

# 基于允许流失量和正负地形源汇理论的 喀斯特关键带土壤侵蚀研究

钱庆欢<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1,3</sup>, 白晓永<sup>1,3</sup>, 周德全<sup>2</sup>, 田义超<sup>1,3,4</sup>,  
李琴<sup>1,3,4</sup>, 吴路华<sup>1,3,4</sup>, 肖建勇<sup>1,2</sup>, 曾成<sup>1,2</sup>, 陈飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 贵州师范大学  
地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测站,  
普定 562100; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 喀斯特地区下垫面的特殊复杂性使得地表发生显著坡面径流需要达到更大的降水累积阈值, 碳酸盐岩石成土速率的缓慢和空间异质性导致喀斯特地区的土壤存量被严重高估和均一化等, 因此, 传统经典的土壤侵蚀模型在喀斯特地区难以适用。本文依据喀斯特关键带岩性的差异, 确定其有效降水侵蚀阈值, 并对降雨侵蚀力进行重新测算; 根据碳酸盐岩化学成分的差异, 计算其成土速率并作为土壤允许流失量; 通过地貌—水文分析法提取喀斯特洼地空间分布信息, 对喀斯特关键带土壤侵蚀算法进行多次改进和创新。结果显示: ① 传统算法忽视了喀斯特关键带下垫面的特殊性, 致使其平均降雨侵蚀力被高估 47.35%, 且喀斯特区域的平均降雨侵蚀力仅相当于非喀斯特区域的 59.91%; ② 传统算法可能将一些无土或少土可流区计算为土壤的高侵蚀量区, 而连续性碳酸盐岩、碳酸盐岩夹碎屑岩、碳酸盐岩与碎屑岩互层的土壤允许流失量仅分别为  $0.21 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $2.89 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ; ③ 传统算法通常将有坡度和耕作的洼地视为土壤侵蚀的高发区, 但其实际应是地表侵蚀的沉积区, 喀斯特洼地在空间上的连续性与碳酸盐岩的分布区基本重合; ④ 传统算法高估土壤侵蚀面积 27.79%, 土壤侵蚀量 47.72%。总之, 传统经典模型会大大高估喀斯特地区的土壤侵蚀量, 因此, 应该建立一种精确适用的模型。另外, 由于喀斯特地区的成土速率慢而土层薄、总量少, 土壤允许流失量远低于非喀斯特区域侵蚀标准, 应制定适用于喀斯特地区的土壤侵蚀分类分级标准和风险评价方法。

**关键词:** 喀斯特; 降雨侵蚀力; 土壤允许流失; 洼地沉积; 理论土壤侵蚀; 实际土壤侵蚀; 中国西南  
DOI: 10.11821/dlxb201811007

## 1 引言

土壤侵蚀已成为全球性的重大生态环境问题之一<sup>[1]</sup>。定量地研究评价土壤侵蚀的时间

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502102, 2016YFC0502300); “西部之光”人才培养计划(A类); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STG-ZDTP-036); 国际合作局国际伙伴计划(132852KYSB20170029, 2014-3); 贵州省高层次人才创新人才培养计划“十”层次人才项目([2016]5648); 喀斯特科学研究中心联合基金项目(U1612441); 国家自然科学基金项目(41571130074, 41571130042); 贵州省科技计划(2017-2966) [Foundation: NNational Key Research & Development Program of China, No.2016YFC0502102 No.2016YFC0502300; "Western light" Talent Training Plan (Class A); Science and Technology Service Network Initiative, No.KFJ-STG-ZDTP-036; International Cooperation Agency International Program, No.132852KYSB20170029, No.2014-3; Guizhou High-level Innovative Talent Training Program "Ten" Level Talents Program, No.2016-5648; United Fund of Karst Science Research Center, No.U1612441; National Natural Science Foundation of China, No.41571130074, No.41571130042; Science and Technology Plan of Guizhou Province of China, No.2017-2966]

作者简介: 钱庆欢(1992-), 男, 贵州盘县人, 硕士生, 主要从事岩溶环境与土地利用研究。E-mail: qianqinghuan@yeah.net

通讯作者: 白晓永(1978-), 男, 河北石家庄人, 博士, 研究员, 主要从事岩溶生态环境研究。E-mail: baixiaoyong@126.com  
2135-2149 页

和空间分异规律,明确其发生强度,区域类型,对有效地实施水土保持工作和改善土地利用方式具有重要科学价值。为此,国内外众多学者做了许多杰出的研究。基于景观生态学的“尺度—格局—过程”原理,建立了多尺度土壤侵蚀<sup>[2]</sup>与生态安全评价指数<sup>[3]</sup>。研究了不同土地利用方式<sup>[4-5]</sup>、不同土壤属性<sup>[6]</sup>、及不同植被类型景观<sup>[7]</sup>条件下的水土流失效应。利用RULSE模型及GIS技术研究了土壤侵蚀的时空变化<sup>[8-10]</sup>。利用WEPP模型研究了坡度<sup>[11]</sup>、坡长<sup>[12]</sup>及耕作制度<sup>[13]</sup>对土壤侵蚀的影响,并对WEPP模型在不同地区的适用性进行评价<sup>[14-17]</sup>。

但是,喀斯特关键带是个特殊的生态系统<sup>[18]</sup>,传统经典方法在喀斯特关键带并不适用。喀斯特关键带的特殊性体现在以下几各方面,首先不同岩性下垫面产生侵蚀性径流的降水临界值存在差异。在非喀斯特区地表径流系数一般在20%以上,甚至达到30%以上<sup>[19]</sup>。喀斯特区的径流系数介于0.01%~14.72%<sup>[20-23]</sup>。喀斯特区的地表径流系数远低于非喀斯特区,将非喀斯特地区的降雨侵蚀力算法直接运用于喀斯特地区是不合适的,需要对其加以改进。其次是碳酸盐岩成土物质的先天不足使得喀斯特地区的成土速度十分缓慢,喀斯特山区的土层通常仅有几厘米到几十厘米厚<sup>[24]</sup>,其实际的土壤存有量远低于理论侵蚀量,土壤侵蚀被高估。第三是喀斯特洼地因有一定量缓坡耕地的存在,通常被当作侵蚀区,但从区域整体上来看,喀斯特洼地是区域物质与水流的汇聚区,在土壤侵蚀过程中起到汇流与物质累积的作用。因此,从局部上来看,喀斯特洼地坡面是土壤侵蚀的源,但从整个洼地系统来看,其实质却是土壤侵蚀的汇。

有鉴于此,本文以世界上喀斯特最为集中连片的中国西南为研究对象,通过对土壤侵蚀的多次改进,更加精准高效地评估喀斯特关键带土壤侵蚀,为长江与珠江的上游生态屏障建设提供科学参考,为中国西南喀斯特石漠化的治理提供理论依据。

## 2 研究区与数据来源

### 2.1 研究区概况

本文所涉及的喀斯特关键带在行政区划上包含云南省、贵州省、四川省、重庆市、湖北省、湖南省、广西区、广东省8个省区(20°13'N~34°19'N, 97°21'E~117°19'E),总面积约193.82万km<sup>2</sup>(图1),约占中国国土面积的1/5。地跨中国地貌的三级阶梯,地势西高东低,包含川西高原、云贵高原、横断山脉、四川盆地、洞庭湖平原、两广丘陵多个一级地貌单元,地貌条件复杂,土壤水蚀作用强烈<sup>[25]</sup>。同时是世界三大喀斯特集中连片分布区之一。气候兼具低纬气候、季风气候、山原气候的特点,年降水量500~2500 mm之间,降水主要集中于4-9月,受地形、气候因素的制约,降水由东南向西北递减,空间差异较大。地带性植被为亚热带、热带常绿阔叶林。土壤类型丰富,地带性土壤以红壤和黄壤为主,非地带性土壤以石灰土为主。区域生态环境脆弱,是中国水土流失风险最严重的区域之一。

### 2.2 数据来源

研究采用的基础数据包括:研究区数字高程模型(DEM),国家级气象站点日降水

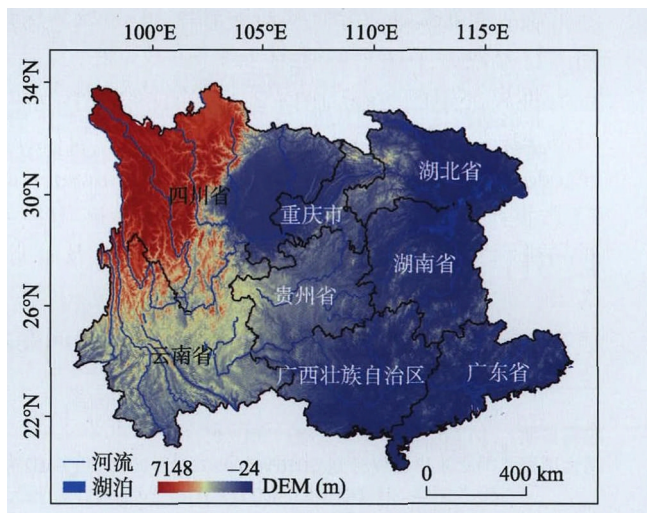


图1 研究区位置及高程

Fig. 1 Location and elevation of the study area

数据, 土地利用数据, 土壤类型及土壤质地数据, 土壤有机质数据, NDVI月尺度MODIS中国合成产品数据(表1)。

表1 基础数据及其来源

Tab. 1 The basic data and their sources

数据类型	来源	网站
中国南方8省行政区划图	国家地球系统科学数据共享平台	http://www.geodata.cn/
岩性图	喀斯特科学数据中心	http://www.karstdata.cn/
DEM	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/
NDVI	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/
日降水	中国气象数据网	http://data.cma.cn
土地利用	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
土壤类型	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
土壤质地	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
土壤有机质	中国土种志	全国土壤普查办公室

### 3 研究方法

#### 3.1 降雨侵蚀力优化和改进

降雨侵蚀力的计算方法采取降雨动能 $E$ 和最大30 min降雨强度的乘积来表示时, 即 $EI_{30}$ 法, 称为R值经典算法。Richardson等在研究中发现 $EI_{30}$ 与降雨量 $P$ 之间存在幂指数关系<sup>[26]</sup>, 形如 $EI_{30} = aP^b$ , 其中 $P$ 为日降水量,  $a$ 、 $b$ 为待定参数; Elsenbeer等的研究也证实了此关系的存在, 并对该方法进行了验证<sup>[27]</sup>。CREAMS模型中降雨侵蚀力的计算便采取了幂指函数的基本形式, 系数 $a = 1.03$ ,  $b = 1.51$ 。胡续礼等通过对CREAMS模型、Richardson模型、郭新波修正模型的验证对比, 表明CREAMS模型有着更好的稳定性<sup>[28]</sup>, 能达到更高的精度要求。在为喀斯特<sup>[23, 29]</sup>与非喀斯特<sup>[30]</sup>区域限定有效降水侵蚀阈值的基础上, 本文选取CREAMS日降水模型进行降雨侵蚀力计算:

$$R_{nk} = 1.03P_i^{1.51} \quad (P_i \geq d_{12}) \quad (1)$$

$$R_k = 1.03P_i^{1.51} \quad (P_i \geq d_{30}) \quad (2)$$

式中:  $R_{nk}$ 为非喀斯特地区的降雨侵蚀力 ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ );  $R_k$ 为喀斯特地区的降雨侵蚀力 ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ );  $P_i$ 为日降水量 ( $\text{mm}$ );  $d_{12}$ 为非喀斯特区域侵蚀性降雨标准, 即日降水量 $\geq 12 \text{ mm}$ ;  $d_{30}$ 为喀斯特区域侵蚀性降雨标准, 即日降水量 $\geq 30 \text{ mm}$ 。

#### 3.2 岩石风化速率

喀斯特关键带的土壤来源于母岩风化<sup>[31]</sup>, 其土壤允许流失量的大小取决于成土速率的高低<sup>[32-33]</sup>。参照白晓永等<sup>[34]</sup>提出的喀斯特地区不同岩石类型及其组合方案的成土速率计算公式:

$$W = v \times Q \times \rho \times M + N \times (1 - M) \quad (3)$$

式中:  $W$ 为岩石风化成土速率 ( $\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ );  $v$ 为碳酸盐岩溶蚀速率 ( $\text{mm a}^{-1}$ ), 换算为 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ;  $Q$ 为酸不溶物含量 (%);  $\rho$ 为碳酸盐岩容重 ( $\text{tm}^{-3}$ );  $M$ 为碳酸盐岩含量 (%);  $N$ 为非碳酸盐岩成土速率 ( $\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )。

以碳酸盐岩的泥质含量作为岩石组合类型的划分指标<sup>[32]</sup>, 将碳酸盐岩地区的岩石组合类型分为三大类(表2)。曹建华等<sup>[35-36]</sup>的监测记录表明, 碳酸盐岩的溶蚀速率介于30~89.7 mm/ka之间, 白云岩平均溶蚀速度为55.27 mm/ka, 石灰岩的平均溶蚀速度为96.72

表 2 碳酸盐岩地区的岩石组合类型

Tab. 2 The types of rock assemblage in the carbonate rock region

岩石组合类型	碳酸盐岩含量(%)	酸不溶物含量(%)	岩层特征
连续性碳酸盐岩	95	5	无明显碎屑岩夹层
碳酸盐岩夹碎屑岩	80	20	存在明显的碎屑岩夹层
碳酸盐岩与碎屑岩互层	50	50	碳酸盐岩与碎屑岩彼此互层且厚度相当

mm/ka。根据陈晓平<sup>[37]</sup>的研究结果,石灰岩方解石密度为 2.75 t/m<sup>3</sup>,白云石密度 2.86 t/m<sup>3</sup>,碎屑岩的成土速率以 5 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>计算<sup>[38]</sup>。

### 3.3 喀斯特洼地空间分布信息的提取与计算

由于DEM的误差以及一些真实地形的存在,使得DEM表面存在着一些凹陷区域。首先对原始DEM数据进行填洼,得到无洼地的DEM。通过计算中心网格与邻域网格的最大距离权重差来确定水流的流向,在ArcGIS中通过Hydrology工具集中的Flow Direction工具进行提取。其次是利用Hydrology工具集中的Sink工具,通过输入水流方向数据可计算得到洼地空间分布,Watershed工具则用于计算洼地的贡献区域。Zonal工具集中的Zonal Statistic工具用于计算每个洼地所形成的贡献区域的最低高程,Zonal Fill工具则用于计算每个洼地贡献区域出水口高程<sup>[39]</sup>。依据洼地贡献区域的最低高程和出水口高程,运用Raster Calculator工具计算出区域洼地深度。

### 3.4 RUSLE模型

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

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

式中:  $A$  为土壤侵蚀模数 (t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>);  $R$  为降雨侵蚀力因子 (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>);  $K$  为土壤可蚀性因子 (t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>);  $L$  为坡长因子;  $S$  为坡度因子;  $C$  为地表植被覆盖与管理因子;  $P$  为水土保持措施因子。

降雨侵蚀力 ( $R$ ) 的改进计算详见 3.1 节。

土壤可蚀性因子 ( $K$ ) 本文选择 Williams 等<sup>[40]</sup>提出的 EPIC 模型进行计算,公式为:

$$K = 0.1317 \{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 SAN \left( 1 - \frac{SIL}{100} \right)] \times \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.9SN - 5.51)} \right] \} \quad (5)$$

式中:  $SAN$  为砂粒含量百分比;  $SIL$  为粉砂含量百分比;  $CLA$  粘粒含量百分比;  $C$  为有机质含量百分比;  $SN = 1 - SAN/100$ 。

坡度因子 ( $S$ ) 参照 Liu<sup>[41]</sup>提出的分段修正公式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta \leq 14^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (14^\circ \leq \theta) \end{cases} \quad (6)$$

坡长因子 ( $L$ ) 参照 Wischmeier 等<sup>[42]</sup>和 Mocol 等<sup>[43]</sup>提出的算法公式:

$$L = (\lambda/22.13)^\alpha \quad (7)$$

$$\alpha = \beta/(\beta + 1) \quad (8)$$

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

式中:  $\theta$  为坡度;  $\lambda$  为坡长 (m);  $\alpha$  为坡长因子指数。

植被覆盖与管理因子 ( $C$ ) 参照 Van der Knijff 等<sup>[44]</sup>提出的计算公式:

$$C = \exp\left(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad (9)$$

式中： $\alpha$ 和 $\beta$ 是决定NDVI-C关系曲线的参数， $\alpha = 2$ ， $\beta = 1$ 。

参照陈思旭等<sup>[45]</sup>、许月卿等<sup>[46]</sup>的研究成果，确定研究区水土保持措施因子（ $P$ ）（表3）。 $K$ 、 $LS$ 、 $C$ 、 $P$ 各因子图层如图2所示。

表3 不同土地利用类型  $P$  值  
Tab. 3 The  $P$  values of different land use types

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

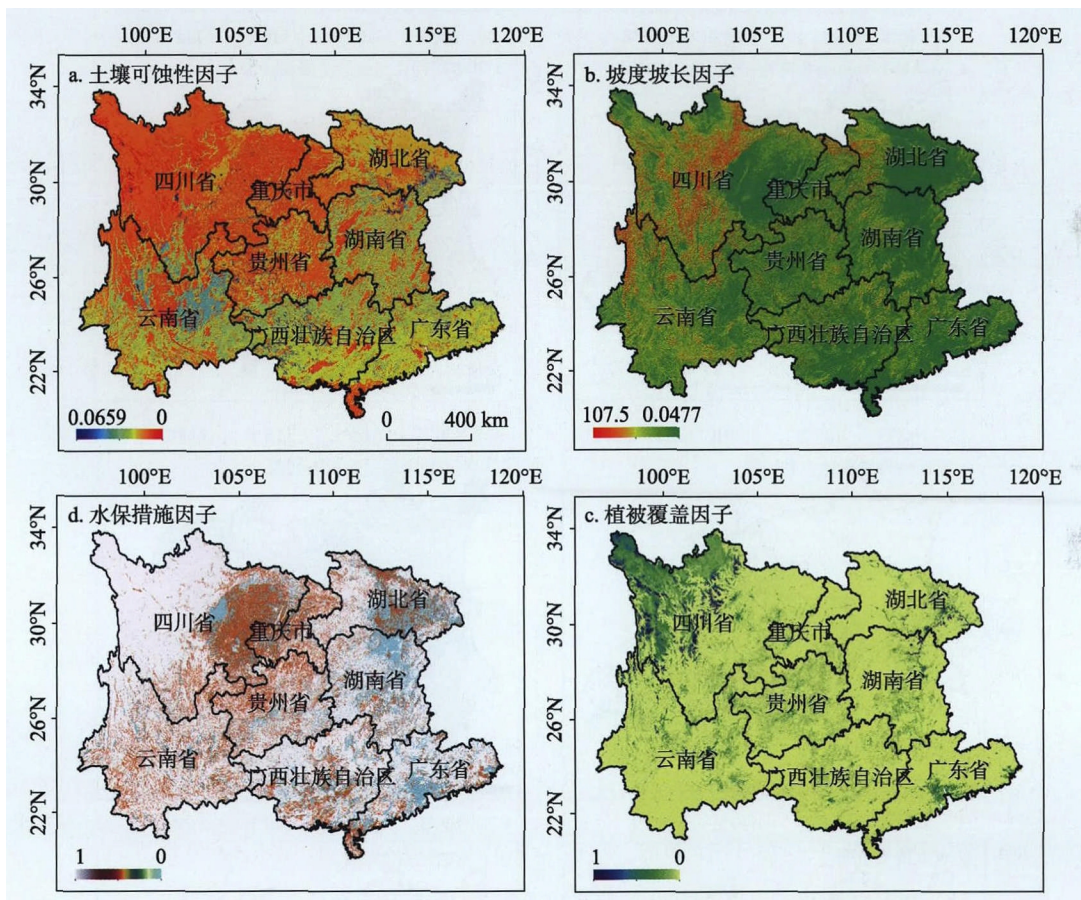


图2 RULSE模型因子图层

Fig. 2 RULSE model factor layers

## 4 结果分析

### 4.1 喀斯特关键带不同岩性降雨侵蚀力

未考虑岩性差异，将全年降雨都计算为降雨侵蚀力时，非喀斯特区域降雨侵蚀力的平均值为  $7787.23 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，喀斯特区域降雨侵蚀力的平均值为  $7321.58 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。非喀斯特区域与喀斯特区域的平均值仅有  $465.65 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  的差值，不同岩性背景下的降雨侵蚀力的差异未被区分开（图3a、3b）。

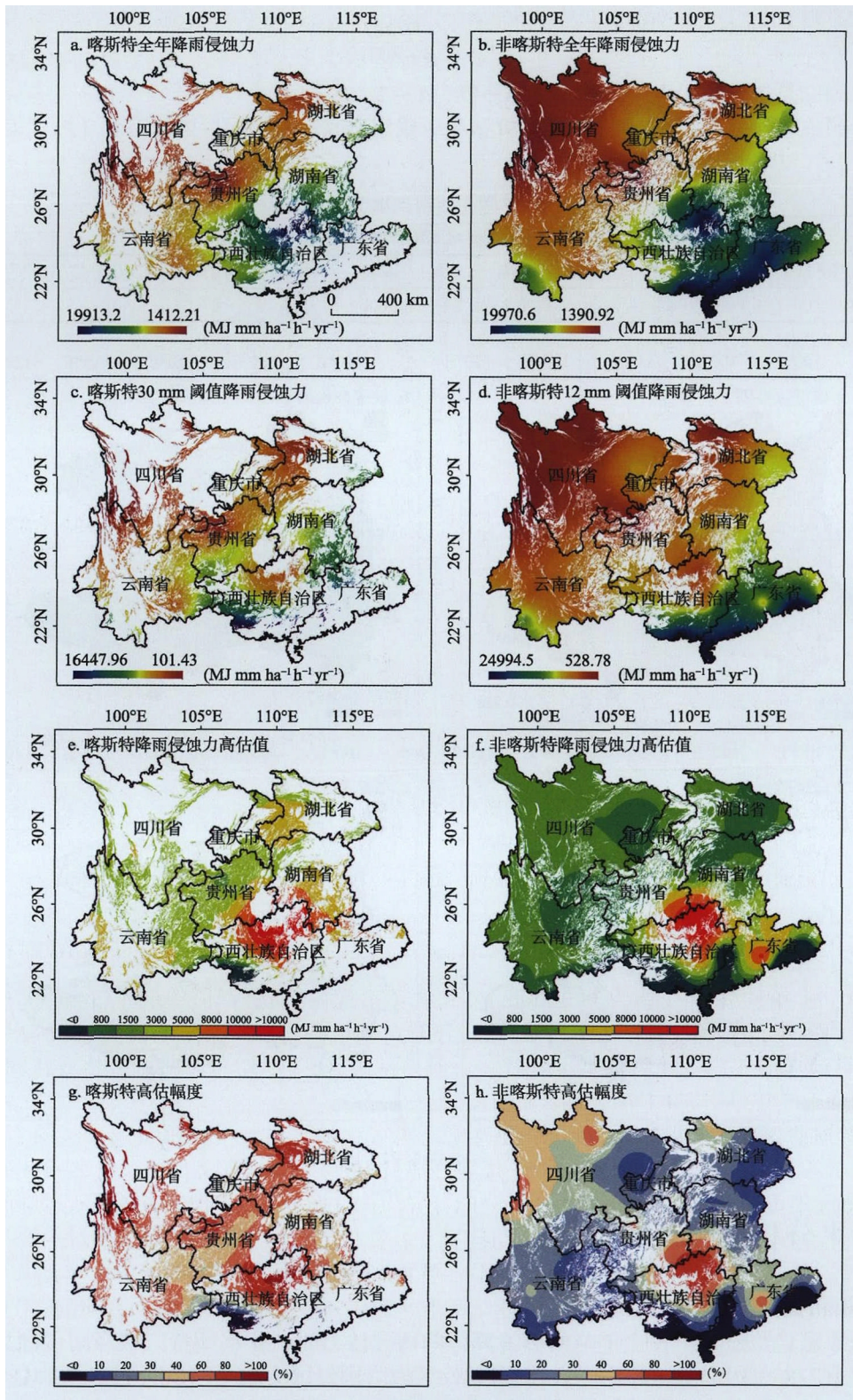


图3 不同算法降雨侵蚀力及其差值与改进幅度

Fig. 3 Rainfall erosivity of different algorithms and its minus and improvement rate

考虑到不同岩性下垫面产汇流差异, 为不同的岩性区域限定不同的有效降雨侵蚀阈值。将日降水量 $\geq 12$  mm作为非喀斯特区域的有效侵蚀降雨阈值时, 非喀斯特区域平均降雨侵蚀力为 $6434.31 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。将日降水量 $\geq 30$  mm作为喀斯特区域的有效侵蚀降雨阈值时, 喀斯特区域平均降雨侵蚀力为 $3854.9 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。非喀斯特区域与喀斯特区域的平均降雨侵蚀力差值为 $2579.41 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 喀斯特区域的平均降雨侵蚀力仅为非喀斯特区域的59.91%, 喀斯特与非喀斯特不同岩性对降水产生侵蚀地表径流的差异得到充分地体现(图3c、3d), 与彭涛等<sup>[19-23]</sup>的实验观测相符。与有效阈值算法相比(图3e、3f、3g、3h), 无阈值算法将非喀斯特区域的平均降雨侵蚀力高估了17.37%, 将喀斯特区域的平均降雨侵蚀力高估了47.35%。

#### 4.2 喀斯特关键带不同岩性背景区土壤允许流失量的计算与空间格局

根据碳酸盐岩不同组合中酸不溶物的平均含量和碳酸盐岩的平均风化溶蚀速率计算碳酸盐岩地区的成土速率并将其作为土壤允许流失量。结果表明, 连续性碳酸盐岩组合分布区为 $0.21 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 碳酸盐岩夹碎屑岩组合分布区为 $1.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 碳酸盐岩与碎屑岩互层组合为 $2.89 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。

连续性碳酸盐岩组合亚类中, 连续性白云岩组合区域为 $0.19 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 连续性石灰岩组合区域为 $0.24 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 白云岩与石灰岩混合组合区域为 $0.22 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ; 碳酸盐岩夹碎屑岩组合亚类中, 白云岩夹碎屑岩分布区域为 $1.12 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 石灰岩夹碎屑岩分布区域为 $1.29 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ; 碳酸盐岩与碎屑岩互层组合亚类中, 白云岩与碎屑岩互层分布区域为 $2.76 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 石灰岩与碎屑岩互层分布区域为 $3.03 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。

由图4可知, 喀斯特地区存在多个土壤允许流失量, 具有多样性的特点。但是, 同样是碳酸盐岩, 在连续性碳酸盐岩、碳酸盐岩夹碎屑岩、碳酸盐岩与碎屑岩互层中, 其土壤允许流失量却差别较大, 这是因为在喀斯特地区, 影响其土壤允许流失量大小的关键因素除了岩石中酸不溶物的含量外, 还与区域地层中碎屑岩的含量有关。

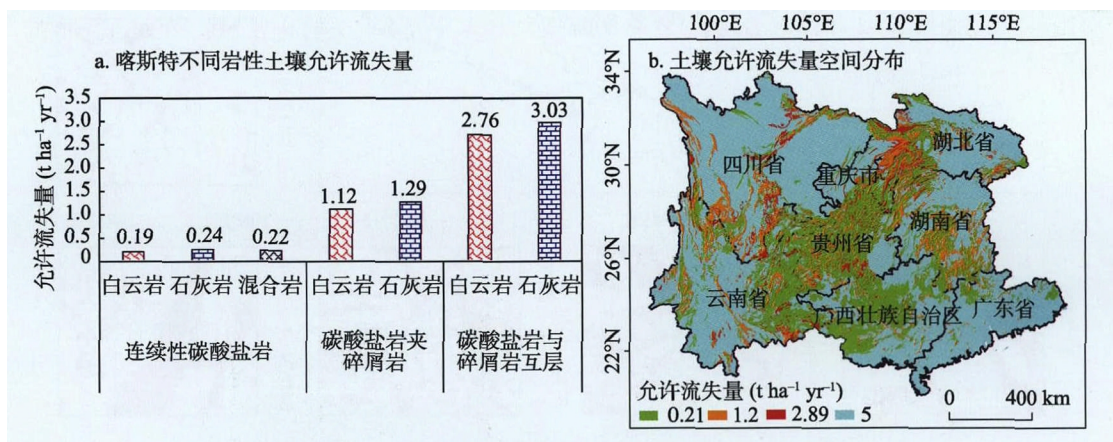


图4 不同岩性土壤允许流失量及其空间分布

Fig. 4 Soil loss tolerance and its spatial distribution of different lithology

#### 4.3 喀斯特洼地空间格局与碳酸盐岩分布的匹配性分析

洼地大小与其汇集降雨面积与原始地形有关, 其规模和深度随汇集面积而变化。从空间上看, 洼地主要集中分布于广西北部、云南的东部、贵州除黔东南州外的大部分区域、重庆市全境、四川的东部、湖北西部及湖南西北部地区。研究区内的洼地总面积为 $70.82 \times 10^5 \text{ ha}$ , 占区域总面积的3.65%; 其中喀斯特洼地面积为 $25.80 \times 10^5 \text{ ha}$ , 占总洼地面

积的36.43%；非喀斯特洼地面积为 $45.01 \times 10^5$  ha，占总洼地面积的63.57%。

洼地在空间上连续性与碳酸盐岩的分布区基本重合(图5)，属喀斯特类型的洼地。这类型的洼地在成因上是由碳酸盐岩的可溶蚀性，加之长期的水流作用下溶蚀形成。此外，还有部分非喀斯特洼地的存在，主要集中分布于四川盆地中部以及零星分布于其他区域。这部分洼地的成因有别于喀斯特洼地，主要是由早期以地壳差异性抬升作用为主的构造运动形成<sup>[47]</sup>。

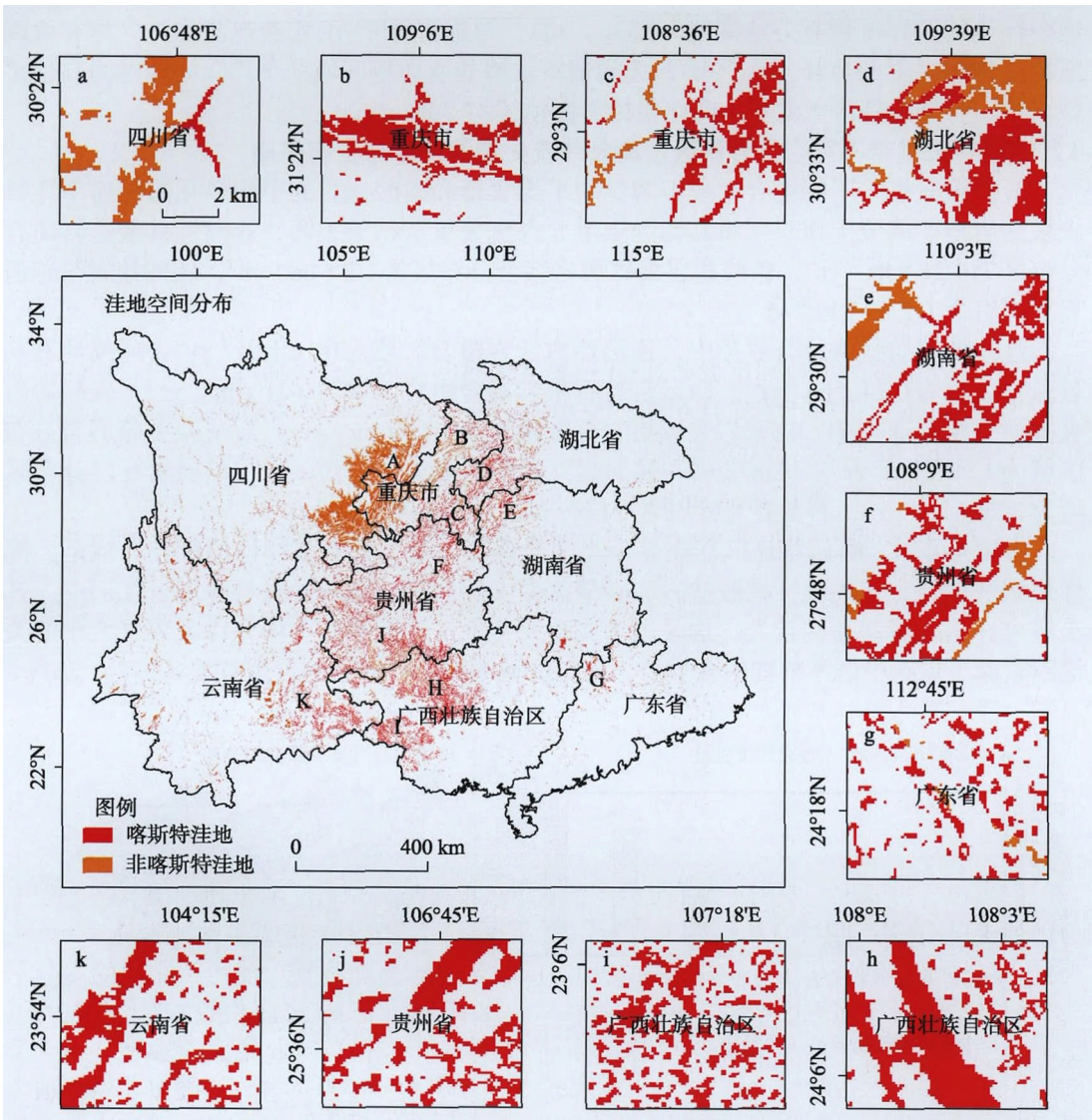


图5 中国西南洼地空间分布及局部放大示意图  
Fig. 5 Spatial distribution and partial enlargement of depressions

#### 4.4 传统算法与优化算法对土壤侵蚀量的测算与对比分析

对多次校正前后的土壤侵蚀进行统计(表4,图6),结果显示,将全年降雨都计算为降雨侵蚀力时,研究区的土壤侵蚀面积为 $14.07 \times 10^7$  ha, 占总面积的73.19%, 土壤侵蚀总量为 $90.9 \times 10^8$  t yr<sup>-1</sup>, 平均侵蚀模数为 $47.3$  t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。

将日降水量 $\geq 12$  mm和 $\geq 30$  mm分别做为非喀斯特与喀斯特区域的有效侵蚀降雨阈



表4 不同算法土壤侵蚀统计  
Tab. 4 Statistics of soil erosion of four algorithms

算法类别	侵蚀等级	侵蚀面积 (10 <sup>6</sup> ha)	面积 百分比(%)	平均侵蚀 模数(t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	侵蚀量 (10 <sup>7</sup> t yr <sup>-1</sup> )	侵蚀量 百分比(%)
全年降雨累计 (传统算法)	微度	96.06	49.99	1.14	10.93	1.2
	轻度	42.43	22.08	13.09	55.53	6.11
	中度	17.43	9.07	36.3	63.28	6.96
	强度	10.15	5.28	63.94	64.88	7.14
	极强度	10.93	5.69	109.97	120.24	13.23
降雨侵蚀力优化 (第一次改进)	剧烈	15.17	7.89	391.72	594.11	65.36
	微度	107.09	55.72	1.11	11.86	2.09
	轻度	43.32	22.54	12.94	56.05	9.88
	中度	15.71	8.18	35.73	56.15	9.9
	强度	8.9	4.63	62.76	55.87	9.85
允许流失量校正 (第二次改进)	极强度	8.74	4.55	108.48	94.84	16.72
	剧烈	8.41	4.37	347.71	292.31	51.55
	微度	131.58	68.47	0.7	9.21	1.93
	轻度	28.69	14.93	12.9	37.03	7.77
	中度	10.94	5.69	36.22	39.62	8.32
洼地校正 (第三次改进)	强度	6.36	3.31	63.99	40.68	8.54
	极强度	7	3.64	110.21	77.17	16.2
	剧烈	7.61	3.96	358.32	272.56	57.23
	微度	131.87	68.61	0.69	9.11	1.92
	轻度	28.51	14.83	12.91	36.8	7.74
洼地校正 (第三次改进)	中度	10.89	5.67	36.22	39.44	8.30
	强度	6.18	3.21	63.59	39.28	8.27
	极强度	7.08	3.69	109.19	77.33	16.27
	剧烈	7.66	3.99	356.72	273.23	57.50

值,对降雨侵蚀力进行优化改进后,研究区的土壤侵蚀面积为 $13.39 \times 10^7$  ha, 占总面积的69.66%,土壤侵蚀总量为 $56.71 \times 10^8$  t yr<sup>-1</sup>,平均侵蚀模数为 $29.51$  t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。与传统算法相比,第一次改进后的侵蚀面积、侵蚀量和平均侵蚀模数分别下降4.83%、37.61%、37.61%。

将碳酸盐岩地区的岩石风化速率作为最大土壤允许流失量阈值,对喀斯特地区的土壤侵蚀量进行校正后,研究区的土壤侵蚀面积为 $10.25 \times 10^7$  ha, 占总面积的53.32%,土壤侵蚀总量为 $47.63 \times 10^8$  t yr<sup>-1</sup>,平均侵蚀模数为 $24.79$  t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。与传统算法相比,第二次改进后的侵蚀面积、侵蚀量和平均侵蚀模数分别下降27.14%、47.60%、47.58%。

洼地是区域的负地貌,是区域范围内物质汇聚的沉积区。将研究区范围内的洼地看作是一个独立的闭合系统,不会产生洼地范围以外的土壤侵蚀,因此洼地的真实侵蚀量应计算为 $0$  t yr<sup>-1</sup>。研究区的土壤侵蚀面积为 $10.16 \times 10^7$  ha, 占总面积的53.32%,土壤侵蚀总量为 $47.52 \times 10^8$  t yr<sup>-1</sup>,平均侵蚀模数为 $24.73$  t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。与传统算法相比,第三次改进后的侵蚀面积、侵蚀量和平均侵蚀模数分别下降27.79%、47.72%、47.72%。

不同算法下的土壤侵蚀有着如下共同特点,就侵蚀面积而言,土壤侵蚀等级越高则

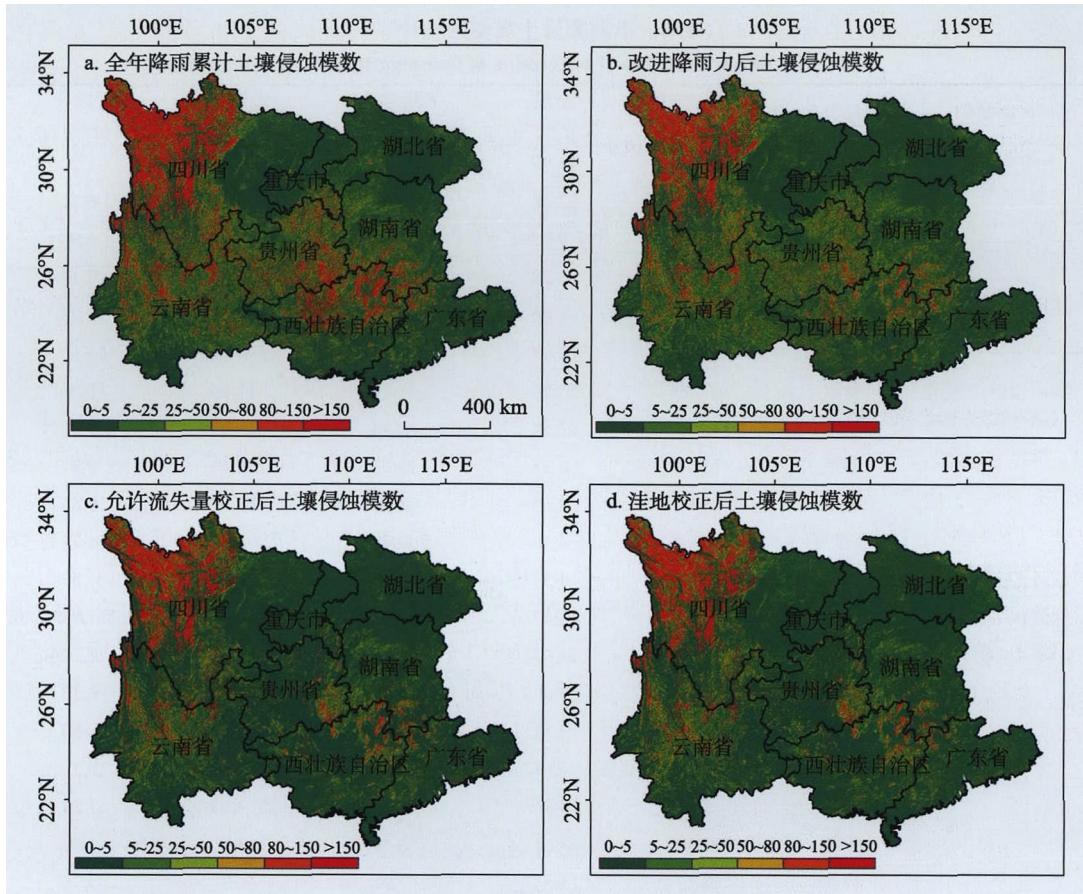


图6 不同算法中国西南土壤侵蚀模数

Fig. 6 Soil erosion rating of different algorithms

占总面积的比例越低, 其中强度、极强度及剧烈侵蚀面积均在10%以下。就侵蚀量而言, 侵蚀等级越高则侵蚀量越大, 对总侵蚀量的贡献率越高, 其中以剧烈侵蚀最大, 各算法均大于50%; 极强度侵蚀次之, 均大于13%。

## 5 讨论

高效精确地估算喀斯特关键带土壤侵蚀, 明确其发生的类型及强度, 对喀斯特关键带生态系统管理和社会经济良性发展具有重要的理论和运用价值。本文基于喀斯特关键带不同岩性差异性及其正负地形源汇关系, 对喀斯特关键带的土壤侵蚀进行多次改进(表5)。

喀斯特地区并不是每场降雨都产生径流, 主要是大雨( $25 \text{ mm} \leq x < 50 \text{ mm}$ ,  $x$ 为雨强)尤其是暴雨( $x \geq 50 \text{ mm}$ )才产生径流<sup>[23]</sup>。设定合理的有效侵蚀性降水阈值, 能够区分发生和不发生侵蚀的降雨事件, 有效地剔除未产生侵蚀的降雨量<sup>[30]</sup>, 使降雨侵蚀力的计算结果更加精确, 从而解决因降雨侵蚀高估而造成土壤侵蚀高估的问题。本文将喀斯特与非喀斯特相区分, 在未改进降雨侵蚀力时, 喀斯特区域的平均降雨侵蚀力相当非喀斯特区域的94.02%; 改进降雨侵蚀力后, 喀斯特区域的平均降雨侵蚀力仅为非喀斯特区域的59.91%。

表5 与传统方法相比本研究的贡献

Tab. 5 Contribution of this study compared to traditional methods

内容	传统研究的局限性	本研究的贡献
降雨侵蚀力	未考虑下垫面岩性差异对降雨形成侵蚀性径流的影响, 将喀斯特与非喀斯特均一化。	将喀斯特与非喀斯特不同的岩性下垫面相区分, 设定适合其岩性特征的有效侵蚀降水阈值。
允许流失量	未考虑区域成土速率及土壤实际存存量, 理论侵蚀量大于实际土壤保有量, 造成土壤侵蚀高估。	基于喀斯特不同岩石类型及组合方式测算其成土速率, 并将其作为允许流失量对高估的土壤侵蚀进行校正。
洼地区域	将洼地缓坡耕种区看作土壤侵蚀流失区。	将洼地看作一个完整的相对封闭系统, 是周边物质(泥沙)的汇聚区。

喀斯特关键带因其成土物质的先天不足, 成土速度慢、土层薄, 实际成土量远小于其理论侵蚀量。按水利部的传统侵蚀标准, 喀斯特地区的土壤侵蚀强度以微度和轻度侵蚀为主, 但喀斯特地区较低的侵蚀强度是由于土壤的限制<sup>[32]</sup>。虽然喀斯特地区土壤侵蚀的绝对量小, 但其土壤侵蚀的风险性往往非常严重。因此, 急需建立一套适用于喀斯特地区的土壤侵蚀分类分级标准及风险评价方法。此外, 在土壤侵蚀过程中喀斯特洼地系统应该被看作是完整的系统。虽然洼地在坡面尺度上存在坡面汇入径流沟蚀、超渗径流面蚀等水土流失过程, 从其最终的侵蚀结果来看, 被侵蚀的土壤仍处在整个洼地系统之中, 只是其位置发现了变化。被侵蚀搬运的土壤在洼地底部富集形成可耕作层, 在一定程度上增加了喀斯特区域的耕地面积。

通过表6的对比可知, 通过对土壤侵蚀算法的多次改进, 能够有效的剔除因降雨侵蚀力及实际土壤保有量高估造成的计算误差, 这种考虑喀斯特土壤侵蚀可承受阈值的方法, 实现了对喀斯特土壤侵蚀量的精确量化。

由于喀斯特特殊的二维三元地质结构, 使得其土壤侵蚀存在地表流失与地下漏失两种形式。需要指出的是, 本文主要是针对喀斯特地区的地表土壤侵蚀进行的算法改进, 地下漏失部分将会作为进一步的研究, 还有待完善。

表6 基于RUSLE方法不同研究区土壤侵蚀模数

Tab. 6 Soil erosion modulus in different research areas based on RUSLE method

主要作者	研究区	时间尺度	土壤侵蚀模数(t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )
高峰等 <sup>[48]</sup>	广西钦江流域	2010	26.09
许月卿等 <sup>[46]</sup>	贵州省猫跳河流域	2002	28.7
吴昌广 <sup>[49]</sup>	三峡库区	1999	45.28
		2009	39.89
曾凌云 <sup>[50]</sup>	红枫湖流域	1960-1986	38.35
		1987-1997	52.80
		1998-2004	40.24
本文校验前	南方8省区	2015	47.3
本文校验后	南方8省区	2015	24.73

## 6 结论

(1) 将全年降雨都计算为降雨侵蚀力时, 非喀斯特与喀斯特区域的降雨侵蚀力没有显著差异。设定不同的有效降雨侵蚀阈值后, 非喀斯特与喀斯特平均降雨侵蚀力的差值

为  $2579.41 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，喀斯特区域的平均降雨侵蚀力仅相当于非喀斯特区域的 59.91%，不同岩性对降水产生侵蚀地表径流的差异得到充分地体现。

(2) 在碳酸盐岩地区不同岩层组和类型的成土速率差别较大，在连续性碳酸盐岩、碳酸盐岩夹碎屑岩、碳酸盐岩与碎屑岩互层中其土壤允许流失量分别为  $0.21 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $2.89 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。碳酸盐岩地区存在多个土壤允许流失量，具有多样性的特点。

(3) 研究区内的洼地总面积为  $70.82 \times 10^5 \text{ ha}$ ，占区域总面积的 3.65%，洼地在空间上的连续性与碳酸盐岩的分布区基本重合。其中喀斯特类型的洼地数量较多，空间分布相对集中，但是规模面积较小；而非喀斯特洼地的数量相对较少，空间分布较为零散单一，其面积规模通常较大，这是由于其成因的差异性导致。

(4) 相比于全年降雨累计算法，经过多次校正后的土壤侵蚀面积降低了  $3.91 \times 10^7 \text{ ha}$ ，修正幅度达 27.79%；土壤侵蚀总量减少了  $43.38 \times 10^8 \text{ t yr}^{-1}$ ，修正幅度达 47.72%；平均侵蚀模数减低了  $22.57 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，修正幅度达 47.72%。

### 参考文献(References)

- [1] Qiao Yuliang, Qiao Yun. Fast soil erosion investigation and dynamic analysis in the Loess Plateau of China by using information composite technique. *Advances in Space Research*, 2002, 29(1): 85-88.
- [2] Fu Bojie, Zhao Wenwu, Chen Liding, et al. Multi-scale soil erosion evaluation index. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 1(16): 1936-1943. [傅伯杰, 赵文武, 陈利顶, 等. 多尺度土壤侵蚀评价指数. *科学通报*, 2006, 1(16): 1936-1943.]
- [3] Liu Shiliang, Guo Xudong, Lian Gang, et al. Multi-scale ecological security evaluation of typical fragile areas in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1554-1559. [刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原典型脆弱区生态安全多尺度评价. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1554-1559.]
- [4] Fu Bojie, Qiu Yang, Wang Jun, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 717-722. [傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, 57(6): 717-722.]
- [5] Roberto R, Thanh H L, Maria C R. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology*, 2012, 422(5): 17-29.
- [6] Fu Bojie, Chen Liding, Qiu Yang, et al. Variability of the soilphysical properties on the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 587-594. [傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. *地理学报*, 2002, 57(5): 587-594.]
- [7] Liu Shiliang, Fu Bojie, Ma Keming, et al. Effects of vegetation types and landscape features on soil properties at the plateau in the upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 26-30. [刘世梁, 傅伯杰, 马克明, 等. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 26-30.]
- [8] Zha Liangsong, Deng Guohui, Gu Jiachuang. Dynamic changes of soil erosion in the Chaohu Watershed from 1992 to 2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1708-1719. [查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992-2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化. *地理学报*, 2015, 70(11): 1708-1719.]
- [9] Wang Jiao, Cheng Weimin, Qi Shenglin, et al. Sensitive evaluation and spatial analysis of soil and water loss based on USLE and GIS: Taking Taihang Mountain area of Hebei Province as an example. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 614-624. [王娇, 程维明, 祁生林, 等. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析: 以河北太行山区为例. *地理研究*, 2014, 33(4): 614-624.]
- [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. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 19(12): 912-921.
- [11] Liu Shuyan, Qin Fucang, Xiang Yuanhe, et al. Study on the relationship between slope and the amount of soil loss based on WEPP. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4): 97-101. [刘淑燕, 秦富仓, 项元和, 等. 基于 WEPP 模型进行坡度因子与侵蚀量关系研究. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 97-101.]
- [12] Wang Jianxun, Zheng Fenli, Jiang Zhongshan, et al. Hillslope soil erosion prediction based on WEPP model under different slope lengths in hilly-gully region of the loess area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 151-156. [王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 等. 基于 WEPP 的黄土丘陵区不同坡长条件下坡面土壤侵蚀预测. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 151-156.]

- [13] Liu Shiliang, Dong Yuhong, Wang Jun. Effects of land consolidation on long-term soil erosion based on WEPP model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 18-22. [刘世梁, 董玉红, 王军. 基于 WEPP 模型的土地整理对长期土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 18-22.]
- [14] Long Mingzhong, Wu Kehua, Xiong Kangning. Assessment of the applicability of the WEPP model (Hillslope Version) for soil erosion in karst rock desertification area, Guizhou Province. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(2): 201-207. [龙明忠, 吴克华, 熊康宁. WEPP 模型(坡面版)在贵州石漠化地区土壤侵蚀模拟的适用性评价. *中国岩溶*, 2014, 33(2): 201-207.]
- [15] Wang Jianxun, Zheng Fenli, Jiang Zhongshan, et al. Assessment of WEPP model applicability (hillslope version) on hill-gully region of the Loess Plateau: A case study in slope length factor. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 50-55. [王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价: 以坡长因子为例. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 50-55.]
- [16] Ye Jundao, Qin Fucang, Yue Yongjie, et al. The applicability of WEPP in simulating the soil erosion in soft rock region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7): 132-135. [叶俊道, 秦富仓, 岳永杰, 等. WEPP 模型在砒砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 132-135.]
- [17] Liu Yuanli, Zheng Fenli, Wang Bin, et al. Assessment of WEPP model applicability in black soil zone of Northeast China: A case study of slope gradient and soil and water conservation measures. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 139-145. [刘远利, 郑粉莉, 王彬, 等. WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价: 以坡度和水土保持措施为例. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 139-145.]
- [18] An Xianjin, Li Wei. Development trends of global Karst research based on WOS and CSCD. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2018, 36(3): 14-22. [安显金, 李维. 基于 WOS 数据库和 CSCD 的全球喀斯特研究动态. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(3): 14-22.]
- [19] Shi Dongmei, Lu Xiping, Liu Lizhi. Study on functions of soil and water conservation by mulberry hedgerow intercropping of purple soil sloping farmland in Three Gorges Reservoir region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 75-79. [史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 75-79.]
- [20] Li Sheng, Ren Huadong, Yao Xiaohua, et al. Study on characteristics of runoff and nutrition loss between different vegetation land in typical karst rock desertification zone. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 1-6. [李生, 任华东, 姚小华, 等. 典型石漠化地区不同植被类型地表水土流失特征研究. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 1-6.]
- [21] Peng Tao, Wang Shijie, Zhang Xinbao, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes. *Earth and Environment*, 2008, 36(2): 125-129. [彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报. *地球与环境*, 2008, 36(2): 125-129.]
- [22] Peng Tao, Yang Tao, Wang Shijie, et al. Monitoring results of soil loss in karst slopes. *Earth and Environment*, 2009, 37(2): 126-130. [彭韬, 杨涛, 王世杰, 等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报. *地球与环境*, 2009, 37(2): 126-130.]
- [23] Wei Xingping, Xie Shiyong, Zhang Zhiwei, et al. Characteristics of surface soil erosion of carbonate vally in different land use types at Nanping in Chongqing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 42-46. [魏兴萍, 谢世友, 张志伟, 等. 重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 42-46.]
- [24] Yuan Daoxian, Cai Guihong. *Karst Environment Science*. Chongqing: Chongqing Press, 1988. [袁道先, 蔡桂鸿. *岩溶环境学*. 重庆: 重庆出版社, 1988.]
- [25] Ying Bin, Fang Yiping. The classification of China mountain areas and its spatial distribution characteristics. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2017, 35(5): 7-14. [盈斌, 方一平. 中国山区类型划分及其空间格局特征. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(5): 7-14.]
- [26] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Transactions of the ASABE*, 1983, 26(1): 153-156.
- [27] Elsenbeer H D, Classel W T. A daily rainfall erosivity model for western Amazonia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48(5): 439-444.
- [28] Hu Xuli, Pan Jianjun, Yang Shujiang, et al. Comparative study on rainfall erosivity models using daily rainfall amounts. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(1): 68-70. [胡续礼, 潘剑君, 杨树江, 等. 几种降雨侵蚀力模型的比较研究. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 68-70.]
- [29] Peng Xudong, Dai Quanhou, Li Changlan, et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in carbonate region. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 131-140. [彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.]
- [30] Xie Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 6-11. [谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.]
- [31] Wang Shijie, Li Ruiling, Zhou Dequan, et al. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of carbonate rocky desertified land in Guizhou Province, P R China: Phenomena and mechanisms. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 123-131.
- [32] Li Yangbing, Wang Shijie, Wei Chaofu, et al. The spatial distribution of soil loss tolerance in carbonate area in Guizhou Province. Earth and Environment, 2006, 34(4): 36-40. [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. 地球与环境, 2006, 34(4): 36-40.]
- [33] Zhang Liping, Yang Dayuan, Zhu Dakui. Relationship between the tolerance loss value of soil and the weathering and denudation rate of parent rock. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(4): 382-387. [张丽萍, 杨达源, 朱大奎. 母岩的风化剥蚀速率与土壤允许流失量的关系: 以长江三峡坝区风化花岗岩土壤为例. 长江流域资源与环境, 2003, 12(4): 382-387.]
- [34] Bai Xiaoyong, Wang Shijie. Relationships between soil loss tolerance and carbonate rocky desertification. Journal of Natural Resources, 2011, 26(8): 1315-1322. [白晓永, 王世杰. 岩溶区土壤允许流失量与土地石漠化的关系. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1315-1322.]
- [35] Cao Jianhua, Jiang Zhongcheng, Yang Desheng, et al. Grading of soil erosion intensity in southwest carbonate area of China. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 1-7, 20. [曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 1-7, 20.]
- [36] Cao Jianhua, Jiang Zhongcheng, Yang Desheng, et al. Soil loss tolerance and its prevention and control measures of karst area in Southwest China. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 40-45. [曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策. 中国水土保持, 2008(12): 40-45.]
- [37] Chen Xiaoping. Research on characteristics of soil erosion in carbonate mountainous region environment. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 3(4): 32-37. [陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 32-37.]
- [38] People's Republic of China Ministry of Water Resources. SL190-2007 Standards of Classification and Gradation of Soil Erosion. Beijing: China Water Power Press, 2007. [中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [39] Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS Geographic Information System Spatial Analysis Experimental Course. Beijing: Science Press, 2006. [汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [40] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion-sediment yield models. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [41] Liu Baoyuan. Nearing MRL. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASABE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [42] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conversation Planning. Agriculture Handbook No. 537. US Department of Agriculture Science and Education Administration: Washington DC, 1978.
- [43] McCool D, Foster G, Mutchler C. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. Transactions of the ASABE, 1989, 32(5): 1571-1576.
- [44] Van der Knijff JM, Jones RJA, Montanarella L. Soil erosion risk assessment in Europe EUR 19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2000.
- [45] Chen Sixu, Yang Xiaohuan, Xiao Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model. Resources Science, 2014, 36(6): 1288-1297. [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. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297.]
- [46] Xu Yueqing, Huang Jing, Feng Yan, et al. Soil erosion economic loss under different land use structures: A case study of Maotiao River Watershed, Guizhou Province. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1451-1456. [许月卿, 黄静, 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. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1451-1456.]
- [47] China Geography, China Encyclopedia General Committee. China Encyclopedia: China Geography. Beijing: China Encyclopedia Publishing House, 1993. [中国大百科全书总委员会《中国地理》. 中国大百科全书: 中国地理. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993.]
- [48] Gao Feng, Hua Cui, Lu Yuan, et al. Assessment of soil erosion in Qinjiang Watershed based on GIS and USLE.

- Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 18-22, 28. [高峰, 华瑾, 卢远, 等. 基于GIS和USLE的钦江流域土壤侵蚀评估. 水土保持研究, 2014, 21(1): 18-22, 28.]
- [49] Wu Changguang. Assessment of vegetation cover dynamic and soil erosion risk in Three Gorges Reservoir Area under the background of climate change [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [吴昌广. 气候变化背景下三峡库区植被覆盖动态及其土壤侵蚀风险研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.]
- [50] Zeng Lingyun. Study on soil erosion in karst area based on RUSLE model [D]. Beijing: Peking University, 2008. [曾凌云. 基于RUSLE模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.]

## Assessment of soil erosion in karst critical zone based on soil loss tolerance and source-sink theory of positive and negative terrains

QIAN Qinghuan<sup>1,2</sup>, WANG Shijie<sup>1,3</sup>, BAI Xiaoyong<sup>1,3</sup>, ZHOU Dequan<sup>2</sup>, TIAN Yichao<sup>1,3,4</sup>,  
LI Qin<sup>1,3,4</sup>, WU Luhua<sup>1,3,4</sup>, XIAO Jianyong<sup>1,2</sup>, ZENG Cheng<sup>1,2</sup>, CHEN Fei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China; 2. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, CAS, Puding 562100, Guizhou, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Traditional classic soil erosion models are not applicable in karst areas. In this study, the effective rainfall erosion threshold was obtained and the rainfall erosivity was re-estimated, according to the lithologic difference of the karst critical zone. The soil formation rate was calculated and used as the soil loss tolerance, based on the chemical composition variation of carbonate rocks. The spatial distribution information of karst depression was extracted by geomorphologic-hydrologic analysis, and the soil erosion algorithm in the karst critical zone was modified and improved. The results showed that: (1) The traditional algorithm ignored the specificity of the underlying surface of the karst critical zone. The average rainfall erosivity was estimated to be 47.35%, and the average rainfall erosivity in the karst area is only 59.91% of the non-karst area. (2) The soilless or less soil areas could be miscalculated as the high erosion region by using the conventional algorithm. However, the soil loss tolerance by continuous carbonate, carbonate clastic, carbonate and clastic interbeds were about 0.21, 1.2 and 2.89 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively. (3) Sloping lands and croplands in the depressions are generally regarded as the high incidence area of soil erosion, but the depression of the karst should be the sediment area of surface erosion. The spatial distribution of karst depression was basically coincided with that of carbonate rocks. (4) The traditional algorithm overestimated the soil erosion area at about 27.79%, while the soil erosion amount at approximately 47.72%. Generally, the traditional classic model could greatly overestimate the soil erosion amount in the karst area, therefore, an accurate and applicable model should be established. In addition, due to the slow soil formation rate, the thin soil layer and the less total amount of soil in karst area, the soil loss tolerance was far lower than the erosion standard of non-karst area. The classifying and grading standard and risk assessment method of soil erosion applicable to karst area should be set and established.

**Keywords:** karst; rainfall erosivity factor; soil loss tolerance; depression sedimentary; theoretical soil erosion; actual soil erosion; southwest China