

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.04.011

基于改进RUSLE模型的西南土石山区水土流失评价 ——以湖南省龙山县为例

龙思佳¹, 汤媛媛^{1,2*}, 戴亮亮¹, 乔双¹, 樊旺东¹, 余雄¹, 孔巍巍¹

LONG Si-Jia¹, TANG Yuan-Yuan^{1,2*}, DAI Liang-Liang¹, QIAO Shuang¹, FAN Wang-Dong¹,
SHE Xiong¹, KONG Wei-Wei¹

1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙410600; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京100083
1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha 410600, Hunan, China;
2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要:本文基于Landsat遥感影像,引入归一化山地植被指数(NDMVI),改进RUSLE模型中的植被管理因子 C ,得到改进的RUSLE模型,并利用其对湖南省龙山县2000~2020年的土壤侵蚀进行估算,旨在快速、科学地评价研究区水土流失变化情况,为以龙山县为代表的西南土石山区水土流失治理提供科学依据。2000年的NDMVI数值范围较均一化植被指数(NDVI)增加了0.3158,2020年的NDMVI数值较NDVI增加了0.2076,增加幅度均较大,这说明NDMVI区分地物的能力更强,具有较强地消除复杂地形影响的能力。通过影像对比,可以看出NDMVI区分地物的能力要优于NDVI,提取城镇用地、水体等地物的精度更高,尤其在地形起伏地区以及山坡的阴影地区,能更好地反演植被覆盖管理因子。基于山地植被指数修正的植被覆盖管理因子 C 可以更准确地区分地物,尤其是在地形起伏和山坡阴影地区。该方法能有效地运用于西南土石山区的水土流失监测和评价,实现动态变化的快速定量监测。

关键词:土壤侵蚀;RUSLE;NDMVI;植被覆盖管理因子;西南土石山区

中图分类号:P407.8;S157.1

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)04-0704-09

Long S J, Tang Y Y, Dai L L, Qiao S, Fan W D, She X and Kong W W. 2023. Evaluation of Soil and Water Loss in the Rocky Mountain Area of Southwest China Based on Improved RUSLE Model: Taking Longshan County, Hunan Province as an Example. *South China Geology*, 39 (4): 704-712.

Abstract: The RUSLE model, the vegetation management factor C of which is improved based on Landsat remote sensing images and the Normalized Mountain Vegetation Index (NDMVI), is used to estimate soil erosion from 2000 to 2020 in Longshan County, Hunan Province. The aim is to quickly and scientifically evaluate the changes in soil erosion in the study area, and provide a scientific basis for soil erosion control in southwestern rocky mountainous areas represented by Longshan County. The NDMVI value range in 2000 increased by 0.3158 compared to the Normalized Vegetation Index (NDVI), and the NDMVI value range in 2020 increased by 0.2076 compared to NDVI, with significant increases. This indicates that it is easier to use ND-

收稿日期:2023-8-8;修回日期:2023-10-5

基金项目:中国地质调查局项目(DD20211576)

第一作者:龙思佳(1995—),男,助理工程师,主要从事遥感地质调查研究,E-mail:longsjia@mail.cgs.gov.cn

通讯作者:汤媛媛(1987—),女,高级工程师,主要从事遥感地质调查研究,E-mail:tangyuanyuan@mail.cgs.gov.cn

MVI to distinguish features and eliminate complex terrain impacts. Through image comparison, it can be seen that it is better to use *NDMVI* to distinguish land features than *NDVI*, and the accuracy of extracting urban land, water bodies, and other land features is higher, especially in areas with undulating terrain and shaded slopes, which can better invert vegetation cover management factors. The vegetation cover management factor *C* within mountain vegetation index correction can be used to more accurately distinguish land features, especially in areas with undulating terrain and shaded slopes. This method can be effectively applied to the monitoring and evaluation of soil and water loss in southwestern mountainous areas, achieving rapid and quantitative monitoring of dynamic changes.

Key words: soil erosion; RUSLE; *NDMVI*; vegetation cover and management factor; rocky mountain area of Southwest China

湘西土家族苗族自治州地处武陵山区,位于湘、鄂、黔、渝4省(市)交界处,土壤侵蚀类型分区属于西南土石山区,是我国西南典型岩溶山区,也是长江中上游地区的岩溶区(潘佑堂和杨胜刚,1995;吴兆清和苏绍眉,2004)。受自然条件和人为因素影响,湘西土家族苗族自治州的水土流失问题十分严重。该地区位于长江中游地区的沅水流域,是湖南省水土流失问题相对集中和严重的地区之一。2010年,龙山县成为湘西土家族苗族自治州水土流失最为严重的县市之一,整体水土流失状况以轻度 and 中度侵蚀为主,强烈侵蚀次之(尹黎明等,2012)。水土流失导致当地生态环境破坏严重,土壤流失和退化,土壤蓄水抗旱能力降低,对人类的生存发展造成极大的影响。当地百姓流传一句话:“水在地下流,人在岸上愁”。防治水土流失、加大水土保持力度对于生态文明建设和推动湘西土家族苗族自治州经济社会可持续发展有着重大而深远的意义。

土壤侵蚀模型是检测和预报土壤流失的重要工具。美国的修正通用土壤流失方程 RUSLE 是目前较为通用的土壤侵蚀模型(陈朝良等,2021;张素等,2021;高凡洁等,2022;王丰等,2022),已应用于我国多地土壤侵蚀时空变化分析和水土保持研究。RUSLE 土壤流失方程共包含5个土壤侵蚀因子:降雨侵蚀力因子(*R*)、土壤可蚀性因子(*K*)、坡度坡长因子(*LS*)、植被覆盖管理因子(*C*)、水土保持措施因子(*P*)。植被覆盖管理因子(*C*)作为抑制水土流失的重要因素,以植被类型和植被覆盖度对其的影响最大(陈学兄,2013)。植被覆盖度一般由植被指数反演而来,是描述地表植被状况的重要参数,

是土壤侵蚀模型的重要输入参数,也是当今研究植被因子与水土流失关系中用得最多的一个参数(张灿等,2015;Jia K et al., 2016),其估算精度影响土壤侵蚀预测的精度(吴志杰和徐涵秋,2011)。然而,植被覆盖度遥感估算精度与植被指数等紧密相关,且大多数的植被指数都没考虑地形的影响(刘亚迪等,2015)。目前植被覆盖管理因子的估算均使用均一化植被指数(*NDVI*)来提取植被覆盖度,能够较好地反映区域植被情况。但是在地形起伏的山区,遥感影像中有着大量的阴影分布,利用*NDVI*计算的结果会影响土壤侵蚀模型的精度,存在一定误差(孙桂凯等,2021;罗杰等,2022)。龙山县多山丘,地形起伏大,其引起的光谱信息变化影响山地植被覆盖度的提取精度,从而成为植被覆盖管理因子准确估算的主要障碍。

目前用于解决山地植被信息提取的方法有:对影像地形校正后计算植被指数、复合植被指数、地形调节植被指数和归一化差值山地植被指数(*NDMVI*)(吴志杰和徐涵秋,2011;吴志杰等,2016, 2017),其中归一化差值山地植被指数可有效提高山地植被信息提取的精度,该指数已被广泛应用于南方丘陵山区植被覆盖度的遥感估算(吴志杰等,2016,2017;陈学兄等,2020)。而这些植被指数多应用于植被覆盖度的提取,较少应用于水土流失监测与评价。本研究以 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 为遥感数据源,尝试将 *NDMVI* 应用于西南土石山区植被覆盖管理因子的提取,探讨改进的 RUSLE 模型在龙山县水土流失监测与评价中的应用,并对龙山县 2000 年和 2020 年土壤侵蚀进行估算,分析龙

山县土壤侵蚀空间分布特征,实现对龙山县土壤侵蚀动态变化的快速定量监测,旨在为今后以龙山县为代表的西南土石山区土壤侵蚀监测和治理、水土保持规划等提供科学依据。

1 研究区概况及数据获取

1.1 研究区概况

龙山县位于湘西土家族苗族自治州西北部,地处武陵山脉腹地,座落于湘、鄂、渝三省(市)交界处,地理坐标为 $109^{\circ}10' \sim 109^{\circ}53' E$, $28^{\circ}45' \sim 29^{\circ}30' N$ (图1)。全县地形以山地为主,地势北高南低,东陡西缓,海拔218.2~1736.5 m。龙山县属亚热带大陆性湿润季风气候,年平均温度 $15.7^{\circ}C$,极端最高温度 $41.8^{\circ}C$,极端最低温度 $-14^{\circ}C$,无霜期238~333天,年均降雨量1046.2~1740 mm。龙山县土壤主要由灰岩、白云岩、板页岩、河流冲积物(包括古河流和近代河流冲积物)、紫色砂页岩等富含矿物质营养元素的母质风化发育而成。

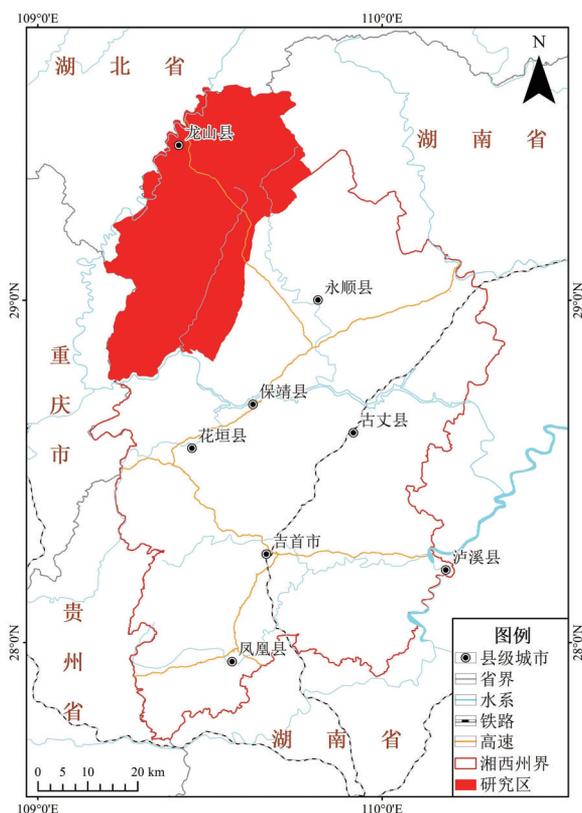


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据来源

研究区基础数据包括:来自美国地质调查局的2000年Landsat 5、2020年Landsat 8多光谱影像;数据来源于NASA EARTHDATA的数字高程模型ALOS DEM,空间分辨率为12.5 m;来自中国土壤数据库的研究区土壤类型矢量图;来源于Terra Climate的2000年和2020年研究区降雨数据,精度4 km;中国科学院资源环境科学与数据中心提供的研究区土地利用类型图。遥感数据预处理包括:对两期影像数据进行镶嵌、裁剪、正射校正和辐射校正处理,将影像数据各波段像元灰度值转换为表观反射率值。

2 研究方法

2.1 研究原理

2.1.1 山地植被指数(NDMVI)提取

吴志杰和徐涵秋(2011)提出一种归一化差值山地植被指数(NDMVI),该植被指数由NDVI变换而来,它不需要DEM的支持,仅依据植被光谱特征和遥感影像数据。该指数能有效减弱地形效应,可用于解决复杂地形对山地植被信息的影响问题。NDMVI的计算公式为:

$$NDMVI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red}) + (R_{min} - NIR_{min})}{(\rho_{nir} + \rho_{red}) - (R_{min} + NIR_{min})} \quad (1)$$

式中: ρ_{nir} 和 ρ_{red} 为近红外波段和红光波段的表观反射率; R_{min} 为红光波段表观反射率的最小值; NIR_{min} 为近红外波段表观反射率的最小值。为避免其取值的主观性以及不确定性,不剔除建成区、水体等信息。

2.1.2 土壤侵蚀模型RUSLE

采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)对研究区的土壤侵蚀进行定量评估,RUSLE模型可用如下公式表达:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

式中: A 为年土壤侵蚀模数,量纲为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; R 为降雨侵蚀力因子,量纲为 $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$; K 为土壤可蚀性因子,量纲为 $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$; LS 为坡长坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

2.2 RUSLE 模型因子计算

2.2.1 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力因子反映降雨对土壤的潜在剥蚀能力,是一项评估降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标(李晓松等,2011)。目前 R 的计算方法有很多种,本研究利用龙山县逐月降雨数据,计算研究区域降雨侵蚀力因子 R 值,计算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \{1.735 \times 10^{(1.5 \times \log_{10}(P_i^2/P) - 0.8188)}\} \quad (3)$$

式中: P_i 为各月降雨量,单位mm; P 为年降雨量,单位mm。

2.2.2 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性因子反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感程度,是评价土壤遭受侵蚀敏感程度的指标(高峰等,2014;陈正发等,2021)。本研究将收集到的龙山县土壤类型分布图按照制定的坐标位置匹配后,把这些土壤进行空间矢量化分类,并按照我国土壤分类标准(GB/T 17296-2009)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2009)将其分为以下土壤亚类:沼泽土、水稻土、石灰(岩)土、黄壤土、紫色土、黄棕壤土、红壤土。参考前人研究(梁音和史学正,1999;江莉佳,2015),根据研究区不同位置土壤物质的组成成分,对土壤类型的 K 值进行赋值(表1)。

表1 研究区不同土壤类型的 K 值

Table 1 K values of different soil types in the study area

土壤类型	沼泽土	水稻土	石灰(岩)土	黄壤土	紫色土	黄棕壤土	红壤土
K 值	0.21	0.253	0.294	0.244	0.33	0.225	0.25

2.2.3 坡长坡度因子(LS)

坡长坡度因子反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响,是降雨侵蚀动力的加速因子(邓辉等,2013)。坡度越大,土壤的重力势能越大,越容易被剥蚀;坡长越大,坡面水流沿程能量积累越大,土壤剥蚀量越大(付兴涛和张丽萍,2015)。本文利用12.5 m分辨率DEM,采用基于累积流量的单位汇水面积法计算 LS 值(Wischmeir and Smith, 1978),公式如下:

$$LS = \left(\text{FlowAccumulation} \times \frac{\text{CellSize}}{22.13} \right)^{0.5} \times \left(\frac{\sin(\text{Slope} \times 0.01745)}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (4)$$

2.2.4 植被覆盖管理因子(C)

植被覆盖管理因子反映植被对土壤侵蚀的消减作用,一般来说植被覆盖度越大,地表植被越多,土壤在植物根系的固定作用下越不易被剥蚀。 C 值的取值范围为0~1,值越小,表示植被对土壤侵蚀的抑制作用越大。本文采用蔡崇法等(2000)的方法,根据 $NDMVI$ 指数提取植被覆盖度,进而对 C 值进行估算。

(1)计算研究区植被覆盖度 FVC

$$FVC = \frac{(NDMVI - NDMVI_{\min})}{(NDMVI_{\max} - NDMVI_{\min})} \quad (5)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDMVI$ 为像元的地表植被指数; $NDMVI_{\min}$ 为全裸土地表的植被指数; $NDMVI_{\max}$ 为完全由植被覆盖地表的植被指数;取置信度为2%和98%所对应的 $NDMVI$ 值。

使用2000年11月Landsat5 TM、2020年11月的Landsat8 OLI表观反射率数据计算各期的 $NDMVI$ 和 $NDVI$,统计各期 $NDMVI$ 和 $NDVI$ 的最小值、最大值,分析植被指数变化的范围(表2),统计各期 $NDMVI$ 和 $NDVI$ 的频数、频率,分析植被指数各组数值频率频数变化(表3,图2)。

表2 研究区 $NDMVI$ 与 $NDVI$ 数值范围比较

Table 2 Comparison of $NDMVI$ and $NDVI$ numerical ranges in the study area

时间	指数	最小值	最大值	动态范围
2000年	$NDVI$	-0.6942	0.7494	1.4436
	$NDMVI$	-0.7595	0.9999	1.7594
	$NDMVI-NDVI$			0.3158
2020年	$NDVI$	-0.7651	0.7417	1.5068
	$NDMVI$	-0.8955	0.8189	1.7144
	$NDMVI-NDVI$			0.2076

表3 研究区NDMVI与NDVI数值频数频率比较

Table 3 Comparison of NDMVI and NDVI numerical frequency comparison in the study area

	NDVI分组	频数	频率		NDMVI分组	频数	频率
2000年 NDVI	[-1,-0.7)	8	0.00001	2000年 NDMVI	[-1,-0.7)	662	0.0002
	[-0.7,-0.3)	66253	0.0191		[-0.7,-0.3)	76474	0.0219
	[-0.3,0)	539547	0.1552		[-0.3,0)	194599	0.0559
	[0,0.3)	2682102	0.7714		[0,0.3)	1723098	0.4949
	[0.3,0.7)	188077	0.0541		[0.3,0.7)	1457257	0.4185
	[0.7,1]	929	0.0003		[0.7,1]	29880	0.0086
2020年 NDVI	[-1,-0.7)	41	0.00001	2020年 NDMVI	[-1,-0.7)	87	0.00001
	[-0.7,-0.3)	9566	0.0028		[-0.7,-0.3)	5702	0.0016
	[-0.3,0)	103122	0.0297		[-0.3,0)	19149	0.0055
	[0,0.3)	755372	0.2173		[0,0.3)	288400	0.0828
	[0.3,0.7)	2608600	0.7503		[0.3,0.7)	3048340	0.8755
	[0.7,1]	163	0.00004		[0.7,1]	120293	0.0345

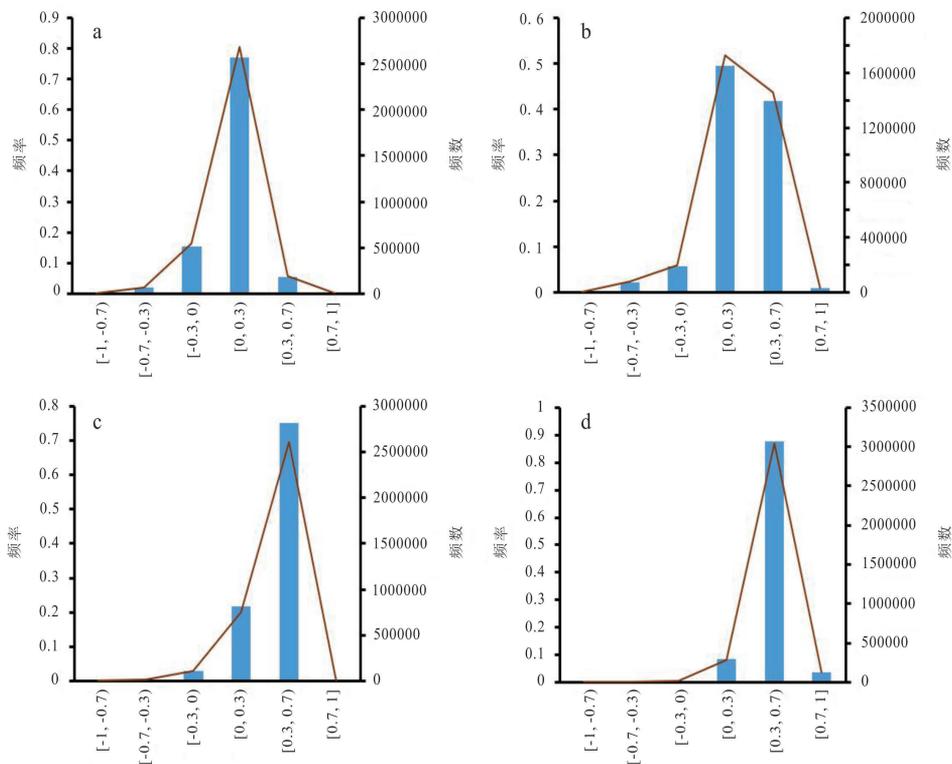


图2 研究区2020年、2022年NDMVI与NDVI频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of NDMVI and NDVI of 2020 and 2022 in the study area

a. 2000年NDVI频率分布图; b. 2000年NDMVI频率分布图; c. 2020年NDVI频率分布图; d. 2020年NDMVI频率分布图

由表2、表3及图2可以看出,NDMVI的数值及频率变化范围较NDVI更宽,在-1~1范围内,2000年的NDMVI数值范围较NDVI增加了0.3158,2020年的NDMVI数值范围较NDVI增加了0.2076,增加幅度均较大。2000年和2020年的NDVI在[-1,-0.7)

和[0.7,1]区间的频数,均小于2000年和2020年的NDMVI。这说明NDMVI区分地物的能力更强,具有较强地消除复杂地形影响的能力。因此,使用该指数计算植被覆盖度和植被覆盖管理因子C,比使用NDVI计算更为精确。

(2) 计算植被覆盖管理因子 C

$$C=0.6508-0.3436 \times \ln(FVC) \quad (7)$$

当植被覆盖度大于78.3%时,发生土壤侵蚀的概率很小, C 值取0;当植被覆盖度为0时,最易发生土壤侵蚀, C 值取1(蔡崇法等,2000)。研究区植被覆盖管理因子2000年平均值为0.59,标准差为0.31,2020年平均值为0.39,标准差为0.38。

为了验证 $NDMVI$ 提取 C 因子的科学性,利用2020年 Landsat 影像分别提取 $NDVI$ 和 $NDMVI$ 指数,并计算对应的 C 因子。通过影像对比,可以看出 $NDMVI$ 区分地物的能力要优于 $NDVI$,提取城镇用地、水体等地物的精度更高,尤其在地形起伏地区以及山坡的阴影地区,能更好地反演植被覆盖管理因子。

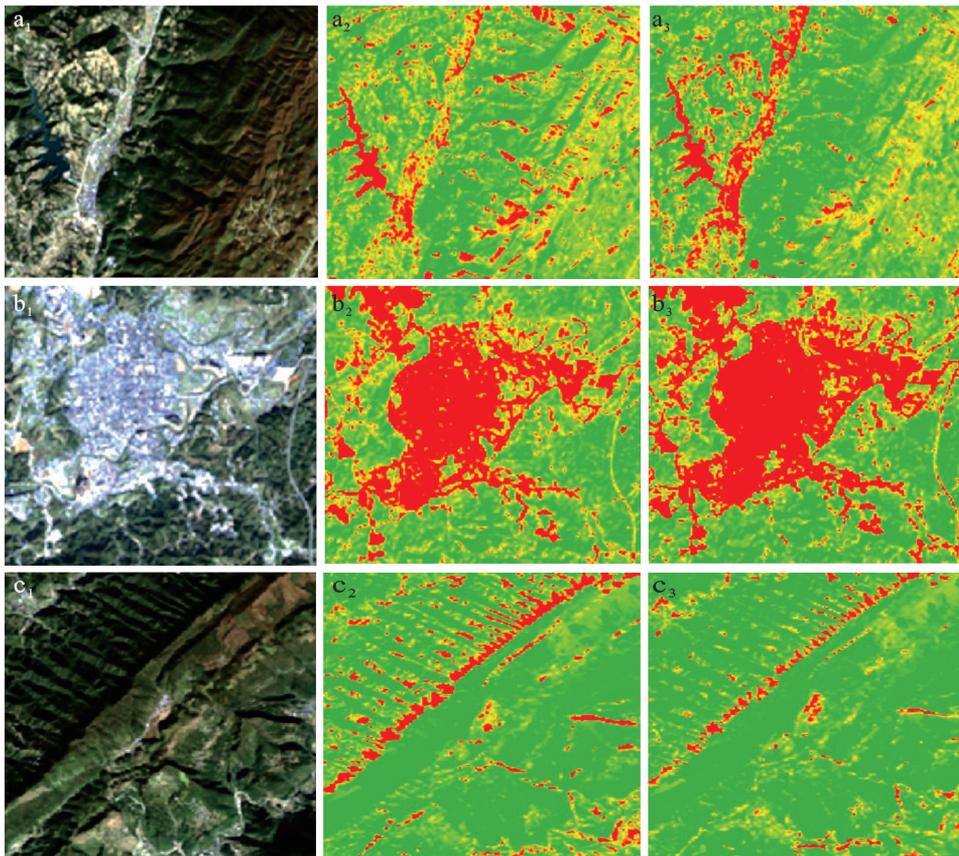


图3 基于 $NDVI$ 和 $NDMVI$ 提取的龙山县2020年 C 因子对比图

Fig. 3 Comparison chart of 2020 C -factor based on $NDVI$ and $NDMVI$ extraction in Longshan County

a_1, b_1, c_1 为龙山县局部2020年 Landsat 影像; a_2, b_2, c_2 为基于 $NDVI$ 提取的2020年 C 因子显示; a_3, b_3, c_3 为基于 $NDMVI$ 提取的2020年 C 因子显示
 C 值大小排序:红色>橙色>黄色>浅绿色>深绿色

2.2.5 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子反映水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用(杨冉冉等,2013;陈红等,2021)。 P 值的取值范围为0~1,值越小,表示水土保持能力越好,土壤越不易被侵蚀。已有研究中经常根据土地利用类型确定 P 值,本文参考已有的相关研究(江莉佳,2015),根据研究区土地利用/地表覆盖数据,确定研究区不同土地利用类型的 P 值(表4)。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀结果

将两期 RUSLE 模型各因子计算结果进行叠加计算,得到龙山县土壤侵蚀模数分布图,龙山县2000年平均土壤侵蚀模数为 $2116.18 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2020年平均土壤侵蚀模数为 $1275.84 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根

表4 研究区不同土地利用类型的P值选择

Table 4 P value selection of different land use types in the study area

土地利用	水田	旱地	水浇田	果园	茶园	其他园地
P值	0.01	0.5	0.2	0.4	0.7	0.6
土地利用	乔木林地	灌木林地	其他林地	天然牧草地	人工牧草地	其他草地
P值	1.0	1.0	0.7	0.2	0.9	0.9
土地利用	河流水面	水库/坑塘水面	内陆滩涂	沟渠	裸土地	城镇用地
P值	0	0	0	0	1	1

注:0表示完全不会发生土壤侵蚀的地区,1表示未采取任何水土保持措施的地区。

据我国《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)(中华人民共和国水利部,2007),龙山县属于西南土石山区,容许土壤侵蚀模数为 $500\text{ t}\cdot\text{km}^2\cdot\text{a}^{-1}$,其2000年平均土壤侵蚀模数属于轻度接近中度水平。按照该标准分类,得到龙山县两期各等级土壤侵蚀面积如表5所示,各等级土壤侵蚀空间分布如图4所示。

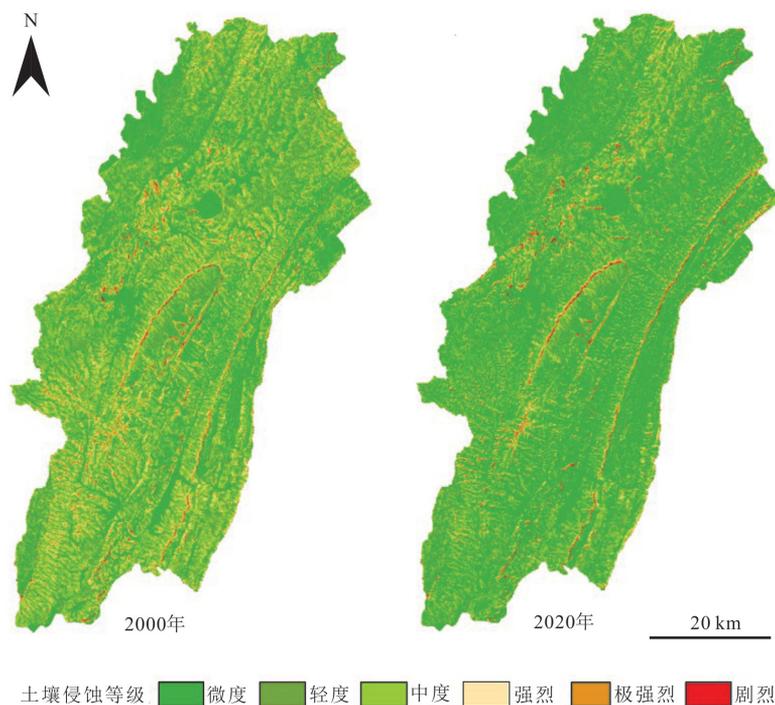


图4 龙山县2000年、2020年土壤侵蚀空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of soil erosion of Longshan County in 2000 and 2020

3.2 土壤侵蚀空间特征分析

西南土石山区的土壤侵蚀允许量为 $500\text{ t}\cdot\text{km}^2\cdot\text{a}^{-1}$,据此,龙山县2000年的土壤侵蚀面积为 1794.39 km^2 ,占比57.75%。2020年的土壤侵蚀面积为 1025.88 km^2 ,占比33.02%,相比于2000年减少了24.87%。其中,轻度、中度、强烈、极强烈侵蚀面积占比均比2000年有所下降。自1999年以来,龙山县通过退耕还

林、封山护林、坡改梯、实施节能工程等措施,治理水土流失(彭华,2006;江莉佳,2015;王海涛,2020),水土流失状况已得到很大改善。

从龙山县2000年、2020年土壤侵蚀空间分布(图4)来看,地形对土壤侵蚀具有显著的影响。坡度等级分级参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)(中华人民共和国水利部,2007)的土

壤水力侵蚀中对地面坡度分级标准,将龙山县水力侵蚀坡度分为 $[0^\circ, 5^\circ]$ 、 $(5^\circ, 8^\circ]$ 、 $(8^\circ, 15^\circ]$ 、 $(15^\circ, 25^\circ]$ 4类。龙山县地形以山地为主,2000年中度以上等级土壤侵蚀基本遍布整个区域,强烈及极强烈等级土壤侵蚀分布在水力侵蚀坡度在 $(8^\circ, 15^\circ]$ 的地区,剧烈侵蚀分布在水力侵蚀坡度在 $(15^\circ, 25^\circ]$ 的地

区。2020年中度、强烈及极强烈等级土壤侵蚀多发生坡度坡长较大的地区,即丘陵山壑地带,坡度为 $(8^\circ, 15^\circ]$ 。剧烈侵蚀土壤侵蚀区域在空间上呈条脉状分布,主要发生在山脚等陡坡附近,因为坡度较大,为 $(15^\circ, 25^\circ]$,加之降雨充沛,导致土壤侵蚀较为严重。

表5 龙山县2000年、2020年土壤侵蚀情况

Table 5 Soil erosion of Longshan County in 2000 and 2020

		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2000年	面积(km ²)	1312.84	785.97	581.82	286.65	129.11	10.84
	比率(%)	42.25	25.29	18.72	9.23	4.16	0.35
2020年	面积(km ²)	2081.34	465.52	296.86	157.30	92.01	14.19
	比率(%)	66.98	14.98	9.55	5.06	2.96	0.46

3.3 土壤侵蚀转移矩阵

引入转移矩阵(表6)对龙山县2000年、2020年土壤侵蚀的演变状况进行分析,结合表5进行分析可知:从2000年到2020年,研究区各等级间相互转换关系均相对显著;整个时段内,微度、轻度和剧烈侵蚀未发生改变的比例为89.98%、

51.53%和91.87%,均具有较高的稳定性;除微度侵蚀外,各类别从高强度向低强度侵蚀转换的比例分别为47.32%、57.31%、56.49%、0%和59.36%,这说明从2000年到2020年研究区土壤侵蚀得到有效的治理和保护,整体向良好的方向发展。

表6 龙山县2000年、2020年土壤侵蚀强度转移矩阵

Table 6 Soil erosion transfer matrix of Longshan County in 2000 and 2020

		2020年					
		极强烈	剧烈	强烈	中度	轻度	微度
2000年	强度						
	极强烈	62.49	3.98	5.44	24.86		57.20
	剧烈	0.63	7.09				
	强烈	9.44		115.29	11.77		150.15
	中度			10.08	238.29	15.81	317.65
	轻度				9.10	404.98	371.88
	微度	19.45	3.12	26.50	37.70	44.47	1181.34

4 结论

本文尝试基于NDMVI山地植被指数反演植被覆盖管理因子C,利用改进RUSLE模型对龙山县2000年、2020年土壤侵蚀的时空演变及发展规律进行分析,主要结论如下:

(1)利用2020年Landsat影像分别提取NDVI和NDMVI指数并反演植被覆盖管理C因子。通过

影像对比,可以看出NDMVI区分地物能力要优于NDVI,提取城镇用地、水体等地物的精度更高,尤其在地形起伏地区以及山坡的阴影地区,能更好地反演植被覆盖管理因子。验证了改进RUSLE模型在西南土石山区的适用性,其可作为西南土石山区水土流失监测的技术手段。

(2)通过空间分析和数理统计,得出龙山县2000年平均土壤侵蚀模数为 $2116.18 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,土壤侵蚀面积为 1794.39 km^2 ;2020年平均土壤侵蚀模数

为 $1275.84 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤侵蚀面积为 1025.88 km^2 。2020年相比2000年, 龙山县各等级侵蚀面积均发生较明显的变化, 微度侵蚀增长 768.5 km^2 , 轻度、中度、强烈、极强烈均呈不同程度的下降, 除微度外, 各类别高等级向低等级转换的比例分别为 47.32%、57.31%、56.49%、0%和 59.36%。龙山县土壤侵蚀得到有效的治理和保护, 整体向良好的方向发展。

参考文献:

- 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 2000. 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, 14(2): 19-24.
- 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 刘利昆. 2021. 基于 RUSLE 模型的涅水流域土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持学报, 35(4): 73-79.
- 陈红, 江旭聪, 任磊, 唐小倩, 肖新. 2021. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J]. 土壤通报, 52(1): 165-176.
- 陈学兄. 2013. 基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D]. 西北农林科技大学博士学位论文, 25-42.
- 陈学兄, 常庆瑞, 毕如田, 刘正春, 徐立帅, 张小军. 2020. 基于山地植被指数估算临县植被覆盖度[J]. 应用基础与工程科学学报, 28(2): 310-320.
- 陈正发, 龚爱民, 宁东卫, 张刘东, 王建雄, 相彪. 2021. 基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J]. 水土保持学报, 35(6): 7-14.
- 邓辉, 何政伟, 陈晔, 许辉熙, 蔡宏. 2013. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析——以四川泸定县为例[J]. 地球与环境, 41(6): 669-679.
- 付兴涛, 张丽萍. 2015. 坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 23(3): 474-483.
- 高峰, 华瑾, 卢远, 陶艳成. 2014. 基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估[J]. 水土保持研究, 21(1): 18-22+28.
- 高凡洁, 张富, 胡彦婷, 柴亚昕, 包炳琛, 蒋承洋. 2022. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的定西市安定区土壤侵蚀时空变化[J]. 甘肃农业大学学报, 57(1): 161-168.
- 江莉佳. 2015. 基于 RUSLE 模型的湘西石漠化地区土壤侵蚀研究——以龙山县为例[D]. 长沙: 中南林业科技大学硕士学位论文, 4-26.
- 李晓松, 吴炳方, 王浩, 张瑾. 2011. 区域尺度海河流域水土流失风险评估[J]. 遥感学报, 15(2): 372-387.
- 梁音, 史学正. 1999. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水土保持研究, 6(2): 47-52.
- 刘亚迪, 汪小钦, 江洪. 2015. 基于地形调节植被指数估算长汀县植被覆盖度[J]. 国土资源遥感, 27(1): 164-171.
- 罗杰, 刘绥华, 阮欧, 胡海涛. 2022. 运用 NDVI-Albedo 特征空间提取石漠化信息[J]. 测绘通报, (4): 56-60+82.
- 潘佑堂, 杨胜利. 1995. 武陵山区水土流失亟待治理[J]. 湖南水利, (1): 42-45.
- 彭华. 2006. 加快龙山生态建设步伐[J]. 湖南林业, (9): 5.
- 孙桂凯, 王国帅, 魏义熊, 赵荣娜, 莫崇勋, 杨云川. 2021. 基于改进遥感生态指数的岩溶山区生态质量评价[J]. 水土保持通报, 41(2): 230-239.
- 王丰, 刘金铜, 付同刚, 高会, 齐菲. 2022. 基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 7: 1064-1076.
- 王海涛. 2020. 湖南省近 20 年土壤侵蚀时空变化[D]. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 8-36.
- 吴兆清, 苏绍眉. 2004. 湖南“四水”中上游水土流失现状与治理对策[J]. 矿冶, 13(1): 91-94.
- 吴志杰, 何国金, 黄绍霖, 王猛猛, 林金堂. 2017. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. 遥感学报, 21(1): 159-167.
- 吴志杰, 何国金, 王猛猛, 傅娇凤, 邹丹. 2016. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算与时空变化研究: 以福建省永定县为例[J]. 遥感技术与应用, 31(6): 1201-1208.
- 吴志杰, 徐涵秋. 2011. 卫星影像数据构建山地植被指数与应用分析[J]. 地球信息科学学报, 13(5): 656-664.
- 杨冉冉, 徐涵秋, 林娜, 何慧, 曾宏达. 2013. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J]. 生态学报, 33(10): 2974-2982.
- 尹黎明, 袁志忠, 雷永康. 2012. 湘西土家族苗族自治州的水土流失及防治对策[J]. 中国水土保持, (1): 21-23.
- 张灿, 徐涵秋, 张好, 唐菲, 林中立. 2015. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J]. 自然资源学报, 30(6): 917-928.
- 张素, 熊东红, 吴汉, 袁勇, 李璇欣, 张闻多. 2021. 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, 35(5): 24-30.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2009. GB/T 17296-2009 中国土壤分类与代码[S].
- 中华人民共和国水利部. 2007. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].
- Jia K, Liang S L, Gu X F, Baret F, Wei X Q, Wang X X, Yao Y J, Yang L Q, Li Y W. 2016. Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data[J]. Remote Sensing of Environment, 177: 184-191.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. USA: Agriculture Handbook, 537.