

钱庆欢,白晓永,周德全,等.基于RULSE模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J].人民珠江,2018,39(2):19-25.

基于 RULSE 模型的北盘江流域土壤侵蚀研究

钱庆欢^{1,2},白晓永²,周德全¹,肖建勇^{1,2},陈飞^{1,2},李颖^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550000;

2. 中国科学院地球化学研究所环境与地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 基于 GIS 与 RS 技术, 利用 RULSE 模型, 结合遥感影像、DEM、降雨量、土壤类型、NDVI、土地利用等基础数据, 研究北盘江流域的土壤侵蚀空间分布特征, 进一步分析土壤侵蚀强度空间变化与坡度、土地利用类型等因子间的关系。结果表明: ①北盘江流域内较低侵蚀等级的分布主要以块状为主, 在整个流域的上中下游皆有分布, 较高侵蚀等级的分布主要以条带状为主, 条带的延展方向与河流基本相一致; ②土壤侵蚀面积最大的坡度为 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 和 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 两个坡度带, 占土壤总侵蚀面积比率的 61.08%, 同时也是土壤侵蚀量最大的两个坡度带, 占到总侵蚀总量的 60.74%, 此外, 15° 是土壤侵蚀发生变化的一个显著界限, 在坡度小于 15° 时, 土壤侵蚀面积比率大于土壤侵蚀量比率, 而当坡度大于 15° 时, 土壤侵蚀面积比率小于土壤侵蚀量比率; ③在各土地利用类型中, 侵蚀面积和侵蚀量最大的土地利用类型是林地, 其次是草地, 两者合计占到总侵蚀面积的 74.32%, 占总侵蚀量的 80.24%。

关键词: 土壤侵蚀; RULSE; GIS; 空间分布; 环境因子; 北盘江流域

中图分类号: S157.1 文献标识码: B 文章编号: 1001-9235(2018)02-0019-07

Study on Soil Erosion in Beipanjiang River Basin Based on RULSE Model

QIAN Qinghuan^{1,2}, BAI Xiaoyong², ZHOU Dequan¹, XIAO Jianyong^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, LI Ying^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Sciences, GuiZhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Based on the GIS and RS techniques, the spatial distribution characteristics of soil erosion in the Beipanjiang River Basin were studied by using the RULSE model and the basic data of remote sensing image, DEM, rainfall, soil type, NDVI and land use. The relationship between some factors (such as spatial variation of soil erosion intensity, slope, land use type etc.) were further analyzed. The results showed that ①The distribution of lower erosion grade in the Beipanjiang River basin was mainly as mass, and it was distributed in the middle and lower reaches of the whole basin. The distribution of the higher erosion grade was mainly as strip, and its direction was consistent with the river; ②The maximum slopes of the soil erosion area were $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ and $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, that accounted for 61.08% of the total soil erosion area. While there were the largest slope of soil erosion, accounting for 60.74% of the total erosion. In addition, this paper found that 15° was a significant boundary of soil erosion changes. When the slope was less than 15° , soil erosion area ratio was greater than soil erosion ratio; When the slope was more than 15° , it would be the reverse; ③Among the land use types, the largest land use types of erosion area and erosion amount were woodland, followed by grassland, which accounted for 74.32% and 80.24% of total erosion area and total erosion, respectively.

Keywords: soil erosion; RULSE; GIS; spatial distribution; Environmental factors; Beipanjiang River Basin

土壤资源是地球表面维持生态系统的重要组成部分。受不合理的人类活动的影响, 土壤侵蚀不仅使本来拥有土地

资源遭到破坏, 导致土壤退化、引起土地生产力下降^[1], 而且造成沟渠塘库的淤积, 加剧洪涝、干旱等灾害的发生, 对土壤

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFC0502300; No. 2016YFC0502102)

收稿日期: 2017-11-07

作者简介: 钱庆欢, 男, 主要从事自然资源开发利用与生态环境效应研究。E-mail: 1106202129@qq.com

通讯作者: 周德全, 男, 主要从事自然资源开发利用与生态环境效应研究。E-mail: 1460176514@qq.com

结构、农业生产、水质和环境,以及区域可持续发展构成严重威胁^[2]。随着人们对耕地的需求日益增大,土壤侵蚀已成为全球性的重大生态环境问题之一^[3]。

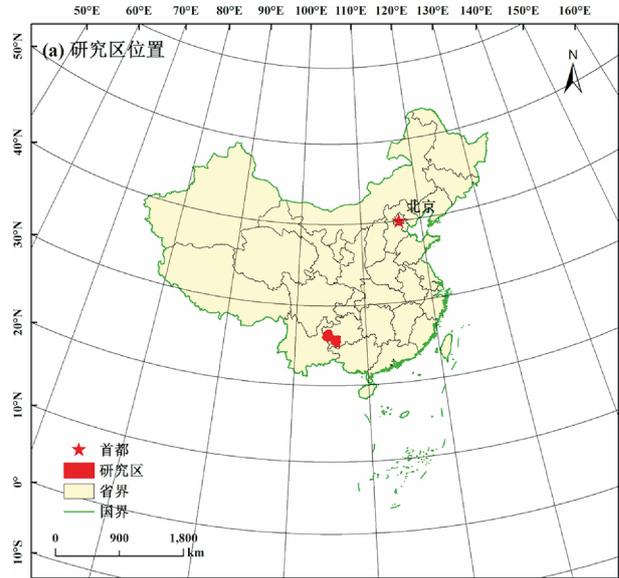
在国家、地区、流域等较大空间尺度上,定量估算土壤侵蚀量和分析土壤侵蚀的空间分布特征是水土流失治理和水土保持宏观决策的关键^[4-5]。运用模型的方法开展定量测度是土壤侵蚀研究的常用手段。20 世纪 60 年代,美国学者 Wischmeier^[6] 等最早建立了通用土壤流失方程 (USLE)。随着农业开发的需要,美国学者对 USLE 局限性进行修正,研发了 RUSLE 模型^[7]。该模型与土壤侵蚀密切相关的各种自然与人文因子出发,研究土壤侵蚀与这些因子的关系。随着 RS 和 GIS 的快速发展,RUSLE 被广泛地应用在一些区域的相关研究。Lu^[8] 等以 RUSLE 为研究方法,利用 GIS 技术完成澳大利亚片蚀和沟蚀的定量预测和制图;Ranzi^[9] 等利用 RUSLE 模型计算了越南北部地区河流的悬移质;Alkharabsheh^[10] 等基于 RUSLE 模型研究了约旦北部农业区的土壤侵蚀变化对土地覆盖变化的响应。任志远^[11] 等估算了中国西北地区土壤现实侵蚀量与潜在侵蚀量,并进行土壤保持效益分区;Rao^[12] 等估算了中国土壤保持功能的分布及其影响;谢永生^[13] 研究了洞庭湖、潘阳湖流域水土流失特点与防治对策;李忠武^[14] 等以长沙市为例研究了红壤丘陵区脆弱生态系统条件下的土壤侵蚀;许月卿^[15] 等研究了不同土地利用结构下贵州省猫跳河流域土壤侵蚀的经济损失;陈龙^[16] 等研究了澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布;肖洋^[17] 等估算了重庆地区土壤侵蚀量、土壤保持量和土壤保持价值。这些学者应用 RUSLE 模型开展不同方面的研究,取得一系列的研究成果,使研究方式由定性研究逐渐转变为定量研究。

北盘江属珠江流域西江上源红水河的一级支流,流经云南、贵州两省,多处为滇黔界河。本研究根据 RUSLE 模型,运用 GIS 空间分析技术,揭示北盘江流域土壤侵蚀空间分布特征,探讨土壤侵蚀空间分布与坡度和土地利用等环境因子的关系。对水土流失防治划定重点保护区,确认水土流失关键因子提供科学依据,为开展生态环境恢复与保护工作提供决策参考。

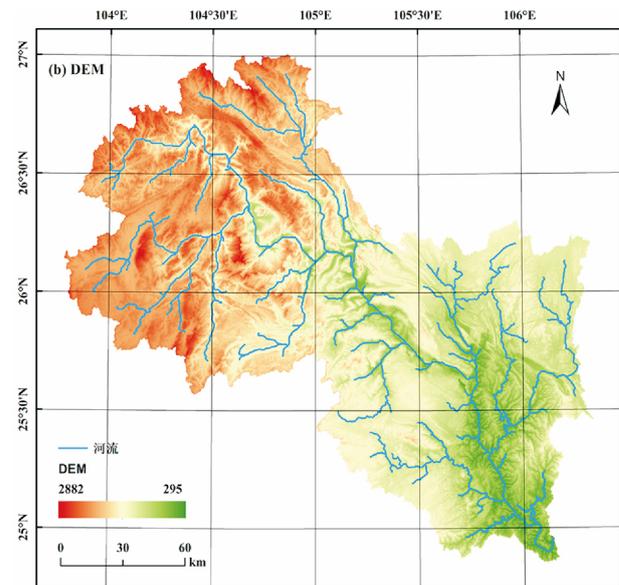
1 研究区概况

北盘江流域位于云贵高原斜坡地带,见图 1,地处东经 103°50′~106°20′,北纬 24°51′~26°45′。地势西北高东南低,东接黔中高原丘陵盆地,南部与南盘江相接。流域范围包括云南的沾益、宣威、富源,贵州的水城、六枝、盘县、普安、晴隆、兴仁、安顺、紫云、镇宁、普定等 20 个县市、特区的全部或一部分。在上游分水岭地区残存的高原面起伏和缓呈缓丘山原地貌,相对高差较小;其余地区则河谷深切狭窄,山势陡峻,相对高差较大。流域内石灰岩分布面广,岩溶发育,井泉洞穴、岩溶洼地,地下伏流河段、跌差瀑布都较多,以打帮河上源白水河上的黄果树瀑布最大。流域气候复杂多变,年平均降雨量 1 300 mm,以黔西南为多雨区,多雨中心在册亨、

兴仁与普安之间,仅上游威宁、水城一带为少雨区。流域内平均气温 16℃,西北部较低为 14℃,东南部较高为 20℃左右。



a) 研究区位置



b) 研究区 DEM

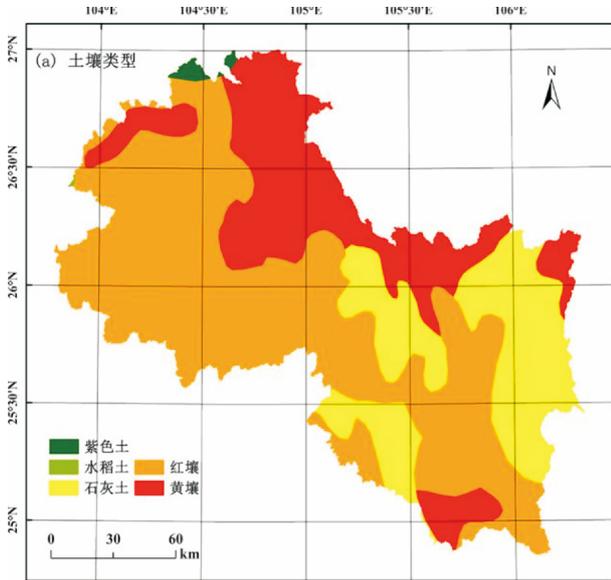
图 1 研究区位置和 DEM

2 数据来源与研究方法

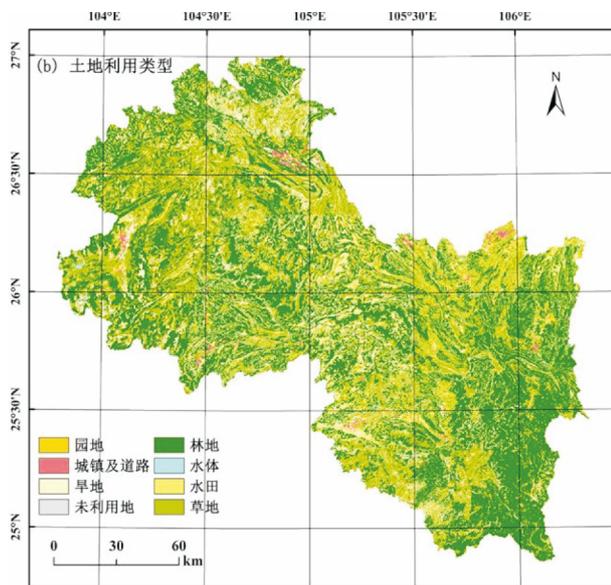
2.1 数据来源

本文所使用的原始数据包括研究区分辨率为 90 m 的数值高程模型 (DEM) 数据,来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>); 云南、贵州、四川、广西四省份共 10 个国家级气象站点日降水数据,来源于中国气象数据共享服务网 (<http://data.cma.cn>); 研究区 2015 年土地利用数据,研究区土壤类型及土壤质地数据,见图 2,来源于中国科学院资源环

境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>); 研究区土壤有机质数据, 通过查阅《中国土种志》获取; 研究区 2015 年 MODIS 中国合成产品 500 m NDVI 月合成数据, 来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。



a) 研究区土壤类型



b) 研究区土地利用类型

图2 研究区土壤类型与土地利用类型

2.2 土壤侵蚀模型

本文采用目前应用最为广泛的修正土壤流失模型 (RULSE) 进行研究区土壤侵蚀的量化, 表达方程式如下:

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

式中 A ——土壤侵蚀模数, $t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$; R ——降雨侵蚀力因子, $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$; K ——土壤可蚀性因子, $t \text{ hm}^2 \text{ h MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; L ——坡长坡度因子; C ——

地表植被覆盖与管理因子; P ——水土保持措施因子。

2.2.1 降雨侵蚀力 (R)

降雨是导致土壤侵蚀的主要驱动因素, 雨滴溅击和径流剥蚀地表是土壤侵蚀的主要表现形式。降雨的时空分布在一定程度上决定了土壤侵蚀的空间分布规律。降雨侵蚀力因子 R 是一项评价降雨引起土壤分离和搬运能力的动力指标, 反应了降雨对土壤侵蚀的潜在能力。胡续礼^[18] 等通过对 CREAMS 模型、Richardson 模型、郭新波修正模型 3 个日雨量模型的验证对比, 结果表明 CREAMS 模型有着更好的稳定性。因此, 本研究采用 CREAMS 模型计算降雨侵蚀力:

$$R = 1.03 \cdot P_i^{1.51} \cdots (P_i \geq P_o) \quad (2)$$

式中 R ——降雨侵蚀力, $(t \text{ hm}^2 \text{ h MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1})$; P_i ——日降水量, mm ; P_o ——侵蚀性降雨标准, $P_o \geq 12$ 。

2.2.2 土壤可蚀性因子 (K)

K 值反应土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运的难易程度, 是土壤抵抗侵蚀力的综合体现, 与降雨、径流、土壤内部结构、坡面渗透性以及土壤有机质含量密切相关。不同的土壤类型 K 值大小不同, K 值越大, 土壤受侵蚀的可能性越大, 反之越小。本研究选择 Williams^[19] 等提出的 EPIC 模型公式计算 K 值, 公式如下:

$$K = 0.1317 \{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256SAN(1 - \frac{SIL}{100})] \times (\frac{SIL}{CAL + SIL})^{0.3} \times [1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}] \times [1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.9SN - 5.51)}] \} \quad (3)$$

式中 SAN ——砂粒含量百分比; SIL ——粉砂含量百分比; CAL ——黏粒含量百分比; C ——有机质含量百分比; $SN = 1 - SAN/100$ 。

2.2.3 坡长坡度因子 (L)

地形是影响土壤侵蚀的基本自然地理要素, 影响着土壤和植被的形成和发展, 制约着地表物质和能量的再分配, 决定着地表径流的运动状态和方向。本研究采用 90 m 分辨率的 DEM 数据提取坡长坡度因子, 由于通用土壤流失方程中坡度 S 因子计算公式是根据美国耕地坡度来建立的经验公式, 美国耕地坡度普遍小于 11.3° ^[20], 这与研究区的实际情况不符。因此, 本文借鉴刘宝元^[21] 等对坡度因子分段计算修正公式。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin\theta + 0.03 \cdots \cdots \cdots (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin\theta - 0.5 \cdots \cdots \cdots (5^\circ \leq \theta \leq 14^\circ) \\ 21.9 \sin\theta - 0.96 \cdots \cdots \cdots (14^\circ \leq \theta) \end{cases} \quad (4)$$

坡长因子计算公式采用 Wischmeier · W · H^[22] 等提出的坡面每一段的 L 因子算法:

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

式中 λ ——特定的集水面积, m^2 ; 22.13——标准小区的坡长, m ; θ ——坡度; α ——坡长因子指数, 参照 Mo-cool^[23] 等对坡度因子的算法:

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

$$\beta = (\sin\theta/0.0896) / (3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56) \quad (6)$$

2.2.4 植被覆盖与管理因子(C)

C 是在相同的土壤、坡度、降雨条件下,某一特定作物或植被情况时的土壤流失量与耕种过后连续休闲地的土壤流失量比值。C 是侵蚀动力的抑制因子,起着保持水土的作用,其取值范围为 0~1。C 因子由植被类型、覆盖度、高度、叶面积指数等因素决定,不同植被类型在不同生长期 C 值大小亦不相同。参照 Knijff^[24] 等对 C 的计算:

$$C = \exp(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}) \quad (7)$$

式中 α, β ——决定 NDVI-C 关系曲线的参数, $\alpha = 2, \beta = 1$ 是一个合理的取值。

2.2.5 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子是指采取水土保持措施之后的土壤流失量相对于顺坡种植时土壤流失量的比率。其值位于 0~1 之间,0 值代表不会发生土壤侵蚀,1 值代表没有采取任何水土保持措施的地区。分析研究区的地形特点、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许月卿^[15]、陈思旭^[20] 等研究成果,确定研究区水土保持措施因子 P 值,见表 1。

表 1 不同土地利用类型 P 值

土地利用类型	P	土地利用类型	P
林地	1	旱地	0.4
灌木林	1	水田	0.15
疏林地	1	水体	0
果园	0.7	城镇及道路	0
草地	1	未利用地	1

3 结果分析与讨论

3.1 研究区土壤侵蚀空间分布特征

RULSE 的各因子空间分布和土壤侵蚀等级,见图 3。对研究区的土壤侵蚀模数进行统计,平均土壤侵蚀模数为 3 432.68 t/(km²·a¹),土壤侵蚀总量为 1.04 × 10⁸ t/a,土壤侵蚀面积为 3.02 × 10⁴ km²。

从空间上来看,研究区土壤侵蚀呈现块状分布和带状分布的特征。其中,较低侵蚀等级的分布主要以块状为主,在整个流域的上中下游皆有分布;较高侵蚀等级的分布主要以条带状为主,条带的延展方向与河流的水流方向基本相一致。这样的分布特征是受制于地形影响的结果。在流域的分水岭地区,以起伏和缓的高原面为主,相对高差较小;其余地区则河谷深切狭窄,山势较为陡峻,相对高差较大。在流域的东南方向,则由于长期的水流作用形成侵蚀山地与山间小盆地。

各侵蚀等级的侵蚀面积,见表 2,流域土壤侵蚀以轻度、微度侵蚀和中度侵蚀为主,分别占到总侵蚀面积的 32.23%、27.31% 和 18.26%,三者合计占到总侵蚀面积的 78.3%。强

度及以上侵蚀等级的侵蚀面积较少,仅占总侵蚀面积 21.8%,其中强度侵蚀为 10.36%,极强度侵蚀为 8.14%,剧烈侵蚀为 3.31%。总体而言,侵蚀等级越高,占总侵蚀面积的比例也就越低,呈现出降低趋势。

从各侵蚀等级对总侵蚀量的贡献上来看,对流域总侵蚀量贡献最大的是极强度侵蚀和剧烈侵蚀,分别占总量的 25.39% 和 21.74%,二者以近 1/10 的侵蚀面积(11.45%)贡献了总侵蚀量的近一半(47.13%)。其次是中度侵蚀与强度侵蚀,分别占到侵蚀总量的 19.39% 和 19%。而占到总侵蚀面积 60.04% 的轻度与微度侵蚀,对总侵蚀量的贡献率仅为 14.5%。总体而言,侵蚀等级越高,对总侵蚀量的贡献率就越大。

表 2 不同土壤侵蚀等级统计

土壤侵蚀等级	侵蚀面积/km ²	面积百分比/%	土壤侵蚀量/(10 ⁵ t·a ⁻¹)	侵蚀量百分比/%	平均土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² a ⁻¹)
微度	8 372.52	27.71	12.50	1.21	149.35
轻度	9 769.19	32.33	137.84	13.29	1 410.93
中度	5 519.04	18.26	201.13	19.39	3 644.20
强度	3 099.11	10.36	197.06	19	6 358.71
极强度	2 458.42	8.14	263.34	25.39	10 711.84
剧烈	1 001.33	3.31	225.47	21.74	22 517.68

3.2 研究区土壤侵蚀与环境因子的关系

3.2.1 土壤侵蚀坡度分布特征

地形坡度是土壤侵蚀的主要影响因素,依据中华人民共和国水利部土壤侵蚀分类分级标准将坡度划分为 6 个带,统计各坡度带土壤侵蚀情况,见表 3、4。土壤侵蚀面积最大的坡度为 8°~15° 和 15°~25° 两个坡度带,占土壤总侵蚀面积比率的 61.08%,同时也是土壤侵蚀量最大的两个坡度带,占到总侵蚀总量的 60.74%;0°~5° 和 5°~8° 两个坡度带的土壤侵蚀面积分别占总侵蚀面积的 12.58% 和 12.04%,两者的土壤侵蚀量比率分别为 6.78% 和 8.47%;25°~35° 和大于 35° 两个坡度带的土壤侵蚀面积比分别为 11.29% 和 3.01%,是侵蚀面积比中最小的两个坡度带,两者占土壤总侵蚀量的比率分别为 17.03% 和 6.97%。

总的来说,8°~15° 和 15°~25° 两个坡度带,是侵蚀发生面积最大的两个坡度带,也是流域产沙来源的主要坡度带,这与流域内的坡耕地大量集中在此坡度带有关,因此,8°~15° 和 15°~25° 两个坡度带,应是今后水土保持措施实施的重点区域。研究发现,平均侵蚀模数与坡度具有正相关性,即平均侵蚀模数随坡度的增大而增大。此外,我们还发现 15° 是土壤侵蚀发生变化的一个显著界限,在坡度小于 15° 时,土壤侵蚀面积比率大于土壤侵蚀量比率,而当坡度大于 15° 时,土壤侵蚀面积比率小于土壤侵蚀量比率,15° 以上的坡度带以较小的面积贡献了较多的侵蚀量,是土壤侵蚀的主

要贡献带。

表 3 不同坡度等级的土壤侵蚀

坡度/ (°)	土壤侵蚀		土壤侵		侵蚀总量		平均土壤 侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
	面积/ km ²	百分比/ %	蚀总量/ (10 ⁵ t·a ⁻¹)	百分比/ %	侵蚀总量 百分比/ %		
0~5	3 802.11	12.58	70.36	6.78	1 850.43		
5~8	3 639.8	12.04	87.91	8.47	2 415.11		
8~15	9 357.94	30.97	280.47	27.04	2 997.15		
15~25	9 099.04	30.11	349.58	33.70	3 841.96		
25~35	3 410.78	11.29	176.70	17.03	5 180.65		
>35	909.94	3.01	72.33	6.97	7 948.55		

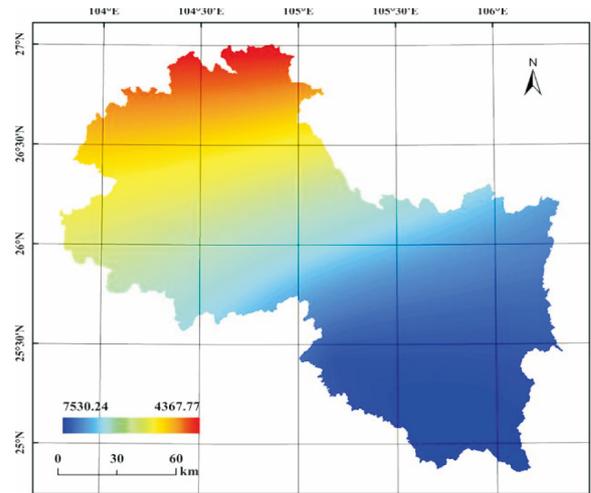
3.2.2 土壤侵蚀土地利用分布特征

土地利用的差异在研究区主要表现在植被覆盖度和植被类型上,对研究区不同土地利用类型的土壤侵蚀强度进行分类统计,见表 4、图 3、4。在各土地利用类型中,就侵蚀面积而言,以林地占比最大为 46.63%,其次是草地为 27.69%,耕地占总面积的 24.54%,其中旱地占 15.98%,水田占 8.56%;水体、建筑用地和未利用地三者占总面积的比例皆小于 1%,分别为 0.21%,0.92%和 0.01%。就平均侵蚀模数而言,以未利用地和草地最高,其次分别为林地、旱地、建筑用地和水田。就侵蚀量而言,以林地最高为 45.88%,草地次之为 34.36,两者合计占到总侵蚀量的 80.24%;耕地对流域总侵蚀的贡献率为 18.92%,其中旱地为 13.55%,水田为 5.37%。

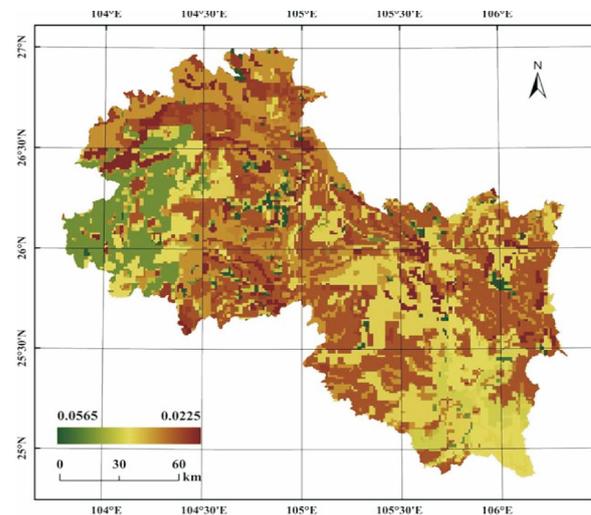
总体而言,林地和草地是流域内主要的土壤侵蚀类型,二者以 74.32%的侵蚀面积,产生了占总侵蚀量 80.24%的泥沙。林地和草地形成较大输沙量有两方面的原因,首先是林地和草地两种土地利用类型具有较大的面积体量,输沙量随着面积占比的增加而增加;其次是在林地和草地类型中包含有大量低郁闭度和低覆盖度的疏林地与中低覆盖草地,对水土的保持能力低于预期,在林地类型中疏林地占到总比例的 53.91%,在草地类型中中低覆盖草地占到总比例的 75.99%。

表 4 不同土地利用类型的土壤侵蚀

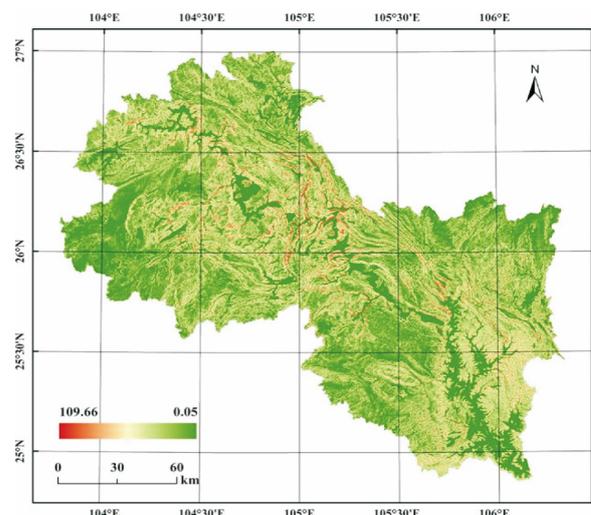
土地利 用类型	土壤侵		土壤侵		侵蚀总量		平均土壤 侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
	蚀面积/ km ²	百分比/ %	蚀总量/ (10 ⁵ t·a ⁻¹)	百分比/ %	侵蚀总量 百分比/ %		
水田	2 586.52	8.56	55.68	5.37	2 152.71		
旱地	4 829.10	15.98	140.58	13.55	2 911.08		
林地	14 091.16	46.63	475.92	45.88	3 377.46		
草地	8 367.71	27.69	356.44	34.36	4 259.74		
水体	63.85	0.21	0.73	0.07	1 143.24		
建筑用地	277.23	0.92	7.79	0.75	2 810.13		
未利用地	2.88	0.01	0.16	0.02	5 570.49		



a) 降雨侵蚀力

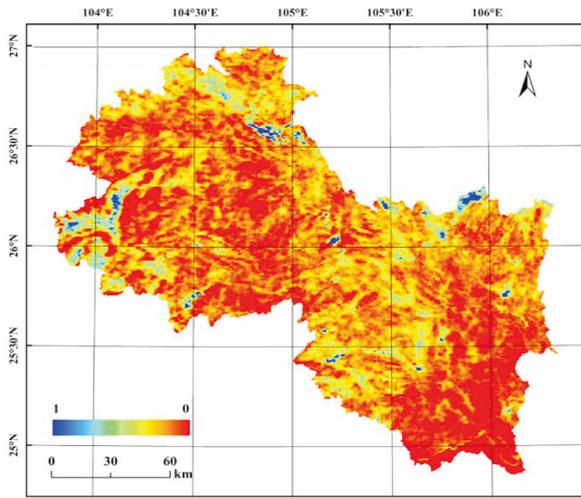


b) 土壤可蚀性

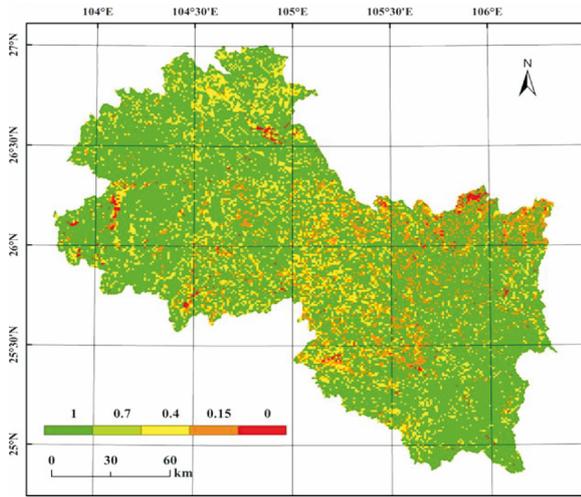


c) 坡度坡长因子

图 3 RULSE 各因子图层



d) 植被覆盖管理



e) 土壤保持措施

续图 3 RULSE 各因子图层

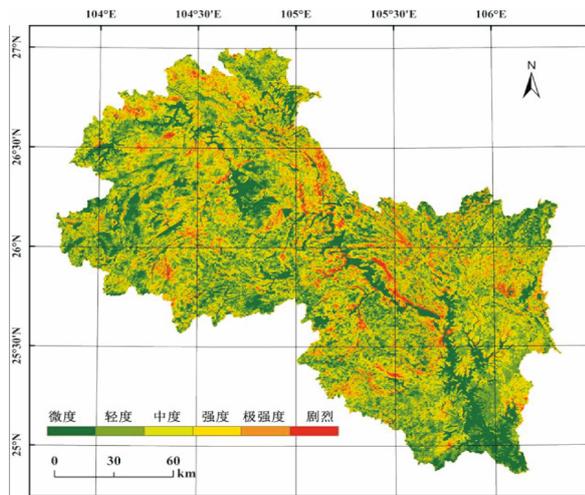


图 4 土壤侵蚀空间分布

4 结论

本文基于 GIS 与 RULSE 模型对北盘江流域土壤侵蚀的空间分布特征进行了分析,得出如下结论。

a) 北盘江流域内的土壤侵蚀总量为 1.04×10^8 t/a, 土壤侵蚀面积为 3.02×10^4 km² 平均土壤侵蚀模数为 3 432.68 t/(km²·a)。从空间上来看,较低侵蚀等级的分布主要以块状为主,在整个流域的上中下游皆有分布;较高侵蚀等级的分布主要以条带状为主,条带的延展方向与河流的水流方向基本相一致。

b) 在不同坡度带上,8°~15°和 15°~25°两个坡度带是侵蚀发生面积最大的两个坡度带,也是流域产沙来源的主要坡度带。平均侵蚀模数与坡度具有正相关性,随坡度的增加而增大;15°是土壤侵蚀发生变化的一个显著界限,在坡度小于 15°时,土壤侵蚀面积比率大于土壤侵蚀量比率,而当坡度大于 15°时,土壤侵蚀面积比率小于土壤侵蚀量比率。

c) 在各土地利用类型中,侵蚀面积和侵蚀量最大的土地利用类型是林地,其次是草地,两者合计占到总侵蚀面积的 74.32%,占总侵蚀量的 80.24%。再次之的是耕地,其中旱地占侵蚀面积 15.98%,侵蚀量的 13.55%;水田占侵蚀面积的 8.56%,侵蚀量的 5.37%。

参考文献:

- [1] 张燕,彭补拙,高翔,等. 人类干扰对土壤侵蚀及土壤质量的影响——以苏南宜兴低山丘陵区为例[J]. 地理科学,2002(3): 336-341.
- [2] 潘剑君,赵其国,张桃林. 江西省兴国县、余江县土壤侵蚀时空变化研究[J]. 土壤学报,2002(1): 52-58.
- [3] QIAO Y, YUN Q. Fast soil erosion investigation and dynamic analysis in the loess plateau of China by using information composite technique[J]. Advances in Space Research, 2002, 29(1): 85-88.
- [4] 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(5): 802-809.
- [5] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展,2006(8): 849-856.
- [6] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning[J]. Agriculture Handbook, 1978.
- [7] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [J]. Agriculture Handbook, 1997.
- [8] LU H, GALLANT J, PROSSER I P, et al. Prediction of Sheet and Rill Erosion Over the Australian Continent, Incorporating Monthly Soil Loss Distribution[J]. 2001.
- [9] RANZI R, LE T H, RULLI M C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 422-423(5): 17-29.
- [10] ALKHARABSHEH M M, ALEXANDRIDIS T K, BILAS G, et al.

- Impact of Land Cover Change on Soil Erosion Hazard in Northern Jordan Using Remote Sensing and GIS [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 19(12): 912-921.
- [11] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被保持土壤效应评估 [J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 610-617.
- [12] RAO E, OUYANG Z, YU X, et al. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China [J]. *Geomorphology*, 2014, 207(1): 64-70.
- [13] 谢永生. 长江中游洞庭湖、鄱阳湖流域水土流失特点与防治对策 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999(1): 9-13.
- [14] 李忠武, 张棋, 曾光明, 等. 基于 GIS 的红壤丘陵区脆弱生态系统土壤侵蚀研究——以长沙市为例 [J]. *资源科学*, 2006(5): 201-206.
- [15] 许月卿, 黄靖, 冯艳, 等. 不同土地利用结构下的土壤侵蚀经济损失——以贵州省猫跳河流域为例 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1451-1456.
- [16] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 等. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2249-2256.
- [17] 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 等. 基于 GIS 重庆土壤侵蚀及土壤保持分析 [J/OL]. *生态学报*, 2015, 35(21): 7130-7138.
- [18] 胡续礼, 姜小三, 杨树江, 等. 利用日雨量模型进行伏牛山区降雨侵蚀力的初步研究 [J]. *水土保持研究*, 2006(3): 195-197.
- [19] WILLIAMS J, ARNOLD J. A system of erosion-sediment yield models [J]. *Soil technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [20] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵区土壤侵蚀研究 [J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [21] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes. [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 64(5): 1759-1763.
- [22] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning [J]. *dept of Agriculture*, 1978, 537.
- [23] 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 Asae*, 1989, 30(5): 1387-1396.
- [24] KNIJFF J M V D, JONES R J A, MONTANARELLA L. Soil Erosion Risk Assessment in Europe [C]// *ACM Conference on Electronic Commerce*, 2000.

(责任编辑: 李泽华)