

基于水库沉积物特征及 WaTEM/SEDEM 模型的 贵州喀斯特小流域土壤侵蚀时空变化

邱安安, 罗耀, 王红亚

(北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:全面认识长时间尺度的贵州喀斯特地区土壤侵蚀时空变化对土壤侵蚀治理具有重要意义。以贵州松官流域为研究对象,使用土壤侵蚀分布式模型 WaTEM/SEDEM 分 6 个阶段模拟了过去 1986—2015 年的土壤侵蚀变化,并将其与松官水库沉积物揭示的侵蚀强度进行了对比。结果表明:利用 WaTEM/SEDEM 模型模拟得到的产沙量与实测值相近,显示模型在喀斯特地区具有较好的适用性;过去 30 年间松官流域土壤平均侵蚀模数为 $21.33 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀强度经历了先加剧后减缓的过程,最强烈的侵蚀出现在 1996—2000 年;流域南部的耕地地区是松官流域土壤侵蚀的主要来源,占土壤侵蚀总量的 85.09%,而流域北部的林地草地侵蚀较弱;模型结果与沉积物记录具有较好的一致性,皆反映出土地利用相较降雨对土壤侵蚀影响更大,未来对喀斯特地区的水土保持更应关注土地利用的变化。

关键词:地理学;侵蚀模数;WaTEM/SEDEM 模型;沉积物;贵州喀斯特

中图分类号:S157; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0014-08

Spatial and Temporal Changes of Soil Erosion in Small Watershed in Guizhou Karst Based on Characteristics of Reservoir Sediments and WaTEM/SEDEM Model

QIU Anan, LUO Yao, WANG Hongya

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Understanding the temporal and spatial changes of soil erosion in the karst area of Guizhou Plateau is a key requirement for managing against soil erosion. A spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WaTEM/SEDEM) was applied to investigate temporal-spatial changes in soil erosion under six scenarios during the past 30 years in Songguan Watershed. The results showed that the sediment yield simulated by using the WaTEM/SEDEM model and observed values fitted well, showing that the model had a good predictability and practicability in karst regions. The average soil erosion in Songguan watershed was $21.33 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and the intensity of soil erosion decreased firstly and then increased during the past 30 years. The major sediment source was dryland, accounting for 85.09% of the total sediment yields while the erosion in northern forestland and grassland was relatively slight. The simulated sediment yields were in good agreement with the sediment records. They both demonstrated that land use had a greater impact on soil erosion rather than rainfall. The study suggests that attention should be given to the changes of land use spatial pattern when applying soil conservation policies in karst regions.

Keywords: geography; erosion modulus; WaTEM/SEDEM Model; sediments; Guizhou Karst

土壤侵蚀是喀斯特地区最严重的环境问题之一^[1],
并威胁到当地农业粮食生产与生态环境。贵州喀斯特

(岩溶)区位于西南喀斯特地貌最集中成片分布的中心
片区,是世界上发育最完全的喀斯特连续地带^[2]。由于

喀斯特地区的成土过程缓慢^[3],坡上表土易被亚热带季节性降雨迅速侵蚀,导致基岩大面积裸露,土壤生产力下降。此外,由于过去不合理农业管理措施的应用,导致贵州喀斯特地区侵蚀过程进一步加剧^[4]。因此,深入了解过去长时间尺度的土壤侵蚀时空动态变化特征,对认识土壤侵蚀影响因素及形成机制有重要意义,同时能为喀斯特地区生态环境治理提供理论支持。

近年来,众多学者通过坡地径流小区观测和土壤侵蚀核素示踪研究等方法对贵州喀斯特地区土壤侵蚀进行了研究。然而,尽管实地观察与试验分析能定量评估土壤侵蚀变化,但是这些方法价格昂贵,难以在大范围长时间尺度下探讨土壤侵蚀时空变化。此外,试验方法无法量化土壤侵蚀与其影响因素之间的关系^[5]。因此,为了解决上述问题,基于 USLE/RUSLE 方法的各种土壤侵蚀模型已经广泛应用于预测水土流失与评价其影响因子。WaTEM/SEDEM 是在 USLE/RUSLE 上发展建立起来的空间分布式土壤侵蚀模型^[6]。该模型使用土壤侵蚀模块和泥沙运移模块^[7]预测沉积物向河流的输送情况。近年来,在国内外已有广泛应用。

松官流域位于贵州省盘县境内,是典型的喀斯特地区,水土流失严重。本文通过 WaTEM/SEDEM 模拟流域内土壤侵蚀状况,拟解决(1)探讨 WaTEM/SEDEM 模型在喀斯特地区的适用性;(2)揭示松官流域过去 30 a 来土壤侵蚀的时空分布特征;(3)通过模型结果与沉积物对比,并结合降雨,土地利用数据,探讨土壤侵蚀的主要来源及其影响因素。

1 研究区概况

松官水库(25°50′49.62″N,104°40′50.67″E)位于贵州省六盘水市盘县中部,库体呈现南北延伸的狭长小洼地,水库始建于 1958 年,水体面积为 0.17 km²,总库容 1.34×10⁶ m³。水库水源依靠大气降水补给,总灌溉面积达 2.67 km²。

松官水库所在流域的面积为 8.34 km²,海拔为 1 701~1 908 m。流域内气候属亚热带季风湿润气候,全年气候温和,雨热同期,年平均温为 15.2℃,降雨量充沛,年均降雨量在 1 300 mm 左右。流域内的主要土地类型为林地和耕地。其中林地主要为针叶常绿、阔叶落叶混交林,占流域面积 32%,耕地面积占 42%。流域内光照充足,作物有效生长期较长,主要作物类型为玉米与小麦。流域内土壤类型有黄壤(47%),石灰土(28%)与水稻土(25%),其中水稻土

是耕作土壤的主要类型,耕作历史长,集约化水平和土壤熟化程度较高。

2 数据来源与方法

2.1 WaTEM/SEDEM 模型简介

WaTEM/SEDEM 模型通过模拟土壤在流域内的运输和沉积,预测河道中的泥沙运移量,它可以应用于从区域到盆地等不同空间尺度的研究^[8],关于模型的详细介绍记录在^[9-10]中。本文仅对土壤侵蚀模、栅格单元泥沙输沙两个主要过程做简要描述。

其中土壤侵蚀模块与 RUSLE 模型相同:

$$A = RKLS_{2D}CP \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数[kg/(km²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(km²·h·a)]; K 为土壤可蚀性因子[(kg·km²·h)/(MJ·mm·km²)]; C 为土地管理因子; P 为水土保持措施因子; LS_{2D} 不同于原始的 RUSLE 方程,用上游汇水面积代替坡长:

WaTEM/SEDEM 模型泥沙输移模块计算公式为:

$$T_c = K_s RK (LS - 4.1s^{0.8}) \quad (2)$$

式中: T_c 为年均输沙能力(kg); s 为坡度(m/m); K_s 是输沙能力系数(m); R 和 K 分别为降雨侵蚀力和土壤可蚀性因子。

2.2 模型输入数据

运行 WaTEM/SEDEM 所需的主要输入数据包括 DEM,土地利用,部分 RUSLE 因子(C 因子, P 因子, K 因子)在内的空间数据(均为 IDRISI GIS 栅格图层)以及高、低输送能力系数的模型参数^[11]。为揭示长时间尺度的水土流失变化,本文将 1985—2014 年平均分为 6 个阶段进行模拟,即 P1(1985—1989 年),P2(1990—1994 年),P3(1995—1999 年),P4(2000—2004 年),P5(2005—2009 年)和 P6(2010—2014 年),同时假定每个阶段的土地利用变化较小,可用阶段中某一年的土地利用数据代表。因此,本文选择 6 个具有代表性年份(1987,1992,1997,2002,2007,2013 年)的 Landsat 影像,使用监督分类方法,解译获得不同年份的土地利用数据。流域 DEM 数据来自本经济产业省和美国航天局共同发布的 ASTER GDEM(30 m×30 m),用于反映流域地形和河网空间分布特征与计算坡度和长度(LS)因子。根据 Arnoldus^[12]提出的 R 因子(降雨侵蚀力因子)与气象资料之间的关系,利用研究区内及周边 6 个气象台站的月降雨量序列,计算了各站点流域内 30 a 间每年的 R 因子,依据 6 个阶段分别计算各时期 R 因子的平均值,作为该阶段 R 因子数值,同时基

于 Kriging 插值方法为生成 R 因子图层。流域内土壤分布及数据来自中国科学院土壤研究所 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>), 使用 EPIC 模型方法^[13] 计算 K 因子^[14-16] (土壤可蚀性因子)。由于 WaTEM/SEDEM 模拟的可执行程序并未提供 R 因子图层输入窗口, 故本文将 R 因子图层与 K 因子图层相乘后在 K 因子窗口处输入。 C 因子 (土地管理因子) 常用来定义对各种土地利用的敏感性。 C 因子图层通常采用给不同土地利用类型赋值的方式来获取^[17-18]。对于松官流域, 本文依据实地调研与相关研究, 对不同土地利用类型进行赋值: 水体 0, 耕地 0.37, 草地 0.08, 林地 0.003^[19-25]。

2.3 WaTEM/SEDEM 模型校正与验证

WaTEM/SEDEM 模型中的输沙能力系数是决定泥沙沉积的主要因子。正确地依据研究区的特点对输沙能力的系数进行校正对 WaTEM/SEDEM 模型的应用有着重要意义, 也是评价模型结果合理性与可靠性的关键。本文使用了乌都河上草坪头水文站 1996—2001 年共 6 a 的年产沙量数据, 使用 1996 年、1997 年、1998 年数据作为模型校正, 1999 年、2000 年、2001 年数据验证模型。

本文选用 NS 效率系数与 RRMSE 作为评价模型的指标。其中 NS 效率系数是评价模型有效性的主要参数之一, 其计算公式为:

$$NS=1-\frac{\sum_{i=1}^n(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-O_{mean})^2}$$
 (3)

式中: n 为观测次数; O_i 为观测值; P_i 为预测值; O_{mean} 为观测值的平均值。NS 的数值在 $-\infty \sim 1$; NS 数值越接近于 1, 模型模拟效果越好。

RRMSE 参数是评价模型预测准确性的参数, 其计算公式为:

$$RRMSE=\sqrt{\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(O_i-P_i)^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nO_i^2}}$$
 (4)

RRMSE 的数值在 0~1, RRMSE 数值越接近于 0, 模型预测精度越高。

2.4 沉积物采集, ²¹⁰Pb 测年与地球物理指标分析

2016 年 7 月, 使用中科院地化所自行研制与制造的 SWB-1 型柱状采样器对松官水库湖心处沉积物进行采样分样工作, 共获得沉积物样品 54 个。对沉积物样品进行 ²¹⁰Pb 含量测试、矿物磁性测试、元素含量测试 (含烧失量 LOI, Ti 含量)、粒度测试。

3 结果与分析

3.1 WaTEM/SEDEM 模型验证与校正

Ktc_{max} 和 Ktc_{min} 是模型运行的重要参数, 分别反映了在耕地与非耕地土地利用类型下的土壤输沙能力。本文使用试错法, 在预期范围内手动改变这两个参数的数值, 模拟 1996 年、1997 年、1998 年草坪头流域土壤侵蚀, 获取流域输沙预测值, 与实际观察测值对比并计算 NS 与 RRMSE 指标, NS 和 RRMSE 指标在 13 m 与 5 m 的组合下, 存在显著的峰值 (0.84) 与谷值 (0.41), 表明在该参数组合下的模型预测结果较其他组合更优。这一组合的数值要低于其他研究区, 例如, 西班牙中部比利牛斯山脉流域 (23 m 和 7 m)^[26], 意大利北部半自然流域 (20 m 和 50 m)^[7], 以及位于比利时南弗兰德省的 21 个集水区 (75 m 和 250 m)^[18]。这一现象可能是由喀斯特特殊的地形与土壤侵蚀机制决定, 反映出对于同样的土地利用类型而言, 喀斯特地区的土壤相较非喀斯特地区更易流失。

表 1 模型验证效果对比

项 目	1996 年	1997 年	1998 年	NS	RRMSE	1999 年	2000 年	2001 年	NS	RRMSE
观测值/10 ⁶ t	2.45	2.36	2.95	0.66	0.13	2.38	3	2.29	0.72	0.11
模拟值/10 ⁶ t	2.28	2.61	2.69			2.46	2.76	2.42		

使用 13 m 与 5 m 组合模拟 1999 年、2000 年、2001 年草坪头流域土壤侵蚀, 与观测值对比以验证模型的准确性, 结果如表 1 所示。不同年份之间, 预测值与观测值接近, NS 系数为 0.72, RRMSE 系数为 0.11, 表明该模型在贵州西南区域的土壤侵蚀模拟具有较好的适用性。

3.2 松官流域 1986—2015 年土壤侵蚀时空分布

在 Ktc_{max} 和 Ktc_{min} 的数值为 13 m 与 5 m 的组合

下, 使用 WaTEM/SEDEM 模型对松官流域 6 个阶段的土壤侵蚀进行模拟, 依据水利部颁发的土壤水力侵蚀强度分级标准 (SL190—2007), 得到该流域土壤侵蚀强度分布图 (图 1), 并计算各阶段平均侵蚀模数及不同侵蚀强度所占百分比 (表 2)。

尽管不同阶段土壤侵蚀强度变化不同, 但侵蚀强度的空间分布格局具有较好的一致性。在流域的北侧以林地与草地为主的区域, 土壤侵蚀较弱, 多为轻度以下

侵蚀。而在流域南侧以耕地为主的区域,侵蚀作用较强,显示出不同土地利用类型间土壤侵蚀差异明显。耕

地产生的土壤侵蚀要远高于林地与草地,同时也说明松官流域的土壤侵蚀来源主要由耕地土壤提供。

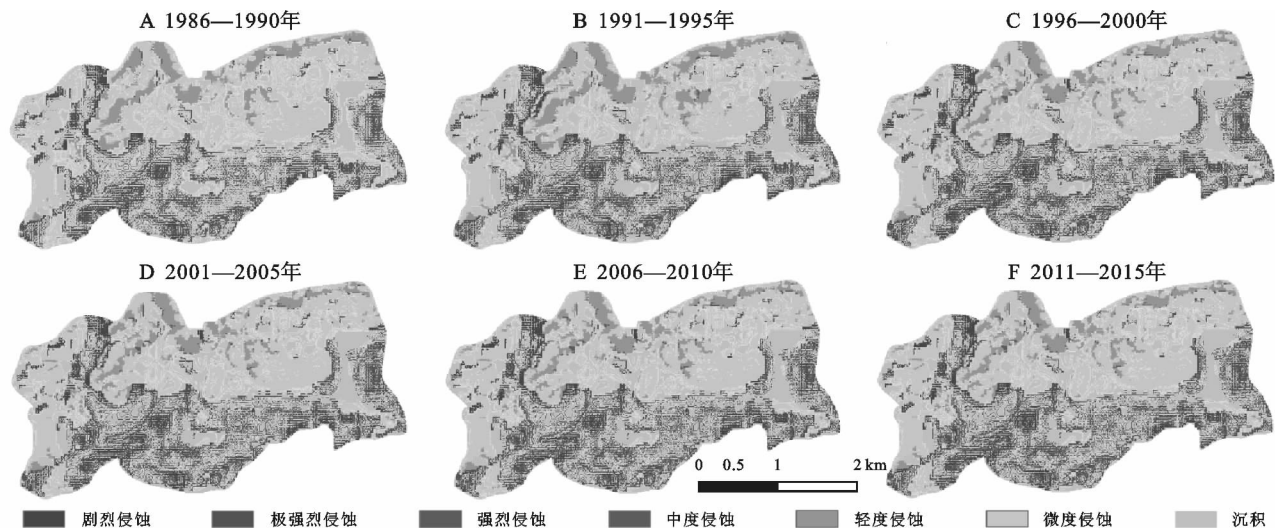


图1 松官流域不同时间段的土壤侵蚀分布

就土壤侵蚀强度而言,在1986—2015年,流域内的土壤侵蚀变化过程整体上呈现先加剧后减弱,再加剧而后再减弱的趋势。1986—1990年,土壤侵蚀较弱,土壤侵蚀模数为 18.70 t/hm^2 ,微度与轻度侵蚀分别占流域面积的35.13%与12.75%。1991—1995年土壤侵蚀增强,流域内平均土壤侵蚀模数为 23.78 t/hm^2 ,微度与轻度侵蚀分别减少至33.15%和9.68%,中度以上侵蚀面积增加,其中剧烈侵蚀面积占流域的6.80%。1996—2000年,侵蚀进一步增强,达到近30a来最大值,土壤侵蚀模数为 26.28 t/hm^2 ,中度以上侵蚀面积减少,剧烈侵蚀增加至8.41%。2001—2005年土壤侵蚀开始减弱,侵蚀模数降低至 21.37 t/hm^2 ,微度侵蚀面积开始回升至36.48%,剧烈侵蚀面积减少至5.49%。然而,2006—2010年侵蚀再次加剧,流域内平均侵蚀模数为 23.97 t/hm^2 ,微度侵蚀区面积减少,轻度侵蚀面积增加,剧烈侵蚀区域再次增加至7.85%。2011—2015年,土壤侵蚀开始显著降低,侵蚀模数降至 13.88 t/hm^2 ,为近30a以来最低值,微度侵蚀覆盖流域41.37%的地区,中度以上侵蚀显著减少,剧烈侵蚀占流域面积的2.58%。

3.3 模拟结果与沉积物记录对比

松官水库沉积物分析结果如图2所示。 χ_{lf} 主要反映样品中亚铁磁性矿物的含量,而SIRM反映样品中磁性矿物的总量(亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物)^[27]。一般而言,在以碳酸盐类岩石为母质发育的土壤中,磁性矿物主要是在成土过程中形成的亚铁磁性矿物,且在表层或浅部相对富集^[28],当土壤侵蚀较为强烈时,更多的磁性矿物会被搬运至水库中,使得

χ_{lf} 与SIRM数值上升,反之下降。ARM用来指示样品中较细的、稳定单畴亚铁磁性颗粒($0.02 \sim 0.40 \mu\text{m}$)的含量, $\text{ARM}/\chi_{\text{lf}}$ 则反映这类磁性颗粒在亚铁磁性矿物集合体中的相对比例^[28]。当侵蚀强烈时,粗颗粒的亚铁磁性颗粒被带入到水库中, $\text{ARM}/\chi_{\text{lf}}$ 指标较低。Ti作为土壤中的稀有金属,多富集于土壤表层,具有良好的抗腐蚀性能,其含量常用来指示侵蚀的强烈程度。当样品中Ti含量较高时,表明土壤中更多的Ti被带入到集水区,指示侵蚀作用较强。LOI为样品的烧失量,一般用来表示样品中有机质的含量。LOI含量较高时表明样品中有机质的含量较高,暗示流域内的植被发育较好,能对土壤侵蚀起到有效的抑制作用。故当样品中LOI含量较高时,流域内土壤侵蚀相对缓和。粒度是对沉积物中颗粒粒径大小的度量,当侵蚀加剧时,地表径流发育,流域内较粗的颗粒物质多由径流携带至湖底沉积,使得样品中粗颗粒含量增加,平均粒径增大。依据沉积物中矿物磁性与粒度的变化特征,可将松官水库1967年以来的侵蚀变化划分为3个主要阶段:

3.3.1 侵蚀较弱期 SG-1-1(1985—1995) χ_{lf} 与SIRM指标较低,显示沉积物中磁性矿物的总量及其亚铁磁性矿物的含量均较低,表明这一时期被带入流域内水库中的亚铁磁性矿物及磁性矿物总量偏低,侵蚀主要集中于表层。 $\text{ARM}/\chi_{\text{lf}}$ 数值较低,显示样品中粗颗粒磁性矿物颗粒较多,表明尽管侵蚀集中于表层,但侵蚀仍有一定强度。Ti含量较高,表层土壤受到侵蚀作用扰动较强,暗示部分地区仍有较强侵蚀发生。这一阶段样品中LOI含量较低,说明流域土壤

中被带入水库内的有机质较少,表明此时流域内植被发育较差,不能对土壤侵蚀进行有效遏制。样品的平均粒径较细,样品中粉砂、砂的含量较多,而黏土的含

量处于较低水平,指示流域内径流发育较弱,水动力作用并不强烈。整体而言,这一阶段土壤侵蚀较弱,但在局部地区仍有相当强的侵蚀发生。

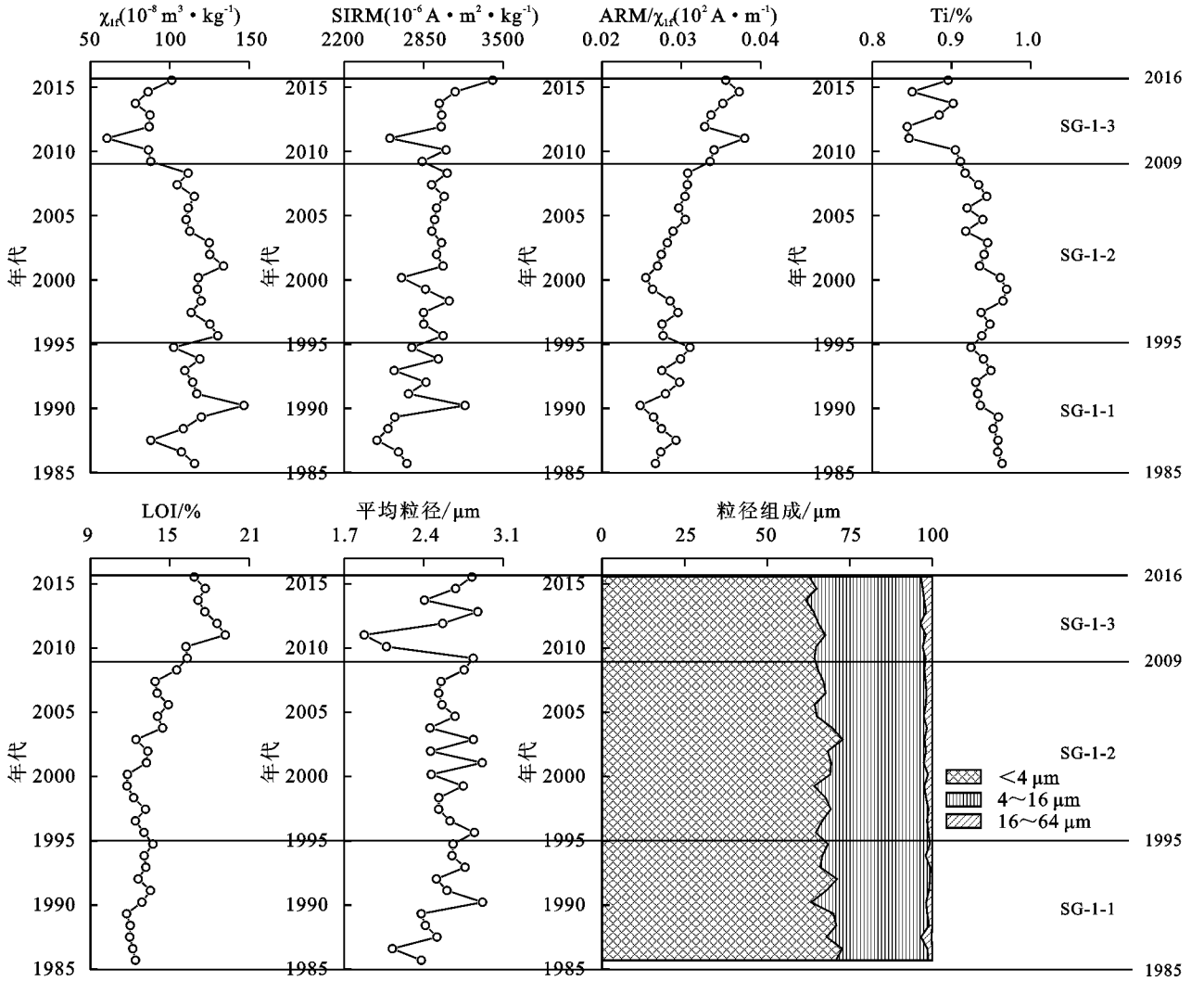


图 2 松官水库沉积物 SG-1 物化指标分析

表 2 松官流域土地沉积与侵蚀百分比

侵蚀强度	1986—1990 年	1991—1995 年	1996—2000 年	2001—2005 年	2006—2010 年	2011—2015 年
沉积	33.48	36.07	35.44	36.29	35.60	40.15
微度侵蚀	35.13	33.15	34.79	36.48	32.91	41.37
轻度侵蚀	12.75	9.68	7.69	6.66	8.95	4.66
中度侵蚀	5.80	5.56	5.49	5.80	5.69	4.11
强烈侵蚀	4.35	4.22	3.88	4.55	4.36	3.32
极强烈侵蚀	4.98	4.51	4.31	4.73	4.64	3.81
剧烈侵蚀	3.50	6.80	8.41	5.49	7.85	2.58

3.3.2 侵蚀强烈期 SG-1-2(1996—2009) 这一阶段 χ_{ir} 与 SIRM 指标相对上一时期有了明显升高,显示样品中亚铁磁性矿物含量与磁性矿物的总量在样品中显著增加,表明流域内土壤受侵蚀扰动加剧,强烈的侵蚀作用将更多磁性矿物带入水库中。ARM/ χ_{ir} 数值相较上一阶段有所增加,但幅度不大,显示样

品中粗颗粒磁性矿物进一步增多,表明流域内侵蚀作用强烈。Ti 含量有所降低,这有可能是强烈的土壤侵蚀开始对较深的土壤进行扰动所致。同时,样品中 LOI 含量较上一阶段持平,说明流域内植被发育仍然较差,土壤侵蚀容易发生。平均粒度数值较高,黏土颗粒的含量逐渐降低,粉砂与砂的含量开始增多,显

示出样品中粗颗粒含量较多,而细颗粒含量比例减少,表明这一时期流域内的水动力作用显著增大,土壤侵蚀强度变得剧烈。因此,这一时期土壤侵蚀相较上一期时期强度增大。

3.3.3 侵蚀缓和期 SG-1-3(2004—2015) χ_{Hf} 指标显著下降,显示样品中亚铁磁性矿物含量较低,而 SIRM 的数值较高,表明样品中总体磁性矿物浓度较高,表明样品中反铁磁性矿物的含量有所增加。这有可能是因为原始土壤被带入水库中,累积在沉积物表层,未经过有效还原作用^[29]。然而,这一阶段样品中亚铁磁性矿物含量整体上仍处于较低水平,显示侵蚀对流域内土壤的扰动并不强烈。ARM/ χ_{Hf} 数值进一步升高,表明水库中亚铁磁性矿物含量主要由细颗粒磁性矿物提供,表明该时期侵蚀强度较弱。Ti 含量显著降低,表明土壤表层中 Ti 含量难以通过侵蚀作用被带入水库中,表明流域内侵蚀开始缓和。LOI 数值上升,说明流域内植被开始广泛发育,对土壤的保护作用显著增加。平均粒径开始减小,样品中

黏土与粉砂的相对含量增多,说明流域内水动力较弱,地表径流发育受限,流水搬运作能力较低。综上,这一阶段松官流域水土流失得到有效遏制,土壤侵蚀强度较低。

4 讨论

4.1 模拟结果与沉积物记录对比

松官流域沉积物指标的分析与模型结果的对比如图 3 所示。沉积物记录反映出的土壤侵蚀强度变化与模拟结果在整体上较为接近。实际上,由于 WaTEM/SEDEM 模型的土壤侵蚀模块在形式上与 RUSLE 模型一致^[11],WaTEM/SEDEM 模型的结果主要反映了面蚀对流域土壤侵蚀的影响,而无法有效揭示沟蚀或细沟侵蚀的作用^[30]。流域内地形较为平坦,坡度为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 的地区占流域总面积的 70.68%,主要分布于流域以南的耕地区域,不利于沟蚀作用的发生。这也是模型结果在整体上与沉积物记录一致的主要原因。

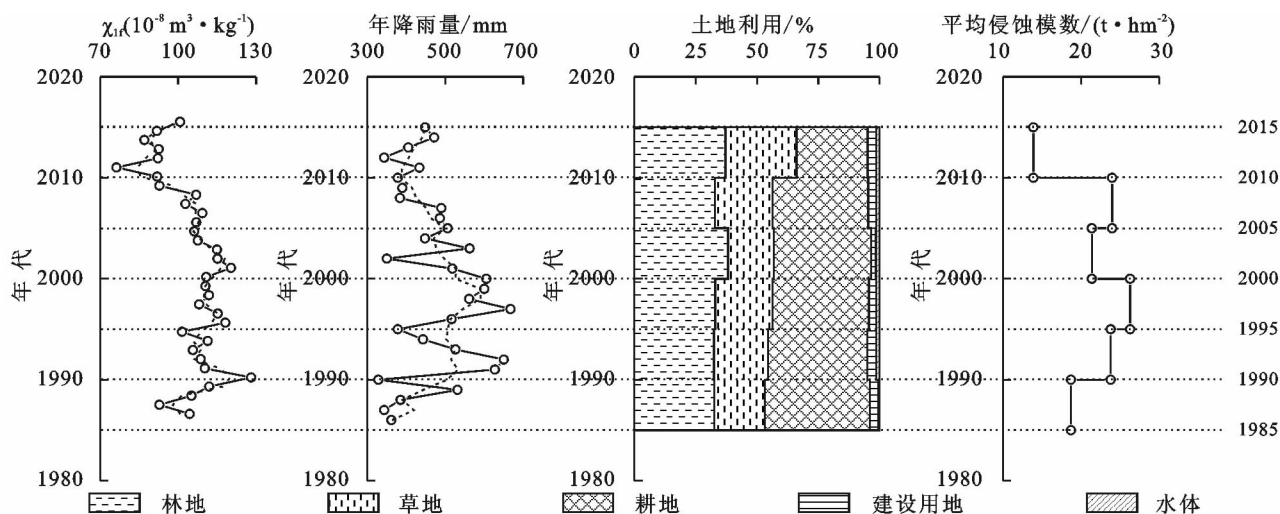


图3 松官流域沉积物记录与降雨、土地利用及模拟产沙量对比

然而,模型结果与沉积物记录在阶段性的土壤侵蚀重建上仍存在差异。在 2000—2010 年期间,沉积物显示土壤侵蚀强度呈现逐渐下降的趋势,而模型结果表明在 2005—2010 时期土壤侵蚀再次加剧。这一时期降雨与土地利用数据对比可知,2005—2010 年降雨量相对于上一期也有下降的趋势,而这一时期林地面积低于上一阶段,同时耕地面积有所增加。水库中沉积物的变化受到流域内环境变化的影响显著,由于松官流域内土壤多发育于碳酸盐为主体的母质上^[31],表层土壤中磁性矿物颗粒受流水作用明显,换句话说沉积物记录能较好揭示流域内水动力作用的变化,因此降雨的变化过程与沉积物记录较为相似。

相反,将降雨与土地利用同时作为输入因子的 WaTEM/SEDEM 模型反映了两个因子对土壤侵蚀的综合作用^[32],因而表现出这一阶段土壤侵蚀加剧。此外,由于沉积物记录对土壤侵蚀的解译具有高分辨率的特征,其能在更小的尺度上反映出流域内土壤侵蚀的变化,主要表现在 1990 年附近土壤侵蚀的土壤增强与 2012 年后土壤侵蚀再次加剧。受限于模型精度,这些变化无法在模型结果中得到印证。

4.2 松官流域土壤侵蚀影响因素

降雨与土地利用变化是影响土壤侵蚀变化的两个重要因素,为进一步探讨它们对松官水库土壤侵蚀的影响,本文将松官流域内年降雨量及由遥感影像解

译获取的土地利用变化与模型结果进行对比,见图3。由图可知,1985—2000年期间,松官水库耕地面积逐渐减少。这主要得益于,1990年后盘县政府开始加强水土保持工作与治理工程,实施封山育林,退耕还林还草政策^[33]。然而,在1985—2000年期间,流域内的平均侵蚀模数并未随着耕地的减少而降低,相反有增加的趋势。这可能是由于这一段时期降雨逐渐增加导致。实际上,在1985—2000年期间,耕地面积的减少幅度相对较小,而林地面积增加并不显著,使得降雨在这一时期对侵蚀强度的影响起到较大的影响。而在2000—2005年期间,尽管耕地面积变化相较1995—2000年时期变化不明显,但流域内林地面积显著增加,同时流域内降雨强度有一定减弱趋势,这些共同使得这一时期流域侵蚀强度趋于缓和。在2005—2010年时期,尽管降雨总量相对上一阶段有所降低,但因为耕地面积增加与林地面积减少,使得这一时期,土壤侵蚀再次增大。在2010年后,流域内降雨具有小幅降低,但流域内土壤侵蚀显著减少的主要原因为耕地面积的显著减少,同时林地与草地面积增加。

总体而言,尽管松官流域土壤侵蚀处于中等水平,但仍受降雨与土地利用变化影响显著。另一方面,过去30a间耕地土壤侵蚀的平均模数为45.84 t/hm²,远大于草地侵蚀的9.92 t/hm²和林地侵蚀的6.35 t/hm²,表明耕地是流域内土壤侵蚀的主要来源,同时也显示土壤侵蚀对土地利用变化,尤其是耕地面积的变化更为敏感。

5 结论

松官流域作为喀斯特发育的典型区域,其过去30a来的土壤侵蚀时空变化对认识喀斯特地区土壤侵蚀变化机制与水土保持治理具有借鉴意义。使用草坪头水文站泥沙数据对WaTEM/SEDEM模型进行了校正与验证,结果显示WaTEM/SEDEM模型在喀斯特地区具有较好的适用性,可以用于开展喀斯特地区土壤侵蚀相关研究。模拟得到松官流域土壤侵蚀模数变化范围13.88~26.29 t/hm²,整体上呈现先加剧后缓和的变化过程,最强烈的侵蚀出现在1995—2000年,侵蚀最弱的时期为2010—2015年。尽管受模型精度的影响,这一变化结果与沉积物记录在趋势上呈现较好的一致性,显示出模拟结果的可靠性。空间分布上,松官流域内相对强烈的侵蚀主要出现在流域南部坡度较缓的耕地地区,而流域北部的林草地侵蚀较弱,这空间分布趋势受时间变化影响不

大。此外,统计结果也显示耕地地区的土壤侵蚀模数要远大于林地与草地,显示出松官流域土壤侵蚀主要来源于耕地。松官流域土壤侵蚀受降雨与土地利用变化作用显著,但侵蚀总量对土地利用变化更为敏感,因此在未来土壤侵蚀治理过程中,除加强流域对降雨流水作用的抵抗能力外,还应关注土地利用变化对土壤侵蚀的影响。

参考文献:

- [1] 李阳兵,侯建筠,谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学,2002,22(3):365-370.
- [2] Sweeting M M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China[J]. Z Geomorph, 1993,37:127-136.
- [3] Wang H, Huo Y, Zeng L, et al. A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China[J]. Journal of Paleolimnology, 2008,40(3):897-921.
- [4] Xu Y Q, Shao X M, Kong X B, et al. Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2008,141(1/3):275-286.
- [5] López-Vicente M, Navas A. Relating soil erosion and sediment yield to geomorphic features and erosion processes at the catchment scale in the Spanish Pre-Pyrenees[J]. Environmental Earth Sciences, 2010,61(1):143-158.
- [6] 盛美玲,方海燕. WaTEM/SEDEM模型及其应用研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2014,33(1):85-91.
- [7] Rompaey A V, Bazzoffi P, Jones R J, A et al. Modeling sediment yields in Italian catchments[J]. Geomorphology, 2005,65(1):157-169.
- [8] Verstraeten G, Prosser I P. Modelling the impact of land-use change and farm dam construction on hillslope sediment delivery to rivers at the regional scale[J]. Geomorphology, 2008,98(3/4):199-212.
- [9] Oost K V, Govers G, Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage[J]. Landscape Ecology, 2000,15(6):577-589.
- [10] Rompaey A J J V, Verstraeten G, Oost K V, et al. Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2001,26(11):1221-1236.
- [11] 盛美玲,方海燕. WaTEM/SEDEM模型及其应用研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2014,33(1):85-91.
- [12] Arnoldus H M J. Predicting soil losses due to sheet

- and rill erosion[J]. *Fao Conservation Guide*, 1997,1: 99-124.
- [13] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator; 2. User manual[J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1989,4(4):206-207.
- [14] Alatorre L C, Beguería S, García-Ruiz J M. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,391(1):109-123.
- [15] Chen H, Oguchi T, Wu P. Assessment for soil loss by using a scheme of alternative sub-models based on the RUSLE in a Karst Basin of Southwest China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017,16(2):377-388.
- [16] Didoné J, minella J P G, Evrard O. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017,174:24-33.
- [17] Feng T, Chen H, Polyakov V O, et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China; Comparison of the RUSLE model with ^{137}Cs measurements[J]. *Geomorphology*, 2016,253:217-224.
- [18] Verstraeten G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data [J]. *Geomorphology*, 2006,81(1/2):128-140.
- [19] 方海燕,孙莉英,聂斌斌,等. 基于 WaTEM/SEDEM 模型的双枫潭流域侵蚀产沙模拟[J]. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2014,42(1):92-97.
- [20] 许月卿,彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. *资源科学*, 2008,30(8):1218-1225.
- [21] Rompaey A J J V, Verstraeten G, Oost K V, et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2001,26(11):1221-1236.
- [22] Verstraeten G. RUSLE applied in a GIS framework; Calculating the LS factor and deriving homogeneous patches for estimating soil loss[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005,19(7): 809-829.
- [23] Krasa J, Dostal T, Van Rompaey A, et al. Reservoirs' siltation measurements and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study[J]. *Catena*, 2005,64(2):348-362.
- [24] Zeng C, Zeng C, Zeng C, et al. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS[J]. *Solid Earth*, 2017,8(4):1-26.
- [25] 王尧,蔡运龙,潘懋. 贵州省乌江流域土壤侵蚀模拟: 基于 GIS, RUSLE 和 ANN 技术的研究[J]. *中国地质*, 2014(5):1735-1747.
- [26] Alatorre L C, Beguería S, García-Ruiz J M. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,391(1):109-123.
- [27] Wang H, Huo Y, Zeng L, et al. A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2008,40(3):897-921.
- [28] 李春梅,汪美华,王红亚. 贵州麦岗水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. *地理研究*, 2010,29(11):1971-1980.
- [29] 胡鹏翔,刘青松. 磁性矿物在成土过程中的生成转化机制及其气候意义[J]. *第四纪研究*, 2014,34(3):458-473.
- [30] Dan R. A comparison of mineral-magnetic and distributed RUSLE modeling in the assessment of soil loss on a southeastern U. S. cropland[J]. *Catena*, 2007,69(2):170-180.
- [31] 王红亚,霍豫英,吴秀芹,等. 贵州石板桥水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. *地理研究*, 2006, 25(5):865-876.
- [32] Vente J D, Poesen J, Verstraeten G, et al. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain [J]. *Global & Planetary Change*, 2008,60(3/4):393-415.
- [33] 沈虹. 关岭布依族苗族自治县志[M]. 贵州人民出版社, 2002.