

李成芳, 王忠诚, 李振炜, 等. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 962-974.

DOI: 10.11932/karst20220608

## 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展

李成芳<sup>1</sup>, 王忠诚<sup>2</sup>, 李振炜<sup>3,4</sup>, 徐宪立<sup>3,4</sup>

- (1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中南林业科技大学林学院, 湖南 长沙 410004;  
3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125;  
4. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

**摘要:** 西南喀斯特区土层浅薄、成土速率低等特点决定了其允许土壤流失量小, 土壤一旦流失, 极难恢复, 土壤侵蚀及其造成的石漠化现象已成为制约该区可持续发展最严重的生态环境问题。文章首先明晰西南喀斯特区土壤侵蚀特征, 从坡面、小流域和区域三个尺度上系统概括西南喀斯特区土壤侵蚀的相关研究进展。针对当前喀斯特区土壤侵蚀研究野外径流小区、小流域及区域空间尺度数据缺少和相关研究模型限制性较强等不足, 建议从不同尺度深入研究喀斯特区土壤侵蚀发生发展规律及时空演化格局, 并结合高新遥感、地球物理探测技术及模型, 同步监测坡面—小流域—区域土壤流失, 对土壤侵蚀进行定量评估, 结合不同空间尺度土壤侵蚀特征构建系统性水土保持生态恢复治理模式和监测系统评价体系。

**关键词:** 喀斯特; 石漠化; 土壤侵蚀; 尺度; 研究进展

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2022) 06-0962-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### 0 引言

中国是喀斯特地貌分布最广的国家, 其面积超过 124 万 km<sup>2</sup>, 约占国土总面积的 13%, 其中西南喀斯特区具有连续分布面积最大、发育类型最完全、生态环境最脆弱等显著特点<sup>[1]</sup>。西南喀斯特区主要是由石灰岩和白云岩等碳酸盐岩发育而成的地貌, 在亚热带湿热的气候环境下, 溶蚀物沿构造裂隙被水体带走, 致使成土过程缓慢<sup>[2]</sup>, 土壤一旦流失极难恢复。同时, 在人地关系不协调的基础上, 人为逆向活动严重, 生态环境脆弱, 频繁的自然灾害以及喀斯特地区独特的水文地质特点导致土壤侵蚀强烈、植被土壤退化、基岩裸露、地表状况恶化, 造成

水土流失、农田土地生产力急剧降低、水质恶化、生物多样性下降, 呈现类似石漠化的景观<sup>[3]</sup>。因而土壤侵蚀及其导致的石漠化现象成为该区最大的生态环境问题<sup>[4]</sup>。

与非喀斯特区相比, 西南喀斯特地区水文及土壤侵蚀过程相对较为复杂, 土壤随降雨发生地下漏失是喀斯特地区土壤流失的一种特殊现象<sup>[5]</sup>。土壤地下漏失是指由于降雨容易入渗并为碳酸盐岩裂隙的扩张提供充足的水动力条件, 在径流侵蚀下, 地表土壤在负地形周围汇聚, 以蠕滑和错落等重力侵蚀方式通过溶蚀形成的溶洞或暗河进入地下岩溶管道系统, 是土壤从上覆土层向下覆岩层迁移的过程<sup>[6]</sup>。因此喀斯特区地表土壤侵蚀和地下土壤流失都可将

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41730748)、面上项目 (41977073); 中国科学院青年创新促进会项目 (2020359)

第一作者简介: 李成芳 (1998—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: lichengfang98@126.com。

通信作者: 李振炜 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: lizhenwei337@isa.ac.cn。

收稿日期: 2021-09-16

土壤或沉积物输出水文网络<sup>[7]</sup>。喀斯特地区特殊水文地质环境的存在,致使其水土流失形式、特点、发生机制等与非喀斯特区有显著的差别。喀斯特地区坡地地表起伏度大、土壤总量少、土层浅薄并分布不连续、岩石裸露率高且渗漏性强,导致土壤蓄水能力弱<sup>[8]</sup>;地下则是由于碳酸盐岩的化学溶蚀作用发育形成裂隙、溶洞、溶沟、漏斗、落水洞、竖井、地下河等系统,所以不仅存在地表径流流失,还存在土壤以落水洞为主要漏失途径的地下流失形式<sup>[9-10]</sup>,从而形成喀斯特地区特有的集坡面产流产沙过程和流域汇流输沙过程相结合的二元三维侵蚀系统<sup>[11]</sup>。

中国喀斯特地区水土流失的研究从20世纪60年代就已经开始,直到20世纪90年代,石漠化概念被提出和完善,西南喀斯特区的侵蚀现状得到广泛关注。到21世纪,学者们对喀斯特区土壤侵蚀的机理及时空变化规律进行了深入研究。喀斯特土壤侵蚀机理、石漠化的形成原因、危害及治理途径成为研究热点<sup>[12-13]</sup>。过去的半个世纪,由于特殊的地质背景和不合理的土地利用方式,石漠化问题和贫困的相互交织,生态环境保护和经济社会发展的矛盾逐渐突出,约13万 $\text{km}^2$ 被植被和土壤覆盖的喀斯特地区变成了岩石地貌<sup>[14]</sup>。然而石漠化是碳酸盐岩地区森林砍伐和土壤流失的最终结果,它在不同尺度上极大影响了水文、土壤和生态条件,并因此造成更多的地质灾害,如干旱、洪水、滑坡和地面沉降,在更大的范围内,它甚至影响碳平衡和区域气候条件<sup>[15]</sup>。为与这种严重的土地退化形式作斗争并减轻贫困,政府部门决定实施“退耕还林”计划,扩大森林面积,减少边缘坡地农业,并在更肥沃/不易受侵蚀的土壤上加强作物种植,通过控制土壤侵蚀和恢复受干扰的生态系统,实现社会经济环境的可持续发展<sup>[16]</sup>。在区域范围内,生态工程项目可通过增加植被覆盖和降低生态系统对气候变化的敏感性来减少石漠化风险。西南喀斯特地区是生态环境治理与政府部门扶贫攻坚的重点、难点区<sup>[17-18]</sup>,因此,明晰西南喀斯特地区土壤侵蚀研究现状,对于该区石漠化治理、社会经济可持续发展及生态环境保护具有重要科学意义。

## 1 坡面土壤侵蚀特征

由于西南喀斯特区土壤侵蚀特征在不同尺度上存在很大差异,为此将从坡面尺度、小流域尺度和区

域尺度上分别论述该区土壤侵蚀特征。

### 1.1 室内径流小区

坡面土壤侵蚀机理研究的基础是坡面降雨径流产沙过程。通过室内人工模拟降雨实验,装填土壤模拟喀斯特坡面,设置不同雨强、降雨历时、地下孔隙度、坡度、基岩裸露率条件等,研究其对土壤侵蚀的影响,分析地表地下产流产沙过程及径流转化过程,揭示喀斯特地区坡面土壤侵蚀特征,这是常用的分析手法。

许多研究喀斯特地区裸坡地、坡耕地产流产沙特征及坡地土壤地下侵蚀的结果已证明喀斯特坡面产流产沙受多种因素(降雨强度、地下孔隙度、降雨历时、坡度、岩石裸露率等)共同影响,分析排序各因子的影响程度大小,发现就地表产流产沙和地下土壤流失而言,降雨强度影响最大,而岩石裸露率影响最小,并发现坡度是影响地下产流最主要的因素<sup>[19-22]</sup>,然而不同影响因素超过某一特定临界值后侵蚀过程会发生明显改变,进而更多研究以准确量化这一临界值为目的。严友进等<sup>[23]</sup>发现降雨强度为30、50 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,只有当坡度大于 $15^\circ$ 时地表径流才产生,土壤侵蚀以地下流失为主,表土剥离后的坡地,地下孔隙度相对降雨强度对产流产沙的影响更大;Dai等<sup>[24]</sup>2015年通过模拟岩溶裸露边坡以及地下岩溶裂隙结构的微地貌特征,发现当孔隙裂隙为3%、坡度为 $25^\circ$ 、岩石裸露率为50%、降雨强度为30 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和50 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,地表不产生径流,且随岩石裸露率的增加产流产沙量呈现波动变化;在2016年,Dai等<sup>[25]</sup>发现20%的岩石裸露率是地表、地下径流量分布的临界,地下孔隙裂隙中的水土流失是喀斯特地区土壤侵蚀过程中与其他地区相比的特殊模式和主要差异,也是岩溶裸露边坡地下渗漏的关键,地下产沙率随地下孔隙裂隙度的增加而增加,地下孔隙裂隙度的增加会增加地表产沙的临界降雨条件;而极端降雨也是影响坡面产流产沙的一种特殊情况<sup>[26]</sup>。Yan等<sup>[27]</sup>通过模拟降雨实验来确定地表侵蚀性降雨的强度阈值以及分析不同降雨条件尤其是极端降雨条件下岩溶坡地产流产沙的特征,发现造成地表土壤侵蚀所需的降雨强度需大于 $0.8\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,在轻度和中度降雨期间,地下孔隙裂隙是径流和泥沙流失的主要途径,在极端降雨条件下,坡面径流和产沙量占坡面土壤侵蚀的大部分。

## 1.2 野外径流小区

在喀斯特试验区设置野外径流小区,通过观测径流小区的降雨、产流产沙、土壤水分等数据,分析不同条件下雨强、降雨历时、坡长、坡度、种植措施、土壤含水量等因子对径流小区产流产沙量的影响,其较室内模拟实验更能反映出喀斯特区土壤侵蚀的特征。

不同土地利用方式对产流产沙的影响是坡面土壤侵蚀研究的重要内容。陈洪松等<sup>[28]</sup>在桂西北喀斯特地区通过设置野外径流小区分析了峰丛洼地坡面13种不同土地利用方式下的产流产沙特征,发现无论平水年还是丰水年,不同土地利用坡面次降雨径流系数均 $<5\%$ ,地表产流很少、降雨几乎全部入渗,植被类型、土地利用方式对坡面降雨产流的影响较小,而对地表侵蚀量的影响较大,但侵蚀强度以微度为主,人为干扰会增加地表侵蚀产沙量;而 Peng 等<sup>[29]</sup>在贵州普定峰丛洼地喀斯特小流域,却发现土地利用方式和植被覆盖可显著影响径流和土壤流失,土壤流失量从大到小依次为:牧场>火烧区>耕地>复合植被地>幼林地;覃莉等<sup>[30]</sup>以5个不同坡度裸露径流小区为研究对象,分析了2012至2013两年间15次天然降雨下的坡面产流产沙情况,发现暴雨条件下产流产沙随坡度增加呈现先增大后减小的趋势,坡面产流产沙存在临界坡度( $15^\circ$ ); Zhang 等<sup>[31]</sup>选取野外径流小区,研究了坡度和坡长对径流和土壤流失的影响,发现当坡长增加时,坡面径流呈现减少—增加—减少的趋势,土壤流失量与坡度、坡长和坡面径流深度呈幂函数关系;而李瑞等<sup>[32]</sup>则以降雨量和降雨强度为研究变量,发现喀斯特径流小区降雨量与产沙量的相关系数均大于0.5,而降雨强度和产沙量关系并不显著;文雅琴等<sup>[33]</sup>则分析了前期土壤含水量对喀斯特坡面产流产沙的影响,发现前期土壤含水量越高,坡面地表产流越快,入渗时间越短,产流量和径流系数就越大,从而对土壤的侵蚀能力也越强。

室内人工模拟降雨实验往往通过设置不同水平降雨历时、雨强、坡度、地下孔(裂)隙度、基岩裸露率来研究坡面的产流产沙特征,并比较不同影响因子的相关性程度。野外径流小区则分析不同植被覆盖方式、土地利用方式、坡度、坡长、雨强、次降雨、前期土壤含水量对坡面产流产沙的影响。室内人工模拟降雨实验具有一定的局限性,土壤组成、岩层

构造、地下孔裂隙分布及基岩裸露率都与自然条件存在差距。而野外径流小区在进行降雨强度与地下孔裂隙度与产沙量的相关性分析时,由于降雨历时和雨强的不稳定性、地下孔裂隙度分布不匀的限制,难以进行准确的量化分析。

## 1.3 坡面核素反演土壤侵蚀

在土壤侵蚀研究中,放射性核素沉降运移与坡面土壤侵蚀关系使得核素示踪法逐渐受到了人们广泛关注。与传统方法如径流小区法、人工模拟降雨等相比,核素示踪法的优点是在不改变原始地貌的基础上,将示踪核素在土壤中的浓度与背景值进行比较,分析土壤侵蚀强度的空间分布及土壤侵蚀速率,综合对喀斯特坡面土壤侵蚀的过程进行定性定量描述。研究土壤侵蚀的放射性核素目前主要有核爆炸产物 $^{137}\text{Cs}$ 、天然放射性核素 $^{210}\text{Pb}$ 和人造放射性核素 Pu。

相较 $^{210}\text{Pb}$ 和 Pu,目前 $^{137}\text{Cs}$ 示踪方法已获得最为广泛且成熟的应用。对喀斯特地区,山地坡面土壤侵蚀的 $^{137}\text{Cs}$ 研究主要是研究其在坡耕地、坡面次生林、落水洞、高原岩溶丘陵坡地、倒石堆型岩溶坡地中的剖面分布特征及其侵蚀指示意义,进而研究其分布规律与主要环境影响因子的相关关系。早期的研究发现喀斯特地区土壤粒度粗、土层薄、坡地裸石面积比例大以及土壤中碳酸盐颗粒的溶蚀等原因,不适用 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术来测定坡地的土壤流失量<sup>[34]</sup>;张笑楠等<sup>[35]</sup>研究裸岩对 $^{137}\text{Cs}$ 分布特征的影响,发现取自石缝中的土壤样品 $^{137}\text{Cs}$ 比活度明显高于非石缝中的土壤样品,由此证实了裸岩对周围土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 含量的影响,因此,在喀斯特地区将 $^{137}\text{Cs}$ 作为坡面示踪剂时必须考虑裸岩对 $^{137}\text{Cs}$ 含量的影响,即在计算样地 $^{137}\text{Cs}$ 面积活度时,应对其进行校正。但是关于校正方法的研究中,张笑楠运用较小范围( $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ )的裸岩率数据对核素比活度进行了校正,而大型石堆的分布在一定程度上会影响样地内核素含量,因而这种校正可能存在一定的局限性。因此,受到裸岩分布的影响, $^{137}\text{Cs}$ 的分布差异性显著,影响其作为示踪元素的灵敏度,在喀斯特坡面应用 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术反演土壤侵蚀量存在限制。

为避免 $^{137}\text{Cs}$ 示踪法这一限制因素,较高土壤均质性和连续土壤覆盖的坡地显然满足应用条件。冯腾等<sup>[36]</sup>选择石漠化程度轻、连续覆盖的林间空地地

带的白云岩坡地,使用 $^{137}\text{Cs}$ 法研究了中短期尺度不同坡位的土壤侵蚀强度及其空间分布特征;陆树华等<sup>[37]</sup>运用核素 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术,并结合土壤侵蚀定量估算模型,评估了西江流域典型丘陵山地人工林坡地和坡耕地的土壤侵蚀状况。

## 2 小流域土壤侵蚀产沙特征

### 2.1 基于流域出口监测

目前分析典型喀斯特小流域产流产沙特征,探讨喀斯特小流域产流产沙的主控因子是研究热点<sup>[38]</sup>。选择典型喀斯特小流域,通过持续对卡口站流量与泥沙的实时监测,建立产流产沙与影响因子的相互关系,分析喀斯特地区产流产沙输出特征是较为常用的手段。

在喀斯特区地表河产沙特征研究中,杜波等<sup>[39]</sup>通过分析喀斯特坡面和小流域产流产沙特征,发现流域单位面积产流产沙量远高于坡面径流小区,主要原因有:小流域内溶沟、溶槽发育,高差较大,流域外有溶洞,喀斯特地区特殊“二元结构”的存在,使得泥沙易从地下流失,从控制站点流出;流域地表虽然是闭合流域,但地下可能并不闭合,外流域径流中携带的泥沙可从地下流入该流域,并在流域控制站点流出。李瑞等<sup>[40]</sup>运用小流域控制站定位观测法,对遵义泮洋水小流域进行4年连续野外观测,发现基于坡面尺度的土壤侵蚀模数观测结果要小于小流域尺度,一方面是因为径流小区还不能准确测量土壤地下流失量,另一方面是因为坡面尺度的观测多集中在单个影响因子上,而自然流域的土壤侵蚀往往受到多个因子的共同作用;此外,由于人工设置径流小区的耕作措施也与当地不同,从而导致土壤侵蚀模数的观测结果要小于实际值。

地下河是喀斯特地区的独特现象<sup>[41]</sup>。由于地下水土流失过程十分复杂且监测方法也处于初始阶段,地下水土流失特征的探索研究相对缺乏。地下河的产流输沙与降雨显著相关。在喀斯特小流域地下河出口断面,通过连续定位监测,李晋等<sup>[42]</sup>发现地下河涨水产沙仅当降雨量达到一定值后才与其有显著响应。降雨的减少不仅降低了地表土壤侵蚀强度,而且降低了地下河流的流量和流速,降低了悬浮物质的输送能力<sup>[43]</sup>。

由于小流域尺度的野外定位观测试验设施修建、

观测费用昂贵,以及长期定位观测等限制,对于小流域土壤侵蚀产沙特征而言,基于喀斯特小流域出口监测的研究仍旧偏少。

### 2.2 基于核素反演

针对喀斯特小流域的侵蚀产沙研究,当前多集中在以下3个方面:运用 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术对洼地、河流滩地和塘库泥沙沉积速率进行反演;结合径流小区和水文站输沙量的观测资料,分析不同类型喀斯特小流域泥沙截留率、输移比及泥沙来源;建立流域产沙模型。

峰丛洼地广泛分布于中国西南喀斯特地区<sup>[44]</sup>,由封闭的洼地与构成流域分水岭的峰丛组成,大部分峰丛洼地可视为相对独立的封闭流域。峰丛洼地的地貌特征决定了其产流产沙具有明显的向心聚集性,即峰丛包围的洼地是坡面产沙的汇集中心,整个洼地可视为天然的大型沉沙池或塘库,其记录了流域侵蚀产沙的历史,是利用核素示踪技术研究泥沙沉积的良好场所。暴雨期间,一些洼地常因落水洞排水不畅而积水,积水时间长达数天至一个月,根据大坝库容理论,可认为除少部分泥沙从落水洞流失外,绝大部分泥沙都沉积于洼地内,因而洼地内泥沙的堆积量接近流域产沙量,据此可根据峰丛洼地的泥沙堆积量来反演流域的土壤流失量<sup>[45]</sup>。运用核素示踪技术定量研究峰丛洼地小流域土壤流失量,可为喀斯特特定地质条件下流域侵蚀产沙平衡计算、不同水土保持措施的配置及石漠化治理提供科学参照和理论依据。

由于喀斯特地区地表土壤的不连续性以及孔隙和裂隙发育对土壤空间分布的影响,传统的 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪方法不适用于西南喀斯特坡地土壤侵蚀速率的估算,然而有研究发现此技术可成功应用于喀斯特洼地沉积泥沙的断代<sup>[46]</sup>。为此,一些学者尝试运用 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 等核素示踪方法对喀斯特峰丛洼地泥沙沉积速率进行研究。Zhang等<sup>[47]</sup>以贵州喀斯特高原石人寨小流域洼地为研究对象,发现1979年以前,洼地底部的沉积作用非常有限,而自1979年砍伐森林以来,沉积作用迅速,因此对沉积泥沙进行 $^{137}\text{Cs}$ 断代,并将洼地视为临时性蓄水体,基于塞流理论和DEPOSITS模型,计算了1979年森林破坏后小流域的侵蚀速率; $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术对洼地泥沙堆积速率和地面土壤流失模数也有了定量研究,或运用

$^{137}\text{Cs}$  结合  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的 C-CRS 模型,也可反演西南喀斯特区峰丛洼地土壤侵蚀速率的动态变化<sup>[48-49]</sup>;也有学者联合运用核素  $^{137}\text{Cs}$  示踪、孢粉和土壤粒度分析方法,发现喀斯特洼地土壤侵蚀经历了轻微—剧烈增加—显著减缓的过程<sup>[50]</sup>。

近年来也有相关学者利用核素对喀斯特流域泥沙来源进行识别。梁家伟等<sup>[51]</sup>利用  $^{137}\text{Cs}$  技术,根据威宁草海沙河小流域地貌部位的角度和不同土地利用方式,通过对比分析不同类型源地土壤中  $^{137}\text{Cs}$  的分布状况,探讨喀斯特地区小流域泥沙来源特征,结果表明地表土、裂隙土和沟道沟壁土是喀斯特流域的三种主要泥沙来源;张信宝等<sup>[52]</sup>定性或定量确定了喀斯特地区坡地表层土壤对流域产沙的贡献,发现无论是非耕作土还是耕作土均含  $^{137}\text{Cs}$ ,而沟壁土和裂隙土产沙基本上不含  $^{137}\text{Cs}$ ;程倩云等<sup>[53]</sup>利用  $^{137}\text{Cs}$  和磁化率双指纹识别因子,对碳酸盐岩深层、浅层土壤以及碎屑岩夹层岩屑进行指纹复合示踪,探讨了黔中喀斯特高原农林复合生态系统峰丛谷地小流域地表及地下出口输出泥沙的主要来源和相对贡献率。然而在利用核素进行泥沙来源识别时,也存在一定的误差。如 He 等<sup>[54]</sup>发现在降雨充足的情况下,  $^{137}\text{Cs}$  会随土壤颗粒垂直向下移动,且移动距离会随着降雨量的增加而增加,这意味着核素的垂直迁移将会影响土壤侵蚀量与泥沙源地贡献率的计算,而寻找新的指纹识别因子将会成为新的研究方向。

## 2.3 基于模型

关于小流域土壤侵蚀模型的研究近年来一直是喀斯特石漠化研究者关注的焦点和前沿领域。在对流域尺度土壤侵蚀特征的研究中有多种应用模型,随着遥感技术的发展,GIS 技术与 RUSLE、SWAT、RMMF 等模型的结合,以及当前研究较少的喀斯特山区分布式土壤侵蚀模型可为系统分析小流域土壤侵蚀过程提供参考。

RUSLE 是目前土壤侵蚀研究中应用最为广泛的模型,常用于分析不同时段内流域的年平均土壤侵蚀量和土壤侵蚀强度,并探讨流域土壤侵蚀的时空变化特征<sup>[55]</sup>。在喀斯特地区常运用修正的通用土壤流失方程 (RUSLE) 预测小流域的年均土壤流失量和土壤侵蚀强度,或将 GIS 和 RUSLE 模型结合来估算流域土壤侵蚀量,以及分析流域不同土地利用方式、海拔、坡度的土壤侵蚀时空变化特征<sup>[56-57]</sup>。但是

RUSLE 的应用缺乏野外实验及土壤侵蚀的观测数据,很多参数无法获得,因此模拟精度无法验证。

目前 SWAT 模型模拟流域径流虽然在中国得到了广泛应用,但大多在一些非喀斯特地区,而在西南喀斯特地区的应用较少。在 GIS 支持下,余丹等<sup>[58]</sup>结合西南喀斯特地区水文特点,在流域水文响应单元 (HRU) 划分时,在一般流域的划分原理基础上改进了喀斯特水模块,模拟了该流域的径流和土壤侵蚀过程,发现 SWAT 模型在该流域内具有良好的适用性,其对西南喀斯特地区小流域产流产沙过程的模拟评估具有很高的参考价值;Feng 等<sup>[59]</sup>应用修正的 RMMF 模型模拟了古周喀斯特小流域的土壤侵蚀空间分布格局,使用组合流量算法计算累积径流,该算法允许通过考虑入渗和径流渗漏的转移网格流入多个单元,其也得到较好的模拟结果,但研究范围只局限于县域以下;为准确估算喀斯特小流域土壤侵蚀量,高翔等<sup>[60]</sup>根据喀斯特区小流域复杂地貌特征、径流与侵蚀产沙在垂直方向上的差异性,建立以栅格 DEM 为基础,由水文及侵蚀模块组成的分布式土壤侵蚀模型,在水文模块选取改进的喀斯特流域汇流模型进行汇流演算,在侵蚀模块通过建立不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因子模型进行产沙量计算,并完成泥沙输移预测,但该分布式模型还未经验证,同时也没有考虑土壤初始含水量和流量因子对喀斯特地区土壤侵蚀的影响。

## 3 区域土壤侵蚀特征

### 3.1 河流径流量和输沙量特征

河流径流量和输沙量特征的研究需要长时间序列水文站河流泥沙的观测资料,主要分析河流输沙量的区域差异及时间动态变化,输沙量主控因子识别及其模拟。对特定喀斯特流域径流量输沙量影响因子的研究中,发现喀斯特流域的侵蚀性降雨与年降雨变化趋势总体一致,径流量变化主要受到气候变化的影响,尤其是极端降雨事件,而输沙量变化主要受到人类活动的影响,相比植被恢复,大坝建设会显著影响河流输沙量的周期性变化,同时改变输沙量与其影响因子在不同时间尺度下的关系,且大坝减沙速率更显著<sup>[61-64]</sup>;Li 等<sup>[65]</sup>运用多元集合经验模态分解方法 (MEMD) 分析输沙量与其影响因素的多尺度变化,发现采用 MEMD 法对输沙量的预测精度

远优于基于原始数据的逐步多元回归结果。而喀斯特地区水沙变化的研究主要集中在年尺度,可能会忽略其季节变化,同时由于喀斯特地区复杂的水文地质结构,月尺度输沙量变异很大,为此Li等<sup>[66]</sup>运用 sediment rating curves 和 state-space model 对月输沙量进行预测,发现 state-space model 预测结果较优,预测值大部分在 95% 预测区间内。

对于不同喀斯特流域,该区独特的水文地质结构可能对流域产沙量有一定影响,景观格局的高度异质性也可能与输沙量紧密联系。地质因子(白云岩含量、石灰岩含量、白云岩+石灰岩含量)和景观指数一般用来表征地质条件和景观特征,通过获取西南喀斯特区 40 个流域 2009—2012 年的输沙量,Li 等<sup>[67]</sup>分析了输沙量与地质和景观因子的关系,发现地质和景观因子对喀斯特流域输沙量影响较大,二者可解释产沙量总变异的 66.8%;同时,该区地貌类型复杂,喀斯特断陷盆地、喀斯特峡谷、喀斯特高原、喀斯特峰丛洼地、喀斯特峰林、喀斯特槽谷等广泛分布,地貌类型的高度异质性与流域产沙量紧密相关,河网密度、流域相对高差、曲率、平均海拔、相对地形因子和流域面积等是影响喀斯特流域输沙量的主要地貌因子<sup>[68]</sup>。

### 3.2 土壤侵蚀特征

相较于坡面和小流域尺度,目前在区域尺度上土壤侵蚀评价的研究还相对较少。土壤可蚀性、地形特征(地表粗糙度、地形起伏度、高程变异系数、地表切割深度、沟壑密度)、降雨、土地利用均对区域土壤侵蚀有显著影响<sup>[69]</sup>。赵斯琦等<sup>[70]</sup>分析上述五个地形指标与土壤侵蚀模数的关系,发现地表粗糙度是区域尺度土壤侵蚀的最佳评价指标,并确定出喀斯特区域尺度土壤侵蚀的最佳评价指标体系。

在研究区域侵蚀特征时,通常会建立模型来分析土壤侵蚀的时空变化特征。基于修正土壤侵蚀模型(RUSLE),钱庆欢<sup>[71]</sup>研究北盘江流域的土壤侵蚀空间分布特征,分析土壤侵蚀强度空间变化与坡度、土地利用类型(草地、林地、耕地)等影响因素之间的关系,发现平均侵蚀模数与坡度呈正相关关系;通过遥感影像数据构建时空分布模型,赵青松等<sup>[72]</sup>定量分析不同喀斯特地貌类型土壤侵蚀强度的变化趋势,发现低海拔地区土壤侵蚀变化度低于高海拔区域。而胡先培等<sup>[73]</sup>将侵蚀模型与遥感技术结合,利

用 RS 与 GIS 技术,并结合 RUSLE 模型,研究不同时期印江河流域土壤侵蚀时空分布与变化特征,发现流域内较高侵蚀等级主要为带状分布。就区域尺度,与非喀斯特地区侵蚀模型的多样性相比,喀斯特地区模型的研究还相当薄弱<sup>[74-75]</sup>。

## 4 不足与展望

### 4.1 野外径流小区、小流域和区域尺度在长时间尺度上数据缺乏

当前喀斯特土壤侵蚀机理研究主要集中在小尺度的室内坡面径流小区,但其结果不能完全反映喀斯特地区的产流产沙特征。随着多参数水质分析仪等的投入使用,未来实验与野外监测中,可强化野外径流小区和小流域监测,保证监测数据的质量,实现产流产沙数据的长期积累。目前喀斯特小流域和区域尺度土壤侵蚀的研究多限于近 100 年内,较长时间尺度的研究仍然较少,难以反演喀斯特小流域和区域更长时期的侵蚀产沙动态变化特征,限制了对喀斯特区土壤侵蚀发生发展规律及时空演化格局的认知。尝试运用<sup>14</sup>C、光释光等对洼地沉积物定年,反演喀斯特流域近几百年来侵蚀产沙的动态变化可能是以后研究的新方向。

### 4.2 喀斯特地区土壤地下流失研究具有局限性

喀斯特地区土壤地下流失以落水洞为主要途径,现有研究多使用单核素示踪和配比法计算岩溶槽谷区泥沙地下流失比例。但是,在长时间尺度上,地表与地下暗河存在两种泥沙输移途径,一方面是泥沙从落水洞流入地下暗河,另一方面暗河上游来水充足时,在压力作用下落水洞的含沙水流发生上涌,因而在计算径流及泥沙地下流失量、流失速率以及流失比例时存在误差,且由于缺少每年<sup>137</sup>Cs 准确的沉降数据,其背景值的可靠性存在不确定性,核素示踪在长时间尺度上计算泥沙流失速率存在缺陷。因此,如何监测落水洞流入地下暗河和因压力上涌而产生的泥沙量是一个重要挑战,同时寻找新的指纹因子示踪土壤地下流失量也是当下喀斯特地区土壤地下流失过程和机理研究需要关注的重要问题。

### 4.3 土壤侵蚀研究较少考虑土壤—表层喀斯特带结构

土壤—表层喀斯特带是喀斯特关键带的核心区

域, 具有重要的水文调蓄功能, 复杂的内部耦合结构可显著影响不同界面的水文连通性, 而多界面水文过程又共同驱动了地表、地下土壤侵蚀。但关于土壤—表层喀斯特带的结构及其水文连通性难于观测和定量描述, 属于土壤学、水文学和地质学的交叉性难题。随着探地雷达、高密度电法仪(ERT)等地球物理探测技术的发展, 土壤—表层喀斯特带三维结构的可视化成为现实, 并可定量表征土壤—表层喀斯特带的结构和功能水文连通性。同时, 可以结合新近提出的针对喀斯特区域的 VarKarst<sup>[76]</sup> 模型, 引入水文和泥沙流通性指数, 力图实现土壤地表流失及地下流失的定量评估, 解析喀斯特侵蚀产沙的水文驱动机制, 分析喀斯特地区土壤侵蚀的发生和演化机理。但不同类型的模型在运行过程中具有各自的局限性, 在未来喀斯特地区土壤侵蚀研究中, 需要多种模型相互结合与验证。

#### 4.4 空间尺度上的土壤侵蚀机理研究独立不同步

在传统水土流失研究中, 往往将坡面、小流域、区域三个尺度分开。然而在发生侵蚀性降雨后, 坡面—小流域—区域水土流失不仅是尺度递进, 也表现为泥沙输移的路径过程。而以往的研究中, 不同空间尺度土壤侵蚀机理研究独立进行, 且不具有表征泥沙迁移过程的连续性。近年来, 中国水土流失治理已从坡面和小流域尺度转向更大尺度来集中连片治理, 同步监测坡面—小流域—区域土壤流失, 能够完整地理解侵蚀的发生发展过程以便追踪泥沙来源, 可全面揭示喀斯特区土壤侵蚀特征, 为区域水土保持规划提供理论支撑。

#### 4.5 结合喀斯特区不同空间尺度构建系统性水土保持治理评价体系

针对水土流失, 目前喀斯特区域尺度缺少生态过程调控、系统格局和生态重建可持续技术的整体系统研究以及可持续的调控集成模式, 支撑不了重大生态恢复工程的规划与实施。喀斯特区现有的水土流失治理分区较为粗放, 治理体系在模式调整、结构优化方面仍需改进, 模式的科学性和有效性有待证明, 治理效益也缺乏系统科学的评价<sup>[77-78]</sup>。由于喀斯特地区独特的水文地质结构, 复杂的地形以及高度异质性的景观, 不同尺度的土壤侵蚀过程更加复杂<sup>[79]</sup>, 因此结合不同空间尺度土壤侵蚀特征和土壤侵蚀程度, 构建科学性的水土

保持生态恢复治理模式和系统性的监测评价体系是一个难题。

#### 参考文献

- [1] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 461-466.  
YUAN Daoxian. World correlation of karst ecosystem: objectives and implementation plan[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(4): 461-466.
- [2] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 37-44.  
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing. World correlation of karst ecosystem: objectives and implementation plan[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 37-44.
- [3] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101-105.  
WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 101-105.
- [4] 陈海, 朱大运, 陈浒. 石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 346-354.  
CHEN Hai, ZHU Dayun, CHEN Hu. Effects of land-use patterns on soil aggregate stability and organic carbon in rocky desertification areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 346-354.
- [5] 张信宝, 王世杰. 浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 602-603.  
ZHANG Xinbao, WANG Shijie. A discussion on the definition of soil leaking in a karst catchment[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 602-603.
- [6] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 余恬钰, 杨坪, 王建秀. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究: 以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 121-127.  
TANG Yiqun, ZHANG Xiaohui, ZHOU Jie, SHE Tianyu, YANG Ping, WANG Jianxiu. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas: A case in Chenqi small watershed, Puding, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(2): 121-127.
- [7] Zeng Faming, Jiang Zhongcheng, Shen Lina, Chen Wei, Yang Qiyong, Zhang Cheng. Assessment of multiple and interacting modes of soil loss in the karst critical zone, Southwest China (SWC)[J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 97-106.
- [8] 何永彬, 张信宝, 文安邦. 西南喀斯特山地的土壤侵蚀研究探讨[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2393-2398.  
HE Yongbin, ZHANG Xinbao, WEN Anbang. Discussion on karst soil erosion mechanism in karst mountain area in southwest China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2393-2398.
- [9] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 裴建国, 杨慧, 罗为群. 我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 1-7, 20.

- CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, YANG Desheng, PEI Jianguo, YANG Hui, LUO Weiqun. Grading of soil erosion intensity in Southwest karst area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(6):1-7,20.
- [10] 魏兴萍,谢德体,倪九派,苏程烜.重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2015,23(3):462-473.
- WEI Xingping, XIE Deti, NI Jiupai, SU Chengxuan. Soil erosion and loss on slope in karst valley area, Chongqing with <sup>137</sup>Cs[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(3):462-473.
- [11] 张信宝,王世杰,曹建华,王克林,孟天友,白晓永.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].*中国岩溶*,2010,29(3):274-279.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua, WANG Kelin, MENG Tianyou, BAI Xiaoyong. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [12] 曹建华,邓艳,杨慧,蒲俊兵,宋同彬,蓝芙宁,黄芬,李建鸿.喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J].*生态学报*,2016,36(22):7103-7108.
- CAO Jianhua, DENG Yan, YANG Hui, PU Junbing, ZHU Tongbin, LAN Funing, HUANG Fen, LI Jianhong. Rocky desertification evolution, treatment technology and demonstration in karst faulted basins, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7103-7108.
- [13] 王克林,岳跃民,马祖陆,雷廷武,李德军,宋同清.喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究[J].*生态学报*,2016,36(22):7098-7102.
- WANG Kelin, YUE Yuemin, MA Zulu, LEI Tingwu, LI Dejun, SONG Tongqing. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in karst peak-cluster depression regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7098-7102.
- [14] Tong Xiaowei, Martin Brandt, Yue Yuemin, Horion Stephanie, Wang Kelin, De Keersmaecker Wanda, Tian Feng, Schurgers Guy, Xiao Xiangming, Luo Yiqi, Chen Chi, Myneni Ranga, Shi Zheng, Chen Hongsong, Fensholt Rasmus. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [15] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [16] Tong Xiaowei, Martin Brandt, Yue Yuemin, Ciais Philippe, Jepsen Martin Rudbeck, Penuelas Josep, Wigneron Jean-Pierre, Xiao Xiangming, Song Xiaopeng, Horion Stephanie, Rasmussen Kjeld, Saatchi Sassan, Fan Lei, Wang Kelin, Zhang Bing, Chen Zhengchao, Wang Yuhang, Li Xiaojun, Fensholt Rasmus. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(11): 1191-1197.
- [17] 陈洪松,付智勇,张伟,聂云鹏.西南喀斯特地区水土过程与植被恢复重建[J].*自然杂志*,2018,40(1):41-46.
- CHEN Hongsong, FU Zhiyong, ZHANG Wei, NIE Yunpeng. Soil water processes and vegetation restoration in karst regions of southwest China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 41-46.
- [18] 蒋勇军,刘秀明,何师意,何丙辉,谢建平,罗维均,白晓永,肖琼.喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J].*生态学报*,2016,36(22):7092-7097.
- JIANG Yongjun, LIU Xiuming, HE Shiyi, HE Binghui, XIE Jianping, LUO Weijun, BAI Xiaoyong, XIAO Qiong. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7092-7097.
- [19] 杨智,戴全厚,黄启鸿,吴学强.典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J].*水土保持学报*,2010,24(4):78-81.
- YANG Zhi, DAI Quanhou, HUANG Qihong, WU Xueqiang. Experimental study of runoff processes on typical karst slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 78-81.
- [20] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].*水土保持学报*,2012,26(6):46-51.
- HU Yi, DAI Quanhou, WANG Peijiang. Experimental study of runoff processes on typical karst slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 46-51.
- [21] 刘正堂,戴全厚,杨智.喀斯特裸坡土壤侵蚀模拟研究[J].*中国岩溶*,2014,33(3):356-362.
- LIU Zhengtang, DAI Quanhou, YANG Zhi. Study of simulated soil erosion on a bare karst slope[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 356-362.
- [22] 刘正堂,戴全厚,倪九派,杨智.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].*水土保持学报*,2013,27(5):12-16.
- LIU Zhengtang, DAI Quanhou, NI Jiupai, YANG Zhi. Bare slope soil erosion experimental research under the condition of artificial rainfall precipitation in karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 12-16.
- [23] 严友进,戴全厚,伏文兵,李燕.喀斯特坡地土壤地下侵蚀模拟试验研究[J].*水土保持学报*,2015,29(6):7-13.
- YAN Youjin, DAI Quanhou, FU Wenbing, LI Yan. Experimental study on simulation of underground soil erosion in karst slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 7-13.
- [24] Dai Quanhou, Liu Zhilun, Shao Hongbo, Yang Zhi. Karst bare slope soil erosion and soil quality: a simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [25] Dai Quanhou, Peng Xudong, Yang Zhi, Zhao Longshan. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area[J]. *Catena*, 2017, 152: 218-226.
- [26] Dai Quanhou, Peng Xudong, Zhao Longshan, Shao Hongbo, Yang Zhi. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. *Land Degradation &*



- Development, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [27] Yan Youjin, Dai Quanhou, Yuan Yingfei, Peng Xudong, Zhao Longshan, Yang Jing. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 30-40.
- [28] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.  
CHEN Hongsong, YANG Jing, FU Wei, HE Fei, WANG Kelin. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 121-126.
- [29] Peng Tao, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2011, 90: 53-62.
- [30] 覃莉, 刘凤仙, 杨智. 喀斯特地区不同坡度径流小区水土流失特征分析[J]. *中国水土保持*, 2015(8): 63-65.  
QIN Li, LIU Fengxian, YANG Zhi. Analysis of characteristics of karst area in different slope runoff plots of soil and water loss[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(8): 63-65.
- [31] Zhang Xingqi, Hu Maochuan, Guo Xinya, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J]. *Catena*, 2018, 160: 394-402.
- [32] 李瑞, 李勇, 刘云芳. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 7-11.  
LI Rui, LI Yong, LIU Yunfang. Study of rainfall and soil erosion on slope in karst region of Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 7-11.
- [33] 文雅琴, 熊康宁, 李瑞. 黔东南喀斯特坡面产流产沙及土壤含水量特征[J]. *人民黄河*, 2020, 42(3): 77-81,86.  
WEN Yaqin, XIONG Kangning, LI Rui. Characteristics of runoff and sediment yield and soil water content on slope in karst area of northeast Guizhou[J]. *Yellow River*, 2020, 42(3): 77-81,86.
- [34] 李豪, 张信宝, 王克林, 文安邦. 桂西北倒石堆型岩溶坡地土壤的<sup>137</sup>Cs分布特点[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 42-47.  
LI Hao, ZHANG Xinbao, WANG Kelin, WEN Anbang. <sup>137</sup>Cs Distribution characteristics at a talus-type karst slope in northwestern Guangxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 42-47.
- [35] 张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳, 张信宝. 典型喀斯特坡地<sup>137</sup>Cs的分布与相关影响因子研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3152-3158.  
ZHANG Xiaonan, WANG Kelin, ZHANG Wei, CHEN Hongsong, HE Xunyang, ZHANG Xinbao. Distribution of <sup>137</sup>Cs and Relative Influencing Factors on Typical Karst Sloping Land[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3152-3158.
- [36] 冯腾, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 王克林. 桂西北喀斯特坡地土壤<sup>137</sup>Cs的剖面分布特征及其指示意义[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 593-599.  
FENG Teng, CHEN Hongsong, ZHANG Wei, NIE Yunpeng, WANG Kelin. <sup>137</sup>Cs profile distribution character and its implication for soil erosion on Karst slopes of northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 593-599.
- [37] 陆树华, 李先琨, 徐广平, 黄甫昭, 李冬兴, 蒋忠诚. 基于Cs-137示踪的西江流域典型丘陵坡地土壤侵蚀研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 38-43.  
LU Shuhua, LI Xiankun, XU Guangping, HUANG Fuzhao, LI Dongxing, JIANG Zhongcheng. Assessment of Soil Erosion on the Typical Hilly Upland of Xijiang River Basin Based on Cs-137 Tracer Method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 38-43.
- [38] 涂成龙, 陆晓辉, 刘瑞禄, 李勇, 李瑞, 孙泉忠, 李龙波. 典型喀斯特流域地表产流输出特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(12): 1879-1885.  
TU Chenglong, LU Xiaohui, LIU Ruilu, LI Yong, LI Rui, SUN Quanzhong, LI Longbo. Output characteristics of surface runoff in typical karst watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(12): 1879-1885.
- [39] 杜波, 唐丽霞, 潘佑静, 杨智. 喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 1-6.  
DU Bo, TANG Lixia, PAN Youjing, YANG Zhi. Characteristics of runoff and sediment yields in the karst hillslope and small watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 1-6.
- [40] 李瑞, 陈康, 刘瑞禄, 顾再柯, 文雅琴, 黎庆贵, 刘凤仙. 基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 139-147.  
LI Rui, CHEN Kang, LIU Ruilu, GU Zaik, WEN Yaqin, LI Qinggui, LIU Fengxian. Characteristics of runoff and sediment in karst area of northern Guizhou Province based on small watershed scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 139-147.
- [41] 莫美仙, 王宇, 李峰, 虞慧. 云南南洞地下河系统边界及性质研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 173-185.  
MO Meixian, WANG Yu, LI Feng, YU Hui. Study on the boundaries and properties of the underground river system in Nandong, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 173-185.
- [42] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水流失观测研究[J]. *中国水土保持*, 2012(6): 38-40,76.  
LI Jin, XIONG Kangning, WANG Xianpan. Study on the boundaries and properties of the underground river system in Nandong, Yunnan Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(6): 38-40,76.
- [43] Li Jianhong, Pu Junbing, Zhang Tao, Xiong Xiaofei, Wang Sainan, Huo Weijie, Yuan Daoxian. Measurable sediment discharge from a karst underground river in southwestern China: temporal variabilities and controlling factors[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(4): 1-18.
- [44] 李春茂, 陈洪松, 徐勤学, 吴攀, 付智勇. 典型岩溶峰丛洼地坡

- 面土壤水分空间变异性[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 159-167.
- LI Chunmao, CHEN Hongsong, XU Qinxue, WU Pan, FU Zhiyong. Spatial variability of soil moisture on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 159-167.
- [45] 李豪, 张信宝, 白晓永, 何永彬, 王克林. 桂西北喀斯特丘陵峰丛洼地小流域泥沙堆积的<sup>137</sup>Cs示踪研究[J]. 泥沙研究, 2010(1): 17-24.
- LI Hao, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong, HE Yongbin, WANG Kelin. Study on sediment deposition in a peak-cluster depression catchment using <sup>137</sup>Cs technique in Karst hilly area, NW Guangxi[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(1): 17-24.
- [46] Bai Xiaoyong, Zhang Xinbao, Chen Hongsong. Using <sup>137</sup>Cs fingerprint technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in karst region of southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21: 1-6.
- [47] Zhang Xinbao, Bai Xiaoyong, Liu Xiuming. Application of a <sup>137</sup>Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(3): 431-437.
- [48] 李豪, 张信宝, 文安邦, 曹建华. 喀斯特峰丛洼地泥沙堆积的<sup>137</sup>Cs示踪研究: 以丫吉试验场为例[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 57-63.
- LI Hao, ZHANG Xinbao, WEN Anbang, CAO Jianhua. Assessment of sediment rate of a karst hill peak-cluster depression catchment using <sup>137</sup>Cs technique: A case study on yaji experimental site[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(1): 57-63.
- [49] Li Zhenwei, Xu Xianli, Zhang Yaohua, Wang Kelin, Zeng Peng. Reconstructing recent changes in sediment yields from a typical karst watershed in southwest China[J]. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2019, 269: 62-70.
- [50] 何永彬, 张信宝, 贺秀斌. 利用<sup>137</sup>Cs示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 246-250.
- HE Yongbin, ZHANG Xinbao, HE Xiubin. Sediment deposition and erosion environment in a karst peak-cluster grassland depression studied by <sup>137</sup>Cs tracing technology and pollen analysis[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(1): 246-250.
- [51] 梁家伟, 戴全厚, 张曦, 高华端, 刘文. <sup>137</sup>Cs技术研究岩溶高原湿地小流域土壤侵蚀特征[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 116-122.
- LIANG Jiawei, DAI Quanhou, ZHANG Xi, GAO Huaduan, LIU Wen. Study on soil erosion features of small catchment of karst plateau wetland by <sup>137</sup>Cs tracing technology[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(1): 116-122.
- [52] 张信宝, 白晓永, 李豪, 冯腾, 彭涛, 严东春, 何永彬, 鲍玉海, 汪阳春. 西南喀斯特流域泥沙来源、输移、平衡的思考: 基于坡地土壤与洼地、塘库沉积物<sup>137</sup>Cs含量的对比[J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 247-258.
- ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong, LI Hao, FENG Teng, PENG Tao, YAN Dongchun, HE Yongbin, BAO Yuhai, WANG Yangchun. Contrast of <sup>137</sup>Cs content in slope soil with depressions, and pond sediments-sediments sources, transportation and balance of karst basin in SW China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(3): 247-258.
- [53] 程倩云, 彭韬, 张信宝, 曹乐, 王世杰. 西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的<sup>137</sup>Cs和磁化率双指纹示踪研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 140-145, 154.
- CHENG Qianyun, PENG Tao, ZHANG Xinbao, CAO Le, WANG Shijie. Tracing fine sediment sources in the surface and subsurface rivers of a karst watershed using compound fingerprinting with <sup>137</sup>Cs and magnetic susceptibility in southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 140-145, 154.
- [54] He Jianghu, Zhang Keli, Cao Zihao, Ke Qihua. Tracer vertical movement and its affecting factors in karst soil profiles in simulated leaching context[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22: 229-237.
- [55] 曾凌云, 汪美华, 李春梅. 基于RUSLE的贵州省红枫湖流域土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 113-118.
- ZENG Lingyun, WANG Meihua, LI Chunmei. Study on soil erosion and its spatio-temporal change at Hongfeng Lake watershed based on RUSLE Model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 113-118.
- [56] 许月卿, 邵晓梅. 基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006(4): 67-71.
- XU Yueqing, SHAO Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: A case study of Maotiaohe Watershed, Guizhou Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006(4): 67-71.
- [57] 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, 41(5): 1735-1747.
- WANG Yao, CAI Yunlong, PAN Mao. Soil erosion simulation of the Wujiang River Basin in Guizhou Province based on GIS, RUSLE and ANN[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1735-1747.
- [58] 余丹, 孙丽娜, 于俊峰, 王震洪. 基于SWAT的猫跳河流域径流及土壤侵蚀模拟研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(17): 256-261.
- YU Dan, SUN Lina, YU Junfeng, WANG Zhenhong. Simulation on soil erosion and streamflow in maotiaohe watershed of Guizhou Province based on SWAT model[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(17): 256-261.
- [59] Feng Teng, Chen Hongsong, Wang Kelin, Zhang Wei, Qi Xiangkun. Modeling soil erosion using a spatially distributed model in a karst catchment of northwest Guangxi, China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(15): 2121-2130.
- [60] 高翔, 蔡雄飞, 王济, 胡国锋. 喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估

- 算模型[J]. *山地学报*, 2013, 31(5): 542-547.
- GAO Xiang, CAI Xiongfeng, WANG Ji, HU Guofeng. Distributed soil erosion estimation model for small watershed in karst area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(5): 542-547.
- [61] Li Zhenwei, Xu Xianli, Yu Bofu, Xu Chaohao, Liu Meixian, Wang Kelin. Quantifying the impacts of climate and human activities on water and sediment discharge in a karst region of southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 836-849.
- [62] Li Zhenwei, Xu Xianli, Xu Chaohao, Liu Meixian, Wang Kelin, Yu Bofu. Annual runoff is highly linked to precipitation extremes in karst catchments of southwest China[J]. *Hydroeteor*, 2017, 18: 2745-2759.
- [63] Li Zhenwei, Xu Xianli, Xu Chaohao, Liu Meixian, Wang Kelin. Dam construction impacts on multiscale characterization of sediment discharge in two typical karst watersheds of southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 42-54.
- [64] 郭玉琴, 何太蓉, 钟博星. 乌江流域1956-2014年降雨特征及输沙效应[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 1-7.
- WU Yuqi, HE Tairong, ZHONG Boxing. Characteristics of precipitation and sediment effect in wujiang river basin during 1956-2014[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 1-7.
- [65] Li Zhenwei, Xu Xianli, Zhu Jingxuan, Xu Chaohao, Wang Kelin. Scale-specific controls of sediment yield in karst watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 1-12.
- [66] Li Zhenwei, Xu Xianli, Xu Chaohao, Liu Meixian, Wang Kelin, Yi Ruzhou. Monthly sediment discharge changes and estimates in a typical karst catchment of southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 95-107.
- [67] Li Zhenwei, Xu Xianli, Zhu Jingxuan, Xu Chaohao, Wang Kelin. Sediment yield is closely related to lithology and landscape properties in heterogeneous karst watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 437-446.
- [68] Li Zhenwei, Xu Xianli, Zhu Jingxuan, Xu Chaohao, Wang Kelin. Effects of lithology and geomorphology on sediment yield in karst mountainous catchments[J]. *Geomorphology*, 2019, 343: 119-128.
- [69] Rania Kheir, Chadi Bou Abdallah, Tommy Dalgaard, Greve Mogens H. Using visual erosion features to validate the application of water erosion models in Mediterranean karst environments: the case study of Lebanon[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände*, 2010, 54(2): 27-49.
- [70] 赵斯琦, 王晓红, 舒天竹, 唐睿. 喀斯特地区区域尺度土壤侵蚀地形因子研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(5): 97-103.
- ZHAO Siqi, WANG Xiaohong, SHU Tianzhu, TANG Rui. Research on topographic factors in relation to regional soil erosion in karst region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(5): 97-103.
- [71] 钱庆欢, 白晓永, 周德全, 肖建勇, 陈飞, 李颖. 基于RULSE模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J]. *人民珠江*, 2018, 39(2): 19-25.
- QIAN Qinghuan, BAI Xiaoyong, ZHOU Dequan, XIAO Jianyong, CHEN Fei, LI Ying. Study on soil erosion in Beipanjiang river basin based on RULSE model[J]. *Pearl River*, 2018, 39(2): 19-25.
- [72] 赵青松, 兰安军, 范泽孟, 杨青. 贵州省不同地貌形态类型土壤侵蚀强度变化的定量分析[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(7): 1555-1566.
- ZHAO Qingsong, LAN Anjun, FAN Zemeng, YANG Qing. Quantitative analysis on the soil erosion intensity change in different morphological types of Guizhou Province[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(7): 1555-1566.
- [73] 胡先培, 郭程程. 基于RUSLE模型的印江流域土壤侵蚀动态变化研究[J]. *环保科技*, 2019, 25(2): 34-40.
- HU Xianpei, GUO Chengcheng. Using RUSLE model to analyze temporal and spatial characteristics of soil erosion in Yinjiang River Basin[J]. *Environmental Protection and Technology*, 2019, 25(2): 34-40.
- [74] 雷章, 岳德鹏, YANG Di, 罗志东, 许永利, 于强. 基于Hadoop的区域土壤侵蚀强度计算GIS设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 160-165, 137.
- LEI Zhang, YUE Depeng, YANG Di, LUO Zhidong, XU Yongli, YU Qiang. GIS design and experiment of soil erosion intensity calculating based on Hadoop[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 160-165, 137.
- [75] 李朋飞, 穆兴民, HOLDEN Joseph, 赵广举. 区域土壤侵蚀模型 PESERA介绍及其应用现状[J]. *泥沙研究*, 2016(6): 74-80.
- LI Pengfei, MU Xingmin, HOLDEN Joseph, ZHAO Guangju. Principles and applications of a coarse-scale soil erosion model PESERA[J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(6): 74-80.
- [76] Mudarra Matías, Hartmann Andreas, Bartolomeo Andreo. Combining experimental methods and modeling to quantify the complex recharge behavior of karst aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(2): 1384-1404.
- [77] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 37-42.
- CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: achievements, problems, and countermeasures[J]. *Carso-logica Sinica*, 2018, 37(1): 37-42.
- [78] 熊康宁, 朱大运, 彭韬, 喻理飞, 薛建辉, 李坡. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7109-7113.
- XIONG Kangning, ZHU Dayun, PENG Tao, YU Lifei, XUE Jianhui, LI Po. Study on ecological industry technology and demonstration for karst rocky desertification control of the karst plateau-gorge[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7109-7113.
- [79] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 付智勇, 连晋姣, 王克林. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. *水土保持学报*, 2018,

32(1): 10-16.

CHEN Hongsong, FENG Teng, LI Chengzhi, FU Zhiyong,  
LIAN Jinjiao, WANG Kelin. Characteristics of soil erosion inthe karst regions of southwest china: research advance and  
prospective[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,  
32(1): 10-16.

## Research progress of soil erosion in karst areas of southwest China

LI Chengfang<sup>1</sup>, WANG Zhongcheng<sup>2</sup>, LI Zhenwei<sup>3,4</sup>, XU Xianli<sup>3,4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 3. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 4. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China )

**Abstract** As one of the largest contiguous karst areas in the world, southwest China is characterized by shallow soil layer and low rate of soil formation. The very low tolerance of soil loss in this area may lead to the extreme difficulty in the recovery of soil layer once lost. Therefore, soil erosion and its effects such as the rocky desertification have become the most serious problem of ecological environment, restricting the sustainable development of the karst area. The purpose of this study is to review the characteristics of soil and water loss at different scales, identify the limitations of different evaluation methods for soil erosion, and to predict the future research on the soil erosion in karst areas of southwest China.

Firstly, according to plenty of research data about soil erosion in karst areas at home and abroad, the characteristics of soil and water loss in karst areas are expounded at various spatial scales such as slope, small watershed, and region. Additionally, the characteristics of soil erosion in karst areas and non-karst areas are compared at these three scales.

The karst area is featured by a binary three-dimensional erosion system—runoff and sediment production processes at the slope scale and the sediment transport process at the watershed scale. At the slope scale, the effect of rainfall intensity and duration, underground fissure degree, slope, and bedrock exposure rate on soil erosion are investigated at both indoor and field runoff plots. However, because of the big difference between the experimental conditions of indoor rainfall simulation and natural conditions, it is essential to investigate the soil erosion characteristics at the field runoff plots. Meanwhile, the instability of rainfall intensity and the uneven distribution of fissure degree of underground pore also pose a challenge to the accurate quantification of the correlation between rainfall intensity, fissure degree of underground pore and sediment yield in the field runoff plots. Generally, radionuclide tracing technology can quantitatively identify the spatial distribution of intensity and rate of soil erosion. However, due to the high bare rock ratio, karst slopes with high soil homogeneity and continuous soil cover must be selected to avoid the influence of bare rock on the content of radionuclide.

At the small watershed scale, monitoring the discharge and sediment concentration at the outlet of watershed is a typical method to analyze the characteristics of runoff and sediment yield in small watershed, and to establish the relationship between sediment yield and runoff or its influencing factors. This method is also used to predict the average annual soil loss and soil erosion intensity in a small watershed, and to analyze the temporal and spatial variation in soil erosion for different land use patterns, altitudes and slopes. But the application of various models is still limited by some factors. For example, RMMF model is generally used within a county territory; the distributed soil erosion model has not been verified, and the influence of initial soil water content and runoff on soil erosion have not yet been considered in this model. In addition, peak-cluster depression is a special geological and geomorphic type in the karst area of southwest China, and its topographic features contribute to the depositing of most eroded sediment in

the central karst depression. Radionuclide tracing technology can be applied to analyze the sediment interception rate and sediment transport ratio of different types of karst depressions, river beaches and ponds, to determine the sediment source and to establish the sediment yield model of river basins.

At the regional scale, the regional differences and temporal dynamic changes of soil erosion and sediment discharge are investigated, and the dominant factors controlling the sediment discharge are also identified. The relationship between different topographic indexes and regional soil erosion is discussed, and the optimal evaluation index system of regional soil erosion is also determined. Based on the soil erosion model (RULSE), the temporal and spatial variation in soil erosion on the regional scale is investigated.

In terms of research advance, it is suggested that future studies should be focused on the occurrence and development of soil erosion as well as the spatial and temporal evolution patterns in karst rocky desertification. It is necessary to explore the occurrence, development and temporal and spatial evolution patterns of soil erosion in karst areas on a larger scale, and to quantitatively evaluate the amount of soil erosion by combining high-tech remote sensing technology, geophysical exploration and different models. According to the correlation between soil loss and its influencing factors, a reasonable model for ecological restoration management of soil and water conservation and a relevant monitoring and evaluation system should be constructed. This study could provide theoretical and technical support for controlling soil erosion in the karst area of southwest China.

**Key words** karst, rocky desertification, soil erosion, scale, research progress

(编辑 黄晨晖)

---

## 发挥专业优势，保障乡村饮水安全

中国地质调查局岩溶地质研究所在贵州省丹寨县扬武镇番瓮村实施的水资源调蓄开发利用示范工程取得成效，当地政府和人民对此项工程给予高度肯定，并对岩溶所在保障饮水安全、助力乡村振兴中付出的努力表示感谢。

受自然地质条件等限制，丹寨县扬武镇番瓮村水资源供给长期不足、供水管线老化等饮水安全问题突出。岩溶所项目组对接地方需求，经过详细调

查，在番瓮大寨、干果寨、干也寨、把卧寨完成了 3 座引水前池和 80 m<sup>3</sup> 高位蓄水池的建设，完成了 6900 m 引水管网铺设和 8900 m 供水管网的安装，为 186 户村民配套了自动化水表，建立了“前池净水—蓄水池集水调蓄—引水入户”的安全供水示范工程，直接解决 365 户、1800 余人的饮水安全问题，并辅助丹寨县建立了偏远山区水资源管理模式，有效地提升了丹寨县农村供水标准和质量。