北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

大宁河流域景观格局演变及其对径流泥沙的影响

杨佳 勾蒙蒙 刘常富 欧阳帅

Evolution of landscape pattern and its impact on runoff and sediment in the Daning River Basin of southwestern China

Yang Jia, Gou Mengmeng, Liu Changfu, Ouyang Shuai

引用本文:
杨佳, 勾蒙蒙, 刘常富, 欧阳帅. 大宁河流域景观格局演变及其对径流泥沙的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):184–195. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260275
Yang Jia, Gou Mengmeng, Liu Changfu, Ouyang Shuai. Evolution of landscape pattern and its impact on runoff and sediment in the Daning River Basin of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):184–195. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260275

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260275

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

晋西黄土区流域景观格局对径流及其组分的影响
Effects of watershed landscape pattern on runoff and its components in the loess region of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 118–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230037

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响
Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment
北京林业大学学报, 2024, 46(2): 95–104. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230121

基于ENVI技术的永定河段景观格局演变与优化研究
Evolution and optimization research on landscape pattern of Yongding River section of Beijing based on ENVI technology
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 118–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200204

滦河流域水文连通性
Hydrological connectivity of the Luanhe River Basin in northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 119–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220485

鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素
Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 23–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250312

挠力河流域景观生态时空演变特征与预测研究
Spatial and temporal evolution characteristics and prediction of landscape ecology in Naolihe Basin of northeastern China
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 90–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210395

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260275

大宁河流域景观格局演变及其对径流泥沙的影响

杨 佳[1,2] 勾蒙蒙[1,2] 刘常富[1,2] 欧阳帅[3]

（1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所，森林生态系统保护修复国家林业和草原局重点实验室，北京 100091；2. 湖北秭归三峡库区森林生态系统定位观测研究站，湖北 宜昌 443600；3. 中南林业科技大学生态环境学院，湖南 长沙 410004）

摘要:【目的】探讨景观格局演变对流域生态水文过程的影响机制，为景观空间配置优化、水资源管理及土壤侵蚀防治提供科学依据。**【方法】**选取三峡库区大宁河流域作为研究区，基于 2000、2010 和 2020 年土地利用数据计算景观组成与空间配置指标，利用经率定和验证的 SWAT 模型模拟子流域尺度年径流深和产沙模数，并采用 XGBoost-SHAP 模型识别降雨、地形、土地利用及景观格局因子的相对贡献和影响方向。**【结果】**(1)2000、2010、2020 年，大宁河流域土地利用以林地和耕地为主，二者总占比长期超过 84%；林地略有增加，耕地和草地减少，建设用地和水域面积大幅增加，增幅分别为 449.06% 和 161.55%。(2)景观格局整体由破碎化向聚集化演变，表现为 AI、COHESION 和 CONTAG 升高，而 PD、ED 和 LSI 下降，说明景观聚集度和结构连通性总体增强。(3)年径流深呈“西北高、东南低”的空间格局，产沙模数表现为“北部、中部高、东南部低”的分布特征，高产沙区主要对应景观破碎化程度较高和人类活动较强的区域。(4)驱动因素分析表明，径流过程主要受降雨和地形控制，而泥沙输出对土地利用结构和景观破碎化更为敏感。**【结论】**大宁河流域径流与产沙过程具有差异化驱动机制，维持林地和其他生态斑块的空间完整性，优化坡耕地布局，并降低高风险区域的景观破碎化程度，可有效缓解流域水土流失风险。

关键词：景观格局；泥沙；径流；XGBoost-SHAP 模型；大宁河流域

中图分类号：S718 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0184−12

引文格式：杨佳，勾蒙蒙，刘常富，等. 大宁河流域景观格局演变及其对径流泥沙的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：184−195. Yang Jia, Gou Mengmeng, Liu Changfu, et al. Evolution of landscape pattern and its impact on runoff and sediment in the Daning River Basin of southwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 184−195.

Evolution of landscape pattern and its impact on runoff and sediment in the Daning River Basin of southwestern China

Yang Jia[1,2] Gou Mengmeng[1,2] Liu Changfu[1,2] Ouyang Shuai[3]

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Conservation and Restoration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Hubei Zigui Three Gorges Reservoir Forest Ecosystem Observation and Research Station, Yichang 443600, Hubei, China;
3. College of Ecology and Environment, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to elucidate the mechanisms through which landscape pattern dynamics affecting watershed ecohydrological processes, thereby providing a scientific basis for optimizing landscape configuration, improving water resource management, and mitigating soil erosion. ［**Method**］Using the Daning River Basin in the Three Gorges Reservoir Area of southwestern China as a case study, landscape composition and configuration metrics were derived from land-use data of 2000, 2010, and 2020. A calibrated and validated SWAT model was used to simulate annual runoff depth and specific

收稿日期: 2026−06−02 **修回日期:** 2026−09−25

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2023MA011)，国家自然科学基金项目(32301670)。

第一作者: 杨佳。主要研究方向：景观与生态系统服务。Email: yangjia_2049@163.com 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 2 号中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所。

责任作者: 勾蒙蒙，助理研究员。主要研究方向：景观与生态系统服务。Email: goumm0243@163.com 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

sediment yield at the sub-basin scale, while XGBoost-SHAP was applied to quantify the relative importance and effects of precipitation, topography, land use, and landscape-pattern variables. [**Result**] (1) Forest and cropland remained dominant, together accounting for more than 84% of the basin. Forest area increased slightly, whereas cropland and grassland declined; built-up land and water bodies expanded by 449.06% and 161.55%, respectively. (2) The landscape shifted overall from fragmentation toward aggregation, as indicated by increases in AI, COHESION, and CONTAG and decreases in PD, ED, and LSI, suggesting enhanced aggregation and structural connectivity. (3) Annual runoff depth was generally higher in the northwest and lower in the southeast, whereas specific sediment yield was higher in the northern and central regions and lower in the southeast. High-sediment-yield areas largely coincided with fragmented landscapes and intensive human disturbance. (4) Runoff depth was controlled primarily by precipitation and topography, whereas sediment yield was more sensitive to land-use composition and landscape fragmentation. [**Conclusion**] Runoff depth and sediment yield in the Daning River Basin respond to different dominant controls. Maintaining the spatial integrity of forests and other ecological patches, optimizing the distribution of sloping cropland, and reducing fragmentation in high-risk areas are essential for mitigating soil-erosion risk.

Key words: landscape patterns; sediment; runoff; XGBoost-SHAP model; Daning River Basin

景观格局揭示了不同类型斑块在规模、形态和生态属性上的差异及其空间组合特征，是表征景观异质性与土地利用空间结构的重要方式[1]。近年来，随着人类活动干扰不断增强，流域景观格局的空间组成与配置发生了显著变化。这种变化通过改变地表汇流路径与水流流速，深刻影响了流域的生态水文过程，进而引发土壤侵蚀加剧、水资源再分配失衡等一系列生态环境问题[2−3]。因此，系统揭示景观格局演变对径流泥沙的影响机制，并探索通过景观空间优化推进水土流失防控与水资源保护的可行路径，这一研究工作对流域生态治理与水资源可持续管理具有重要意义[4]。

当前，探究景观格局演变对流域水沙过程的影响是生态、地理等学科领域的前沿热点[5]。景观格局演变通常涵盖景观组成和景观空间配置变化[6]。在景观组成方面，由于不同景观类型的生态水文功能存在差异，景观类型和面积变化直接影响产流和产沙量[7]。例如，黄土高原几十年来退耕还林(草)工程促使林草面积显著增加，有效削减了地表径流与产沙负荷[8−9]。景观配置的变化则通过改变不同景观类型形状、连通性、多样性等空间特征影响生态水文过程[10]。例如，程陆陆等[11]从类型和整体景观 2 个层级选取格局指标，分析了西南高山峡谷区土壤侵蚀对景观结构变化的响应，也有研究发现斑块密度、景观多样性及聚集度是径流与产沙的主要影响因子[12]。由于景观组成与配置具有内在关联，将二者结合探讨其对生态水文过程的影响为揭示景观格局与径流、产沙动态变化关系提供了有效途径，但二者综合的研究仍相对缺乏[13]。此外，流域径流与产沙不仅受景观格局变化影响，还受到降雨、地形等多要素综合调控[14]，亟须开展耦合景观格局与多环境因子的综合研究以系统揭示景观格局演变对流域径流与产沙的驱动机制。

大宁河流域作为三峡库区重要的水源涵养区，径流量丰富，但也面临着严重的水土流失风险。近年来，随着社会经济快速发展，流域内城镇化加快导致建设用地面积扩张，同时农业活动集约化、退耕还林工程等也驱动耕地、林地和草地面积发生了极大变化，这些共同作用于流域的水文循环，使流域内水源涵养功能、地表径流及土壤流失状况发生变化[15]。然而，针对大宁河流域的相关研究仍较为有限，其景观结构的时空演变特征以及径流和泥沙过程的响应规律尚待系统揭示。基于此，本研究基于 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数据，系统解析景观格局在类型和景观水平上的演变特征，结合 SWAT 模型模拟的子流域尺度径流量和泥沙量，并运用 XGBoost-SHAP 模型揭示景观格局变化对流域径流与产沙影响机制，旨在为三峡库区植被恢复的空间格局优化和流域管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

大宁河流域地处三峡库区腹地(31°04′～31°44′N、108°47′～110°09′E)，总面积约 430 727 hm^2(图 1)。流域总体海拔在 42～2 761 m 之间，区域海拔落差较大，在空间上呈现出北部、东部高而中部、南部低的分布格局。大宁河流域属亚热带季风性气候，具有明显季节性，年降水量约 1 224 mm，降水主要集

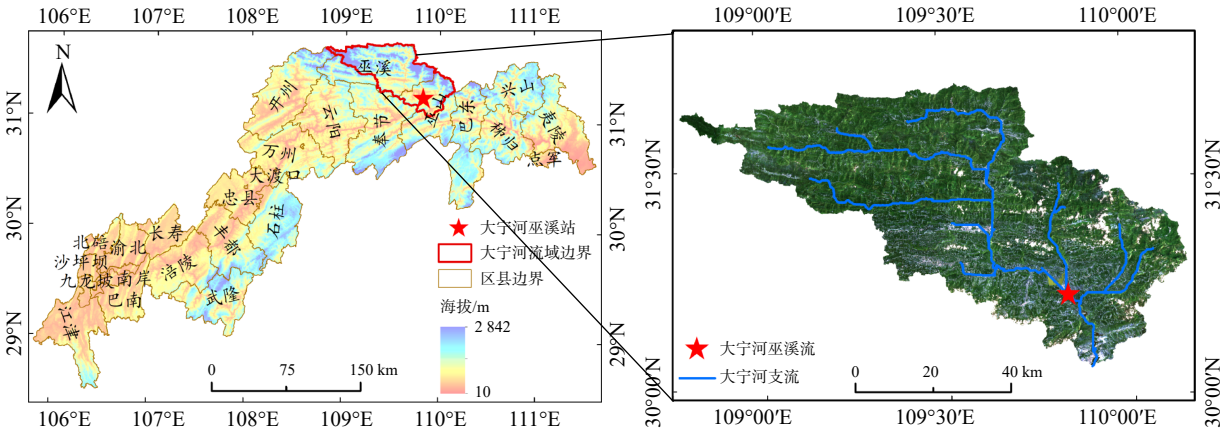


图 1 大宁河流域地理区位

Fig. 1 Geographical location of the Daning River Basin

中于 4—6 月，年平均气温约 16.6 ℃。流域主要土壤类型有黄壤、黄棕壤和棕壤。主要植被类型以常绿阔叶林、针叶林及针阔混交林为主，具有显著的垂直分异特征。

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据涵盖土地利用、地形、土壤、气象及水文泥沙等类型，各类数据的时间范围、时空分辨率与来源见表 1。

1.3 SWAT 模型构建

SWAT 是一种以物理过程为基础的半分布式流域模型，可通过空间离散化刻画降水—径流与泥沙输移过程，并对相关水文响应进行定量评估[16]。本研究基于 ArcGIS 10.8 中的 SWAT 模块，将大宁河流域划分 242 个子流域。其中，在 SWAT 模型构建过程中，综合考虑流域面积、河网提取精度及模型计算效率，本文将子流域划分阈值设定为 1 000 hm^2。水文响应单元(HRU)依据土地利用类型、土壤类型和坡度等级三类属性组合生成，并将三者的面积阈值均设为 0，以最大程度保留流域下垫面空间异质性。模型预热期设定为 1995—1999 年，以减小初始条件对模拟结果的影响，并确保水文过程达到相对稳定状态。采用 SUFI-2 算法和 SWAT-CUP 工具进行校准和不确定性分析，将大宁河水文站的月径流、产沙过程进行了率定和验证，2003—2010 年作为率定期，2011—2018 年的验证期，并根据 R^2 和 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)系数作为模型评价指标。通常，当 NSE ⩾ 0.50 且 R^2 ⩾ 0.60 时，模型被认为适用于水文模拟，而当 NSE ⩾ 0.70 且 R^2 ⩾ 0.80 时，则表明模型性能良好[17]。本研究模型率定验证结果如图 2 所示，模型在校准和验证期间的 R^2 和 NSE 均超过 0.65，表明模型可用于该流域径流产沙模拟。

1.4 景观格局指数

景观格局可从类型组成与空间配置两个维度反映流域景观结构特征。本研究以耕地、林地和草地的面积占比表征景观组成，并借助 FRAGSTATS 4.2 软件计算空间配置指标。综合已有研究成果及研究区实际情况[11−12]，最终选取斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)等 9 项指数。各指标的具体含义见表 2。

1.5 XGBoost-SHAP 模型

XGBoost 是一种基于决策树的分布式梯度提升框架，因其具有高效的并行计算能力、优异的预测精度，还能有效降低过拟合风险、显著提升模型泛化能力，目前已被广泛应用于各类机器学习任务中[18]。因此本研究采用 XGBoost 模型探究大宁河流域径流与产沙输出对景观格局演变的响应机制。鉴于径流形成与泥沙输移受多种因素共同作用，本研究在景观格局指标的基础上，进一步引入海拔、坡度和年降

表 1 研究所用数据及其来源

Tab. 1 Data used in this study and their sources

数据内容	时间范围	时空分辨率	数据来源
土地利用数据	2000、2010、2020年	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
数字高程模型(DEM)		30 m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
土壤属性数据(HWSD 2.0)		1 km	世界土壤数据库2.0(Harmonized World Soil Database, HWSD 2.0)
降水量、平均气温、平均风速和太阳辐射		逐日	国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/)
水文泥沙数据	2003—2018年	逐日	《长江流域水文年鉴》

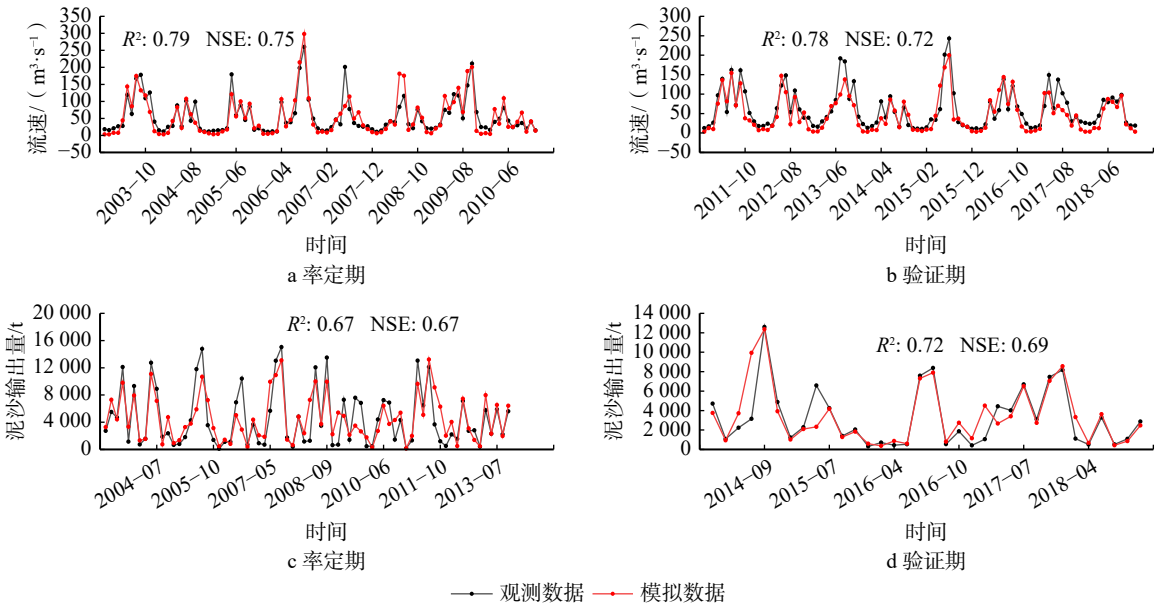


图 2　月径流量与月泥沙量率定与验证对比

Fig. 2　Calibration and validation comparison of monthly runoff and sediment yield

表 2　景观组成与空间配置的量化指标

Tab. 2　Metrics used to quantify landscape composition and spatial configuration

类别	景观格局指数	缩写	生态意义
景观组成	耕地面积比例	CROP	表征耕地面积占土地利用总面积比例
	林地面积比例	FOREST	表征林地面积占土地利用总面积比例
	草地面积比例	GRASS	表征草地面积占土地利用总面积比例
景观配置	斑块密度	PD	以单位面积内的斑块数量刻画景观分割状况; 指数升高通常意味着斑块趋于零散, 破碎化加剧
	最大斑块指数	LPI	指最大斑块占景观总面积的百分比, 可用于识别优势类型及其空间控制程度; 数值越大, 优势斑块的主导性越强
	聚集度指数	AI	依据同类斑块之间的邻接关系衡量其聚合状态; 较高数值表明同类斑块分布更加集中和连片
	斑块结合度	COHESION	通过斑块面积与周长的关系量化同类斑块的物理衔接水平; 指数越高, 景观结构连通性越强
	边缘密度	ED	表示单位面积内各类斑块边界的总长度, 用于刻画边界发育及景观切割程度; 较高数值通常对应更复杂的边界结构
	蔓延度指数	CONTAG	根据不同景观类型的空间邻接关系, 衡量斑块的聚集与延展状态; 指数越高, 优势类型越趋于连片分布
	景观形状指数	LSI	通过比较实际边界与最紧凑形态下的边界长度, 判断景观轮廓的复杂程度; 数值增大表明边界更加曲折、形态更不规则
	Shannon多样性指数	SHDI	综合景观类型数量及其面积分配的均匀程度, 衡量景观组成多样性; 数值越高, 类型越丰富且分布越均衡
	分割指数	SPLIT	用于描述景观被划分为相互分离斑块的程度; 指数越大, 斑块隔离程度越高, 景观连续性越弱

雨量等地形与气候变量, 构建综合驱动因子体系并纳入模型分析。同时, 为克服 XGBoost“黑箱”模型的局限, 本研究进一步引入 SHAP(shapley additive explanations)可解释性框架量化分析各因子对模型预测结果的边际贡献度与影响方向[19]。

本研究以子流域作为样本, 通过模型随机抽样将样本数据按照 7∶3 的比例, 划分为模型训练集和独立验证集。其次, 采用 5 折交叉验证评估网格搜索生成的候选参数组合, 据此筛选 XGBoost 的最佳超参数, 以增强模型的泛化性能。参与调优的参数包括迭代次数、最大树深、学习率、样本与特征采样比例、最小子节点权重、节点分裂所需的最小损失下降值, 以及 L1 和 L2 正则化系数。将交叉验证中预测误差最低的超参数配置用于构建最终 XGBoost 模型, 并通过决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)综合检验其拟合效果与预测精度。在最优 XGBoost 模型基础上, 采用 SHAP 方法量化各解释变量对径流深、产沙模数的贡献大小和影响方向, 并通过平均绝对 SHAP 值对变量重要性进行排序[20]。

为降低解释变量间多重共线性对驱动机制识别的影响, 本研究首先采用 Spearman 相关系数识别高

度相关变量组合，对景观因子进行共线性筛选，当变量间相关系数绝对值大于 0.85 时，优先保留与因变量相关性更强且具有明确生态意义的变量[21−22]。随后进一步计算方差膨胀因子 VIF，并采用逐步剔除法去除 VIF 大于 5 的变量，最终获得共线性较低的景观因子集合，即 CROP、FOREST、GRASS、PD、CONTAG、AI、LSI、SPLIT。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

2000、2010、2020 年，大宁河流域土地利用呈现出明显的时空异质性(图 3)。在空间分布上，林地和耕地构成了流域优势景观类型，二者总占比均超过 84%。其中，耕地集中分布于人类活动较密集的北部、西部及中下游地区，林地呈连续带状分布于东部和东南部山区，而草地则集中分布在西北部山区。2000—2020 年耕地和草地面积总体呈下降趋势，耕地面积由 110 641.73 hm^2 下降至 104 315.40 hm^2，减少 5.72%，草地面积减少 4.96%。林地面积总体保持相对稳定并略有增加，由 256 530.74 hm^2 增加至 260 629.83 hm^2，增长 1.60%。相比之下，尽管建设用地和水域占比较低，但其面积分别增加 449.06% 和 161.55%(表 3)。

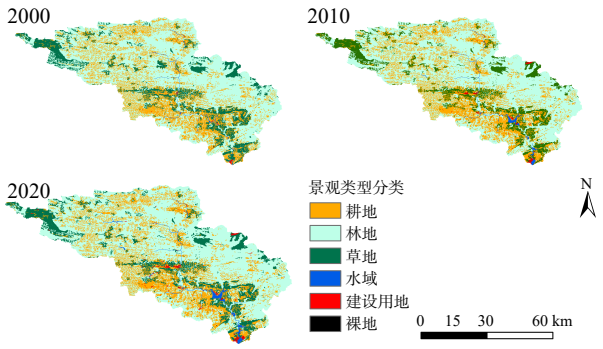


图 3 2000—2020 年大宁河流域土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use in the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

2.2 景观格局特征分析

大宁河流域 2000、2010、2020 年的景观格局整体呈现由破碎化向聚集化演变的趋势(表 4)。在景观组成方面，林地始终为流域主导景观类型，其面积占比由 2000 年的 59.56% 增加至 2020 年的 60.51%，增幅为 1.59%；耕地面积占比由 25.69% 下降至 24.22%，降幅为 5.72%；草地面积占比由 14.19% 下降至 13.49%，降幅为 4.93%。从阶段变化来看，林地整体呈现出波动上升的趋势，而耕地和草地则在两个阶段均呈下降趋势，表明生态恢复和土地利用调整背景下，流域林地主导地位有所增强，而耕地和草地面积持续减少。

从景观空间配置来看，AI、COHESION 与 CONTAG 整体呈上升趋势，分别由 92.70%、98.48% 和 54.87% 增加至 93.52%、98.58% 和 58.58%，说明同类型景观斑块趋于连片化分布，景观聚集度、连通性及蔓延程度不断增强。相反，PD、ED 与 LSI 整体呈下降趋势，其中 PD 由 9.12 下降至 6.72；ED 由 47.35 下降至 42.21，LSI 由 6.12 下降至 5.62，表明景观破碎化程度及边界复杂性整体减弱，景观斑块形状趋于规则化。此外，SHDI 由 0.75 增加至 0.77，说明流域景观异质性略有增强，而 SPLIT 由 3.17 变化为 3.26，虽然整体变化幅度较小，但局部区域仍存在一定的人类活动扰动和景观再破碎化现象。因此，2000—2020 年流域景观结构较 2000 年有所优化，主要表现为林地优势增强、景观聚集度提高和破碎化程度降低。

在子流域尺度上(图 4)，2000、2010、2020 年，景观格局指数空间分布格局整体较为稳定，但不同区域间存在明显空间异质性。其中，流域北部及中高海拔山区受地形约束及人类活动干扰较弱，林地分布较为集中，表现为 AI、COHESION 与 CONTAG 高值聚集以及 SPLIT 低值聚集，说明该区域景观连通性较高、景观结构稳定性较强。相反，中下游地势平缓区域受农业开发及人为活动影响较强，耕地与

表 3 2000、2010、2020 年大宁河流域土地利用面积变化

Tab. 3 Changes in land use area in the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

土地利用类型	面积/hm^2			变化率/%		
	2000年	2010年	2020年	2000—2010年	2010—2020年	2000—2020年
耕地	110 641.73	105 649.47	104 315.40	−4.51	−1.26	−5.72
林地	256 530.74	260 937.43	260 629.83	1.72	−0.12	1.60
草地	61 134.21	58 799.25	58 100.48	−3.82	−1.19	−4.96
水域	1 842.57	3 581.20	4 819.32	94.36	34.57	161.55
建设用地	518.94	1 745.82	2 849.31	236.42	63.21	449.06
裸地	59.22	14.22	13.50	−75.99	−5.06	−77.20

表 4　2000、2010、2020 年大宁河流域景观格局指数变化特征

Tab. 4　Variation characteristics of landscape metrics in the Daning River Basin in 2000，2010 and 2020

景观格局指数	2000年	2010年	2020年
CROP/%	25.69	24.53	24.22
FOREST/%	59.56	60.58	60.51
GRASS/%	14.19	13.65	13.49
PD/（个·100 hm^{-2}）	9.12	5.82	6.72
LPI/%	59.26	60.13	59.39
AI/%	92.70	93.93	93.52
COHESION	98.48	98.64	98.58
ED/（$m·hm^{-2}$）	47.35	39.46	42.21
CONTAG/%	54.87	57.94	58.58
LSI	6.12	5.43	5.62
SHDI	0.75	0.75	0.77
SPLIT	3.17	3.10	3.26

建设用地斑块交错分布，PD、ED 与 LSI 高值区明显集聚，表现出景观破碎化程度较高、斑块边界复杂及空间异质性较强的景观特征。

2.3　年径流量和泥沙量时空动态

2000、2010、2020 年，大宁河流域年径流深与产沙模数均表现出明显的时空异质性(图 5、6)。其中，年径流深呈现“西北高、东南低”的空间分布格局，高值区（ > 600 mm）主要集中于流域东北部及中北部山区，而低值区（ < 293.62 mm）则主要分布于东南部及局部河谷区域。时间上，2000、2010、2020 年流域中高径流区范围整体有所扩大，尤其在西北部及中部区域表现较为明显，表明研究期内流域整体水量输出能力增强。相比之下，东南部区域长期维持低径流状态。年径流深整体空间变化差异较大主要受降水量变化的影响。

产沙模数整体则呈现“北部、中部高、东南部低”的空间分布特征，其中高值区（ > 300 $t/(hm^2·a)$）主要集中于流域中部、北部及局部西部区域，而低值区主要分布于东南、西北部森林、草地覆盖较高区域。与 2000 年相比，2010 年和 2020 年中高值区范围明显扩展，尤其在中北部等区域扩张较为显著，表明研究期内部分区域泥沙输移强度增强，水土流失风险有所加剧。产沙模数高值区与景观破碎化程度较高、人类活动较强区域具有较明显的空间对应关系，而林地覆盖度较高及景观连通性较强区域则表现出较低的泥沙输出水平。

大宁河流域径流深与产沙模数在部分区域呈现一定空间对应关系，说明高径流区可能更易形成较强泥沙输移过程。但这种对应关系并非由单一因素决定，而可能受降雨、地形、土地利用结构和景观破碎化程度的共同影响。

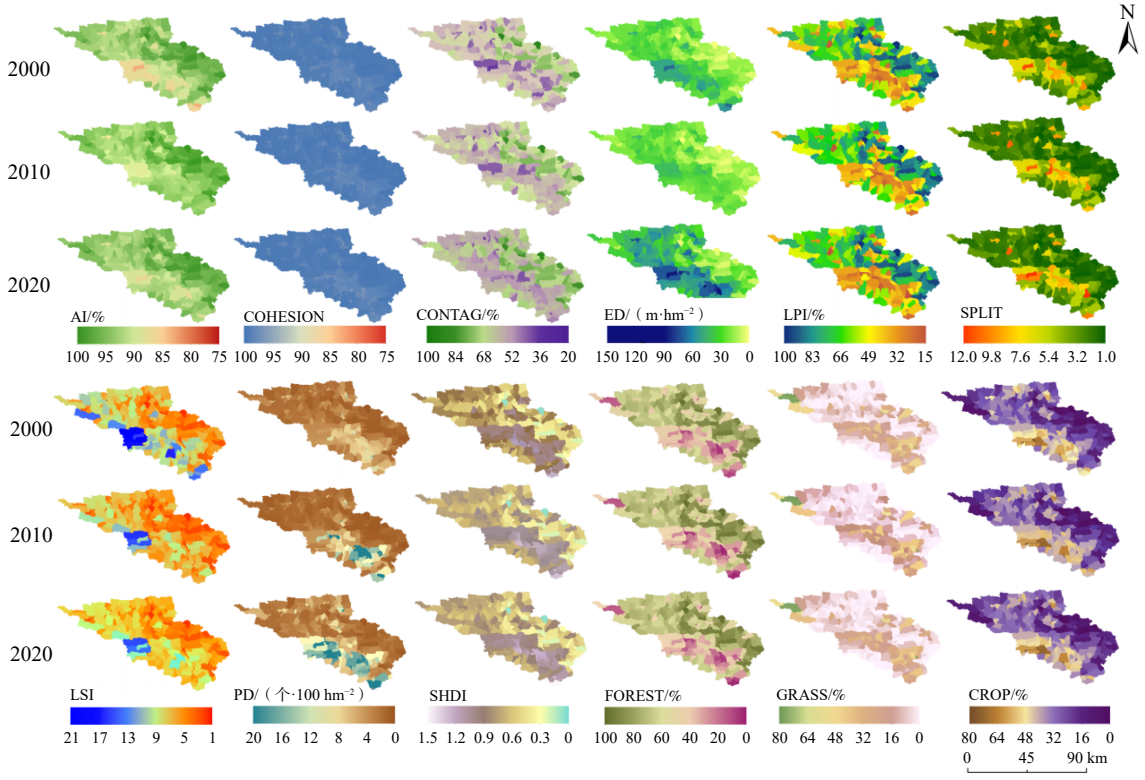


图 4　2000、2010、2020 年大宁河流域景观指数的时空格局

Fig. 4　Spatiotemporal patterns of landscape metrics across the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

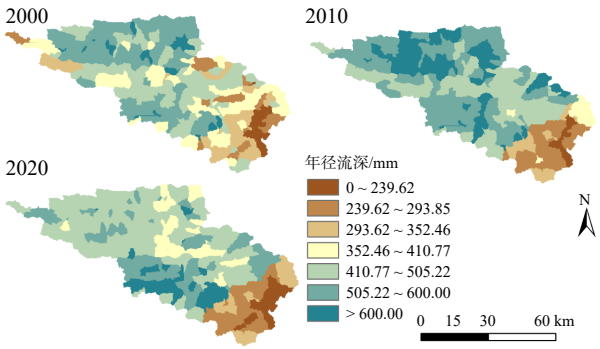


图 5 2000、2010、2020 年大宁河流域年径流深的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual runoff depth in the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

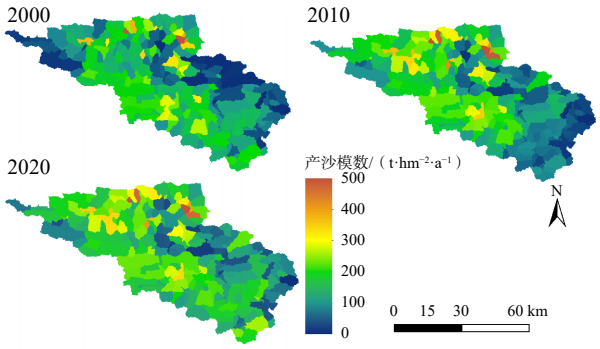


图 6 2000、2010、2020 年大宁河流域单位面积产沙量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of specific sediment yield in the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

2.4 基于 XGBoost-SHAP 的径流与产沙驱动因素分析

XGBoost 模型预测值与观测值之间呈现出显著的线性一致关系。在年径流深与产沙模数的验证集中，预测值与观测值仍保持较好的线性关系，散点总体沿拟合线分布，但相较于训练集离散程度略有增加。验证集的 R^2 分别为 0.83、0.75，表明模型在未参与训练的数据上仍具备较好的解释能力和预测性能（图 7）。尽管验证集误差略高于训练集，但整体仍处于合理范围，说明模型不存在明显的过拟合现象，具有较好的泛化能力。

基于 XGBoost-SHAP 模型的结果表明，不同驱动因子对大宁河流域年径流深与产沙模数的相对贡献存在明显差异，且二者的主导因子具有不同特征（图 8、表 5）。其中，年均降雨量始终是影响年径流深的主导因子，其相对贡献率在 2000、2010 和 2020 年分别为 36.50%、35.26% 和 46.88%，表明降雨始终是控制流域径流变化的主导因素。SHAP 分布表明，较高降雨量整体对应正向 SHAP 值，说明降雨量增加在模型中对年径流深预测值具有正向贡献，表明降雨输入增强可能促进流域径流生成与水量输出。除降雨外，海拔和坡度也具有较高贡献，尤其在 2000 年分别达到 16.36% 和 10.62%，说明地形条件通过影响降水空间分配、坡面汇流路径和下垫面蓄泄过程，对流域径流响应具有重要调控作用。相比之下，土地利用和景观格局因子对年径流深的贡献整体低于降雨和地形因子，但其作用具有一定阶段性差异。其中，CROP 的贡献率由 2000 年的 13.09% 下降至 2020 年的 6.11%，表明耕地比例对径流变化的影响有所减弱；而 FOREST、GRASS、PD 和 CONTAG 等因子在不同年份间存在波动，表明植被类型组成和景观空间配置对径流过程的影响并非单向增强，而是受土地利用转化、斑块空间重组和降雨年际差异共同调节。因此，年径流深主要受降雨输入和地形条件控制，土地利用及景观格局因子更多表现为调节作用。

与年径流深不同，产沙模数表现出更明显的土地利用、地形和降雨共同控制特征。其中，CROP

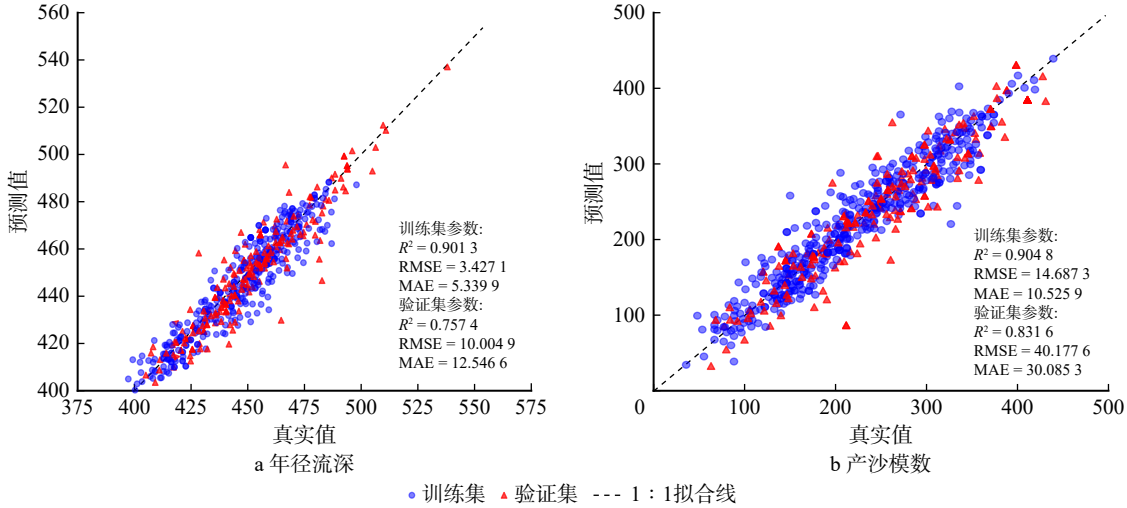


图 7 XGBoost 模型预测径流深与产沙量的精度验证

Fig. 7 Accuracy validation of the XGBoost model for predicting runoff depth and sediment yield

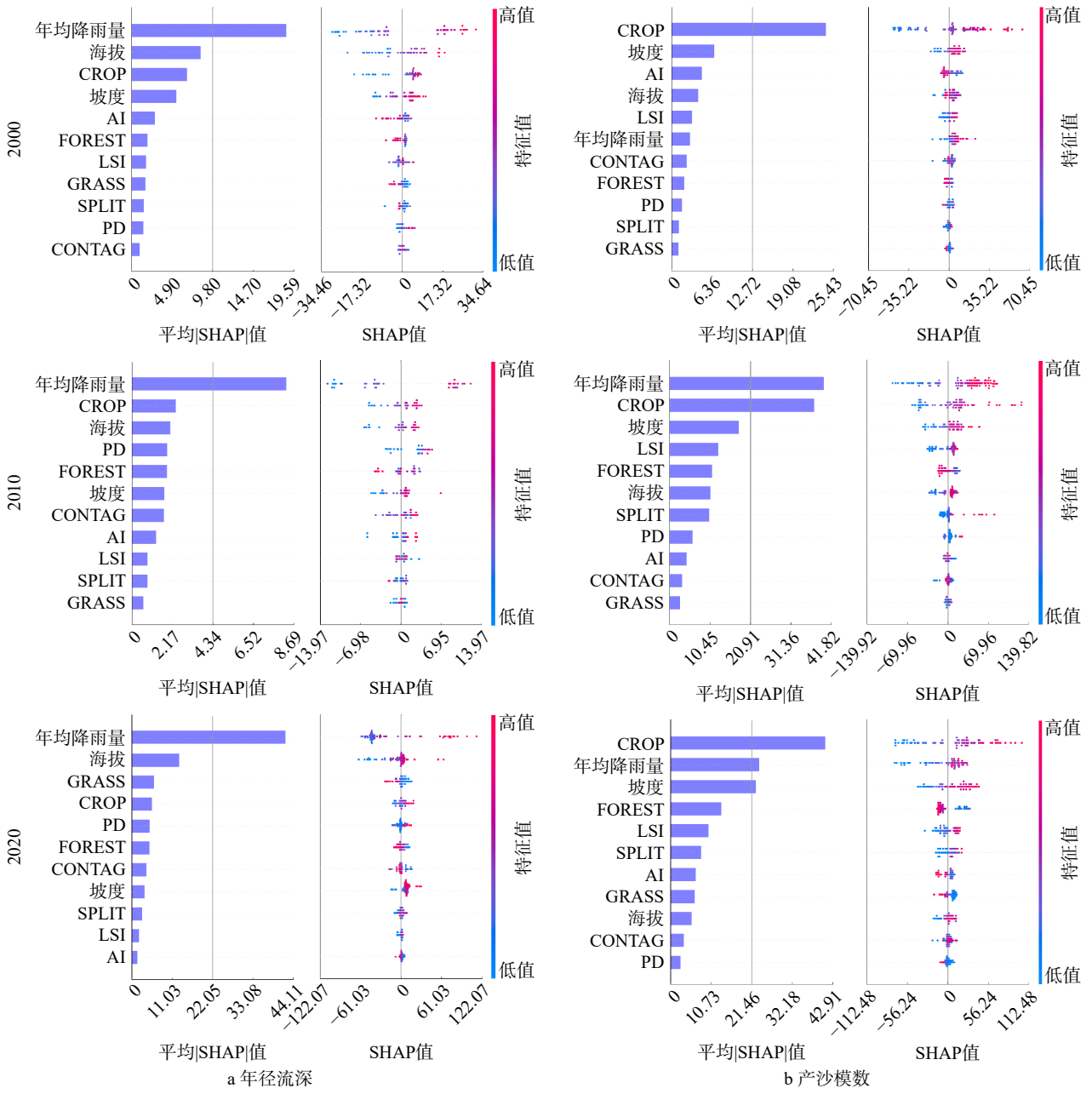


图 8　基于 SHAP 的年径流深与单位面积产沙量驱动因素的重要性分析

Fig. 8　SHAP-based importance of the drivers of annual runoff depth and specific sediment yield

在 2000、2010 和 2020 年的贡献率分别为 44.79%、23.95% 和 28.63%，在 3 个时期均保持较高贡献，是影响产沙模数的重要因子。这表明耕地分布、坡耕地利用及农业扰动仍是流域泥沙输出的重要来源。坡度和年均降雨量也对产沙模数具有较强影响。坡度的贡献率分别为 12.42%、11.45% 和 15.79%，在 3 个时期均维持较高水平，说明坡面地形条件对侵蚀产沙过程具有持续调控作用。年均降雨量的贡献率在 2010 年升高至 25.57%，2020 年仍达到 16.40%，表明降雨对泥沙输移的影响具有阶段性特征，在特定降雨条件下可能增强坡面侵蚀和泥沙搬运过程。同时，FOREST 和 SPLIT 等景观组成与配置因子对产沙模数的相对贡献在研究期内也发生了变化。其中，SPLIT 的贡献率由 2000 年的 2.09% 上升至 2020 年的 5.65%，因子排序由第 10 位上升至第 6 位；FOREST 的贡献率由 3.61% 上升至 9.32%，因子排序由第 8 位上升至第 4 位。这表明随着流域土地利用结构调整和景观空间重组，林地覆盖和景观分割程度对泥沙输出的调节作用逐渐凸显。结合 SHAP 分布特征来看，高耕地比例和高坡度条件通常更易对应正向 SHAP 值，说明其可能增加泥沙输出风险；而较高森林覆盖度和较稳定的景观结构则可能通过增强地表覆盖、削弱坡面径流能量和拦截泥沙输移，进而有助于降低产沙强度。

表 5 2000、2010、2020 年大宁河流域不同驱动因子相对贡献度变化

Tab. 5 Changes in relative contribution of different driving factors in the Daning River Basin in 2000, 2010 and 2020

驱动因子	年径流深/mm			产沙模数/(t·hm^{-2}·a^{-1})		
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
年均降雨量	36.50	35.26	46.86	5.26	25.57	16.40
海拔	16.36	8.73	14.43	7.77	6.80	3.90
CROP	13.09	10.03	6.11	44.79	23.95	28.63
坡度	10.62	7.43	3.88	12.42	11.45	15.79
AI	5.50	5.55	1.61	8.80	2.80	4.62
FOREST	3.70	7.99	5.31	3.61	7.10	9.32
LSI	3.44	3.55	3.10	5.93	8.12	6.99
GRASS	3.26	2.60	6.71	1.92	1.74	4.41
SPLIT	2.79	3.52	2.17	2.09	6.57	5.65
PD	2.78	8.04	5.46	3.00	3.81	1.85
CONTAG	1.95	7.30	4.37	4.42	2.10	2.43

3 讨论与建议

3.1 景观格局时空分布格局

大宁河流域景观格局变化是生态工程、自然地形条件和人类活动共同作用的结果。2000、2010、2020 年，流域土地利用结构始终以林地和耕地为主，两类用地的合计面积占比保持在 84% 以上。期间，林地呈小幅扩张趋势，耕地与草地有所缩减，而建设用地和水域面积增长较为显著；与此同时，AI 和 CONTAG 总体升高，而 PD 和 LSI 总体下降，表明流域景观整体由分散趋向聚集，景观聚集度和结构连通性有所增强，破碎化程度及边界复杂性总体降低。该变化与三峡库区已有研究结果基本一致。退耕还林、天然林保护和库区生态屏障建设等生态工程促进了林地恢复及生态斑块整合，使区域景观整体呈现由分散向集聚演变的趋势[23−24]。但部分指标在 2010 年后出现一定波动，说明局部区域仍存在景观再破碎化现象。

景观格局的空间差异可能与复杂地形对土地利用和人类活动的约束有关。流域中高海拔山区受地形限制，农业开发和建设活动相对较弱，林地斑块更易保持连续分布；而中下游河谷及地势平缓区域受农业利用和建设用地扩张影响较强，耕地与建设用地斑块交错分布，局部景观仍表现出较高的破碎化程度和边界复杂性。这与西南高山峡谷区及三峡库区小流域中地形条件与人类活动共同塑造景观格局的研究结论一致[25−26]。因此，大宁河流域景观格局虽然总体趋于聚集和连通，但中下游河谷及开发强度较高区域仍是景观破碎化防控的重点。

3.2 年径流深与产沙模数时空分异的影响因素

年径流深总体呈“西北高、东南低”的空间格局，主要受到降雨和地形条件控制，而土地利用和景观格局因子更多表现为调节作用。这一结果与三峡库区和西南喀斯特流域的相关研究结论基本一致，降水变化通常是流域径流变化的重要主控因素，其强度、频率及时空分布可显著影响坡面产流、河道补给和流域水量输出[27−28]。海拔和坡度则可通过影响降水空间分配、坡面汇流速度、土壤入渗及下垫面蓄泄过程，进一步塑造径流深的空间差异。此外，不同气候区水分条件和地形特征的差异，可能是造成径流驱动机制区域差异的重要原因。如黄土区及干旱半干旱区水分限制较强，植被恢复和土地利用变化往往会显著改变蒸散发、土壤水分和区域水量平衡，因此其对径流过程的影响更加突出[29−30]。相比之下，大宁河流域位于亚热带湿润山区，降雨较为充沛，且地形起伏明显，径流形成过程更容易受到气候水分输入和地形分异的直接控制。因此，在大宁河流域，土地利用和景观格局更多表现为对径流形成过程的间接调节，其相对贡献低于降雨和地形因子。因此，在大宁河流域，土地利用和景观格局主要通过改变地表入渗、蓄水能力和汇流路径调节径流过程，其相对贡献总体低于降雨和地形因子。

与径流过程不同，产沙模数总体表现为“北部和中部较高、东南部较低”的空间格局，其变化不仅取决于降雨侵蚀力和坡度条件，还受地表覆盖、景观分割以及泥沙源区与汇流通道空间连通性的共同影响。这与重庆区域及黄土高原流域中关于耕地和破碎化景观增强径流与产沙输出的研究结论相一致[31−33]。其原因是耕地和破碎化斑块往往具有较低植被覆盖、较高土壤扰动和较强坡面汇流连通性，容易促进土壤颗粒剥蚀和泥沙向河道输移[34−35]。同时，本研究中 FOREST 和 SPLIT 的相对重要性在不同年份有

所变化，说明随着土地利用结构和空间配置变化，模型预测的产沙模数对林地覆盖和景观分割程度表现出更高敏感性。较高林地覆盖能够通过冠层截留、根系固土、增加地表粗糙度和降低坡面径流能量来削弱泥沙输移[36]。相反，景观分割程度升高可能导致斑块破碎化和边界复杂性增强，增加裸露地表、耕地斑块或扰动斑块与坡面汇流路径之间的连接机会，从而提高泥沙由坡面向沟道输移的风险[37]。因此，景观破碎化在区域土壤侵蚀过程中发挥关键作用。当耕地、裸露地表和其他扰动斑块沿坡面汇流路径或邻近河道分布时，较高的景观分割程度可能增强泥沙源区与沟道之间的水文连通性，从而提高泥沙输移风险。这一结果表明，维持景观结构完整性和生态连通性、降低农业区和建设扩张区的斑块破碎化程度，是削弱土壤侵蚀风险和提升流域生态稳定性的重要途径。因此，产沙过程不仅受土地利用类型面积比例的影响，还取决于各类斑块在坡面和河网周边的空间配置。维持生态斑块的空间完整性、降低高风险农业区和建设扩张区的景观分割程度，是削弱泥沙输移和降低水土流失风险的重要途径。

尽管本研究结合 SWAT 模型、景观格局指数和 XGBoost-SHAP 方法揭示了大宁河流域景观格局演变对径流与产沙过程的影响，但仍存在一定不确定性。如 XGBoost-SHAP 模型能够较好识别非线性响应和变量相对贡献，但其结果主要反映统计关联和模型解释关系，并不能完全等同于严格因果机制[38]。此外，随机划分训练集和验证集可能受到空间自相关影响，从而在一定程度上高估模型泛化能力[39]。后续研究可引入空间分块交叉验证、结构方程模型或过程机理模型对比分析，并结合野外调查和泥沙来源示踪技术，进一步验证景观格局变化影响径流与产沙过程的生态水文机制。

3.3　流域景观优化与水土保持管理建议

大宁河流域生态管理应由单纯增加林地面积转向景观空间配置优化和重点风险区精准治理。针对中下游河谷及中北部高产沙风险区，应控制坡耕地扩张和建设用地无序发展，优化耕地斑块的空间布局，减少高侵蚀风险斑块与河道之间的直接连通。对于高坡度和高产沙风险耕地，可优先实施植被缓冲带建设、坡耕地整治及退耕还林还草工程，以降低坡面径流能量和泥沙输移能力[40−41]。在中高海拔林地集中分布区，应重点维持林地斑块的完整性和结构连通性，减少道路建设、零散开发和不合理采伐造成的新增破碎化。对于林耕交错区及高产沙风险子流域，可通过生态廊道构建、河岸缓冲带修复和林草斑块连接，优化“源—汇”景观配置，减少斑块分割和边界复杂性，削弱泥沙源区与河道之间的直接连通。综上，大宁河流域径流与产沙过程具有明显的差异化驱动特征。年径流深主要受降雨和地形条件控制，土地利用和景观格局主要发挥调节作用；产沙模数则受耕地比例、降雨、坡度及景观空间配置的共同影响。未来流域管理应在维持林地和其他生态斑块空间完整性的基础上，重点优化坡耕地布局并降低高风险区域的景观分割程度，从而协同提升景观连通性、水土保持能力和流域生态安全水平。

4　结　　论

本研究基于大宁河流域 2000、2010 和 2020 年土地利用数据，结合 SWAT 模型与 XGBoost-SHAP 分析，揭示了景观格局演变特征及其与径流、泥沙空间分异的关联，主要结论如下。

（1）2000—2020 年，流域土地利用以林地和耕地为主，二者面积占比超过 84%。建设用地和水域面积明显增加，城镇扩张推动了局部土地利用格局调整。

（2）景观格局整体向聚集化演变，斑块破碎化程度与边界复杂性降低。中高海拔山区林地分布集中、景观完整性较高；中下游平缓地区受农业开发与建设用地扩张影响，景观破碎化特征仍较明显。

（3）年径流深和产沙模数具有明显空间异质性，分别呈“西北高、东南低”和“北部、中部高、东南部低”的分布格局。产沙高值区多与景观破碎化程度较高、人类活动较强的区域重叠。

（4）XGBoost-SHAP 分析表明，降雨对年径流深预测的贡献最为突出，地形亦具有重要贡献；产沙模数则与耕地比例、降雨、坡度及景观格局等因素密切相关，其中耕地比例在多数年份保持较高贡献，体现出径流与泥沙空间分异的关键关联因素存在差异。

景观整体聚集化与局部产沙高值可以并存，流域治理应兼顾景观完整性保护与局部产沙风险防控。在保护中高海拔连续林地的基础上，结合耕地分布、坡度和产沙高值区识别水土保持优先区域，通过土地利用配置优化与针对性治理，提高流域水土保持能力。

参　考　文　献

[1] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 798−804.
Fu B J, Lü Y H, Chen L D, et al. The latest progress of landscape ecology in the world [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 798−804.

[2] 刘雯丹, 吴一平, Kivalov Sergey, 等. 汉江流域安康段径流和泥沙对土地利用变化的响应 [J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(9): 2347−2361.

Liu W D, Wu Y P, Sergey K, et al. Responses of runoff and sediment to land use change in the Ankang section of the Han River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(9): 2347−2361.

[3] Yang H, Qi Z X, Huang W, et al. Evaluating the impact of "source-sink" landscape composition and configuration changes on sediment yield in watersheds using a coupled multi-model framework [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 534: 146998.

[4] Yin S W, Wang Y F, Wu H H, et al. Future landscape pattern optimization based on runoff response across different temporal scales: a SWAT-PLUS coupled model simulation in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2026, 65: 103426.

[5] 魏冲, 董晓华, 马耀明, 等. 多源土地利用数据下景观格局对径流−泥沙影响的不确定性——以鄱阳湖区虎山流域为例 [J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1102−1115.
Wei C, Dong X H, Ma Y M, et al. Uncertainty analysis on the effects of landscape pattern on runoff and sediment using multi-source land use data: a case study in the Hushan River Basin of the Poyang Lake Regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1102−1115.

[6] Song S Y, Yu D Y, Li X Y. Impacts of changes in climate and landscape pattern on soil conservation services in a dryland landscape [J]. Catena, 2023, 222: 106869.

[7] 梁越, 秦伟, 张勤, 等. 多时间尺度小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 155−166.
Liang Y, Qin W, Zhang Q, et al. Response of sediment yield under different temporal scales to land use/cover pattern changes in typical watershed of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(8): 155−166.

[8] 周添惠, 杨磊, 赵方凯, 等. 渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(1): 58−66.
Zhou T H, Yang L, Zhao F K, et al. Impacts of source and sink landscape dynamics on runoff and sediment in the source watershed of the Weihe River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 58−66.

[9] Wang K, Liu G, Wang X K, et al. Dynamic change of watershed sediment sources during implementation of the "Grain for Green" project in the coarse sandy areas of the Chinese Loess Plateau [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025, 13(3): 564−575.

[10] Qin Y L, Shi P, Hu Y, et al. Landscape indices explain different responses of runoff and sediment yield to land use/cover change on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2025, 249: 108674.

[11] 程陆陆, 兰梦瑶, 关颖慧, 等. 西南高山峡谷区景观格局变化及其对土壤侵蚀的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(24): 12416−12432.
Cheng L L, Lan M Y, Guan Y H, et al. Landscape pattern changes and their impacts on soil erosion in the southwest alpine canyon area of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12416−12432.

[12] Zhang Y, Bi Z L, Zhang X, et al. Influence of landscape pattern changes on runoff and sediment in the Dali River Watershed on the Loess Plateau of China [J]. Land, 2019, 8(12): 180.

[13] Zhang W L, Tang Z K, Yan Y T, et al. New insight into identifying sediment phosphorus sources in multi-source polluted urban river: effect of environmental-induced microbial community succession on stability of microbial source tracking results [J]. Environmental Research, 2024, 247: 118215.

[14] 尹思危, 王跃峰, 周琨鸿, 等. 三峡库区小流域景观格局变化洪枯径流效应及归因分析 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 7962−7976.
Yin S W, Wang Y F, Zhou K H, et al. Runoff extreme responses to watershed landscape pattern changes and their attribution analysis in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 7962−7976.

[15] Gou M M, Li L, Ouyang S, et al. Integrating ecosystem service trade-offs and rocky desertification into ecological security pattern construction in the Daning River Basin of southwest China [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108845.

[16] Zhang X Q, Qi Y, Li H Y, et al. Assessing the response of non-point source nitrogen pollution to land use change based on SWAT model [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111391.

[17] Wang A, Wang J Y, Luan B J, et al. Quantifying the impact of land use changes on surface runoff in the Loess Plateau area of Northwest China by SWAT [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377: 124641.

[18] 杨佳, 斛如媛, 赵海平, 等. 基于 XGBoost-SHAP 的三峡库区生态屏障区生态系统服务权衡及驱动力分析 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 127−138.
Yang J, Hu R Y, Zhao H P, et al. Analysis of trade-offs and driving forces of ecosystem services in ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir Area based on XGBoost-SHAP model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 127−138.

[19] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30: 4765−4774.

[20] Lundberg S M, Erion G, Chen H, et al. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees [J]. Nature Machine Intelligence, 2020, 2: 56−67.

[21] Graham M H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression [J]. Ecology, 2003, 84(11): 2809−2815.

[22] Zuur A F, Ieno E N, Elphick C S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(1): 3−14.

[23] 陈雅如, 肖文发, 滕明君, 等. 三峡库区 1992—2012 年森林景观格局演变研究 [J]. 林业科学研究, 2018, 30(4): 542−550.
Chen Y R, Xiao W F, Teng M J, et al. Evolution of forest landscape pattern in the Three Gorges Reservoir Area during 1992−2012 [J]. Forest Research, 2018, 30(4): 542−550.

[24] 吴娇, 李月臣. 三峡库区 (重庆段) 景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4):

308−317.
Wu J, Li Y C. Variation of landscape pattern and its influences on ecosystem service in value in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section) [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(4): 308−317.

[25] 陈雅如, 肖文发, 滕明君, 等. 三峡库区景观格局粒度效应及其对土地利用变化过程的响应 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 588−599.
Chen Y R, Xiao W F, Teng M J, et al. Grain size effect of landscape pattern and its response to land use change in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 588−599.

[26] 汪荣, 李阳兵, 邵景安, 等. 2000—2020 年三峡库区腹地人地耦合土地系统演变机制 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 255−264.
Wang R, Li Y B, Shao J A, et al. Evolution mechanism for human-land coupling land system in the hinterland of the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(10): 255−264.

[27] Zhang X, Chen X M, Zhang W S, et al. Impact of land use changes on the surface runoff and nutrient load in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Sustainability, 2022, 14(4): 2023.

[28] Li Z W, Xu X L, Xu C H, et al. Annual runoff is highly linked to precipitation extremes in karst catchments of Southwest China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(10): 2745−2759.

[29] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16: 2617−2628.

[30] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019−1022.

[31] 冯斌, 张学伍, 徐敏, 等. 土地利用变化对泥沙连通性及泥沙输移的影响——以重庆市涪陵页岩气开采区为例 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 171−179.
Feng B, Zhang X W, Xu M, et al. Effects of landscape pattern change on sediment connectivity and sediment transport: taking Fuling Shale Gas Production Area in Fuling Area of Chongqing City as a case area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 171−179.

[32] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed [J]. Catena, 2012, 99: 1−8.

[33] 许文旭, 毕华兴, 王亚娟. 晋西黄土区流域景观格局对径流及其组分的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 118−126.
Xu W X, Bi H X, Wang Y J. Effects of watershed landscape pattern on runoff and its components in the loess region of western Shanxi Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 118−126.

[34] 李朝月, 方海燕. 基于 SWAT 模型的寿昌江流域产沙模拟及影响因素分析 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 127−135，142.
Li C Y, Fang H Y. Simulation of sediment yield and analysis of influencing factors in the Shouchang River Basin based on SWAT model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 127−135, 142.

[35] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(1): 59−78.

[36] 李亚娇, 沈明昕, 李家科, 等. 汉江流域上游景观格局变化及水沙响应关系 [J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(4): 538−550.
Li Y J, Shen B X, Li J K, et al. Changes of landscape pattern and response relationship between water and sediment in the upper reaches of Hanjiang River Basin [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(4): 538−550.

[37] 田昌园, 张红丽, 汪军红, 等. 近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 37−44.
Tian C Y, Zhang H L, Wang J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 37−44.

[38] Janzing D, Minorics L, Blöbaum P. Feature relevance quantification in explainable AI: a causal problem[C]// Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Xiamen: PMLR, 2020: 2907−2916.

[39] Roberts D R, Bahn V, Ciuti S, et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure [J]. Ecography, 2017, 40(8): 913−929.

[40] Dunn R M, Stevens C J, Gooddy D C, et al. Impacts of different vegetation in riparian buffer strips on runoff and sediment loss [J]. Science of the Total Environment, 2022, 837: 155890.

[41] Wei H, Liu H, Xu Z, et al. Effects of vegetation restoration on soil erosion on the Loess Plateau [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(17): 9095.

（责任编辑　李　契
责任编委　张建国）