

西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望

陈洪松^{1,2}, 冯腾³, 李成志^{1,2,4}, 付智勇^{1,2}, 连晋姣^{1,2}, 王克林^{1,2}

(1. 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, 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100;

3. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 受地质背景的强烈制约, 西南喀斯特地区土壤侵蚀与其他类型区显著不同, 叠加了化学溶蚀、重力侵蚀和流水侵蚀的耦合作用, 呈现地面流失和地下漏失的混合侵蚀机制。从土壤地表侵蚀产沙、土壤地下漏失、土壤侵蚀强度与分级标准、土壤侵蚀过程模拟等几个方面简要综述了该区土壤侵蚀特征, 并对未来研究方向进行了展望。今后应该加强西南喀斯特地区水土流失途径与土壤流失/漏失定位监测技术研究, 进一步发展水土二元流失模拟模型, 为该区土地利用变化的水土保持功能定量评估提供科技支撑, 服务石漠化综合治理和后续规划制订。

关键词: 土壤侵蚀; 地下漏失; 侵蚀强度; 模拟模型; 西南喀斯特地区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0010-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.003

Characteristics of Soil Erosion in the Karst Regions of Southwest China: Research Advance and Prospective

CHEN Hongsong^{1,2}, FENG Teng³, LI Chengzhi^{1,2,4},

FU Zhiyong^{1,2}, LIAN Jinjiao^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Science, Changsha 410125; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100; 3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Restricted heavily by the geology, soil erosion in karst regions of southwest China is obviously different from that in other regions. Due to the couple of chemical dissolution, gravitational erosion and water erosion, the erosion in the region had a mixture mechanism of soil surface loss and underground leakage. This paper summarized the characteristics of soil erosion briefly, including surface soil loss, underground soil leakage, soil erosion intensity and the grading standard, and the simulation of soil erosion process. Further, future research interests were discussed. From the point view of the research advance, the located monitoring of soil and water loss was put forward, and the simulation model for dual soil and water loss should be developed further in karst regions of southwest China. This could give a reference for quantitative assessment of the effects of land use change on soil and water conservation, and then provide service for the control of rock desertification and its subsequent plan design.

Keywords: soil erosion; underground leakage; erosion intensity; simulation model; Karst regions of southwest China

我国是世界上喀斯特面积最大(344.3万 km²)、分布最广、类型最多的国家,其中西南喀斯特地区(约55万 km²)是全球三大喀斯特集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区^[1]。由于特殊的地质背景和强烈的岩溶作用,加上近现代人

类不合理的土地利用,长期以来该区石漠化和贫困问题相互交织,生态保护与社会经济发展矛盾突出^[1-3],成为西部大开发战略实施的重点和难点地区。经过“十一五”“十二五”期间大规模实施退耕还林、封山育林、扶贫开发、生态移民等措施,西南喀斯特地区生态重

建初见成效,石漠化面积已实现由持续增加向“净减少”的重大转变,石漠化治理已进入从前期有效遏制转到深入推进的转型阶段^[4]。但是,该区石漠化防治形式依然严峻,仍有水土流失面积 20.4 万 km²,其中石漠化土地 12 万 km²,坡耕地 7.22 万 km²^[5]。西南喀斯特地区地下溶蚀空间形态发育,土壤流失叠加了化学溶蚀、重力侵蚀和流水侵蚀的耦合作用,呈现地面流失和地下漏失的双重侵蚀机制^[3],而且土壤与母岩之间界面明显,缺乏过渡层,结合力差,是扰动诱发石漠化的重要原因。国外喀斯特地区水土流失研究始于 20 世纪 20 年代,而我国则始于 20 世纪 60 年代,且一直没有受到足够的重视^[6]。通过采用同位素示踪、埋桩和划痕迹、径流小区观测等方法,部分研究者探讨了西南喀斯特地区水土流失途径、特征及土壤侵蚀机理^[7-9],并逐步建立了相应的土壤侵蚀强度分级标准^[10]。但是,由于长期以来西南喀斯特地区基础研究薄弱,对水土流失过程及机理认知不足,对土地退化成因与发生机制了解不清,难以为工程建设提供有效的科技支撑,该区石漠化综合治理工程成效的科学评估以及治理技术与模式的可持续性受到严重影响。

“十三五”是我国全面建设小康社会的关键期,也是建设生态文明建设的重要阶段,迫切需要寓经济发展于生态治理之中,将生态修复与民生改善有机结合。作为西南生态安全屏障区和扶贫攻坚核心区域(国家扶贫重点县 227 个,贫困人口>5 000 万)^[5],随着石漠化综合治理二期工程的全面开展,亟待深入分析土壤侵蚀特征以及目前研究存在的不足之处,为生态治理成效评估与后续规划制定提供科技支撑。在全球气候变化的大背景下,西南喀斯特地区近 60 年来降雨量以每 10 年减少 11.4 mm 的速率下降,极端气候事件逐渐增强,导致旱涝灾害越来越频繁,尤其在云南和广西发生干旱和洪水的风险最大^[11]。因此,系统总结西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状,探讨今后的研究方向,对于该区域水土保持功能提升、社会经济可持续发展具有重要的现实意义和科学价值。

1 土壤地表侵蚀产沙

自 21 世纪初至今,我国研究者在西南喀斯特地区应用径流小区、侵蚀划线法及核素示踪方法等技术手段,分别研究了中低山峡谷、高原、沟谷盆地、峰丛洼地等不同喀斯特地貌类型的土壤地表侵蚀产沙特征,取得了一定的研究成果(表 1)。在贵州北盘江花江段的典型喀斯特中低山峡谷,彭建等^[12]、龙明忠等^[13-14]通过沉沙池、谷坝和侵蚀线监测法,监测到牛场坡 1999—2000 年、板贵坡 1999—2003 年以及查耳岩小区 2003—2005 年的土壤侵蚀模数分别为 1.654~24.558,174.5~

813.6,17.54~23.57 t/(km²·a)。在贵州喀斯特高原,梅再美等^[15]通过对清镇示范区退耕还林(草)和封山育林区的径流小区监测表明,植被恢复能够有效控制水土流失,恢复 2 年的示范区土壤侵蚀模数为 78.4~185.7 t/(km²·a)。在贵州低山沟谷、沟谷盆地和中低山地,贺祥^[16]选择了 6 个典型喀斯特生态治理小流域为研究区域,通过径流小区和侵蚀划线方法监测的不同土地利用类型的土壤侵蚀模数为 47.4~604.5 t/(km²·a)。在贵州省喀斯特中低山丘陵地区,李瑞等^[17]对龙里水土保持科技示范区 10 个不同种植模式的径流小区进行了试验观测,结果表明 2008—2010 年间 28 场典型降雨下灌木、天然草地和撂荒地小区的产沙均较少。

在峰丛洼地地貌类型区,罗为群等^[18]在广西平果县龙何屯,通过侵蚀划线法和径流泥沙分析法监测了山峰顶部、峰坡中部、缓坡部位、坡麓部位和洼地底部的土壤侵蚀特征,发现喀斯特坡面水土流失过程具有一定的“地貌效应”,自山峰顶到洼地底部,地表土壤侵蚀强度逐渐增加,为 4.02~1 441.29 t/(km²·a)。陈洪松等^[9]在广西环江径流小区的监测结果发现,由于地表产流少,不同利用方式坡地土壤侵蚀大部分小于 30 t/(km²·a),但人为干扰(经济林果地种植早期和坡耕地)会加剧地表侵蚀产沙,可达 30~100 t/(km²·a);后续监测进一步表明,如遇暴雨,长期耕作的玉米地种植早期地表侵蚀可达 100~300 t/(km²·a)。彭韬等^[19]在贵州普定径流小区的监测结果发现,2007 年 7 月至 2008 年 12 月,不同利用方式坡面地表侵蚀产沙量为 0.05~62.25 t/(km²·a),其中放牧的稀疏灌丛土壤侵蚀模数最高(62.25 t/(km²·a)),坡耕地次之(7.93 t/(km²·a)),火烧迹地、灌草地、幼林地等均在 5 t/(km²·a)以下。利用小流域独特的地貌特点,部分研究者^[20-25]分别在贵州茂兰、普定和广西环江等 7 个峰丛洼地小流域,通过分析洼地沉积物的¹³⁷Cs 剖面分布特征估算了小流域的多年平均土壤侵蚀速率。其中,森林植被 1979 年遭受严重破坏的普定石人寨小流域最高(平均土壤侵蚀速率达到 2 315 t/(km²·a)),森林植被遭受破坏初期(1979—1990 年)高达 6 000 t/(km²·a);其他 6 个近期土地利用无明显变化的不同程度石漠化的小流域 1963 年以来的平均侵蚀速率为 12.3~57.1 t/(km²·a)。

由上述可见,受地表覆盖情况、土壤厚度空间分布、表层岩溶带结构、地表—地下网络通道水文连通性等因素的综合影响,不同地貌类型区土壤地表侵蚀产沙存在一定的差异。但是,通过径流小区、侵蚀划线或核素示踪手段获得的以自然植被类型为主的碳酸盐岩喀斯特坡面年均地表土壤侵蚀模数大部分比

较微弱($<100\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$),耕作、放牧、砍伐等人为干扰在石漠化初期可加剧地表土壤侵蚀(表 1)。然而,国内早期在开展喀斯特地区水土保持综合治理工作时,由于研究基础薄弱,大多借鉴其他类型区(如黄土高原地区)比较成熟的研究方法和相关研究成果,

忽视了喀斯特地区地质地貌的特殊性、水土流失过程的复杂性和尺度效应,结果事倍功半,收效甚微。由于喀斯特地表产流产沙少,单纯从水土流失防治的角度来看,常用的坡改梯、砌墙保土等措施在土层浅薄的喀斯特坡地应用得不偿失。

表 1 西南喀斯特地区土壤地表侵蚀产沙研究汇总

地理位置	地貌类型	研究地区	研究面积	岩性	估算方法	研究年份(年)	年均降雨量/mm	土壤侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	文献来源
贵州花江峡谷	中低山峡谷	牛场坡	0.263 km ²	纯碳酸盐岩	沉沙池	1999—2000	844	1.654~24.558	[12]
贵州关岭县	中低山峡谷	板贵坡	—	部分碳酸盐岩	谷坝	1999—2003	—	174.5~813.6	[13]
		查尔岩小区	10 m×20 m	碳酸盐岩为主	侵蚀划线法为主	2003—2005	—	17.54~23.57	[14]
贵州清镇	高原	坡面	5 m×10 m	碳酸盐岩为主	径流小区	2002	1091	78.4~185.7	[15]
贵州遵义县	沟谷盆地	龙坝坡面	5 m×20 m	碳酸盐及砂页岩	径流小区	2006	1036	47.4	[16]
贵州沿河县	低山沟谷	沿河梨子坡面	10 m×20 m	碳酸盐及碎屑岩	侵蚀划线	2006	1136	318.6	[16]
贵州毕节市	中低山地	石桥坡面	5 m×20 m	碳酸盐及砂页岩	径流小区	2006	836	604.5	[16]
广西龙何屯	峰丛洼地	坡面各部位	—	纯石灰岩	侵蚀划线法	2006—2007	—	4.02~1441.29	[18]
广西环江县	峰丛洼地	坡面中下部	约 20 m×100 m	白云岩	径流小区	2006—2010	1507	<77.8	[9]
贵州普定县	峰丛洼地	坡面中上部	700~2900 m ²	纯灰岩	径流小区	2007—2008	988	0.05~62.25	[19]
贵州龙里	中低山丘陵	坡面	5 m×20 m	—	径流小区	2008—2010	1158	—	[17]
贵州茂兰县	峰丛洼地	工程碑小流域	0.154 km ²	石灰岩夹少量白云岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2007	—	45.95	[20]
贵州普定县	峰丛洼地	冲头小流域	0.47 km ²	石灰岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2008	—	20.27	[21]
广西环江县	峰丛洼地	成义小流域	0.418 km ²	石灰岩、白云岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2008	—	57.1	[22]
贵州普定县	峰丛洼地	石人寨小流域	0.054 km ²	石灰岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2007	1397	1570	[23]
贵州普定县	峰丛洼地	马官小流域	0.44 km ²	石灰岩、白云岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2007	—	20	[24]
广西环江县	峰丛洼地	古周小流域	0.31、0.804 km ²	石灰岩	¹³⁷ Cs 洼地推算	1963—2011	1499	20.6、12.3	[25]

注:“—”表示文献中没有统计。

2 土壤地下漏失

国外学者在 20 世纪 60,80 年代报道了地下水土流失,之后鲜见这方面的深入研究^[6]。在我国,刘志刚^[26]最早在国内报道地下水土流失,发现广西都安石灰岩区的土壤易于随着径流沿落水洞进入地下空间,随后上世纪 80,90 年代只有零星几篇文献提及了地下流失。袁道先等^[27]依据西南喀斯特地区地质地貌特征,指出该地区呈现的层面多、坡度大、切割深、垂向喀斯特发育剧烈的碳酸盐岩山地环境,为土壤侵蚀提供了动力潜能。进入 21 世纪,通过水文地质调查、分析或者定位监测,喀斯特土壤地下流失在过程认识和机理探究上取得了一些进展。李德文等^[28]通过野外考察发现在喀斯特灰岩区存在“土壤丢失”的现象,与通常意义上的水土流失不同,灰岩区土壤或风化壳不需要远距离的物理冲刷,而是通过局部向下运动从地表消失。徐则民等^[29]调查发现在喀斯特地区的地下空间内经常可以看到沉积有厚层红土,而暗河出口则经常表现为旱季清澈、雨季浑浊的现象,认为地面红土可通过喀斯特溶蚀管道向地下空间排泄,且人工扰动可以显著加快这一过程。冯志刚等^[30]通过研究石灰土剖面的地球化学和矿物学等特征,指出溶沟部位的风化壳,从风化前锋向上的一定深度范围

内为原位残积层,在此深度以上的部分为相邻部位不同风化程度的残积物的搬运堆积。张信宝等^[8]在红土层和岩土界面处发现了大量蠕滑的擦痕,继而提出了在碳酸盐岩坡地土壤流失有地面流失和地下漏失两种方式,地下漏失往往是主要的土壤流失方式。周念清等^[31]通过对贵州普定县的现场调查以及对该区地形特征和水文地质条件进行综合分析,从理论上探讨了水土从降雨到转移至地下空间的过程。唐益群等^[32]通过对喀斯特洞穴的调查,发现地下洞穴内土壤粘粒含量高的土壤在流水的浸润软化下,可向连续贯通的地下洞穴系统蠕滑变形,导致地表土壤流失。张信宝等^[33]提出,从流域侵蚀—泥沙输移的角度,应将喀斯特流域的土壤漏失或水土漏失界定为坡地的土壤地下流失,进入沟道和洼地后的泥沙的运移,属于泥沙输移的范畴,不应界定为地下漏失。

通过野外监测、核素示踪和地下河泥沙监测等技术,对地下地表土壤流失比例、地下土壤流失量取得了初步认识,但是土壤地下漏失的比例研究结果不一。罗为群等^[18]在广西典型峰丛洼地,以侵蚀划线与径流泥沙分析两种方法监测的土壤流失量差值作为土壤地下漏失量,发现坡面山峰顶部、峰坡中部、缓坡部位和坡麓部位 4 个地貌部位土壤流失均以地下漏

失为主(65.56%~96.24%),但洼地底部地下土壤流失比例较小(38.68%),各地貌部位地下土壤侵蚀模数为49.09~1 409.44 t/(km²·a)。何永彬等^[20]在贵州茂兰峰丛洼地区的工程碑草地洼地典型小流域进行了同位素¹³⁷Cs示踪分析,认为地表土壤流失和地下裂隙土壤流失的比例为70.13%和29.87%,土壤地下漏失速率为29.35 t/(km²·a),与张信宝等^[34]通过土壤硅酸盐矿物物质平衡估算的结果类似。冯腾等^[35]通过分析典型峰丛洼地的岩溶裂隙中¹³⁷Cs分布,认为土壤颗粒在裂隙中向下迁移的量极小。李晋等^[36]通过对王家寨喀斯特小流域地下河出口断面的连续一年的定位观测,认为地下土壤侵蚀模数为0.42 t/(km²·a),占土壤流失总量的0.81%,主要原因是流域内有一落水洞因人工干扰,土壤不能通过落水洞进入地下河。魏兴萍等^[37]通过同位素¹³⁷Cs和配比法测定了重庆喀斯特槽谷区地表地下水土流失的比例分别为74.55%和25.45%,同时发现从坡面通过裂隙漏失进入溶洞的地表土壤几乎为0。Luo等^[38]等通过对贵州普定和贞丰2个典型喀斯特区样地内树根年龄的测试分析,认为地下流失量占总土壤侵蚀量的2/3。而室内模拟试验主要集中在地下土壤侵蚀对降雨强度、地下孔隙度等影响因素的响应^[39-40],与野外实际情况差异较大。由于喀斯特裂隙结构的地下隐蔽性、复杂性和高度异质性,土壤地下流失的监测和研究技术还不够成熟,对土壤地下流失的发生、发展规律及影响因素的作用机制尚未形成系统确切的结论,需要因地制宜的改进或发展新的研究途径和方法^[41]。

3 土壤容许流失量和侵蚀强度分级标准

西南喀斯特地区水土流失易引发石漠化问题,除受喀斯特地区特殊的土壤混合侵蚀影响外,喀斯特基

岩碳酸盐岩的风化成土作用十分缓慢也是其重要原因之一^[42]。据已有研究资料表明,碳酸盐岩风化成土的快慢与碳酸盐岩溶蚀速率以及碳酸盐岩酸不溶物含量(一般<4%)的高低成正比,广西碳酸盐岩溶蚀风化形成1 mm厚的土层需要250~850年,贵州碳酸盐岩溶蚀风化形成1 mm厚的土层需要630~7 880年,比一般非喀斯特地区慢10~40倍^[43]。碳酸盐岩风化形成的石灰土,其理化性质有别于地带性土壤,表现为富钙、偏碱性、有效营养元素供给不足且不平衡,质地偏黏,有效水分含量偏低^[42,44]。与同纬度红壤相比,石灰土养分含量较高,但一旦开垦利用,养分含量急剧降低^[45]。对于容许流失量的指标也有不同的见解,如李阳兵等^[46]研究估算连续性碳酸盐岩地区、碳酸盐岩夹碎屑岩地区和碳酸盐岩与碎屑岩互层地区的土壤容许流失量分别小于6.84,45.53,103.46 t/(km²·a);甄晓君^[47]以成土速率为土壤容许流失量,认为重庆中梁山喀斯特区土壤容许侵蚀的范围为19.02~49.01 t/(km²·a);白晓永等^[48]提出岩溶区的土壤允许流失量具有空间异质性,在极纯、较纯和不纯的碳酸盐岩地区分别为20,100,250 t/(km²·a)。何永彬等^[49]以贵州茂兰自然保护区内有关岩石结构及化学组成资料分析,认为该地区土壤允许侵蚀量为13.51 t/(km²·a)。

针对喀斯特地区土壤侵蚀强度分级标准,不同学者之间的研究结果存在一定的差异(表2)。随着西南喀斯特地区土壤侵蚀研究的深入,研究者普遍认为水利部1997年颁布的土壤强度分类分级标准对于特殊的喀斯特环境意义不大,亟需针对喀斯特地区土壤侵蚀特征来确定相应的分级指标体系。目前,结合已有径流小区监测结果和土壤容许流失量估算结果,西南喀斯特地区采用的主要是水利部2009年颁布的土壤侵蚀强度分级标准。

表 2 西南喀斯特地区土壤侵蚀强度分级标准 单位:t/(km²·a)

文献来源	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
[50]	<200,500,1000	200,500,1000~2500	2500~5000	5000~8000	8000~15000	>15000
[51]	<68	68~100	100~200	200~500	>500	
[52]	<50	50~100	100~200	200~500	500~1000	>1000
[53]	<46	46~230	230~460	460~700	700~1300	>1300
[10]	<30	30~100	100~200	200~500	500~1000	>1000
[54]	<50	50~300	300~1500	1500~3000	3000~6000	>6000

4 土壤侵蚀模型模拟

喀斯特地区土壤侵蚀的研究起步较晚,自20世纪80年代初才陆续在西爱尔兰、地中海地区、澳大利亚以及我国西南喀斯特地区等地展开。之后,随着野外定位观测、核素示踪、与遥感和地理信息系统相结合等各种研究技术的应用以及对土壤侵蚀过程和机理进一步认识,各国学者尝试在喀斯特地区建立适用于喀斯特地区的或者改进已在非喀斯特区应用

成功的土壤侵蚀模型。国外的研究主要集中在侵蚀模型的探讨上。Kheir等^[55]提出结合土壤可蚀性、地形特征、土地覆盖/利用、降雨侵蚀力与GIS技术开发区域侵蚀模型,对比发现添加与水分入渗相关的岩性参数进行计算,精度更高。López-Vicente等^[56]在西班牙喀斯特地区,对比了3种汇流方法计算的RMMF有效径流及土壤流失量,指出在研究区域内使用复合汇流方法(MDD8),即允许径流从一个栅格流向周围多个可能

得栅格,可获得较高的模拟精度。Vega 等^[57]在古巴热带喀斯特地区结合喀斯特发育程度提出 EVERC 模型(Erosion Evaluation in Karstic Regions); Geissen 等^[58]在墨西哥东南部结合实地调查的坡度、植被覆盖度、裸岩率和土壤侵蚀资料与自动分类树归纳法,制作出指导土壤侵蚀危险性制图的定性模型。

在我国西南喀斯特地区,高翔等^[59]提出喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型,尝试通过建立不同坡度条件下的土壤侵蚀模数的多因子模型,但未见应用报道,效果有待验证。而已在我国西南喀斯特地区使用的土壤侵蚀模型有 USLE/RUSLE、RMMF、WEPP 及 SWAT 等。其中,USLE/RUSLE 是经验统计模型,所需参数少,在喀斯特地区应用较多。汪文富^[60]在前人研究工作的基础上,在贵州普定后寨河小流域使用了土壤侵蚀定量模型(RUSLE),得出流域实际的土壤侵蚀图、潜在的土壤侵蚀图等,但缺乏相关数据的验证,结果可信度难以确定。许月卿等^[61]以贵州省猫跳河流域为研究区,应用 RUSLE 计算研究区的土壤侵蚀量。王尧^[62]基于 GIS 和 RUSLE 对贵州乌江流域的现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量进行了模拟计算。倪九派等^[63]在重庆市岩溶槽谷区小流域使用引入石漠化因子的 RUSLE 模型进行了土壤侵蚀量的计算。曾凌云等^[64]采用 RUSLE 模型估算了贵州红枫湖流域土壤侵蚀,部分参数利用经验公式换算而来,模拟精度无法验证。王珊等^[65]以 RUSLE 为基础,对“珠治”工程广西项目区河池片区进行了土壤侵蚀遥感监测,定量研究了治理措施实施后喀斯特地区的土壤侵蚀变化规律。Chen 等^[66]使用 RUSLE₂ 模型对桂江流域进行土壤侵蚀模拟估算,并使用水文站泥沙数据对 C 和 P 因子进行了校准,在全流域模拟结果吻合的情况下,各子流域误差为(-15.07%)~25.31%。Feng 等^[25]通过校正坡长因子,发现在峰丛洼地小流域 RUSLE 模型模拟结果与¹³⁷Cs 推算结果很吻合。当然,在 USLE/RUSLE 模型使用过程中,由于相关基础研究薄弱,且缺乏野外试验的支持,部分参数无法直接获取,多使用经验公式换算或借鉴其他类型区,模拟结果具有较大的不确定性。至于其他模型,应用效果不一。余丹等^[67]在贵州猫跳河流域成功构建了 SWAT 模型,模拟结果良好,但需要大量基础资料构建模型,难以推广应用。龙明忠等^[68]使用 WEPP 模型在贵州花江喀斯特石漠化地区进行了适用性的探讨,发现该模型不适用于直接估算喀斯特地区土壤侵蚀。陈美洪等^[69]应用第一次全国水利普查水土保持专项数据,分析了喀斯特地区实际土地利用单元地块空间统计特征及相应侵蚀规律。Feng 等^[70]在使用 RMMF 模型模拟广西古周小流域时,针对喀斯特地区的水文地质特点,使用多流向汇流方式和添加渗漏比例参数进行汇流计

算,模拟结果与¹³⁷Cs 推算结果吻合,效果良好。之后,李成志等^[71]将该模型应用县域尺度(广西环江县)上,区分喀斯特与非喀斯特区进行参数设置,模拟结果与径流小区和水文站泥沙观测数据相近,效果良好。

5 结论与展望

受地质背景强烈制约的西南喀斯特地区,其水土流失过程具有独特的地表和地下双重机制,区域内地表土被空间分布的不连续和高异质性,以及地下各形态喀斯特溶蚀系统的隐蔽和复杂性,使得传统土壤侵蚀成熟理论和技术方法的应用受到一定的限制。目前在地表、地下土壤侵蚀特征研究方面虽然取得了较多成果,但在因地制宜研究手段开发、地下漏失强度定量监测以及土壤流失过程影响因素分析等方面仍需要系统深入研究。

长期以来,西南喀斯特地区开展的土壤侵蚀研究多采用非喀斯特地区土壤水蚀的成熟技术方法。一方面,针对地表土壤侵蚀特征研究,目前主要集中采用各种定位观测(埋桩划痕迹、径流小区观测、同位素示踪等)和模型模拟方法。其中定位观测方法具有获得数据可靠的优点,但径流小区、埋桩划痕迹法等存在投资大、历时长、尺度单一的问题,尚需要针对不同尺度,在多种地貌类型、植被类型下开展更多长期定位观测试验。同位素示踪方法多成功应用于峰丛洼地地貌类型中洼地沉积物的¹³⁷Cs 等核素记录方面,对其他示踪同位素及其在各地貌类型区的坡面原位适用性研究方面需要深入探讨。目前应用的土壤侵蚀模型模拟方法大多在非喀斯特地区建立,已有少量研究针对喀斯特坡面部分特殊的土壤侵蚀过程机理和环境特征,对个别地表土壤侵蚀模型的改进和校正进行了初步尝试,但仍需要全面深入考虑喀斯特地表土壤侵蚀的影响机理,发展喀斯特地区土壤地表侵蚀模拟的专有模型。另一方面,喀斯特地下土壤漏失是综合了化学溶蚀、重力侵蚀和流水侵蚀的混合侵蚀机制,针对土壤地下漏失特征的研究手段更加欠缺,目前仅有少量学者尝试应用了埋桩划痕迹法、核素示踪方法、树根年龄和室内模拟方法,对于模型模拟方法尚无涉及,亟待改进或发展新的因地制宜的研究方法。

在喀斯特地表环境和地下空间结构复杂性以及现有技术方法的限制下,已有研究在地表土壤侵蚀特征方面取得了较多的成果,获得了自然条件下地表土壤侵蚀模数较微弱,人为干扰在石漠化初期会造成侵蚀加剧的共识,但是对于土壤地下流失的途径及地下漏失模数尚缺乏定论,也难以定量区分尺度、喀斯特结构、植被类型或土地利用方式对地表和地下水流失过程的影响程度。今后应该在深入分析西南喀斯特地区水土流失途径与研发土壤流失/漏失定位监测技术的基础上,加强定量评估土壤地下漏失程度、识

别地表和地下土壤流失主要影响因素作用机制的研究,逐步发展喀斯特地区专有的水土二元流失模拟模型,以为该区土地利用变化的水土保持功能定量评估和石漠化综合治理后续方案制定提供科技支撑。

参考文献:

- [1] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132(3): 1-12.
- [2] 王世杰,李阳兵.喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J].*地球科学进展*,2007,22(6):573-582.
- [3] 张信宝,王世杰,曹建华,等.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.
- [4] 王克林,岳跃民,马祖陆,等.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.
- [5] 国家林业局.中国石漠化状况公报[N].*中国绿色时报*,2012-6-18(第3版).
- [6] 李晋,熊康宁.我国喀斯特地区水土流失研究进展[J].*土壤通报*,2012,43(4):1001-1007.
- [7] 曹建华,鲁胜利,杨德生,等.西南岩溶区水土流失过程及防治对策[J].*中国水土保持科学*,2011,9(2):52-56.
- [8] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].*地球与环境*,2007,35(3):202-206.
- [9] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式下坡面产流产沙特征初探[J].*农业工程学报*,2012,28(16):121-126.
- [10] 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[J].*中国水土保持科学*,2008,6(6):1-7,20.
- [11] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064002.
- [12] 彭建,杨明德.贵州花江喀斯特峡谷水土流失状态分析[J].*山地学报*,2001,19(6):511-515.
- [13] 龙明忠,杨洁,吴克华.喀斯特峡谷区不同等级石漠化土壤侵蚀对比研究:以贵州花江示范区为例[J].*贵州师范大学学报(自然科学版)*,2006,24(1):25-30.
- [14] 龙明忠.喀斯特峡谷区生态治理的水土保持效应与土壤侵蚀模型[D].贵阳:贵州师范大学,2006.
- [15] 梅再美,熊康宁.喀斯特地区水土流失动态特征及生态效益评价:以贵州清镇退耕还林(草)示范区为例[J].*中国岩溶*,2003,22(2):136-143.
- [16] 贺祥.喀斯特生态治理区的土壤侵蚀特征空间规律研究[D].贵阳:贵州师范大学,2007.
- [17] 李瑞,刘瑞禄,吕涛,等.贵州省喀斯特地区典型小流域不同种植模式坡面径流产沙研究[J].*水土保持通报*,2012,32(5):132-135.
- [18] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].*中国水土保持*,2008(12):46-49.
- [19] 彭韬,杨涛,王世杰,等.喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J].*地球与环境*,2009,37(2):126-130.
- [20] 何永彬,李豪,张信宝,等.贵州茂兰峰丛草地洼地小流域侵蚀产沙的 ^{137}Cs 法研究[J].*中国岩溶*,2009,28(2):181-188.
- [21] 白晓永,张信宝,王世杰,等.普定冲头峰丛洼地泥沙沉积速率的 ^{137}Cs 法测定[J].*地球与环境*,2009,37(2):142-146.
- [22] 李豪,张信宝,白晓永,等.桂西北喀斯特丘陵区峰丛洼地小流域泥沙堆积的 ^{137}Cs 示踪研究[J].*泥沙研究*,2010(1):17-24.
- [23] Zhang X B, Bai X Y, Liu X B. Application of a ^{137}Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the catchment of the Guizhou Plateau, China [J]. *Science China Earth Science*, 2011,54(3): 431-437.
- [24] Bai X Y. Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium - 137 technique in a Chinese polygonal karst depression [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2151-2158.
- [25] Feng T, Chen H S, 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(1): 217-224.
- [26] 刘志刚.广西都安县石灰岩地区土壤侵蚀的特点和水土保持工作的意见[J].*林业科学*,1963,8(4):354-360.
- [27] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.
- [28] 李德文,崔之久,刘耕年,等.岩溶风化壳形成演化及其循环意义[J].*中国岩溶*,2001,20(3):183-188.
- [29] 徐则民,黄润秋,唐正光,等.中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展[J].*地球与环境*,2005,33(4):29-36.
- [30] 冯志刚,王世杰,刘秀明,等.微地域搬运:碳酸盐岩红色风化壳形成过程的一种方式[J].*地质学报*,2007,81(1):127-138.
- [31] 周念清,李彩霞,江思珉,等.普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究[J].*水土保持通报*,2009,29(1):7-11.
- [32] 唐益群,张晓晖,周洁,等.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.
- [33] 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.
- [34] 张信宝,王世杰,曹建华.西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J].*地球与环境*,2009,37(2):97-102.
- [35] 冯腾,陈洪松,张伟,等.桂西北喀斯特坡地土壤 ^{137}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.
- [36] 李晋,熊康宁,王仙攀.喀斯特地区小流域地下水土流失观测研究[J].*中国水土保持*,2012(6):38-40.
- [37] 魏兴萍,谢德体,倪九派,等.重庆岩溶槽谷区山坡土壤

- 的漏失研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 462-473.
- [38] Luo M, Zhou Y C, Wang K K. Soil erosion characteristics according to tree-rings in a karst area [J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(4): 257-262.
- [39] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 24-28.
- [40] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2067-2079.
- [41] 冯腾. 喀斯特峰丛洼地小流域土壤侵蚀特征及地表流失模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [42] 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.
- [43] 王世杰, 季宏军, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441-449.
- [44] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.
- [45] Chen H S, Zhang W, Wang K L, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1086-1093.
- [46] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布[J]. 地球与环境, 2006, 34(4): 36-40.
- [47] 甄晓君. 岩溶区不同土地利用方式下土壤容许侵蚀研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [48] 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[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1315-1322.
- [49] 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.
- [50] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [51] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀[J]. 山地研究, 1989, 7(4): 255-260.
- [52] 韦启璠. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径[J]. 水土保持研究, 1996, 3(4): 72-76.
- [53] 陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 31-36.
- [54] 中华人民共和国水利部. 岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [55] Kheir R B, Abdallah C, Dalgaard T, et al. Using visual erosion features to validate the application of water erosion models in Mediterranean karst environments: the case study of Lebanon [J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie, 2010, 54(2): 27-49.
- [56] López-Vicente M, Navas A. Routing runoff and soil particles in a distributed model with GIS: implications for soil protection in mountain agricultural landscapes [J]. Land Degradation & Development, 2010, 21(2): 100-109.
- [57] Vega M B, Febles J M. Application of the new method of evaluation of the soil erosion (EVERC) and the model MMF in soils of the Mamposton cattle production basin in Havana province, Cuba [J]. Cuban Journal of Agricultural Science, 2008, 42(3): 306-314.
- [58] Geissen V, de Llergo-Juarez J, Galindo-Alcantara A, et al. Superficial soil losses and karstification in Macuspana, Tabasco, Southeast of Mexico [J]. Agrociencia, 2008, 42(6): 605-614.
- [59] 高翔, 蔡雄飞, 王济, 等. 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.
- [60] 汪文富. 贵州普定后寨河流域土壤侵蚀模型与应用研究[J]. 贵州地质, 2001, 18(2): 99-106.
- [61] 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, 28(4): 67-71.
- [62] 王尧. 喀斯特地区土壤侵蚀模拟研究[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [63] 倪九派, 袁道先, 谢德体, 等. 基于 GIS 的岩溶槽谷区小流域土壤侵蚀量估算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 217-225.
- [64] 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.
- [65] 王珊, 史明昌, 赵丹丹, 等. 广西岩溶地区土壤侵蚀变化遥感监测: 以“珠治”工程广西项目区河池片区为例[J]. 中国水土保持, 2012(3): 32-34.
- [66] Chen P, Lian Y Q. Modeling of soil loss and its impact factors in the Guijiang Karst River Basin in southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 352.
- [67] 余丹, 孙丽娜, 于俊峰, 等. 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.
- [68] 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[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 201-207.
- [69] 陈美洪, 魏欣, 张科利, 等. 基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 16-21.
- [70] Feng T, Chen H S, Wang K L, et al. 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.
- [71] 李成志, 连晋蛟, 陈洪松, 等. 县域喀斯特地区土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 39-47.