

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.023.

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.

MA Yue, HE Hongming, ZHAO Hongfei. Spatiotemporal Change of Soil Erosion in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture Based on GIS and RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 37-46.

基于GIS和RUSLE的甘南州土壤侵蚀时空演变

马悦¹, 何洪鸣^{1,2}, 赵宏飞¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究甘南州草场退化带来的侵蚀问题,可以把握当地水土流失情况,有利于建设青藏高原生态安全屏障。[方法]通过修正的通用土壤流失方程(RUSLE模型)研究2000年、2010年和2019年甘南州土壤侵蚀时空变化,并基于地理探测器模型分析侵蚀的影响因素。[结果]甘南州侵蚀程度较轻,以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,强烈、极强烈、剧烈侵蚀区面积占比虽然较小,但呈现面积扩大、强度增强的趋势。甘南州土壤侵蚀空间差异性较为明显,西部地区土壤侵蚀强度低于东部地区,中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域的分布较为相似,呈现出较为明显的聚集状态,卓尼县、迭部县、舟曲县土壤侵蚀强度较高。2000—2019年甘南州87.14%的地区侵蚀等级未发生明显变化,发生转移的区域主要为微度侵蚀和轻度侵蚀,侵蚀等级升高的区域面积高于降低的区域,升高的区域主要分布在玛曲县、碌曲县、夏河县、卓尼县以及迭部县。对甘南州侵蚀空间分异性解释力较强的是土地利用和地形起伏度。退耕还林(草)工程、农牧业活动、城市化推进以及甘南州复杂的地形均对侵蚀有较大的影响,人口密度、坡度、高程、年均降雨量、植被覆盖度与土地利用交互作用时对侵蚀的解释力均呈现明显增强。[结论]甘南州总体侵蚀较轻但局部较强烈且随时间呈现增强的趋势,土地利用变化和地形因素对其影响较大,未来甘南州应重点关注土地利用变化和草场退化问题,做好保护和修复工作,警惕地形复杂的生态风险区的侵蚀恶化风险。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE模型; GIS空间分析; 地理探测器

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0037-10

Spatiotemporal Change of Soil Erosion in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture Based on GIS and RUSLE

MA Yue¹, HE Hongming^{1,2}, ZHAO Hongfei¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

North A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Science and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Exploring the erosion problem caused by grassland degradation in Gannan Prefecture can help understand the local soil and water losses, which is conducive to the construction of ecological security barrier on the Qinghai-Tibet Plateau. [Methods] This study revealed the temporal and spatial changes of soil erosion in Gannan Prefecture in 2000, 2010 and 2019 based on the RUSLE model, and analyzed the erosion factors of Gannan Prefecture through geographical detector. [Results] The overall degree of erosion in Gannan Prefecture is relatively light, mainly with slight erosion and mild erosion. The areas with strong, extremely strong and severe erosion in Gannan Prefecture are relatively small, but the areas and intensities of these types of erosion show the increasing trend with time. The spatial difference of soil erosion in Gannan Prefecture is obvious, and the soil erosion intensity in the western region is lower than that in the eastern

收稿日期: 2021-05-21

修回日期: 2021-05-17

资助项目: 国家科技部“第二次青藏高原科学综合考察研究”项目“生态安全屏障功能与优化体系”(SQ2019QZKK2003)

第一作者: 马悦(1995—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和生态脆弱性评价研究。E-mail: bscsds118@nwafu.edu.cn

通信作者: 何洪鸣(1975—), 男, 广东兴宁人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境系统数值模拟研究。E-mail: hongming.he@yahoo.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

region. The distributions of moderate, strong, very strong, and severe erosion areas are similar, showing a relatively obvious aggregation state. Zhuoni County, Diebu County and Zhouqu County show higher erosion risk than other counties. The erosion grade of 87.14% of Gannan Prefecture did not change from 2000 to 2019, and the transferred areas were mainly mild erosion and mild erosion areas. The areas with increased erosion levels have a higher proportion of area than areas with decreased erosion levels, which mainly distribute in Maqu County, Luqu County, Xiahe County, Zhuoni County and Diebu County. Landuse and topographic undulation are the main factors affecting ecological vulnerability in Gannan Prefecture. The project of returning farmland to forest (grass), agricultural and animal husbandry activities, the advancement of urbanization, and the complex topography of Gannan Prefecture all have the greater impacts on erosion. There is enhancement when landuse acting with population density, slope, elevation, average annual rainfall and vegetation coverage. [Conclusion] The overall erosion in Gannan Prefecture is light, but the local erosion is strong and shows an increasing trend with time. Land use change and topographic factors have the great impacts on the erosion. In the future, more attention should be paid to land use change and grassland degradation, do a good job of protection and restoration should be strengthened, and the erosion deterioration risk in ecological risk areas with complex topography should be concerned in Gannan Prefecture.

Keywords: soil erosion; RULSE model; GIS analysis; Geographical Detector

青藏高原是我国重要的生态屏障,其独特的自然环境对全球变化、社会经济发展、资源开发利用等具有重要的影响。作为青藏高原生态屏障的重要组成部分^[1],甘南藏族自治州(以下简称甘南州)位于青藏高原东北边缘地带,地跨黄河和长江源区,黄河干流流经域内 433 km,是我国重要的水源涵养与补给区^[2-3]。此外,因其独特的地理环境以及丰富的植被资源,甘南州同时也是我国重要的高寒牧区之一。甘南州草原面积占总面积的 70.28%,其中可利用草场面积达 94.2%,是当地的优势资源,因此畜牧业也成为甘南的主导产业和经济支柱之一,甘南州也是甘肃省重要的畜牧业基地^[2],2005 年甘南州牧区牧业收入占农牧民家庭收入的 47.89%^[4];此外甘南州林区也是甘肃省最大的林区,森林面积占全省的 30%,是甘肃省木材资源的重要来源之一^[2]。

然而高寒牧区地理环境和气候条件比较恶劣,区域内生态系统结构单一,脆弱性强,稳定性差。近年来甘南的生态环境潜在风险较高,有恶化趋势^[5]。资料表明,甘南州草地有退化、沙化、盐碱化的问题,优良牧草产量下降,黄河沿岸的沙化线不断扩展^[2]。由于人口增长与社会发展压力,2002 年甘南牧区载畜量超载率高达 94.6%,退化草场面积在 20 a 间增加了近 120 倍^[4],导致牧民迁往其他草场地方放牧,人类活动范围扩大进一步加剧了对生态环境的扰动。玛曲县草地在 60 年代后沙化速度加快,2003 年中度和重度退化草场占可利用草场的 23.86%和 39.84%^[6];玛曲湿地干涸、萎缩,至 2001 年时沙化面积达 3.5×10^4

hm²^[7];合作市 72.4%的草场出现了不同程度的退化,中度和重度退化分别占可利用草场面积的 49.1%和 30.5%,全市水土流失面积达 910.6 km²^[5]。此外,甘南林地也存在一定程度的破坏,有研究表明玛曲县高山阴坡的水源涵养林面积减少 76.6%,流域调蓄和涵养能力下降^[2]。

甘南州草地退化不仅会造成水土流失问题,也会进一步诱发沙漠化、生物多样性降低等其他生态环境问题,阻碍牧区良性和可持续性发展,影响高原地区生态安全。而且甘南位于西北高原生态脆弱区,对人类干扰较为敏感,生态系统自我恢复能力差,自然修复周期较长^[8],更需重点关注。目前关于甘南州水土流失和侵蚀风险的相关研究较少,为探究甘南州多年来土壤侵蚀状况和变化以及影响侵蚀的因素,以把握当地水土流失状况,有针对性地开展保护与恢复工作,本文基于通用土壤流失方程(RUSLE 模型)对 2000 年、2010 年、2019 年甘南州土壤侵蚀进行定量分析,探究其时空变化规律,并基于地理探测器模型分析其影响因素,为甘南州水土流失防治及生态修复工作提供一定参考。

1 研究区概况

甘南州位于甘肃省西南部,地处青藏高原东北边缘与黄土高原西部交汇处,北纬 33°6′—36°10′,东经 100°46′—104°44′。海拔高度大约 1 172~4 920 m,地势从西北向东南倾斜,州内多为山原地貌,大致可分为高原区、高山峡谷区和低山丘陵区^[2,9]。甘南州

是大陆性季节气候,光照条件好,降水量在季节性和空间上差异较大,部分区域冬季降水量极小,全州各地年均降水量在 500~750 mm,年均气温在 2.8~13.6℃,全年平均气温低于 10℃ 的低温天气一般长达八至十个月,较为寒冷,全州除舟曲、迭部县部分地区没有严寒期外,其余地方冬季较长,春季秋季短且相连。甘南州草地资源丰富,林地茂密,全州牧草地面积占比 63.58%,林业用地占比 28.53%^[10]。土壤垂直分布比较明显,土壤类型多样,共分为 13 个土类,27 个亚类,40 个土属。有高山草甸土类、亚高山草甸土类、亚高山草原土类、黑钙土类、栗钙土类、暗棕壤类、棕壤类、褐土类、灰褐土类、草甸土类、沼泽土类、泥炭土、高山寒漠土。甘南州土壤具有脆弱性、敏感性等特点,一旦遭到破坏恢复难度较大^[11]。甘南州下辖一市七县,分别为合作市、临潭县、卓尼县、舟曲县、迭部县、玛曲县、碌曲县、夏河县,各市县位置见图 1。

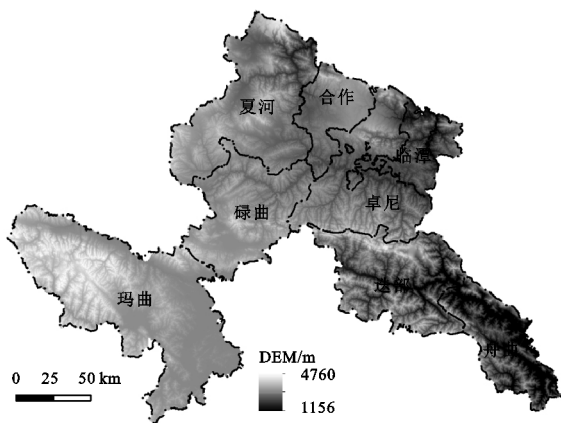


图 1 研究区位置

2 研究方法

2.1 RUSLE 模型

本研究采用 1997 年美国农业部在通用土壤流失方程(USLE)的基础上提出了修正通用土壤流失方程(RUSLE)^[12],公式如下:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $t/(hm^2 \cdot a)$,表示单位面积土壤年平均流失量; R 为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。降雨侵蚀力是降水及其产生的径流所具有的引起土壤侵蚀的潜在能力,是土壤的水蚀动力。降雨侵蚀力难以直接测定,通常采用降雨量、雨强等参数进行估算,本研究采用 Wischmeier 提出并由 Arnoldus 修正的经验公式进行计算^[13]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.5 \times \lg(P_i^2/P) - 0.8188]} \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀力因子; P_i 和 P 分别为月平均降雨量和年平均降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。 K 值表示土壤的可蚀性,即土壤特性对侵蚀量的影响。 K 值的大小主要受土壤质地、土壤结构及其稳定性、土壤渗透性、有机质含量和土层深度等因素的影响^[14-15],当土壤颗粒粗、渗透性大时, K 值就低,反之则高。 K 值反映了土壤抗侵蚀能力, K 值越大,土壤抗侵蚀能力越弱。根据相关研究成果^[16], K 值计算公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_d \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{S_c + S_i} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right) \quad (3)$$

式中: S_d 表示土壤砂粒含量(%); S_i 表示土壤粉粒含量(%); S_c 表示土壤黏粒含量(%); C 表示土壤有机碳含量(%); $S_n = 1 - S_d/100$ 。式中计算结果 K 的单位为美制,需乘以转换系数 0.131 7 转换为国际制单位。

(3) 坡长因子和坡度因子 LS 。坡度坡长因子可以体现地形对土壤侵蚀的影响,与土壤侵蚀强度呈正相关,通常基于数字高程模型 DEM 提取计算坡度坡长因子。根据国内外的研究成果^[17],不同坡度范围内,坡度因子采用不同的公式计算,

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$)。

考虑汇流对坡长因子影响,坡长因子采用以下公式进行计算^[18-19]:

$$L_i = \frac{A_{out}^{m+1} - A_{in}^{m+1}}{\Delta x^2 L_m^m 22.13^m} \quad (5)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 3^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_i 为栅格坡长因子值; A_{out} , A_{in} 分别为栅格出口和入口的汇流面积(m^2); Δx 为栅格分辨率(m); L_m 为与栅格入口、出口水流方向相关的非累计坡长(m); m 为坡长指数。

(4) 植被覆盖因子 C 。植被覆盖对土壤侵蚀有一定的抑制作用,植被覆盖因子 C 值是指当土壤、

坡度坡长、降雨条件都一致时,有植被覆盖的土地与裸土地土壤流失量比率,取值为 $0 \sim 1$ [20-21]。C 值越大,对土壤侵蚀的抑制越弱。目前较为常用的方法是采用归一化植被指数 NDVI 对 C 值进行估算,根据国外学者建立的 NDVI 和 C 值的关系式以及国内的相关研究 [20-21],采用以下公式计算 C 值:

$$C = \exp \left[-\alpha \cdot \frac{\text{NDVI}}{(\beta - \text{NDVI})} \right] \quad (7)$$

式中: C 为植被覆盖因子, α 和 β 是决定 NDVI-C 关系曲线的参数,通常取 $\alpha = 2, \beta = 1$ 。

(5) 水土保持措施因子 P。水土保持措施因子指采取水土保持措施后的土壤流失量与不采取任何措施时土壤流失量的比率, P 值范围在 $0 \sim 1$, 0 代表该地区不会发生土壤侵蚀, 1 代表该地区未采取任何水土保持措施 [20]。通常利用土地利用类型来间接反映水土保持措施。根据研究区特点以及参考文献, 本文对未采取水土保持措施的地类包括人造地表(由人工建造活动形成的地表, 包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等)、水体、湿地、裸地、冰川和永久积雪, 赋值为 1; 对于具有较好水土保持作用的地类包括林地、灌木地、草地, 赋值为 0.7; 此外, 坡度对耕地水土保持措施的作用影响较大, 坡度越陡, 水土保持措施的效果较明显。因此, 耕地根据不同坡度参考相关文献进行赋值 [22-23], 如表 1 所示。

表 1 不同坡度耕地的 P 值

坡度	$\leq 5^\circ$	$5^\circ \sim 10^\circ$	$10^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 20^\circ$	$20^\circ \sim 25^\circ$	$> 25^\circ$
P 值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

2.2 地理探测器模型

地理探测器是一种探测空间分异性及其驱动力的空间分析方法, 其核心思想是基于这样的假设: 如果某个自变量 X_i 对某个因变量 Y 有重要影响, 那么自变量 X_i 和因变量 Y 的空间分布应该具有相似性 [24]。它包含因子探测、交互作用探测、风险区探测、生态探测等 4 种探测器 [24]。为探究各侵蚀因子对甘南州侵蚀状况的解释力以及不同因子之间的交互作用, 本文采用模型里的因子探测、交互作用探测进行分析。

因子探测用来分析因变量 Y 自身的空间分异性, 和某影响因子 X_i 对 Y 的空间分异性的解释力强度, 强度大小用 q 值来衡量 [24], 计算公式如下:

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

式中: $h = 1, \dots, L$ 为因变量 Y 或影响因子 X 的分层, 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。q 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。q 值越大表明影响因子 X 对因变量 Y 空间分异的解释程度越强。

交互作用探测用来判断不同影响因子共同作用时是增加还是减弱对因变量 Y 的解释力 [24]。交互作用探测判断方法和类型如表 2 所示。

表 2 交互作用探测类型

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

注: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 为影响因子 X_1 和影响因子 X_2 对 Y 的 q 值。

本文选取了甘南州年均降雨量、年均温、高程、地形起伏度、坡度、土地利用、植被覆盖度、人口密度等 8 个影响因子作为自变量 $X_1 - X_8$, 甘南州土壤侵蚀状况作为因变量 Y。利用地理探测器进行计算需将自变量和因变量统一到同一空间粒度, 并对连续型数据进行离散化处理。通过 ArcGIS 创建 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的渔网和渔网点, 并对离散化后的自变量和因变量数据进行采样, 将其值提取到点后去除异常值, 得到 31 263 个有效点, 作为模型输入数据。本文通过 ArcGIS 的重采样工具对数据进行离散化: 年均降雨量和年均温采用等间距的方式分别分为 5 类和 4 类; 高程和地形起伏度按照自然间断法分为 5 类; 坡度按照 $0^\circ \sim 5^\circ$, $5^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$, $35^\circ \sim 45^\circ$, $45^\circ \sim 55^\circ$, $> 55^\circ$ 分为 7 类; 土地利用分为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地、冰川和永久积雪 9 类; 植被覆盖度按照 $0 \sim 0.2$, $0.2 \sim 0.4$, $0.4 \sim 0.6$, $0.6 \sim 0.8$, $0.8 \sim 1$ 的方式分为 5 类; 人口密度按照等间距的方式分为 5 类。

3 数据来源与处理

2000—2019 年气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 的中国地面气候资料月值数据集; DEM 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数字高程数据产品; 土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>) 的基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1);

土地利用数据来源于 Globeland30:全球地理信息公共产品 (<http://www.globallandcover.com>);NDVI 数据利用 Google Earth Engine 平台对遥感影像进行处理得到;人口密度数据来源于《甘肃发展年鉴》。将各因子数据坐标系转换为 WGS1984 坐标系及 UTM48N 投影,栅格分辨率统一为 30 m×30 m。

4 结果与分析

4.1 甘南州土壤侵蚀总体特征

将 RUSLE 模型计算结果按照《土壤侵蚀强度分级标准》(SL190—2008)分为微度侵蚀(0~200)、轻度侵蚀(200~2 500)、中度侵蚀(2 500~5 000)、强烈侵蚀(5 000~8 000)、极强烈侵蚀(8 000~15 000)、剧烈侵蚀(>15 000)6 个等级^[25],单位为 t/(km²·a),结果如表 3 所示。

甘南州 2000 年、2010 年、2019 年主要以微度侵蚀为主,其次是轻度侵蚀。微度侵蚀区域面积占比分别为 89.68%,86.88%,87.36%,平均侵蚀模数分别为 14.79,15.09,16.49 t/(km²·a)。甘南州微度侵蚀

区侵蚀强度较低,但面积占比随时间呈下降趋势,平均侵蚀模数呈增加趋势;3 个时期轻度侵蚀区面积占比为 8.01%,10.07%,9.51%,平均侵蚀模数随时间呈下降趋势,分别为 731.41,697.93,670.76 t/(km²·a);中度侵蚀区面积占比随时间呈下降趋势,分别为 1.51%,1.32%,1.21%,平均侵蚀模数分别为 3 591.76,3 604.22,3 620.89 t/(km²·a),呈上升趋势。

甘南州强烈、极强烈、剧烈侵蚀区面积占比虽然较小,但均随时间呈上升趋势,3 个区域占比总和从 2000 年的 0.80%增长到了 2019 年的 1.92%,其中极强烈侵蚀区域面积占比明显增加,2000—2019 年增加了 0.73%。可以看出,2000—2010 年的这 3 个区域面积增长速度较快,2010—2019 年明显放缓。此外,强烈、极强烈侵蚀区域的平均侵蚀模数随时间呈上升趋势,而剧烈侵蚀区域 2010 年平均侵蚀模数最大,2019 年的数值略低于 2010 年。虽然总体上甘南州侵蚀较为微弱,然而局部区域侵蚀较为强烈,且这些区域随时间呈现出面积扩大,侵蚀强度增大的趋势。

表 3 甘南州 2000—2019 年侵蚀状况

年份	参数	侵蚀等级					
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2000	侵蚀面积/km ²	32823.87	2930.94	554.42	239.88	51.08	0.12
	侵蚀面积占比/%	89.68	8.01	1.51	0.66	0.14	0.00
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	14.79	731.41	3591.76	6154.74	9359.08	15865.96
2010	侵蚀面积/km ²	31796.80	3686.53	484.65	311.60	266.87	53.83
	侵蚀面积占比/%	86.88	10.07	1.32	0.85	0.73	0.15
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	15.09	697.93	3604.22	6351.06	10581.39	18414.90
2019	侵蚀面积/km ²	31974.15	3479.18	442.70	319.73	318.23	66.29
	侵蚀面积占比/%	87.36	9.51	1.21	0.87	0.87	0.18
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	16.49	670.76	3620.89	6378.43	10687.00	18132.51

此外,本文对甘南州各县市 2000 年、2010 年、2019 年不同侵蚀等级面积占比进行了统计,结果如表 4 所示。合作市、玛曲县、碌曲县绝大部分区域均以微度侵蚀为主,3 个时期微度侵蚀面积占比均在 90%以上,其中合作市微度侵蚀面积占比随时间减小,轻度、中度、强烈、极强烈侵蚀面积随时间增加;玛曲县微度侵蚀面积占比随时间减小,轻度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积在增加;夏河县同样以微度侵蚀为主,3 个时期微度侵蚀面积仅次于上述 3 个地区,其中度、强烈、极强烈侵蚀面积随时间呈增加趋势;甘南州轻度、中度侵蚀区主要分布在临潭县、卓尼县、舟曲县、迭部县,这 4 个县的轻度、中度侵蚀区面积占比明显高于其他几个县。值得注意的是,卓尼县强烈、极

强烈、剧烈侵蚀面积的总和随时间明显增加;从 2010 年后,迭部县强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积占比最高,其次是舟曲县。

4.2 甘南州土壤侵蚀时空分布与变化

2000 年、2010 年、2019 年甘南州土壤侵蚀空间分布如图 2 所示。甘南州土壤侵蚀空间差异性较为明显,总体上西部地区土壤侵蚀强度低于东部。甘南州大部分区域都为微度侵蚀;轻度侵蚀主要分布在玛曲县西北部、夏河县北部、卓尼县和临潭县西部、迭部县西北部和舟曲县南部;中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域呈现出较明显的聚集状态,主要分布在玛曲县西北部、玛曲县和碌曲县交界处、碌曲中部、夏河县北部、卓尼县和临潭县的东部、迭部县和舟曲县。此外,玛曲县

西北部、迭部县和舟曲县的交界处的强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域面积随时间明显增加；舟曲县的侵蚀状况改善较为明显，高风险侵蚀区域占比有所减少，但与其他县市相比仍然较高。

表 4 甘南州各市县 2000—2019 年侵蚀等级统计

年份	等级	面积占比/%							
		合作市	临潭县	卓尼县	舟曲县	迭部县	玛曲县	碌曲县	夏河县
2000	微度	93.38	80.96	89.92	70.11	83.73	95.58	96.25	90.66
	轻度	6.22	15.99	7.99	19.32	12.37	3.22	3.47	8.49
	中度	0.35	2.26	1.41	5.96	2.42	0.97	0.24	0.71
	强烈	0.05	0.75	0.59	3.56	1.20	0.23	0.05	0.14
	极强烈	0.00	0.04	0.09	1.04	0.28	0.01	0.00	0.01
	剧烈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2010	微度	92.92	73.04	85.05	75.85	72.43	92.84	93.34	92.24
	轻度	6.40	23.28	11.94	18.60	19.45	4.75	5.83	6.54
	中度	0.49	2.23	1.27	2.70	2.73	1.03	0.36	0.81
	强烈	0.17	1.10	0.83	1.61	2.02	0.77	0.25	0.33
	极强烈	0.03	0.35	0.74	1.12	2.57	0.57	0.21	0.08
	剧烈	0.00	0.00	0.16	0.11	0.80	0.04	0.01	0.00
2019	微度	92.32	82.10	85.20	83.96	76.77	90.63	94.70	88.30
	轻度	6.76	15.06	11.17	11.15	15.68	6.59	4.67	10.10
	中度	0.53	1.30	1.40	1.73	2.67	0.87	0.36	1.00
	强烈	0.27	0.82	1.04	1.33	2.14	0.74	0.20	0.45
	极强烈	0.12	0.66	1.05	1.53	2.34	0.86	0.07	0.15
	剧烈	0.00	0.06	0.16	0.30	0.39	0.31	0.00	0.00

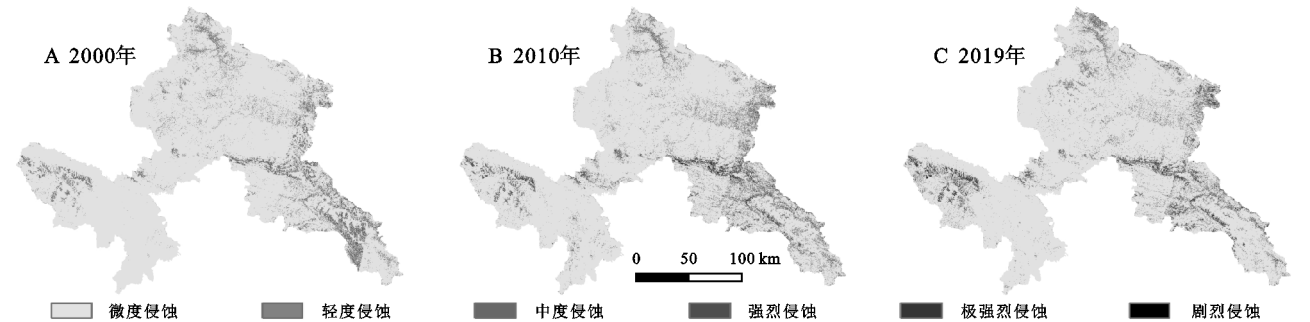


图 2 甘南州 2000—2019 年土壤侵蚀空间分布

本文基于马尔科夫模型制作了甘南州 2000—2010 年、2010—2019 年和 2000—2019 年土壤侵蚀面积转移矩阵，并利用 ArcGIS 将侵蚀变化结果可视化，结果如表 5 所示。从表中可以看出，2000—2010 年，侵蚀等级保持不变的区域面积占比为 88.44%；微度侵蚀转为轻度侵蚀的区域面积占比为 5.36%；轻度侵蚀转为微度侵蚀和中度侵蚀的区域面积占比分别为 2.45%和0.88%；中度侵蚀向轻度和强烈侵蚀转变得较多，占比分别为 0.34%和 0.39%；强烈侵蚀转为轻度和极强烈侵蚀的区域面积占比分别为 0.17%和 0.21%；极强烈侵蚀转为轻度侵蚀和剧烈侵蚀的区域面积占比均为 0.04%。2010—2019 年，侵蚀等级保持不变的区域面积占比为 88.08%，较上一时期有所降低；微度侵蚀转为轻度

侵蚀的区域面积占比为 4.04%；轻度侵蚀转为微度侵蚀的区域面积占比为 4.63%；中度侵蚀转为轻度和强烈侵蚀的区域面积占比分别为 0.50%和0.21%；强烈侵蚀转为轻度和极强烈侵蚀的区域面积占比分别为 0.21%和 0.20%；极强烈侵蚀转为轻度和强烈侵蚀的区域面积占比为 0.13%和 0.14%；剧烈侵蚀转为极强烈侵蚀的区域面积占比为 0.06%。

综上，结合 2000—2019 年的侵蚀转移矩阵，可以看出，甘南州 80%以上的地区侵蚀等级未发生变化，发生转移的区域主要为微度侵蚀和轻度侵蚀，分别占 6.15%和 4.54%；此外，虽然强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域的面积占比不高，但这些侵蚀风险较高的区域的面积增速却显著高于其他侵蚀风险较低的区域。

表 5 甘南州 2000—2019 年土壤侵蚀等级转移百分比矩阵

年份	等级	2010							
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总和	减少
2000	微度	83.99	5.36	0.20	0.08	0.04	0.01	89.68	5.69
	轻度	2.45	4.16	0.88	0.31	0.17	0.03	8.01	3.84
	中度	0.29	0.34	0.20	0.39	0.28	0.01	1.51	1.31
	强烈	0.12	0.17	0.03	0.06	0.21	0.06	0.66	0.59
	极强烈	0.02	0.04	0.01	0.01	0.03	0.04	0.14	0.11
	剧烈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	总和	86.88	10.07	1.32	0.85	0.73	0.15	100.00	
	新增	2.89	5.91	1.12	0.79	0.70	0.15		
年份	等级	2019							
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总和	减少
2010	微度	82.49	4.04	0.20	0.09	0.06	0.01	86.88	4.38
	轻度	4.63	4.61	0.45	0.20	0.16	0.02	10.07	5.46
	中度	0.15	0.50	0.38	0.21	0.08	0.01	1.32	0.94
	强烈	0.06	0.21	0.14	0.23	0.20	0.01	0.85	0.62
	极强烈	0.03	0.13	0.04	0.14	0.31	0.08	0.73	0.42
	剧烈	0.00	0.02	0.01	0.00	0.06	0.05	0.15	0.09
	总和	87.36	9.51	1.21	0.87	0.87	0.18	100.00	
	新增	4.87	4.89	0.83	0.64	0.56	0.13		
年份	等级	2019							
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总和	减少
2000	微度	83.53	5.59	0.30	0.14	0.10	0.01	89.68	6.15
	轻度	3.15	3.47	0.77	0.36	0.22	0.03	8.01	4.54
	中度	0.43	0.29	0.11	0.35	0.31	0.03	1.51	1.41
	强烈	0.21	0.13	0.02	0.02	0.22	0.06	0.66	0.64
	极强烈	0.04	0.03	0.01	0.00	0.01	0.05	0.14	0.13
	剧烈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	总和	87.36	9.51	1.21	0.87	0.87	0.18	100.00	
	新增	3.83	6.03	1.10	0.86	0.86	0.18		

利用 ArcGIS 栅格计算器对甘南州 3 个时期侵蚀空间分布图进行处理,得到甘南州 2000—2010 年、2010—2019 年和 2000—2019 年侵蚀变化情况的分布图,结果如图 3 所示。2000—2010 年,侵蚀等级降低的区域主要分布在甘南州西部及西南部,侵蚀强度等级升高的区域主要分布在玛曲县西北部、玛曲县和碌曲县的交界处、临潭县和卓尼县东部、迭部县。2010—2019 年,侵蚀等级降低的区域与上一时段相较变多,主要分布在临潭县和卓尼县东部、迭部县和舟曲县、玛曲县、碌曲县、夏河县北部;而侵蚀等级升高的区域较上一时段变少,主要分布在玛曲县西北部、夏河县北部、卓尼县东部及迭部县。结合表 5 来看,2000—2019 年,甘南州

大部分地区侵蚀等级不变,面积占比为 87.14%,侵蚀等级降低的区域面积占比为 4.31%,主要分布在卓尼县和临潭县的东部以及舟曲县;侵蚀等级升高的区域面积占比为 8.56%,主要分布在玛曲县西北部、玛曲县和碌曲县的交界处、夏河县北部和中部、卓尼县东部以及迭部县。玛曲县西北部和卓尼县东部在 2000—2010 年、2010—2019 年均呈现侵蚀等级升高的趋势,而夏河县侵蚀等级升高的区域也明显增加。此外,迭部县在 2000—2010 年侵蚀等级升高的区域较多,2010—2019 年侵蚀等级降低的区域较多,说明该地区侵蚀状况有明显改善,但从 2000—2019 年来看,仍然是侵蚀等级升高的区域较多。

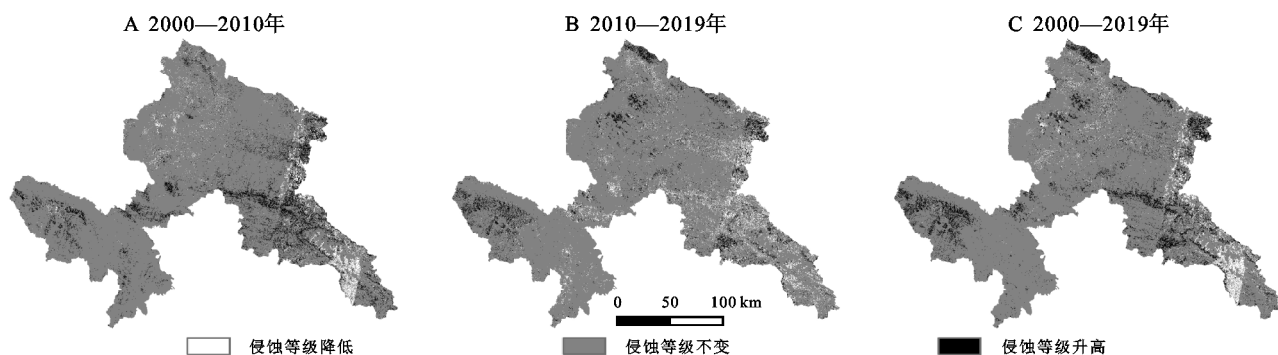


图 3 甘南州 2000—2019 年土壤侵蚀变化分布

4.3 甘南州土壤侵蚀影响因素

将甘南州年均降雨量、年均温、高程、地形起伏度、坡度、土地利用、植被覆盖度、人口密度等 8 个影响因子作为自变量,甘南州土壤侵蚀状况作为因变量输入地理探测器模型,因子探测结果如表 6 所示。 q 值越大说明因子对侵蚀空间分异性的解释力越强。各因子的 q 值从大到小分别为土地利用、地形起伏度、年均温、坡度、人口密度、高程、年均降雨量、植被覆盖度,分别为 0.09, 0.04, 0.04, 0.03, 0.02, 0.02, 0.02, 0.01。

对甘南州侵蚀解释力最强的是土地利用。甘南州主要土地利用类型为林地和草地,2019 年面积占比分别为 35.78% 和 52.87%,其次是耕地,占比 6.64%。相关研究表明,1999 年,退耕还林政策在甘肃试点,甘南州在 2000—2005 年启动了退耕还林(草)计划,在 2006 年转变为封山育林和造林,并在 2013 年完成了第一轮退耕还林^[26]。根据甘南州土地利用数据,2000—2019 年甘南州草地大量转化为林地,林地面积增加了 10.31%,草地面积减少了 12.67%,草地减少的区域主要集中在临潭县、卓尼县以及合作市南部。结合图 3 来看,该区域 2010 年侵蚀等级较 2000 年有所升高,但到 2019 年明显改善,微度侵蚀区明显增加。出现这个现象的原因可能是 2010 年甘南州第一轮退耕还林尚未完成,并且新建好的林地需要一定时间恢复保水保土能力,所以该时期侵蚀等级略有升高;而 2019 年退耕还林基本完成,且林地发育

成熟,保水保土增强,所以侵蚀状况有所改善。此外,甘南州农业总产值增长较快,城镇化水平提高,农业活动、城市化推进和造林过程对地表的扰动较大,易引发侵蚀和水土流失。

地形起伏度是指一定范围内最高海拔和最低海拔的差值,直接影响地面径流的变化^[27]。本文中的地形起伏度使用研究区 DEM 数据通过 ArcGIS 软件中的领域分析和栅格计算器工具计算得到。甘南州地形较为复杂,全州海拔高低悬殊,全州可分为西部高原区、东南部高山峡谷区、东部山地丘陵区^[2,9]。高原区是高寒草甸集中分布的地区,地形起伏度较低且植被覆盖度较高,因此侵蚀程度与甘南州东部相比较轻;高山峡谷区主要分布在东南部迭部县与舟曲县境内,呈现出山高坡陡、谷窄沟深的特征,受到自然因素和人为活动的影响,该区域侵蚀与洲内其他区域相比较强,强烈、极强烈、剧烈侵蚀多发生在该区域内;山地丘陵区主要分布在东部临潭县和卓尼县,夏河东部县和碌曲县北部也有分布,这些区域地势较为平缓,农业活动较为频繁,因此侵蚀等级比西部高原区略高,但弱于东南部高山峡谷区。

甘南州植被覆盖度整体较高,但对侵蚀的解释力较弱,这可能是由于本文研究区植被覆盖度是采用最大值合成法合成年度 NDVI 值来计算的,计算结果相比于实际植被覆盖率可能偏高且空间差异较小,因此解释力较弱。

表 6 甘南州侵蚀因子探测结果

参数	年均降雨量	年均温	高程	地形起伏度	坡度	土地利用	植被覆盖度	人口密度
q 值	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03	0.09	0.01	0.02
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

地理探测器中的交互探测可以评估两种因子共同作用时对侵蚀是增强还是削弱。按照 $q(X_i \cap X_j)$ 的大小可以将结果分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种结果。甘南州各因子交互作用探测结果如表 7 所示。所有因子

间的交互均对侵蚀的解释力存在增强作用。其中非线性增强类型里交互作用较强的是年均温 \cap 土地利用、土地利用 \cap 人口密度, q 值分别为 0.14, 0.13; 双因子增强类型里交互作用较强的是地形起伏度 \cap 土地利用、坡度 \cap 土地利用、高程 \cap 土地利用、年均降雨

量 \cap 土地利用、土地利用 \cap 植被覆盖, q 值分别为 0.13,0.11,0.11,0.10,0.10。

可以看出,人口密度、坡度、高程、年均降雨量、植被覆盖度单独作用于侵蚀时 q 值较低,解释力较弱,而与土地利用共同作用时均呈现明显增强。人口密度大小与土地利用类型高度相关,人类活动对地表的扰动也是侵蚀发生的重要原因之一,因此人类活动较强的地类较容易发生侵蚀;甘南州植被覆盖度较高,90%的地类为耕地、林地、草地,林地和草地的占比高达 80%以上,而坡度、高程、年均降雨量均可以直接对作物、林草的生长产生影响,而农业活动和林草发育状况是影响侵蚀的重要因素,这可能是这几种因素与土地利用共同作用时相较其单独作用均出现明显增强的原因;此外,不同地类的植被覆盖度差异较大,因此植被覆盖度和土地利用共同作用时对侵蚀的空间分异性的解释力增强。

甘南州是国内重要的畜牧业基地,但由于气候变化、人类活动加强等导致其出现了一定程度的草场退化,发生侵蚀的风险升高,尤其是生态环境本就比较脆弱的东南部高山峡谷区以及耕地分布广泛的东部区域,侵蚀强度增大的趋势较明显。因此,在对当地自然资源进行开发利用、推动城市化进程和社会经济发展的同时要注重环境的保护与修复,警惕侵蚀风险区的环境恶化问题,防治水土流失。

5 结 论

(1) 甘南州以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,强烈、极强烈、剧烈侵蚀区面积占比虽然较小,但均随时间呈上升趋势,所占比例从 2000 年的 0.80%增长到了 2019 年的 1.92%,其中极强烈侵蚀区域明显增加。甘南州虽然总体上侵蚀问题并不突出,但局部区域侵蚀较为强烈,且随时间呈现出面积扩大,强度增大的趋势。

(2) 甘南州土壤侵蚀空间差异性较为明显,总体看西部地区土壤侵蚀强度低于东部地区,中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域的分布较为相似,呈现出较为明显的聚集状态。合作市、玛曲县、碌曲县总体以微度侵蚀为主,但高风险侵蚀区有随时间扩大的趋势;卓尼县、迭部县、舟曲县侵蚀风险较高,强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积占比高于其他县市。

(3) 2000—2019 年甘南州 87.14%的地区侵蚀等级未发生明显变化,发生转移的区域主要为微度侵蚀和轻度侵蚀,高风险侵蚀区占比虽然不高,但增速

较快。侵蚀等级升高的区域面积占比高于降低的区域,侵蚀等级降低的区域主要分布在卓尼县和临潭县的东部以及舟曲县,升高的区域主要分布在玛曲县、碌曲县、夏河县、卓尼县以及迭部县。

表 7 甘南州侵蚀因子交互作用探测结果

因子	$q(X_i \cap X_j)$	交互作用
年均降雨量 \cap 高程	0.04	非线性增强
年均降雨量 \cap 人口密度	0.05	非线性增强
年均降雨量 \cap 年均温	0.06	非线性增强
土地利用 \cap 人口密度	0.13	非线性增强
年均温 \cap 土地利用	0.14	非线性增强
年均降雨量 \cap 植被覆盖度	0.03	双因子增强
高程 \cap 植被覆盖度	0.03	双因子增强
植被覆盖 \cap 人口密度	0.03	双因子增强
坡度 \cap 植被覆盖	0.04	双因子增强
高程 \cap 坡度	0.04	双因子增强
地形起伏度 \cap 坡度	0.04	双因子增强
年均降雨量 \cap 坡度	0.04	双因子增强
坡度 \cap 植被覆盖	0.04	双因子增强
高程 \cap 人口密度	0.04	双因子增强
年均温 \cap 植被覆盖度	0.05	双因子增强
地形起伏度 \cap 植被覆盖度	0.05	双因子增强
高程 \cap 地形起伏度	0.05	双因子增强
地形起伏度 \cap 人口密度	0.05	双因子增强
年均温 \cap 人口密度	0.05	双因子增强
年均温 \cap 坡度	0.05	双因子增强
年均温 \cap 高程	0.05	双因子增强
年均降雨量 \cap 地形起伏度	0.05	双因子增强
年均温 \cap 地形起伏度	0.06	双因子增强
土地利用 \cap 植被覆盖	0.10	双因子增强
年均降雨量 \cap 土地利用	0.10	双因子增强
高程 \cap 土地利用	0.11	双因子增强
坡度 \cap 土地利用	0.11	双因子增强
地形起伏度 \cap 土地利用	0.13	双因子增强

(4) 土地利用和地形起伏度是对甘南州侵蚀解释力较强的因子。退耕还林(草)工程、农牧业活动、城市化推进以及甘南州复杂的地形均对侵蚀状况有较大的影响。此外人口密度、坡度、高程、年均降雨量、植被覆盖度与土地利用交互作用时对侵蚀的解释力均呈现明显增强。因此在甘南州未来的侵蚀防治中,应关注土地利用变化和草场退化问题,做好保护和修复工作,以及在地形复杂的生态风险较高的区域如东南部的高山峡谷区开展各类工业农业活动时对侵蚀问题恶化的趋势保持警惕。

参考文献:

- [1] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- [2] 张志强,孙成权,王学定,等.论甘南高原的生态保护、生态建设与可持续发展[J].科技导报,2000(8):30-33.
- [3] 赵雪雁.甘南牧区人文因素对环境的影响[J].地理学报,2010,65(11):1411-1420.
- [4] 赵雪雁.高寒牧区生态移民、牧民定居的调查与思考:以甘南牧区为例[J].中国草地学报,2007,29(2):94-101.
- [5] 王录仓,高静.高寒牧区村域生态足迹:以甘南州合作市为例[J].生态学报,2012,32(12):3795-3805.
- [6] 赵雪雁.高寒牧区草地退化的人文因素研究:以甘南牧区玛曲县为例[J].草业学报,2007,16(6):113-120.
- [7] 常得中.黄河玛曲湿地水资源初步分析研究[J].甘肃水利水电技术,2009,45(2):8-10.
- [8] 邓姣姣.甘南藏族自治州生态旅游可持续发展研究[D].兰州:甘肃农业大学,2016.
- [9] 薛中正.基于生态系统健康的甘南地区生态承载力评价及预警研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [10] 徐丹丹.甘南天然草地生态风险评价和预测[D].兰州:兰州大学,2011.
- [11] 梁海红.甘南州草场土壤分布及特点[J].甘肃农业,2014(15):73-74.
- [12] Yoder D, Lown J. The future of RUSLE: Inside the new revised universal soil loss equation [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1995, 50(5):484-489.
- [13] 卜兆宏,宫世俊,阮伏水,等.降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用[J].遥感技术与应用,1992(3):1-10.
- [14] 史学正,邓西海.土壤可蚀性研究现状及展望[J].中国水土保持科学,1993(5):29-33,65-66.
- [15] ROMKENS M J M,李中魁.土壤可蚀性因子研究展望[J].水土保持科技情报,1988(4):16-22.
- [16] William J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models [J]. Soil Technology, 1997, 11(1):43-55.
- [17] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the Asae, 1994, 37(6):1835-1840.
- [18] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1996, 51(5):427-433.
- [19] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
- [20] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [21] 郭达,宋小宁,董震,等.基于 RUSLE 与 GIS 的黄土高原水土流失评价研究:以宁夏中卫地区为例[J].泥沙研究,2020,45(5):55-60.
- [22] 林经理.基于 RUSLE 模型的甘肃省文县土壤侵蚀定量评价[D].兰州:兰州大学,2009.
- [23] 陈峰,李红波.基于 GIS 和 RUSLE 的滇南山区土壤侵蚀时空演变:以云南省元阳县为例[J].应用生态学报,2021,32(2):629-637.
- [24] 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.
- [25] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 GB/SL190-2008[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [26] 刘晋荣,刘淑英,张伟军,等.甘南藏族自治州耕地资源时空变化及驱动力分析[J].草业科学,2010,27(6):25-31.
- [27] 舒天竹,王晓红.基于 3S 技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J].水土保持研究,2017,24(4):127-132.