

基于 ArcGIS 的小流域土壤侵蚀模数估算及精度验证

边巴央金

西藏自治区水土保持局 西藏 拉萨 850032

【摘要】：利用 ArcGIS 空间分析技术对小流域土壤侵蚀模数进行系统估算，为精准识别高侵蚀区域提供技术手段。通过分析地形、降雨和土壤因素，建立土壤侵蚀模数空间分布模型，并与实测数据进行精度验证。结果显示，基于 GIS 的估算方法在空间分布和数值精度上均表现出较高一致性，能够有效支持流域水土保持和土地管理。研究表明，该方法可为小流域土壤侵蚀动态监测提供可靠的数据基础。

【关键词】：ArcGIS；小流域；土壤侵蚀；模数估算；精度验证

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.061

引言

小流域是水土流失的重要单元，其土壤侵蚀状况直接影响区域水资源和生态环境。准确评估小流域土壤侵蚀模数对于制定科学的水土保持措施具有重要意义。传统测量方法受限于工作量大、空间覆盖不足等问题，难以满足精细化管理需求。ArcGIS 作为空间分析和地理信息处理平台，能够高效整合地形、降雨和土壤数据，实现土壤侵蚀模数的空间化估算。结合实测数据进行精度验证，可以提升模型的可靠性和实用价值，为小流域水土保持策略提供精准参考。

1 土壤侵蚀评估指标与数据获取

1.1 流域边界和地形数据

小流域的边界确定是土壤侵蚀评估的基础，通过高精度数字高程模型 (DEM) 对地形进行精细化分析，可明确水系分布、汇流路径及坡向特征。边界划定过程中，应结合流域分水岭自动提取算法，确保不同尺度下坡面水文单元的完整性和连续性。同时，对 DEM 进行空洞填补、平滑处理及坡度、坡长计算，能够准确反映地形起伏和径流集中程度，为后续土壤侵蚀模数计算提供精确输入。高分辨率地形数据的集成应用不仅能够提高空间分析的精度，还可以在多源数据融合中实现地形特征的动态更新和时空变化分析，为小流域土壤侵蚀动态模拟提供坚实基础。

1.2 降雨及水文因子获取

降雨量及其空间分布是土壤侵蚀的重要驱动因子。通过遥感资料和气象站数据结合的方式，可获取不同时间尺度下的降雨特征，包括降雨强度、持续时间及年际变化规律。水文因子获取不仅限于降雨，还需考虑地表径流系数、土壤含水量及汇流时间参数，这些因素直接影响土壤侵蚀量的计算精度^[1]。运用高精度气象资料和 GIS 空间插值技术，能够形成连续的降雨和径流分布图，便于建立土壤侵蚀模数空间化模型。同时，将历史水文数据与地形、土地利用变化结合分析，可揭示小流域降雨径流对土壤侵蚀的敏感性，提升预测模型的科学性和适应性。

1.3 土壤性质与植被覆盖信息

土壤类型、质地和侵蚀易损性是土壤侵蚀模数估算的关键控制因素。通过土壤数据库与实测数据相结合，可获取土壤团粒结构、孔隙度、渗透性及有机质含量等指标，分析不同土壤条件下的侵蚀敏感性。植被覆盖率和植被类型对降雨冲刷和径流速度具有重要调节作用，可通过遥感影像提取 NDVI 指数实现空间化映射。将土壤物理化学属性与植被空间分布信息整合到 GIS 平台，可构建土壤侵蚀模数估算的综合因子库，实现对小流域高侵蚀区的精细化识别。数据处理过程中可引入机器学习算法优化因子权重，提高模型预测的精准度和适应性。

2 ArcGIS 空间分析方法构建

2.1 数字高程模型处理

数字高程模型 (DEM) 处理是小流域土壤侵蚀空间分析的核心环节，通过高分辨率 DEM 可精确重建地形起伏和坡面微地形特征。处理流程包括数据预处理、空洞填补、滤波平滑及重采样，以消除测量误差和分辨率不一致带来的偏差。DEM 数据可用于计算坡度、坡向及汇流路径，为水动力侵蚀模拟提供基础参数。多源 DEM 融合技术可整合卫星遥感与地面测量数据，提高地形重构精度。通过分级处理和栅格化方法，可将地形信息转化为土壤侵蚀评估可用的空间分析单元，实现对小流域不同坡段和微地形的精细化解析，为后续坡度、坡长及径流分析提供可靠的空间基础。

2.2 坡度、坡长与径流分析

坡度、坡长及径流汇流特征直接影响土壤侵蚀强度和模数分布。利用 ArcGIS 空间分析工具，可基于 DEM 自动提取坡度和坡长，并结合流域边界计算水流汇集路径及集中流量指标。通过分级坡面处理，可识别高侵蚀敏感区，实现坡度-坡长复合因子的空间化表达^[2]。径流分析涉及水流累积量、流向和汇流系数计算，将水动力作用量化为可用于模数计算的空间变量。采用多时间尺度降雨径流数据与坡度、坡长信息结合，可模拟不同水文条件下的土壤侵蚀过程，实现动态分析。通过 GIS 网络分析与栅格分析方法，可对流域内径流路径进行高精度划

分, 为小流域土壤侵蚀模数计算提供空间支撑。

2.3 土壤侵蚀模数空间计算

土壤侵蚀模数计算以空间数据为基础, 将坡度、坡长、降雨因子、土壤性质和植被覆盖等综合指标转化为模数估算公式。ArcGIS 可实现栅格化运算, 将各因子按照权重整合, 生成小流域土壤侵蚀模数分布图, 实现空间可视化。空间分析方法可采用加权叠加、栅格运算及地理统计方法, 提升模型的精细度和局部差异辨识能力。模数计算过程中可引入高分辨率遥感数据和机器学习优化算法, 对空间非线性关系进行拟合, 减少估算偏差。最终输出的空间化模数结果可用于高侵蚀区识别和土壤管理决策, 为流域水土保持措施提供量化依据, 并支持动态监测与精细化管理。

3 小流域土壤侵蚀模数估算

3.1 模数计算公式选择

土壤侵蚀模数的计算公式选择是估算精度的关键环节, 需要将降雨动力、土壤易蚀性、地形特征和植被覆盖等多因素进行综合量化。通过分析 R、K、LS、C、P 等因子在不同土壤类型和坡面条件下的作用机理, 可确定适合小流域尺度的改进公式, 使其兼顾空间分异性与可操作性。在公式构建过程中, 需引入栅格化运算与权重分配方法, 将各因子转化为可叠加的空间量值, 并应用非线性调节系数优化坡度和径流响应对模数的影响。通过公式参数与实测数据校准, 可提升估算的可靠性和科学性, 同时支持多尺度和多时间步的动态模拟, 为高分辨率土壤侵蚀监测提供可操作的数学工具。该方法不仅保证了土壤侵蚀强度的空间差异准确反映, 还可为后续高侵蚀区识别和管理策略提供量化基础。

3.2 空间分布图生成

土壤侵蚀模数空间分布图的生成依托 ArcGIS 平台, 将栅格化数据、坡度、坡长及径流等多源因子进行空间叠加运算, 形成连续的空间化模数分布图。通过高精度栅格运算, 可反映小流域内不同坡段的侵蚀强度及潜在风险。数据处理过程中, 需应用地理加权回归和空间插值技术, 实现对空间非均匀性和局部高值的精细识别^[3]。生成的分布图不仅显示侵蚀模数的空间梯度, 还可结合历史降雨和土地利用变化分析其时空动态特征, 为决策提供直观可视化依据。分布图中高模数区域与低模数区域的清晰界定, 有助于对不同防治措施的空间优化和优先级排序, 为科学管理和精准治理提供有效工具。

3.3 关键高侵蚀区识别

关键高侵蚀区识别依托空间模数分布图, 将高风险区域与地形、水文及土壤条件综合分析, 实现侵蚀热点的精细划分。通过多因子叠加分析, 可提取模数值超过阈值的区域, 进一步结合坡度和径流集中区对高侵蚀区进行精确定位。空间分析中, 可采用地理统计学方法量化侵蚀空间分异, 识别潜在的易

侵蚀斑块和汇流集中带, 确保管理干预聚焦核心区域。高侵蚀区识别的精度对流域水土保持措施的实施具有直接影响, 同时可为后续土壤侵蚀动态监测提供标准化参考框架。通过整合高分辨率地形、植被和土壤数据, 关键高侵蚀区的划定不仅体现了空间特征, 也反映了小流域内部环境敏感性, 为制定差异化防治策略奠定基础。



图1 河曲场地图

4 精度验证与误差分析

4.1 实测数据采集

实测数据采集是土壤侵蚀模数验证的核心基础, 通过对小流域内不同坡段、土壤类型和植被覆盖区进行分布式采样, 可获得空间分布均匀且具有代表性的土壤侵蚀观测数据。采集过程中需考虑降雨事件频次和强度对侵蚀量的影响, 选择关键时间节点进行定量测定, 同时测定土壤含水量、团粒结构及地表径流参数, 以保证数据的综合性和可比性。数据处理需进行异常值识别和标准化处理, 确保多源数据在空间和时间尺度上具有一致性。通过建立高精度监测站点网络, 结合无人机遥感和地面测量技术, 可实现空间上高分辨率覆盖, 确保实测数据在小流域尺度的科学性和可用性, 为模型精度验证提供可靠基础。

4.2 模型结果与实测对比

模型结果与实测数据对比是评估土壤侵蚀模数精度的关键环节, 通过栅格化模数值与实测侵蚀量进行空间叠加分析, 可量化模型预测误差及偏差分布。对比过程中需建立统一评价指标体系, 包括均方根误差、相关系数及百分比误差等, 全面衡量模型在不同坡度、坡长和植被条件下的预测能力。空间对比分析可揭示模型在局部高侵蚀区或低侵蚀区的适应性, 同时识别模型对极端降雨事件响应的准确性^[4]。通过对比分析, 能够对模型参数进行调整与优化, 使模拟结果更接近实测数据, 提升小流域土壤侵蚀预测的可靠性和科学性, 为后续管理和防治策略提供量化依据。

4.3 误差来源及影响因素分析

误差来源分析聚焦模型计算、数据精度及空间尺度不匹配等因素对土壤侵蚀模数估算的影响。DEM 分辨率、土壤物理参数的不确定性及降雨空间异质性均可能导致局部预测偏差,

同时栅格化处理和因子权重选择对模型结果产生系统性误差。影响因素分析还包括坡长和坡度的非线性响应、植被覆盖率变化及土壤结构随季节变化的动态效应，对误差产生显著影响。通过敏感性分析和误差分布统计，可识别主要驱动因素，并通过改进数据获取方法、优化模型参数和引入高分辨率动态因子，实现误差最小化。该过程不仅增强模型的可靠性，也为土壤侵蚀精细化管理提供科学支撑和量化依据。

5 结果应用与管理建议

5.1 高侵蚀区控制策略

高侵蚀区控制策略应基于空间化土壤侵蚀模数分布和坡面特征进行精细化设计，将高模数区域作为重点干预单元，采取综合性措施降低地表冲刷强度。通过坡面改造、植被覆盖优化和径流分流设计，可有效削减水动力侵蚀能量，实现土壤保持与水流调控的同步作用。在空间管理上，可利用 GIS 技术建立侵蚀敏感区数据库，对不同高侵蚀斑块进行分级管理，精确分配防护资源和技术措施，避免低效投入。策略实施中需结合多因子响应分析，考虑土壤类型、降雨强度和坡长对侵蚀的敏感性，实现高侵蚀区的动态监控和调整，确保控制措施与地形条件、降雨特征及植被覆盖变化相匹配，从而提升防治效果和资源利用效率。

5.2 流域水土保持措施优化

流域水土保持措施优化应将土壤侵蚀模数分布结果与水文和地形因子结合，形成高精度空间化控制方案。在优化过程中，需对坡度、坡长、径流汇集区及土壤敏感性进行综合分析，确定重点防护区域和措施类型。措施包括植被建设、梯田或缓坡耕作、水流引导及覆盖保护等，通过多因子集成优化，实现

对降雨径流的有效缓释和地表侵蚀的减弱^[5]。结合遥感和 GIS 动态监测技术，可对不同季节、不同降雨事件下的侵蚀风险进行实时评估和措施调整，提升水土保持措施的适应性和精准性。优化过程强调系统性、科学性与可操作性，确保水土保持工程与自然地形条件高度契合，同时最大化生态效益和防护效果，为小流域土壤稳定提供有效支撑。

5.3 管理决策支持与实施路径

管理决策支持与实施路径构建依托高分辨率土壤侵蚀模数空间分布图，形成量化和可操作的管理工具。通过 GIS 平台，可对不同侵蚀强度区进行分级，建立科学的优先干预序列和资源配置方案。实施路径包括数据更新与动态监控、措施效果评估、风险预测与响应方案生成等环节，实现土壤侵蚀管理的闭环控制。结合遥感、物联网监测及数据分析技术，可实现流域管理的实时决策支持，提高措施实施的精度与效率。路径设计强调空间精细化和多因子关联，能够快速响应降雨、地形和土壤变化，确保管理干预与实际侵蚀风险高度匹配，为水土保持政策制定和执行提供科学依据，并在小流域尺度上实现动态、可量化、可追踪的管理模式。

6 结语

基于 ArcGIS 的空间分析与土壤侵蚀模数估算实现了小流域侵蚀风险的定量识别与空间化表达，提升了数据驱动下的侵蚀控制策略制定能力。土壤侵蚀模数空间分布图和高侵蚀区识别成果，为针对性水土保持措施提供了清晰的空间依据，有利于增强流域管理的精细化水平。精度验证与误差分析表明，多源数据集成与模型参数优化是提高估算可靠性的关键环节。管理决策支持路径为科学配置资源与实施防治措施提供了量化依据，推动流域水土保持实践向高效能方向发展。

参考文献:

- [1] 王鹭松,黄绍强,徐敬华,等.基于 RUSLE 模型的广东省大顶山小流域土壤侵蚀特征研究[J].广东水利水电,2025,(12):127-132+144.
- [2] 符素华,刘宝元.小流域土壤侵蚀模型(SWEM)[J].水土保持学报,2026,40(02):159-165.
- [3] 韦荫新,周复雄.ArcGIS Pro 在广西小流域设计洪水计算中的探讨[C]//中国水利学会,河海大学,南京水利科学研究院.2025 中国水利学术大会论文集——数智赋能水利现代化.珠江水利委员会西江局西江水利综合技术中心,;2025:105-109.
- [4] 邢慧敏.砒砂岩区典型小流域土壤侵蚀演变及泥沙来源研究[D].内蒙古农业大学,2025.
- [5] 曹双成,乔一娜,马志林.基于 ArcGIS 榆林沙区典型小流域可持续性调查研究[J].安徽农业科学,2024,52(19):54-58.