

基于 RUSLE 的蔗区小流域土壤侵蚀特征研究

刘小梅¹, 李勇¹, 黄智刚¹, 邓羽松², 郭豪¹, 何卿姮¹

(1.广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2.广西大学林学院, 广西南宁 530004)

摘要: [目的] 探讨广西壮族自治区典型赤红壤集约化蔗区小流域的土壤侵蚀状况, 以及土壤侵蚀强度与不同坡度、土地利用类型的关系, 为广西集约化蔗区小流域防治土壤侵蚀提供科学参考。[方法] 在 GIS 空间分析技术支持下, 利用修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)对其进行定量估算。[结果] ①那辣小流域坡度在 0°~35°之间, 坡耕地(甘蔗)、林地(桉树)分别占土地利用总面积的 82.85%, 10.99%, 道路和沟渠共占 6.16%。2020 年流域平均土壤侵蚀速率为 22.97 t/(hm²·a), 属轻度侵蚀水平, 是水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 5 t/(hm²·a)的 4.6 倍; ②流域土壤侵蚀主要发生在 5°~25°的坡度范围内, 是预防和治理水土流失的重点区域; ③不同土地利用类型中, 平均侵蚀速率最大的是林地(桉树), 为 53.59 t/(hm²·a), 分别是坡耕地(甘蔗)、道路、沟渠的 2.84, 2.12, 27.91 倍。[结论] 应用 RUSLE 模型通过借助软件输入相关参数和处理数据, 即可估算出蔗区土壤侵蚀及不同坡度、土地利用类型的土壤侵蚀强度分布特征, 应合理规划并利用管理好流域的坡耕地(甘蔗)、林地(桉树)、道路等土地利用类型, 采取具有针对性的、有效的水土保持措施。

关键词: GIS; RUSLE 模型; 土壤侵蚀; 蔗区; 小流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0082-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 刘小梅, 李勇, 黄智刚, 等. 基于 RUSLE 的蔗区小流域土壤侵蚀特征研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 82-88. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220310.001; Liu Xiaomei, Li Yong, Huang Zhigang, et al. Soil erosion characteristics of sugarcane-growing watershed based on RUSLE [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 82-88.

Soil Erosion Characteristics of Sugarcane-Growing Watershed Based on RUSLE

Liu Xiaomei¹, Li Yong¹, Huang Zhigang¹, Deng Yusong², Guo Hao¹, He Qingheng¹

(1.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2.College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The soil erosion status and the relationships between soil erosion intensity and different slope and land use types in a small watershed of an intensive sugarcane-growing area with a typical lateritic soil were investigated in order to provide a theoretical reference for soil erosion control in this area of the Guangxi Zhuang Autonomous Region. [Methods] With the support of GIS spatial analysis technology, the revised universal soil loss equation (RUSLE) was used to quantitatively estimate soil loss. [Results] ① The Nala watershed slope ranged between 0° and 35°, and the slope farmland (sugarcane) and forest land (eucalyptus) accounted for 82.85% and 10.99%, respectively, of the total land use area, while roads and channels accounted for 6.16%. The average soil erosion rate of the Nala watershed in 2020 was 22.97 t/(ha·yr) (classified as mild erosion), and this rate was 4.6 times of the allowable soil loss rate of 5 t/(ha·yr) stipulated by the ministry of Water Resources for the southern red soil hilly region. ② Soil erosion mainly occurred on slopes ranging from 5° to 25°, and areas with slopes in this range were the key areas to target for the prevention and control of soil erosion. ③ Among different land use types, the average erosion rate of forest land

收稿日期: 2021-10-24

修回日期: 2022-01-06

资助项目: 广西科技重大专项“集约化农区面源污染综合防控体系与示范”项目(桂科 AA17204078); 广西科技基地和人才专项“流域农业面源污染的 FRN-CSSI 联合溯源示踪新技术”(桂科 AD17195098)

第一作者: 刘小梅(1994—), 女(汉族), 广西壮族自治区浦北县人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: 2668704307@qq.com。

通信作者: 李勇(1958—), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 博士生导师, 教授, 主要从事农业面源污染追因与防控研究。Email: liyong@caas.cn。

(eucalyptus) was 53.59 t/(ha · yr), which was 2.84, 2.12, and 27.91 times of the erosion rate of slope farmland (sugarcane), roads, and channels, respectively. [Conclusion] The RUSLE model can be used to estimate soil erosion and soil erosion intensity distribution characteristics of different slopes and land use types in sugarcane-growing areas by inputting relevant parameters and processing data with software. Land use types such as slope farmland (sugarcane), forest land (eucalyptus), and roads should be properly planned and managed so as to take targeted and effective soil and water conservation measures.

Keywords: GIS; RUSLE model; soil erosion; sugarcane growing area; small watershed

甘蔗作为中国重要的糖料作物,据统计,中国的甘蔗种植面积在全球排名第三位,约占6.05%。而中国70%的甘蔗种植在坡耕地上^[1]。广西壮族自治区(以下简称“广西”)是中国最重要的甘蔗生产基地,2020年,甘蔗种植面积和产量分别占全国约65%,70%^[2]。广西甘蔗种植区多为山地丘陵地貌,大部分为坡耕地且种植甘蔗,小部分坡度大的坡顶为林地且多种植桉树,其余土地利用类型较少。调查表明,甘蔗生长周期长,主要种植于土层较薄的赤红壤和红壤的旱作坡耕地上,岩性抗侵蚀性弱,由于对蔗糖需求增加,甘蔗种植扩张到坡度较大的山坡地,甘蔗生长前期植被覆盖度较小,加上降雨集中且多暴雨,而甘蔗为剑形叶片,大部分降雨穿透植株直接击打土壤表面,且顺坡种植等不合理的耕作方式,易引发严重的土壤侵蚀。但目前有关蔗区土壤侵蚀特征,侵蚀速率等方面数据不够明晰,有必要进一步探究,为蔗区土壤侵蚀防治提供依据。

目前,研究土壤侵蚀的方法有人工模拟降雨法、径流小区观测法、核素示踪法和侵蚀针法等。付兴涛等^[3]采用人工模拟降雨法,研究了南方红壤丘陵区作物覆盖坡耕地上不同雨强下坡长对其土壤侵蚀的影响。Hartanto等^[4]在印度尼西亚加里曼丹中部的森林集水区设置径流小区,发现影响土壤侵蚀的重要生态因子包括冠层盖度、幼树密度、凋落物深度和木本碎屑,但降雨对径流大小和土壤侵蚀量影响更大。Rabesiranana等^[5]运用放射性同位素¹³⁷Cs和²¹⁰Pb估算马达加斯加土壤侵蚀速率为18 t/(hm² · a),比当地农业气候条件下的可持续土壤流失率高出两倍。赵珩钰等^[6]利用侵蚀针法,探究了黄土丘陵沟壑区小流域退耕地不同植被恢复条件下多种不同植物群落的土壤侵蚀特征。但这些方法需要投入大量资金、时间和人力,局限在较小范围,很难大规模推广使用。为此,许多评价侵蚀、水土流失量的模型与方程被提出来。经验模型有:通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)、修正的通用土壤流失方程、中国土壤流失方程等,物理模型有欧洲土壤侵蚀

模型、水蚀预报项目、荷兰的土壤侵蚀模型、水土评价模型等^[7]。但是,物理模型所需数据较多,参数计算较复杂,而USLE/RUSLE模型机制较简单且数据易获取,在国内外广泛应用。Sinha等^[8]利用USLE估算印度阿杜拉河和马哈伦吉河耕地不同作物的土壤流失,发现土壤流失量已超过容许限度,作物因素即人类活动对土壤流失量更为重要。Lu等^[9]利用USLE,RS和GIS相结合的方法,探讨巴西亚马逊流域土壤侵蚀风险与土地利用、土地覆盖之间的关系,森林向其他土地覆盖转变是土壤侵蚀风险增加的重要因素。朱青等^[10]采用RUSLE模型和随机森林法定量分析了赣江上游流域土壤侵蚀及其影响因素。但目前有关甘蔗种植区土壤侵蚀的估算主要利用田间监测法和径流小区法。谢如林等^[11]利用田间监测法,研究了广西旱坡地甘蔗种植不同施肥模式下地表径流引起的土壤侵蚀及氮、磷流失特点。杨任翔等^[12]基于径流小区观测,探究南方高强度、高频次降雨下甘蔗种植模式对赤红壤坡面土壤侵蚀的影响。而利用GIS技术和土壤侵蚀模型等定量估算、分析蔗区土壤侵蚀特征、土壤侵蚀速率等鲜有报道。因此,本文将GIS技术与RUSLE模型相结合,选取广西典型赤红壤集约化蔗区那辣小流域,定量估算该流域的平均土壤侵蚀速率,确定土壤侵蚀等级和不同子流域的土壤侵蚀状况,探讨不同坡度、土地利用类型与土壤侵蚀强度的分布特征,以为广西集约化蔗区小流域防治土壤侵蚀提供科学参考。

1 研究区概况

那辣小流域位于广西崇左市扶绥县境内,位于107°39′29″—104°40′17″E,22°20′36″—22°20′50″N,流域总面积为1.29 km²〔划分为3个子流域,子流域1(SW₁),子流域2(SW₂)和子流域3(SW₃),其面积分别为0.22 km²,0.62 km²,0.45 km²〕,流域出口排水进入连接左江流域的客兰水库。流域为山地丘陵地貌,坡度0°~35°(表1),属南亚热带湿热气候区,年平均气温20~25℃,雨量充沛,全年降雨主要集中在5—9月,年降雨量在1 100 mm左右,土壤类型为赤

红壤,第四纪红土母质,pH 值 4.7~5.2。流域坡耕地种植甘蔗,占土地利用总面积的 82.85%,林地种植桉树,占土地利用总面积的 10.99%,道路和沟渠分别占 5.40%,0.77%(附图 1,见封 3)。该小流域 2—3 月种植甘蔗并在 12 月至次年 3 月收割,一般连续种植 3 a 再翻耕新种。

表 1 那辣小流域地理环境因素状况

子流域 编号	海拔/m	坡度/ (°)	土地利用类型面积/hm ²			
			坡耕地(甘蔗)	林地(桉树)	沟渠	道路
SW ₁	125.56	7.29	20.65	0.07	0.23	1.28
SW ₂	139.66	8.81	48.63	8.97	0.50	3.66
SW ₃	141.05	9.16	37.47	5.11	0.26	2.00

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究主要使用以下数据:①流域 2020 年的月降雨量和年降雨量,来源于流域内监测站收集的降雨数据。②流域土壤类型和属性数据来源于 1:100 万全国土壤类型数据库和中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>),流域实测的土壤理化性质;③数字高程模型 DEM,约为 3 m 空间分辨率,来源于流域测绘所得数据;④流域 2020 年土地利用图,由无人机航拍影像图进行监督分类获得;⑤2020 年流域植被

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \cdot 6 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(-2.95C + 3.72)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7\text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN}_1)} \right) \quad (3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子,为美制单位,乘以系数 0.131 7 转为国际单位[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)];SAN 为砂粒(0.050~2.000 mm)质量分数(%);SIL 为粉粒(0.002~0.050 mm)质量分数(%);CLA 为黏粒(<0.002 mm)质量分数(%);C 为土壤有机碳质量分数(%);SN₁ = 1 - SAN/100;通过 1:100 万全国土壤类型数据库,根据研究区所在扶绥县的土壤类型通过 ArcGIS 软件把流域的土壤类型裁剪出来,并根据中国土壤数据库找到研究区所在扶绥县的土种并结合野外调查和流域实测土壤理化性质,以确定研究区的土壤类型和土壤的砂粒、粉粒、黏粒和有机碳质量分数,代入公式(3)求出土壤可蚀性因子 K 值并赋值到土壤类型图中。

(3) 坡度坡长因子 LS 。坡度、坡长是影响土壤侵蚀的地形因子,本文的坡长因子 L 计算采用 Desmet 等提出的经典公式,坡度因子缓坡采用

覆盖度数据获取来源于使用无人机在甘蔗 4 个生长期拍摄流域的四景可见光正射影像图。

2.2 RUSLE 模型各因子的确定

本文采用 RUSLE 模型^[13]来估算那辣小流域的土壤侵蚀速率。其公式为:

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

式中: A 为土壤侵蚀速率[t/(hm²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)]; K 为土壤可蚀性因子[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)]; LS 为地形因子(L 为坡长因子, S 为坡度因子),无量纲; C 为植被覆盖与作物管理因子,无量纲,范围 0~1; P 为水土保持措施因子,无量纲,范围 0~1。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。 R 因子代表降雨对土壤侵蚀的影响,本研究采用 Wischmeier^[14]提出的简化算法,计算公式为:

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

式中: R 为降雨侵蚀力因子,国际单位为[MJ·mm/(hm²·h·a)]; P_i 为月降水量(mm); P 为年降水量(mm)。本研究采用研究区 2020 年的年降雨量和月降雨量数据代入公式计算出流域内年降雨侵蚀力图。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。土壤可蚀性反映了土壤对侵蚀的敏感程度,这里采用 Williams^[15]提出的侵蚀—生产力评价模型 EPIC 中土壤机械组成和有机碳含量的计算公式:

McCool 的坡度公式,陡坡用刘宝元的坡度公式^[16]:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^n, \quad n = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为坡度(°); n 为坡长指数;量纲为 1; λ 为坡长(m)。先将分辨率为 3 m 的 DEM 数据在 ArcGIS 中提取坡长和坡度,再代入公式(4),(5)分别进行计算,得到坡长因子 L 和坡度因子 S ,相乘得到地形因子 LS 。

(4) 植被覆盖与管理因子 C 。 C 为植被覆盖与管理因子,在 C 因子的计算过程中需要以无人机在甘蔗 4 个生长期拍摄流域的四景可见光正射影像图为基础,借助 ArcGIS 和 ENVI 软件,根据过绿减过

红指数 $ExG-ExR$ 利用像元二分法模型算出流域的植被覆盖度^[17],再根据蔡崇法等^[18]建立的覆盖度与 C 值的关系来计算 C 因子。

$$ExG-ExR=3\times G-2.4\times R-B \quad (6)$$

式中: $ExG-ExR$ 为过绿减过红植被指数; R, G, B 分别为红、绿、蓝 3 个波段的像元值,把流域的正射影像图利用 ENVI 软件的波段计算器计算。

$$f_c = \{(b_1 < b_{\min}) \times 0 + (b_1 > b_{\max}) \times 1 + (b_{\min} < b_1 < b_{\max}) \times [(b_1 - b_{\min}) / (b_{\max} - b_{\min})]\} \quad (7)$$

式中: f_c 为植被覆盖度(%); b_1 是植被指数的值,本研究用过绿减过红植被指数的值; b_{\min}, b_{\max} 分别是植被指数的最小值和最大值,利用 ENVI 软件,根据过绿减过红植被指数的统计直方图,确定纯植被和纯裸地的值,选取植被指数频率累计 5% 为最小值(b_{\min}),植被指数频率累计 95% 为最大值(b_{\max})。

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

式中: C 为研究区的植被覆盖与管理因子。

(5) 水土保持措施因子 P 。水土保持措施因子 P , 本文通过调查那辣小流域水土保持现状并根据相关研究报告^[19], 对每一种土地利用类型赋予 P 值见表 2。

表 2 研究区不同土地利用类型 P 因子

项目	土地利用类型			
	坡耕地(甘蔗)	林地(桉树)	沟渠	道路
P 值	0.4	1	0	0.2

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀空间分布特征

根据土壤侵蚀模型中各因子的运算关系,在 ArcGIS 10 中将获取的各土壤侵蚀影响因子栅格图均转化为同一坐标下像元大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 后进行叠加计算,得到各像元土壤侵蚀量,并根据水利部制定的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)进行等级划分^[20],获得那辣小流域土壤侵蚀强度分级图。由封 3 附图 2 和表 3 可知,2020 年,那辣小流域平均土壤侵蚀速率为 $22.97 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属轻度侵蚀水平,是水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 $5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的 4.6 倍。轻度侵蚀等级及以下的面积占比达 78.09%,中度侵蚀等级及以上的侵蚀面积占 21.91%,说明从总体上看流域土壤侵蚀程度较轻。流域内中度侵蚀等级及以上的侵蚀量占侵蚀总量的 81.39%,侵蚀量为轻度侵蚀等级及以下的 4.37 倍,表明流域局部区域土壤侵蚀比较严重,因此应该重视防治那辣小流域的土壤侵蚀。

表 3 那辣小流域土壤侵蚀统计特征

侵蚀等级/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	侵蚀面积/ hm^2	面积比例/ %	平均土壤侵蚀速率/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	侵蚀量/ ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	侵蚀量比例/ %
微度(<5)	59.82	46.58	0.72	43.00	1.46
轻度(5~25)	40.45	31.50	12.51	505.95	17.15
中度(25~50)	13.66	10.64	35.82	489.18	16.59
强烈(50~80)	6.24	4.86	63.37	395.41	13.41
极强烈(80~150)	4.85	3.78	107.72	522.49	17.71
剧烈(>150)	3.39	2.64	293.18	993.38	33.68
总量	128.41	100.00	22.97	2 949.40	100.00

由表 4 可知,3 个子流域的平均土壤侵蚀速率由大到小为 $SW_3 > SW_2 > SW_1$,子流域 SW_3 的平均土壤侵蚀速率为 $25.31 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是 SW_1 的 1.67 倍, SW_2 与 SW_3 相差不大。然而子流域 SW_2 在 3 个子流域中的侵蚀面积和侵蚀量占比最大,分别为 47.90%,50.25%,土壤侵蚀量分别是子流域 SW_1, SW_3 的 4.42,1.31 倍。

3.2 土壤侵蚀与坡度的关系

坡度是引发土壤侵蚀的众多影响因素之一,因此探究不同坡度下土壤侵蚀的变化规律和特征是防治那辣小流域水土流失的关键举措。根据水利部颁布的关于土壤侵蚀坡度等级划分标准(SL190-2007),将

流域坡度按照 $0^\circ \sim 5^\circ, 5^\circ \sim 8^\circ, 8^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 25^\circ, 25^\circ \sim 35^\circ$ 进行重分类,将分类后的坡度等级图与土壤侵蚀速率图进行空间叠加分析,得出不同坡度级别上的土壤侵蚀分布状况。从表 5 中可知,随着坡度的增加,平均土壤侵蚀速率不断增大,其值在 $5.64 \sim 112.64 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间。在那辣小流域中, $8^\circ \sim 15^\circ$ 坡度级别的侵蚀面积和侵蚀量最大,其值分别为 $49.91 \text{ hm}^2, 1 420.39 \text{ t/a}$,侵蚀强度属于中度侵蚀; $25^\circ \sim 35^\circ$ 的侵蚀面积和侵蚀量最小,其值分别为 $0.37 \text{ hm}^2, 41.58 \text{ t/a}$,侵蚀强度属于极强烈侵蚀。不同侵蚀强度的土壤侵蚀量在各坡度级别所占比例差异较大,随着坡度的增加,微度侵蚀在各坡度级别所占侵

蚀量比例逐渐减小,而其他侵蚀强度,以 15°坡度级别为中心向上和向下土壤侵蚀量在各坡度级别所占比例呈减小趋势。流域内土壤侵蚀主要发生在 5°~25°的坡度范围内,占侵蚀总量的 92.36%,是预防和治理土壤侵蚀的重点区域,应采取合理有效的防治措施。由图 1 可知,不同侵蚀强度在各个坡度级别的侵蚀面积所占比例差异较大。总体上,微度侵蚀在各个坡度级别上所占的面积比例总体呈减少趋势,而其他侵蚀强度所占的面积比例则呈现出先增加后减少趋势。说明坡度分级标准可以明显区分不同土壤侵蚀等级与坡度的变化关系。

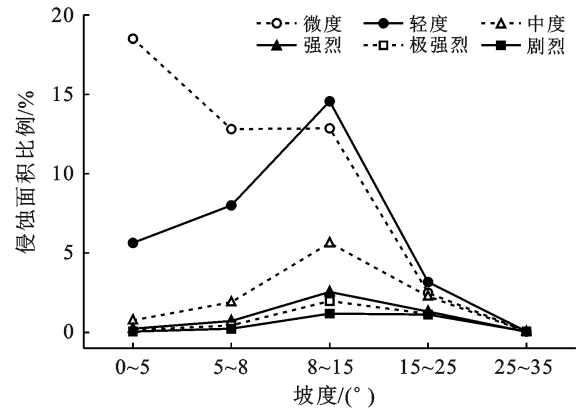


图 1 那辣小流域不同坡度土壤侵蚀等级面积百分比

表 4 那辣小流域中各子流域土壤侵蚀特征

子流域编号	侵蚀面积/ hm ²	面积比例/ %	平均侵蚀速率/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	土壤侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	侵蚀量比例/ %
SW ₁	22.18	17.27	15.13	335.60	11.38
SW ₂	61.50	47.90	24.10	1 481.97	50.25
SW ₃	44.71	34.82	25.31	1 131.70	38.37

表 5 那辣小流域不同坡度土壤侵蚀统计特征

坡度/ (°)	面积/ hm ²	平均土壤侵蚀速率/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	土壤侵蚀量比例/%					
				微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
<5	32.62	5.64	183.89	0.62	2.61	1.15	0.63	0.66	0.55
5~8	31.02	13.77	427.06	0.48	4.13	2.93	1.98	2.03	2.92
8~15	49.91	28.46	1 420.39	0.33	8.29	8.81	7.05	9.26	14.41
15~25	14.84	59.08	876.41	0.02	2.10	3.61	3.65	5.56	14.78
25~35	0.37	112.64	41.58	0.00	0.03	0.07	0.09	0.20	1.01

3.3 土壤侵蚀与土地利用的关系

将流域土壤侵蚀强度图与土地利用类型图在 ArcGIS 中进行叠加分析,得到不同土地利用类型的土壤侵蚀强度分布情况。由表 6 可知,坡耕地(甘蔗)、林地(桉树)、道路 3 种土地利用类型的土壤侵蚀强度面积比例主要处于微度和轻度侵蚀,而沟渠处于微度侵蚀。

从表 7 可知,在不同土地利用类型中,侵蚀面积

最大的是坡耕地(甘蔗),占 82.85%,林地(桉树)、沟渠和道路的侵蚀面积共占 17.15%,流域平均侵蚀速率由大到小为:林地(桉树)>道路>坡耕地(甘蔗)>沟渠,林地(桉树)平均土壤侵蚀速率为 53.59 t/(hm²·a),分别是坡耕地(甘蔗)、道路、沟渠的 2.84,2.12,27.91 倍,而侵蚀量最大的是坡耕地(甘蔗),其值为 2 013.05 t/a,分别是林地(桉树)、道路、沟渠的 2.65,11.46,1 059.50 倍。

表 6 那辣小流域不同土地利用类型下土壤侵蚀强度分布

土地利用类型	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
	面积/ hm ²	比例/ %	面积/ hm ²	比例/ %	面积/ hm ²	比例/ %	面积/ hm ²	比例/ %	面积/ hm ²	比例/ %	面积/ hm ²	比例/ %
坡耕地(甘蔗)	50.93	47.71	34.92	32.71	11.07	10.37	4.73	4.43	3.33	3.12	1.77	1.65
林地(桉树)	5.58	39.43	3.35	23.65	1.61	11.37	1.03	7.31	1.13	7.98	1.45	10.27
沟渠	0.98	98.62	0.01	0.81	0.00	0.20	0.00	0.11	0.00	0.12	0.00	0.14
道路	2.77	39.81	2.18	31.36	0.97	14.01	0.48	6.86	0.39	5.55	0.17	2.41

表 7 那辣小流域不同土地利用类型的土壤侵蚀量

土地利用类型	面积/hm ²	面积比例/%	平均土壤侵蚀速率/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	侵蚀量比例/%
坡耕地(甘蔗)	106.75	82.85	18.86	2 013.05	68.25
林地(桉树)	14.16	10.99	53.59	758.76	25.73
沟渠	0.99	0.77	1.92	1.90	0.06
道路	6.95	5.40	25.27	175.66	5.96

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文利用 RUSLE 模型计算 2020 年广西典型赤红壤集约化蔗区那辣小流域平均土壤侵蚀速率为 $22.97 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 属轻度侵蚀水平, 是水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 $5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的 4.6 倍。轻度侵蚀等级及以下的面积占比达 78.09%, 从总体上看流域土壤侵蚀程度较轻, 中度侵蚀等级及以上的侵蚀量占侵蚀总量的 81.39%, 侵蚀量为轻度侵蚀等级及以下的 4.37 倍, 说明局部区域土壤侵蚀较严重。根据 Li 等^[21] 实测那辣小流域甘蔗坡面沟蚀量表明, 2017—2019 年甘蔗不同种植模式下年均坡面沟蚀速率为 $18.9 \sim 32.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 流域甘蔗坡面侵蚀主要是沟蚀, 而 RUSLE 模型主要用于估算坡面细沟或细沟间侵蚀形成的平均土壤流失量, 本文用 RUSLE 模型估算的坡耕地(甘蔗)土壤侵蚀速率 $18.86 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 与实测的坡面沟蚀速率相近, 表明利用 RUSLE 模型估算流域土壤侵蚀总体结果较可靠。子流域 SW_3 的平均土壤侵蚀速率是 SW_1 的 1.67 倍, SW_2 与 SW_3 相差不大, 可能原因是子流域 SW_3 的坡度比 SW_1 , SW_2 大, 表明子流域坡度的差异影响土壤侵蚀速率。Abdalla 等^[22] 在南非甘蔗种植区的试验研究表明, 坡度与土壤侵蚀速率呈正相关关系, 与本研究结果相符。子流域 SW_2 , SW_3 的林地(桉树)面积大于 SW_1 , 流域林地(桉树)土壤侵蚀速率较大。有研究表明, 桉树人工林产生较高坡面径流量和泥沙流失量主要是因为造林抚育措施及大量级降水^[23]。此外, 本研究发现那辣小流域 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的坡度范围是土壤侵蚀防治的重点区域。

流域平均土壤侵蚀速率由大到小为: 林地(桉树) > 道路 > 坡耕地(甘蔗) > 沟渠, 林地(桉树)平均土壤侵蚀速率为 $53.59 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 分别是坡耕地(甘蔗)、道路、沟渠的 2.84, 2.12, 27.91 倍。王永平等^[24] 利用 ^{137}Cs 示踪法研究了滇池东大河小流域不同土地利用类型平均土壤侵蚀速率为耕地 $[15.39 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ > 草地 $[13.09 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ > 林地 $[0.82 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$, 其林地种植马尾松、云南松和萌芽灌木等乔灌混交林, 冠层植被丰富, 植被覆盖起到较大抑制水土流失的作用。而本研究的林地土壤侵蚀速率与之相比大许多, 主要是因为流域山坡上林地为纯桉树人工林, 坡度大, 冠层植被稀疏, 地表覆盖度较低, 种植、砍伐等人为活动易引发严重的土壤侵蚀。王会利等^[25] 采用径流场观测发现, 炼山后种植桉树第一年土壤侵蚀量达 $350 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。有研究表明, 南方红壤

区林下土壤侵蚀主要原因是人为干扰频繁、林分结构单一、林下植被匮乏^[26]。流域道路的土壤侵蚀速率较大, 但其侵蚀量和侵蚀面积占流域侵蚀总量和总面积的 5% 左右, 流域道路几乎没有水土保持措施, Li 等^[27] 研究表明, 2017 年那辣小流域农田从小块地变成大块地之后, 道路密度、交通强度增加, 受大型卡车等运输车辆产生的车辙形成细沟, 导致道路侵蚀量显著增加。流域坡耕地(甘蔗)的侵蚀量最大, 其值为 $2\,013.05 \text{ t}/\text{a}$, 分别是林地(桉树)、道路、沟渠的 2.65, 11.46, 1\,059.50 倍。可能原因是坡耕地面积占流域土地利用总面积的 82.85%, 坡耕地种植甘蔗, 坡度较大, 降雨集中且多暴雨, 种植方式大部分是顺坡种植, 加上翻耕除草, 新植甘蔗地表较为裸露, 植被覆盖不足以抵挡降雨产生径流对表层土壤的冲刷, 导致土壤侵蚀比较严重。有研究表明, 在种植甘蔗模式下, 每年的泥沙流失量为 $27 \sim 30 \text{ t}/\text{hm}^2$ 左右^[11], 甘蔗坡面径流量和侵蚀量为: 裸坡 > 顺坡蔗地 > 横坡蔗地, 顺坡蔗地坡面径流量和侵蚀量是横坡蔗地的 1.9, 2.3 倍^[12], 甘蔗地表覆盖是影响地表径流的最重要因素, 甘蔗地表凋落物不会改变地表粗糙度, 在最低凋落物量 ($4 \text{ t}/\text{hm}^2$) 下水土流失量减少, 入渗率增加^[28]。甘蔗坡面土壤侵蚀和养分流失主要在萌芽期和苗期^[29], 要增加地表覆盖等措施, 有针对性地对甘蔗生长前期, 特别是大的降雨期坡面土壤侵蚀进行防治。由于各子流域的海拔、坡度、土地利用类型面积和种植管理方式等的差异, 引发各子流域的土壤侵蚀速率也不同, 可以根据流域的情况采取针对性的措施来防治土壤侵蚀。例如, 流域甘蔗可以采取横坡种植, 新植宿根按合适的比例种植, 合理规划土地利用类型等, 尽量减轻流域的土壤侵蚀。

RUSLE 经验模型结构相对简单, 各因子易于理解, 所需数据较少, 可以对所研究地区的数据变化进行模型各因子数据输入计算。但在利用 RUSLE 模型因子计算过程中, 由于模型参数的数据精度不一, 导致在 ArcGIS 的栅格计算器计算过程中难免产生误差, 而且修正的通用土壤流失方程是一个经验模型, 其应用存在较大的局限性, 在未来的研究中考虑改进模型的一些参数或使用其他更优化的模型, 使得评估结果更具有科学性和可靠性。

4.2 结论

(1) 2020 年那辣小流域平均土壤侵蚀速率为 $22.97 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 表明流域土壤侵蚀较严重, 应重视流域的水土流失治理工作。

(2) 流域内土壤侵蚀主要发生在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的坡度范围内, 是预防和治理水土流失的重点区域, 应采取

合理有效的防治措施。

(3) 研究区不同土地利用类型中,平均侵蚀速率最大的是林地(桉树),为 53.59 t/(hm²·a),分别是坡耕地(甘蔗)、道路、沟渠的 2.84,2.12,27.91 倍,应合理利用并规划管理好流域的坡耕地(甘蔗)、林地(桉树)、道路等土地利用类型,采取具有针对性的、有效的水土保持措施,以改善流域的土壤侵蚀状况。

[参 考 文 献]

- [1] 谭宏伟,刘永贤,周柳强,等.基于滴灌条件下的甘蔗施肥减量技术研究[J].热带作物学报,2013,34(1):24-28.
- [2] 罗思妮.甘蔗联合种植机械化技术探讨[J].农业技术与装备,2021(5):44-45.
- [3] 付兴涛,张丽萍.红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):91-98.
- [4] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A S E, et al. Factors affecting runoff and soil erosion: Plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003,180(1/2/3):361-374.
- [5] Rabesiranana N, Rasolonirina M, Solonjara A F, et al. Assessment of soil redistribution rates by ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex in a typical Malagasy agricultural field [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016,152:112-118.
- [6] 赵珩航,曹斌挺,焦菊英.黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征[J].中国水土保持科学,2017,15(3):105-113.
- [7] 田义超,黄远林,张强,等.北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J].中国环境科学,2019,39(1):257-273.
- [8] Sinha D, Joshi V U. Application of universal soil loss equation (USLE) to recently reclaimed badlands along the Adula and Mahalungi rivers, Pravara Basin, Maharashtra [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2012,80(3):341-350.
- [9] Lu D, Li G, Valladares G S, et al. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, remote sensing and GIS [J]. *Land Degradation & Development*, 2004,15(5):499-512.
- [10] 朱青,国佳欣,郭熙,等.基于随机森林算法的土壤侵蚀影响因子研究:以赣江上游流域为例[J].水土保持通报,2020,40(2):59-68.
- [11] 谢如林,谭宏伟,周柳强,等.甘蔗种植体系水土及氮磷养分流失研究[J].西南农业学报,2013,26(4):1572-1577.
- [12] 杨任翔,邱凡,王坚桦,等.雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):65-70.
- [13] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. US: Agriculture Handbook, 1997.
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1958,39(2):285.
- [15] Williams J, Nearing M, Nicks A, et al. Using soil erosion models for global change studies [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996,51(5):381-385.
- [16] 刘盼,任春颖,王岩松,等.基于 RUSLE 模型的梅河口市土壤侵蚀动态分析[J].水土保持通报,2019,39(1):172-179.
- [17] 高永平,康茂东,何明珠,等.基于无人机可见光波段对荒漠植被覆盖度提取的研究:以沙坡头地区为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2018,54(6):770-775.
- [18] 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.
- [19] 冯强,赵文武.USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.
- [20] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [21] Li Yong, Mo Yaqi, Are K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: Evidence from hillslope observation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021,309:107289.
- [22] Abdalla K, Dickey M, Hill T, et al. Assessment of soil erosion under rainfed sugarcane in KwaZulu-Natal, South Africa [J]. *Natural Resources Forum*, 2019,43(4):241-252.
- [23] 梁宏温,钟瀚涛,温远光,等.不同造林抚育措施对桉树人工林坡面径流特征的影响[J].南方农业学报,2014,45(11):2020-2025.
- [24] 王永平,周子柯,滕昊蔚,等.滇南小流域 3 种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J].水土保持研究,2021,28(1):11-18.
- [25] 王会利,曹继钊,孙孝林,等.桉树—牧草复合经营模式下水土流失和土壤肥力的综合评价[J].土壤通报,2016,47(6):1468-1474.
- [26] 何绍浪,何小武,李凤英,等.南方红壤区林下水土流失成因及其治理措施[J].中国水土保持,2017(3):16-19.
- [27] Li Yong, Are K S, Qin Zhaohua, et al. Farmland size increase significantly accelerates road surface rill erosion and nutrient losses in southern subtropics of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,204:104689.
- [28] Valim W C, Panachuki E, Pavei D S, et al. Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion [J]. *Semina: Ciências Agrárias*, 2016,37(3):1155.
- [29] 杨任翔,邱凡,郑佳舜,等.赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J].生态学报,2022,42(3):904-913.