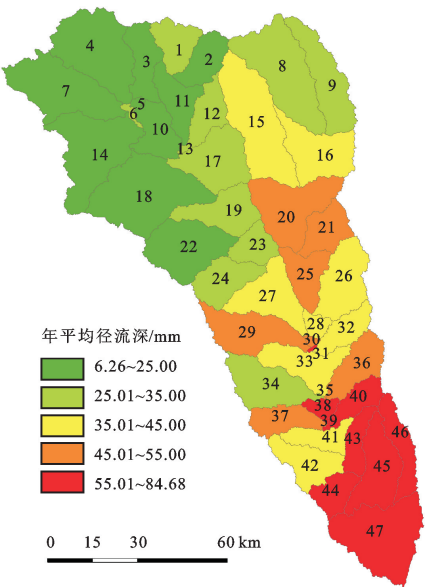


图 4 窟野河流域年平均径流深

Fig. 4 Average annual runoff depth of the Kuyue River Basin

由图 4 可知,窟野河流域年平均径流深空间分布存在较大差异,低径流深区域大部分分布在流域上游,在流域中游略有分布,高径流深区域均位于流域下游,并且流域东部区域径流深大于流域西部,整体呈现“上游低,下游高,西部低,东部高”的空间分布格局。

将这 5 期土地利用数据按相同时间间隔划分成 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年 4 个时间段,并计算出各时间段子流域尺度上的年平均径流深变化率。图 5 为 4 个时间段内窟野河流域空间尺度上年平均径流深的变化幅度。2000—2005 年流域上游及下游部分地区年平均径流深处于增加的状态,增幅在 0~393.04%;2005—2010 年、2010—2015 年除流域上中游部分以东地区、以西地区以外,流域大部分区域年平均径流深处于增加的状态,增幅分别为 0~80.90%,0~79.43%;2015—2020 年大部分区域位于减少的状态,降幅在 0~22.37%,但总体年平均径流深呈增加态势。

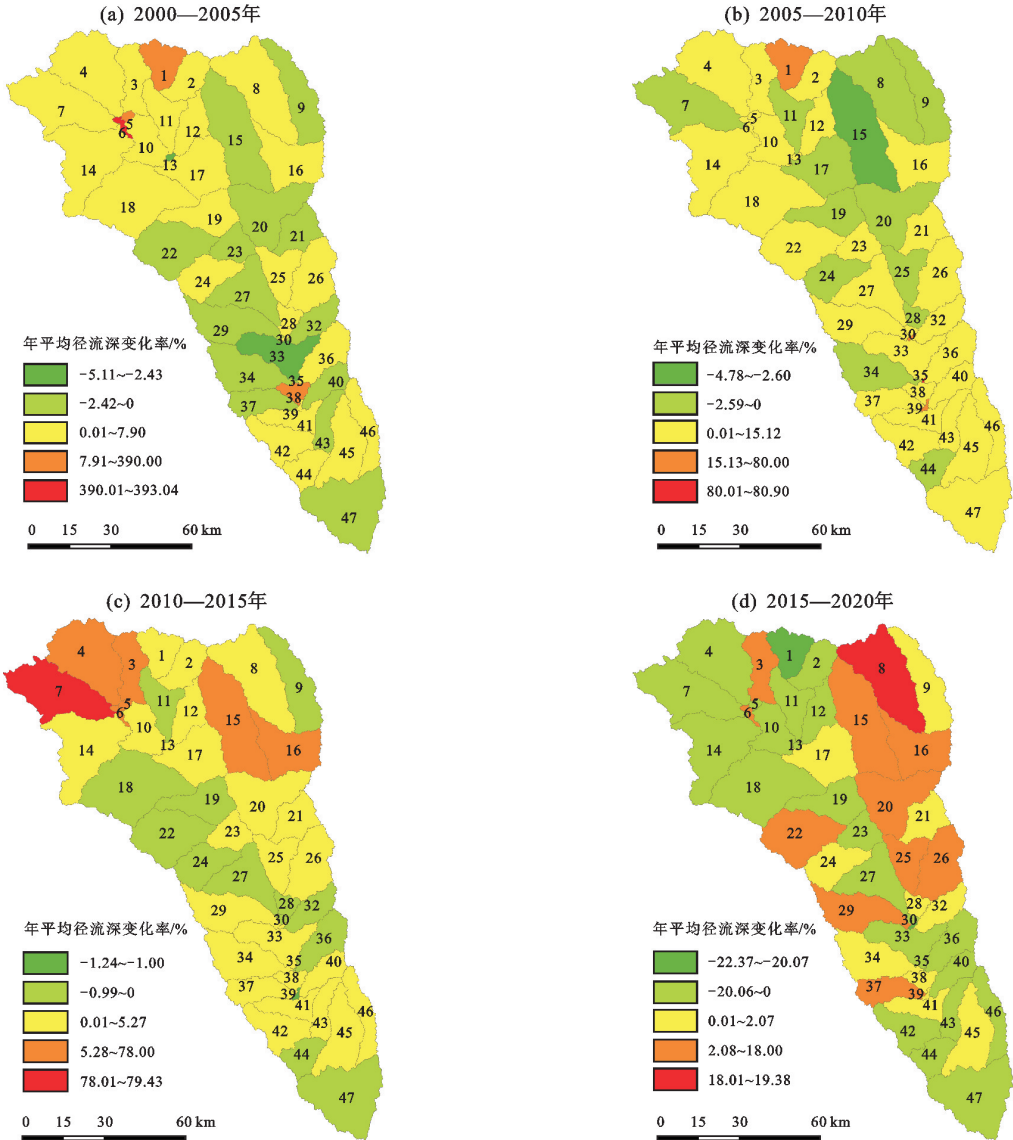


图 5 2000—2020 年年平均径流深变化率

Fig. 5 Change rate of average annual runoff depth from 2000 to 2020

为进一步研究各土地利用类型对径流的影响,选取 2000—2005 年增幅最大的 6 号子流域(393.04%)、2005—2010 年增幅最大的 35 号子流域(80.90%)、2010—2015 年增幅最大的 7 号子流域(79.43%)及 2015—2020 年增幅最大的 8 号子流域(19.38%)进行土地利用变化分析。

由表 7 可知,6 号子流域年平均径流深增幅主要由于草地面积减少和建设用地面积增加;35 号子流域年平均径流深增幅主要由于林地、草地面积减少和建设用地面积增加;7、8 号子流域年平均径流深增幅主要由于草地面积减少和建设用地面积增加。

综合来看,林地、草地面积减少会促进径流,建设用地面积增加同样会促进径流。2000—2020 年窟野河流域林地面积虽然增加(102.92 km²),但草地面积减少量(366.25 km²)和建设用地面积增加量(600.90 km²)大于前者,对径流的促进作用大于抑制作用,导致径流呈增加趋势。

3.4 土地利用及径流预测

本研究以 2015 年为初始年份,模拟得到 2020 年土地利用数据,并与 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,总体精度为 0.877 4,Kappa 系数为 0.802 1,模拟结果可靠性高,表明 PLUS 模型在窟野河流域适用性较好。

以 2020 年为初始年份,预测得到自然发展情景下窟野河流域 2025 年和 2030 年土地利用分布。由图 6 可知,2025 年和 2030 年,窟野河流域土地利用空间分布格局未发生显著变化,依旧以耕地和草地为主,这 2 种土地利用类型的面积之和占比分别为75.05%,

73.14%。2020—2030 年,窟野河流域的耕地、林地和草地的面积在不断减少,其减少面积分别为 19.33,28.54,358.48 km²;水域面积增加 14.74 km²。由于城镇化进程与采矿工作,建设用地快速扩张,扩张面积为 217.62 km²。

表 7 子流域土地利用类型面积比例
Table 7 Area proportion of land use type in the sub watershed %

子流域	土地利用类型	初始期面积比例	结束期面积比例	变化量
6	耕地	—	—	—
	林地	—	—	—
	草地	87.35	45.38	—41.97
	水域	12.65	10.84	—1.81
	建设用地	—	43.78	43.78
	未利用地	—	—	—
35	耕地	24.75	24.61	—0.14
	林地	11.69	—	—11.69
	草地	63.56	39.75	—23.81
	水域	—	—	—
	建设用地	—	35.64	35.64
	未利用地	—	—	—
7	耕地	—	—	—
	林地	—	—	—
	草地	100.00	86.94	—13.06
	水域	—	—	—
	建设用地	—	13.06	13.06
	未利用地	—	—	—
8	耕地	14.54	13.83	—0.71
	林地	—	—	—
	草地	85.46	74.13	—11.33
	水域	—	—	—
	建设用地	—	12.04	12.04
	未利用地	—	—	—

注：—表示无此土地利用类型。

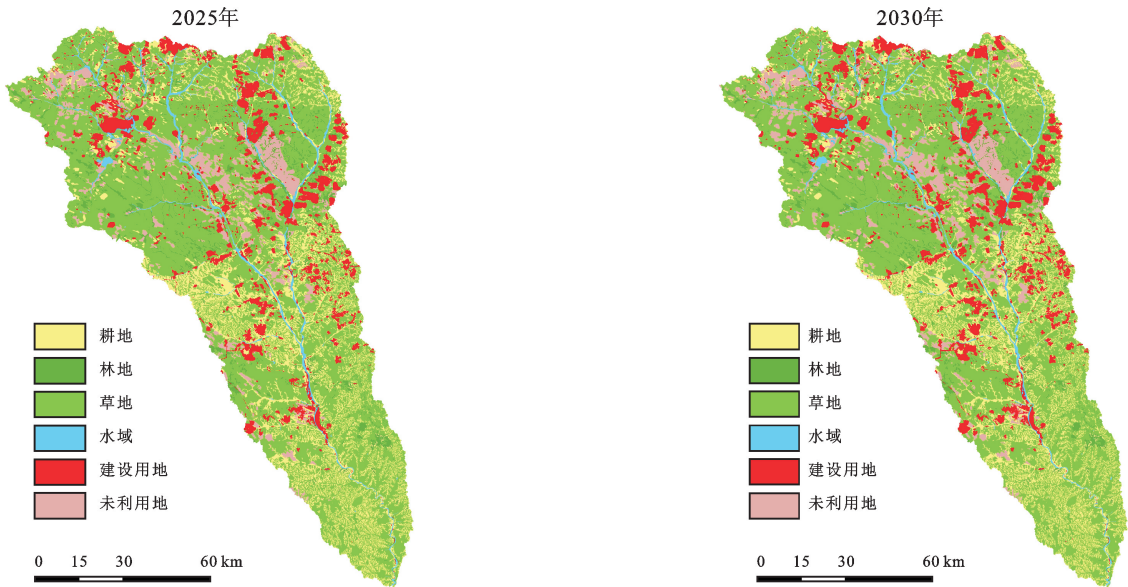


图 6 2025 年和 2030 年窟野河流域土地利用分布
Fig. 6 Land use distribution in the Kuye River Basin in 2025 and 2030
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

将预测得到的 2025 年和 2030 年 2 期土地利用数据输入 SWAT 模型中,同样保持土壤、气象数据及其他阈值设置不变,研究未来自然发展情景下径流的空间分布及变化趋势。由图 7 可知,2025 年和 2030 年 2 期土地利用情景下,窟野河流域年平均径流深整体空间分布格局基本一致,下游依旧是高径流深区

域,中游的 20,21,25,29,30 号子流域年平均径流深逐渐增大,流域上游年平均径流深仍然较小。未来自然发展情景下,下游的高径流深区域是需要防范的地区。2025 年和 2030 年,窟野河流域年平均径流量分别为 2.89×10^8 , $2.94\times 10^8\text{ m}^3$,相较 2020 年分别增加 3.21%,5.00%。

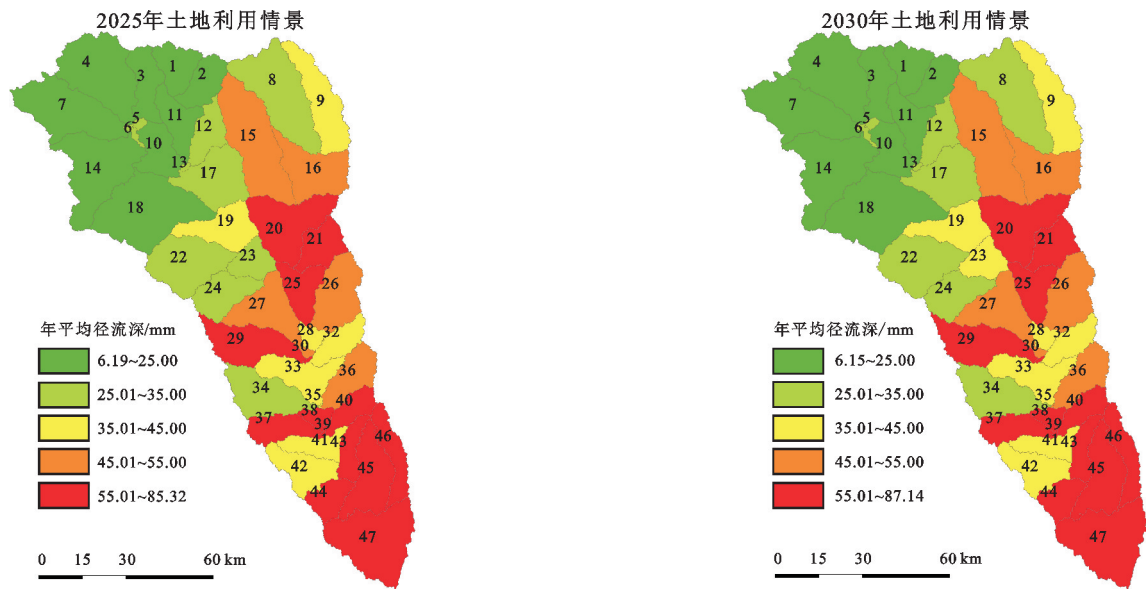


图 7 2025 年和 2030 年窟野河流域年平均径流深

Fig. 7 Average annual runoff depth in the Kuye River Basin in 2025 and 2030

4 讨论

水文模拟结果说明 CMADS+SWAT 模式适用于黄土高原地区,但本身也存在一定不足,主要体现在融雪和降水少的枯水期,对于这 2 种情况,SWAT 模型模拟效果较差。分析其原因主要有 2 点:一是 SWAT 模型是针对美国地区所开发的,其采用的 SCS 径流曲线法,对于蓄满产流区域模拟较理想,而对于类似黄土高原这样极易发生超渗产流的干旱半干旱区具有一定的局限性^[25];二是 SWAT 模型采用简单的度日因子算法计算融雪径流^[26],窟野河流域在 3 月因融雪往往会迎来一次峰值,此时导致 SWAT 模拟结果偏低,带来误差。

本研究得出林地、草地对径流有抑制作用,建设用地对径流有促进作用的结论,与王磊等^[27]、刘卫林等^[28]研究结果一致。究其原因在于:林地的植被冠层和草地的植被盖度可以显著提高对降水的截留能力,同时增加植被蒸腾量,起到减少径流的作用;而建设用地破坏土壤结构,影响土壤下渗,使地表易形成径流,起到增加径流的作用。

结合 PLUS 模型所预测的未来自然发展情景下土地利用数据,2025 年和 2030 年窟野河流域径流呈增加态势,该结论与赵雪岩等^[29]在无定河流域运用 CA—Markov 模型,得出未来径流增加的结果一致。在 2025 年和 2030 年,窟野河流域下游依然是高径流

深区,中游的 20,21,25,29,30 号子流域因建设用地的扩张,径流深也在相应增大。未来需防范这些地区,实施相应的水土保持措施,避免因地表径流增大而带来的土壤侵蚀。

本研究通过中国科学院提供的 30 m 土地利用数据,结合其他数据,基于 2 种模型分析了径流对土地利用变化的响应及未来土地利用情景下的径流变化。从数据本身上看,本研究使用的土地利用数据精度高、使用广泛^[30];从研究方法上看,SWAT、PLUS 模型在相关的研究中被众多学者使用,方法科学可靠;从研究结果上看,窟野河流域 2008—2016 年实测径流量呈显著增加趋势,说明降水和土地利用变化会导致径流量增加。本研究通过固定气象数据,得出土地利用变化促进径流增加的结果与实际情况相吻合,研究结果合理可信。

5 结论

(1)SWAT 模型率定期和验证期的 R^2 和 NS 均大于 0.7;PLUS 模型总体精度为 0.877 4,Kappa 系数为 0.802 1,2 个模型在窟野河流域适用性较好;

(2)2000—2020 年间,窟野河流域林地、建设用地面积分别增加 102.92,600.90 km^2 ,耕地、草地、水域和未利用地分别减少 277.15,366.25,40.44,19.98 km^2 ;

(3)窟野河流域年平均径流深整体呈现“上游低,下游高,西部低,东部高”的空间分布格局;

(4)在保证其他输入数据不变的情况下,改变土地利用数据,情景分析结果表明:林地、草地面积减少会促进径流,建设用地面积增加同样会促进径流;

(5)自然发展情景下,2025 年和 2030 年窟野河流域土地利用空间分布格局未发生显著变化,仍以耕地和草地为主,年平均径流量分别较 2020 年增加 3.21%,5.00%。

参考文献:

- [1] 张冠华,张平仓,张晓峰.三峡库区土地利用/覆被变化及其驱动力研究进展[J].中国水土保持,2017(5):47-51.
ZHANG G H, ZHANG P C, ZHANG X F. Research progress on land use/cover change and its driving forces in the Three Gorges Reservoir area[J].Soil and Water Conservation in China,2017(5):47-51.
- [2] 程程.基于 SWAT 模型的土地利用和土地覆被变化及气候变化对元江流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):52-59.
CHENG C. Impacts of land use/land cover change and climate change on the runoff in Yuan River Basin based on SWAT model[J].Science of Soil and Water Conservation,2020,18(5):52-59.
- [3] KINDU M, SCHNEIDER T, DÖLLERER M, et al. Scenario modelling of land use/land cover changes in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian Highlands[J].The Science of the Total Environment,2018,622/623:534-546.
- [4] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.气候变化、土地利用/覆被变化及 CO₂ 浓度升高对滦河流域径流的影响[J].水科学进展,2014,25(1):10-20.
ZENG S D, XIA J, DU H, et al. Effects of climate change, land use and cover change and CO₂ enrichment on runoff: A case study of the Luanhe River Basin[J].Advances in Water Science,2014,25(1):10-20.
- [5] 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.
- [6] WORKU T, KHARE D, TRIPATHI S K. Modeling runoff-sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed[J].Environmental Earth Sciences,2017,76(16):e550.
- [7] 史培军,袁艺,陈晋.深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J].生态学报,2001,21(7):1041-1049,1217.
SHI P J, YUAN Y, CHEN J. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China[J].Acta Ecologica Sinica,2001,21(7):1041-1049,1217.
- [8] 席梅竹,赵中秋,吴攀升,等.基于改进 CA-Markov 模型的滹沱河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J].西北林学院学报,2021,36(4):150-158.
XI M Z, ZHAO Z Q, WU P S, et al. Changes and predictions of land use in mountain section of the Hutuo River Basin based on improved CA-markov model[J].Journal of Northwest Forestry University,2021,36(4):150-158.
- [9] 汤佳,胡希军,韦宝婧,等.基于 FLUS 模型的流域土地利用变化预测及水文响应评估[J].长江科学院院报,2022,39(4):63-69.
TANG J, HU X J, WEI B J, et al. Land use change prediction and hydrological response assessment of watershed based on FLUS model[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(4):63-69.
- [10] 梁友嘉,徐中民,钟方雷.基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J].地理研究,2011,30(3):564-576.
LIANG Y J, XU Z M, ZHONG F L. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou district of Zhangye city[J].Geographical Research,2011,30(3):564-576.
- [11] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J].Computers Environment and Urban Systems,2020,85:e101569.
- [12] ZHAI H, LV C Q, LIU W Z, et al. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000—2019[J].Remote Sensing,2021,13(16):e3331.
- [13] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等.基于 PLUS-SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J].干旱区研究,2022,39(4):1246-1258.
JIANG X F, DUAN H C, LIAO J, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS-SD coupling model[J].Arid Zone Research,2022,39(4):1246-1258.
- [14] 邢华.基于主体模型的窟野河流域水资源配置研究[D].西安:西安理工大学,2022.
XING H. Research on water resources allocation in Groye River Basin based on subject model[D].Xi'an: Xi'an University of Technology,2022.
- [15] 刘强,蔡学娅,刘君怡,等.黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析[J].水土保持研究,2022,29(4):68-74.
LIU Q, CAI X Y, LIU J Y, et al. Variation characteristics and causes of runoff-sediment relationship in Kuye River Basin in the middle reaches of the Yellow River[J].Research of Soil and Water Conservation,

- 2022,29(4):68-74.
- [16] 孟现勇,王浩,刘志辉,等.基于 CLDAS 强迫 CLM3.5 模式的新疆区域土壤温度陆面过程模拟及验证[J].生态学报,2017,37(3):979-995.
- MENG X Y, WANG H, LIU Z H, et al. Simulation and verification of land surface soil temperatures in the Xinjiang Region by the CLM3.5 model forced by CLDAS [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (3): 979-995.
- [17] 中华人民共和国水利部水利局.中华人民共和国水文年鉴:黄河流域水文资料[Z].2010.
- Bureau of Water Resources, Ministry of Water Resources, People's Republic of China. *Hydrological yearbook of the People's Republic of China: Hydrological data of the Yellow River Basin*[Z].2010.
- [18] 张蕾,卢文喜,安永磊,等.SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展[J].生态环境学报,2009,18(6):2387-2392.
- ZHANG L, LU W X, AN Y L, et al. Advances in non-point source pollution modelling with SWAT[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18 (6): 2387-2392.
- [19] BOUGHTON W C. A review of the USDA SCS curve number method[J].*Soil Research*,1989,27(3):e511.
- [20] 王钰双,陈芸芝,卢文芳,等.闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J].水土保持学报,2020,34(6):30-36.
- WANG Y S, CHEN Y Z, LU W F, et al. The hydrological response to different land use scenarios in the Minjiang River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2020,34(6):30-36.
- [21] 王佳楠,张志.基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J].西北林学院学报,2022,37(3):139-148,179.
- WANG J N, ZHANG Z. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the Qaidam Basin based on markov-PLUS model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37 (3): 139-148,179.
- [22] 张大川,刘小平,姚尧,等.基于随机森林 CA 的东莞市多类土地利用变化模拟[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):29-36,127.
- ZHANG D C, LIU X P, YAO Y, et al. Simulating spatiotemporal change of multiple land use types in Dongguan by using random forest based on cellular automata[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016,32(5):29-36,127.
- [23] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.
- WANG B S, LIAO J F, ZHU W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(12):4284-4298.
- [24] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
- HU F, ZHANG Y, GUO Y, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J].*Arid Land Geography*,2022,45(4): 1125-1136.
- [25] 王丽霞,吕亮,刘招,等.基于 CMADS 气象数据集的延河流域径流量变化模拟及分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):73-80.
- WANG L X, LV L, LIU Z, et al. Simulation and analysis of runoff changes in Yanhe River Basin based on CMADS [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022,36(1):73-80.
- [26] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等.基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(6):139-144.
- YAO H F, SHI C X, SHAO W W, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the Xiliugou in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015,29(6):139-144.
- [27] 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.
- [28] 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, LI 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.
- [29] 赵雪岩,张鑫,孙媛.2005—2030 年无定河流域土地利用变化对径流的影响[J].人民黄河,2023,45(3):24-31.
- ZHAO X Y, ZHANG X, SUN Y. Effects of different land use changes on runoff in Wuding River Basin in 2005—2030 period [J]. *Yellow River*,2023,45(3):24-31.
- [30] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL].资源环境科学与数据中心[2018].<http://www.resdc.cn/DOI>.
- XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China Multi-Period Land Use Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC) [DB/OL]. *Resources and Environmental Science and Data Center*[2018].<http://www.resdc.cn/DOI>.