

# 基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征

张素<sup>1,2</sup>, 熊东红<sup>1</sup>, 吴汉<sup>1</sup>, 袁勇<sup>1</sup>, 李琬欣<sup>1</sup>, 张闻多<sup>1</sup>

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641100)

**摘要:** 土壤侵蚀一直是我国开展区域生态环境治理所关注的热点问题之一。在 RS 和 GIS 技术支持下, 基于 RUSLE 模型分析了凉山州孙水河流域不同土地利用类型、海拔和坡度条件下土壤侵蚀强度的特征, 定量评价了研究区土壤侵蚀空间特征。结果表明: 孙水河流域平均土壤侵蚀模数为 1 954.32 t/(km<sup>2</sup> · a), 土壤侵蚀严重区域主要集中于孙水河干流及其支流沿岸; 坡耕地和中覆盖草地是流域内主要侵蚀土地利用类型; 海拔 2 000~3 000 m 流域土壤侵蚀较为严重, 平均土壤侵蚀模数超过 2 000 t/(km<sup>2</sup> · a); 当坡度低于 25° 时, 土壤侵蚀模数随着坡度的增加而增大, 15°~25° 是该流域侵蚀最为严重的地带。研究成果可服务于凉山州孙水河流域水土保持治理工作, 为实现乡村振兴提供一定理论支持。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE; 孙水河流域

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)05-0024-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.004

## Research on Spatial Variation of Soil Erosion in Sunshui River Basin Based on RUSLE Model

ZHANG Su<sup>1,2</sup>, XIONG Donghong<sup>1</sup>, WU Han<sup>1</sup>, YUAN Yong, LI Wanxin<sup>1</sup>, ZHANG Wenduo<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041;

2. School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100)

**Abstract:** Soil erosion has always been one of the hot issues that China has paid attention to when developing regional ecological environment management. With the support of RS and GIS technology, this study analyzed the characteristics of soil erosion intensity under different land uses, altitudes and slope conditions in the Sunshui River Basin of Liangshan Prefecture based on the RUSLE model, and quantitatively evaluated the spatial characteristics of soil erosion. The results showed that: (1) The average soil erosion modulus of the Sunshui River Basin was 1 954.32 t/(km<sup>2</sup> · a), and the areas with severe soil erosion were mainly concentrated along the mainstream of the Sunshui River and its tributaries. (2) Moreover, the slope farmland and middle-cover grassland were the main types of eroded land use in the watershed. Soil erosion in the 2 000~3 000 m altitude zone of the basin was more serious, with an average soil erosion modulus exceeding 2 000 t/(km<sup>2</sup> · a). (3) Furthermore, the soil erosion modulus increased with the increases of slope, and 15°~25° was the most severely eroded zone in this watershed. We expect that these research results could serve the water and soil conservation and management work of the Sunshui River Basin in Liangshan Prefecture, and provide certain theoretical support for the realization of rural revitalization.

**Keywords:** soil erosion; RUSLE; Sunshui River Basin

土壤侵蚀造成土地退化、肥力下降, 使生态环境恶化, 已成为制约区域生态环境可持续发展的因素之一, 受到国内外学者的长期关注<sup>[1-3]</sup>。土壤侵蚀问题主要受降水、坡度、植被、土地利用类型等诸多因素的影响, 对于气候条件相似的小流域而言, 其土壤侵蚀

强度受不同的地形、坡度和土地利用条件的影响极大<sup>[4-6]</sup>。开展土壤侵蚀评估及泥沙来源分析是实现区域水土保持措施布设、江河湖库泥沙治理及相关生态文明建设工程布局的前提和基础<sup>[1]</sup>。修正后的通用土壤流失方程 Reclassify Universal Soil Loss Equa-

收稿日期: 2021-03-12

资助项目: 四川省科技计划项目(2018JY0545); 中国科学院先导专项 A(XDA20020401); 内江师范学院应用基础理论重点项目(2019YZ03)

第一作者: 张素(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、土壤物理研究。E-mail: zhangsu211@foxmail.com

通信作者: 熊东红(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀、土壤物理与生态恢复研究。E-mail: dxiong@imde.ac.cn

tion(简称 RUSLE)具有结构较简单、参数易获取、计算更简便的优势,是目前国内外广泛采用的土壤侵蚀模型之一<sup>[7-9]</sup>。王楚琪等<sup>[7]</sup>运用 RUSLE 模型分析了大连庄河市土壤侵蚀空间分布特征认为,坡度较大、植被覆盖度较低的丘陵低山区易发生水土流失;张园眼等<sup>[8]</sup>针对南方红壤丘陵区的深圳市土壤侵蚀的研究表明,林地和园地是土壤侵蚀易发地类,汛期山区地带的泥沙输移量超过全年总量的 80%;唐艺嘉等<sup>[9]</sup>研究发现,九寨沟震后土壤侵蚀严重地带主要集中于海拔 3 000~4 000 m 区域。此外,在东北黑土区、西北天山流域及西南干热河谷区域开展的土壤侵蚀研究<sup>[10-12]</sup>均有报道。上述研究表明,该模型在探明不同空间尺度、不同环境和不同区域的土壤侵蚀问题方面发挥了较大作用。尤其是近年来,该模型成为缺乏观测数据地区了解土壤侵蚀现状、解析泥沙来源的重要手段。

凉山彝族自治州(以下简称“凉山州”)是国家确定的“三州三区”深度贫困地区之一,区域山高坡陡,沟壑纵横,陡坡耕地现象严峻,水土流失十分严重。孙水河是雅砻江二级支流,也是凉山州境内含沙量最高河流之一。在此期间,诸多学者<sup>[13-15]</sup>针对该区域开展了土壤侵蚀和水土保持研究工作,但受限于该区水土流失监测数据稀缺,对区域侵蚀产沙规律、泥沙来源还处在定性和经验的描述状态,亟待进一步开展研究。对孙水河流域的土壤侵蚀强度和侵蚀特征进行评估与分析,找出重点土壤侵蚀地带,分析侵蚀差异原因,可为该流域农业可持续发展中土壤侵蚀防治、水土资源的高效利用和水土保持措施的实施提供科学依据。基于此,本研究在数次野外查勘采样基础上,利用区域多源数据,基于 RUSLE 模型,定量分析土壤侵蚀空间分布特征,判别主要泥沙来源地带,以期服务于研究区土壤侵蚀监测、水土保持规划及生态文明建设的宏观决策。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

孙水河流域总面积 1 678 km<sup>2</sup>,地处四川省凉山州,位于 102°11′—102°42′E,27°54′—28°29′N(图 1),海拔 1 630~3 491 m;年均降水量 1 149.8 mm,属“冕宁—西昌”暴雨中心区域,雨季降水量占全年 90%以上;年均气温 17~19℃,年均风速 2.5 m/s,属亚热带季风气候<sup>[13]</sup>。孙水河是安宁河上游左岸的最大支流,发源于昭觉县的洛马阿木拖山(主峰海拔高程 3 491 m),干流全长 95.2 km,多流经深切河谷地带,河流水系呈枝状分布,河床平均坡降比 12.94%,年径流量 11.1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,年输沙率 94.37 m<sup>3</sup>/s,水能资源理论蕴藏量达 15.04×10<sup>4</sup> kW。研究

区域植被属于中亚热带湿润山地植被类型,基带土壤为红壤,广泛分布陆相红色碎屑沉积地层(以下简称“红层”),岩层产状陡而多变,<5°的面积仅为 5.21%,坡度>15°的面积超过 65%;裂隙密集且产状复杂,岩体破碎<sup>[6]</sup>,地表松散物质较多,抗蚀性差,加上水力、人为耕种等方面的因素之间相互作用构成了严重的土壤侵蚀问题。

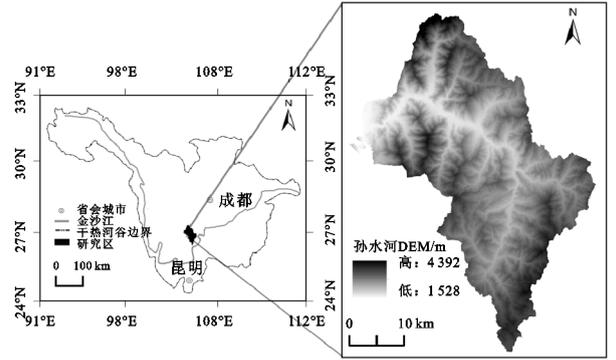


图 1 研究区地理位置

### 1.2 数据来源

本研究所使用的数据主要有:(1)凉山州水利局提供的水利普查数据(2011年),孙水河流域 2018 年逐月气象水文数据以及 1:50 000 土地利用数据;(2)凉山州土壤类型数据、土壤机械组成主要来源于中国土壤科学数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>);(3)遥感影像来源于美国地质勘探局 landsat-8 2018 年卫星数据(<https://www.usgs.gov/>);(4)地理空间云下载的 30 m 分辨率 DEM 及 1:50 000 地形数据(<http://www.resdc.cn/>)。

### 1.3 数据处理

(1)修正通用土壤流失方程(RUSLE)。通过降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被与经营管理措施 5 个因子开展土壤侵蚀定量计算<sup>[7-9]</sup>,其表达式为:

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

式中:A 为土壤流失量(t/(hm<sup>2</sup>·a));R 为降雨侵蚀力因子((MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a));C 为植被与经营管理措施因子;K 为土壤可蚀性因子((t·hm<sup>2</sup>·h)/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm));LS 为坡长坡度因子;P 为水土保持措施因子;其中 LS、C、P 为无量纲因子。

(2)降雨侵蚀力 R 因子。该因子反映降雨对土壤的潜在剥蚀能力,可表征降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标<sup>[16-17]</sup>,其表达式为:

$$R = 5.249 \left( \sum_{n=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_n} \right)^{1.205} \quad (2)$$

式中:P<sub>i</sub>为第 n 月降水量(mm);P<sub>n</sub>为年降水量(mm)。

(3)植被与经营管理因子 C。计算坡面产沙量与植被覆盖度的相关关系,C 值范围为 0~1,其值越大<sup>[8]</sup>,则受土壤侵蚀的潜在威胁越大,其表达式为:

$$C = \begin{cases} 1 & c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & 0 < c < 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (3)$$

(4) 土壤可蚀性因子  $K$ 。本研究采用 EPIC 模型中发展起来的土壤可蚀性因子  $K$  值来估算 RUSLE 方程中的土壤侵蚀力因子<sup>[18]</sup>, 其表达式为:

$$K = (0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100))) \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left( 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left( 1 - \frac{0.7 \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 - 22.9 \text{SN}_1)} \right) \quad (4)$$

式中: SAN、SIL、CLA 和  $C$  分别为土壤中沙粒、粉粒、黏粒以及碳的含量(%);  $\text{SN}_1 = 1 - \text{SAN}/100$ 。计算获取的  $K$  值为美制单位, 转换为国际通用公制单位( $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ )需乘以转换系数 0.13, 获取公制单位  $K$  值。

(5) 坡长坡度因子  $LS$ 。坡长坡度因子是降雨侵蚀动力的加速因子<sup>[7,9,19]</sup>。坡度越大, 土壤的重力势能越大, 越容易被剥蚀; 坡长越短, 坡面水流沿程能量积累越小, 土壤剥蚀量越小。其表达式为:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \left( -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)} \right) \quad (5)$$

其中, 在陡坡区域,  $m$  值应该取 0.44, 故  $m$  的取值为:

$$m = \begin{cases} 0.04 & \text{tg } \theta > 5\% \\ 0.4 & 5\% > \text{tg } \theta > 3\% \\ 0.3 & 3\% > \text{tg } \theta > 1\% \\ 0.2 & \text{tg } \theta < 1\% \end{cases} \quad (6)$$

(6) 水土保持措施因子  $P$ 。一般未采取任何土壤保持措施的土地  $P$  值为 1, 根本不发生侵蚀的土地  $P$  值为 0。

采用 Arc GIS 10.2 软件和 Matlab 2019b 软件进行数据分析和制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀空间分布格局

图 2 为基于 RUSLE 的孙水河流域土壤侵蚀因子空间分布。其中, 图 2a 为利用 ArcGIS 10.2 中的 IDW 插值得出孙水河流域  $R$  值空间分布, 其高值区位于贺波洛河流经区域; 已有研究<sup>[8]</sup>表明, 当植被盖度  $> 78\%$  时, 受土壤侵蚀的潜在威胁较小, 故取值 0, 当植被盖度为 0 时, 极易发生土壤侵蚀, 故取值 1, 研究区  $C$  值平均值为 0.43, 标准差为 0.14, 植被覆盖度较好(图 2b); 同时,  $K$  因子和  $LS$  因子的高值区位于孙水河沿岸地带(图 2c, d)。图 2e 为水土保持措施  $P$  因子, 分析表明, 研究区水土保持措施水平较差,  $P$

值平均值为 0.67, 标准差为 0.35。根据国家水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)》<sup>[20]</sup> 确定土壤侵蚀强度分级指标, 孙水河流域属于西南土石山区, 土壤侵蚀以水蚀为主, 该区土壤容许流失量为  $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (图 2f)。

随着水土保持工作的逐年开展, 研究区土壤侵蚀问题得到一定的遏制, 流域土壤侵蚀表现为沿河谷呈条带状分布, 流域年平均输沙量为  $302.9 \times 10^4 \text{ t}$ , 总土壤侵蚀量达  $328.1 \times 10^4 \text{ t/a}$ , 平均土壤侵蚀模数为  $1954.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。不同空间尺度的土壤侵蚀问题有所差别, 局部区域的水土保持工作不容忽视。全流域微度水力侵蚀(I)主要分布于流域下游贺波洛河、则约河、深沟等区域, 侵蚀面积为  $1185.9 \text{ km}^2$ , 占比 70.3%, 其中深沟地区平均侵蚀模数低于  $1200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 中度水力侵蚀(III)主要分布于孙水河干流及支流两岸, 面积为  $153.8 \text{ km}^2$ ; 洛哈沟、巴久河、洛莫河流经区域的平均侵蚀模数超过  $3000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 而依达河、米市河等地区的侵蚀模数也高于  $2800 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。应重视孙水河干流及其支流(洛哈沟、巴久河、米市河)沿岸的存在的较强的土壤侵蚀问题, 做好微度水利土壤侵蚀区(贺波洛河、则约河、深沟)的预防保护工作(表 1 和图 3)。

### 2.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征分析

由表 2 可知, 各地类以轻度水力侵蚀(II)为主, 微度水力侵蚀(I)和中度水力侵蚀(III)次之, 以坡耕地、中覆盖草地和灌木林地土壤侵蚀较为严重。坡耕地的年侵蚀量最高为  $112.6 \times 10^4 \text{ t}$ , 其占研究区土壤侵蚀总量的 34.31%; 其次为中覆盖草地, 年侵蚀总量为  $87.9 \times 10^4 \text{ t}$ , 占比 26.78%; 灌木林地年侵蚀总量为  $78.5 \times 10^4 \text{ t}$ ; 有林地的土壤侵蚀量较低。土壤侵蚀模数也呈现相似趋势, 以坡耕地最高, 中覆盖度草地和高覆盖度草地次之, 有林地土壤侵蚀模数最低。

可见, 开展土地利用类型与土壤侵蚀强度之间的关系研究对于治理土壤侵蚀、减轻侵蚀危害具有重要意义。合理的土地利用方式会减轻土壤侵蚀, 而陡坡垦殖等不合理土地利用方式是土壤侵蚀的重要诱因, 分析发现, 研究区坡耕地土壤侵蚀问题严重, 应该加强坡耕地治理。

### 2.3 不同海拔土壤侵蚀特征

孙水河流域地势起伏较大, 不同海拔带的植被类型、土地利用类型等都有很大差别, 为了更直观地了解孙水河流域土壤侵蚀强度的分布情况, 以 DEM 为基础数据, 将孙水河流域划分为 6 个高程带。由表 3 和图 4 可知, 研究区平均侵蚀模数为  $1954.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。其中土壤侵蚀最严重的区域处于海拔  $2000 \sim 2500 \text{ m}$ , 土壤侵蚀模数高达  $2468.4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 以轻度水力

侵蚀(II)和中度水力侵蚀(III)为主,II、III级侵蚀面积占比高达 50.86%;低海拔地区(<2 000 m)以 III级侵蚀强度为主,占比达 36.43%,土壤侵蚀模数为 2 064.7

t/(km<sup>2</sup>·a),而海拔 3 500~4 000 m 和 >4 000 m 地带的土壤侵蚀强度以 II级为主,土壤侵蚀模数低于区域平均值。

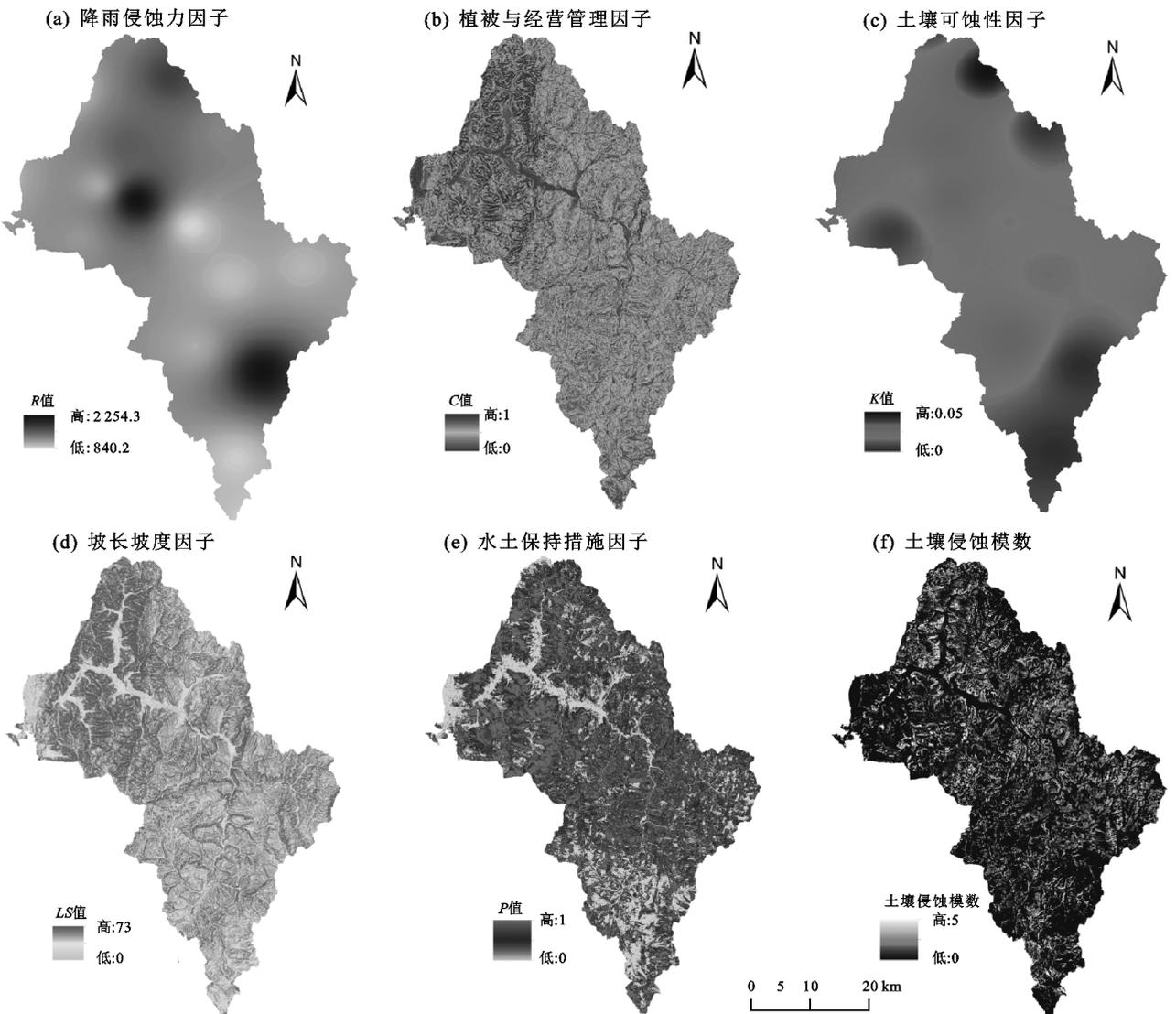


图 2 孙水河流域土壤侵蚀因子空间分布

表 1 孙水河流域土壤侵蚀强度分级

| 土壤侵蚀级别  | 编号  | 土壤侵蚀强度/<br>(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | 平均流速厚度/<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | 面积/km <sup>2</sup> | 百分比/% |
|---------|-----|---|----------------------------------|--------------------|-------|
| 微度水力侵蚀  | I   | <1000   | <0.15, <0.37, <0.74              | 1185.95            | 70.31 |
| 轻度水力侵蚀  | II  | 1000~2500   | 0.15, 0.37, 0.74~1.9             | 306.80             | 18.50 |
| 中度水力侵蚀  | III | 2500~5000   | 1.90~3.70                        | 153.81             | 9.28  |
| 强烈水力侵蚀  | IV  | 5000~8000   | 3.70~5.90                        | 22.87              | 1.38  |
| 极强烈水力侵蚀 | V   | 8000~15000  | 5.90~11.10                       | 6.90               | 0.42  |
| 剧烈水力侵蚀  | VI  | >15000  | >11.10                           | 1.89               | 0.11  |

孙水河流域海拔大多处于 2 000~3 500 m,不同海拔带土壤侵蚀差异明显,海拔低于 3 000 m 区域,为土壤侵蚀严重地带,土壤侵蚀强度以 III级为主,而高海拔区(>3 000 m)区域土壤侵蚀状况稍轻,以 II级轻度水力侵蚀为主(侵蚀面积占比超过 40%)。这可能与区域退耕还林政策和自发移民搬迁有关,高海拔地区出现大量撂

荒地,加之自然封禁的实施,使得该区域生态环境有所恢复;而低海拔区域为移民迁入区域,土地利用开发强度增大,加之水土保持等措施项目具有一定的生态滞后性,使得该区土壤侵蚀问题较为严峻。

#### 2.4 不同坡度的土壤侵蚀特征

坡度比坡长能够更加直观地影响土壤侵蚀,坡度越

陡, 汇流的时间越短, 径流能量也越大, 因而对坡面的冲刷能力越强。孙水河流域为土石山区, 研究不同坡度下的土壤侵蚀强度有很强的现实意义。结合孙水河地区的实际情况, 利用 ArcGIS 10.2 软件, 将坡度划分为 5 个坡度分级, 并求得研究区不同坡度的土壤侵蚀模数, 划分侵蚀强度(表 4 和图 5)。15°~25°的坡度面积占研究区总面积 32.9%, 其土壤侵蚀量却达流域总土壤侵蚀量的 37.1%, 土壤侵蚀模数高达 2 193.3 t/(km<sup>2</sup>·a), 是不同坡度侵蚀最为严重区域; 在 >25° 坡度区域, 随着海拔的升高, 平均土壤侵蚀模数呈现显著降低的趋势, 35°以上区域土壤侵蚀模数最小, 为 1 500.6 t/(km<sup>2</sup>·a), 侵蚀强度以微度(I)和轻度(II)水力侵蚀为主, 2 类侵蚀强度面积占比高达 86.91%; 在 <25° 坡度带内, 平均土壤侵蚀模数呈现出随坡度降低而逐带下降的现象。可见, 自然封禁和陡坡还林政策有利于区域生态恢复; 在 <5° 的平坦地带, 土壤侵蚀模数仅为 1 463.1 t/(km<sup>2</sup>·a), 区域降低坡度的坡改梯生态工程成效明显。

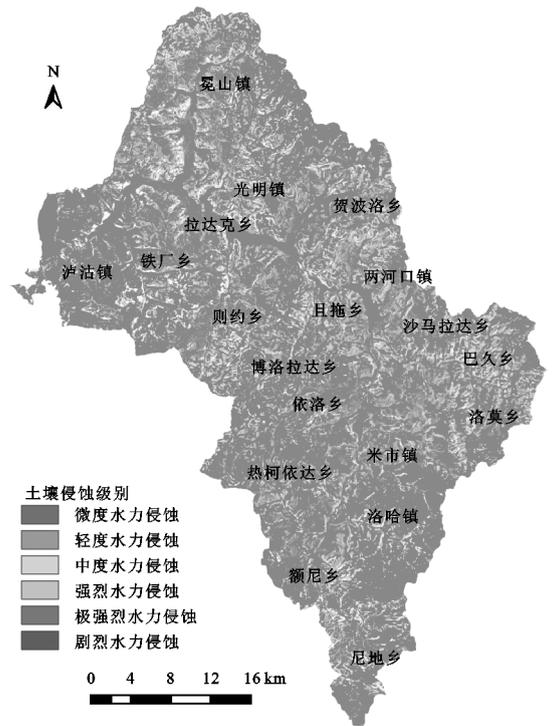


图 3 土壤侵蚀强度空间分布

表 2 孙水河流域不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

| 土地利用类型 | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/% | 侵蚀量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> ) | 侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |       |       |      |      |      |      |
|--------|--------------------|------|--|---|-------|-------|------|------|------|------|
|        |                    |      |  | 年均  | I     | II    | III  | IV   | V    | VI   |
| 低覆盖度草地 | 10.6               | 0.4  | 1.7                                      | 1646.2                                      | 2.4   | 7.2   | 0.3  | 0.1  | 0.1  | 0.3  |
| 中覆盖度草地 | 373.0              | 15.5 | 87.9                                     | 2356.4                                      | 26.8  | 260.8 | 46.0 | 16.6 | 14.9 | 6.8  |
| 疏林地    | 63.6               | 2.6  | 9.1                                      | 1429.3                                      | 7.7   | 46.4  | 5.3  | 1.9  | 1.4  | 0.5  |
| 灌木林地   | 588.8              | 24.4 | 78.5                                     | 1333.2                                      | 117.4 | 400.8 | 37.3 | 13.7 | 12.1 | 12.1 |
| 高覆盖度草地 | 172.8              | 7.2  | 30.9                                     | 1790.2                                      | 18.6  | 120.2 | 22.1 | 5.7  | 3.9  | 1.7  |
| 滩地     | 1.6                | 0.1  | 0  | 256.4                                       | 1.3   | 0.2   | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 坡耕地    | 362.8              | 15.0 | 112.6                                    | 3103.5                                      | 26.0  | 194.4 | 68.5 | 41.1 | 24.9 | 6.9  |
| 裸地     | 0.5                | 0    | 0.2                                      | 3125.0                                      | 0.0   | 0.3   | 0.1  | 0    | 0    | 0    |
| 有林地    | 62.0               | 2.6  | 3.5                                      | 567.7                                       | 28.1  | 31.7  | 1.2  | 0.2  | 0.3  | 0.2  |
| 水田     | 34.8               | 1.4  | 1.6                                      | 445.8                                       | 23.7  | 9.3   | 1.6  | 0    | 0    | 0    |
| 农村居民点  | 2.1                | 0.1  | 0.3                                      | 1179.3                                      | 1.0   | 0.8   | 0.1  | 0    | 0    | 0.1  |
| 工交建设用地 | 0.7                | 0    | 0.4                                      | 4861.1                                      | 0.2   | 0.2   | 0.1  | 0    | 0    | 0.1  |
| 城镇及其他  | 2.5                | 0.1  | 0.1                                      | 476.2                                       | 2.0   | 0.2   | 0.1  | 0.1  | 0    | 0    |

注: I、II、III、IV、V、VI 分别为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈水力侵蚀。

表 3 孙水河流域不同海拔高程带土壤侵蚀特征

| 海拔/m      | 面积/km <sup>2</sup> | 面积百分比/% | 平均侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--------------------|---------|---|
| <2000     | 132.1              | 7.8     | 2064.7  |
| 2000~2500 | 438.0              | 26.1    | 2468.4  |
| 2500~3000 | 742.7              | 44.3    | 1952.4  |
| 3000~3500 | 341.7              | 20.4    | 1273.6  |
| 3500~4000 | 20.2               | 1.2     | 1867.4  |
| >4000     | 3.3                | 0.2     | 466.5   |
| 合计        | 1679.0             | 100.0   | 1954.3  |

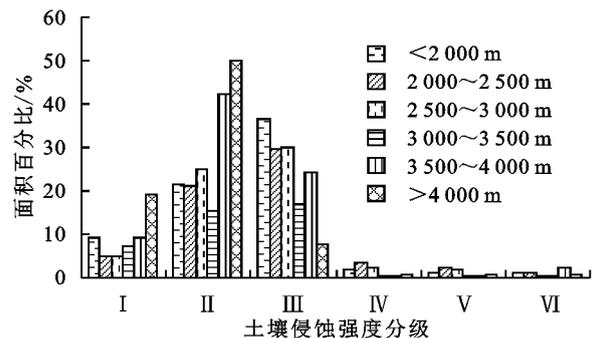


图 4 孙水河流域不同海拔高程带侵蚀强度分级面积占比  
整体而言, 孙水河流域不同坡度的土壤侵蚀以轻

度水利侵蚀(Ⅱ)为主,其次为微度侵蚀(Ⅰ)和中度水利侵蚀(Ⅲ),关注零星分布的强度、极强度和剧烈水利侵蚀强度的区域;同时,土壤侵蚀最严重地区集中于 $8^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内,而该区间是研究区坡耕地集中地带,后续应继续开展陡坡退耕还林政策,其余较低坡度的区域,尤其是坡耕地区域,应继续实施坡改梯项目,降低坡度,提高土地生产力,将减少土壤侵蚀与实现区域粮食安全并举(图 5)。

表 4 孙水河流域不同坡度土壤侵蚀特征

| 坡度<br>分级/ $^{\circ}$ | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 百分比/<br>% | 侵蚀量/<br>( $10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ) | 平均侵蚀模数/<br>( $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) |
|----------------------|------------------------|-----------|---|--|
| <5                   | 85.5                   | 5.1       | 12.5  | 1463.1   |
| 5~8                  | 76.7                   | 4.5       | 13.2  | 1719.3   |
| 8~15                 | 290.5                  | 17.3      | 58.5  | 2009.6   |
| 15~25                | 553.5                  | 32.9      | 121.6   | 2193.3   |
| 25~35                | 426.8                  | 25.4      | 85.8  | 2007.8   |
| >35                  | 245.0                  | 14.6      | 36.8  | 1500.6   |
| 合计                   | 1679.0                 | 100.0     | 328.1   | 1954.3   |

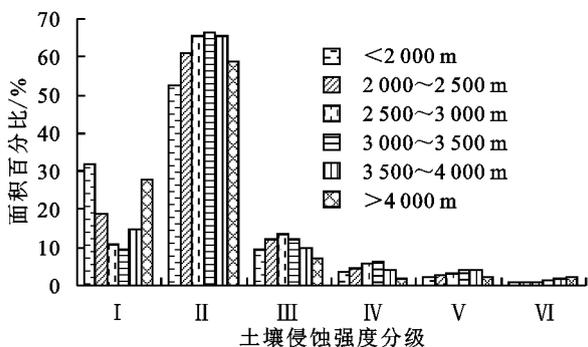


图 5 孙水河流域不同坡度的侵蚀强度分级面积占比

## 3 讨论

### 3.1 模型结果合理性

对较小时间尺度的同一地区而言, $P$  值是影响土壤侵蚀结果的关键因子。目前,基于日、月、年不同时间尺度的降水侵蚀力指标模型已得到广泛应用,岳本江<sup>[21]</sup>通过评估现有的 11 种模型指标发现,修正后的傅里叶指数(MFI)为基础的降雨侵蚀力模型能够较好地估算流域降水侵蚀力,同时,该模型已成功应用于西南土石山区降雨侵蚀力时空分布与演变趋势的研究。基于此,本研究选用基于 MFI 指数的降雨侵蚀力模型作为 RUSLE 模型重要输入参数。本研究表明,研究区基于 RUSLE 的平均侵蚀量为  $302.92\times 10^4\text{ t}$ ,与王昌远等<sup>[22]</sup>研究结论(平均侵蚀量为  $319.2\times 10^4\text{ t}$ )相差仅为 5.3%。同时,平均土壤侵蚀模数为  $1\,954.32\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  的模拟结果,与区域第一次全国水利普查结果( $2\,036.03\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ )以及王昌远等<sup>[22]</sup>的研究结论( $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ )较接近,表明模

型计算结果可靠。值得注意的是,流域主要侵蚀区域为坡耕地,侵蚀产沙严重地带主要集中于孙水河干流及其支流沿岸,与野外调查现状相吻合,证实了 RUSLE 模型在该流域的适用性,且进一步佐证了前人<sup>[23]</sup>提出的“沟坡兼治、综合治理”的理念。

### 3.2 土壤侵蚀分布的集中地带

研究区的坡耕地和中覆盖草地土壤侵蚀严重,主要分布于海拔  $2\,000\sim 3\,000\text{ m}$ (当地俗称“二半山”,是该区较为独特的地理单元<sup>[22]</sup>),是农业耕作、人类活动最强烈的地带;该范围内其坡度多在  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,坡耕地广布,植被覆盖度低,加之近年来受自发移民的影响,大量坡耕地撂荒,局部出现裸露现象,严重土壤侵蚀强度较大。二半山以上区域( $>3\,000\text{ m}$ )受人类扰动较小,植被覆盖好,土壤侵蚀较轻,需加强该区域的生态保护力度;二半山以下区域( $<2\,000\text{ m}$ ),土壤侵蚀主要分布于洛哈沟、巴久河、米市河沿岸。

### 3.3 岩土性质与土壤侵蚀空间分布的关系

从岩性构成上看,孙水河流域轻度侵蚀地区(深沟)主要为岩浆岩,岩体相对完整,地表疏松物质少,土壤侵蚀相对较轻;中度侵蚀区域岩层主要为川南红层的紫色砂页岩,岩体破碎易风化,土壤抗蚀性弱;研究区岩层以侏罗系、白垩系红层为主,具有“砂页岩+泥岩”的软硬相间特征,易发崩塌、滑坡、泥石流地质灾害,沟谷产沙严重。可见,流域内土壤侵蚀空间差异大,地形因子、岩土性质是导致土壤侵蚀模数差异的主要因素之一,后续可加强不同地质类型的土壤侵蚀特征研究。

### 3.4 流域水土流失防控建议

建议后续开展水土保持工作时,应继续加强“退耕还林(草)”“保土耕作”等坡耕地整治、灌草地生态修复措施,使之固结土壤,拦截地表径流;针对洛哈沟、巴久河、米市河等沿岸侵蚀严重的沟谷地带,视流域干支流沿岸的重力侵蚀(崩塌、滑坡)、沟道混合侵蚀(泥石流)的治理;针对侵蚀严重的支毛沟,建议加强泥沙拦挡工程(拦沙坝、谷坊等)建设,以削减径流动能、拦截泥沙,实现“固土”“稳坡”“拦沙”的目的。

## 4 结论

土壤侵蚀严重区域主要集中于孙水河干流及其支流(洛哈沟、巴久河、米市河)沿岸,孙水河流域平均土壤侵蚀模数为  $1\,954.32\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,远高于水利部发布的西南地区容许土壤侵蚀模数  $500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,后续加强相关区域的水土保持工作,针对不同的侵蚀强度区域,布设对应的水土保持措施。

坡耕地和中覆盖草地是流域内主要侵蚀土地利

用类型;流域海拔 2 000~3 000 m 的二半山土壤侵蚀较为严重,以中度水力侵蚀为主,平均土壤侵蚀模数超过 2 000 t/(km<sup>2</sup>·a);土壤侵蚀模数与坡度关系密切,当坡度在 0~25°时,表现为随着坡度的增加而增大的趋势,15°~25°是该流域侵蚀最为严重的地带,也是流域内产沙的主要来源之一,需加强上述坡度、海拔带区域内的坡耕地和灌草地的重点治理。

#### 参考文献:

- [1] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.
- [2] Fang H Y. Impact of land use changes on catchment soil erosion and sediment yield in the northeastern China: A panel data model application[J].International Journal of Sediment Research,2020,35(5):540-549.
- [3] He Q, Dai X A, Chen S Q. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J].Journal of Arid Land,2020,12(5):865-886.
- [4] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.
- [5] 黄俊,金平伟,姜学兵,等.南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证[J].农业工程学报,2020,36(17):106-114.
- [6] 倪化勇,王德伟,白永健,等.孙水河流域地质灾害链类型结构与断链对策[J].山地学报,2016,34(4):451-459.
- [7] 王楚琪,王利.大连庄河市土壤侵蚀强度评价研究[J].国土与自然资源研究,2020(6):5-8.
- [8] 张园眼,李天宏.基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):48-61.
- [9] 唐艺嘉,王泽根.基于 RUSLE 的九寨沟县地震后土壤侵蚀定量分析[J].化工设计通讯,2021,47(1):86-87,100.
- [10] 何煦,桑琦明,郑粉莉,等.东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2021,35(1):103-109,115.
- [11] 李娜,王新军,卢刚,等.2000—2017 年天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):73-79.
- [12] 戴佳栋,张泽洪,张建辉,等.干热河谷区耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀特性[J].水土保持学报,2021,35(1):116-124,131.
- [13] 李琬欣,熊东红,张素,等.四川凉山州孙水河流域近 60 年来径流趋势特征分析[J].水土保持学报,2020,34(2):130-137.
- [14] 曾义.孙水河流域水文特征分析[J].江苏水利,2018(3):69-72.
- [15] 王德伟,林启飞,倪化勇,等.孙水河流域阿坡洛滑坡成灾机理分析[J].四川地质学报,2016,36(1):114-117.
- [16] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
- [17] Zhang Y, Chao Y, Fan R R, et al. Spatial-temporal trends of rainfall erosivity and its implication for sustainable agriculture in the Wei River Basin of China[J]. Agricultural Water Management,2021,245:e106557.
- [18] 饶良懿,徐也钦,胡剑汝,等.砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):763-773.
- [19] 李鑫,郭伟玲,张莎莎.土壤侵蚀分辨率对地形因子空间精度影响研究[J].黑龙江工程学院学报,2021,35(1):5-9,38.
- [20] Zhang S, Xiong D H, Wu H, et al. Effects of the root morphological characteristics of different herbaceous species on soil shear strength and soil anti-scourability in the dry-hot valley region of South-western China[J]. Soil Research,2019,58(2):189-197.
- [21] 岳本江.延河流域水沙演变及对土地利用/覆被变化的响应[D].北京:中国科学院研究生院,2015.
- [22] 王昌远,谌贻良.孙水河泥沙变化趋势因素及治理对策研究[J].中国农资,2014(4):208-211.
- [23] 王延贵,胡春宏,刘茜,等.长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J].泥沙研究,2016(1):1-8.