

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.030

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.030

高浩淞, 秦富仓, 乌义汉, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的窟野河流域水源涵养量时空演变与预测[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 417-428.

GAO Haosong, QIN Fucang, WU Yihan, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of water conservation capacity in Kuye River basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 417-428.

基于InVEST与CA-Markov模型的窟野河流域 水源涵养量时空演变与预测

高浩淞¹, 秦富仓^{1,2}, 乌义汉¹, 董晓宇¹, 周永琴³

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010018;

3. 鄂尔多斯市东胜区生态保护与发展协调服务中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 以窟野河流域为研究区, 旨在探讨窟野河流域土地利用格局的自然演变如何驱动水源涵养功能的变化。[方法] 通过构建综合评估框架, 重点解析二者之间的相互作用与权衡机制, InVEST模型与元胞自动机-马尔可夫, CA-Markov模型分析窟野河流域2000—2020年的水源涵养状况, 并对2020—2035年的变化趋势进行预测。[结果] 1) 窟野河流域2000—2020年的产水量情况整体呈逐年增长趋势, 其中2020年的产水量最大, 为12.60亿m³, 2000年的产水量最小, 为5.87亿m³。不同土地利用类型的单位面积产水深度表现为耕地、草地和林地产水深度较高, 建设用地和裸地产水量较低。2) 窟野河2000年、2005年、2010年、2015年、2020年水源涵养量分别为1.06亿、1.32亿、1.88亿、2.04亿、2.28亿m³, 林地、草地和耕地的水源涵养量大, 其他土地利用类型水源涵养量小。对水源涵养量解释力最强的是降雨, 在双因子交互作用下降雨和土地利用类型的解释力最大, 其次为土地利用类型与坡度和高程。3) 预测期内土地利用的总体格局与2020年相比保持稳定, 具体表现为草地持续减少而建设用地不断扩张。水源涵养能力的空间分布也与2020年状况基本一致, 呈现东南多西北少的分布特征, 但总涵养量呈现增长速率降低并趋近于平缓趋势, 流失量也延续2000—2020年逐年增多的趋势。[结论] 窟野河流域2000—2020年产水量与水源涵养量均逐年增长, 林地、草地、耕地是核心贡献类型, 且产水量与土地利用类型的交互作用对水源涵养影响最大。在自然演变情景下预测2020—2035年流域将延续“草地缩减、建设用地扩张”趋势, 水源涵养总量增长趋于停滞, 水源流失量持续上升。为保障北方缺水地区的生态安全与水资源的可持续利用, 后续工作应着力于林地和草地的保护修复, 以此优化土地利用结构。

关键词: 水源涵养; 土地利用; InVEST模型; CA-Markov模型; 窟野河流域

中图分类号: S271

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0417-12

Spatiotemporal Evolution and Prediction of Water Conservation Capacity in Kuye River Basin Based on InVEST and CA-Markov Models

GAO Haosong¹, QIN Fucang^{1,2}, WU Yihan¹, DONG Xiaoyu¹, ZHOU Yongqin³

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010018, China; 3. Ecological Protection and Development Coordination Service Center of Dongsheng District, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] Taking the Kuye River basin as the study area, this study aims to investigate how the natural evolution of land use patterns drives changes in water conservation functions within the river basin. [Methods] By constructing a comprehensive assessment framework, this study focused on analyzing the interactions and trade-off mechanisms between the two. The InVEST model and the Cellular Automata-Markov

收稿日期: 2025-09-11

修回日期: 2025-10-27

录用日期: 2025-11-03

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-31

资助项目: 内蒙古自然科学基金重大项目(2021ZD07); “科技兴蒙”行动重点专项(2022EEDSKJXM005-01)

第一作者: 高浩淞(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 2576076138@qq.com

通信作者: 秦富仓(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: qinfca@126.com

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

(CA-Markov) model were used to analyze the water conservation status in the Kuye River basin from 2000 to 2020 and to predict the variation trends from 2020 to 2035. [Results] 1) Water yield in the Kuye River basin exhibited an overall increasing trend from 2000 to 2020. The highest water yield was 1.26 billion m^3 in 2020, and the lowest was 587 million m^3 in 2000. The water yield per unit area for different land use types showed higher values for cultivated land, grassland, and forest land, while lower water yields were observed in construction land and bare land. 2) The water conservation capacity of the Kuye River basin in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 was 106 million m^3 , 132 million m^3 , 188 million m^3 , 204 million m^3 , and 228 million m^3 , respectively. Forest land, grassland, and cultivated land exhibited large water conservation capacities, while other land use types had small capacities. Rainfall exhibited the strongest explanatory power for water conservation capacity. In two-factor interactions, the combination of rainfall and land use type showed the greatest explanatory power, followed by the interaction of land use type with slope and elevation, respectively. 3) The overall land use pattern during the prediction period remained stable compared with that in 2020, specifically manifested as a continuous decrease in grassland and ongoing expansion of construction land. The spatial distribution of water conservation capacity remained largely consistent with that in 2020, showing distribution characteristics of higher values in the southeast and lower in the northwest. However, the total conservation capacity showed a declining growth rate and tended to stabilize, and water loss continued the increasing trend observed from 2000 to 2020. [Conclusion] Both the water yield and water conservation capacity in the Kuye River basin increased year by year from 2000 to 2020. Forest land, grassland, and cultivated land are the core contributing types, and the interaction between water yield and land use type has the greatest impact on water conservation. Under the natural evolution scenario, it is predicted that the river basin will continue the trends of "grassland reduction and construction land expansion" from 2020 to 2035. The total water conservation capacity is expected to stagnate, and water loss will continue to rise. To ensure ecological security and the sustainable use of water resources in water-scarce northern regions, future efforts should focus on the protection and restoration of forest land and grassland, thereby optimizing the land use structure.

Keywords: water conservation; land use; InVEST model; CA-Markov model; Kuye River basin

Received: 2025-09-11

Revised: 2025-10-27

Accepted: 2025-11-03

Online(www.cnki.net): 2025-12-31

水源涵养能力作为维系区域水平衡与保障水安全的关键生态系统服务,其精准量化与动态预测对于生态脆弱区的水资源管理至关重要^[1-2]。当前,国际上对水源涵养量的量化评估主要形成3类技术路径,基于分布式水文模型的物理机制模拟法,如SWAT、VIC模型等,其具有明确的物理基础,能精细刻画“降水-入渗-产流”过程,但数据需求高、建模复杂;其二,基于生态系统服务模型的经验评估法,如InVEST模型,其参数需求相对简化,擅长服务的空间显式评估,但物理机制相对薄弱,精度依赖于参数本地化;其三,基于自然解决方案的“海绵体”效能评估法,强调通过恢复自然生态系统来增强景观的蓄水能力,是当前国际研究的前沿。聚焦于窟野河流域,其水源涵养功能的维系面临着特殊的挑战与科学问题。该流域地处黄土高原与毛乌素沙地过渡带,属于黄河中游水土流失严重、水资源矛盾突出的典型生态脆弱区。近年来,高强度煤炭开采、退耕还林还草等人类活动与气候变化交织,引发剧烈的土

地利用转型,直接威胁着流域的水文过程与水源涵养功能^[3-4]。尽管已有研究针对该区域的水土流失、产沙或水资源总量展开探讨,但对“水源涵养”这一关键生态功能的时空演变规律、驱动机制及未来情景模拟仍缺乏系统性的解析。现有研究^[5-7]或局限于静态评估,或使用的模型参数未能充分考虑流域内降水入渗、土壤持水等水文过程的特殊性,导致评估结果的准确性与预见性不足。鉴于此,本研究并非简单地套用InVEST模型,而是致力于通过方法论的耦合与优化,以解决窟野河流域水源涵养评估中的具体科学问题,创新性地将在InVEST模型^[8-9]与CA-Markov模型^[10-11]进行耦合,旨在实现从历史回溯(2000—2020年)到未来预测(至2035年)的动态评估。更为关键的是,本研究针对窟野河流域的下垫面特性,对InVEST模型的关键参数(如Z系数、径流系数)进行深入的本地化率定,并利用温家川水文站的实测径流数据对产水量模拟结果进行严格验证,旨在弥补传统InVEST模型在物理机制上的不足,显

著提升其在本区域的模拟精度与可靠性。本研究的意义在于:第一,通过构建“参数本地化-模型验证-动态预测”的研究框架^[12],为窟野河流域的水源涵养功能评估提供更可靠的量化依据;第二,明晰土地利用变化对水源涵养功能的驱动路径,为黄河流域的国土空间优化、生态修复工程布局(如精准落实退耕还林还草)提供直接的科学支撑,服务于黄河流域生态保护和高质量发展的国家战略^[13]。InVEST 模型适用于生态系统服务空间显式评估,CA-Markov 模型在土地利用变化预测中表现稳健,二者耦合能同时捕捉功能与结构演变。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

窟野河是黄河中游的一条支流,区域平均海拔 1 153 m(图 1)。流域位于黄土高原干旱-半干旱过渡带,上游以风沙地貌为主,植被稀疏,中下游为黄土丘陵沟壑区,植被以草地、灌丛为主,近年来通过大规模造林、种草及沙棘等耐旱灌木的栽植,植被覆盖度从约 49% 提升至约 57%^[14]。该流域水土流失极为严重,受侵蚀面积约 8 244 km²,占总面积的 95%;年平均土壤侵蚀模数从 1989 年的 3 860.85 t/(km²·a)下降至 2011 年的 2 423.72 t/(km²·a),侵蚀强度主要集中在砒砂岩丘陵沟壑区^[15]。

自 20 世纪 50 年代起,流域先后建设小型坝库,1970—1979 年启动大规模沟道-坝系、梯田、造林、种草等综合治理,累计完成水土保持措施面积约 11.71 万 hm²(约占流域面积的 14.2%),以温家川站(控制面积 8 645 km²)为核心控制单元,针对砒砂岩丘陵、沙质丘陵、黄土丘陵三大地貌单元布局沟道-坝系、沙棘、灌

木等生态修复工程^[13]。流域自 1978 年大规模煤炭开采以来,年平均采煤量从 2.9×10⁵ t 提升至 5.4×10⁷ t,导致基流深仅 24.7 mm,仅占年径流量的 38.0%。枯水期出现断流,水资源供需矛盾日益突出,加之降雨稀少且集中、植被稀疏,水土流失剧烈,生态系统对降雨波动和人类活动高度敏感,表现为“水资源矛盾突出、生态敏感性高”^[16]。水系结构并不复杂,整体呈树状分布,两岸支流普遍较短小。流域内较大支流共有 21 条,其中东北岸分布着 9 条,从径流情况看,窟野河多年平均径流总量为 7.59 亿 m³,河水补给主要依赖降水,这部分占比约 70.3%,剩下 29.7% 的年径流量则来自地下水补给。

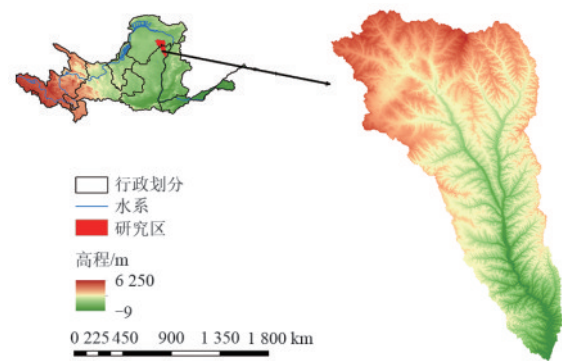


图 1 窟野河流域概况

Fig. 1 Overview of Kuye River basin

1.2 数据来源

本研究收集 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年共 5 期数据,所有空间数据均统一为 Albers 等面积圆锥投影,重采样为 30 m 分辨率栅格数据。根系深度与 K_c 系数参照于 InVEST 模型使用手册。详细数据来源、描述及用途见表 1。

表 1 数据来源及用途

Table 1 Data sources and purposes

| 数据类别 | 数据来源 | 分辨率/时间 | 用途 |
|------------------|---|------------------|---------------|
| 土地利用 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn) | 30 m/2000—2020 年 | 土地利用变化分析、模型输入 |
| 气象数据(降水、潜在蒸散) | 中国气象数据网(http://data.cma.cn/) | 站点数据/2000—2020 年 | InVEST 模型输入 |
| NDVI | 中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn) | 30 m/2000—2020 年 | 植被状况分析 |
| 土壤数据 | 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn) | 1 km | 计算土壤理化属性、PAWC |
| 根系限制层深度与植物可利用含水量 | HWSD 世界土壤数据库(https://www.fao.org) | 1 km | 计算 AWC |
| DEM | ASTER GDEM | 30 m | 地形分析、水流方向计算 |
| 径流数据 | 黄河水利委员会温家川水文站 | 年径流量/2000—2020 年 | 产水量模型率定与验证 |

注:PAWC (plant available water content)为植物可利用水含量;AWC (available water capacity)为植被有效可利用水。

计算窟野河流域产水量前,需要对植物可利用水(PAWC)与 Z 系数进行提前调整。PAWC 是由研究区的土壤数据计算得出,计算公式为:

$$PAWC = 54.509 - 0.132C_{sand} - 0.003C_{sand}^2 - 0.055C_{silt} - 0.006C_{silt}^2 - 0.738C_{clay} + 0.007C_{clay}^2 - 2.699c + 0.501c \quad (1)$$

式中:PAWC为植被可利用水率,%,即土壤有效水分体积分数,与土壤结构、有机质质量分数、土壤体积质量因子有关,为田间持水量和永久萎蔫系数的差值, C_{sand} 、 C_{silt} 、 C_{clay} 和 c 分别为土壤中砂粒、粉粒、黏粒和有机质质量分数。

2 研究方法

水源涵养量计算通过采用InVEST模型计算出研究区的年产水量,采用基于地形指数、地表流速系数和土壤饱和导水率的耦合算法,实现水源涵养量的空间量化评估。土地利用预测依靠于多指标评价(multi-criteria evaluation, MCE)模型和CA-Markov模型,对研究区进行空间自相关分析,从而更好地从栅格的角度观察到研究区水源涵养量的相关性及哪些地区需要得到优先关注。驱动因子指标的选取基于生态系统水源涵养功能形成的“气候-地形-植被-土壤-人类活动”综合驱动框架,系统性选取6个关键驱动因子(DEM、降雨量、潜在蒸散发量、坡度、NDVI、土地利用),全面揭示窟野河流域水源涵养量空间分异的成因。

2.1 基于InVEST模型计算产水量

InVEST模型产水量模块是一种基于水量平衡法的估算方法,该方法根据水循环原理,结合年降水量、年潜在蒸散量、植物根系限制层深度、PAWC(植被可利用水率)、土地利用及流域等参数,计算研究区产水量^[14]。其计算公式为:

$$Y = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \times P \quad (2)$$

$$\frac{AET}{P} = \frac{1 + W \frac{PET}{P}}{1 + W \frac{PET}{P} + \frac{P}{PET}} \quad (3)$$

式中: Y 为产水量,mm; AET 为实际蒸散量,mm; P 为降水量,mm; PET 为潜在蒸散发量,mm; W 为非物理参数,反映自然气候条件下流域土壤和植被等实际状况^[15]。

$$W = Z \times \frac{AWC}{P} \quad (4)$$

式中:AWC为植被有效可利用水,mm,表示植被生长所利用的土壤的水量,其值由土壤质地和有效土壤深度决定; Z 为Zhang系数,是利用流域实测径流量进行数据校验后获得的经验参数。本研究Zhang系数经校验取4.8。 Z 系数源于Budyko水热耦合平衡理论,描述降水、潜在蒸散发与实际蒸散发之间的平衡关系,最终影响产水量(即径流)的计算。 Z 系数受季节性降雨影响,在1~30浮动,本文以温家川站2000—2020年实测径流数据为参考标准,多次改变 Z 值从而获得最适合当前流域的 Z 系数,最终将 Z 值定为4.8。

$$AWC = \min(SDP, RDP) \times PAWC \quad (5)$$

式中:SDP为土层深度,mm;RDP为根系深度,mm,是指根系生物量的90%所能达到的土壤最大延伸深度。

2.2 水源涵养量计算

$$\text{Retention} = \min\left(1, \frac{249}{\text{velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_x \quad (6)$$

式中:Retention为单位面积水源涵养量,mm;velocity为流速系数;TI为地形指数,由公式(7)计算得到; K_s 为土壤饱和导水率,mm/d,根据土壤的黏粒、沙粒和粉粒质量分数计算得到^[15]。

$$\text{TI} = \lg \frac{\text{Drainagearea}}{\text{soil_depth} \times \text{percent_slope}} \quad (7)$$

式中:Drainagearea为集水区栅格数量;percent_slope为百分比坡度;soil_depth为土层深度,mm。

2.3 不同土地利用类型径流系数

研究采用径流系数综合参考InVEST模型用户手册建议范围,结合窟野河流域下垫面特征及相关区域研究成果进行本地化调整^[17-18]。其中,耕地(0.07)、林地(0.02)和草地(0.12)的系数依据手册推荐的典型区间,并参照针对黄土高原地区水文观测的研究^[19-20]进行微调;建设用地与未利用地则因其地表透水性极差的特点,被赋予接近理论最大值(1.00),以反映其几乎完全产流的特性。其中,水域的径流系数设定为0,基于水文学的基本共识,即在流域尺度水文模拟中,河流、湖泊等水体被视为径流的汇集区与传输载体,其本身并不作为新的产流源,这符合模型原理且为相关研究的通用做法。所有参数在初步确定后,均以流域出口水文站实测径流数据为约束进行整体校验,以确保参数组合在流域尺度上的综合合理性^[21]。

2.4 地理探测器

地理探测器模型是一款空间分析工具,主要用于检测空间变量的异质性,揭示背后的驱动因素,被广泛应用于属性的空间特征分析。探测器可量化各驱动因子对地理数据空间异质性的解释度,结果用 q 统计量表示, q 值的含义为自变量解释 $q \times 100\%$ 的因变量。具体公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (8)$$

式中: q 为一个影响因子对于生态系统服务功能时空变化的解释力; h 为因子的分类或分区数; L 为影响因子的样本数; N_h 和 N 分别为 h 类和整个区域的单元数; σ_h^2 和 $N\sigma^2$ 为 h 和整个区域的方差。2个因子之间的关系见表2。

表 2 交互作用类型及判别依据
Table 2 Interaction types and discrimination criteria

| 判别依据 | 交互作用 |
|--|----------|
| $q(A \cap B) < \min[q(A), q(B)]$ | 非线性减弱 |
| $\ln[q(A), q(B)] < q(A \cap B) < \max[q(A), q(B)]$ | 单因子非线性减弱 |
| 若 $q(A \cap B) > \max[q(A), q(B)]$ | 双因子增强 |
| $q(A \cap B) = q(A) + q(B)$ | 相互独立 |
| $q(A \cap B) > q(A) + q(B)$ | 非线性增强 |

2.5 土地利用预测

土地利用预测以 CA-Markov 模型为主;其中,适应性图集通过 MCE 模型生成,而预测结果的精度则通过 Kappa 一致性检验进行评估。

1) CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是一种结合元胞自动机 (cellular automata) 和马尔可夫链 (markov chain) 的混合模型,主要用于模拟和预测土地利用/土地覆盖等时空动态变化过程。通过整合时间序列上的状态转移概率和空间邻域效应,能够更准确地刻画复杂系统的时空演变规律,且下一时刻的状态仅取决于当前状态,与更早的历史无关。对土地演化状况进行预测的具体公式为:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \tag{9}$$

式中: S_t, S_{t+1} 分别为 $t, t+1$ 时刻的土地利用状态; P_{ij} 为土地利用类型转移概率矩阵,计算公式为:

$$\begin{matrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{matrix} \tag{10}$$

式中: $0 \leq P_{ij} \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$; n 为土地利用类型。

$$A_{t+1} = f(A_t, N) \tag{11}$$

式中: A_{t+1}, A_t 分别为 $t+1, t$ 时刻的元胞有限离散的集合状态; N 为元胞的邻域; f 为局部空间的元胞转化规划函数。

2) Kappa 一致性检验

采用 Kappa 系数对预测的土地利用进行检验,计算公式为:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \tag{12}$$

式中: P_0 为正确模拟的比例; P_c 为模型随机情况下的正确预测比例; P_p 为理想情况下正确预测的比例^[13]。

3) MCE 模型

MCE 模型是一种在多目标决策中依据不同准则从一系列备选方案中确定最优解的分析方法。本研究采用 MCE 模型中的加权线性组合法^[16],计算方法为:

$$B = \sum_{i=1}^n \omega_i X_i \prod C_j \tag{13}$$

式中: B 为土地利用类型的适宜性指数; ω_i 为第 i 个适宜性因子的权重指数; X_i 为第 i 个因子的标准化得分,该值通过 IDRISI 平台的 Fuzzy 模块统一规范化至 0~255,数值越高,表示适宜性越强; C_j 为约束条件 j 的数值,取值为 0,表示禁止流转;取值为 1,表示允许流转。

2.6 模型验证与精度评价

1) 产水量验证:基于窟野河流域温家川站 2000—2020 年实测径流数据,对 InVEST 模型产水量模拟结果进行验证。采用试错法,以 2020 年径流量为基准,通过调整 Z 值使模拟径流量与实测值误差最小化,最终取值为 4.80,此时纳什效率系数 (NSE) 达到 0.82,决定系数 (R^2) 为 0.85,满足精度要求。

2) CA-Markov 模型验证:利用 IDRISI 软件的 CROSSTAB 功能进行计算,基于 2015 年的土地利用数据,预测 2020 年的格局,然后与真实的 2020 年土地利用图进行对比,计算 Kappa 系数为 0.952 3。根据常用标准,Kappa 系数超过 0.750 0 意味着数据一致性良好,表明该模型的预测效果可靠,可应用于水源涵养预测工作。

3 结果与分析

3.1 产水量分析

由图 2 可知,2000—2020 年窟野河流域产水量的空间分布格局呈显著异质性特征,其空间分异表现为“南高北低、东高西低”的总体趋势,与区域内降雨量和潜在蒸发量的空间格局具有高度耦合性^[22]。具体而言,南部地区由于受季风气候影响更为显著,年平均降雨量可达 450~500 mm,远高于北部地区 200~300 mm 的水平,是形成产水量梯度差异的主导因子。同时,潜在蒸发量呈自东南向西北递减趋势,进一步强化产水量空间分异的双重驱动机制。对 InVEST 模型产水量模块的验证中,本研究利用温家川水文站 2000—2020 年的实测年径流数据进行率定与验证。以 2000—2015 年为率定期,2016—2020 年为验证期。结果显示,率定期的纳什效率系数 (NSE) 为 0.82,决定系数 (R^2) 为 0.85;验证期的 NSE 为 0.76, R^2 为 0.80。

表明模型模拟效果良好,模拟值与实测值具有较高的一致性,模拟结果可靠。对比2000年与2020年栅格数据,北部产水量得到明显提升,是因为2000年实施水

土保持工程后,累计治理面积达11.71万 hm^2 ,植被覆盖率提升35.05%,显著增强土壤持水能力,使得北部产水量较基准期提升约18.60%。

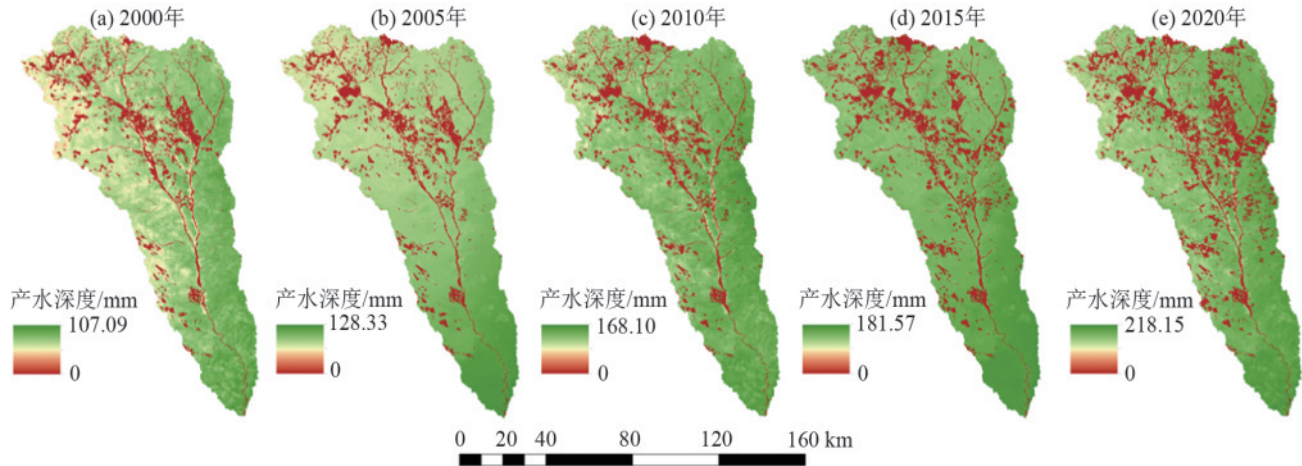


图2 窟野河流域产水量深度分布

Fig. 2 Depth distribution of water yield in Kuye River basin

3.2 不同土地利用产水量功能及动态

在ArcGIS平台中,通过叠加分析窟野河流域的产水量栅格与土地利用类型栅格,提取得到2000年、2005年、2010年、2015年及2020年各土地利用类型对应的产水量数据。由表3可以看出,研究区不同用地类型下的产水量与产水深度差异明显,耕地、草地、林地产水深度较高,建设用地、水体、裸地的产水深度较低,其

中耕地的产水深度从2000年的77.81 mm增加到2020年的175.25 mm,建设用地由2000年的23.53 mm增加为2020年的126.81 mm,呈显著增长趋势。从总产水量来看,草地的总产水量从2000年的42 348.17万 m^3 增加到2020年的91 200.68万 m^3 ,呈显著增长趋势。林地和耕地的总产水量也呈增长趋势,但幅度相对较小,其余用地类型的总产水量变化不大。

表3 2000—2020年窟野河流域各用地类型平均产水量

Table 3 Average water yield of different land use types in Kuye River basin from 2000 to 2020

| 土地利用类型 | 单位面积平均产水深度/mm | | | | | 总产水量/(万 m^3) | | | | |
|--------|---------------|-------|--------|--------|--------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 |
| 耕地 | 77.81 | 97.35 | 135.98 | 151.46 | 175.25 | 12 247.12 | 15 447.32 | 20 533.51 | 22 550.98 | 25 572.55 |
| 林地 | 66.14 | 82.20 | 119.18 | 134.02 | 153.96 | 3 270.41 | 4 086.43 | 5 946.91 | 6 697.58 | 7 337.39 |
| 草地 | 75.26 | 92.61 | 134.05 | 148.26 | 172.83 | 42 348.17 | 52 407.98 | 76 422.77 | 82 484.61 | 91 200.68 |
| 水体 | 2.03 | 1.99 | 1.55 | 2.27 | 2.64 | 47.31 | 51.41 | 37.87 | 49.43 | 42.63 |
| 建设用地 | 23.53 | 30.22 | 41.94 | 87.94 | 126.81 | 329.95 | 401.87 | 561.11 | 797.32 | 1 172.41 |
| 裸地 | 7.52 | 9.05 | 12.21 | 15.31 | 14.97 | 474.52 | 421.17 | 501.45 | 521.97 | 611.61 |

3.3 水源涵养量分析

由图3可知,2000—2020年研究区水源涵养量呈逐年增加趋势,最高值从2000年的98.08 mm上升至2020年的206.62 mm,高水源涵养量区域的面积和分布范围也不断扩大,总体分布格局表现为东南高、西北低,多年间无明显空间异质性。

3.4 不同土地利用水源涵养功能及动态

在ArcGIS中,通过空间叠加窟野河流域的水源涵养量栅格与土地利用栅格,统计得到2000年、2005年、2010年、2015年和2020年不同土地利用类型的水源涵养量。由表4可知,2000年窟野河流域不同土地利用类型的单位面积水源涵养量为0.25~22.85

mm,到2020年为0.29~50.55 mm,各土地利用类型在单位面积上的水源涵养能力存在显著差异。林地、草地和耕地水源涵养效能较为突出,而其他用地类型的相对较低。2000—2020年,耕地、草地和林地的水源涵养功能呈增强趋势,其余土地利用类型则保持基本稳定,变化幅度较小。从总水源涵养量来看,不同土地利用类型中,耕地、林地和草地的贡献程度最大,耕地的总水源涵养量从2000年的1 806.76万 m^3 增长至2020年的3 421.42万 m^3 ,林地从2000年的848.41万 m^3 增长到2020年的2 400.52万 m^3 ,草地则从2000年的7 916.70万 m^3 增长到2020年的16 905.33万 m^3 ,其中草地的总水源涵养量增长表现最为显著。

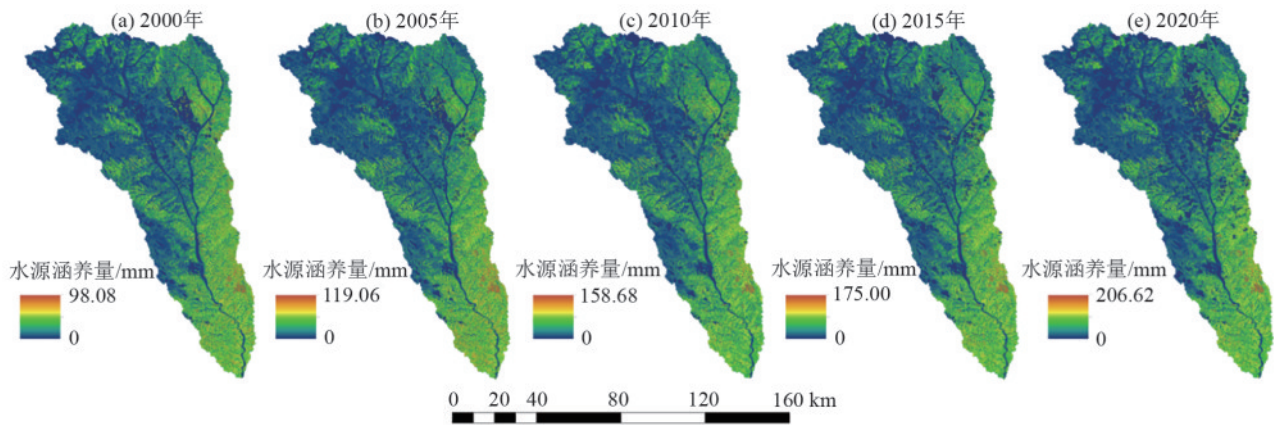


图 3 窟野河流域水源涵养量分布

Fig. 3 Distribution of water conservation capacity in Kuye River basin

表 4 窟野河流域不同土地利用类型水源涵养量

Table 4 Water conservation capacity of different land use types in Kuye River basin

| 土地利用 分类 | 单位面积水源涵养量 | | | | | 总水源涵养量 | | | | |
|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 |
| 耕地 | 10.50 | 13.31 | 18.27 | 20.31 | 23.55 | 1 806.76 | 2 098.41 | 2 745.78 | 3 003.74 | 3 421.42 |
| 林地 | 22.85 | 26.65 | 39.42 | 43.43 | 50.55 | 848.41 | 1 318.12 | 1 959.74 | 2 159.84 | 2 400.52 |
| 草地 | 14.05 | 17.25 | 24.71 | 27.40 | 32.14 | 7 916.70 | 9 713.97 | 14 041.32 | 15 169.16 | 16 905.33 |
| 水体 | 0.25 | 0.31 | 0.15 | 0.11 | 0.29 | 5.33 | 6.71 | 5.11 | 5.41 | 6.01 |
| 建设用地 | 3.01 | 3.58 | 4.51 | 5.61 | 6.99 | 3.67 | 4.02 | 4.99 | 5.02 | 7.02 |
| 裸地 | 0.94 | 1.02 | 1.01 | 1.15 | 1.99 | 53.34 | 49.81 | 55.69 | 54.61 | 52.88 |

3.5 产水量与水源涵养量对比分析

为量化在产水过程中未被生态系统有效截留而快速转化为径流的水量,将“流失量”定义为产水量与水源涵养量之差,表征那些未能通过土壤入渗、植被截留和地下水补给等过程被暂时储存在生态系统内部,并相对快速地汇入河道的水量。通过此水量来对比不同年份的水源涵养能力(图4)。

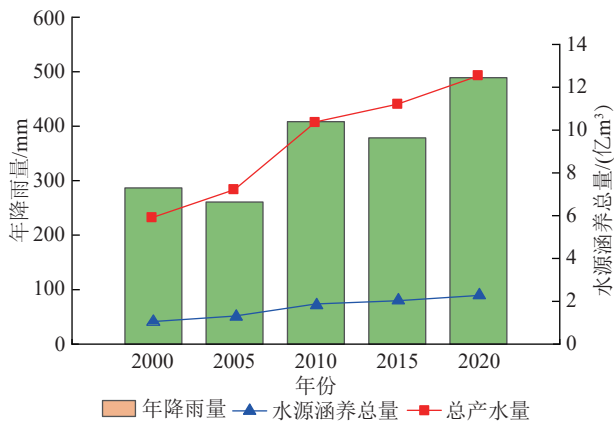


图 4 窟野河流域水源涵养量

Fig. 4 Water conservation capacity in Kuye River basin

由图4可知,年降雨量、水源涵养总量和总产水量之间存在明显的正相关。水源涵养总量的变化趋势与年降雨量的变化趋势相似,表明年降雨量的增加对水源涵养总量有积极影响。2000—2020年产水量与水源涵养量的涨幅明显,总产水量从2000年的5.87亿m³增长至2020年的12.60亿m³,增幅高达114.60%;而总水源涵养量从1.06亿m³增长至2.28亿m³,增幅为

115.10%,但水源涵养量的基数远小于产水量。产水量的增长幅度(年平均增长0.34亿m³)远大于水源涵养量(年平均增长0.06亿m³),表明降水的增加更多地转化为快速径流,而非被生态系统有效滞留。产水量与水源涵养量的年际变化通过Mann-Kendall趋势检验,均显示显著上升趋势($p < 0.05$)。

从图5可以看出,2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的流失量呈增加趋势。Mann-Kendall检验证实流失量呈显著上升趋势($p < 0.05$)。流失量与降雨量的变化规律基本相近,一般来说,降雨量多的年份,水源涵养量往往更充足,随之而来的流失量也更多。但流失量与降雨量的变化并非完全同步,即2000年、2010年、2020年流失量变化和降雨量趋势保持一致,而2005年和2015年流失量出现下降。综合可知,在此研究周期内,研究区域的固水能力呈变弱趋势。

3.6 影响因子分析

3.6.1 单因子探测器 采用地理探测器中的单因子探测进一步探明各影响因子对窟野河流域水源涵养量的影响(图6)。本研究选取DEM、潜在蒸发量、坡度、NDVI、土地利用及降雨量分析影响窟野河水源涵养量的因素,其中解释力较强的是降雨量。降雨量的相关系数年平均达到最高,5 a平均值为0.22,降雨量对区域水源涵养能力起决定作用。在水源涵养量的影响因素中,坡度与土地利用类型也是其中的主要因素之一。NDVI的相关系数最低(0.02)。

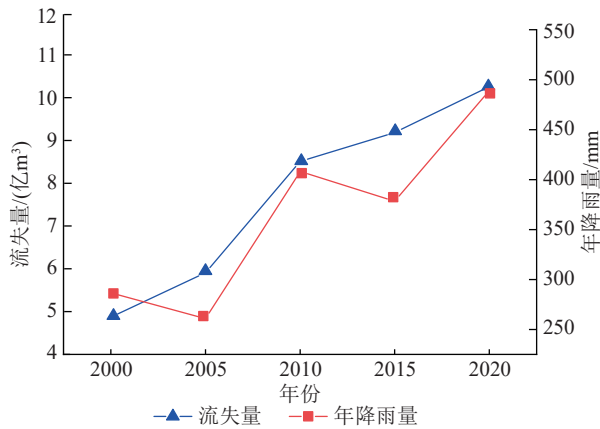


图 5 窟野河流域水源流失量

Fig. 5 Water losses in Kuye River basin

3.6.2 交互探测器 基于2000—2020年5期地理探测器交互作用分析,窟野河流域水源涵养量空间分异的主导驱动机制表现为土地利用类型与降雨的交互作用解释力持续最高,在0.357~0.709区间构成核心驱动层,土地利用分别与坡度、高程的交互作用形成稳定的次强驱动层, q 值分别集中于0.296~0.571和0.315~0.497(图7)。潜在蒸发量与土地利用的交

互在2005年($q=0.555$)和2015年($q=0.528$)出现明显峰值,显示出气候因子在特定年份的协同增强效应。相比之下,植被与地形因子的交互解释力中等(q 值多为0.291~0.578),而潜在蒸发量与NDVI的交互作用解释力相对最弱(q 值为0.263~0.388),定量揭示流域水源涵养功能以土地利用和地形稳定主导为基础,并受气候和下垫面动态调节的多因子协同驱动机制。

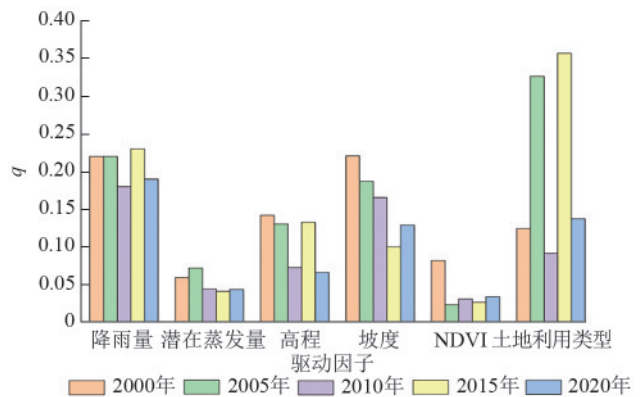


图 6 研究区水源涵养量的影响因子 q 值

Fig. 6 q -value of influencing factors of water conservation capacity in study area

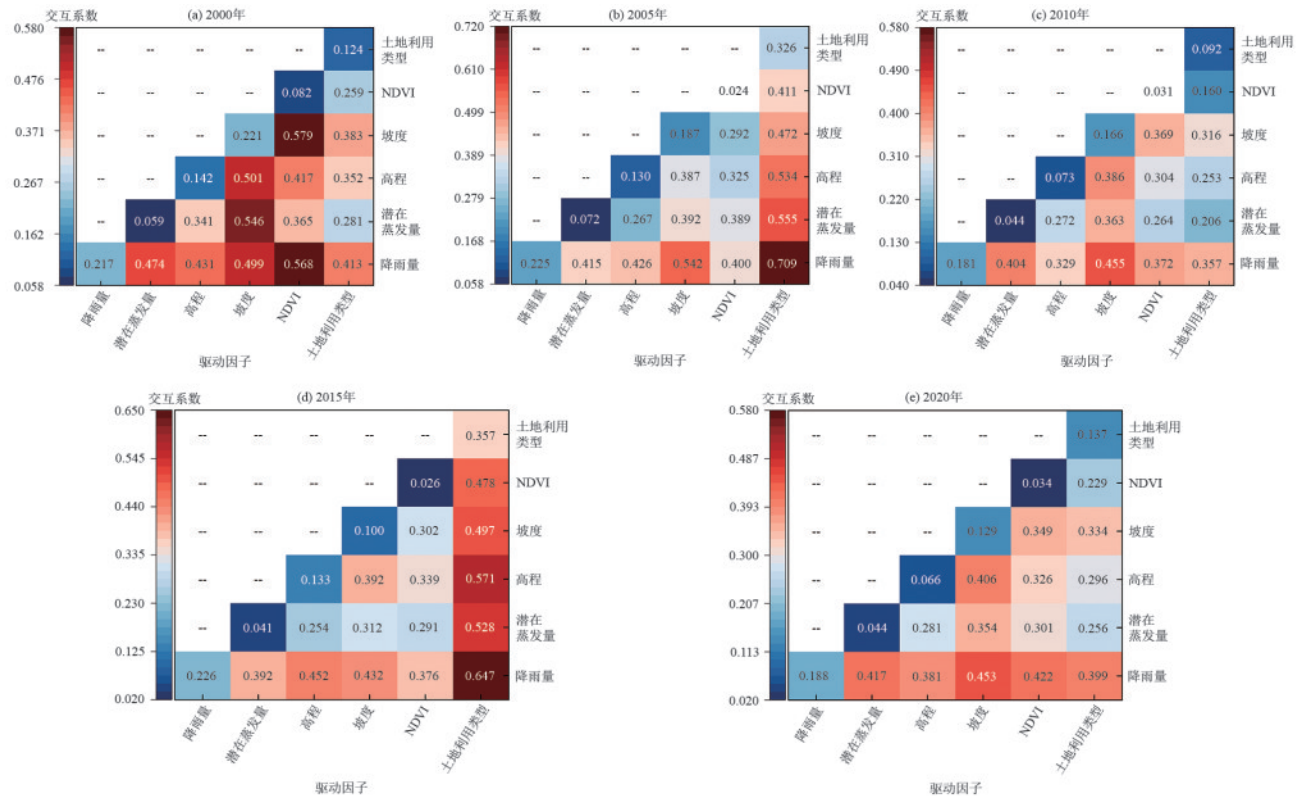


图 7 研究区水源涵养量服务影响因子的交互作用探测结果

Fig. 7 Interaction detection results of influencing factors of water conservation capacity services in study area

3.7 土地利用变化对水源涵养功能的驱动机制与时空演变研究

3.7.1 土地利用时空演变研究 因为降雨、土地利用与水源涵养量之间存在一定关联性,故在保持降水条件不变的前提下,基于CA-Markov模型对窟野河

域2025—2035年土地利用格局进行预测(图8)。在水源涵养量估算中,进一步耦合2020年降雨及潜在蒸散数据,实现对流域未来水源涵养能力的模拟分析。基于上述模型与分析,研究进一步探讨2025—2035年该区域未来土地利用变化给水源涵养带来的影响。

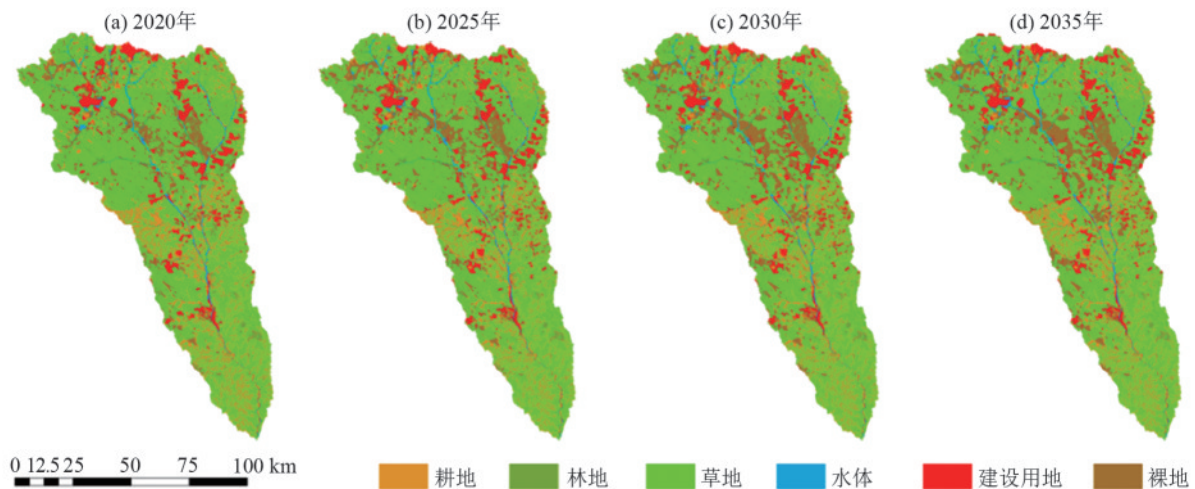


图 8 各预测年份土地利用预测结果

Fig. 8 Land use prediction results for each predicted year

3.7.2 预测土地利用及转移情况 由图9可知,2025—2035年预测期内各类土地利用类型的空间分布格局与2020年基本一致,整体仍以草地为主导,林地和建设用地主要集中于流域北部地区。

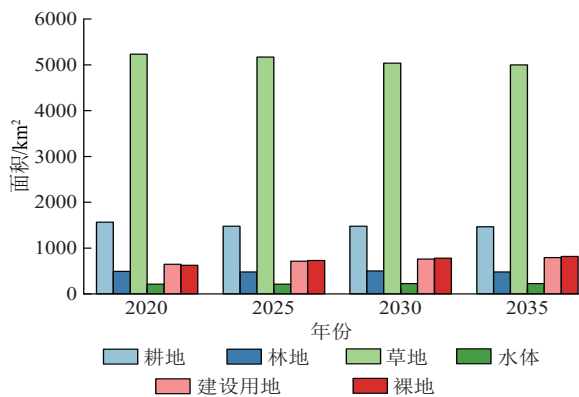


图 9 2020—2035年各类型土地利用面积

Fig. 9 Area of land use by type from 2020 to 2035

2020—2035年,草地始终占据主体地位,耕地次之。在此期间,土地利用结构呈现明显变化趋势,即

裸地面积显著扩大,草地面积趋于减少,建设用地则持续扩张。

3.8 预测土地利用下的水源涵养分析

基于预测的土地利用数据及2020年降雨与蒸散发数据,对研究区的水源涵养能力进行评估,其空间分布预测结果见图10。水源涵养整体空间格局与2020年较为一致,仍呈东南高、西北低的特征,表明在自然发展情景下,土地利用变化未能显著改善区域水源涵养功能。结合土地利用变化可知,西北地区持续扩张的建设用地等高径流系数地表覆盖类型是导致该区域水源涵养能力偏低的主要原因。从年际变化来看,水源流失量自2000—2020年呈上升趋势,并在预测期内持续增加。在产水量未发生显著变化的情况下,水源涵养量由缓慢增长逐步趋于停滞,并于2035年达到最大值(3.45亿 m^3),2020年为最小值(2.28亿 m^3),二者相差2.17亿 m^3 ,可能与森林面积持续减少和城镇用地不断扩张密切相关。

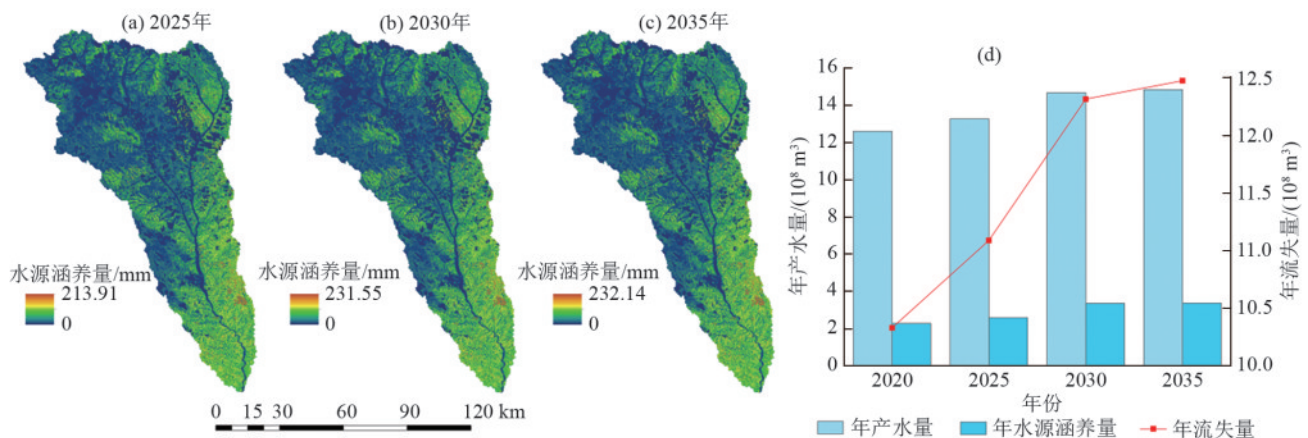


图 10 预测年份水源涵养量分布

Fig. 10 Distribution of water conservation capacity in predicted years

4 讨论

本研究评估的窟野河流域2000—2020年水源涵养量呈显著增长趋势,与近年来针对黄土高原^[23]、祁连山地区^[24]等生态修复区的评估结论一致,印证大规模退耕还林还草等生态工程对提升区域水源涵养功能的积极成效。然而,与山西省^[25]等以山地丘陵为主的研究区发现林地水源涵养量最大结论不同。本研究发现,草地的水源涵养总量最大。此差异凸显窟野河流域作为干旱到半干旱过渡带的特殊性,草地作为本流域的优势植被类型,其广大的分布面积抵消其单位面积效能略低于林地的特点,从而在总量上成为主导,提示在类似生态脆弱区进行生态恢复规划时,除关注植被类型的单位效能外,更需综合考虑其空间覆盖规模与恢复可行性。在驱动机制上,本研究通过地理探测器解析,明确“土地利用-降雨”交互作用是主导流域水源涵养量空间分异的核心^[26],与在湿润地区^[25]或高植被覆盖流域中“地形-植被”交互作用占主导的结论形成对比。窟野河流域的结果深刻揭示在降水稀少且变率大的半干旱区,下垫面性质对有限降水再分配过程的调控作用被放大,其与降水格局的耦合共同决定水源的涵养与流失路径。本研究发现,裸地、建设用地的单位面积产水与涵养量均显著低于林地、草地,与常规研究结论相悖,实则反映InVEST模型基于水热平衡原理的计算特点,低植被覆盖类型具有较高的实际蒸散发比例,导致产水计算值偏低^[27];同时,极高的径流系数使得产水几乎全部转化为快速径流,导致涵养量极低^[28]。此复杂关系凸显在半干旱区不能仅凭单一指标评判地类的生态水文作用,需结合“产流-涵养-流失”全过程进行综合解析。

国际上的水源涵养评估正从静态评估向动态预测、从单一模型向多模型耦合、从通用参数向本地化率定发展^[29]。本研究耦合InVEST与CA-Markov模型实现“评估-预测”的衔接,呼应国际上整合生态系统服务模型与土地利用变化模型的前沿方向^[30]。与许多直接应用模型默认参数的研究相比,本研究通过对关键参数进行以实测径流为约束的迭代率定,显著提升InVEST模型在窟野河流域的模拟精度($NSE > 0.82$)。这种强调“参数本地化”的做法,与国际上在数据稀缺区改进生态系统服务模型应用的努力^[31]高度一致,增强研究结果的可靠性与区域针对性。本研究提出的“流失量”概念,旨在量化未被生态系统调节的快速径流。此思路与国际水文研究中关注“快速流”与“慢速流”分割及评估生态系统“缓冲”能力的研究范式相通。结果表明,流失量的持续上升,揭示尽管产水与涵养总量增加,但流域水文调

节功能并未同步增强,与全球许多地区在气候变化与人类活动下观察到的水文过程“激进化”趋势有相似之处。本研究通过在模型框架内构建这一指标,为评估生态工程的水文调节“效率”而非仅仅“总量”提供简易的分析工具。

本研究的一个重要贡献在于实现InVEST模型在窟野河流域的参数本地化应用,有效提升模拟结果的准确性。基础气象数据源于公共平台,但本研究通过已测定的水文过程来优化模型参数,关键参数的迭代率定。区别于许多研究直接引用文献中的 Z 系数,本研究利用流域出口长序列实测径流数据,通过系统化迭代率定^[32],得到专属于窟野河流域的 Z 值(4.80)。之后在水源涵养量计算中,对流速系数、径流系数等参数的赋值,充分考虑流域内黄土高原丘陵沟壑区土壤入渗特性与毛乌素沙地边缘地表覆盖特性。使得模型在验证期内达到良好精度($NSE > 0.82$)。证明通过对有限的参数进行有针对性的校准,即使使用全球或区域性的公共数据集,也能构建出适用于特定中小流域的、可靠的水文生态系统服务评估模型。本研究采用的预测方法,其核心创新在于通过耦合模型,将土地利用变化的空间动态与基于历史气候的单位能力参数相结合,实现对水源涵养功能的动态投影。该方法避免为未来每种地类随意设定能力值的武断性,而是将气候条件作为驱动单位面积水源涵养能力年际变化的主导因素。该方法的优势在于逻辑清晰、可重复,并且有效分离土地利用变化与气候变化的影响,使预测专注于评估气候不变情况下土地利用格局的自然演变对水源涵养功能的影响。本研究的局限性是预测未考虑气候变化本身对单位面积能力的进一步影响。未来研究需要深化此方向,通过耦合全球或区域气候模型输出的未来气候情景数据,替换本框架中静态的2020年气候数据,从而实现“气候-土地利用”双驱动下的综合情景模拟^[33]。

5 结论

1) 本文计算得到窟野河流域2000—2020年的产水量情况,整体呈现逐年增长的趋势,其中2020年的产水量最大,为12.60亿 m^3 ,2000年的产水量最小,为5.87亿 m^3 。不同土地利用类型的单位面积产水深度表现为耕地、草地和林地产水深度较高,建设用地的裸地产水量较低。

2) 对窟野河流域的水源涵养功能进行体系研究,窟野河2000年、2005年、2010年、2015年、2020年水源涵养量分别为1.06亿、1.32亿、1.88亿、2.04亿、2.28亿 m^3 ,呈逐年增加趋势。在水源涵养功能评价中,林地、草地和耕地的水源涵养量大,其他土地利用类型水源涵养量小。对水源涵养量解释力最强的

是降雨,在双因子交互作用下降雨和土地利用类型的解释力最大,其次为土地利用类型与坡度和高程的解释力较大。

3)对2025年、2030年及2035年窟野河流域的土地利用状况进行预测显示,未来土地利用结构整体与2020年相近,仍呈现草地持续减少、建设用地逐步扩张趋势。在此土地利用预测情景下,流域水源涵养能力的空间分布特征也与2020年较为一致,呈现东南多、西北少的分布特征,但总涵养量呈增长速率降低并趋于平缓趋势,流失量也延续2000—2020年逐年增多趋势。

参考文献:

- [1] 吕新,王双明,杨泽元,等.神府东胜矿区煤炭开采对水资源的影响机制:以窟野河流域为例[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):54-57.
LYU X, WANG S M, YANG Z Y, et al. Influence of coal mining on water resources: A case study in Kuye River basin [J].Coal Geology and Exploration, 2014, 42(2): 54-57.
- [2] 乔殿新,赵莹,李天毅,等.《生态清洁小流域建设技术规范》解读[J].中国水土保持,2023(10):17-20.
QIAO D X, ZHAO Y, LI T Y, et al. Explanation on technical specifications for the construction of ecological and clean small-watersheds[J].Soil and Water Conservation in China, 2023(10): 17-20.
- [3] 董哲仁,赵进勇,张晶.生态水利工程概念内涵及技术体系构建[C].工程科技II辑.建设生态水利 推进绿色发展.南京:中国水利经济研究会,2020:177-185.
DONG Z R, ZHAO J Y, ZHANG J. Connotation and technical system construction of ecological hydraulic engineering [C]. Engineering Technology II . Constructing ecological water conservancy to promote green development. Nanjing: China Society of Water Economics, 2020: 177-185.
- [4] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.
WANG Y C, ZHAO J, FU J W, et al. Quantitative assessment of water conservation function and spatial pattern in Shiyang River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [5] 张能能,刘兆刚.基于InVEST模型的小兴安岭生态系统服务功能权衡/协同效应[J].环境科学,2025,46(7):4628-4640.
ZHANG N N, LIU Z G. Trade-offs/synergies of ecosystem services in the Xiaoxing'an Mountains based on the InVEST model[J].Environmental Science, 2025, 46(7): 4628-4640.
- [6] 刘俸汝,赵俊三,林伊琳,等.基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(5):212-224.
LIU F R, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 212-224.
- [7] 魏雷哈冰,时鹏,魏勇,等.窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):222-235.
WEI L, SHI P, WEI Y, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the Kuye River basin [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 222-235.
- [8] 苏航.窟野河流域水文连通性及其影响因素研究[D].西安:西安理工大学,2024.
SU H. Study on hydrological connectivity and its influencing factors in kuyehe river basin [D].Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [9] 王冶,郭祖彬.基于生态系统服务供需关系和土地利用程度耦合的生态分区识别与管理:以滦河流域为例[J].草业科学,2024,41(10):2471-2486.
WANG Y, GUO Z B. Identification and management of ecological zoning based on the coupling of ecosystem service supply and demand and land use intensity: A case study of the Luan River basin [J].Pratacultural Science, 2024, 41(10): 2471-2486.
- [10] 高向龙,冯起,李宗省,等.三江源水源涵养价值时空格局及影响因素[J].生态学报,2024,44(16):7074-7086.
GAO X L, FENG Q, LI Z X, et al. Spatio-temporal pattern and key influencing factors of water conservation value in the Three-River Source region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7074-7086.
- [11] 王金凤,徐洁,徐基良,等.黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估[J].北京林业大学学报,2024,46(7):90-100.
WANG J F, XU J, XU J L, et al. Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River basin [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 90-100.
- [12] 张健康,王计平,石建省.气候变化和人类活动影响下窟野河流域水沙变化归因分析[J].水文地质工程地质,2024,51(6):47-59.
ZHANG J K, WANG J P, SHI J S. Attribution analysis of water-sediment variation under the influence of climate change and human activities in the Kuye River basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2024, 51(6): 47-59.
- [13] 李慧娟,师长兴,马小晴,等.黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J].资源科学,2020,42(3):499-507.
LI H J, SHI C X, MA X Q, et al. Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River [J].Resources Science, 2020, 42(3): 499-507.
- [14] KHALEFA E, PEPIN N, TEEUW R. Long-term vegetation trends and driving factors of NDVI change on the slopes of Mount Kilimanjaro [J]. International Journal of Environmental Studies, 2024, 81(5): 2027-2047.

- [15] 陈利利. 窟野河流域土地利用变化、侵蚀响应及因素贡献分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
CHEN L L. The analysis of lucc, erosion responses and human activities contribution in the Kuye River basin, China [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [16] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1559-1568.
LEI Y N, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River catchment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1559-1568.
- [17] 王英顺, 贾泽祥, 胡建军, 等. 窟野河流域生态建设工程布局探讨[J]. 中国水土保持, 2003(5): 32-33.
WANG Y S, JIA Z X, HU J J, et al. Approach to engineering layout of ecological building of the Kuye River basin [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(5): 32-33.
- [18] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 43-56.
JIANG J, JIANG D B, LIN Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 43-56.
- [19] 傅春, 李帆, 刘业忠, 等. 基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的鄱阳湖流域水源涵养模拟预测分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(11): 1513-1521.
FU C, LI F, LIU Y Z, et al. Simulation and prediction analysis of water conservation in Poyang Lake basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(11): 1513-1521.
- [20] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
LÜ Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [21] 王国庆, 张建云, 李岩, 等. 窟野河流域径流演变及其驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 7-11.
WANG G Q, ZHANG J Y, LI Y, et al. Analysis of runoff evolution and factor of driving force in Kuye River catchment [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(2): 7-11.
- [22] 王晓燕. 黄土高原不同空间尺度森林植被对径流的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
WANG X Y. The impact of forest on runoff under different SpaceScale on the Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [23] 何秋琴, 王京伟, 毕旭, 等. 2005—2020年山西省水源涵养功能时空格局及其演变驱动力分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(4): 862-873.
HE Q Q, WANG J W, BI X, et al. Temporal and spatial dynamics of water conservation in Shanxi Province (2005—2020): Patterns and influence analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(4): 862-873.
- [24] 万志纲. 祁连山国家公园产水量驱动因素探究及未来多情景模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
WAN Z G. Exploration o driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park and future multi-scenario simulation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.
- [25] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5847-5856.
WANG Y, ZHANG C S, LIU C L, et al. Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest Program region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [26] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 84-90.
LIU Y Y, LIU X Y, ZHANG B, et al. Evaluation of soil and water conservation function of artificial shrub-grassland ecosystem in hilly region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 84-90.
- [27] 张日升, 凡胜豪, 姜涛, 等. 辽西北风沙区典型利用类型下的土壤水分变化特征[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(23): 62-64.
ZHANG R S, FAN S H, JIANG T, et al. Characteristics of soil moisture changes under typical utilization types in the windy and sandy areas of northwest Liaoning [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(23): 62-64.
- [28] 曹明, 李俊生, 王伟, 等. 基于 InVEST 与倾向评分匹配模型评估秦岭国家级自然保护区水源涵养服务保护成效[J]. 生物多样性, 2021, 29(5): 617-628.
CAO M, LI J S, WANG W, et al. Assessing the effectiveness of water retention ecosystem service in Qinling National Nature Reserve based on InVEST and propensity score matching model [J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(5): 617-628.
- [29] BEROHO M, BRIAK H, CHERIF E K, et al. Future scenarios of land use/land cover (LULC) based on a CA-Markov simulation model: Case of a Mediterranean watershed in Morocco [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): e1162.
- [30] YANG X, CHEN R S, MEADOWS M E, et al. Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China [J]. *Water Supply*, 2020, 20(3): 1035-1045.
- [31] SCORDO F, LAVENDER T M, SEITZ C, et al. Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model [J]. *Water*, 2018, 10(11): e1496.
- [32] KIM S W, JUNG Y Y. Application of the InVEST model to quantify the water yield of north Korean forests [J]. *Forests*, 2020, 11(8): e804.
- [33] MARTIN K L, HWANG T, VOSE J M, et al. Watershed impacts of climate and land use changes depend on magnitude and land use context [J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(7): e1870.