

# 基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究 ——以贵州省为例

孙德亮<sup>1</sup>, 赵卫权<sup>2</sup>, 李威<sup>2,1</sup>, 吴建峰<sup>3</sup>, 杨振华<sup>4</sup>, 吕思思<sup>4</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院 GIS 应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 400047; 2. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550004; 3. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018; 4. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** [目的] 对贵州省土壤侵蚀进行快速定量研究, 为土壤侵蚀治理工作和土地利用决策提供科学依据。[方法] 在 GIS 技术的支持下, 利用日降雨量、土壤类型、土地利用、DEM、MODIS-NDVI 等数据, 结合 RUSLE 模型估算研究区土壤侵蚀量。[结果] 研究区的 2010 年年均土壤侵蚀模数为 880.81 t/(km<sup>2</sup>·a), 属轻度侵蚀。大部分区域主要以小于 500 t/(km<sup>2</sup>·a) 的微度侵蚀为主, 占研究区总面积的 59.60%。土壤侵蚀面积(轻度侵蚀以上)达 71 164.14 km<sup>2</sup>, 占总面积的 40.40%。强度以上土壤侵蚀面积达 10 431.60 km<sup>2</sup>, 占总面积的 5.91%, 主要分布在研究区西北部和东北部, 以及北部大娄山、武陵山、东南部苗岭以及西部乌蒙山等地势较高以及中东部乌江, 西南部北盘江等河流域。[结论] 林地、耕地和草地以及海拔在 600~1 600 m 之间的区域是今后水土流失防治的重点区域。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE; GIS; 贵州省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)03-0271-06

**中图分类号:** S157.1, TP79

**文献参数:** 孙德亮, 赵卫权, 李威, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 271-276. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.047

## Research on Soil Erosion in Karst Area Based on GIS and RUSLE Model —A Case Study in Guizhou Province

SUN Deliang<sup>1</sup>, ZHAO Wei-quan<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2,1</sup>, WU Jian-feng<sup>3</sup>, YANG Zhen-hua<sup>4</sup>, LYU Si-si<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of GIS Application, College of Geography Science, Chongqing Normal

University, Chongqing 400047, China; 2. Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of

Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. School of Geography and Tourism, Guizhou Education University,

Guiyang, Guizhou 550018, China; 4. Institute of Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** [Objective] A rapid and quantitative study has been done on soil erosion in Guizhou Province in order to provide scientific basis for the management of soil erosion and land use decision. [Methods] With the support of GIS technology and data on the rainfall, soil type, land use, DEM and MODIS-NDVI, we used RUSLE model to estimate of soil erosion. [Results] The annual average soil erosion modulus of the study area was 880.81 t/km<sup>2</sup>, which belongs to mild erosion. Most area belongs to the micro erosion with soil erosion modulus less than 500 t/(km<sup>2</sup>·a), which accounted for 59.60% of the total study area. Soil erosion area(above the mild erosion) reached 71 164.14 km<sup>2</sup>, which accounted for 40.40% of the total area. The area above strong erosion level was 10 431.60 km<sup>2</sup>, which accounted for 5.91% of the total area and mainly distributed in the northwest and northeast of the research area, and in the Northern Dalou Mountain, Wuling Mountain, Southeastern Miaoling Mountain and Western Wumeng Mountain with high altitude and middle east of Wujiang River, southwest of North Panjiang and other river basins. [Conclusion] Woodland, farmland, grassland and region between elevation of 600~1 600 m is the key area for soil and water conservation in the future.

**Keywords:** soil erosion; RUSLE; GIS; Guizhou Province

收稿日期: 2015-12-09

修回日期: 2016-01-18

资助项目: 2014 年度“西部之光”人才培养计划项目“基于 LUCC 的贵州赤水河流域生态风险监测与评估”

第一作者: 孙德亮(1976—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 主要从事资源环境遥感与 GIS 研究。E-mail: 892525771@qq.com.

通讯作者: 李威(1986—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事资源环境遥感与 GIS 研究。E-mail: liwei\_N70@126.com.

土壤侵蚀是地表土壤物质在风力、水力、重力和冻融等外力作用下发生土壤被剥离、破坏、搬运和沉积的过程<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来,全球土壤流失量不断增加,土壤侵蚀作为生态环境恶化最为重要的原因之一,是由诸多要素共同构成的复杂现象,其空间表现为土壤持续退化,土壤肥力下降、河流湖泊等水资源质量下降以及洪水灾害等,严重制约着生态环境、社会和经济的可持续发展<sup>[2-3]</sup>。中国是土壤侵蚀最为严重的国家之一,土壤侵蚀面积约为  $3.60 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占国土总面积的 37%<sup>[4]</sup>。土壤侵蚀的产生是地形、土壤、气候、植被覆盖等自然因素和土地开发方式等人为因素共同作用的结果,其中人类不合理的土地利用方式加剧土壤侵蚀的发生,如何定量地研究评价土壤侵蚀的空间分异规律,明确其发生强度,区域类型,对有效地实施水土保持工作和改善土地利用方式具有重要的科学参考价值。而传统的土壤侵蚀调查手段耗费周期长,费用高,并不适合大范围使用。近年来, GIS, RS 技术在土壤侵蚀研究中表现出便捷、快速、周期短等优势而被广泛应用,目前国内外发展了众多土壤侵蚀评价模型,主要有 USLE, RUSLE, LISEM 和 WEPP 等模型<sup>[5]</sup>,能够快速估算土壤侵蚀量以及空间分布,其中以 1997 年由 SCS(美国土壤水土保持局)提出的修正通用土壤流失方程 RUSLE 模型应用最为广泛<sup>[6]</sup>。国内外学者应用 RUSLE 模型开展了不同方面的研究,取得了一系列的研究成果,研究方式主要从定性研究逐渐转换为量化研究。但是大多数是基于平原或是河流流域地区,而对于地形条件较为复杂的喀斯特区域等易发生土壤侵蚀的区域研究比较少<sup>[7-8]</sup>。因此,本文以贵州省为研究区域。贵州省是中国水土流失问题最为严重的区域之一,区域内地形复杂,山多坡陡,地表崎岖破碎,是国内唯一没有平原支撑的省份,生态环境十分脆弱。在 GIS 技术支持下,根据 RUSLE 模型对贵州省土壤侵蚀进行快速的定量研究,以期对土壤侵蚀治理工作和土地利用决策提供科依据。

## 1 研究区概况

研究区地处中国西南部向四川盆地以及湖南、广西低山丘陵过渡的内陆斜坡地带,总面积  $176\ 167 \text{ km}^2$ ,地理位置在东经  $103^\circ 36' - 109^\circ 35'$ ,北纬  $24^\circ 37' - 29^\circ 13'$ ,东西相距  $595 \text{ km}$ ,南北长约  $509 \text{ km}$ ,自西北部向北、东、南三面倾斜,平均海拔约为  $1\ 100 \text{ m}$ ,大部分以山地为主,有少部分丘陵和盆地,属典型的高原山地地貌。东邻湖南,北接重庆和四川,南部与广西相邻,西部与云南接壤。辖 6 个地级市,3 个自治

州,共 88 个区县。全区年均温  $15 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,降水主要集中在 4—9 月,降水较多,雨季明显,阴天多,日照少,年均降水量在  $1\ 100 \text{ mm}$  左右,属于亚热带湿润季风气候,受到地形、气候因素的制约,降水、蒸发在空间分布上有较大差异。植被覆盖主要以常绿阔叶林、山地季雨林、热带沟谷季雨林,寒温性针叶林,暖性针叶林为主。土壤类型主要是水稻土、紫色土、石灰土、黄棕壤、黄壤等。区域内部水土流失、石漠化、泥石流等自然灾害极为严重,是中国水土流失问题最严重的省份之一。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本研究采用基础数据包括:研究区 1:5 万的数字高程模型(DEM);全区 26 个国家气象站点 1980—2010 年日均降雨数据,来源于中国气象数据共享服务网;2010 年研究区土地利用数据;2000—2010 年 MODIS 16 d 最大值合成 NDVI 数据,空间分辨率为  $250 \text{ m}$ ;1:100 万土壤类型图;联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(HASA)构建的  $1 \text{ km}$  分辨率世界土壤特征数据库(HWSD)。

### 2.2 土壤侵蚀模型

本研究采用美国土壤水土保持局提出的修正土壤流失方程 RUSLE 模型进行模拟研究,方程表达程式为:

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

式中: $A$ ——年均土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$ ——降雨侵蚀因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$ ——土壤可侵蚀因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)]$ ;  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $C$ ——耕作管理植被覆盖因子;  $P$ ——水土保持措施因子。

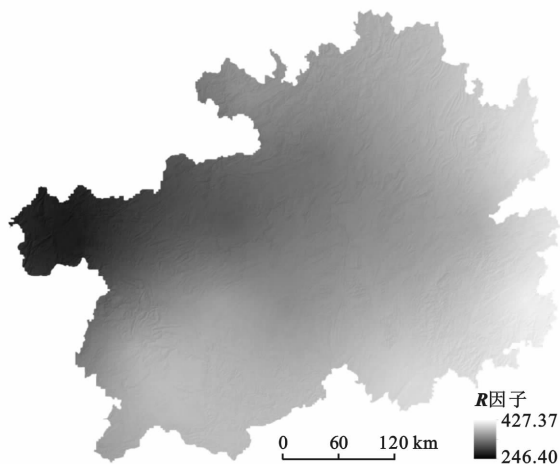
2.2.1 降雨侵蚀力  $R$  因子获取 降雨是导致土壤侵蚀发生最为重要的因子之一,它表示降水对土壤的侵蚀能力大小,其时空分布在一定程度上决定了土壤侵蚀的空间分布规律。目前众多国内外相关学者提出了多种基于月平均降雨量计算  $R$  的简易公式<sup>[9-12]</sup>,由于研究区地表破碎且降水相对较为集中,水蚀作用强烈,鉴于数据资料有限,本研究采用周伏建等<sup>[13]</sup>提出的适合中国南方地区的简易计算公式计算降雨侵蚀力  $R$ 。

$$R = \sum_{i=1}^{12} (0.3406P_i - 2.6398) \quad (2)$$

式中: $R$ ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $P_i$ ——研究区多年 1—12 月平均降雨量( $\text{mm}$ )。运用 ArcGIS 空间插值功能对研究区 26 个国家气象站

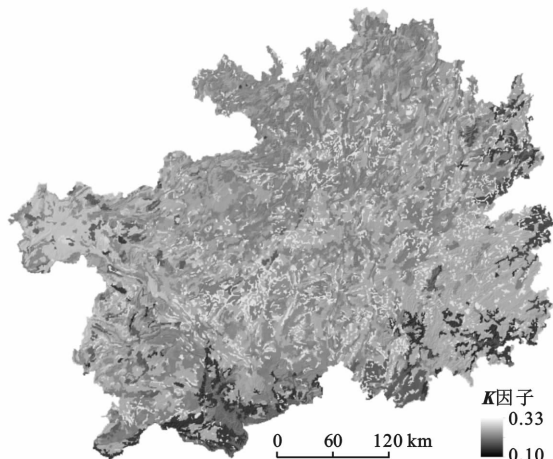
点降雨数据使用克里金法进行插值处理,叠加计算后得到降雨侵蚀力因子  $R$  值空间分布(图 1),研究区多年平均降雨侵蚀力在 246.40~427.37 之间。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 14^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (14^\circ \leq \theta) \end{cases} \quad (4)$$



注:  $R$  因子单位为  $[MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)]$ 。

图 1 研究区降雨侵蚀力  $R$  因子



注:  $K$  因子单位为  $[t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$ 。

图 2 研究区土壤可侵蚀  $K$  因子

2.2.2 土壤可侵蚀性  $K$  因子获取 土壤可侵蚀性是指土壤抵抗降雨、径流和径流侵蚀能力的大小或土壤受侵蚀的潜在可能性。土壤可侵蚀( $K$ )值越大,土壤受侵蚀的可能性越大,反之越小,是影响土壤流失的内部原因。与土壤内部结构,坡面渗透性以及土壤有机质含量密切相关<sup>[14-15]</sup>。本研究通过联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(HASA)构建的世界土壤数据库(HWSD)和研究区土壤类型图计算土壤可侵蚀( $K$ )值,采用 EPIC 模型公式计算  $K$  值<sup>[16]</sup>,公式如下

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256SAN(1 - \frac{SIL}{100})]\} \times (\frac{SIL}{CAL + SIL})^{0.3} \times [1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}] \times [1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.9SN - 5.51)}] \quad (3)$$

式中:  $SAN$ ——土壤砂粒含量(%);  $SIL$ ——土壤粉粒含量(%);  $CAL$ ——土壤黏粒含量(%);  $C$ ——有机碳含量(%)。通过 HWSD 土壤数据库提取相应土壤类型的  $SAN, SIL, CAL$  和  $C$  含量,计算出研究区  $K$  值分布图(图 2)。

2.2.3 坡长坡度因子  $LS$  获取 坡长坡度因子是影响土壤侵蚀的基本地形因素,而在现实中对于大尺度区域测量坡长坡度是不可行的。本研究采用研究区 1:5 万 DEM 数据提取坡长坡度因子,由于研究区坡度大于  $15^\circ$  区域面积超过研究区总面积的 50.70%,因此通用土壤流失方程中坡度  $S$  因子计算公式并不适用,本文借鉴刘宝元等<sup>[17]</sup>对坡度因子分段计算修正公式。

坡长因子计算公式采用 Wischmeier W H 等<sup>[18]</sup>提出的坡面每一坡段的  $L$  因子算法;

$$L = (\lambda / 22.13)^\alpha \quad (5)$$

式中:  $\lambda$ ——为特定的集水面积( $m^2$ ),用 flowaccumulation(累计流量)乘以栅格边长(cellsize)估算; 22.13——标准小区的坡长(m);  $\alpha$ ——坡长因子指数,参照 Mocolool 等<sup>[19]</sup>对坡度因子的算法;

$$\alpha = \beta / (\beta + 1) \quad (6)$$

$$\beta = (\sin\theta / 0.0896) / (3.0 \sin^{0.8}\theta + 0.56)$$

式中:  $\alpha$ ——坡长因子指数;  $\theta$ ——坡度( $^\circ$ )。结果如图 3 所示。

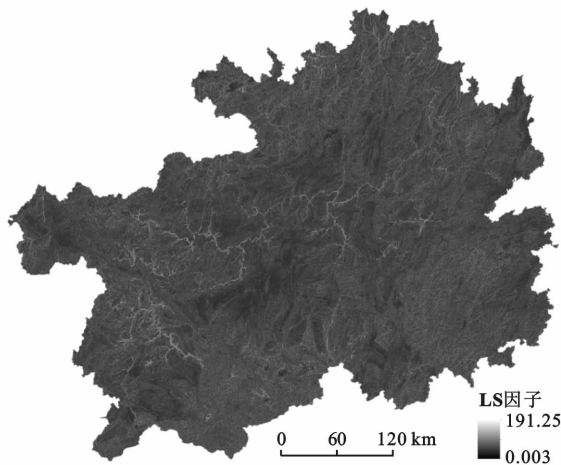


图 3 研究区坡长坡度  $LS$  因子

2.2.4 耕作管理植被覆盖  $C$  因子获取  $C$  因子表示地表植被或作物以及管理措施对土壤侵蚀的影响,研究表明,不同区域的土壤侵蚀差异中地表覆盖对侵蚀量的影响最大<sup>[20]</sup>。以研究区 MODIS NDVI 为数据

基础计算植被覆盖度和蔡崇法等<sup>[21]</sup>研究算法计算  $C$  因子(图 4):

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} 1 & (f = 0\%) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & (0 < f < 78.3\%) \\ 0 & (78.3\% \leq f) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f$ ——研究区植被覆盖度(%);  $\text{NDVI}_{\min}$ ,  $\text{NDVI}_{\max}$ ——研究区归一化植被指数的最小值和最大值;  $C$ ——耕作管理植被覆盖因子。

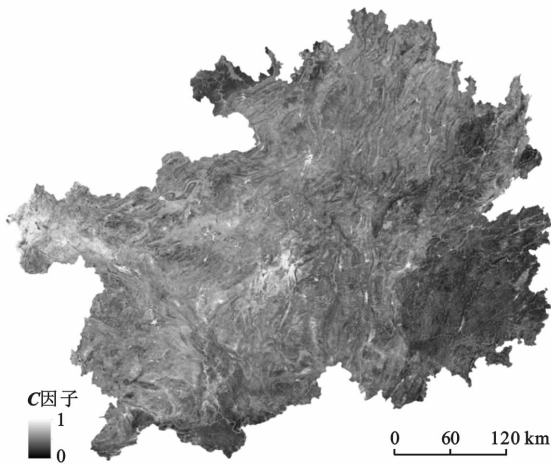


图 4 研究区耕作管理植被覆盖  $C$  因子

2.2.5 水土保持实施因子  $P$  获取 采取水土保持措施后,研究区土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量比值为水土保持实施因子,其值介于 0~1,0 表示不会发生水土流失的区域,1 表示未采取水土保持措施的区域。分析研究区地形特点、种植特点和植被覆盖的前提下,结合土地利用类型图和植被覆盖图以及陈思旭、游松财等研究成果<sup>[22-23]</sup>,确定研究区水土保持实施因子  $p$  值(图 5,表 1)。

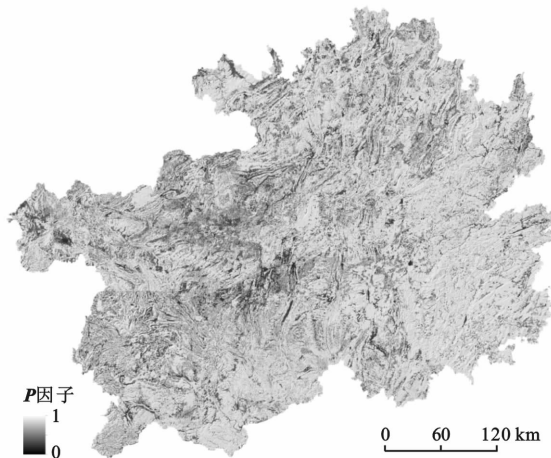


图 5 研究区水土保持实施  $P$  因子

表 1 研究区不同土地利用类型及其不同植被盖度下  $p$  值

用地类型	$p$ 值	旱地	
		坡度/(°)	$p$ 值
林地(有林地、灌木林、疏林地)	1.00	<5°	0.10
草地	1.00	5°~10°	0.22
未利用地	1.00	10°~15°	0.31
其他林地	0.70	15°~20°	0.58
水田	0.15	20°~25°	0.71
水域、建设用地	0.00	>25°	0.80

2.2.6 土壤侵蚀量计算 在 GIS 强大的空间分析运算功能的支持下,将各个因子转换为 50 m 大小的栅格,根据 RUSLE 方程将各个因子进行乘积运算,并按照国家水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96)土壤侵蚀强度分级标准,进行重新分类,根据土壤侵蚀的成因,将侵蚀量在同一等级的象元进行合并,分为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀 6 个等级,得到研究区土壤侵蚀强度图(附图 13)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀总体特征

土壤侵蚀度在一定程度上是土壤侵蚀实际强度与潜在风险的综合,是当前土壤侵蚀现状的表征,研究区土壤侵蚀强度由西部—中部—东部呈现逐渐减少—增强的趋势。从空间上看,研究区土壤侵蚀面积(轻度侵蚀以上)达 71 164.14 km<sup>2</sup>,占总面积的 40.40%。土壤侵蚀呈现块状和条带状分布的特征,整体上较为严重的区域主要分布在研究区西部,西北部和东北部,以及北部大娄山,武陵山、东南部苗岭以及西部乌蒙山等海拔地势较高以及中东部乌江,西南部北盘江等河流域,主要的原因是这些区域地形破碎度大,水力冲刷较为严重,造成侵蚀程度最严重。而中部贵阳市境内大部分区域属微度、轻度侵蚀,究其原因,主要是该区域地处黔中经济区,属经济发达地带,地势相对较为平坦,耕地开垦和耕作加强等水土流失综合治理效益良好。就各个区县而言,望谟、晴隆、桐梓、德江等区县较为严重。对研究区土壤侵蚀量图和侵蚀等级图的象元统计如表 2 所示,结果表明,研究区的 2010 年年均土壤侵蚀模数为 880.81 t/(km<sup>2</sup>·a),总体属于轻度侵蚀,大部分区域土壤侵蚀主要以小于 500 t/(km<sup>2</sup>·a)的微度侵蚀为主,占研究区总面积的 59.60%,其次是轻度侵蚀和中度侵蚀,面积比例分别为 26.98%和 7.50%,极强烈侵蚀和剧烈侵蚀相对较少,面积比例均在 2%以下。

表 2 研究区土壤侵蚀强度面积

侵蚀等级	侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
微度	<500	105 002.90	59.60
轻度	500~2 500	47 530.28	26.98
中度	2 500~5 000	13 220.26	7.50
强烈	5 000~8 000	5 557.74	3.15
极强烈	8 000~15 000	2 287.86	1.30
剧烈	>15 000	2 568.00	1.46

### 3.2 不同土地利用类型下土壤侵蚀特征

运用 ArcGIS 空间分析功能,结合研究区土地利用图分别统计不同类型土地利用状况下土壤侵蚀状况,得到研究区各种土地利用类型中各土壤侵蚀等级面积的统计情况(表 3)。

从表 3 中可以看出,不同类型土地利用类型发生

土壤侵蚀的差异较大。整个研究区面积最大的土地利用类型是林地,占到研究区国土面积的 53.3%,其次是耕地,占总面积的 24.17%,其他土地利用合计仅占总面积的 22.53%。从侵蚀面积上看,土地利用类型的面积大小与土壤侵蚀面积大小呈现明显的正相关关系,其中林地和草地的土壤侵蚀面积(轻度侵蚀以上)较大,分别占土壤侵蚀总量的 61.58%,24.32%,耕地次之,占侵蚀总量的 12.84%,其他土地利用类型发生土壤侵蚀量相对较少,总共占侵蚀总量的 1.26%。

结果显示林地、耕地和草地是今后区域防止水土流失的重点区域。应当加强耕地耕作管理方式,选择合理的耕作措施,合理配置林地、草地空间分布,积极实施“退耕还林、退耕还草”政策。

表 3 研究区不同土地利用类型下土壤侵蚀状况

类别	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	侵蚀面积 km <sup>2</sup>
草地	10 944.63	3 083.371	1 277.96	961.35	1 039.98	17 307.29
耕地	6 668.16	1 174.46	456.70	359.17	478.42	9 136.91
林地	29 687.53	8 788.19	3 657.80	803.33	883.11	43 819.96
建设用地	48.82	41.50	40.46	40.29	40.52	211.59
裸岩	40.73	40.10	39.94	39.92	39.91	200.60
其他用地	90.18	49.15	43.06	42.14	42.67	267.20
水域及水利用地	50.23	43.49	41.82	41.66	43.39	220.59
总计	47 530.28	13 220.26	5 557.74	2 287.86	2 568.00	71 164.14

### 3.3 不同高程下土壤侵蚀特征

将研究区土壤侵蚀强度图与地形图进行叠加分析,统计不同高程下的土壤侵蚀状况(如表 4 所示)。

从表 4 中可以看出,研究区高程主要集中在 600~1 600 m 间,面积占总面积的 76.66%,从土壤侵蚀状况看,土壤侵蚀主要发生在高程 600~1 100 和 1 100~1 600 m 区间内,侵蚀面积(轻度侵蚀以上)分别为 34 471.30,20 506.96 km<sup>2</sup>,分别占侵蚀总量的

48.43%,28.82%。其他高程区域土壤侵蚀面积仅占侵蚀总量的 22.75%。

随着高程的增加土壤侵蚀强度呈现先增加然后减少的趋势,结果显示高程低于 1 600 m 的区域是土壤侵蚀发生主要区域。这也是人类活动最为频繁的区域,大量的辟林放牧,毁林开荒,城市建设等人类活动造成土壤侵蚀较为严重,土壤侵蚀量较大,是今后重点治理的区域。

表 4 研究区不同高程下土壤侵蚀状况

高程/m	轻度侵蚀/km <sup>2</sup>	中度侵蚀/km <sup>2</sup>	强度侵蚀/km <sup>2</sup>	极强度侵蚀/km <sup>2</sup>	剧烈侵蚀/km <sup>2</sup>	侵蚀面积/km <sup>2</sup>
200~600	4 749.90	1 481.54	685.37	311.38	453.24	7 681.43
600~1 100	22 383.29	6 683.28	2 889.84	1 199.45	1 315.44	34 471.30
1 100~1 600	14 290.86	3 628.87	1 435.81	564.28	587.14	20 506.96
1 600~2 100	4 648.50	1 135.73	442.15	173.53	181.04	6 580.95
>2 100	1 457.74	290.84	104.58	39.22	31.15	1 923.53
合计	47 530.28	13 220.26	5 557.74	2 287.86	2 568.00	71 164.14

### 3.4 不同坡度下土壤侵蚀特征

将土壤侵蚀强度图与坡度图进行叠加分析,按照

水利部土壤侵蚀分类分级标准将坡度划分,统计不同坡度下的土壤侵蚀状况(如表 5 所示)。

表 5 研究区不同坡度下土壤侵蚀状况

坡度/(°)	轻度侵蚀/km <sup>2</sup>	中度侵蚀/km <sup>2</sup>	强度侵蚀/km <sup>2</sup>	极强度侵蚀/km <sup>2</sup>	剧烈侵蚀/km <sup>2</sup>	侵蚀面积/km <sup>2</sup>
<8°	4 664.56	836.29	367.84	175.97	274.39	6 319.05
8°~15°	12 730.86	2 439.40	986.96	436.08	561.66	17 154.96
15°~25°	18 855.73	5 294.14	2 067.18	835.88	915.18	27 968.11
25°~35°	8 375.10	3 283.01	1 426.89	544.81	533.03	14 162.84
35°~45°	2 336.29	1 059.93	535.38	217.19	204.08	4 352.87
>45°	567.74	307.49	173.49	77.93	79.66	1 206.31
合计	47 530.28	13 220.26	5 557.74	2 287.86	2 568.00	71 164.14

从整体上看,坡度是影响土壤侵蚀的最为主要的地形因子,与研究区土壤侵蚀量呈现明显的正相关,在不同的坡度等级土壤侵蚀中,轻度侵蚀占相应坡度等级侵蚀总量的 53% 以上,而极强度以上侵蚀面积占相应坡度等级侵蚀总量 13% 以下。可见全区主要以轻度侵蚀为主。整个研究区坡度在 8°~35° 的国土面积占到总面积的 75% 以上,这区间内随着坡度的增大各强度侵蚀级别面积增加,侵蚀面积占到整个侵蚀总量的 83.31%。研究区在 15°~25° 土壤侵蚀最为严重,其次是 8°~15°,25°~35°,侵蚀面积分别占侵蚀总量的 39.30%,24.11%,19.90%,可见坡度在 8°~35° 范围的区域是今后区域防止水土流失的重点区域。

## 4 讨论与结论

(1) 研究区土壤侵蚀空间分布趋势整体上是研究区内部向外部成扩散增强。其中以苗岭、乌蒙山、大楼山,武陵山以及乌江流域、北盘江流域的土壤侵蚀较强,贵阳,遵义南部地区较弱,全年土壤侵蚀模数为 880.81 t/km<sup>2</sup>,属于微度侵蚀。全区土壤侵蚀面积(轻度侵蚀以上)达到 71 164.14 km<sup>2</sup>。主要以轻度侵蚀为主,轻度侵蚀面积占到土壤侵蚀总量的 66.79%。

(2) 研究区由于其特殊的地质地貌环境造成土壤侵蚀空间分布差异较大,地形、高程海拔的变化和土地利用方式是造成这种差异的首要因素。从土地利用上看,林地、耕地和草地是土壤侵蚀较为严重的区域。从高程上看,海拔低于 1 600 m 的区域是土壤侵蚀发生主要地区,这些区域是今后水土流失防治的重点地带。

本研究仍存在一定的不足,主要是在利用 RSULE 模型计算各个因子过程中,由于各因子数据的精度不一,且气象站点只考虑了研究区内国家降雨量站点,造成计算降雨侵蚀力存在一定的误差,如何提高数据精度以及结果的野外调查验证是下一步要研究的重要内容。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王全九,邵明安,郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 张喜旺,周月敏,李晓松,等. 土壤侵蚀评价遥感研究进展[J]. 土壤通报,2010,41(4):1010-1017.
- [3] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [4] 李智广,曹炜,刘秉正,等. 我国水土流失状况与发展趋势研究[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.
- [5] 赵文武,傅伯杰,吕一河,等. 多尺度土地利用与土壤侵蚀[J]. 地理科学进展,2006,25(1):24-33.
- [6] 林晨,周生路,吴绍华. 30 年来东南红壤丘陵区土壤侵蚀度时空演变研究[J]. 地理科学,2011(10):1235-1241.
- [7] 水建国,叶元林,王建红,等. 中国红壤丘陵区水土流失规律与土壤允许侵蚀量的研究[J]. 中国农业科学,2003,36(2):179-183.
- [8] 梁音,张斌,潘贤章,等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.
- [9] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报,1992,6(4):1-5.
- [10] 王万中,张宪奎. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(D)[J]. 水土保持学报,1995,9(4):7-18.
- [11] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. Journal of Hydrology, 1994,157(1):287-306.
- [12] 崔晓燕,查轩,黄少燕. 1980-2009 年闽东南地区降雨侵蚀力的时空分布特征[J]. 水土保持通报,2015,35(1):1-5.
- [13] 周伏建,黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [14] 陈明华,黄炎和. 土壤可蚀性因子的研究[J]. 水土保持学报,1995,9(1):19-24.
- [15] 李雪莹,杨俊,温海明,等. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀量估算:以辽宁省阜新市为例[J]. 水土保持通报,2015,35(1):199-205.
- [16] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator (1): Model documentation[J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4):206-207.

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等.土壤侵蚀预报模型研究进展[J].水土保持通报,2001,21(6):16-18.
- [2] 高燕,王晓欣,鞠哗,等.东北黑土区土壤侵蚀模型研究现状与展望[J].东北水利水电,2010,28(12):16-17.
- [3] 韩晓燕,钱鞠,王磊,等.黄土高原土壤侵蚀(水蚀)多尺度过程与水土保持研究进展[J].冰川冻土,2012,34(6):1487-1498.
- [4] 田国行,杨晓明,杨春.高速公路边坡土壤侵蚀研究进展[J].中外公路,2008,28(6):21-28.
- [5] 刘娜,王克林,张伟,等.土壤侵蚀及其评价、检验方法研究进展[J].中国农学通报,2011,27(18):1-6.
- [6] 文江苏,何小武.国外土壤侵蚀模型发展研究[J].宁夏农林科技,2012,53(4):92-93.
- [7] 赵文武,傅伯杰,郭旭东.多尺度土壤侵蚀评价指数的技术与方法.地理科学进展,2008,27(2):47-52.
- [8] 张蕴潇,孙紫英.基于 3S 技术内蒙古水土保持土壤侵蚀模型建立及参数提取[J].内蒙古农业大学学报,2012,33(4):108-112.
- [9] 陈旭东,程先福,鲍伟伟,等.基于 ArcObjc 的土壤侵蚀模型的设计与实现[J].水土保持研究,2010,17(6):26-31.
- [10] 袁再建.基于 CIS 的分布式侵蚀产沙模型及其空间尺度转换研究进展[J].中国农学通报,2012,28(9):293-296.
- [11] 张喜旺,周月敏,李晓松,等.土壤侵蚀评价遥感研究进展[J].土壤通报,2010,41(4):1010-1017.
- [12] 杨子生.云南省金沙江流域土壤侵蚀流失方程研究[J].山地学报,2002,20(S):1-9.
- [13] 许月卿,邵晓梅.基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州省猫跳河流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(4):467-71.
- [14] 虎雄岗,谈树成,金艳珠,等.基于地形高程的云南省降雨量空间插值方法研究[J].热带地理,2012,32(4):370-377.
- [15] 彭建,李丹丹,张玉清.基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析:以云南省丽江县为例[J].山地学报,2007,25(5):548-556.
- [16] 邓良基,侯大斌,王昌全,等.四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J].中国水土保持,2003,23(7):29-48.
- [17] 林斌.基于 RS 与 GIS 的定西市安定区土壤侵蚀因子提取与侵蚀强度定量评价研究[D].兰州:甘肃农业大学,2011.
- [18] 刘宝元,谢云,张科礼,等.土壤侵蚀预报模型[M].北京:科学技术出版社,2001.
- [19] 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.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Prediction rainfall erosion losses: A guide to conservation planning science [M]. Washington D C: U. S. Department of Agriculture, Handbook 537,1978.
- [21] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (USA), 1987, 30(5):1387-1396.
- [22] 赵磊,袁国林,张琰,等.基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [23] 蔡崇法,丁树文.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.
- [24] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. Resources Science, 2014, 36(6):1288-1297.
- [25] 游松财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算:以江西省泰和县灌溪乡为例[J].自然资源学报,1999,14(1):62-68.

(上接第 276 页)