

# 广西西江流域土壤侵蚀估算及特征分析

李翠漫<sup>1</sup>, 卢远<sup>1</sup>, 刘斌涛<sup>2</sup>, 许贵林<sup>3</sup>

(1. 广西师范学院 地理科学与规划学院, 南宁 530001; 2. 中国科学院 水利部

成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

**摘 要:** 西江流域占广西土地总面积的 85.7%, 流域内碳酸盐岩出露面积大, 地形复杂, 水土流失是西江流域的重要生态环境问题, 对广西乃至珠三角地区生态安全都具有重要影响。因此基于 USLE 模型引入修正因子, 建立了西江流域土壤流失方程  $A=R \times K \times LS \times C \times P \times M$ , 对土壤侵蚀空间分布进行了定量研究, 结合水文资料及相关研究成果对模型计算结果进行了对比分析。结果表明: 模型定量计算的土壤侵蚀模数与水文验证结果一致, 与相关研究成果较为接近, 2015 年广西西江流域平均土壤侵蚀模数为 135.22 t/(km<sup>2</sup> · a), 年总侵蚀量为 2 737.72 万 t, 坡耕地是土壤侵蚀的主要来源, 8°~25° 的坡度范围是土壤侵蚀的易发区。该研究对广西、珠江流域水土保持生态文明建设具有参考意义。

**关键词:** 广西; 西江流域; 修正因子; USLE 模型; 空间分布

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)02-0034-06

## Estimation and Characteristics Analysis of Soil Erosion in Xijiang River Basin of Guangxi

LI Cuiman<sup>1</sup>, LU Yuan<sup>1</sup>, LIU Bintao<sup>2</sup>, XU Guilin<sup>3</sup>

(1. *Geography and Planing Institute, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China;*

*2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 3. Key Laboratory of*

*Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)*

**Abstract:** The Xijiang River Basin accounts for 85.7% of the total land area of Guangxi. In the basin, the carbonate rocks are exposed to large areas and the terrain is complex. soil and water loss is an important ecological environment problem in the Xijiang River Basin, which has an important impact on the ecological security of Guangxi and the Pearl River Delta of China. Therefore, this paper introduces correction factor based on the USLE model and establishes the soil loss equation in Xijiang River Basin as follow:  $A=R \times K \times LS \times C \times P \times M$ . This equation was used to quantitatively examine the spatial distribution of soil erosion. The results of the model are compared and analyzed based on hydrological data and related research results. The results show that: the soil erosion modulus calculated by the model is consistent with the results of hydrological data, and is close to the relevant research results; in 2015, the average soil erosion modulus of Xijiang River in Guangxi was 135.22 t/(km<sup>2</sup> · a), and the total annual soil erosion was 27.377 2 million t/a; slope land is the main source of soil erosion, and the slopes with the gradients of 8°~25° are the prone areas of soil erosion. These results can provide the references for the soil and water conservation and the construction of ecological civilization in Guangxi and the Pearl River Basin.

**Keywords:** Guangxi; Xijiang River Basin; correction factor; USLE model; spatial distribution

收稿日期: 2017-05-16

修回日期: 2017-06-19

资助项目: 国家自然科学基金(41661043); 广西自然科学基金(2015GXNSFAA139234); 广西科技重点研发计划(AB16380318); 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2015CB452700)

第一作者: 李翠漫(1993—), 女, 广西玉林人, 硕士, 研究方向为 GIS 与 RS 应用。E-mail: LCM931102@163.com

通信作者: 卢远(1971—), 男, 广西横县人, 教授, 硕士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统应用、土地规划、水土流失研究。E-mail: luyuan-gx@yahoo.com.cn

土壤侵蚀导致大量土壤资源遭到破坏,使土层变薄,肥沃表土大量流失,地表植被遭到严重破坏,导致自然生态环境失调,严重威胁了人们的生产发展<sup>[1]</sup>。1990年珠江流域土壤侵蚀现状调查显示<sup>[2]</sup>,西江流域土壤侵蚀面积53 327.89 km<sup>2</sup>,占珠江流域土壤侵蚀面积的93.44%,占西江流域土地总面积的15.10%。2013年全国第一次全国水利普查公告,广西土壤水力侵蚀面积5.05万 km<sup>2</sup>,根据广西水利厅颁布的广西水土保持公报,截至2015年底,广西累计完成水土流失治理面积3.34万 km<sup>2</sup>。水土流失已成为西江流域重要生态问题,研究西江流域土壤侵蚀空间分布,对广西乃至整个珠江流域的可持续发展和生态治理环境治理提供决策参考,意义深远。

长期以来土壤侵蚀一直是我国关注的热点问题,20世纪30年代Wischmeier等<sup>[3]</sup>提出的通用土壤流失方程(USLE)得到广泛推广和应用,但原始的USLE模型是一个经验模型,主要适用于美国落基山脉以东的农业区,在其他地区使用需要进行参数校正。因此我国不少学者在研究区域土壤侵蚀问题上,基于USLE模型基础上进行修正并运用修正后的模型对区域土壤侵蚀定量评价,如刘宝元等<sup>[4]</sup>改进建立了中国土壤流失方程(CSLE),杨子生<sup>[5]</sup>开发了云南金沙江流域土壤流失方程,江忠善等<sup>[6]</sup>建立了中国坡面水蚀预报模型等。

广西水土保持监测起步较晚,水土保持监测网点少、基础研究薄弱,难以直接利用定位监测数据来对广西西江流域的水土流失态势进行评价和分析,为了全面了解广西水土流失状况,2015年广西开展了土壤侵蚀调查与制图工作,本文正是在此项目背景的支持下,基于USLE模型,对喀斯特分布广泛的西江流域,引入石漠化修正因子 $M$ ,建立西江流域土壤流失方程,定量研究土壤侵蚀的空间分布,并探索其水土流失的特征。

## 1 研究区概况

西江作为珠江流域的主流,是华南地区最长的河流,为中国第三大河流,长度仅次于长江、黄河。全长约2 214 km,集水面积约为35.3万 km<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,西江流域横跨广西,在广西境内集水面积约为20.24万 km<sup>2</sup>,占广西土地总面积的85.7%。自西向东主要水系有南盘江、红水河、柳江、黔浔江、郁江、右江、左江。

广西西江流域喀斯特分布广泛,碳酸盐岩及碎屑岩为流域内的主要地质类型,总体地势西北高东南低,地

貌类型以山地为主,多为小起伏、中起伏山地,山地面积约占流域总面积的64.68%;流域内地处亚热带气候区,气候温暖多雨,雨量主要集中在春夏两季,土壤种类繁多,以红壤、赤红壤及棕色石灰土为主,植被类型主要有针叶林、阔叶林、竹林、灌丛、草丛等。流域范围内人口密度大,人类活动强烈,且喀斯特地区地表坎坷崎岖、土层浅薄贫瘠,土地利用类型多样,不合理的开发和利用土地,则出现了一系列生态问题,其中以生态破坏后所产生的石漠化问题最为突出。

## 2 土壤流失方程建立

### 2.1 土壤流失方程修正

本研究以通用土壤流失方程(USLE)为蓝本,结合广西西江流域特点,引入石漠化修正因子 $M$ ,建立广西西江流域土壤侵蚀预报模型,进行土壤侵蚀定量评估。方程计算公式为:

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \times M \quad (1)$$

式中: $A$ 为土壤侵蚀模数[t/(km<sup>2</sup>·a)]; $R$ 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $K$ 为土壤可蚀性因子[t·km<sup>2</sup>·h/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)]; $LS$ 为坡长坡度因子(无量纲); $C$ 为地表覆盖与管理因子(无量纲); $P$ 为水土保持措施因子(无量纲); $M$ 为石漠化修正因子(无量纲)。

2.1.1 降雨侵蚀力 用 $EI_{30}$ 作为降雨侵蚀能力指标需要连续记录的降雨过程资料,在许多地区都难以获取这些资料,因此本文利用观测值和经验建立降雨侵蚀力的简易算法,即通过气象站收集到的广西逐日降雨资料(1980—2015年),采用章文波等<sup>[8-9]</sup>基于日降雨资料的降雨侵蚀力计算模型,计算得出广西西江流域平均降雨侵蚀力为:9 585.40 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

2.1.2 土壤可蚀性 土壤可蚀性估算模型较多,其中EPIC模型<sup>[10]</sup>在我国是应用较多的土壤可蚀性计算模型。张科利等<sup>[11]</sup>研究指出EPIC模型计算的 $K$ 值与中国各地区实测的 $K$ 值相差较大,并提出 $K$ 值修正公式为 $K=-0.01383+0.51575K_{EPIC}$ 。因此本文土壤可蚀性采用EPIC模型并结合张科利提出修正 $K$ 值的公式进行估算。

2.1.3 地形因子 地形是决定土壤侵蚀的重要内在因素,在土壤流失方程中地形因素采用地形因子表示,地形因子( $LS$ )即坡长因子( $L$ )和坡度因子( $S$ )。西南土石山区的地形特征极为破碎,土壤侵蚀环境比较复杂、土壤侵蚀空间异质性大。因此本文地形因子计算采用刘斌涛等<sup>[12]</sup>提出的西南土石山区坡度因子的修正算法,计算法的基本形式如下:

$$L = \left( \frac{L_0}{20} \right)^{0.24} \quad (2)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & 5^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ 20.204\sin\theta - 1.2404 & 10^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ 29.585\sin\theta - 5.6079 & \theta > 25^\circ \end{cases} \quad (3)$$

#### 2.1.4 地表覆盖与管理因子与水土保持措施因子

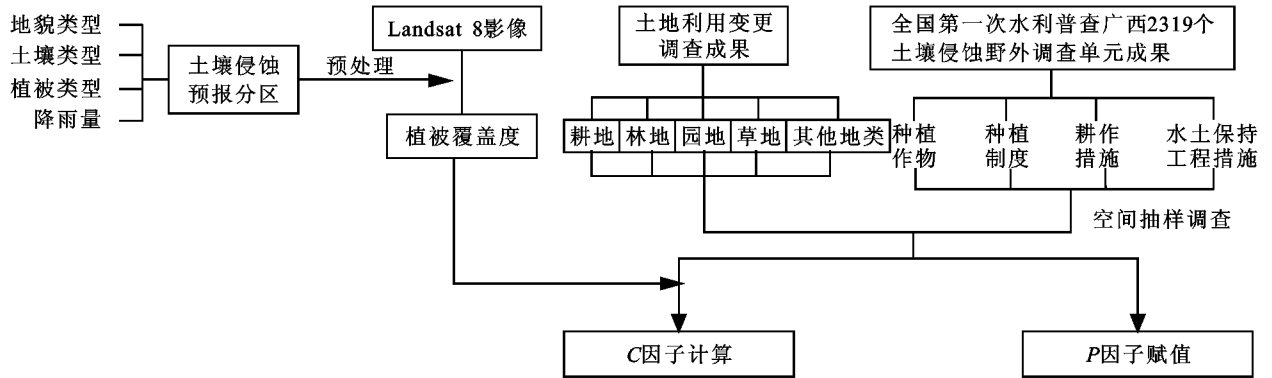


图 1 C、P 因子计算流程

地表覆盖与管理因子(C)与土地利用类型和植被覆盖度密切相关。参考杨子生<sup>[5]</sup>对农作物经营 C 因子研究成果,根据广西 2 319 个野外调查单元的成果资料,结合土地利用数据,按照不同土壤侵蚀预报分区先对耕标的种植制度、种植方式进行准化赋值,利用 landsat 8 影像提取的 NDVI 值按照土壤侵蚀预报区计算植被覆盖度,参考蔡崇法等<sup>[13]</sup>研究的植被覆盖与管理因子定量关系,计算林地、园地、草地的 C 因子值,对于没有土壤侵蚀的区域如水域、建设用地等统一赋值为 0,地表完全裸露最容易受到侵蚀区域如裸地等,统一赋值为 1,利用空间技术,制作全区 C 因子值分布图(图 2)。

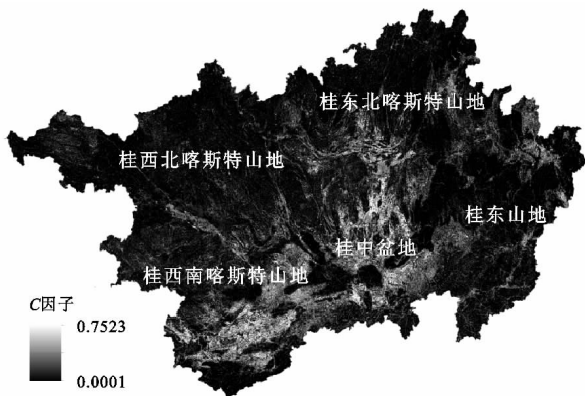


图 2 广西西江流域 C 因子值分布

水土保持措施因子(P)反映了各类人工水土保持措施抵抗土壤侵蚀的能力。本文是在参考西南地区水土保持措施 P 值研究成果<sup>[5,14]</sup>,结合第一次全国水利普查水力侵蚀强度评价结果、第一次全国水利普查野外调查单元成果、2014 年底广西土地利用变更调

查成果,综合考虑广西水土保持工程措施和耕作措施实际情况,作统一校正后确定研究区 P 因子的赋值,利用空间技术,制作全区 P 因子值分布图(图 3)。

2.1.5 修正因子 西江流域岩溶地貌分布广泛,碳酸盐岩类成土物质少,且成土速度十分缓慢,土层浅薄且土体不连续性,抗外界干扰能力差,植被遭到破坏后自我修复能力较差,致使石漠化问题较为严重。

综合目前土壤侵蚀研究成果<sup>[15-18]</sup>,喀斯特地区的土壤侵蚀,裸岩率与土壤相对流失量的关系呈现一个近似符合指数衰减关系(图 4)。因此,根据研究区的特点本文引入了喀斯特石漠化修正因子 M。

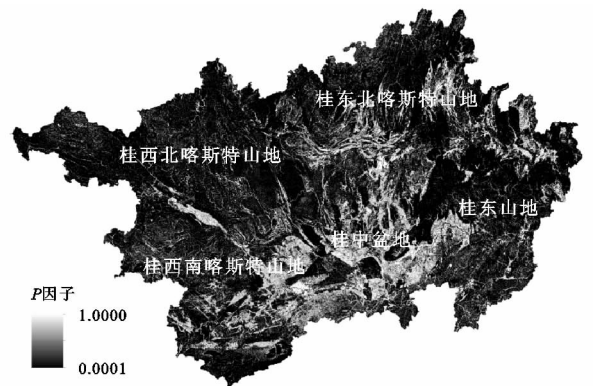


图 3 广西西江流域 P 因子值分布

石漠化信息提取的关键是多信息的综合。本文利用地质地貌图,提取研究区喀斯特与非喀斯特区域,以岩石因子、地形因子、土地利用因子、植被因子、土壤因子等因子作为石漠化评价指标,参考胡顺光<sup>[19]</sup>、岳跃民<sup>[20]</sup>等对石漠化信息的提取,同时借鉴国家重点基础研究计划(973 计划)项目“典型山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控”研究成果,评估获得了广西地区的喀

斯特石漠化数据。结合 2011 年底全国第二次石漠化监测的结果,与研究区提取的喀斯特石漠化数据进行辅助比对,由此计算得到了  $M$  因子(图 5)。

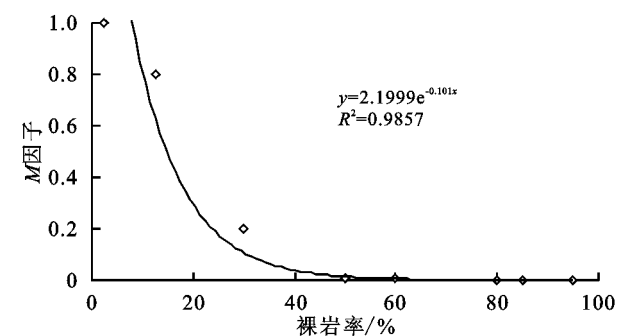


图 4  $M$  因子与裸岩率关系

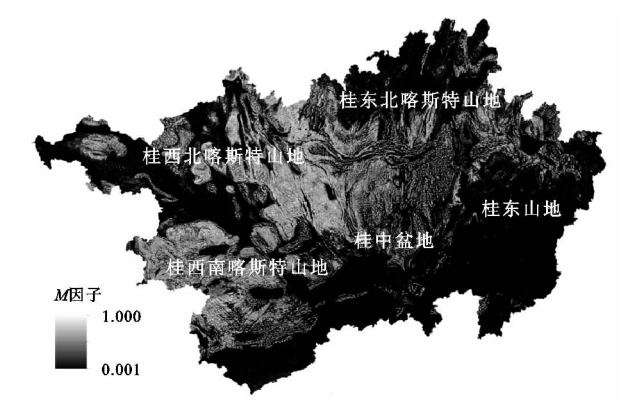


图 5  $M$  因子分布

2.2 土壤侵蚀强度分级标准

本文将模型计算出的土壤侵蚀模数按照《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》(SL461—2009)和《南方红壤丘陵区水土流失综合治理技术标准》(SL657—2014)规定的容许土壤流失量,即岩溶地区容许土壤流失量为  $50\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,南方红壤丘陵区和非岩溶地区的西南土石山区容许土壤流失量为  $500\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 进行分级(表 1)。

表 1 广西西江流域土壤侵蚀强度分级标准  
 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

侵蚀强度等级	土壤侵蚀强度	
	岩溶地区	南方红壤丘陵区
微度侵蚀	$\leq 50$	$\leq 500$
轻度侵蚀	$50 \sim 300$	$500 \sim 1500$
中度侵蚀	$300 \sim 1500$	$1500 \sim 3000$
强烈侵蚀	$1500 \sim 3000$	$3000 \sim 5000$
极强烈侵蚀	$3000 \sim 6000$	$5000 \sim 10000$
剧烈侵蚀	$> 6000$	$> 10000$

2.3 土壤侵蚀精度验证

2.3.1 基于水文输沙验证 水文验证是基于“输沙量=土壤侵蚀量 $\times$ 泥沙输移比”的公式,获取了研究区 8 个水文站点的径流量和输沙量资料(2000—2015 年),在参考大量文献<sup>[21-25]</sup>的基础上,得出广西的泥沙

输移比可近似取 0.41,合理估计了广西西江流域内 8 个水文站点的泥沙输移比,统计出了多年平均输沙量与本文土壤侵蚀模型估算结果进行对比。由表 2 可知,相对误差最大为融水站 16.38%,最小为宁明站 3.08%,大于 15%只有 2 个站点,其他 6 个站点均小于 15%。由此可知推测输沙量与实测输沙量呈现高度一致,本文土壤侵蚀流失模型修正科学合理。

表 2 基于水文资料验证结果对比分析

水文站点	控制流域	集水面积/ $\text{km}^2$	推测输沙量/万 t	实测输沙量/万 t	相对误差/%
融水站	融江	23620.60	366.40	314.83	16.38
三岔站	龙江	16404.96	149.54	131.29	13.90
金鸡站	北流河	9103.00	159.57	189.55	15.82
崇左站	左江	28229.70	221.47	208.30	6.32
宁明站	明江	4262.00	57.92	56.19	3.08
瓦村站	驮娘江	11614.04	168.43	182.72	7.82
桂林站	桂江	2810.07	29.53	26.73	10.48
恭城站	恭城河	2572.03	24.18	26.05	7.18

2.3.2 与邻省研究成果对比 陈强等<sup>[26]</sup>在 2005 年研究滇东南西畴县退耕还林的水土保持效应中,观测到坡耕地的土壤侵蚀模数为  $183\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,本文利用模型计算出广西与西畴县邻近的德保县、靖西县喀斯特旱地土壤侵蚀模数分别为:  $197.70, 250.79\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,模型计算结果与径流小区观测结果较为接近。

郑悦华等<sup>[27]</sup>在使用近 3 年遥感影像对广东青莲小流域水土流失分析中,得出大于  $5^\circ$  的平均土壤侵蚀模数  $724.86 \sim 1\,146.72\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,与本文研究区内坡耕地平均土壤侵蚀模数  $912.04\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 较为接近。

3 土壤侵蚀流失特征分析

3.1 土壤侵蚀空间分布特征

本次土壤侵蚀估算研究中,在不考虑重力侵蚀、工程侵蚀等前提下,广西西江流域土壤侵蚀主要集中在柳江水系西南西北部、左江流域中部及红水河东南部(图 6)。平均土壤侵蚀模数为  $135.22\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤侵蚀总量为  $2\,737.72\text{ 万 t/a}$ ;从侵蚀面积上看(图 7),轻度及以上的土壤侵蚀面积为  $22\,802.75\text{ km}^2$ ,占流域土地总面积的 11.26%;其中轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、剧烈侵蚀、极剧烈侵蚀面积分别为  $15\,375.45, 5\,291.16, 1\,293.14, 620.50, 222.50\text{ km}^2$ ,所占比例分别为 7.59%, 2.61%, 0.64%, 0.31%, 0.11%。

3.2 不同土地利用土壤侵蚀特征

(1) 耕地土壤侵蚀特征分析。广西西江流域耕地面积为  $41\,650.36\text{ km}^2$ ,占土地总面积的 20.57%,其中坡耕地面积为  $7\,162.84\text{ km}^2$ ,占耕地面积的 17.20%,梯田

地的面积为 16 118.01 km<sup>2</sup>,占耕地面积的 38.70%。耕地平均土壤侵蚀模数为 256.88 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量为 1 069.92 万 t/a,侵蚀面积为 8 888.14 km<sup>2</sup>,占耕地面积的 21.34%;坡耕地平均土壤侵蚀模数为 912.04 t/(km<sup>2</sup>·a),侵蚀量为 653.28 万 t/a,侵蚀面积为 4 109.69 km<sup>2</sup>,占坡耕地面积的 57.38%;梯田地平均土壤侵蚀模数为 79.69 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量为 128.45 万 t/a,侵蚀面积为 2 303.88 km<sup>2</sup>,占梯田梯面积的 14.29%。从侵蚀比例上看,坡耕地的土壤侵蚀比例最大。

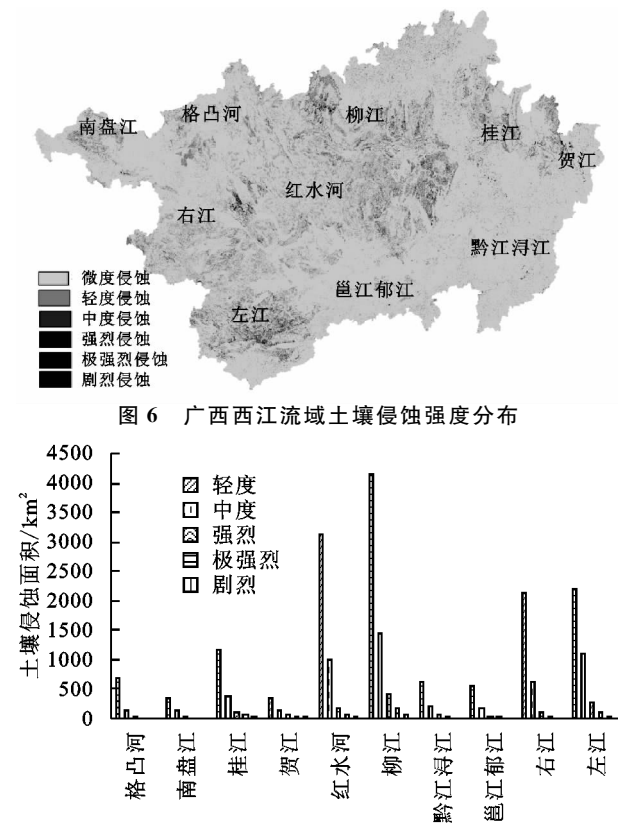


图 6 广西西江流域土壤侵蚀强度分布

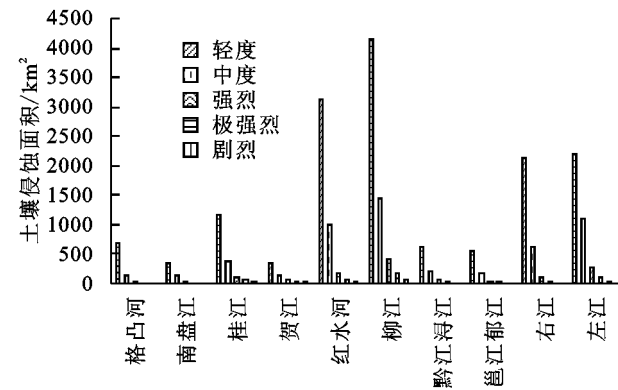


图 7 各子流域土壤侵蚀面积

(2) 林地土壤侵蚀特征分析。森林在控制水土流失发挥着明显的水土保持作用。广西西江流域范围内,林地面积 115 529.48 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 57.06%,林地平均土壤侵蚀模数为 72.32 t/(km<sup>2</sup>·a),远低于全流域的平均土壤侵蚀模数,土壤侵蚀量为 835.56 万 t/a,侵蚀面积为 5 921.15 km<sup>2</sup>,占林地面积的 5.13%。

(3) 园地土壤侵蚀特征分析。园地面积为 8 277.22 km<sup>2</sup>,仅占所有地类总面积的 4.09%,园地平均土壤侵蚀模数为 195.59 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量为 161.90 万 t/a,土壤侵蚀面积为 1 322.99 km<sup>2</sup>,占园地面积的 15.98%,园地面积虽小但其土壤侵蚀比例较高。

(4) 草地土壤侵蚀特征分析。草地总面积为 24 085.69 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 11.90%。草地平均土壤侵蚀模数为 220.60 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量为 531.32 万 t/a,土壤侵蚀面积为 6 226.25 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 25.85%。

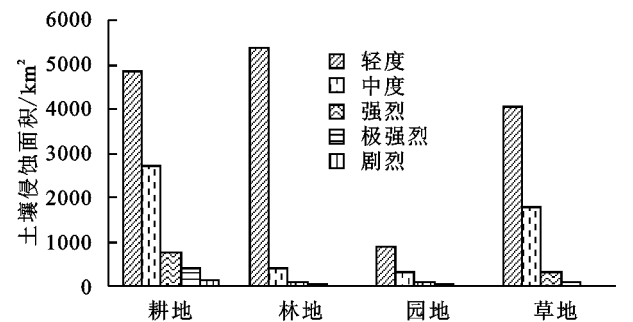


图 8 不同土地利用类型土壤侵蚀面积

3.3 不同地形地貌土壤侵蚀特征

广西西江流域喀斯特地貌分布广泛,地形复杂多样。本文将坡度划分为<3°,3°~5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°,>35°共 7 个等级,地貌上划分为平原、丘陵、台地、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地,分别统计不同等级、类别下的土壤侵蚀分布状况。

从表 3 可以看出,土壤侵蚀面积主要集中分布在 8°~15°,15°~25°坡面上,从侵蚀比例上看,8°~15°坡面侵蚀面积比最大,为 25.75%,其次为 15°~25°坡面,侵蚀面积比为 25.09%;从侵蚀量看,15°~25°坡面侵蚀量最大,为 769.08 万 t/a,其次为 8°~15°坡面,土壤侵蚀量为 721.14 万 t/a。

从表 4 可以看出,大起伏山地平均土壤侵蚀模数最大,为 203.41 t/(km<sup>2</sup>·a),平原平均土壤侵蚀模数最小,为 59.12 t/(km<sup>2</sup>·a),小起伏山地侵蚀面积及侵蚀量最大,分别为 11 251.93 km<sup>2</sup>,1 030.02 万 t/a。从侵蚀比例上看,丘陵侵蚀面积比最大,为 15.82%,其次为起伏山地,侵蚀面积比为 13.99%。由此可知小起伏山地、丘陵是水土流失的主要地貌类型。

表 3 不同坡度等级土壤侵蚀情况

土壤侵蚀指标	坡度等级/(°)						
	≤3	3~5	5~8	8~15	15~25	25~35	>35
平均侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	84.67	113.38	138.88	156.44	150.93	134.91	102.22
侵蚀量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	112.32	175.95	315.90	721.14	769.08	439.18	218.02
侵蚀面积/km <sup>2</sup>	1290.42	1773.58	2864.60	5871.09	5721.64	3259.67	2021.72
侵蚀面积比/%	5.66	7.78	12.56	25.75	25.09	14.30	8.87

表 4 不同地貌类型土壤侵蚀情况

项目	地貌类型					
	平原	丘陵	台地	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地
平均侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	59.12	183.64	128.73	128.1	160.84	203.41
侵蚀量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	181.76	518.98	161.01	1030.02	688.9	157.05
侵蚀面积/km <sup>2</sup>	1827.08	4469.85	1609.86	11251.93	3137.06	384.13
侵蚀面积比/%	5.94	15.82	12.87	13.99	7.32	4.98

4 结 论

(1) 在引入  $M$  因子修正的 USLE 模型中,模型计算得出的结果与基于水文资料验证的结果基本一致,与研究区邻近区域相关研究成果较为接近,表明  $M$  因子值的修正科学合理。

(2) 在不考虑风力侵蚀、重力侵蚀、工程侵蚀等前提下,广西西江流域平均土壤侵蚀模数 135.51 t/(km<sup>2</sup>·a),侵蚀面积为 22 802.75 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 11.26%,土壤侵蚀以轻度、中度侵蚀为主。

(3) 不同地类对土壤侵蚀程度不同。耕地是水土流失的主要地类,其次为草地、林地及园地,其中坡耕地是耕地土壤侵蚀的主要来源,同时也是西江流域水土流失的主要来源。

(4) 地形、地貌影响土壤侵蚀的空间分布。小起伏山地是西江流域水土流失的主要地貌类型;8°~25°的坡面为土壤侵蚀的易发区,水土流失最严重。

参考文献:

[1] 李国英. 对我国水土保持工作的几点思考[J]. 中国水土保持,1998(2):20-23.

[2] 杨德生. 珠江流域土壤侵蚀现状及其特点[J]. 人民珠江,1990(4):38-39.

[3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountain Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation[Z] // Agricultural Handbook 282. Washington, D. C: USDA-ARS,1965.

[4] 刘宝元,毕小刚,符素华. 北京土壤流失方程[M]. 北京:科学出版社,2010.

[5] 杨子生. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J]. 山地学报,2002,20(S1):1-9.

[6] 江忠善,郑粉莉,武敏. 中国坡面水蚀预报模型[J]. 泥沙研究,2005(1):1-6.

[7] 谢淑琴,刘予伟. 西江流域水资源及其特性[J]. 人民长江,2003(10):44-45.

[8] 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.

[9] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.

[10] Sharply A N, Williams J R. EPIC-erosion/Productivity impact calculator: Model documentation[R]. Washington;

United States Department of Agriculture, 1990.

[11] 张科利,彭文英,样红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):8-13.

[12] 刘斌涛,宋春风,史展,等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. 中国水土保持,2015(8):49-51,77.

[13] 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.

[14] 刘斌涛,宋春风,史展,等. 芦山地震灾区土壤流失方程研究[J]. 长江科学院院报,2016(1):15-19.

[15] 王小燕,李朝霞,徐勤学,等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学,2011,9(1):115-120.

[16] Martinez M, Lane L J, Fogel M M. Experimental Investigation of Soil Detachment by Raindrop Impacts [Z]. Agricultural Reviews and Manuals ARMW, 1979:152-155.

[17] 符素华,路炳军,叶芝菡. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(2):15-18.

[18] 王济,蔡雄飞,雷丽,等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶,2010,29(1):1-5.

[19] 胡顺光,张增祥,夏奎菊. 遥感石漠化信息的提取[J]. 地球信息科学学报,2010(6):870-879.

[20] 岳跃民,王克林,张兵,等. 喀斯特石漠化信息遥感提取的不确定性[J]. 地球科学进展,2011(3):266-274.

[21] 文安邦,张信宝,王玉宽,等. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):140-141.

[22] 许炯心. 三峡水库修建前长江宜昌—武汉段泥沙输移比及其影响因子[J]. 山地学报,2008,26(1):15-25.

[23] 景可,焦菊英,李林育,等. 中国南方红壤丘陵区土壤侵蚀量与泥沙输移比研究[J]. 水利学报,2010,41(12):1476-1482.

[24] 马琨,王兆赛,陈欣. 红壤坡面产流产沙与养分流失特征研究[J]. 宁夏农学院学报,2003,24(2):3-7.

[25] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等. 基于 AnnAGNPS 模型的大宁河流域泥沙输移比评价[J]. 水土保持通报,2009,29(3):154-158.

[26] 陈强,常恩福,毕波,等. 滇东南岩溶地区 3 种退耕还林模式的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报,2006,20(5):1-4.

[27] 郑悦华,张晓远,刘协亭. 基于 GIS 的粤北青莲水流域水土流失成因分析[J]. 广东水利电,2016(5):24-28.