

楚雄市龙川江流域土壤侵蚀时空变化特征研究

许永涛¹, 肖雨柔¹, 翟乃琛¹, 罗琼^{2*}

¹楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

²临沧市临翔区平村彝族傣族乡人民政府, 云南 临沧

收稿日期: 2023年9月23日; 录用日期: 2023年10月24日; 发布日期: 2023年10月31日

摘要

土地作为人类赖以生存的根基, 目前土壤侵蚀正制约着经济和环境问题。本文采用现目前广泛使用的RUSLE(修正土壤流失方程)对楚雄市龙川江流域土壤侵蚀强度特征进行研究。研究发现: 楚雄市龙川江流域水土流失2012年没有剧烈侵蚀区域, 2017年、2022年涵盖了土壤侵蚀的六个等级; 从三期土壤侵蚀强度来看, 所占比重最大的均为微度侵蚀和轻度侵蚀区域, 二者面积超过区域侵蚀总面积的80%; 从不同时期的土地利用类型的侵蚀情况来看, 未利用地的平均侵蚀模数一直较高, 侵蚀量却是最小; 草地、耕地和林地三种土地利用类型都属于轻度侵蚀, 但有着高侵蚀量; 水域一直处于微度侵蚀, 但平均侵蚀模数和侵蚀量都在增长, 呈增长趋势; 建设用地在2012年属于微度侵蚀, 随着建设用地的增加, 平均侵蚀模数增长为轻度侵蚀, 侵蚀量也在增加。

关键词

RUSLE, 土壤侵蚀, 楚雄市龙川江流域

Characteristics of Spatial and Temporal Changes of Soil Erosion in Longchuan River Basin, Chuxiong City

Yongtao Xu¹, Yurou Xiao¹, Naichen Zhai¹, Qiong Luo^{2*}

¹College of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

²People's Government of Pingcun Yi and Dai Township, Linxiang District, Lincang City, Lincang Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 许永涛, 肖雨柔, 翟乃琛, 罗琼. 楚雄市龙川江流域土壤侵蚀时空变化特征研究[J]. 土壤科学, 2023, 11(4): 216-227. DOI: 10.12677/hjss.2023.114026

Abstract

Land is the foundation of human survival, and soil erosion is currently constraining economic and environmental problems. This paper adopts the now widely used RUSLE (Revised Soil Loss Equation) to characterize the intensity of soil erosion in Longchuan River Basin of Chuxiong City. The results show that there was no severe erosion area in Longchuan River Basin of Chuxiong City in 2012, and six grades of soil erosion were covered in 2017 and 2022. Judging from the intensity of soil erosion in the third phase, the areas with the largest proportion are slight erosion and slight erosion, which account for more than 80% of the total area of regional erosion; judging from the erosion situation of land use types in different periods, the average erosion modulus of unused land has been high, but the erosion amount is the smallest; grassland, cultivated land and forest land all belong to mild erosion, but they have high erosion; the water area has been slightly eroded, but the average erosion modulus and erosion amount are increasing, showing an increasing trend; construction land was slightly eroded in 2012. With the increase of construction land, the average erosion modulus increased to slight erosion, and the amount of erosion also increased.

Keywords

RUSLE, Soil Erosion, Longchuan River Basin of Chuxiong City

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地是自然物，起初是人类生存和发展的最基本生态环境要素，现已经转化为人的劳动对象和劳动资料，土地资源对于我国来说一直都是国家持续良好发展的重要保障。而土壤侵蚀使土地资源安全面临挑战，土壤侵蚀通常是指土壤和它的成土母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下，被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程[1]。按照外部动力类型的种类不同可以把土壤侵蚀分为风力侵蚀、水力侵蚀、重力侵蚀和冻融侵蚀三大类。土壤侵蚀使流域内水土流失，造成不同程度的生态环境问题。探究土壤侵蚀的影响，对揭示研究区土壤侵蚀的扰动效应具有重要的科学意义，而且对合理开发水土资源、防治土壤侵蚀具有实用前景。

土壤侵蚀模型的研究在国外开始比较早，土壤侵蚀研究最早开始于德国土壤学家 Wollny (1877~1895)，他建立了世界上第一个径流小区，观测植被覆盖对土壤侵蚀和土壤板结的影响[2]，但仅限于观察与定性描述。国外土壤侵蚀经验模型，典型代表是通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)和修正通用土壤流失方程(Reserved Universal Soil Loss Equation, RUSLE) [3]。20世纪60年代，美国学者 Wischmeier [4]等最早建立了土壤流失方程方程(USLE)，后来美国学者对 USLE 局限性进行修正，研发了 RUSLE 模型[5]。与 USLE 模式相比，RUSLE 模式具有更广的范围和更精确的侵蚀因子计算能力。USLE 及 RUSLE 模型的制定及广泛应用，使准确预测、预报坡耕地土壤流失量、对比不同区域土壤流失状况、制定合理的土地利用方案、科学布设水土保持措施等成为可能[6]。修正的土壤流失方程现在被公认为是计算平均土壤侵蚀风险的标准方法，得到广泛应用。该模型与 GIS 和遥感技术相结合，是目前最流行的土壤侵蚀模数估算模型[7]。

土壤侵蚀经验模型的研究在国内是 20 世纪 40 年代开始的,国内许多学者开始对我国的土壤流失进行定量观测。起初主要是片段、小规模试验研究,上世纪 80 年代我国在水土保持预测中引进了统一的水土流失方程,为我国水土流失预测模式的建立提供了有力的支持。该时期许多研究者根据试验所测或已有的观测资料,利用统计方法对土壤侵蚀量进行了评价分析,并在 USLE 的推动下,参考或直接利用 USLE 的基本形式,根据各区域的实际情况对通用土壤流失方程进行了修正[8]。刘宝元[9]等建立的中国土壤流失方程 CSLE,唐克丽[10]等考虑浅沟侵蚀对坡面侵蚀的影响,构建坡面土壤流失预报模型,尹国康等结合气象-水文因素和人类活动影响提出的小流域宏观产沙模型和江忠善等提出的治理流域暴雨产沙预报模型[11][12]。我国还有一些学者是通过大量实验建立起流域侵蚀产沙的经验模型,如琚彤军[13]、田永红等[14]、王治华[15]等建立有效降雨、有效降雨强度与次降雨产沙之间的拟合关系。在 1980 年、1995 年、1996 年江忠善分别提出次降雨流域产沙量统计模型、沟间地土壤侵蚀模型、沟谷地土壤侵蚀模型[8]。

2. 研究区概况及数据来源

2.1. 研究区概况

楚雄市位于云贵高原中部,楚雄州的中西部,楚雄市整个区域处在 24°30'N~25°15'N,东经 100°35'E~101°48'E 之间,楚雄市境内主要河流有龙川江和青龙河,分属元江和金沙江两大水系,使楚雄市位于元江水系与金沙江水系的分水岭地带。龙川江是金沙江南岸的一级支流,是以天然降水补给为主的河流水源丰富[16],在元谋北部汇入金沙江。楚雄市是楚雄彝族自治州政治、文化中心,也是楚雄州经济、交通最发达的地区,作为楚雄市的主要河流,龙川江在城市发展过程中不可或缺,因此备受当地关注对龙川江流域的水质和水量都有较大需求,对楚雄市龙川江流域的土壤侵蚀进行研究,对龙川江流域水资源保护和土地利用规划都具有重要意义。

2.2. 数据来源

本次研究涉及到降水、土壤质地数据、植被覆盖、DEM 等数据,具体来源详见表 1。

Table 1. Summary of data sources

表 1. 数据来源一览表

数据类型	来源
楚雄市 2012、2017、2022 年平均降水数据	国家气象科学数据中心
楚雄市 30 m 分辨率 DEM	地理空间数据云
楚雄市土壤质地数据(HWSD)	中国科学院资源环境科学与数据中心
楚雄市 2012、2017、2022 年 landsat7、8 数据提取 NDVI	地理空间数据云
楚雄市 2012、2017、2022 年土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心

3. 土壤侵蚀模数的计算与分析

本文在开展楚雄市龙川江流域土壤侵蚀的计算基于修订后的 RUSLE 模型,通过对比 2012、2017、2022 年的土壤侵蚀模数来对比构建分析区域土壤侵蚀时空变化特征。在进行计算过程中,由于时间尺度变化小于 30 年,本着短时区域地质地貌不变原则,土壤和地形基础数据相同,模型中 K 因子和 LS 因子不变。具体模型公式(1)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 $t/(hm^2 \cdot a)$;

R ——降雨侵蚀力因子 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$;

K ——土壤可蚀性因子 $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$;

LS ——坡长坡度因子(无量纲);

C ——植被覆盖与管理因子(无量纲);

P ——水土保持措施因子(无量纲)。

3.1. 降雨侵蚀力因子 R

水土流失是由雨水、飞溅和径流形成过程中的侵蚀引起的。准确估计雨水引起的土壤侵蚀，对预测土壤侵蚀和水土保持优化具有重要意义，降雨因子是土壤侵蚀的动力因子。Wischmeier 提出的简化算法，计算公式(2)为：

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^4 \left[1.5 \log \left(\frac{Pi^2}{P} \right) - 0.8188 \right] \quad (2)$$

式中 R ——降雨侵蚀力因子 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$;

P_i ——每个月的多年平均降雨量(mm);

P ——每年的多年平均降雨量(mm)。

降雨侵蚀力因子 R 根据公式(2)，得出三期的 R 值，如图 1。

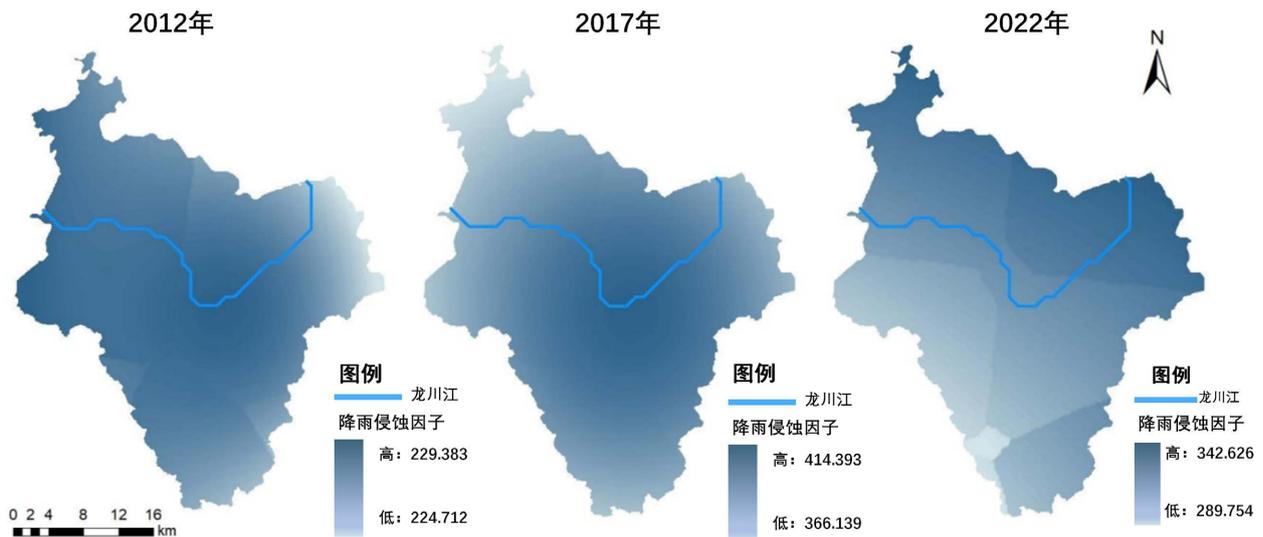


Figure 1. Spatial-temporal variation of rainfall erosion factor R in 2012, 2017 and 2022

图 1. 2012 年、2017 年、2022 年降雨侵蚀因子 R 时空变化图

总体来看，在研究时间区间范围内，2012 年的降雨侵蚀数值最低，2017 年的降雨侵蚀力达到了峰值，也就是说 2017 年的降雨侵蚀力是最高的，后在 2022 年稍微下降，但下降速度较慢；从分布区域来看城市区域的降水侵蚀力一直较高，其次是海拔较高的地方的降雨侵蚀力也较高。

3.2. 土壤可蚀性因子 K

基于 ArcGIS 软件，土壤可蚀性因子 K ，将土壤数据库中的砂粒、粉粒、粘粒及有机碳字段导出为栅

格影像数据，再将其代入公式计算得到楚雄市 K 因子值结果，如图 2。其中土壤可蚀性因子 K 。 K 值是由土壤本身的理化性状决定的[17]，不同的土壤类型 K 值大小不同， K 值与土壤可蚀性呈正比，即 K 值越大，土壤受侵蚀的可能性越大，反之越小。选择 Williams 等提出的 EPIC 模型公式计算 K 值，公式(3)如下：

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(-2.95C + 3.72)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)} \right) \quad (3)$$

式中 K ——土壤可蚀性因子 $t \cdot hm^2 \cdot h / (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$;

SAN ——砂粒的含量%;

SIL ——是粉粒的含量%;

CLA ——是粘粒的含量%;

$SN_1 = 1 - SAN/100$, C 为有机碳含量(%)。

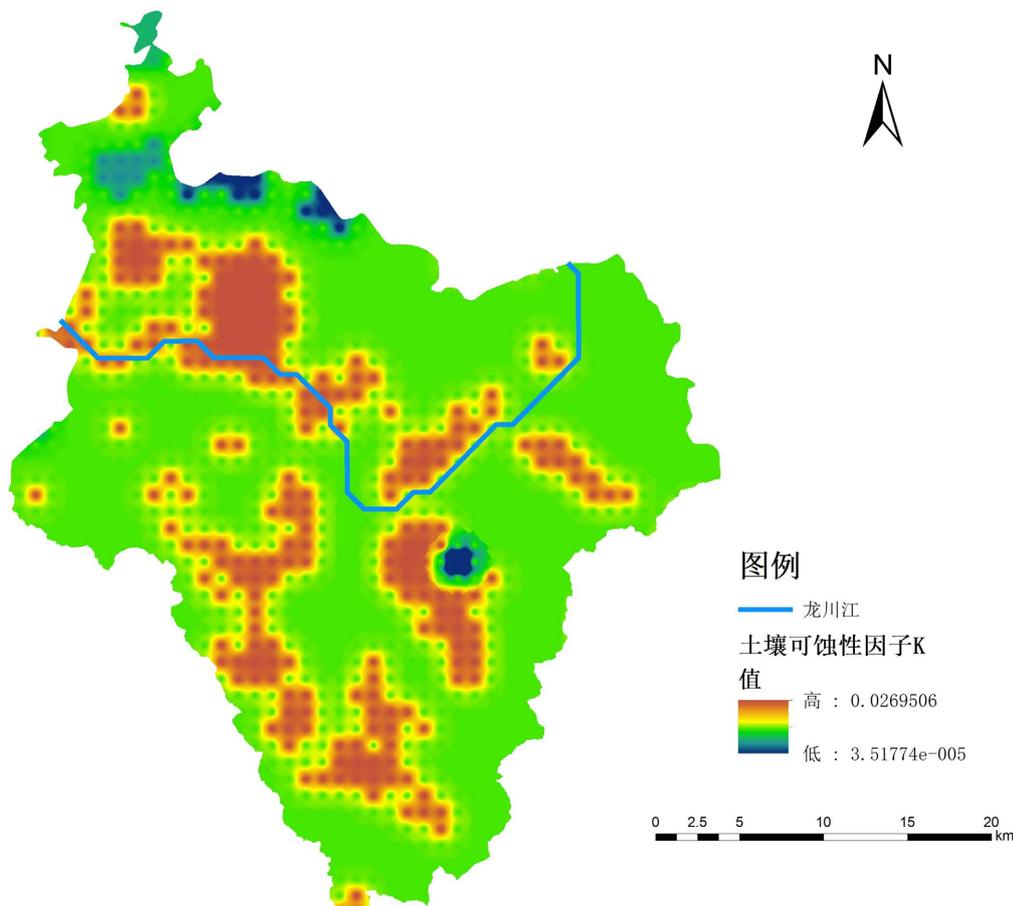


Figure 2. Schematic diagram of soil erosion K

图 2. 土壤可蚀性 K 示意图

由图 2 可以看出龙川江流域 K 值的分布无明显规律斑块化分布明显，研究区大部分区域属于一个中值，土壤可蚀性较高的地方大致都处于海拔较低的地方，研究区整体在龙川江流域的土壤可蚀性都一般。

3.3. 坡长坡度因子 LS

最早由 Zingg 在 1940 年建立土壤侵蚀强度与坡长的关系, 直到 1987 年 Wischmeier 和 Smith 提出并修改完善了经典的 L 因子计算公式(4)为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^n, \quad n = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

根据刘宝元计算公式计算坡度因子 S 公式(5)为:

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

式中 S ——坡长坡度因子(无量纲);

θ ——地面的坡度。

基于 ArcGIS10.8 软件, 导入楚雄市分辨率为 30 m 的 DEM 数字高程和楚雄市行政矢量边界。通过按掩膜提取、填洼和流向的预处理。根据坡长因子 L 坡度因子 S 计算公式借助软件的栅格计算器, 计算结果如图 3 所示。

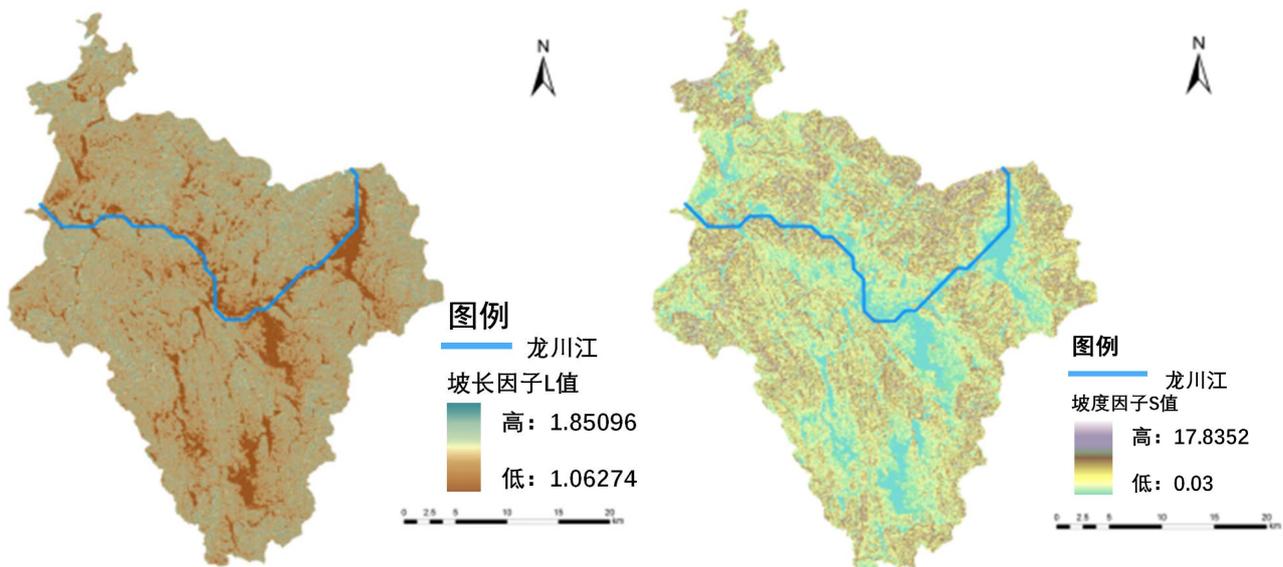


Figure 3. Schematic diagram of slope length L and slope S

图 3. 坡长 L 、坡度 S 示意图

楚雄市龙川江流域地势上总体平坦, 起伏较小, 无论是何种类型的侵蚀, 地形对其的影响是最大的, 同一类型的侵蚀, 侵蚀强度由于地形的影响也有明显差异, L 和 S 两个因子对侵蚀的作用最明显。坡度与侵蚀量的大小成正比, 坡长的增加与水流速度、重力作用、摩擦力等都息息相关, 坡长与侵蚀量的大小也成正比, 二者都会导致土壤侵蚀量的增加, 从而引起水土流失的问题。

3.4. 植被覆盖与管理因子 C

植被覆盖与管理因子 C 是抑制侵蚀的，对水土具有保持作用且范围在 0~1 之间。且根据蔡崇法，植被覆盖管理因子采用的公式(6)为：

$$\begin{cases} C = 0 & fc \leq 2\% \\ C = 1 & 2\% < fc \leq 10\% \\ C = 0.6508 - 0.3436 \log fc & 10\% < fc \leq 78.3\% \\ C = 0 & fc > 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

fc 是植被覆盖度， fc 是 MODIS NDVI 数据用像元二分模型计算得到的：

$$fc = \frac{NDVI - NDVI_{土壤}}{NDVI_{最大} - NDVI_{土壤}} \quad (7)$$

植被覆盖与管理因子 C 根据公式(6)，与公式(7)，计算结果如图 4。

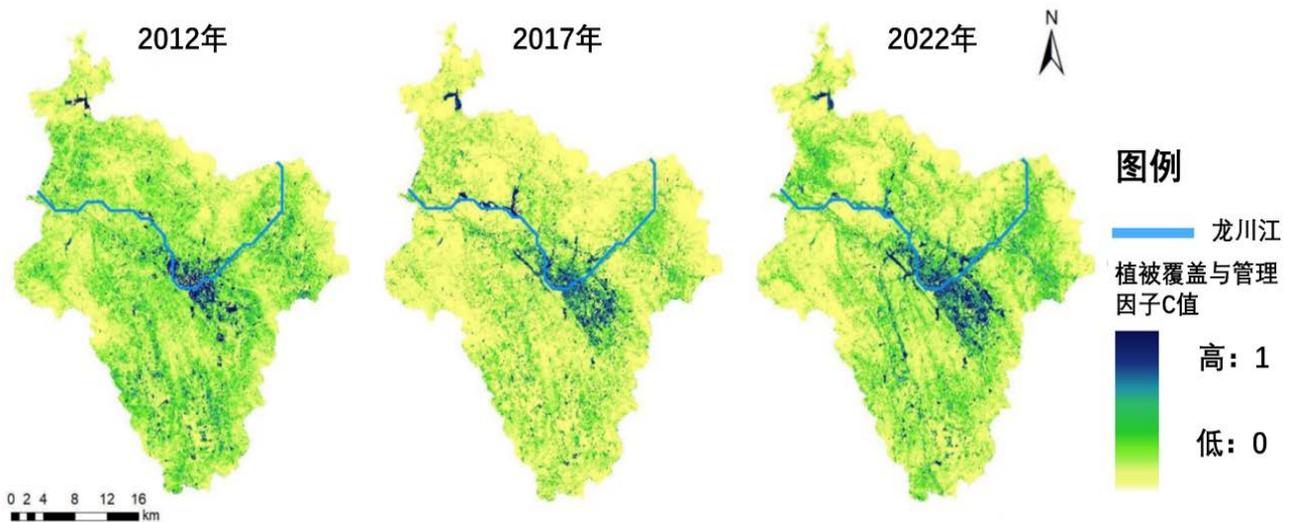


Figure 4. Spatial-temporal variation of vegetation cover factor in 2012, 2017 and 2022
图 4. 2012 年、2017 年、2022 年植被覆盖度因子时空变化图

植被覆盖和管理因子 C 是指一个地区内植被盖度、植被类型等对土壤侵蚀率的影响。了解植被对水土保持的影响，从而知道植被覆盖对水土保持的作用。植被覆盖度与该因子成反比，当植被生长得越好，植被覆盖度越高，但是该因子值就越低，反之亦然，对水土得保持效果就越高。

从结果中可以看出，楚雄市龙川江流域中城市区域的 C 因子是最高的，说明楚雄市城区的植被覆盖度较低，而其他大部分区域都处于一个较低值，可以说明龙川江流域整体的植被覆盖度较高，对水土保持的作用较好。

3.5. 水土保持措施因子 P

水土保持措施因子 P 是定量指标，是采取防止水土流失的措施与否而对土壤侵蚀的影响。 P 值的取值区间为 0~1，当 P 因子值为 0 时，说明研究区有实施相关水土保持措施，且措施效果明显，几乎不会出现土壤侵蚀；当 P 因子值为 1 时，说明研究区目前为止没有采取任何有关水土保持的措施来治理土壤侵蚀，是一种天然侵蚀的状态。通过确定各土地利用类型的 P 值来计算水土保持措施因子 P ，计算结果如表 2 所示。

Table 2. P values for different land use classes
表 2. 不同土地利用类的 P 值

土地利用类型	P 值
耕地	0.35
草地	1
林地	0.8
水域	0
建设用地	0
未利用地	1

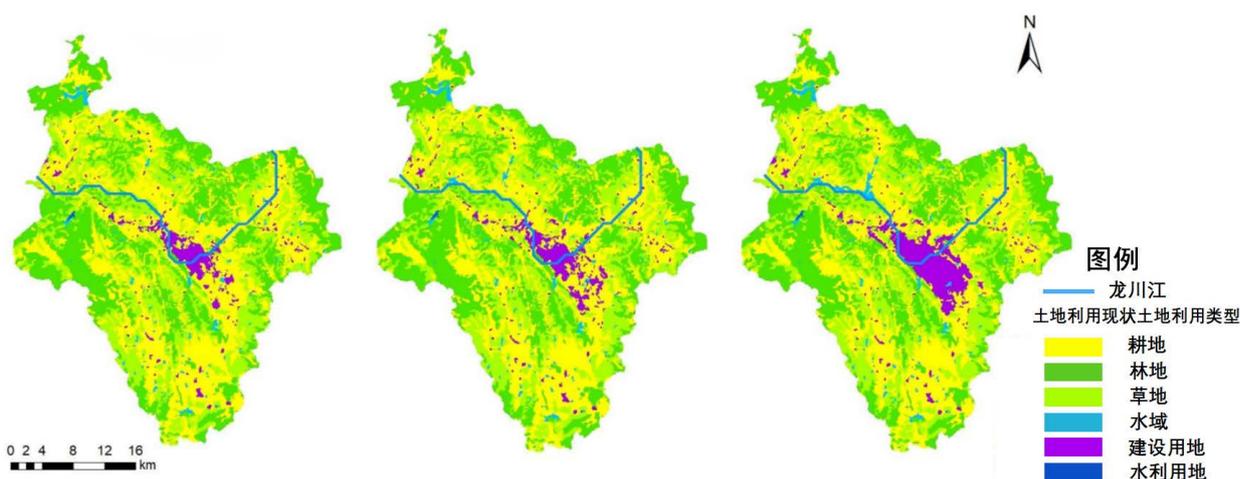


Figure 5. Spatial and temporal changes of land use in 2012, 2017 and 2022
图 5. 2012 年、2017 年、2022 年土地利用时空变化图

如图 5，在图中可以明显看出，在研究时间范围内，建设用地的面积在显著增加，从 2012 年可以看到，建设用地周围大多都是耕地，2022 年大多变为了建设用地。其余用地类型的变化较为细微。采用栅格计算器，将三个阶段的水土保持措施因子按不同的 P 值输出，获得结果图层，如图 6。

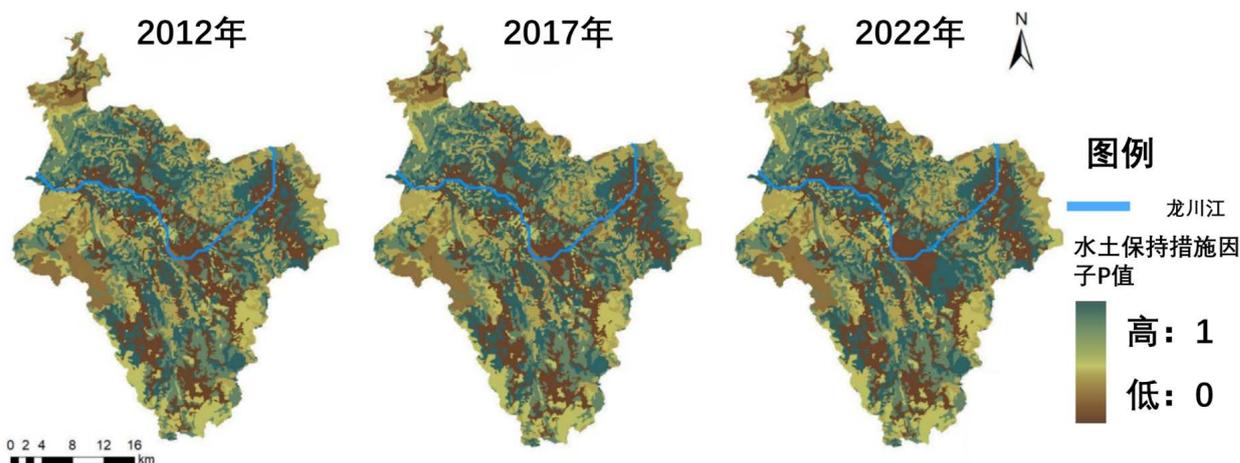


Figure 6. Spatial and temporal changes of soil and water conservation measures factors in 2012, 2017 and 2022
图 6. 2012 年、2017 年、2022 年水土保持措施因子时空变化图

3.6. 土壤侵蚀结果及分析

为了规范全国水土保持工作成果评价，1997年中华人民共和国水利部颁布实施的《土壤侵蚀分类分级标准》中明确规定了适用于全国的土壤侵蚀强度分类标准[18]。根据土壤侵蚀强度等级划分标准，对楚雄市龙川江流域的土壤侵蚀强度进行分级，生成楚雄市龙川江流域土壤侵蚀强度等级分布图(表3)。

Table 3. Classification standards for soil erosion intensity

表 3. 土壤侵蚀强度分类标准

级别	平均侵蚀模数(t/km ² ·a)
微度侵蚀	<500
轻度侵蚀	500~2500
中度侵蚀	2500~5000
强烈侵蚀	5000~8000
极强烈侵蚀	8000~15000
剧烈侵蚀	>15,000

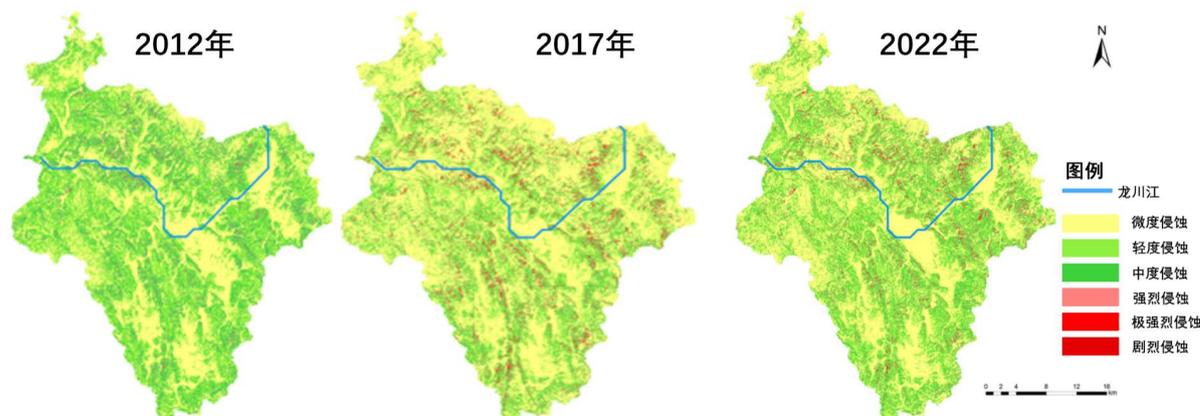


Figure 7. Spatial and temporal changes of soil erosion classification in 2012, 2017 and 2022

图 7. 2012 年、2017 年、2022 年土壤侵蚀等级划分时空变化图

RUSLE 模型的公式，借助 ArcGIS10.8 的栅格计算器工具进行 2012 年、2017 年、2022 年的综合土壤侵蚀模数图，然后分别对三年数据开展土壤侵蚀强度分类得到如图 7 所示的土壤侵蚀等级划分时空变化图，由图可知，三个不同年份中微度侵蚀和轻度侵蚀区域呈片出现较为集中，部分强烈侵蚀区域呈现出较为分散。

Table 4. Graded area and proportion of soil erosion intensity in 2012

表 4. 2012 年土壤侵蚀强度分级面积及其占比

侵蚀强度	2012 年面积(km ²)	2017 年面积(km ²)	2022 年面积(km ²)
微度侵蚀	489.9402	629.6364	516.9384
轻度侵蚀	455.7267	271.494	375.0435
中度侵蚀	150.282	133.7625	161.7453
强烈侵蚀	20.4903	63.9828	54.6597
极强烈侵蚀	0.9963	18.2943	9.0135
剧烈侵蚀	0	0.2295	0.0261

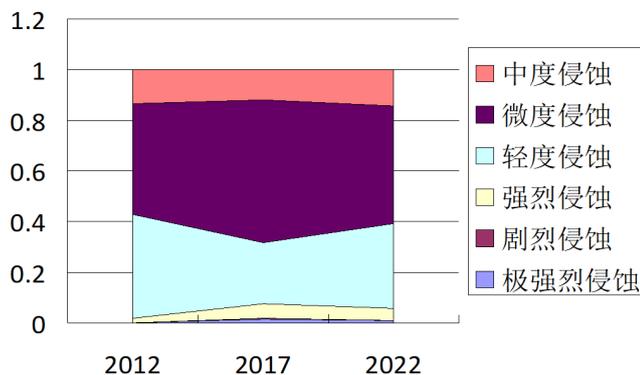


Figure 8. Percentage change of soil erosion degree in 2012, 2017 and 2022

图 8. 2012 年、2017 年、2022 年土壤侵蚀程度变化百分比图

从表 4 和图 8 可以得出：2012 年楚雄市龙川江流域的侵蚀强度只有五级，不存在剧烈侵蚀区域，微度侵蚀的侵蚀面积达到 489.9402 km²，占总侵蚀面积的 43.85%；轻度侵蚀 455.7267 km²，占总侵蚀面积的 40.78%；微度侵蚀和轻度侵蚀占到整体极大部分。楚雄市龙川江流域 2017 年土壤侵蚀强度分为 6 个等级，以微量侵蚀面积最大，达到 56.35%；微量侵蚀面积超过整个侵蚀面积的二分之一。2022 年土壤侵蚀侵蚀强度分为 6 级，以微量侵蚀面积最大，达到 46.26%；微量侵蚀面积约为整个侵蚀面积的二分之一。

3.7. 不同土地利用方式下土壤侵蚀的动态变化分析

Table 5. Soil erosion by land use types, 2012

表 5. 2012 年各土地利用类型的土壤侵蚀

土地利用类型	面积(km ²)	百分比(%)	平均侵蚀模数(t/km ² ·a)	侵蚀量(10 ⁴ t/a)
草地	305.703	27.37%	1818.51	55.59
建设用地	37.6596	3.37%	403.07	1.52
耕地	427.1589	38.25%	884.20	37.77
林地	332.0973	29.74%	1020.11	33.88
水域	13.6692	1.22%	79.22	0.11
未利用地	0.5247	0.05%	3397.94	0.18

由表 5 可以看到，2012 年 6 类土地利用类型的平均侵蚀模数、面积和所占百分比以及侵蚀量。微度侵蚀：建设用地和水域；中度侵蚀：未利用地；轻度侵蚀：草地、耕地和林地，它们的侵蚀模数处于 500~2500 t/km²·a 之间。

Table 6. Soil erosion by land use types in 2017

表 6. 2017 年各土地利用类型的土壤侵蚀

土地利用类型	面积(km ²)	百分比(%)	平均侵蚀模数(t/km ² ·a)	侵蚀量(10 ⁴ t/a)
草地	304.155	27.24%	2148.00	65.33
建设用地	44.4159	3.98%	750.80	3.33
耕地	419.6961	37.58%	1060.90	44.53
林地	331.9182	29.72%	931.06	30.90
水域	16.0668	1.44%	104.06	0.17
未利用地	0.5247	0.05%	3350.72	0.18

表 6 所示的是 2017 年 6 类土地利用类型的平均侵蚀模数、面积和所占百分比以及侵蚀量，微度侵蚀：水域依旧是该侵蚀等级，它的平均侵蚀模数和侵蚀量分别为 $104.06 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $0.17 \times 10^4 \text{ t/a}$ ；未利用地为中度侵蚀，其平均侵蚀模数和侵蚀量分别为 $3350.72 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $0.18 \times 10^4 \text{ t/a}$ ；其余用地类型的侵蚀模数处于 $500 \sim 2500 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 之间，都为轻度侵蚀。

Table 7. Soil erosion by land use types in 2022

表 7. 2022 年各土地利用类型的土壤侵蚀

土地利用类型	面积(km^2)	百分比(%)	平均侵蚀模数($\text{t/km}^2 \cdot \text{a}$)	侵蚀量(10^4 t/a)
草地	301.8087	27.02%	2193.60	66.20
建设用地	66.0456	5.91%	775.13	5.12
耕地	399.0789	35.73%	1149.01	87.54
林地	330.129	29.56%	1102.65	25.59
水域	19.2258	1.72%	132.75	4.22
未利用地	0.5247	0.05%	3838.11	0.04

表 7 所示的是 2022 年 6 类土地利用类型的平均侵蚀模数、面积和所占百分比以及侵蚀量，与 2017 年一致水域依旧为微度侵蚀；其余草地、建设用地、耕地和林地的侵蚀模数处于 $500 \sim 2500 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 之间，均属于轻度侵蚀。

4. 结论

本研究选择楚雄市龙川江流域作为研究区域，选用基于 RUSLE 模型(修正土壤流失方程)方法来进行研究，分析 2012 年、2017 年和 2022 年该流域的土壤侵蚀强度及其变化，以及针对该侵蚀情况提出的土地结构优化建议。得出以下结论：

① 在土壤流失方程的六个因子中，坡度坡长因子和土壤可蚀性因子作为定量因子，在其余三个因子中，降雨侵蚀因子在 2017 年出现峰值，2012 年和 2017 侵蚀力较低；研究区的植被覆盖与管理因子在城市区域是最高的，其余部分都较低，说明研究区的植被覆盖度较高，对水土的保持作用较好；水土保持措施因子中水域和建设用地是最不易受侵蚀的用地类型，草地和未利用地是最容易受侵蚀的用地类型。

② 楚雄市龙川江流域水土流失 2012 年没有剧烈侵蚀区域，2017 年、2022 年涵盖了土壤侵蚀的六个等级。从三期土壤侵蚀强度来看，所占比重最大的均为微度侵蚀和轻度侵蚀区域，二者面积超过区域侵蚀总面积的 80%。

③ 2012~2022 年三期的各用地类型的侵蚀情况来看，未利用地的平均侵蚀模数一直较高，但由于其面积小，侵蚀量是最小的；草地、耕地和林地三种土地利用类型占到研究区总面积的 90% 以上，都属于轻度侵蚀，但有着高侵蚀量；水域一直处于微度侵蚀，但平均侵蚀模数和侵蚀量都在增长，呈增长趋势；建设用地在 2012 年属于微度侵蚀，随着建设用地的增加，平均侵蚀模数增长为轻度侵蚀，侵蚀量也在增加。

项目基金

云南省教育厅基金项目(2022J0818)，国家级大学生创新创业训练项目(202111391019)，云南省一流专业建设点：自然地理与资源环境建设项目。

参考文献

- [1] 曹银贵, 白中科, 景明, 张仲猛, 卢元清, 宋雪姣, 杜振州. 土地利用变化对区域生态服务价值的影响研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 256-261.
- [2] 刘文辉. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的宁夏彭阳县土壤侵蚀变化研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [3] 邝婷婷. 岷江上游土地利用变化及土壤侵蚀特征分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- [4] Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Washington DC.
- [5] 钱庆欢, 白晓永, 周德全, 肖建勇, 陈飞, 李颖. 基于 RUSLE 模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(2): 19-25.
- [6] 李宏伟, 郑钧滢, 彭庆卫, 田耀金. 国外土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 183-185.
- [7] 陈晨晨, 武谦, 张占友, 董卫, 程瑶, 王金. 澜沧江中下游流域土壤侵蚀时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 11-17, 30.
- [8] 牛俊文. 国内土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 25(S2): 386-389.
- [9] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [10] 唐克丽, 张科利, 刘元保, 王斌科, 查轩. 黄土高原人为加速侵蚀与全球变化[J]. 水土保持学报, 1992(2): 88-96.
- [11] 周正朝, 上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 52-56.
- [12] 赖万华, 杨诗经, 王国荣, 等. 土壤侵蚀经验统计预测模型及其应用综述[J]. 四川林勘设计, 2013(1): 18-25.
- [13] 琚彤军, 刘普灵, 徐学选, 王栓全, 史新合. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. 泥沙研究, 2007(4): 65-71.
- [14] 田永宏, 郭玉梅, 张庆伟, 马小哲. 黄丘一区一次降雨条件下的产流产沙计算[J]. 中国水土保持, 1997(2): 18-22.
- [15] 王治华, 黄联捷. 降雨与流域产沙——黄土高原产沙模型研究之一[J]. 中国科学(B 辑·化学·生命科学·地学), 1992(9): 987-993.
- [16] 关会敏, 姬志林. 楚雄市城市河道水体微生物指标测定与分析[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(10): 203-204.
- [17] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(3): 274-281.
- [18] 王雪璐. 青藏高原三江源高寒草地生态系统土壤侵蚀研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.