DOI: 10.5846/stxb202104221057

宫晨,吴文瑾,段怡如,刘海江,何金军,孙聪,蒋倩.基于遥感 RMMF 模型的喀斯特地区水土保持功能评价.生态学报,2022,42(11):4389-4400. Gong C, Wu W J, Duan Y R, Liu H J, He J J, Sun C, Jiang Q.Evaluation of soil and water conservation function in karst region based on Remote Sensing RMMF Model.Acta Ecologica Sinica,2022,42(11):4389-4400.

基于 遥 感 RMMF 模 型 的 喀 斯 特 地 区 水 土 保 持 功 能 评价

宫 晨1,2,吴文瑾1,2,段怡如1,2,刘海江3,*,何金军4,孙 聪3,蒋 倩5

1 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094

2 三亚中科遥感研究所,三亚 572029

3 中国环境监测总站,国家环境保护环境监测质量控制重点实验室,北京 100012

4 鄂尔多斯市林业和草原科学研究所,鄂尔多斯 017010

5 北京航天长城卫星导航科技有限公司,北京 100032

摘要:为支撑我国重点生态功能区生态效益补偿工作,以半物理水土模型 RMMF (The Revised Morgan, Morgan and Finney Model)为基础,通过对模型部分输入物理量进行遥感化改进建立了遥感 RMMF 模型(RS-RMMF)。为在评价中进一步排除气象要素波动带来的水土流失量变化,通过 RS-RMMF 模型构建了单位降水截留率、单位径流冲蚀量以及单位径流运输量 3 项评价指标来综合评价区域生态系统本身的水土保持能力。研究选取了《全国主体功能区规划》中的桂黔滇喀斯特功能区为典型 区,分别基于上述评价指标和经典 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)模型开展了 2011 年至 2019 年水土保持功能计算与对比。结果表明:相比 2011 年,2019 年喀斯特功能区的降水截留率 PI₀升高 1.94%,径流冲蚀量 *H*₀下降 5.96×10⁻⁴ Mg/hm², 径流运输量 TC₀下降 6.0×10⁻⁷ Mg/hm²,水土保持功能综合得分增加 0.83,水土保持功能整体上得到小幅改善。计算结果与RUSLE 模型对比结论基本一致,但在空间相对强弱的分布上存在显著差异,RS-RMMF 模型的评价得分空间分布明显由植被属性主导,且受降水等因素影响较小。该模型可客观核算生态系统水土保持能力,为生态补偿机制的实施应用提供科学支撑。 关键词:水土保持评价;RS-RMMF模型;喀斯特功能区

Evaluation of soil and water conservation function in karst region based on Remote Sensing RMMF Model

GONG Chen^{1,2}, WU Wenjin^{1,2}, DUAN Yiru^{1,2}, LIU Haijiang^{3,*}, HE Jinjun⁴, SUN Cong³, JIANG Qian⁵

1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 Sanya Institute of Remote Sensing, Sanya 572029, China

3 State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

4 Scientific Research Institute of Forestry and Grassland Desertification Control in Ordos City, Ordos 017010, China

5 China Great Wall Industry Corporation, Beijing 100032, China

Abstract: To support the ecological benefit compensation system of key ecological function areas in China, Remote Sensing RMMF (RS-RMMF) soil erosion model is established by selecting the optimized remote sensing factors and RMMF (The revised Morgan, Morgan and Finney model) model. RS-RMMF model eliminates the soil erosion changes caused by the fluctuation of meteorological elements. The function of soil and water conservation is evaluated by constructing three

收稿日期:2021-04-22; 采用日期:2022-01-06

基金项目:科技兴蒙重大专项课题(KJXM-EEDS-2020006)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuhj@ cnemc.cn

evaluation indexes of unit rainfall interception rate, unit runoff erosion amount and unit runoff transportation volume. Karst functional areas in Guangxi, Guizhou and Yunnan are taken as the study area based on RS-RMMF model. The results show that compared with 2011, the rainfall interception rate PI_0 in 2019 increased by 1.94%, the runoff erosion amount H_0 decreased by 5.96×10^{-4} Mg/hm², the runoff transportation volume TC_0 decreased by 6.0×10^{-7} Mg/hm², and the comprehensive score increased by 0.83. The overall water and soil conservation function has been slightly improved. Compared with RUSLE, the results of RS-RMMF model are basically consistent in the overall trend from 2011 to 2019. There are significant differences in the spatial distribution of the model results. The spatial distribution of the evaluation score of RS-RMMF is dominated by vegetation, but is less affected by precipitation factors. RS-RMMF model can objectively calculate the soil and water conservation capacity of the ecosystem, and provide scientific support for the application of ecological benefit compensation system.

Key Words: evaluation of water and soil conservation; RS-RMMF; karst functional areas

水土流失是我国生态保护的重点关注问题,具有面积大、分布广、治理难等特点。在我国的黄土高原、东 北黑土区、长江经济带、桂黔滇等地区,水土流失问题持续突出^[1]。水利部 2018 年发布的水土流失动态监测 结果显示,全国水土流失面积达 273.69 万 km²,占全国国土面积的 28.6%,中度及以上水土流失面积为 105.44 万 km²,占总面积的 38.5%^[2]。为治理水土流失问题,我国划定了水土保持重点生态功能区,并通过生态补偿 制度来奖励各地在生态保护方面所做的贡献,促进生态资源的高效利用,对提升区域生态环境状况、推动可持 续发展起到巨大作用。作为生态系统的重要能力指标之一,对水土保持功能进行有效的评价对生态效益补偿 工作的开展具有重要意义。

目前,国内外学者针对水土保持评价指标及模型已经开展了丰富的研究工作,通过对已调研水土保持评价方法进行归纳总结,可分为以下三类:

(1)土壤模型法

土壤模型法主要分为经验统计模型和物理模型两种。经验模型通过对观测数据的分析来寻求数据之间的特征关系,因其计算方便、结构简洁,成为流域侵蚀研究的广泛采用方法,能适用于观测数据相对粗略的情况。物理模型是在明确侵蚀产沙机制前提下,利用沉积物质量守恒和流量动能等式,建立侵蚀模型,需要大量的观测数据来支持。国际上流行的经验统计模型包括 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)模型^[3]、WEPP (USDA-Water Erosion Prediction Project)模型^[4]、PRISM (Probabilistic Symbolic Model Checker)模型^[5]等。其中最常见的 USLE 模型^[6]是通过获取年降水量、土壤侵蚀度、土地覆被和地形信息来估算土壤流失的年平均量,在世界范围内得到了极为广泛的应用。物理模型包括 ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation)模型^[7]、CLEAMS (Chemicals, Loading, and Erosion from Agricultural Management Systems)模型^[8]、MMF(Morgan-Morgan-Finney)模型^[9]等。典型的 LISEM (Limburg Soil Erosion Model)模型^[10]综合考虑了土壤侵蚀的各个环节,将流域在空间离散化为一系列大小相等的栅格单元,对降雨侵蚀过程以等时间间隔分割,按照时间步长分时段模拟侵蚀过程。

(2)指标分析法

基于指标分析的生态功能评价方法通过因子加权记分综合反映生态功能,该方法将得到的评估指标及权 重排序构建研究区的生态功能评价模型,通过各项指标加权平均的综合值,进行分级评价。常用的方法包括 频度分析法、专家咨询法、层次分析法、灰色聚类分析法等。其中最为常见的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[11]是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础之上进行定性和定量分析 的决策方法。

(3)回归模型法

回归模型法通过建立生态功能和其决定因素的回归模型对生态功能进行评价,实现简单,实用性强。例

如植被保土作用系数 $C^{[12]}$, $C = 0.779 + 0.595 \log C'$,式中, C'表示植被覆盖度,可以反映植被抑制土壤侵蚀的能力;植被覆盖管理因子是根据植被覆盖度的不同,基于线性回归模型分级得到。

目前我国大范围的生态系统水土保持功能评价较多采用因子权重法,但这类方法主观性较强,评价结果的物理意义也不够明确,合理性和公平性易受到质疑。而基于土壤模型的方法难以区分自然气候波动引起的水土流失量改变和生态系统水土保持能力变化引起的水土流失量改变,且在大范围应用中面临参数难以获取的问题。特别地,现有评价中常采用的 USLE 模型并不适用于陡坡条件^[13],给喀斯特等特殊地貌的评价带来困难。综合这些考虑,选取了可用于小流域、陡坡地貌的半物理土壤侵蚀模型 RMMF^[14],通过引入一系列优选遥感因子及其与模型输入物理量之间经验公式建立了遥感 RMMF 模型(RS-RMMF),基于这一模型建立了3个不受气象动态干扰的水土保持功能评价指标,从而在兼顾模型评价客观性和因子获取便捷性的基础上,对传统评价工作中难度较大的喀斯特功能区进行了生态系统水土保持功能评价与时序分析。

1 研究方法

1.1 RMMF 模型

RMMF 土壤侵蚀模型通过将溅流和径流的土壤剥离率与径流输送能力进行比较,可估算年土壤侵蚀速率 并进一步实现对土壤侵蚀量的估计^[15-16]。模型主要分为两个阶段模拟土壤侵蚀:计算降雨能量和地表流量 的水相阶段和计算土壤剥离和迁移率的沉积物阶段。土壤侵蚀的年度总值由土壤剥蚀的年总速率(包括飞 溅和径流造成的土壤侵蚀)与径流输送能力之间的最小值给出。如图1所示。

$$E = \min\{(F + H), TC\}$$
(1)

式中, *E*为年度侵蚀总量(Mg hm⁻² a⁻¹); *F*是飞溅造成的土壤颗粒分离(Mg hm⁻² a⁻¹); *H*为径流造成的土壤颗 粒分离(Mg hm⁻² a⁻¹); *TC* 是径流输送能力(Mg hm⁻² a⁻¹)。其中生态系统主要通过降水截流、减少径流冲蚀 量和运输量来起到保持水土的作用, 对相关参量的估算可以有效评估生态系统的水土保持功能。



图 1 RMMF 模型土壤侵蚀模拟流程图

Fig.1 Soil erosion simulation flow chart based on RMMF model

RMMF:修正的摩根-摩根-芬尼模型 Revised Morgan, Morgan and Finney Model

1.2 RS-RMMF 模型及指标计算

由于水土流失量受到降水动态的影响很大,因此水土流失量的大小并不与水土保持功能的强弱绝对相

42 卷

关。为了在水土保持生态功能评价中排除降雨的影响,基于 RS-RMMF 模型构建了 3 个新的指标对生态系统 的水土保持功能进行评价,分别为区域单位降水截留率、区域单位径流冲蚀量、以及区域单位径流运输量[17]。 这3个指标计算所涉及的参数除土壤属性外均可通过遥感手段获取,并且土壤属性变化极为缓慢、在短时序 计算可认为近似恒定,这就使得模型可完全基于遥感数据实现动态评价。

(1)区域单位降水截留率 PI。

植被覆盖对单位面积降雨量的永久截留的比例称为降水截留率,主要考虑植被覆盖度及冠层垂直结构动 态对降水截流量的影响。

$$PI_0 = CC^2 \times IF_{\max} \times \left[1 - e^{-0.046 \times \text{LAI} \times \frac{1}{IF_{\max}}}\right]$$
(2)

$$W_{\text{max}} = 0.935 + 0.498 \text{LAI} - 0.00575 (\text{LAI})^2$$
 (3)

式中,PI。为植被降雨截留率,单位为%;CC为植被覆盖度,单位为%;IFmax为从LAI估算的最大林冠存储力, 单位为 mm;LAI 为叶面积指数。

植被覆盖度 CC 使用增强植被指数 EVI 计算得到,具体公式如下,

$$CC = \frac{\text{EVI} - \text{EVI}_{\min}}{\text{EVI} + \text{EVI}_{\min}}$$
(4)

式中,EVImin表示理想无植被地表的 EVI 值, 而 EVIman则表示理想植被全覆盖地表的 EVI 值。

(2)区域单位径流冲蚀量 H_0

径流冲蚀部分主要考虑植被覆盖度和基岩裸露率变化对径流冲蚀作用的影响及地形对泥沙的阻拦沉积 作用,由土粒分散率、基岩裸露率、植被覆盖度等得到冲量。

$$H_0 = \left(\sum DR_i \times i\right) (\sin S)^{0.3} (1 - CC) (1 - \text{EBC}) \times 10^{-3}$$
(5)

式中:H₀为单位径流冲蚀量,代表每 mm 径流深冲刷产生的泥沙重量,单位为 Mg/hm²;DR 为土粒分散率;i 分 别表示粘粒、粉粒、砂粒;S为坡度因子,单位为°;CC为植被覆盖度,单位为%;EBC为基岩裸露率,单位为%。

根据张莉等[18]在室内冲刷槽试验实测数据得到不同类型土壤土粒分散率,结合各类型土壤粘粒、粉粒、 砂粒含量反解出各级粒径的土粒分散率,确定粘粒分散率为0.7,粉粒分散率为1.2,砂粒分散率为0.9。

坡度因子 S采用 DEM 数据计算,具体公式如下:

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin\theta + 0.036 & \theta < 5^{\circ} \\ S = 16.8 \sin\theta - 0.5 & 5^{\circ} \le \theta \le 10^{\circ} \\ S = 21.9 \sin\theta - 0.96 & \theta \ge 10^{\circ} \end{cases}$$
(6)

式中, θ 为地形坡度。

基岩裸露率 EBC 采用 Huang 等^[19]模仿归一化植被指数提出的归一化岩石指数和张晓仑等^[19]基于 NDRI 像元二分模型提取基岩裸露率的波段运算方法,其计算公式为:

$$NDRI = \frac{(SWIR - R)}{(SWIR + R)}$$
(7)

$$EBC = \frac{(NDRI - NDRI_{min})}{(NDRI + NDRI_{max})}$$
(8)

式中,EBC 为基岩裸露率;SWIR 表示短红外波段;R 表示红光波段;NDRI 为归一化岩石指数;NDRI wax为归一 化岩石指数的最大值;NDRImin为归一化岩石指数最小值。

(3)区域单位径流运输量 TC。

主要考虑土地覆盖/利用变化对径流运输作用的影响。

$$TC_0 = \left(\sum DR_i \times i\right) \times C \times P \times \sin S \times 10^{-2} \tag{9}$$

式中, TC_0 为每 mm 径流深产生的单位径流运输量,单位为 Mg/hm²;DR 为土粒分散率;i 分别表示粘粒、粉粒、 砂粒:S为坡度因子,单位为°;C和P分别为植被覆盖与管理因子和水土保持措施因子。

植被覆盖管理因子 C 主要是基于植被覆盖度 CC 得到最终的空间分布图,使用的为蔡崇法等^[21]建立的 植被覆盖度与 C 值之间的回归关系。

$$C = 1 \qquad CC = 0 C = 0.6508 - 0.3436 \log_{10} CC \qquad 0 < CC \le 78.3\%$$
(10)
$$C = 0 \qquad CC > 78.3\%$$

对于非喀斯特地区,参考白雷超等^[22]及黄杰等人^[23]的研究,水土保持措施因子的赋值如表1所示。

表 1 非喀斯特地区不同土地利用类型 P 值 Table 1 P value of different land use types in non-karst areas

	水田 Paddy field	旱田 Rainfed land	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	建设用地 Building area	盐碱地 Saline	沼泽地 Wetland	裸地 Bare area
<i>P</i> 值	0.15	0.35	1.00	1.00	0.00	0.00	0.10	0.10	1.00

喀斯特地区属于岩溶环境为主的特殊生态系统,区内土层瘠薄,降雨强度大,陡坡耕种普遍,水土流失非 常严重。根据蔡崇法等人^[20]的研究对 P 因子进行赋值,确定不同土地类型的 P 值,如表 2 所示。

表 2 喀	所特地区不同土地利用类型 P(直
-------	-----------------	---

 Table 2
 P value of different land use types in karst areas

	水田	旱田	林地	草地	水域	建设用地	裸地
	Paddy field	Rainfed land	Forest	Grass	Water	Building area	Bare area
<i>P</i> 值	0.15	0.35	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00

1.3 生态系统水土保持功能综合评价计算

为对区域生态系统水土保持功能进行综合评估,将降水截留率 PI₀、径流冲蚀量 H₀和径流运输量 TC₀三项 指标归一化为 0-100 之间无量纲数据,按照加权打分综合得到区域水土保持能力得分。其中降水截留率 PI₀ 为正向指标,截留率值越大,水土保持效果越好;径流冲蚀量 H₀和径流运输量 TC₀为负向指标,值越小,水土保 持效果越好。由于生态系统对土壤的保持包含冲蚀截留和运输截留两部分,我们对两个指标进行了整合,得 到土壤截留能力得分。最后基于降水截留(保水)和土壤截留(保土)2 项能力得分获得水土保持的总评分。 具体计算过程如下:

(1)对于正向指标归一化处理:

$$X_{i} = \frac{x_{i} - \min(x_{i})}{\max(x_{i}) - \min(x_{i})} \times 100$$
(11)

(2)对于负向指标归一化处理:

$$X_{i} = \frac{\max(x_{i}) - x_{i}}{\max(x_{i}) - \min(x_{i})} \times 100$$
(12)

(3) 截留能力计算:

土壤截留能力得分 =
$$\max(H_0, TC_0)$$
 (13)

降水截留能力得分 =
$$PI_0$$
 (14)

(4)综合打分评估:

生态系统水土保持能力 = 0.5 × 土壤截留能力得分 + 0.5 × 降水截留能力得分 (15)

2 研究区概况

本研究选择《全国主体功能区规划》^[24]划定的9个水土保持功能区之一的桂黔滇喀斯特石漠化防治生态

功能区(图2)作为喀斯特地区的评价示例,评估其2011年至2019年生态系统水土保持功能状况及变化特征。该功能区以贵州高原为中心,包括广西西北部、云南东部和四川、重庆、湖南的部分地区。属于岩溶环境

为主的特殊生态系统,生态脆弱性极高,土地石漠化极为严重,土壤一旦流失,生态恢复难度极大。区内土层 瘠薄,降雨强度大,陡坡耕种普遍,水土流失非常严重。



图 2 桂黔滇喀斯特水土保持区的地理位置 Fig.2 Location of karst functional areas in Guangxi, Guizhou and Yunnan

3 结果与分析

3.1 数据来源

本研究中 RS-RMMF 模型输入参量主要是通过国内外权威土壤和遥感数据集进行计算,数据来源如表 3 所示,其中的经验系数结合参考文献得到。

Table 3 Data source of each input parameter					
因子 Indicators	输入参量 Input parameters	数据来源 Data sources			
区域单位降水截留率	植被覆盖度	MODIS EVI 250m 分辨率产品 MOD13Q1			
Rainfall interception rate	最大林冠存储力	MODIS LAI 500m 分辨率产品 MCD15A3H			
区域单位径流冲蚀量	土粒分散率	全国 1:100 万土壤图以及所附的土壤属性表			
Runoff erosion amount	坡度	ASTER GDEM 30m 分辨率原始高程数据			
基岩裸露率	MODIS 500 米分辨率地表反射率数据 MOD09A1				
区域单位径流运输量	植被覆盖与管理因子	MODIS EVI 250m 分辨率产品 MOD13Q1			
Runoff transportation volume	水土保持措施因子	MODIS 土地覆盖类型 250m 分辨率产品 MCD12Q1			

3.2 水土保持功能评价结果

首先基于 RS-RMMF 模型计算了桂黔滇喀斯特水土保持区的 3 个生态系统水土保持功能评价指标,即年 度平均单位降水截留率、径流冲蚀量和径流运输量。图 3—图 5 展示了该功能区在 2011 年和 2019 年 3 个指 标的空间分布情况,图 6 和图 7 分别为功能区的 EVI 和 LAI 空间分布图,可以看到功能区东部和中部植被覆 盖较好,具有较高的降水截留能力,而西北部地表裸露情况较多。相比 2011 年,2019 年功能区西北部植被指 数和叶面积指数增加,降水截留率有较为明显的提升,说明生态系统保水能力增强,可由植被垂直覆盖度提升 引起。在保土方面,功能区整体存在较多的土壤流失,相比 2011 年,2019 年单位径流冲蚀下降明显,而运输 量也呈小幅下降,说明同等水量冲刷下土壤流失减少,生态系统的保土能力提升,可由植被水平覆盖度提升、 基岩裸露率下降引起。但可看出区域的保土能力动态在空间上存在较大的异质性和不连续性。功能区全区 平均降水截留率由 2011 年的 3.94%增加到 2019 年的 5.58%;单位径流冲蚀量由 2011 年的 15.36×10⁻⁴ Mg/ hm²减少到 2019 年的 9.40×10⁻⁴ Mg/hm²;单位径流运输量由 2011 年的 7.33×10⁻⁵ Mg/hm²下降到 7.27×10⁻⁵ Mg/ hm²。整体看来生态系统降水截留和冲蚀阻力大幅提升,运输阻力有轻微提升,说明生态系统在保水、保土方 面能力都有所增强,与空间分析结论一致。









进一步依照公式(15)计算了功能区在 2011—2019 年间生态系统水土保持功能的综合得分,并采用自然 分段法将总评分划分 6 个区间,进一步计算了各区间的面积比例。图 8 展示了 2011 和 2019 两个年份的总评 分空间分布。可以看到,得分主要集中在 45—55 区间,得分较高的区域主要分布于东部,而中部区域在 2019 年得分大幅增加。其中 2011 年水土保持功能综合得分为 49.75,2019 年综合得分为 50.58。相比 2011 年, 2019 年综合得分低于 51 的区域面积比例减少 17.48%,得分在 51—54 区间的面积比例增加 18.04%。图 9 展 示了 2011—2019 年总评分的统计分布和平均值的时序变化情况。结果显示,该区域水土保持功能得分呈波 动变化,线性趋势不显著。其中 2012 年的区域平均得分最低,为 49.58,2017 年的区域得分最高为 52.92。但 从各等级分布的面积比例来看,从 2011—2019 年,得分处于 45—48 区间的区域比例呈线性下降,而得分处于

4395





Fig.5 Average runoff transportation volume TC₀ of karst functional areas in 2011 and 2019









51—54 区间的区域比例线性增加,说明区域生态系统水土保持功能评分整体向高等级移动,生态功能向好, 而区域均值中并未体现这一现象,可能由极大/极小值区域的评分波动引起。

4396



图 8 喀斯特水土保持区 2011 和 2019 年水土保持功能综合得分

Fig.8 Comprehensive score of soil and water conservation function of karst functional areas in 2011 and 2019





3.3 与 RUSLE 结果对比分析

为了对比 RS-RMMF 模型相较于传统经验模型的评价差异,本文同时基于修正的通用土壤流失方程 RUSLE^[25-26],计算了桂黔滇喀斯特水土保持区的土壤侵蚀量,该模型计算公式为:

$$RUSLE = R \times K \times LS \times C \times P \tag{16}$$

式中, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, LS, C 和 P 分别为坡长-坡度因子, 植被覆盖与管理因子和 水土保持措施因子, 具体计算过程和数据来源与 RS-RMMF 模型一致。降雨侵蚀力因子所用数据是 Terra Climate 0.25°分辨率月降水数据, 土壤可蚀性因子所用数据同样来自中国 1:100 万土壤图以及所附的土壤属 性表。

经 RUSLE 模型计算得到 2011 和 2019 年的土壤侵蚀分布情况,如图 8 所示。2011 年平均侵蚀模数为 215.74 t hm⁻² a⁻¹,2019 年为 209.37 t hm⁻² a⁻¹,侵蚀模数下降 2.95%。根据国家水利部 2008 年发布的 SL190-207《土壤侵蚀分类分级标准》^[27]对研究区土壤侵蚀强度进行分级,2011 年微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧 烈侵蚀面积分别占总面积的 40.51%,2.33%,3.60%,4.19%,9.44%和 39.93%;2019 年的侵蚀分级面积比例分 别为 42.29%,2.12%,3.47%,4.04%,9.14%和 38.94%。2011—2019 年间功能区微度侵蚀面积比例增加,其余

侵蚀面积比例减少,区域土壤流失量整体有所下降,与由 RS-RMMF 评价得出的结论基本一致。

但对比图 8 和图 10 可以看到,两者在空间相对强弱的分布上存在显著差异。其中,RS-RMMF 模型的评价得分空间分布明显由植被属性主导,而在 RUSLE 的计算结果中,位于西北部的区域土壤侵蚀模数较低,但该区域植被生长并不好,而是由裸岩较多、土壤覆盖少所导致的流失量较小。此外,RS-RMMF 模型的评价与降水无关,而对比降水数据可知,RUSLE 的结果在空间分布上很大程度受降水主导,如图 11 所示,东南部区域降雨侵蚀力明显高于西北部区域,土壤侵蚀模数也表现出西北部强于东南部的空间分布规律。同时RUSLE 模型结果具有破碎化的景观特征,由于喀斯特地区地势起伏较为不规则,坡度-坡长因子波动较大,在陡坡等地形变化显著区域坡度-坡长因子误差也相应较大,进一步说明 RUSLE 模型并不适用于陡坡条件^[28]。由此可见虽然两者在 2011 年和 2019 年的对比结论基本一致,但受限于模型的计算机理,RUSLE 的评价结果无论在时间上还是空间上都不是区域生态系统生态功能的绝对表征,难以被用于客观评价人类对生态系统的保护和管理效果,从而并不适于被作为生态效益补偿的计算指标^[29–31]。与此同时,RS-RMMF 模型不仅从降水截留、径流冲蚀、运输等物理过程对生态系统的水土保持功能做了详细分析,从而可为有关部门有针对性地管理区域生态系统、提升其生态功能提供科学支撑,同时还分别评价了生态系统的保水和保土能力,有利于进一步对这些能力的价值进行精准核算。









4 结论与讨论

喀斯特地区受长期溶蚀作用,土壤流失受植被覆盖、土壤性质、径流速率等影响,该区域水土流失具有隐

蔽性和复杂性的特点,适用于大范围、缓坡条件的 USLE 等模型难以做到准确评价。因此针对小流域、陡坡的 喀斯特地貌环境,本研究基于 RMMF 模型,通过引入一系列优选遥感因子,与模型输入物理量之间经验公式 建立了遥感 RMMF 模型。为在评估中客观反映生态系统的水土保持功能,排除降水动态影响,基于 RS-RMMF 模型构建了区域单位降水截留率、区域单位径流冲蚀量以及区域单位径流运输量 3 项指标,并通过综 合打分方法定量化计算区域水土保持功能。由 RS-RMMF 模型计算结果得知,相比 2011 年,2019 年喀斯特功 能区的区域单位降水截留率 PI₀升高了 1.94%,区域单位径流冲蚀量 H₀下降了 5.96×10⁻⁴Mg/hm²,区域单位径 流运输量 TC₀下降了 6.0×10⁻⁷Mg/hm²,水土保持功能综合得分增加 0.83。该区域在此期间降水截留能力得到 提升,降水截流能力不均衡性增加,单位冲蚀量向低等级移动,水土保持功能整体上得到一定程度改善。

与 RUSLE 土壤侵蚀模型比较发现,虽然两者在 2011 年和 2019 年的对比结论基本一致,但在空间相对强弱的分布上存在显著差异。其中 RS-RMMF 模型的评价得分空间分布由植被属性主导,且受降水等因素影响较小。受限于模型机理,RUSLE 的评价结果难以做到区域生态系统生态功能的绝对表征,不能客观评价人类对生态系统的保护和管理效果,但 RS-RMMF 模型更多考虑了侵蚀过程中产沙流沙的物理机制,对土壤侵蚀描述更加清晰,同时通过遥感化改造克服了土壤侵蚀数据难收集的不足,从而可为有关部门客观核算生态系统的水土保持能力提供科学支撑,进一步推进生态补偿机制在各地的实施应用,促进生态资源的高效利用,推动生态环境可持续发展。

本研究目前仅在计算单位径流运输量时考虑了土地利用变化,暂未详细区分自然条件和人为活动对水土 保持生态功能的影响。下一步可以扩展加入社会经济要素,使水土保持评价模型更加具有综合性、动态性和 可调控性,更能有针对性地对区域水土流失治理提出合理的建设建议。

参考文献(References):

- [1] 林祚顶,李智广. 2018年度全国水土流失动态监测成果及其启示. 中国水土保持, 2019, (12): 1-4.
- [2] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2018年).[2020-10-22].http://www.360doc.com/content/19/0820/15/45559526_856053521. shtml.
- [3] Kulikov M, Schickhoff U, Gröngröft A, Borchardt P. Modelling soil erodibility in mountain rangelands of southern Kyrgyzstan. Pedosphere, 2020, 30(4): 443-456.
- [4] Zheng F L, Zhang X C, Wang J X, Flanagan D C. Assessing applicability of the WEPP hillslope model to steep landscapes in the northern Loess Plateau of China. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104492.
- [5] 蒋育昊, 刘鹏举, 夏智武, 许等平, 刘长春. PRISM 模型在复杂地形月降雨空间插值中的可行性研究. 水土保持研究, 2018, 25(1): 57-61, 71-71.
- [6] Sabzevari T, Talebi A. Effect of hillslope topography on soil erosion and sediment yield using USLE model. Acta Geophysica, 2019, 67(6): 1587-1597.
- [7] Bhuyan S J, Kalita P K, Janssen K A, Barnes P L. Soil loss predictions with three erosion simulation models. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(2): 135-144.
- [8] Knisel W G, Douglas-Mankin K R. Creams/gleams: model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1291-1302.
- [9] Zema D A, Nunes J P, Lucas-Borja M E. Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems. CATENA, 2020, 188: 104415.
- [10] Grum B, Woldearegay K, Hessel R, Baartman J E M, Abdulkadir M, Yazew E, Kessler A, Ritsema C J, Geissen V. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM). CATENA, 2017, 159: 20-34.
- [11] 杨超,王金亮,李石华,王丽霞,马骊驰,潘继亚,高帆,刘广杰.抚仙湖流域土地退化动态遥感监测研究.遥感技术与应用,2016,31
 (2):388-396.
- [12] 高素华,郭建平,刘玲,刘安麟,邓凤东.中国北方地区植被覆盖度的遥感解译及水土保持作用系数推算研究.水土保持学报,2001,15 (3):65-67,88-88.
- [13] Van Pelt R S, Zobeck T M, Potter K N, Stout J E, Popham T W. Validation of the wind erosion stochastic simulator (WESS) and the revised wind

erosion equation (RWEQ) for single events. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 191-198.

- [14] Hosseini M, Nunes J P, Pelayo O G, Keizer J J, Ritsema C, Geissen V. Developing generalized parameters for post-fire erosion risk assessment using the revised Morgan-Morgan-Finney model: a test for north-central Portuguese pine stands. CATENA, 2018, 165: 358-368.
- [15] Vieira D C S, Prats S A, Nunes J P, Shakesby R A, Coelho C O A, Keizer J J. Modelling runoff and erosion, and their mitigation, in burned Portuguese forest using the revised Morgan-Morgan-Finney model. Forest Ecology and Management, 2014, 314: 150-165.
- [16] 李成志,连晋姣,陈洪松,冯腾,付智勇.喀斯特地区县域土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应.中国水土保持科学,2017,15(5): 39-47.
- [17] López-Vicente M, Quijano L, Palazón L, Gaspar L, Navas A. Assessment of soil redistribution at catchment scale by coupling a soil erosion model and a sediment connectivity index (central spanish pre-pyrenees). Cuadernos De Investigación Geográfica, 2015, 41(1): 127-147.
- [18] 张莉, 苗连朋, 温仲明. 基于 MMF 模型估算植被与降雨变化对水沙的影响——以延河流域为例. 自然资源学报, 2015, 30(3): 446-458.
- [19] Huang Q H, Cai Y L. Mapping karst rock in southwest China. Mountain Research and Development, 2009, 29(1): 14-20.
- [20] 张晓伦, 甘淑. 基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究. 新技术新工艺, 2014, (1): 72-75.
- [21] 蔡崇法,丁树文,史志华,黄丽,张光远.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究.水土保持学报,2000, 14(2):19-24.
- [22] 白雷超. 基于 RUSLE 的黄土高原河龙区间西岸土壤侵蚀研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2017.
- [23] 黄杰,姚志宏,查少翔,肖培青,王勃. USLE/RUSLE 中水土保持措施因子研究进展.中国水土保持, 2020, (3): 37-39, 56-56.
- [24] 国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知[2020-10-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
- [25] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 谢云, 高歌. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113.
- [26] 郭乾坤, 刘宝元, 朱少波, 王国燕, 刘瑛娜, 王爱娟. 中国主要水土保持耕作措施因子. 中国水土保持, 2013, (10): 22-25, 26-26.
- [27] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [28] Kruk E, Klapa P, Ryczek M, Ostrowski K. Influence of DEM elaboration methods on the USLE model topographical factor parameter on steep slopes. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3540.
- [29] Mondal A, Khare D, Kundu S. A comparative study of soil erosion modelling by MMF, USLE and RUSLE. Geocarto International, 2018, 33(1): 89-103.
- [30] Ghosh S, Guchhait S K. Soil loss estimation through USLE and MMF methods in the lateritic tracts of eastern plateau fringe of rajmahal traps, India. Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management, 2012, 5(4): 529-541.
- [31] Jha M K, Paudel R C. Erosion predictions by empirical models in a mountainous watershed in Nepal. Journal of Spatial Hydrology, 2010, 10(1): 89-102.