

基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析

陈正发^{1,2}, 龚爱民^{1,2}, 宁东卫^{1,2}, 张刘东^{1,2}, 王建雄^{1,2}, 相彪^{1,2}

(1. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201; 2. 云南省农业节水工程技术研究中心, 昆明 650201)

摘要: 准确评估区域土壤侵蚀和养分流失空间分布特征, 是开展区域水土保持规划和生态治理的基础。基于 GIS 空间分析技术和 RUSLE 模型, 对云南省土壤侵蚀和养分流失特征进行定量化分析。结果表明: 云南省土壤侵蚀面积为 $1\,835.91 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总面积的 48.07%, 平均侵蚀模数为 $15.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 土壤侵蚀以微度侵蚀、轻度侵蚀为主, 但极强烈侵蚀、剧烈侵蚀是区域侵蚀产沙的主要来源。滇西南区土壤侵蚀强度较大, 而滇西北区土壤侵蚀强度较小。区域土壤侵蚀主要发生在夏季, 旱地是区域侵蚀产沙的主要策源地。流失土层厚度集中分布在 $0 \sim 2 \text{ mm/a}$, 平均土层流失厚度为 1.19 mm/a 。土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)的平均流失模数分别为 $820.00, 55.19, 3.32, 0.32 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 4 种养分流失量空间分布均存在一定的聚集特征, 总体表现为滇西区等西部区域大于东部区域。研究结果可为云南省水土保持规划和水土流失生态环境建设提供科学依据。

关键词: RUSLE 模型; 土壤侵蚀; 侵蚀危害性评价; 养分流失; GIS; 云南

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0007-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.06.002

Characteristics of Soil Erosion and Nutrient Loss in Yunnan Province Based on RUSLE Model

CHEN Zhengfa^{1,2}, GONG Aimin^{1,2}, NING Dongwei^{1,2},

ZHANG Liudong^{1,2}, WANG Jianxiong^{1,2}, XIANG Biao^{1,2}

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

2. Research Center of Agricultural Water Saving Engineering and Technology in Yunnan Province, Kunming 650201)

Abstract: Accurate assessment of spatial distribution characteristics of soil erosion and nutrient loss is the basis of regional soil and water conservation and ecological environment governance. Based on GIS spatial analysis technology and RUSLE model, soil erosion and nutrient loss were quantitatively evaluated in Yunnan Province. The results showed that the soil erosion area was $1\,835.91 \times 10^4 \text{ hm}^2$ in Yunnan Province, accounting for 48.07% of the total area, and the mean annual erosion modulus was $15.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ with a total of $597.52 \times 10^6 \text{ t/a}$ of potential soil loss. The intensity of soil erosion was mainly micro-erosion and mild erosion, but extremely strong erosion and severe erosion were the main sources of sediment yield. The soil erosion intensity was higher in southwestern Yunnan and lower in northwestern Yunnan. Soil erosion mainly occurred in summer (June-August), and dry land was the main source of sediment yield. The thickness of the lost soil layer was mainly distributed between 0 and 2 mm/a, and the average value was 1.19 mm/a. As the thickness of the lost soil layer increasing, the proportion of the corresponding area presented a decreasing trend. The average loss modulus of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available potassium (AK) and available phosphorus (AP) was $820.00 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $55.19 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $3.32 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $0.32 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, respectively. The spatial distribution of the four nutrient losses had certain aggregation characteristics, and the overall performance was that the western region was larger than the eastern region. These findings could provide scientific basis for water and soil conservation planning and ecological environment construction in Yunnan Province.

Keywords: RUSLE model; soil erosion; erosion hazard assessment; nutrient loss; GIS; Yunnan Province

收稿日期: 2021-05-06

资助项目: 云南农业大学引进人才科研启动项目(A2032021031)

第一作者: 陈正发(1985—), 男, 云南砚山人, 博士, 讲师, 主要从事水土生态工程方面的研究。E-mail: chenzhengfa2013@126.com

通信作者: 宁东卫(1977—), 男, 山西运城人, 硕士, 讲师, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: 674057066@qq.com

土壤侵蚀作为全球性环境问题,是全球变化的重要组成部分^[1]。导致土壤侵蚀的驱动力较多,其中人类不合理的土地利用是加速土壤侵蚀的主要原因^[2]。土壤侵蚀使表土层变薄、带走土壤养分,导致土壤退化,土地生产力下降^[3]。侵蚀泥沙及其伴随的养分流失也会对生态环境造成污染,土壤侵蚀成为规模最大、危害程度最为严重的非点源污染^[4]。因此,土壤侵蚀及其养分流失研究已成为环境科学和农业科学研究人员共同关注的热点课题。定量评估区域土壤侵蚀分布特征是制定水土保持生态环境治理规划的基础和前提^[5]。

目前,国内外土壤侵蚀研究主要集中在土壤侵蚀机制、预测模型、水土保持措施及生态环境效应等方面。在土壤侵蚀预测模型方面,常用的模型包括经验统计模型、物理成因模型等^[6]。从模型适用的空间尺度来看,一般包括坡面尺度模型、流域尺度模型和区域尺度模型^[7],其中以流域尺度模型为主。国内外常用的土壤侵蚀预测模型主要包括 USLE/RUSLE、WEPP、EPM、EUROSEM、AGNPS 等模型,不同模型的输入参数、适宜条件、预测精度存在差异^[8]。其中,USLE/RUSLE 模型因其结构简单,所需参数较少,对平均土壤侵蚀量预测较准确等特点,在世界各地得到了广泛运用^[9]。从模型运用的空间尺度来看,基于 USLE/RUSLE 模型的土壤侵蚀研究既包括坡面、流域尺度,同时也包括区域尺度。近年来,有学者^[10-11]开展了基于 GIS 和 RUSLE 模型的区域土壤保持功能演变和水土保持生态服务功能评价方面的研究,取得了部分研究成果。

土壤有机质和养分作为土壤质量评价的重要指标,其含量的大小是衡量耕地土壤质量高低的重要标准^[12]。侵蚀过程土壤有机质和养分随着侵蚀泥沙和地表径流迁移,一方面成为农业面源污染的重要来源^[4],另一方面也降低了耕地养分含量,从而使耕地质量下降^[13]。土壤有机质在维持耕层土壤物理、化学和生物学特征中起着关键性作用^[14],而坡面土壤侵蚀使土壤有机质通过泥沙和径流损失,破坏了耕层土壤物理、化学和生物结构性能,进而降低土壤质量。N、P、K 等养分含量是土壤质量评价的重要指标,养分含量的高低对土壤质量产生直接的影响^[15]。养分流失使表层土壤 N、P、K 等养分含量减小,最终导致土壤质量降低、耕地发生侵蚀退化,并导致水体污染。近年来,部分学者^[16]采用 USLE/RUSLE 模型对流域或区域尺度养分流失规律进行了研究,拓展了 USLE/RUSLE 模型的运用范围。但总体而言,基于 USLE/RUSLE 模型的区域尺度土壤侵蚀研究主要关注土壤流失,对养分流失的关注相对较少。

云南省作为全球同纬度地带生物多样性保存最完好的地区,生态环境质量总体较好,但受人为活动等因素影响,部分区域土壤侵蚀有进一步加剧的风险,土壤侵蚀和面源污染成为区域农业生产和生态环境建设的重要障碍因素。基于此,本文在前人研究基础上,基于 GIS 空间分析技术和 RUSLE 模型,对云南省土壤侵蚀和养分流失进行定量化评估,为云南省水土保持规划和生态环境建设提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲、云贵高原西南部,国土面积 39 万 km²,属东亚季风和南亚季风交汇区域。国土面积 84% 为山区,丘陵和坝区平地仅占总面积的 16%,地形由山地向喀斯特地貌逐渐演变。由于生态环境演变及人类活动的共同影响,中度生态脆弱性的类型区面积占总面积的 32.02%,强度和极强脆弱的类型区面积占总面积的 53.63%^[17]。云南降雨充沛,河流众多,但在时空上分布严重不均。主要土壤类型为红壤、赤红壤、紫色土、黄壤和黄棕壤。研究^[18]表明,云南坡耕地分布面积为 472.55 万 hm²,占耕地面积的 69.79%,坡耕地占耕地的面积比重较大,坡耕地在云南农业生产活动中具有重要地位。为使本研究与区域农业生产活动保持一致,参照云南省综合农业区划,将云南划分为 7 个分区。云南 7 个分区高程及土地利用类型空间分布见图 1。

1.2 数据来源

研究区 DEM 数据来源于中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),数据空间分辨率为 30 m,该数据集利用 ASTER GDEM 数据进行加工得来。降雨数据来源于均匀分布于云南省的 36 个国家基本气象站 1951—2018 年间的降雨观测资料。土地利用来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),数据空间分辨率为 30 km;该土地利用数据基于 2015 年 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人机交互解译生成;土地利用分类包括耕地(分为水田和旱地)、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级类型。土壤分布图来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界和谐土壤数据库(HWSD),该数据空间分辨率为 1 km,采用的土壤分类系统为 FAO—90。土壤养分含量空间分布采用 2005—2015 年在云南省土壤测土配方施肥项目中获取的分县级数据集,建立全省 30 m×30 m 的土壤养分空间分布栅格图。根据云南省气候、地理特点,在 1 个年度中季节划分为 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 1、2 月为冬季。

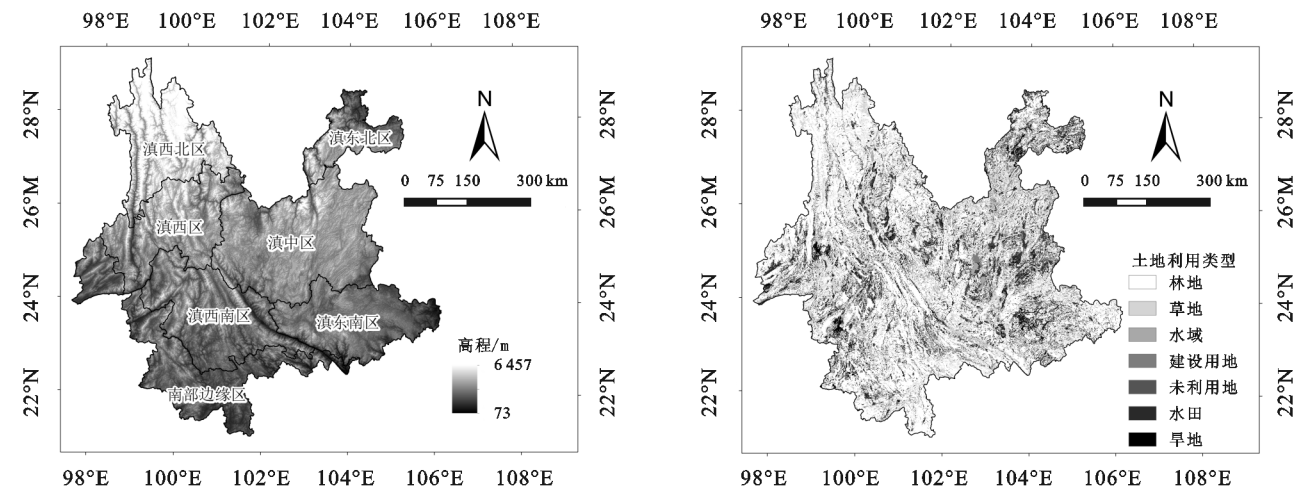


图 1 云南省高程和土地利用类型空间分布

2 研究方法

2.1 分析计算模型

2.1.1 RUSLE 模型及计算流程 采用 RUSLE 模型定量评估云南省土壤流失量,RUSLE 方程基本形式为:

$$A=KLS\textit{SCP}$$
 (1)

式中: A 为年平均土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$); R 为降雨和径流侵蚀因子($(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($((\text{t}\cdot\text{hm}\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}))$); LS 为地形因子,其中 L 为坡长因子, S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子,均为无量纲因子。

为模拟现状土壤侵蚀空间分布特征,本研究土地利用数据采用 2015 年土地利用图,并依据 1951—2018 年降雨观测资料计算逐年降雨侵蚀力,取平均值作为现状降雨侵蚀力值。采用水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)进行侵蚀强度等级划分。模型计算分析基于 Arc GIS 10.2 软件进行,分析流程为:(1)基于基础数据分别计算并获取 R 、 K 、 LS 、 C 、 P 因子空间分布;(2)基于 GIS 空间运算功能,计算各因子乘积并得到云南省土壤侵蚀空间分布;(3)采用 GIS 的空间分析功能,进一步提取土壤侵蚀空间特征参数。为确保计算结果精度,计算栅格均统一为 $30\text{ m}\times30\text{ m}$,并转换为相同的地理坐标系。

2.1.2 流失土层厚度计算模型 根据质量守恒原理,可导出流失土层厚度 ΔH 计算模型为:

$$\Delta H=\frac{A}{10\times\rho}$$
 (2)

式中: ΔH 为流失土层厚度(mm/a); A 为土壤侵蚀模数($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$); ρ 为自然状态下的土壤容重(g/cm^3),10 为单位换算系数。本研究参照水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)的估算方法,结合对云南省不同土壤类型坡面土壤容重的实测数据变化,土壤容重取值为 $1.35\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2.1.3 养分流失估算模型 参照文献[16]提出的方法,第 i 种养分物质流失量 N_i 估算公式为:

$$N_i=ER_i\times A\times W_i$$
 (3)

式中: A 为侵蚀模数($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$); ER_i 为第 i 种养分的侵蚀泥沙富集系数; W_i 为第 i 种养分在土壤中的含量(土壤有机质(SOM)的含量单位为 g/kg ,全氮(TN)的含量单位为 g/kg ,有效磷(AP)的含量单位为 mg/kg ,速效钾(AK)的含量单位为 mg/kg)。

根据已有研究^[19-20],土壤有机质的侵蚀泥沙富集系数分布在 $1.30\sim2.33$,均值为 1.64;全氮的侵蚀泥沙富集系数分布在 $1.05\sim2.99$,均值为 1.95;有效磷的侵蚀泥沙富集系数分布在 $0.84\sim1.95$,均值为 1.34;速效钾的侵蚀泥沙富集系数分布在 $1.14\sim2.17$,均值为 1.67。因此,本研究土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾的侵蚀泥沙富集系数均分别取 1.64,1.95,1.34,1.67。

2.2 RUSLE 模型因子确定

2.2.1 土壤可蚀性因子(K) 土壤可蚀性因子反映土壤承受侵蚀动力剥蚀和搬运的敏感性,是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要量化参数。本研究引用杨子生^[21]、郭志民^[22]针对土壤可蚀性 K 的研究成果,并将土壤可蚀性值转化为国际制单位, K 值取值见表 1。

表 1 云南省不同土壤类型 K 值变化

土壤类型(亚类)	K (US)	K (SI)	土壤类型(亚类)	K (US)	K (SI)
红壤	0.410	0.054	燥红土	0.34	0.044
黄红壤	0.330	0.043	褐红土	0.34	0.045
山原红壤	0.412	0.054	冲积土	0.35	0.046
红壤性土	0.420	0.055	红色石灰土	0.25	0.033
黄壤	0.380	0.050	黑色石灰土	0.31	0.041
黄壤性土	0.347	0.046	黄色石灰土	0.26	0.035
黄棕壤	0.321	0.042	酸性紫色土	0.42	0.055
暗黄棕壤	0.304	0.040	中性紫色土	0.40	0.053
棕壤	0.292	0.038	石灰性紫色土	0.40	0.052
暗棕壤	0.286	0.038	赤红壤	0.27	0.035
棕色针叶林土	0.250	0.033			

注: K (US)表示美国制单位; K (SI)表示国际制单位。

2.2.2 降雨侵蚀力因子(R) 降雨侵蚀力因子一般采用简易公式计算,但不同的简易公式计算得到的降雨侵蚀力数值差异较大,需对计算模型的适宜性进行评价。根据陈正发等^[23]对云南省降雨侵蚀力计算模型的适宜性研究成果,降雨侵蚀力计算公式为:

$$R=5.249\left(\sum_{i=1}^{12}\frac{P_i}{P}P_i\right)^{1.205}\tag{4}$$

式中: P 为年降雨量(mm); P_i 为第 i 个月的降雨量(mm)。

设 $F_i=\frac{P_i}{P}P_i$, $A=\left(\sum_{i=1}^{12}F_i\right)^{\beta-1}$, $\alpha=5.249$, $\beta=1.205$, 则每个月的降雨侵蚀力计算公式为:

$$R_i=\alpha AF_i=5.249AF_i\tag{5}$$

式中: R_i 为第 i 个月的降雨侵蚀力值((MJ·mm)/(hm²·h·a))。

2.2.3 地形因子(LS) 坡度因子(S)和坡长因子(L)统称为地形因子,反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。本研究缓坡地($\theta<14^\circ$)坡度因子采用早期 USLE 中给出的计算式:

$$S=65.41\times(\sin\theta)^2+4.56\times\sin\theta+0.065\tag{6}$$

式中: θ 为坡度($^\circ$)。

陡坡地($\theta\geq 14^\circ$)地形因子采用刘宝元等^[24]基于中国天水、安塞和绥德 3 个水土保持试验站天然径流小区观测资料提出的模型进行计算:

$$S=21.91\sin\theta-0.96\tag{7}$$

坡长因子(L)采用 USLE 模型提出的计算公式进行计算:

$$L=\left(\frac{l}{22.1}\right)^m\tag{8}$$

式中: l 为坡长值(m); m 为可变的坡长指数。当 $\theta<0.57^\circ$ 时, $m=0.2$; $0.57^\circ\leq\theta<1.72^\circ$, $m=0.3$; $1.72^\circ\leq\theta<2.86^\circ$, $m=0.4$; $\theta\geq 2.86^\circ$, $m=0.5$ 。

计算地形因子过程中,首先基于 DEM 图直接提取坡度因子(S);其次,采用 Hickey^[25]提出的方法,基于 DEM 数据经过一系列水文流量累积分析后,最终得到坡长因子(L);最后,取 2 个因子图的乘积,即得到地形因子(LS)空间分布图。

2.2.4 植被覆盖与管理因子(C) 植被覆盖与管理因子反映地表有植被覆盖情况下对侵蚀的减小作用,因子取值在 0~1,一般通过模型计算法、试验法、赋值法确定 C 因子。本研究采用赋值法获得 C 因子空间分布图。根据杨子生^[21]在云南开展的研究成果,水田 C 因子取值为 0.088,旱地取值为 0.120,林地取值为 0.003,草地取值为 0.005,其他土地利用类型取值为 1.000。

2.2.5 水土保持措施因子(P) 水土保持措施因子反映实施水土保持措施后对侵蚀的减小作用,因子取

值在 0~1,区域尺度一般依据土地利用类型进行赋值。根据赵明松等^[16]和杨子生^[21]研究成果,将林地、草地的 P 因子赋值为 0.1,旱地赋值为 0.35,水田赋值为 0.18,其他土地利用类型均赋值为 0。

3 结果与分析

3.1 模型计算结果精度验证

基于 RUSLE 模型进行区域土壤侵蚀评估中,需对计算精度进行验证。抚仙湖尖山河小流域位于云南省滇中地区,多年平均降雨量 1 050 mm,雨季为 6—10 月,降雨量占全年总降雨量的 75%,年平均径流深 300 mm,年均蒸发量为 900 mm,流域土壤主要是红紫泥土和红壤。尖山河小流域土壤、降雨、地形地貌、土地利用等特征在云南省具有较好的代表性,因此采用王克勤等^[26]2006 年在尖山河小流域标准径流小区观测的数据,验证模型计算结果的精度。通过计算,模型在灌草地、坡耕地、次生林小区上的土壤侵蚀预测精度最高,相对偏差仅为 0.93%, -7.28%, 8.48%,梯坪地、人工林小区的预测相对偏差较大,相对偏差为 16.60%, 16.67%。整体上看,5 种土地利用类型上的预测相对偏差为 7.08%,模型确定系数为 0.992,较接近于 1,表明预测结果整体上比实测结果偏大,但整体偏差<10%,表明模型精度相对较高,可基本满足云南省土壤侵蚀和养分流失评估精度要求。

3.2 土壤侵蚀空间分布特征

根据模型计算结果,云南省土壤侵蚀面积为 1 835.91×10⁴ hm²,占总面积的 48.07%,侵蚀量为 597.52×10⁶ t/a,年平均侵蚀模数为 15.65 t/(hm²·a)。图 2 为云南省土壤侵蚀强度分级图。从图 2 可以看出,云南大部分地区土壤侵蚀强度均处于微度侵蚀,其次为轻度侵蚀和中度侵蚀,强烈以上等级的侵蚀分布面积较小,但呈现出集中分布特征。

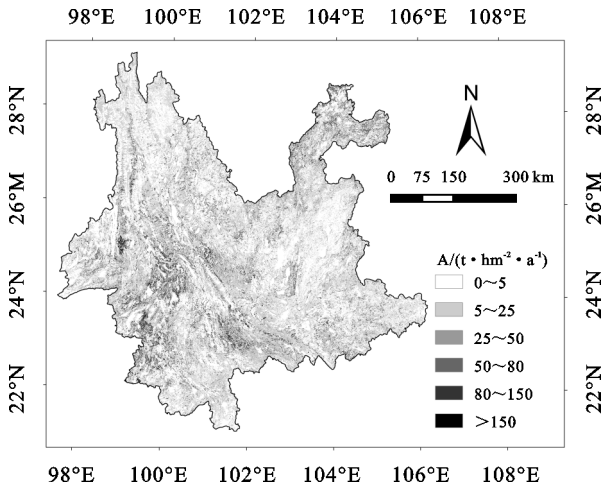


图 2 云南省土壤侵蚀强度空间分布

从表 2 可以看出,微度侵蚀所占面积最大,面积占比为 51.93%,侵蚀模数仅为 1.41 t/(hm²·a),年

侵蚀量仅占总侵蚀量的 4.68%。轻度侵蚀面积仅次于微度侵蚀,侵蚀面积占比为 36.75%,侵蚀模数为 9.86 t/(hm² · a),年侵蚀量占总侵蚀量的 23.17%。中度侵蚀面积占比为 3.26%,侵蚀模数为 33.16 t/(hm² · a),年侵蚀量占总侵蚀量的 6.91%。强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积占比差异较小,侵蚀面积占比分别为 2.32%,3.53%,2.21%;尽管上述 3 个侵蚀强度等级的侵蚀面积占比较小,但平均侵蚀模数较大,侵蚀模数分别为 64.92,109.26,219.45

t/(hm² · a),且土壤侵蚀量占比分别达到 9.64%,24.68%,30.93%。其中,剧烈侵蚀的面积占比仅为 2.21%,但侵蚀量占比却高达 30.93%,剧烈侵蚀是云南省侵蚀产沙的主要策源地。此外,极强烈侵蚀的面积占比也较低,仅为 3.53%,而侵蚀量占比却高达 24.68%。上述分析表明,云南省土壤侵蚀以微度、轻度侵蚀为主,但极强烈、剧烈侵蚀量占比较大,区域水土保持生态环境建设中应重视极强烈、剧烈侵蚀等级的水土流失治理。

表 2 云南省土壤侵蚀强度分级特征

侵蚀强度 分级	面积/ 万 hm ²	面积所占 比例/%	侵蚀量/ (10 ⁶ t · a ⁻¹)	侵蚀量 所占比例/%	平均侵蚀模数/ (t · hm ⁻² · a ⁻¹)
微度侵蚀	1983.13	51.93	27.95	4.68	1.41
轻度侵蚀	1403.52	36.75	138.43	23.17	9.86
中度侵蚀	124.48	3.26	41.28	6.91	33.16
强烈侵蚀	88.75	2.32	57.62	9.64	64.92
极强烈侵蚀	134.95	3.53	147.44	24.68	109.26
剧烈侵蚀	84.22	2.21	184.81	30.93	219.45
合计	3819.04	100.00	597.52	100.00	15.65

土壤侵蚀是导致土地退化、土地生产力下降的重要原因,分析不同农业分区土壤侵蚀特征,可为分区水土流失治理和耕地质量保护提供科学依据。从表 3 可以看出,不同农业分区侵蚀模数和侵蚀总量均存在差异,侵蚀模数的大小关系为滇西南区>滇东北区>南部边缘区>滇西区>滇中区>滇东南区>滇西北区,而侵蚀量的大小关系为滇西南区>滇中区>南部边缘区>滇西区>滇东南区>滇东北区>滇西北区。滇西南区平均侵蚀模数、侵蚀量均为最大,侵蚀模数达 24.91 t/(hm² · a),土壤侵蚀总量为 144.08×10⁶ t/a,说明滇西南区是云南省土壤侵蚀相对较严重的区域。滇东北区平均土壤侵蚀模数仅次于滇西南区,平均侵蚀模数为 23.45 t/(hm² · a),土壤侵蚀强度也较大。南部边缘区土壤侵蚀模数为 17.69 t/(hm² · a),土壤侵蚀量为 105.93×10⁶ t/a,土壤侵蚀量小于滇中区,但平均侵蚀模数大于滇中区。滇西区的土壤侵蚀量、侵蚀模数均小于南部边缘区,平均土壤侵蚀模数为 16.66 t/(hm² · a),土壤侵蚀总量为 82.42×10⁶ t/a。滇西北区土壤侵蚀模数和侵蚀量均为最小,侵蚀模数仅为 9.30 t/(hm² · a),表明该分区土壤侵蚀强度相对较小。

3.3 土壤侵蚀季节分布特征

受不同季节降雨侵蚀力、植被覆盖等因子变化的影响,不同季节土壤侵蚀存在较大波动。从图 3 可以看出,不同季节土壤侵蚀模数差异较大。其中,夏季土壤侵蚀模数最大,侵蚀模数集中分布在 0~50 t/hm²,平均土壤侵蚀模数为 10.53 t/hm²,侵蚀强度等级以轻度侵蚀、微度侵蚀为主。秋季土壤侵蚀模数仅

次于夏季,侵蚀模数集中分布在 0~25 t/hm²,平均土壤侵蚀模数为 2.94 t/hm²,处于微度侵蚀。春季土壤侵蚀模数集中分布在 0~5 t/hm²,平均土壤侵蚀模数为 1.52 t/hm²,处于微度侵蚀。冬季土壤侵蚀模数最小,侵蚀模数集中分布在 0~1.3 t/hm²,平均土壤侵蚀模数为 0.17 t/hm²,也处于微度侵蚀。从侵蚀量占比来看,春、夏、秋、冬 4 个季节土壤侵蚀量占全年侵蚀总量的比重分别为 10.18%,68.99%,19.69%,1.14%,表明云南省土壤侵蚀过程主要发生在夏季,夏季是云南省降雨侵蚀的敏感期,同时也是水土流失防治的关键时段。

表 3 不同分区土壤侵蚀特征

分区	侵蚀模数			侵蚀量	
	均值/ (t · hm ⁻² · a ⁻¹)	标准差	C _v	数值/ (10 ⁶ t · a ⁻¹)	占比/%
滇西北区	9.30	26.69	2.87	45.82	7.67
滇东北区	23.45	44.99	1.92	51.55	8.63
滇西区	16.66	40.85	2.45	82.42	13.79
滇中区	12.73	31.31	2.46	109.31	18.29
南部边缘区	17.69	43.50	2.46	105.93	17.73
滇西南区	24.91	55.54	2.23	144.08	24.11
滇东南区	11.94	27.98	2.34	58.41	9.78

3.4 不同土地利用类型土壤侵蚀特征

不同土地利用类型的侵蚀环境和受人为活动影响的强度不一致,导致不同土地利用的土壤侵蚀特征也存在较大差异。从表 4 可以看出,不同土地利用类型侵蚀模数、侵蚀量占比存在较大差异。从侵蚀模数来看,旱地侵蚀模数最大,平均侵蚀模数为 79.79 t/(hm² · a),达到强烈侵蚀等级;草地的侵蚀模数仅次于旱地,平均侵蚀模数为 10.32 t/(hm² · a),处于

轻度侵蚀等级;林地、水田的侵蚀模数均值差异较小,平均侵蚀模数分别为 4.87,2.61 t/(hm²·a),处于微
度侵蚀等级,表明林地、水田的水土保持效果较好,地
表土壤侵蚀强度较小;未利用土地、建设用地、水域等
土地利用类型几乎不发生侵蚀,或侵蚀量十分微小,
整体上处于微度侵蚀等级。

从不同土地利用类型侵蚀量占比来看,旱地、林地、
草地是区域侵蚀产沙的主要来源,其他土地利用类型侵
蚀量占比均较小。其中,旱地的侵蚀量占比最大,侵蚀
量占比达 67.42%,表明云南省大部分土壤侵蚀发生在旱
地上,旱地是区域侵蚀产沙的主要来源。林地的侵蚀量

占比仅次于旱地,侵蚀量占比为 17.44%;草地侵蚀量占
比小于林地,侵蚀量占比为 14.46%。

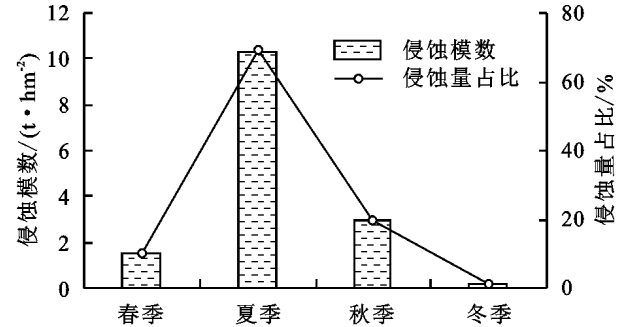


图 3 不同季节土壤侵蚀分布

表 4 不同土地利用类型土壤侵蚀特征

土地利用 类型	侵蚀面积/10 ⁴ hm ²						平均侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量 占比/%
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀		
林地	1411.55	755.40	10.36	2.61	4.35	3.33	4.87	17.44
草地	273.68	535.93	40.77	1.91	2.15	1.37	10.32	14.46
水域	0	0	0	0	0	0	0	0
建设用地	40.03	0	0	0	0	0	0	0
未利用地	15.86	0	0	0	0	0	0	0
水田	136.83	23.43	0.45	0.19	0.22	0.12	2.61	0.69
旱地	64.17	87.75	72.77	83.97	128.15	79.36	79.79	67.42

3.5 流失土层厚度特征

土壤侵蚀导致坡面表土层不断流失,使土层厚度
变薄,坡面石砾化和土壤粗骨化,最终导致土壤退化。
通过计算,云南省土壤侵蚀流失土层厚度分布在 0~
69.9 mm/a,平均土层流失厚度为 1.19 mm/a,不同区
域流失土层厚度存在差异。从表 5 可以看出,随着流
失土层厚度增加,对应面积占比表现为递减趋势;大部
分区域流失土层厚度为 0~2 mm/a,对应的面积为
3 407.63×10⁴ hm²,占总面积的比例为 89.23%。其中,
流失土层厚度为 0~0.5 mm/a 的面积分布最广,分布面
积为 2 293.79×10⁴ hm²,占总面积的比例为 60.06%;流
失土层厚度为 0.5~2 mm/a 范围的面积分布也较大,为
1 113.84×10⁴ hm²,占总面积的比例为 29.17%;流失土
层厚度>2 mm/a 范围的面积分布较小,为 411.41×10⁴
hm²,占总面积的比例仅为 10.77%。

表 5 土壤侵蚀流失土层厚度分布面积及所占比例

流失土层厚度/ (mm·a ⁻¹)	流失面积/ 10 ⁴ hm ²	占比/%
0~0.5	2293.79	60.06
0.5~2.0	1113.84	29.17
2.0~5.0	156.40	4.10
5.0~8.0	103.79	2.72
8.0~12.0	79.89	2.09
12.0~15.0	30.25	0.79
15.0~20.0	24.65	0.65
20.0~25.0	10.20	0.27
25.0~30.0	4.05	0.11
>30.0	2.18	0.06

3.6 养分流失空间分布特征

土壤侵蚀过程中,养分元素伴随着侵蚀泥沙和地表
径流发生迁移、沉积,一方面作为农业面源污染的重要
来源,另一方面使耕地上作物所需养分减少,使土地产
生侵蚀性退化。面源污染治理作为区域环境整治的重
要组成部分,研究区域养分流失时空分布特征对制定区
域环境治理规划和开展生态环境建设具有重要的指导
意义。从表 6 可以看出,在 4 种养分中土壤有机质
(SOM)年流失总量、平均流失模数均为最大,年流失总
量为 3 129.33×10⁴ t,平均流失模数达 820.00 kg/(hm²·
a);全氮(TN)年流失总量和平均流失模数仅次于土壤有
机质(SOM),年流失总量为 210.76×10⁴ t,平均流失模数
为 55.19 kg/(hm²·a);速效钾(AK)流失量和流失模数
次于全氮(TN),年流失总量为 12.69×10⁴ t,平均流失模
数为 3.32 kg/(hm²·a);有效磷(AP)年流失总量和平流
失模数均为最小,年流失总量仅为 1.22×10⁴ t,平均
流失模数为 0.32 kg/(hm²·a)。

从空间分布上来看,土壤有机质流失量分布在 0~
60 945 kg/(hm²·a),集中分布在 0~2 151.01 kg/
(hm²·a),不同区域土壤有机质流失模数空间分布差异
性较大,滇西区有机质流失模数明显大于其他分区。全
氮流失模数分布在 0~3 865 kg/(hm²·a),集中分布在
0~151.56 kg/(hm²·a),不同地区全氮流失模数空间分
布也存在差异性,总体表现为滇西区等西部区域大于东
部区域。有效磷流失模数分布在 0~28.9 kg/(hm²·a),
集中分布在 0~1.02 kg/(hm²·a),流失模数空间分布也

存在差异性,也表现为滇西区等西部区域流失量大于东部区域。速效钾流失模数分布在 0~216 kg/(hm²·a),集中分布在 0~8.48 kg/(hm²·a),流失模数空间分布总体表现为滇西区等西部区域大于东部区域。上述分析表明,云南省 4 种养分流失模数空间分布均存在较大差异性,但空间分布上存在一定的聚集特征,总体表现为滇西区等西部区域大于东部区域。

表 6 云南省养分流失特征统计

养分类型	流失模数集中分布区间/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	平均流失模数/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) (10 ⁴ t·a ⁻¹)	流失量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)
土壤有机质	0~2151.01	820.00	3129.33
总氮	0~151.56	55.19	210.76
有效磷	0~1.02	0.32	1.22
速效钾	0~8.48	3.32	12.69

4 讨论

4.1 不同区域土壤侵蚀模数比较

土壤侵蚀模数可较好地反映不同空间位置上土壤侵蚀强度的大小和潜在侵蚀危险性特征。由于不同区域影响土壤侵蚀的因子不同,使得不同区域土壤侵蚀模数也存在较大差异。据估计^[27],全球尺度土壤侵蚀模数为 12~15 t/(hm²·a),每年流失约 0.90~0.95 mm 厚度的表层土壤。国内部分研究^[28]结果显示,云南省澜沧江流域平均土壤侵蚀模数分布在 0~2 853 t/(hm²·a),平均值为 19.8 t/(hm²·a)。从本文研究来看,云南省土壤侵蚀面积占总面积的 48.07%,年平均侵蚀模数为 15.65 t/(hm²·a),总体处于轻度侵蚀等级。从结果对比来看,云南省平均土壤侵蚀模数接近全球平均值,侵蚀强度小于我国的黄土高原区(平均侵蚀模数>20 t/(hm²·a))^[29]和三峡库区(平均侵蚀模数 20.87 t/(hm²·a))^[30]等区域,但较东北漫岗区(平均侵蚀模数 6.77 t/(hm²·a))^[31]、安徽省(平均侵蚀模数 2.57 t/(hm²·a))^[16]等区域大,说明云南省土壤侵蚀相对较严重,水土保持生态建设仍然面临着艰巨任务,该结论与胡云锋等^[29]的研究结果一致。此外,本研究显示云南西部土壤侵蚀强度大于东部,而澜沧江流域位于云南省西部,该区域土壤侵蚀模数(19.80 t/(hm²·a))大于全省的均值(15.65 t/(hm²·a)),该研究结果与 Zhou 等^[28]对云南省澜沧江流域土壤侵蚀的研究结果具有一致性。

4.2 土地利用变化对土壤侵蚀的影响

不同土地利用类型植被覆盖、微地貌特征、水土保持效应存在差异性,从而影响到地表径流和土壤侵蚀过程^[32]。从本文研究结果来看,旱地、草地、林地、水田的侵蚀模数分别为 79.79,10.32,4.87,2.61 t/(hm²·a),农用地中的旱地土壤侵蚀模数显著大于其他土地利用类型,该研究结果与大多数研究^[28]结

论一致。农用地在耕作过程中表层土壤产生人为扰动现象,同时对地表覆盖状况也产生深刻影响,耕作过程降低土壤和地表对径流侵蚀的抵抗力,加剧土壤侵蚀进程。草地、林地地表覆盖度相对较高,且地表人为扰动相对较小,坡面土壤侵蚀模数也较小。云南省作为典型的高原山地区,大部分旱地为坡度>3°的坡耕地^[18]。受自然因素和不合理耕作活动的影响,坡耕地土壤侵蚀强度较大,整体上处于强度侵蚀等级。因此,旱地(特别是坡耕地)应成为区域水土保持生态环境治理的重点区域。随着人为活动对区域土地利用空间格局影响作用的增强,区域土壤侵蚀空间分布也将发生演变,这对区域水土保持生态环境建设带来了新的挑战^[2]。本文仅对当前状态下的土壤侵蚀空间分布特征进行了研究,今后应加强土地利用/覆盖变化条件下土壤侵蚀时空分布演变特征的研究,以为区域水土保持治理提供科学依据。

5 结论

(1)云南省土壤侵蚀面积为 1 835.91×10⁴ hm²,占总面积的 48.07%,总侵蚀量为 597.52×10⁶ t/a,年平均侵蚀模数为 15.65 t/(hm²·a)。大部分地区土壤侵蚀强度处于微度侵蚀,其次为轻度侵蚀和中度侵蚀,强烈及以上等级的侵蚀分布面积较小,但呈现出集中分布特征,极强烈侵蚀、剧烈侵蚀是区域侵蚀产沙的主要来源。不同农业分区侵蚀模数和侵蚀总量均存在差异,滇西南区土壤侵蚀强度最大,而滇西北区土壤侵蚀强度最小。

(2)不同季节土壤侵蚀模数和侵蚀量占比差异较大,夏季平均土壤侵蚀模数和侵蚀量占比均最大,云南省土壤侵蚀主要发生在夏季。不同土地利用类型侵蚀模数、侵蚀量占比存在较大差异,其中旱地的侵蚀模数、侵蚀量占比均为最大,旱地是区域侵蚀产沙的主要来源。

(3)云南省土壤侵蚀导致的流失土层厚度分布在 0~69.9 mm/a,集中分布在 0~2 mm/a,平均流失土层厚度为 1.19 mm/a。流失土层厚度处于 0~0.5 mm/a 范围的面分布最广,占总面积的比例达 60.06%。

(4)云南省土壤有机质(SOM)年流失总量为 3 129.33×10⁴ t,平均流失模数达 820.00 kg/(hm²·a);全氮(TN)年流失总量为 210.76×10⁴ t,平均流失模数为 55.19 kg/(hm²·a);速效钾(AK)年流失总量为 12.69×10⁴ t,平均流失模数为 3.32 kg/(hm²·a);有效磷(AP)年流失总量为 1.22×10⁴ t,平均流失模数为 0.32 kg/(hm²·a)。4 种养分流失模数空间分布均存在较大差异性,但空间分布上存在一定的聚集特征,总体表现为滇西区等西部区域大于东部区域。

参考文献:

- [1] Karlen D L, Rice C W. Soil degradation: Will humankind ever learn? [J]. *Sustainability*, 2015, 7: 12490-12501.
- [2] Guo S S, Zhu Z R, Lyu L T. Effects of climate change and human activities on soil erosion in the Xihe River Basin, China [J/OL]. *Water*, 2018, 10: 1085. <https://doi.org/10.3390/w10081085>.
- [3] Uddin K, Matin A M, Maharjan S. Assessment of land cover change and its impact on changes in soil erosion risk in Nepal [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 1-20.
- [4] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制 [J]. *环境科学*, 1998, 19(5): 87-91.
- [5] Sharda V N, Ali S. Evaluation of the universal soil loss equation in semi-arid and sub-humid climates of India using stage dependent C-factor [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 78(5): 422-427.
- [6] Amini H, Honarjoo N, Jalaliyan A, et al. A comparison of EPM and WEPP models for estimating soil erosion of Marmeh Watershed in the south Iran [J]. *Agriculture and Forestry*, 2014, 60(4): 299-315.
- [7] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原多尺度土壤侵蚀与水土保持研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [8] Bagarello V, Di Stefano C, Ferro V, et al. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models [J]. *Catena*, 2017, 155: 10-19.
- [9] Chatterjee S, Krishna A P, Sharma A P. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 357-374.
- [10] 武国胜, 林惠花, 曾宏达. 用 RS 和 GIS 技术评价福建省长汀县水土保持功能对生态系统变化的响应 [J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 321-330.
- [11] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能 [J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7013-7025.
- [12] 任艳芳, 何俊瑜, 张艳超, 等. 贵州省开阳茶园土壤养分状况与肥力质量评价 [J]. *土壤*, 2016, 48(4): 668-674.
- [13] Duan X W, Gu Z J, Li Y G, et al. The spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in Yunnan Province, southwest China: An analysis of empirical orthogonal functions [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 144: 82-93.
- [14] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [15] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in range lands [J]. *Geoderma*, 2006, 136: 229-234.
- [16] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 28-38.
- [17] 赵珂, 饶懿, 王丽丽, 等. 西南地区生态脆弱性评价研究: 以云南、贵州为例 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 38-42.
- [18] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 256-265.
- [19] 王宇, 韩兴, 赵占军, 等. 垄沟秸秆覆盖对黑土顺坡耕地氮、磷养分阻控效果 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 137-140.
- [20] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 23-28.
- [21] 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(增刊): 1-9.
- [22] 郭志民. 山地赤红壤可蚀性特征研究 [J]. *水土保持科技情报*, 2001(3): 8-9.
- [23] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 209-219.
- [24] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] Hickey R. Slope angle and slope length solutions for GIS [J]. *Cartography*, 2000, 29(1): 1-8.
- [26] 王克勤, 宋泽芬, 李太兴, 等. 抚仙湖一级支流尖山河小流域的面源污染物贡献特征 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1321-1328.
- [27] Biggelaar C D, Lal R, Eswaran H, et al. Crop yield losses to soil erosion at regional and global scales: Evidence from plot-level and GIS data [M]. *Land Quality, Agricultural Productivity, and Food Security*; Wiebe K Ed, Edward Elgar: Cheltenham, UK, 2003: 262-279.
- [28] Zhou Q W, Yang S T, Zhao C S, et al. A soil erosion assessment of the upper Mekong River in Yunnan Province, China [J]. *Mountain Research and Development*, 2014, 34(1): 36-47.
- [29] 胡云锋, 韩月琪, 曹巍, 等. 中国水土流失研究热点区的空间分布制图 [J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5829-5835.
- [30] 范建容, 刘飞, 郭芬芬, 等. 基于遥感技术的三峡库区土壤侵蚀量评估及影响因子分析 [J]. *山地学报*, 2011, 29(3): 306-311.
- [31] 顾治家, 谢云, 李骛, 等. 利用 CSLE 模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 49-56.
- [32] Li Y Q, Zhang S H, Peng Y. Soil erosion and its relationship to the spatial distribution of land use patterns in the Lancang River Watershed, Yunnan Province, China [J]. *Agricultural Sciences*, 2015, 6(8): 823-833.