

云南干热河谷地貌水土流失时空动态监测及驱动因素分析~以元谋地区为例

丁小丽

云南今禹生态工程咨询有限公司 云南 昆明 650000

摘要:本研究针对云南元谋干热河谷,构建适配干热环境的改良RUSLE模型,结合地理探测器定量解析水土流失时空动态及驱动机制。结果显示:研究区水土流失呈“先升后降”年际趋势与显著季节性,空间上呈“河谷轻、坡面重”格局,重心向西北山地迁移;植被覆盖度、降雨侵蚀力与坡度是核心主导因子,自然基底与人为扰动耦合驱动侵蚀演变。研究明确了区域水土流失演变规律与主控因素,为干热河谷生态治理提供科学依据。

关键词:干热河谷;元谋;水土流失;时空动态

引言:云南元谋干热河谷地形陡峭、气候干热、土质疏松,是我国西南生态脆弱区与水土流失高发区。现有通用模型难以适配其特殊环境,水土流失时空演变规律与驱动机制尚不明晰。本研究基于多源数据构建本地化改良RUSLE模型,结合时空动态分析与地理探测器,精准测算区域水土流失强度,定量识别自然与人为驱动因子贡献度,揭示其耦合作用机制,以期为干热河谷水土流失精准防控与生态修复提供科学支撑。

1 研究区概况与数据预处理

1.1 元谋干热河谷研究区概况

元谋干热河谷地处云南省北部金沙江中游流域,地理位置介于东经 $101^{\circ}35'-102^{\circ}06'$ 、北纬 $25^{\circ}23'-26^{\circ}06'$ 之间,是我国西南干热河谷地貌的典型核心区域。区域整体地势南北狭长、高低起伏悬殊,河谷纵深落差大,山体坡度普遍较陡,特殊的地形地貌为水土流失发生提供了基础地形条件。气候上属南亚热带干热季风气候,全年干热少雨、蒸发量远大于降水量,干湿季分明,年均降水量集中在6-9月,短时强降雨频发,极易引发坡面冲刷侵蚀。区域土壤以燥红土、赤红土为主,土层浅薄、土质疏松、抗蚀性极差,植被覆盖率整体偏低,干季植被枯落、地表裸露问题突出。同时区域人类活动密集,农业开垦、道路建设、林地砍伐等人为扰动频繁,叠加恶劣的自然条件,使得元谋干热河谷成为云南省水土流失高发、生态环境脆弱的重点区域,具备极高的水土流失研究典型性与代表性。

1.2 数据来源与基础数据集构建

本研究数据来源兼顾权威性、时效性与适配性,核心基础数据涵盖地形、气象、土壤、植被及人类活动五大类。地形数据采用30m分辨率DEM数字高程数据,用于提

取坡度、坡长、地形起伏度等核心地形因子;气象数据选取元谋县近20年逐日降雨、气温数据,来源于国家气象科学数据中心,为降雨侵蚀力计算提供支撑;土壤数据采用全国第二次土壤普查及后续更新的1:10万土壤类型与土壤属性数据,获取土壤质地、有机质含量等抗蚀性参数^[1]。植被数据基于Landsat系列卫星遥感影像,预处理后提取年度NDVI植被覆盖度数据。人类活动数据包含土地利用类型、人口密度、耕地分布等矢量数据。基础数据集构建过程中,统一所有数据投影坐标系与空间分辨率,通过数据拼接、裁剪、属性修正、缺失值补齐等操作,剔除异常数据,形成标准化、一体化的研究基础数据集,为后续模型测算与特征分析提供精准数据支撑。

1.3 数据预处理流程

针对多源异构数据,依托ArcGIS、ENVI构建标准化预处理流程。首先对Landsat影像进行辐射定标、大气及几何校正,精准提取植被覆盖度等地表参数;其次对DEM进行洼地填充与地形因子重分级,修正地形误差;气象数据采用克里金插值转化为面状降雨侵蚀力栅格;土壤与土地利用数据经矢量转栅格、重采样及掩膜裁剪,统一为30m分辨率。最后对所有数据进行坐标统一、归一化、异常值剔除与精度验证,构建时序连续、空间匹配、属性完整的预处理数据集。该流程有效规避多源数据误差,保障后续水土流失测算、时空分析及驱动因子识别的准确性与科学性。

2 元谋干热河谷水土流失定量测算及时空表征方法

2.1 土壤侵蚀RUSLE修正模型构建(适配干热河谷)

传统RUSLE模型适配常规湿润区域,无法精准适配元谋干热河谷干热少雨、植被季节性差异显著、土壤抗蚀性弱的特殊环境。本研究基于研究区地域特征,对

模型五大核心因子进行针对性修正,构建适配干热河谷的改良RUSLE模型。针对降雨侵蚀力因子R,结合元谋短时强降雨集中、干季无侵蚀的特点,优化降雨侵蚀力计算公式,剔除无效降雨数据,提升降雨侵蚀力测算精度。土壤可蚀性因子K结合区域燥红土理化特性,修正传统K值估算参数,贴合本地土壤抗蚀特征。地形因子LS优化陡坡区域计算算法,适配河谷大坡度地形特征。植被覆盖与管理因子C区分干湿季植被覆盖差异,引入季节性植被修正系数。水土保持措施因子P结合元谋梯田、退耕还林、坡面治理等本土水保工程优化赋值标准。修正后的模型有效弥补了传统模型在干热河谷区域的适配缺陷,大幅提升水土流失定量测算的精准度与区域适用性^[2]。

2.2 水土流失强度分级标准(适配云南干热河谷)

现有全国通用水土流失强度分级标准未兼顾云南干热河谷特殊自然条件,存在分级阈值偏高、强度判定失真的问题,无法精准反映元谋区域水土流失真实状况。本研究依据《土壤侵蚀分类分级标准》,结合云南干热河谷地形、气候、土壤及植被特征,优化构建本地化水土流失强度分级标准。基于修正RUSLE模型测算的土壤侵蚀模数,结合元谋河谷坡面侵蚀、沟谷侵蚀的空间差异,微调各级侵蚀强度阈值,适配区域轻度侵蚀频发、局部剧烈侵蚀集中的特征。将水土流失强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈六个等级,明确各等级对应的侵蚀模数区间、地表侵蚀特征及空间分布特点。同时结合区域生态管控要求与土地利用现状,细化不同用地类型的侵蚀强度判定规则,规避通用标准在干热河谷区域判定偏差问题,为后续水土流失时空格局分析、强度动态演变研究提供标准化、本地化的分级依据。

2.3 水土流失时空动态分析模型

为精准揭示元谋干热河谷水土流失的时序演变与空间分异规律,本研究构建多维度水土流失时空动态分析模型。时间维度采用时序趋势分析法,基于多年连续侵蚀模数数据,通过年均变化率、趋势显著性检验,刻画不同时段水土流失强度的增减变化时序特征,识别水土流失演变关键节点与变化周期。空间维度引入空间格局分析法,通过景观格局指数、空间自相关分析,探究水土流失强度的空间集聚、离散分布特征,识别高侵蚀核心区与低值稳定区。多模型耦合的分析体系可全方位覆盖时间动态、空间格局、转移演化三大研究维度,精准解析元谋干热河谷水土流失的时空演变规律,为区域水土流失治理提供空间靶向依据。

3 元谋地区水土流失时空动态演变特征分析

3.1 水土流失时间维度动态变化规律

基于多年时序水土流失测算数据,从年际、季节双重维度剖析元谋干热河谷水土流失时间动态变化规律。年际尺度上,研究区水土流失整体呈现“先波动上升、后稳步递减”的演变趋势,早期受无序开垦、植被破坏等人为因素影响,水土流失面积持续扩张、侵蚀强度逐年提升;后期随着退耕还林、水土保持工程落地实施,生态修复成效显著,整体侵蚀强度稳步下降^[3]。季节尺度上,水土流失呈现极强的季节性分异特征,雨季强降雨集中,坡面冲刷、沟谷侵蚀作用剧烈,是水土流失高发时段,高强度侵蚀集中分布于6-9月;干季降水稀少、地表径流微弱,植被虽有枯萎,但水力侵蚀作用大幅减弱,整体以微度、轻度侵蚀为主。时序变化特征表明,降雨节律是水土流失短期波动的核心诱因,生态治理与人为管控是年际演变的主导因素,整体呈现“雨期集中爆发、干季平稳可控、长期持续改善”的时间演变规律。

3.2 水土流失空间分布格局特征

元谋干热河谷水土流失呈现显著的空间异质性与集聚性特征,整体表现为“河谷底部轻、山体坡面重、沟谷带集中”的空间分布格局。从地形梯度来看,低海拔河谷平缓区域地势平坦、径流流速缓慢,水土保持条件较好,以微度、轻度侵蚀为主,侵蚀分布均匀且稳定;中高海拔陡坡区域地形起伏大、坡面径流冲刷力强,加之土层浅薄、植被覆盖不足,是中度及以上水土流失的主要分布区。从空间集聚特征来看,水土流失高值集聚区主要分布于区域北部、西部山地陡坡及耕地集中开垦区域,人为扰动与自然侵蚀叠加效应显著,存在多处剧烈侵蚀核心斑块;低值集聚区集中于河谷城镇建成区、生态修复林区,植被覆盖稳定、水土保持能力较强。整体空间格局呈现斑块状、条带状交织分布的特征,地形起伏与土地利用类型是决定水土流失空间分异的核心基础条件。

3.3 水土流失空间转移与重心演化

通过水土流失强度转移矩阵与重心迁移模型分析可知,元谋干热河谷水土流失各强度等级存在明显的空间转移特征。研究时段内,微度、轻度侵蚀区域稳定性较强,转移概率较低;中度、强烈侵蚀区域转化最为活跃,大量中强度侵蚀斑块向轻度侵蚀转化,同时少量陡坡裸地区域存在轻度侵蚀向高强度侵蚀恶化的现象,整体呈现“整体改善、局部退化”的转移特征。空间重心演化方面,水土流失高强度重心整体呈现“向西北山地、高海拔区域迁移”的趋势,迁移速率逐年放缓。早

期高强度侵蚀重心集中于河谷中部农耕密集区,随着低海拔区域生态治理、耕地规整,人为侵蚀得到有效管控,侵蚀重心逐步向地形复杂、治理难度大的西北山地转移。这一演化特征表明,元谋水土流失治理成效主要集中于平缓河谷区域,山地陡坡仍是后续水土流失防控的重点难点区域,空间治理短板特征显著。

4 元谋干热河谷水土流失复合驱动因素定量识别

4.1 水土流失驱动因子分类体系构建

结合元谋干热河谷区域生态特征与水土流失形成机制,构建“自然基底-人为扰动”二元驱动因子分类体系,实现水土流失驱动因素的系统化、层级化划分。自然驱动因子聚焦区域固有生态基底,选取地形、气象、土壤、植被四大核心类别,具体包含坡度、坡长、年均降雨量、降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖度等基础因子,反映自然本底条件对水土流失的基础性、长期性控制作用。人为驱动因子侧重人类活动扰动影响,选取土地利用类型、耕地开垦强度、人口密度、生态治理措施、道路建设强度等因子,体现短期人为活动对地表覆被、水土保持条件的扰动与改造。所有因子均遵循科学性、可量化性、地域性原则筛选,剔除冗余、低效因子,构建层级清晰、适配干热河谷的驱动因子体系,为后续单因子相关性分析、多因子耦合驱动解析提供标准化指标框架,保障驱动机制研究的系统性与精准性。

4.2 基于地理探测器的驱动因子定量解析

为突破传统相关性分析无法量化因子解释力的局限,本研究引入地理探测器模型,定量解析各驱动因子对元谋干热河谷水土流失的独立解释力与差异贡献度。因子探测结果显示,植被覆盖度、降雨侵蚀力、地形坡度是解释水土流失空间分异的核心主导因子,单因子解释力均处于较高水平,主导区域水土流失整体空间格局;土壤可蚀性、土地利用类型、耕地开垦强度为次要驱动因子,解释力相对较弱,起到辅助调控作用^[4]。交互探测结果表明,任意两个因子交互后的解释力均高于单因子独立解释力,不存在独立作用的单一主导因子。通过风险探测识别出各因子的临界阈值,明确高降雨、陡坡、低植被覆盖、高强度人为开垦是水土流失高发的核心风险区间。地理探测器定量解析精准厘清不同驱动因

子的贡献权重与作用强度,实现水土流失驱动机制的量化研究。

4.3 自然-人为驱动耦合作用机制

元谋干热河谷水土流失的形成与演变是自然基底约束与人为扰动叠加耦合的综合结果,二者形成“自然定基底、人为调格局”的耦合驱动机制。自然因子是水土流失发生的基础先决条件,干热少雨的气候、疏松易蚀的土壤、陡峭起伏的地形构成了区域水土流失脆弱的生态基底,决定了水土流失的整体空间分布格局与易发属性,是长期稳定的基础性驱动力量。人为因子是水土流失加剧与改善的核心调控变量,无序的耕地开垦、植被破坏、工程建设会破坏地表水土保持结构,放大自然侵蚀效应,加剧水土流失;而退耕还林、坡面治理、生态修复等管控措施可有效改善地表覆被,削弱自然侵蚀强度。自然因子提供侵蚀潜力,人为因子触发或抑制侵蚀过程,二者交互耦合、协同作用,共同主导元谋干热河谷水土流失的时序演变与空间分异,形成了区域独特的水土流失复合驱动机制。

结束语

本研究通过构建适配元谋干热河谷的改良RUSLE模型,精准揭示区域水土流失“整体改善、局部退化”的时空演变特征,明确植被覆盖度、降雨侵蚀力与坡度为核心主导因子,阐明了自然基底与人为扰动的耦合驱动机制。研究成果证实山地陡坡为后续治理重点,为干热河谷水土流失靶向防控、生态修复工程布局提供量化依据与科学参考,对区域生态环境可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1]刘方炎,高成杰,李昆,等.西南干热河谷植物群落稳定性及其评价方法[J].应用与环境生物学报,2021,27(2):334-350.
- [2]李振学,刀志刚,赵高卷,等.元江干热河谷海拔梯度植物群落组成及多样性格局[J].广西植物,2024,44(11):2141-2151.
- [3]刘英豪,解明恩,秦才江.云南元江干热河谷萨王纳气候特征与成因[J].云南地理环境研究,2023,35(5):61-69.
- [4]杨礼,柴波,徐敬宾,等.地形地貌和结构面组合对岩质滑坡易发性的影响[J].云南水力发电,2026,42(4):166-172.