

# 贵州赤水河流域水土流失敏感性评价

吕思思 苏维词 李威 黄亮 赵卫权<sup>1</sup>

(贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

**【摘要】:** 赤水河流域在人类活动影响下, 属于典型的生态脆弱区和水土侵蚀敏感区, 水土流失严重且已影响到水质及周边生态环境安全。研究筛选降水侵蚀力(R)、土壤质地(K)、坡度坡向(LS)和地表覆盖(C)为水土流失敏感性影响因子, 同时参考研究区石漠化分布情况, 运用GIS技术研究贵州赤水河流域8个市县水土流失敏感性空间分布情况, 引入水土流失潜在危险指数(SEPDI)评价水土流失敏感危险性。经过研究得出以下结论: (1) 研究区水土流失敏感性属于中等偏上, 其中中度和重度敏感区之和占总面积的63%; (2) 各市县水土流失敏感危险性差异较大, 危险性最大的是桐梓县, SEPDI为5.36, 最小的是赤水市, SEPDI为3.4; (3) 研究区水土流失潜在敏感性随坡度增加先增加后减少, 25°~35° SEPDI达到峰值, 35°以上的SEPDI下降, 这是由于研究区地貌主要为高原山地, 人类在8°~35°活动频繁, 35°以上人类活动减少、植被增加, 水土流失敏感危险性下降; (4) 耕地与未利用地水土流失风险性更高, 土壤表面的覆盖对水土保持至关重要。

**【关键词】:** 水土流失 水土流失潜在危险指数 GIS 赤水河流域

**【中图分类号】:** S157.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1003-6563(2022)03-0062-07

赤水河流经云南、贵州、四川, 是长江上游一级支流中少有的整个干流尚未进行开发建设、基本上保持原生态的河流。沿河自然、生物资源丰富, 有上百种鱼类, 其中10多种珍稀鱼类是赤水河特有, 流域内包括国家丹霞地质公园、国家级桫欏自然保护区等多个保护区和自然景区。同时酒产业发达, 汇集茅台、郎酒、习酒、五粮液和泸州老窖等享誉中外的名酒, 形成了特有的酒文化。红军长征“四渡赤水”也为该地留下了红色文化遗产。因此赤水河流域从文化和生态方面都具有重要的保护价值。

赤水河流域经济开发活动相对活跃, 上游地区过度的垦殖、滥砍乱伐、土法炼硫炼锌, 中下游小煤窑、酒作坊、小纸厂较多, 致使流域植被严重破坏, 水土流失严重, 森林覆盖率已从1950年的35%左右下降到现在的20%左右, 2010年水土流失面积为9520.49km<sup>2</sup>, 占流域总面积的46%<sup>[1]</sup>。水土流失也对赤水河水源、水质、经济、生态构成威胁, 根据1990年到2016年《贵州省环境状况公报》公布的数据, 近十几年赤水河水质由国家I类优质地表水降到国家II、III级; 自1949年以来, 流域发生较大洪灾17次, 平均约3.5年发生一次; 习水县2003年“6·24”特大洪水灾害造成经济损失达6亿多元。该区域的水土流失问题直接影响到生态安全、人民生命安全和经济产业发展, 抓住区域喀斯特特性, 明晰水土流失敏感性, 能为水土流失防治方案提供指导性建议。

水土流失敏感性常用方法有: 1965年, W.H. Wischmeier和D. Smith提出的USLE<sup>[2]</sup>、1997年USDA在USLE的基础上进一步修订发布RUSLE<sup>[3]</sup>、1994年Jeff Arnold开发的SWAT<sup>[4]</sup>、1995年USDA向外公布WEPP<sup>[5]</sup>、Beasley和Huggins改进的ANSWERS等<sup>[6]</sup>。近几年研究成果有李益敏<sup>[7]</sup>、陈思旭<sup>[8]</sup>、Gaub<sup>[9]</sup>利用RUSLE评价怒江、南方丘陵山区、突尼斯共和国的水土流失情况; 李益敏等基于GIS和RUSLE测定怒江州土壤侵蚀情况<sup>[10]</sup>等。此外, 很多学者经过对喀斯特区域水土流失情况的长期研究, 提出喀斯特区

**作者简介:** 吕思思(1987-), 女, 助理研究员, 研究方向: 喀斯特环境与3S应用。赵卫权(1982-), 男, 副研究员, 研究方向: 喀斯特生态环境。

**基金项目:** 黔科院科专合字[2021]03号; 黔科院C字[2021]1号; 贵州科学院创新人才团队能力提升工程([2019]08)

域水土流失的特殊性,如:熊康宁通过对鸭池、红枫湖、花江典型示范区的长期研究,总结了石漠化治理区水土流失的特征与变化规律<sup>[11]</sup>,凡非得<sup>[12]</sup>、李阳兵<sup>[13]</sup>从贵州喀斯特岩性的成土作用分析土壤可流失量;万军根据喀斯特区域特征对国家土壤侵蚀分级标准进行修改<sup>[14]</sup>。降雨作为造成水土流失的动力条件,现有研究中多从年均降雨考虑降雨因子,但赤水河流域6月至9月降雨量占比达到全年的65%~70%,强降水日数较多,实际降雨动力被低估。因此本研究考虑在区域喀斯特石漠化特性的基础上,基于日降雨分析研究区内的水土流失敏感性,为水土流失防治、生态建设提供参考。

## 1 研究区

赤水河流域贵州段涉及毕节、大方、金沙、遵义、仁怀、赤水、习水、桐梓8个市县,占整个流域面积的56.4%,约为10700.2km<sup>2</sup>,人口数约370万人。流域处于云贵高原向四川盆地倾斜的斜坡面,西南高而东北低,流域内有大娄山山脉,高程200~1890m;出露地层有震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二迭系、三迭系、侏罗系、白垩系、第四系等;土壤类型以黄壤、紫色土为主,水稻土分布较为分散;流域内降雨空间与时间分布不均,赤水河左岸支流大同河上游,年降雨量达1200mm以上,中游干流及支流古蔺河中下游年降雨量仅700~800mm,5月至10月降雨量占全年降雨量的75%~83%;截至2014年底,贵州赤水河流域水土流失面积为3336.02km<sup>2</sup>,占流域总面积的29.23%,土壤侵蚀模数约为1466t/km<sup>2</sup>·a<sup>[15]</sup>;流域植被是以常绿林和马尾松为主的过渡性植被;流域内以农业生产为主,酿造业发达;东部有较丰富的煤炭、硫以及水泥用灰岩等矿产资源。

## 2 数据来源

本研究以毕节、大方、金沙、遵义、仁怀、赤水、习水、桐梓8个市县为研究区。基础数据包括:30m数字高程(DEM),来源于地理空间数据云;8个市县及周边市县的24个气象站点2000—2015年的日均降雨数据,由中国气象数据共享服务网提供;2015年LandsatTM遥感数据;2009年全国土壤二次调查数据。在遥感数据基础上,通过野外勘察与高精度遥感目视识别相结合解译得到2015年土地利用图(用混淆矩阵对分类结果精度验证,Kappa系数大于0.80),2015年石漠化等级分布图(分类标准参照《贵州省岩溶地区第二次石漠化监测实施细则》)。

## 3 研究方法

美国通用水土流失方程USLE(The Universal Soil Loss Equation)是较为常用的水土流失评价方法,USLE公式为 $A=R*K*LS*C*P$ 。本研究以USLE为基础,结合区域内石漠化特征,主要参考中科院编制国家环保总局发布的2005年5月5日起实施的《生态功能区划暂行规程》中水土流失敏感性评价方法确定敏感因子,包括降水侵蚀力(R)、坡度坡长因子(LS)、土壤质地因子(K)、覆盖因子(C)。

### 3.1 R因子

研究区汛期与非汛期降雨量、降雨强度相差较大,本文采用章文波<sup>[16]</sup>对全国降雨日降雨数据拟合方程,从单日降雨量计算R。熊康宁<sup>[17]</sup>、龙明忠<sup>[18]</sup>的研究成果表明不同石漠化等产生侵蚀性降雨强度不同,参考其研究成果,将不同等级侵蚀性降雨标准设置为:非喀斯特12.00mm、无石漠化13.36mm、潜在石漠化15.74mm、轻度石漠化11.92mm、中度石漠化12.19mm、强度石漠化19.16mm、极强石漠化20.00mm。处理过程如下:首先分别计算不同等级石漠化侵蚀性降雨量标准的24个站点2000—2010年半月平均、月平均、逐年、年平均降雨侵蚀力,拟合模型如公式(1),然后采用IDW内插方法对不同等级石漠化降雨侵蚀力进行空间插值,得到7个降雨侵蚀力全域覆盖图,再利用ArcGIS叠加提取石漠化等级图对应不同标准的降雨侵蚀力图,将提取出来的7个降雨侵蚀力分布图进行整合,得到基于石漠化等级的降雨侵蚀力因子空间分布(如图1),利用自然断点法(Jenks)对其进行分类,形成R因子敏感等级图。

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{yi} \\ R_{hm} &= \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \\ R_y &= \sum_{i=1}^{24} R_{hm} \\ \beta &= 0.8363 + \frac{18.144}{P_d} + \frac{24.455}{P_y} \\ \alpha &= 21.586\beta^{-0.71891} \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $k=1, 2, \dots, m$  是某半月内侵蚀性降雨日数， $\bar{R}$  为年均降雨侵蚀力， $R_y$  为 24 个半月侵蚀力之和， $R_{hm}$  为半月侵蚀性降雨的侵蚀力， $P_k$  为半月第  $k$  天日降雨量超过侵蚀性降雨标准， $P_d$  为一年内侵蚀性降雨日雨量的平均， $P_y$  为侵蚀性降雨年总量的多年平均值。

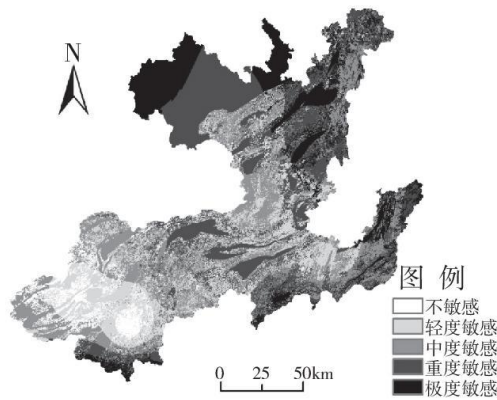


图 1R 因子敏感等级图

### 3. 2K 因子

通用方程中土壤可蚀性因子(K)需要试验确定。在大范围上采用试验获取 K 因子耗费财力物力且时间长，可行性差。因此，本文参考土壤类型对水土流失影响分析研究<sup>[19]</sup>，以土壤类型图为基础，将土壤类型分成五级等级如表 3，得到 K 因子敏感性等级图(图 2)。

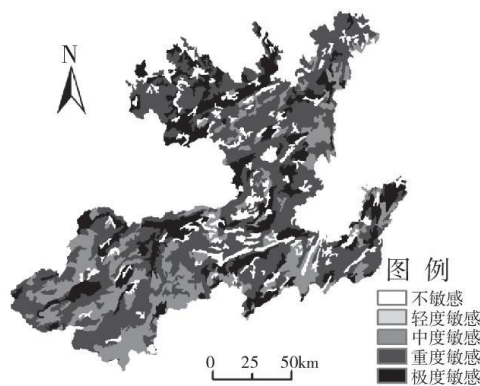


图 2 K 因子敏感性等级图

表 1 K 因子对水土流失敏感性影响分级赋值标准

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
土壤类型	水稻土	山地草甸土	石灰土、褐土	红壤、黄壤、黄棕壤	紫色土壤
分级赋值	1	3	5	7	9

### 3. 3LS 因子

研究区空间范围尺度较大，LS 因子量算困难，本文采用地形起伏度替代 LS 因子。地形起伏度是在一定范围中最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值，是一个宏观的地形指标。以 30mDEM 为数据源提取 9\*9 矩形大小的地形起伏度，参考李月臣对起伏度的分类标准<sup>[20]</sup>，形成 LS 因子敏感性等级图(图 3)。

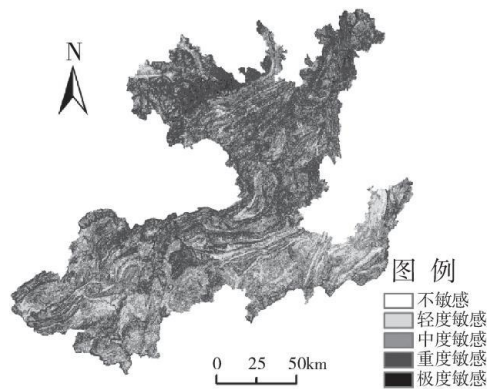


图 3 LS 因子敏感性等级图

表 2 LS 因子对水土流失敏感性影响分级赋值标准

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
起伏度	<20	20~50	50~100	100~300	>300
分级赋值	1	3	5	7	9

### 3. 4C 因子

C 因子是指植被覆盖和管理对水土流失的影响，主要与土地利用类型有关。收集整理张岩、王万忠、蔡崇法等对 C 因子值与土地利用类型对应关系的研究成果<sup>[21, 22, 23]</sup>，对各类土地利用的 C 因子值采用 K-mean 分类方法进行分类(如表 3)，得到 C 因子敏感等级图(图 4)。

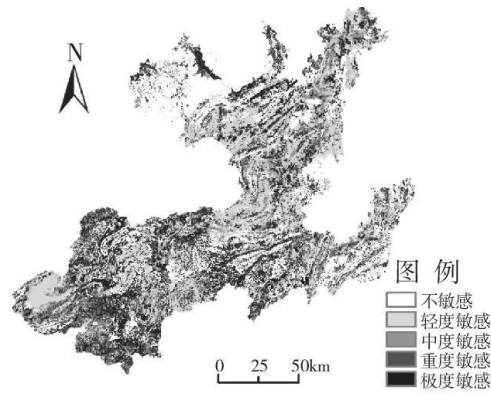


图 4 C 敏感性等级图

表 3 C 因子对水土流失敏感性影响分级赋值标准

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
土地利用类型	水体、林地、疏林地	经济林地、果林、荒地	草地	水田、居民，裸岩	旱地
分级赋值	1	3	5	7	9

### 3.5 综合评价

参考《生态功能区划暂行规程》综合评价方法，将各因子评价结果利用 ArcGIS 中栅格计算(Raster calculator)进行叠加乘积计算，其算法如公式(2)，将乘积结果利用自然断点法中的 Jenks 分类方法(保证各级的内部方差之和最小)进行分类，最终得到结果，如图 5。

$$SS_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 S_i} \quad (2)$$

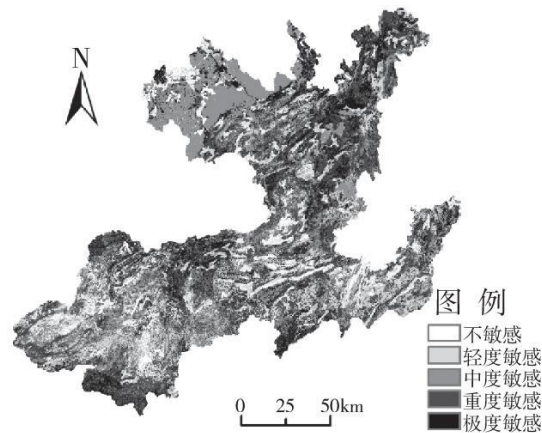


图 5 水土流失敏感性等级图

## 4 结果分析

### 4.1 水土流失敏感性空间分布

研究区水土流失敏感性面积按照敏感性从低到高的顺序分别为 1658.33km<sup>2</sup>、3822.5km<sup>2</sup>、8046.86km<sup>2</sup>、6774.89km<sup>2</sup>、3069.69km<sup>2</sup>，其中中度和高度敏感性面积占总面积的 63%。从空间分布上看：极度敏感、重度敏感主要分布在习水、桐梓以及金沙、仁怀、大方、毕节 4 个市县交界地区；不敏感区分散分布在遵义、赤水、仁怀、毕节、大方，遵义、赤水、仁怀的高山丘陵地带；赤水市起伏度较大，但植被覆盖较好，中度敏感区主要分布在该区域。市区各等级水土敏感性面积分布见表 4。

表 4 市县水土流失敏感性分布特征表

市县	不敏感		轻度敏感		中度敏感		重度敏感		极度敏感		合计面积/km <sup>2</sup>
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	
桐梓	52.31	0.22	341.99	1.46	849.94	3.64	1215.07	5.2	712.25	3.05	3171.56
习水	114.72	0.49	317.79	1.36	1376.84	5.89	745.7	3.19	512.35	2.19	3067.4
赤水	244.94	1.05	85.13	0.36	1263.38	5.41	54.25	0.23	192.67	0.82	1840.37
仁怀	171.74	0.73	300.68	1.29	503.39	2.15	612.41	2.62	187.34	0.8	1775.56
遵义	384.66	1.65	923.47	3.95	1301.64	5.57	1077.78	4.61	405.39	1.73	4092.94
毕节	283.85	1.21	736.98	3.15	1078.83	4.62	1037.49	4.44	264.86	1.13	3402.01
金沙	126.36	0.54	445.17	1.9	632.36	2.71	835.33	3.57	483.44	2.07	2522.65
大方	279.76	1.2	671.33	2.87	1040.49	4.45	1196.85	5.12	311.38	1.33	3499.82
合计	1658.33	7.1	3822.55	16.36	8046.86	34.43	6774.89	28.99	3069.69	13.13	23372.32

利用水土流失潜在危险指数 (SEPDI) 综合判断水土流失敏感危险性，其公式为：

$$SEPDI = (M_1 + 2M_2 + 3M_3 + 6M_4 + 9M_5) / (M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5) \quad (3)$$

M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 分别是不敏感面积、轻度敏感面积、中度敏感面积、重度敏感面积、极度敏感面积。SEPDI 值域范围 1-9，数值越大代表水土流失潜在危险性越大。

经过计算，赤水河流域 8 个市县的平均水土流失敏感危险性为 4.35，属于中度偏重。市县潜在危险性排名：桐梓>金沙>习水>仁怀>大方>毕节>遵义>赤水。危险性最大的是桐梓，SEPDI 为 5.36，最小的是赤水，SEPDI 为 3.4，市县之间 SEPDI 差值较大。

表 5 各市县 SEPDI

危险指数	SEPDI
桐梓	5.36
习水	4.55
赤水	3.4
仁怀	4.3
遵义	3.97
毕节	4
金沙	4.87
大方	4.21
全域	4.35

#### 4.2 坡度与敏感性

按照《水利水电工程水土保持技术规范》将坡度分为 $<5^{\circ}$  ,  $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$  ,  $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$  ,  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  ,  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$  ,  $>35^{\circ}$  共 6 个等级, 利用 ArcGIS 空间分析中 Tabulate Area, 得到每个坡度带中不同水土流失敏感性等级面积。SEPDI 曲线随坡度增大先增大后减小, 在  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$  坡度区间到达最高,  $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$  到  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$  坡度带, SEPDI 增长率上升, 主要因为随着坡度越大土壤本身稳定性越弱、降雨侵蚀力越大, 加上研究区高原山地居多, 人类在  $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$  活动频繁, 城镇建设、农业生产对土地资源不合理利用, 植被破坏, 导致土壤结构、质地破坏, 使得水土流失敏感性增加;  $>35^{\circ}$  坡度带上, 人类活动减少, 植被覆盖增加, 水土流失危险性下降。

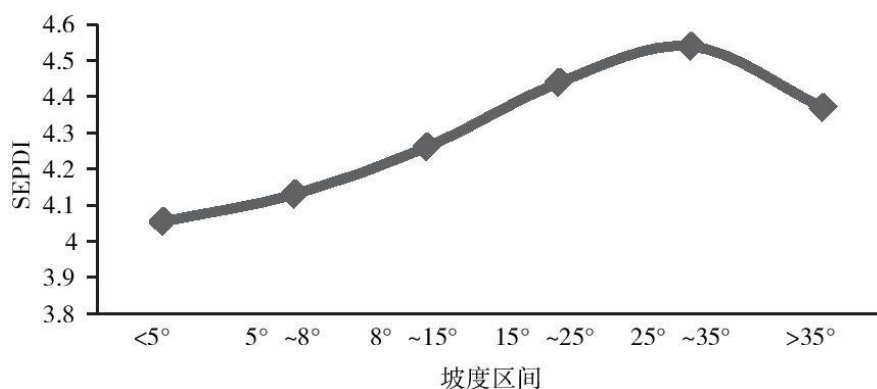


图 6 坡度区间 SEPDI 曲线图

#### 4.3 土地利用与坡度

土地作为人类活动载体,主要研究林地、耕地、建设用地、草地、未开发用地 5 种土地利用类型对水土流失敏感性的影响情况。首先,在喀斯特地区,未开发用地水土流失敏感危险性最高,林地最低,建设用地危险性大于草地,表明土壤表面的覆被对水土保持至关重要;其次,极敏感区域的用地类型以耕地为主,约占 85%;耕地的极度敏感区、重度敏感区占耕地总面积的 36.31%、38.31%;研究区耕地主要以坡耕地为主,坡耕地土壤结构不稳定易受到侵蚀,降雨在坡面易形成急流,造成坡面的强烈冲刷,加速耕地水土流失。

表 6 土地利用类型 SEPDI 值表

类型	SEPDI
林地	2.53
耕地	6.24
建设用地	4.46
草地	5.01
未开发用地	6.38

## 5 结论与讨论

本研究在 GIS 技术支持下,分析 R、K、LS、C 四个水土流失敏感性因素,明晰水土流失敏感性等级分布,引入 SEPDI 对水土流失敏感危险性进行综合评价。研究得出:①总体上看整个研究区水土流失敏感性属于中等偏重(SEPDI=4.35),中度和重度敏感区之和占总面积的 63%,有 4 个极度敏感集中区:金沙、仁怀、大方 3 个市县交界地带,习水以东以及桐梓大部区域,金沙南部地区,大方南部;②各市县水土流失敏感危险性差异较大,顺序依次为桐梓>金沙>习水>仁怀>大方>毕节>遵义>赤水,危险性最大的是桐梓,SEPDI 为 5.36,最小的是赤水,SEPDI 为 3.4;③研究区水土流失敏感危险性随坡度增加先增加后减少,25°~35° SEPDI 达到峰值,35° 以上 SEPDI 下降,这是由于研究区地貌主要高原山地居多,人类在 8°~35° 活动频繁,35° 以上人类活动减少,植被覆盖度较好,水土流失敏感性下降;④从坡度、土地利用两个方面综合分析,地表覆盖对水土保持有重大意义,在区域地貌、地形等自然条件的限制下,农业活动增加水土流失敏感性程度。综上所述,为了防止水土流失,可以采用植树造林或者工程性手段提高地表覆盖度,在坡度较大坡面实施加固措施,优化山地农业种植结构,改善农田生态环境,倡导循环生态,改变传统耕作方式。

研究过程中使用的土地利用图是通过遥感影像解译得到,具有一定主观性;针对喀斯特区域水土流失研究,还可以考虑水土下漏到地下洞穴的过程,这种水土漏失过程亟待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 邹翔, 薛小红, 赵健. 赤水河流域水土流失特点与分区防治研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(8): 12-15.

[2] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: a guide for soil and water conservation planning[M]. Washington D. C.: USDA, 1978.

[3] RENARD K G, FOSTER, G R, WEESIES G A, et al. Predicting rainfall erosion by water: a guide to conservation

---

planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington D. C. :USDA, 1997.

[4]ARNOLD J G, ALLEN P M, BERNHARDT G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of hydrology, 1993, 142 (1/4) :47-69.

[5]FLANAGAN D C, NEARING M A. USDA water erosion prediction project:hillslope profile and watershed model documentation[R]. NSERL report, 1995.

[6]BEASLEY D B, HUGGINS L F, MONKE E J. ANSWERS:a model for watershed planning[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23 (4) :938-0944.

[7]李益敏, 朱军. 基于 GIS 的区域土壤侵蚀敏感性评价——以怒江州为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39 (1) :98-106.

[8]陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36 (6) :1288-1297.

[9]GAUBI I, CHAABANI A, MAMMOU A B, et al. A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia) [J]. Natural Hazards, 2017, 86 (1) :219-239.

[10]李益敏, 朱军. 基于 GIS 的区域土壤侵蚀敏感性评价——以怒江州为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017 (1) :98-106.

[11]熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67 (7) :878-888.

[12]凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31 (21) :6353-6362.

[13]李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布[J]. 地球与环境, 2006, 34 (4) :36-40.

[14]万军, 蔡运龙, 路云阁, 等. 喀斯特地区水土流失风险评价——以贵州省关岭布依族苗族自治县为例[J]. 水土保持研究, 2003, 10 (3) :148-153.

[15]贵州省水利厅. 赤水河流域 2014 年度水土保持公报[R]. 2014.

[16]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.

[17]熊康宁, 胡顺光. 贵州喀斯特地区水土流失研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然版), 2011, 29 (4) :106-110.

[18]龙明忠, 杨洁, 吴克华. 喀斯特峡谷区不同等级石漠化水土流失对比研究——以贵州花江示范区为例[J]. 贵州师范大学学报(自然版), 2006, 24 (1) :25-30.

[19]王美芝, 许兆义, 杨成永. 路堤边坡土壤类型对水土流失影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (3) :16-19.

---

[20]李月臣,刘春霞,赵纯勇,等.三峡库区(重庆段)水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2009,29(2):788-796.

[21]张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原水土流失作物覆盖因子计算[J].生态学报,2001,21(7):1050-1056.

[22]王万忠,焦菊英.中国的水土流失因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996(5):1-20.

[23]蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域水土流失量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.