

引用格式:

姚昆, 柯丹, 程博, 何磊. 攀西地区土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 83–89.

YAO K, KE D, CHENG B, HE L. Spatiotemporal variation and driving factors of soil erosion in Panxi region[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 83–89.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



攀西地区土壤侵蚀时空变化及驱动因素

姚昆^{1,2}, 柯丹^{1,2*}, 程博¹, 何磊³

(1.西昌学院资源与环境学院, 四川 西昌 615000; 2.四川林业草原攀西林草火灾防控工程技术研究中心, 四川 西昌 615000; 3.成都信息工程大学软件工程学院, 四川 成都 610103)

摘要: 基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)模型, 对1990—2020年攀西地区土壤侵蚀模数进行计算与分级, 并借助Sen氏斜率、Mann-Kendall检验及地理探测器模型, 对该地区30年内土壤侵蚀时空动态变化规律及影响因素进行分析。结果表明: 攀西地区约60%的区域土壤侵蚀强度等级为微度及轻度, 其整体处于中等侵蚀水平; 与北部相比, 南部整体受侵蚀的地区分布范围更广且程度也更严重; 斜率及显著性检验结果显示, 该地区土壤侵蚀具有较强的稳定性, 全域16.58%和77.54%的地区呈侵蚀无或无显著改变的发展倾向, 仅1.51%的地区为显著变差; 各因素对土壤侵蚀空间布局形成的影响作用差异显著, 坡度解释力最大, 为17.86%, 年降水量最小仅2.48%, 而在驱动其格局改变的因素中, 土地利用类型的解释力最大, 为8.64%。可见, 攀西地区土壤侵蚀整体发展趋势良好, 自然因素虽然是决定其布局形成的主要因素, 但人类活动才是主导其格局变化的关键因素。

关键词: 土壤侵蚀; 时空动态; 驱动因素; RUSLE模型; 地理探测器; 攀西地区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0083-07

Spatiotemporal variation and driving factors of soil erosion in Panxi region

YAO Kun^{1,2}, KE Dan^{1,2*}, CHENG Bo¹, HE Lei³

(1.College of Resource and Environment, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000, China; 2.Sichuan Forestry and Grassland Panxi Forestry and Grassland Fire Prevention and Control Engineering Technology Research Center, Xichang, Sichuan 615000, China; 3.School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610103, China)

Abstract: Based on the revised universal soil loss equation(RUSLE) model, the soil erosion modulus in the Panxi region from 1990 to 2020 were calculated and classified. The spatiotemporal dynamic changes and influencing factors of soil erosion in the region over the past three decades were analyzed using Sen's slope, Mann-Kendall test, and geographic detector model. The results revealed that over 60% of the soil erosion intensities in the Panxi region were classified as micro or mild, with an overall erosion level classified as moderate. The southern region showed a wider distribution range and more severe erosion compared to the north. The slope and significance test indicated strong stability in soil erosion across the region, with 16.58% of the area showing no change and 77.54% experiencing no significant change in erosion. Only 1.51% of area showed significant deterioration. The impact of various factors on the formation of soil erosion spatial layout varied considerably. Slope had the highest explanatory power at 17.86%, while annual precipitation had the lowest at only 2.48%. Among the factors driving its pattern change, land use type had the highest explanatory power at 8.64%. These findings suggested that the overall trend of soil erosion in the Panxi region had been positive. While natural factors primarily

收稿日期: 2023-12-17

修回日期: 2024-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0608203); 四川省自然资源厅科研项目(Kj-2022012); 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室稳定支持项目(JCKY2022201CRS029); 凉山州科技计划重点研发项目(22ZDYF0173); 沱江流域高质量发展中心项目(TJGZL2023-28)

作者简介: 姚昆(1991—), 男, 四川西昌人, 硕士, 讲师, 主要从事生态环境变化遥感监测研究, jiangshan996@xcc.edu.cn; *通信作者, 柯丹, 博士, 副教授, 主要从事遥感技术开发与应用研究, Kedan@xcc.edu.cn

determined its layout, human activities played a crucial role in driving changes in erosion patterns.

Keywords: soil erosion; spatiotemporal dynamics; driving factors; RUSLE model; geographic detector; Panxi region

土壤侵蚀是全球最为典型的生态环境问题之一^[1],它不仅会造成土壤养分流失、耕地退化及限制粮食生产,还会导致湖泊淤积、河道阻塞、污染水资源等环境问题的发生^[2-4]。水利部发布的数据显示,截至2021年底全国水力侵蚀区面积为 $110.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,治理形势依然严峻。

为开展土壤侵蚀定量评估、变化规律及演变机制等研究,国内外的学者们提出了水蚀预报(WEEP)^[5-6]、欧洲土壤侵蚀(EUROSEM)^[7-8]和荷兰土壤侵蚀预测(LISEM)^[9]等物理模型,也诞生了通用土壤流失方程(USLE)^[10-12]、修正通用土壤流失方程(RUSLE)^[13-15]及中国土壤流失方程(CSLE)^[16-18]等众多经验统计模型。相比物理模型,经验模型结构更简单,适用范围也更广,RUSLE就是其中的一个典型代表。如LI等^[19]基于RUSLE模型实现了秦河流域1990—2018年土壤侵蚀时空变化的分析,并就各地理环境因素对其强度分布的影响作用展开了探讨;熊茂秋等^[20]基于RUSLE对近20年塔里木河流域土壤保持的时空变化进行了分析,发现全时段内该流域土壤保持强度处于一定程度的增强状态;张恩伟等^[21]基于RUSLE完成了滇池流域土壤侵蚀敏感性评价,发现流域土壤侵蚀以轻度和中度敏感为主,且降雨是影响该地区土壤侵蚀敏感性变化的关键因素;余恩旭等^[22]以RUSLE模型为基础,结合空间叠加和数理统计,完成了对岷江上游地区土壤侵蚀空间分布及长时期动态变化成因的分析;田宇等^[23]将RUSLE与多元回归模型结合,对三峡库区1990—2015年土壤保持影响因素展开了探讨,发现虽然自然因素对该地区土壤保持贡献显著,但人类活动对其保持功能产生了干扰作用。

上述成果均对助力地区土壤侵蚀综合治理产生了积极影响,表明RUSLE模型具有适用范围广和可行性强等优点,也显示影响土壤侵蚀空间布局形成和格局改变的因素存在显著差异。同时,以上成果也存在如下不足:它们要么仅从静态视角,将空间叠加与数理统计相结合,完成各侵蚀强度在不同因素区间(如高程带、坡度带、地貌或土地利用类型等)的数量统计,以此探讨各因素对土壤侵蚀空间

布局形成的影响作用;要么仅从动态视角,借助相关性、回归、灰度关联等方法,完成统计数据对土壤侵蚀格局变化的解释力分析;两者均未能将动、静态视角结合完成土壤侵蚀影响因素分析。

攀西地区在先天自然环境和不合理人类活动的共同驱使下,成为长江上游土壤侵蚀的重点监测和治理区之一。然而,对该地区土壤侵蚀开展的研究却较少,且已有成果侧重从静态视角对单年份土壤侵蚀的空间分布规律展开分析,未对该地区土壤侵蚀时空变化规律进行探索,更未涉及驱动因素分析。综上,本研究中,将GIS与RUSLE模型相结合,对1990—2020年攀西地区各年份土壤侵蚀模数进行计算与分级,并对该区域土壤侵蚀动态变化规律进行探讨;以地理探测器为工具,从静态视角对驱动该地区土壤侵蚀空间布局形成的机理展开讨论,并在此基础上结合区域实际从动态视角对影响该地区土壤侵蚀格局变化的因素展开剖析;最后,针对攀西地区土壤侵蚀的治理提出参考建议,以期助力区域生态环境的保护。

1 研究区概况

攀西地区地处四川西南部($100^{\circ}04'E \sim 103^{\circ}53'E, 26^{\circ}02'N \sim 29^{\circ}19'N$),面积约 $6.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海拔高度291~5346 m,地形整体呈西北向东南倾斜的变化形态,山峦起伏明显,沟壑纵横,地貌以高和中山为主,也有小部分丘陵和河谷平原;处于典型的亚热带季风气候区,年均气温 $16 \sim 17^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $600 \sim 1400 \text{ mm}$,降水存在季节性差异,夏季多阴雨且雨量大、时间长,易引发土壤侵蚀;境内自然资源丰富,有金沙江、雅砻江和安宁河等水系,矿类繁多,产量较富足,农牧业是该地区主要的经济产业之一。受前期不合理人类活动的影响,该地区对土壤侵蚀的抑制作用也被降低。

2 数据与方法

2.1 数据来源

攀西地区及周边98个气象站1980—2020年逐年逐日降水量观测数据由国家气候中心提供;各年份

30 m 分辨率的土地利用类型及 DEM 数据均来自资源与环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>); 土壤可侵蚀性因子(K), 分辨率30 m, 由中国科学院成都山地灾害与环境研究所提供; 各年份归一化植被指数为基于 GEE 平台对 Landsat 系列影像处理得到的年均值。

2.2 研究方法

研究采用 RUSLE 模型完成各年份土壤侵蚀模数计算。参照章文波等^[24]的方法, 基于日降水量计算半月侵蚀力模型, 计算 98 个站点的各年降雨侵蚀力因子, 并运用 ANUSPLIN4.37 完成插值; 采用 EPIC 方程^[21]完成土壤 K 的计算, 并结合张科利等^[25]提出的模型进行修正, 最后以 GIS 插值与平滑等算法对成果精度进行提高; 采用刘宝元等^[26]和刘斌涛等^[27]提出的方法计算坡长因子与坡度因子; 利用蔡崇法等^[28]提出的模型计算植被覆盖管理因子; 参照文献^[29-32], 对各土地利用类型的水土保持因子进行分等级赋值(表 1)。

表 1 攀西地区各土地利用类型分级及其水土保持因子

Table 1 Classification of land use types and soil and water conservation factors in Panxi region

| 等级 | 土地利用类型 | 水土保持因子 |
|----|-----------------------|--------|
| 1 | 水田 | 0.15 |
| 2 | 旱地 | 0.40 |
| 3 | 有林地、灌木林地、高覆盖度草地 | 1.00 |
| 4 | 疏林地、中覆盖度草地 | 0.90 |
| 5 | 其他林地、低覆盖度草地 | 0.50 |
| 6 | 城镇用地、农村居民点、其他建设用地 | 0.00 |
| 7 | 水库坑塘、湖泊、永久性冰川雪地、河渠、滩地 | 0.00 |
| 8 | 沙地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地 | 0.00 |

为探究土壤侵蚀随时间的变化规律, 并预测侵蚀的未来发展趋势, 借助 Sen 氏斜率(β)对两者的变化关系进行拟合。

采用 Mann-Kendall(MK)对 β 进行显著性检验, 参照文献^[33], 将它划分为: $\beta < 0, P \leq 0.01$, 显著好转, 即侵蚀被明显抑制; $\beta < 0, 0.01 < P \leq 0.05$, 无显著好转, 即抑制效果不明显; $\beta = 0, P \geq 0.05$, 无变化; $\beta > 0, 0.01 < P \leq 0.05$, 无显著变差, 即有向严重倾向发展但尚处于可控状态; $\beta > 0, P < 0.01$, 显著变差, 即向严重化发展趋势明显。

借助地理探测器^[34-35]确定各因素的解释力(q), 根据 q 识别土壤侵蚀的主导因子, 完成攀西地区土壤侵蚀驱动因素分析。

3 结果与分析

3.1 RUSLE模型精度验证结果

将运用 RUSLE 模拟得到的各强度等级的面积与 2010 年全国第 1 次水利普查公布的攀西地区各侵蚀强度的真实面积进行线性回归与相关性检验, 结果显示, 模拟得到的各侵蚀强度的面积与真实的面积具有较高的吻合性, 两者整体的决定系数 ($R^2=0.781$)较高。同时, 本研究中得出的攀西地区土壤侵蚀强度空间分布情况也与前人^[29,31-32]的成果基本相似。由此可见, 采用 RUSLE 模型对攀西地区土壤侵蚀进行定量模拟运算的方法可行且结果可靠。

3.2 攀西地区土壤侵蚀强度分布

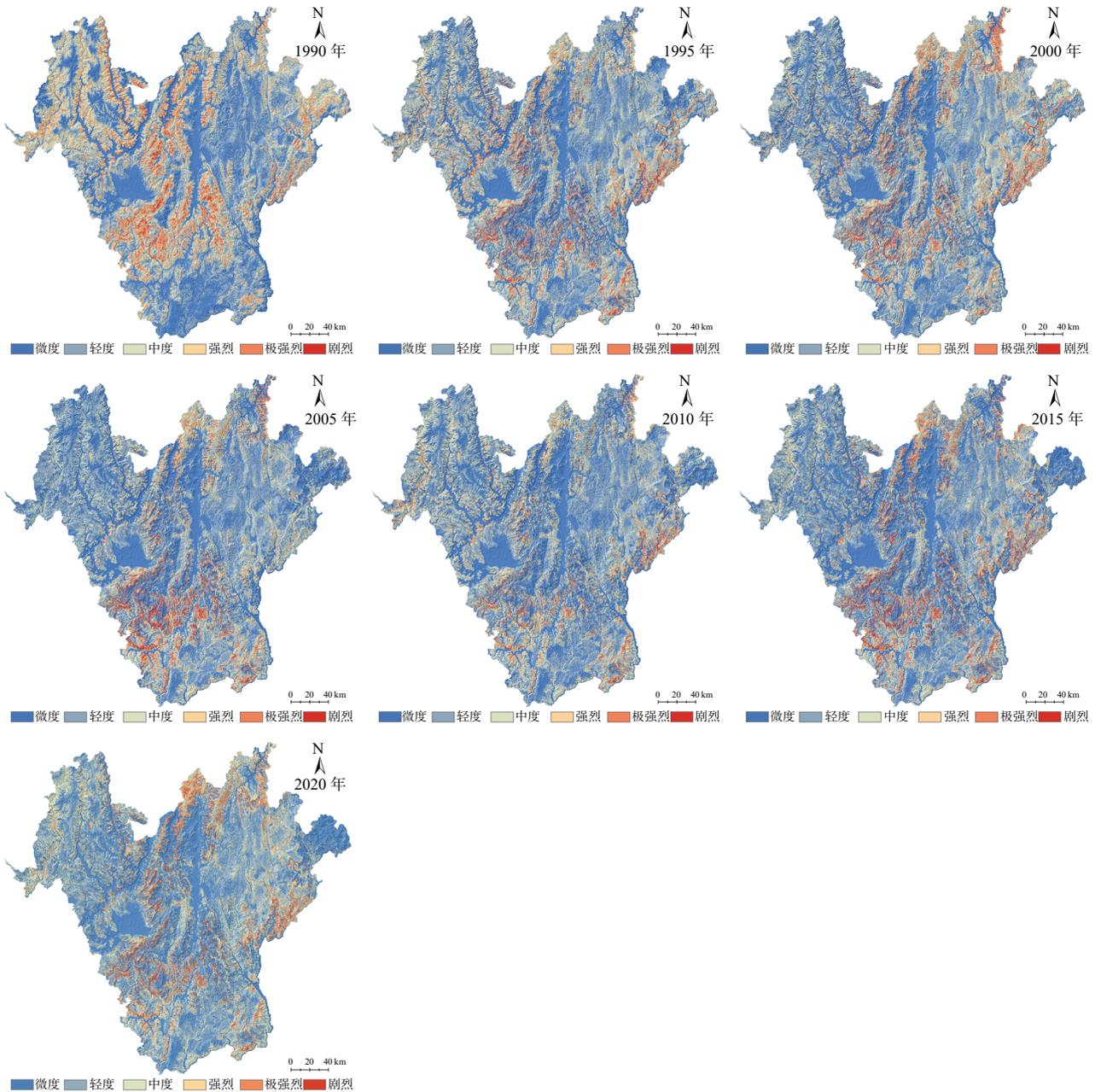
运用 ArcGIS10.7 计算攀西地区 1990—2020 年各年的土壤侵蚀模数, 并结合 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》对攀西地区土壤进行侵蚀强度分级, 结果如图 1 所示。

从图 1 可知, 1990—2020 年间攀西大部分地区主要呈现深蓝和浅蓝色, 即侵蚀强度以微度和轻度为主, 它们约占全域总面积的 60%, 由此可以推断, 攀西全域土壤侵蚀整体处于中等水平; 该地区西北部山区及中部河谷平原的大部分范围土壤侵蚀现象并不明显, 而西南部大部分则表现出土壤侵蚀程度较显著且分布范围也较广的特征。

结合地区实际分析还可知: 理塘河、无量河及雅砻江中上游地区虽然地处高海拔山区, 具有地势陡峭、地形起伏差异显著和沟壑纵横等显著自然特征, 但它们也具备了森林、草地分布范围广且植被覆盖度高, 人类活动较少、几乎未对生态环境产生显著影响等优势, 故这些地区土壤侵蚀现象并不显著; 攀西中部河谷平原及东部大部分地区地势较平坦, 土壤肥沃, 地形条件已占据先天优势, 加之它们也是凉山州社会经济发展的核心地带, 诸多有效的水土保持措施也被实施, 故这些区域土壤侵蚀以微度和轻度为主; 东北部尼日河中上游流域, 人类活动频繁, 耕地广泛分布在陡坡上, 水土保持措施相对滞后, 加之自然植被覆盖度较低, 土壤侵蚀等级以强烈及以上为主; 黑水河及昭觉河中下游地区、美姑河流域及金沙江沿岸县(市)的绝大部分区域土壤侵蚀现象相对显著, 这些地区地形条件复

杂、坡耕地分布范围广、水电和其他矿产资源也较丰富, 植被类型主要为农作物且覆盖率较低, 先天

的劣势加之后天不合理的人类活动共同导致这些地区土壤侵蚀现象较严重。



此图基于四川省测绘地理信息局标准地图(审图号为川S【2024】00149号)绘制, 底图无修改。

图 1 攀西地区 1990—2020 年土壤侵蚀强度

Fig1 Soil erosion intensity in Panxi region from 1990 to 2020

3.3 攀西地区土壤侵蚀年际变化

结合攀西地区 1990—2020 年土壤侵蚀模数斜率计算结果(图 2(a))可以发现: 1990—2020 年内, 攀西地区全域共有 49.98%的地区呈现 $\beta \leq 0$, 它们大部分集中在攀西西北部的无量河、理塘河及雅砻江中上游流域, 这表明在整个研究时段内, 随着时间推移, 以上地区的土壤侵蚀表现出无变化或被抑

制的变化形态; 此外, 全域也有 50.02%的地区表现出 $\beta > 0$ 的变化形态, 主要集中在攀西南部金沙江沿岸、东部黑水河中上游、昭觉河及美姑河流域的大部分地区, 这显示随着时间迁移, 以上地区土壤侵蚀有愈发严重的趋势。

为明确 30 年内攀西地区土壤侵蚀随时间变化的具体形态, 结合 MK 检验结果(图 2(b))分析可知: 1990—2020 年内, 攀西全域土壤侵蚀随时间推移发

展趋势呈显著好转、无显著好转、无变化、无显著变差和显著变差等类型，全域面积占比分别为 4.37%、24.52%、16.58%、53.02%和 1.51%；全时段内，攀西地区土壤侵蚀发展趋势呈无显著变差的地区分布范围最广，主要集中在攀西南部与东部的绝大部分区域；同时，发展趋势为显著变差的地区全域面积占比最小，仅 1.51%，主要集中于安宁河下游

的米易县、金沙江沿岸的会理市和会东县境内。

综上，在 1990—2020 年内，攀西地区土壤侵蚀呈现未发生变化和无显著改变(好转或变差)的地区全域面积占比分别为 16.58%和 77.54%，而显著变差地区全域面积占比仅为 1.51%。由此判定，随着时间的迁移，攀西地区全域呈现绝大部分地区侵蚀程度呈较稳定无变化或无显著变化的发展趋势。

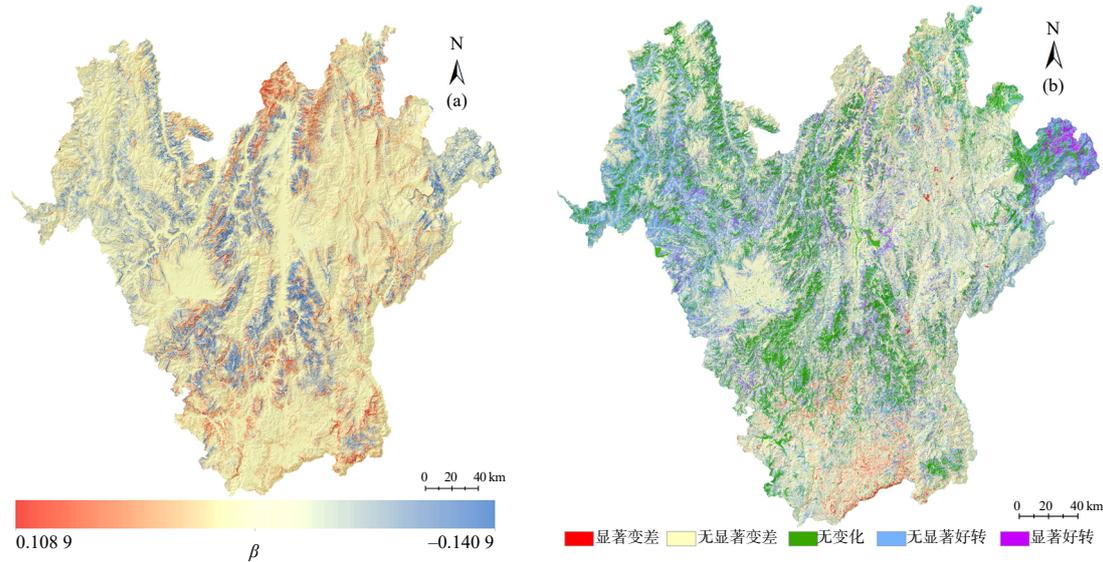


图 2 攀西地区 1990—2020 年土壤侵蚀模数斜率及显著性检验结果。此图基于四川省测绘地理信息局标准地图(审图号为川 S【2024】00149 号)绘制，底图无修改。

图 2 攀西地区 1990—2020 年土壤侵蚀模数斜率及显著性检验结果

Fig.2 Slope and significance test results of soil erosion modulus in Panxi area from 1990 to 2020

3.4 影响因素分析

为明确各因素对土壤侵蚀空间布局形成及格局改变的影响作用，选取 1990—2020 年攀西地区的平均土壤侵蚀强度为因变量，高程、坡度、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖度及年降水量(植被和降水两者均取多年均值)共 6 个要素为自变量，进行驱动因素地理探测。结果表明，坡度、土壤类型、土地利用类型、高程、植被覆盖度、年降水量的 q 依次减小，分别为 17.86%、11.06%、8.64%、3.64%、3.55%、2.48%。

从静态视角分析可知：各因素对攀西地区土壤侵蚀空间布局形成的影响作用存在较显著差异；坡度和土壤类型的解释力均在 10%以上，土地利用类型为 8.64%，而剩余 3 个因素的解释力均在 5%以下。坡度对攀西地区土壤侵蚀空间布局形成的解释力最强，这与攀西地区特殊的地形环境有着密切的关系：攀西大部分处于地势陡峭、沟壑纵横及地形起伏差异显著的山区，全域土壤侵蚀相对严重的区域均表现出坡度差异显著、地表垂直切割程度大且植

被覆盖状况差的特点，而侵蚀相对较轻的地区则主要分布于地势平坦的平原、丘陵及低山区或森林、草地分布广泛且植被覆盖度高的山地区。土壤类型的影响作用位居第二，解释力为 11.06%，全域土壤类型众多，达到 26 类， K 为 0.000 8~0.027 0，平均为 0.112 1，整体也相对较高，且 K 具有明显的垂直地带性特色，随着海拔的升高其数值也逐渐升高，土壤自身的抗侵蚀性能力也逐渐降低；土地利用类型的解释力也较强，它是地表景观的主要呈现方式，也是自然条件和人类活动共同作用的结果，各类型土地对土壤侵蚀形成的影响作用也差异显著，通常高植被覆盖的林、草地土壤侵蚀较轻，高海拔且覆盖低的陡峭地区土壤侵蚀更严重，如攀西西部虽然山高坡陡，但高覆盖度林草地分布范围广，有效抑制了土壤侵蚀，而安宁河河谷平原两侧高海拔区却因大多为低植被覆盖的坡耕地、低覆盖度草地和裸地等土壤侵蚀现象非常典型；年降水量对土壤侵蚀空间格局形成的影响作用最小，解释力仅为 2.48%，这主要是因为静态视角下土壤侵蚀空间分布格局具有较强稳定性。

从动态视角分析又可知:坡度和土壤类型等自然因素虽然主导了攀西地区土壤侵蚀分布格局的形成,但是以上两种基质因素的稳定性均较强,短期内无显著改变,故它们均并不是驱动该地区土壤侵蚀空间布局变化的主要影响因素;然而,土地利用类型及植被覆盖等动能因素不仅会参与土壤侵蚀空间布局的形成,同时也会驱动其格局变化。从动态视角对各动能因素展开分析还可发现,土地利用类型在动能因素中的解释力最强,植被覆盖度次之,最后是降水量;结合地区实际分析又可知,土地利用类型可作为一项综合描述该地区人类活动的因素,而已有成果也显示西南地区植被覆盖变化主要受人类活动的影响^[36],可见,人类活动才是驱动攀西地区土壤侵蚀格局变化的主导因素,侵蚀性降水也会对其布局变化会产生一定的影响。

4 结论与讨论

本研究中,基于RUSLE模型完成了攀西地区1990—2020年土壤侵蚀模数计算与强度分级,精度检验结果表明模型适用于该地区;地理探测结果显示,坡度对该地区土壤侵蚀空间布局形成的解释力(17.86%)最强,这与前人^[29,37]的研究成果基本吻合,但土地利用等人类活动才是主导其格局改变的主导因素,这也与已有成果^[1,18]一致。

1990—2020年内,攀西地区全域土壤侵蚀轻度及以下强度侵蚀区全域面积占比约60%,土壤侵蚀整体处于中等水平,且随时间推移,整体发展状态呈基本稳定且有向良好发展的趋势,这主要得益于天然林保护、退耕还林、荒漠化治理等众多生态工程的实施。政府公报^[38-39]数据显示,攀西地区自2000年起开始实施退耕还林等生态治理工程,到2020年底攀枝花市和凉山州森林覆盖率分别提高了11.18%和18.52%。森林覆盖面积的明显增加,草地退化现象的显著抑制,植被覆盖度的明显提高,均对绝大部分地区土壤侵蚀的抑制起到了积极促进作用。同时,研究也发现,安宁河下游的米易、金沙江沿岸的会理和会东,仍有极小部分地区土壤侵蚀呈显著变差的发展趋势。造成该现象的主要原因为以上地区大多是坡耕地种植区,30年内这些地区土地利用类型和植被覆盖度均无显著改变,但降雨的侵蚀作用却比其他地区的更明显。

对攀西地区土壤侵蚀综合治理时,可以从如下方面制定措施。①受先天自然条件的限制,攀西全

域约90%的耕作区分布在坡地上,第3次全国土地调查结果显示,截至2019年底,15°<坡度≤25°及坡度>25°的耕作区面积分别占攀枝花市耕地总面积的27.55%和12.78%,以上两者也分别占凉山州耕地总面积的35.56%和22.36%。坡耕地若处于长时间的雨水冲刷或在其他外力的驱动下,则非常容易发生土壤侵蚀;因此,应加强坡耕地资源合理开发利用的监管力度,特别是坡度>25°的耕作区更是综合治理的重点区。对坡度>25°的耕作区应持续实施退耕还林等生态修复工程,坡度≤25°的耕作区应加强土地规划整治,如尝试改造为梯田、修筑沟渠和选择固土能力较强的农作物进行轮作等。②攀西地区水电资源丰富,江河沿岸建立了二滩、官地、乌东德、白鹤滩等许多大型水电基地,水电基地的建设也会造成大量耕地、林地和草地被淹没,促进侵蚀范围的扩张及强度的升级;因此,更科学合理地进行水电能源开发,加大环境综合修复的力度也是促进土壤侵蚀综合治理成效显著的重要手段。③攀西境内矿产资源丰富,有会理铜矿、西昌钒钛磁铁矿、冕宁稀土矿及美姑玛瑙矿等采矿区,矿产资源开采会对矿区植被覆盖状况、地形条件及土壤结构产生影响;因此,需要加强矿山开采后生态环境的恢复重建,抑制土壤侵蚀向严重化的方向发展。④受先天自然条件的限制,该地区社会经济发展方式相对传统且单一以农牧业为主,但全域适合发展农牧业的土地资源却较有限;因此,土地资源的超承载力开发利用也会给区域植被的恢复和土壤侵蚀的综合治理带来困难。为缓解紧张的人地关系,应对该地区继续实施乡村振兴政策优化产业结构,实现土地资源合理规划开发利用也是今后努力的方向之一。

影响土壤侵蚀的因素是相对复杂的,受基础数据的限制,笔者仅选择了6个代表性强的典型因素展开分析,在今后的研究中可以加入地质构造、地貌类型、人口密度及路网密度等更多因素;此外,数据离散的方式也会对地理探测结果产生一定差异,寻找更科学的数据离散化方式也是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 田培,贾婷惠,平耀东,等.基于RUSLE和地理探测器的鄂西北土壤侵蚀时空分异与归因[J].热带地理,2023,43(11):2216-2228.
- [2] 朱启明,王宁,刘俊娥,等.陕北生态脆弱区土壤水

- 蚀变化及驱动因子:以榆林市为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 41–51, 60.
- [3] 谭永滨, 谢剑亮, 冉江华, 等. 基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 46–56.
- [4] 牛丽楠, 邵全琴, 刘国波, 等. 六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11): 1755–1767.
- [5] 谢红霞, 郭丽英. 经验水蚀预报模型的国内外研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(2): 1–8.
- [6] 郑粉莉, 杨勤科, 王占礼. 水蚀预报模型研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 13–24.
- [7] 王宏, 蔡强国, 朱远达. 应用 EUROSEM 模型对三峡库区陡坡地水力侵蚀的模拟研究[J]. 地理研究, 2003, 22(5): 579–589.
- [8] 王奇花, 高玉凤, 田沉, 等. EUROSEM 模型对晋西黄绵土坡面侵蚀过程的模拟应用[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 120–127.
- [9] 贾媛媛, 郑粉莉. LISEM 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 91–93, 120.
- [10] 陈正发, 李靖, 段青松, 等. 基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 124–134.
- [11] 刘翊涵, 苏正安, 潘洪义, 等. 张家口市土地利用和土壤保持功能的变化特征[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1281–1292.
- [12] 彭双云, 杨昆, 洪亮, 等. 基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 138–146, 305.
- [13] 张素, 熊东红, 吴汉, 等. 基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 24–30.
- [14] 张艳, 史飞航, 张悦, 等. 黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 1–12.
- [15] 马悦, 何洪鸣, 赵宏飞. 基于 GIS 和 RUSLE 的甘南州土壤侵蚀时空演变[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 37–46.
- [16] 杨建和, 严冬春, 文安邦. 金沙江流域近十年地表变化与土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 13–20.
- [17] 马含, 符素华, 董丽霞, 等. 基于地理探测器的土壤侵蚀空间分异关键影响因子分析[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(2): 33–38.
- [18] 陈锐银, 严冬春, 文安邦, 等. 基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 17–26.
- [19] LI Y Y, RONG T Q, QIN M Z, et al. Spatiotemporal characteristics of soil erosion in a typical watershed consisting of different landscape: a case study of the Qin River Basin[J]. PLoS One, 2022, 17(10): e0275470.
- [20] 熊茂秋, 刘晓煌, 张雪辉, 等. 基于 RUSLE 模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究[J]. 地质通报, 2024, 43(4): 641–650.
- [21] 张恩伟, 彭双云, 冯华梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 115–122.
- [22] 余恩旭, 张明芳, 蒋志魏, 等. 岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 1–10, 17.
- [23] 田宇, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1164–1174.
- [24] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705–711.
- [25] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7–13.
- [26] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [27] 刘斌涛, 宋春风, 陶和平. 成都市土壤侵蚀定量评价研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 40–47.
- [28] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19–24.
- [29] 朱倩文. 攀西地区土壤侵蚀空间特征及与影响因子的关系分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [30] 胡云华, 刘斌涛, 宋春风, 等. 基于 USLE 模型的大小凉山地区土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 232–236.
- [31] 姚昆, 张存杰, 何磊, 等. 土壤侵蚀动态变化分析: 以四川省凉山州为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(7): 36–44.
- [32] 黄凤琴, 第宝锋, 黄成敏, 等. 基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用: 以四川省凉山州为例[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 55–64.
- [33] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1361–1372.
- [34] 陈雪萍, 赵学勇, 张晶, 等. 基于地理探测器的科尔沁沙地植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素[J]. 植物生态学报, 2023, 47(8): 1082–1093.
- [35] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
- [36] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 等. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 155–163.
- [37] 张恩伟. 滇中城市群产水服务和土壤保持服务时空格局演变及其影响因素研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [38] 攀枝花市政府. 攀枝花退耕还林实施 20 周年成效显著 [EB/OL]. (2019–10–15). <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10465/10595/2019/10/15/9cfd265747a648769c4f8a074aae1499.shtml>.
- [39] 凉山州政府门户网站. 凉山州退耕还林工作成绩显著 [EB/OL]. (2019–09–23). <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10465/10595/2019/9/23/02109b59c69440e99fe7a10978dddcb2.shtml>.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正