

西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展

戴全厚, 严友进

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要: 日趋严重的西南喀斯特石漠化问题, 已严重威胁该地区的生态环境安全、人民生活和社会经济发展。系统综述了喀斯特石漠化的研究进展, 主要针对石漠化概念、石漠化类型界定标准、成因等进行了论述。同时, 针对喀斯特地区水土流失的研究动态进行了总结, 阐述了石漠化与水土流失的相互关系, 重点揭示了当前喀斯特地区地下水土流失研究存在的问题与不足。进而根据当前研究热点和不足进行了展望, 提出下阶段的研究重点, 即: 根据当前工作重心重新制定石漠化类型界定标准, 从研究方法和技术上革新, 推进喀斯特地下水土流失机理及量化研究, 重视喀斯特坡地地下水污染问题, 研发科学、有效的地表—地下水土流失防治措施。

关键词: 喀斯特; 石漠化; 地下水土流失; 研究展望

中图分类号: S157; P90

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0001-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.001

Research Progress of Karst Rocky Desertification and Soil Erosion in Southwest China

DAI Quanhong, YAN Youjin

(Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Karst rocky desertification is a growing problem in southwest China, which has seriously threatened the ecological and environmental security, the people's livelihood and even the social development in the region. This paper systematically reviews the research progress of karst rocky desertification, including the concept of karst rocky desertification, the types, criteria and causes of desertification, and so on. Meanwhile, this paper summarizes the research trends of soil and water loss in karst area and expounds the relationship between rocky desertification and soil erosion, and highlights the existing problems and shortcomings in the current research on underground soil and water loss in karst area. And then according to the current research hot spots and shortcomings of the prospects, the research focus of next stage is proposed, i. e., to re-establish the type of rocky desertification standards based on the current work. Through the innovation of research methods and technical, the karst groundwater erosion mechanism and quantitative research would be promoted. And paying more attention to the problem of groundwater pollution in karst slope land, the scientific and effective measures for preventing and controlling surface loss and underground leakage are to be developed.

Keywords: Karst; rocky desertification; underground soil and water loss; research progress

喀斯特石漠化(Karst rocky desertification)是我国三大生态灾害之一,是指亚热带脆弱喀斯特环境条件下不合理的人类活动导致的土壤严重流失、基岩大面积裸露、地表土被不连续和土地退化过程^[1-2]。不断恶化的石漠化问题威胁着生态环境安全,制约着社会经济发展,对人民生产、生活造成严重影响^[3-4]。全球喀斯特面积约 2 200 万 km², 约占陆地总面积的 12%。我国喀斯特主要分布在以贵州省为中心的西

南喀斯特地区,是全球三大岩溶集中分布区之一,该区连片裸露碳酸盐岩面积最大,岩溶发育最为强烈。根据《中国石漠化状况公报》,截至 2011 年底,西南喀斯特地区主要涉及黔、滇、桂、湘、鄂、渝、川和粤八省(区、市),全区国土面积 107.1 万 km²,喀斯特石漠化面积 45.2 万 km²^[5]。西南喀斯特地区是我国珠江、长江水源的重要补给区,具有重要的生态屏障作用^[6-7]。严重的石漠化危及该地区生态安全,制约经

济社会可持续发展。

日益严重的石漠化问题已成为当前地理学界的研究热点,大批国内外专家、学者分别从喀斯特石漠化的自然背景和人地关系等角度对石漠化的发生、发展进行了研究^[8-11]。当前关于喀斯特石漠化研究仍存在较多科学问题,尤其是石漠化形成的主导因素和喀斯特坡地水土流失的相关研究有待进一步探索。为此,本文首先系统综述了石漠化概念、石漠化程度界定、石漠化形成原因等相关研究进展;同时,综述了喀斯特地区地表—地下水流失的研究进展,阐明石漠化与该区水土流失的相互关系,揭示其存在的问题与不足,并对未来的研究进行了展望,以期进一步推动石漠化治理和水土流失防治的深入研究。

1 石漠化概念与类型界定

1.1 石漠化概念及演绎

石漠化的概念是 1997 年袁道先基于荒漠化概念,结合喀斯特“石化”“石山荒漠化”“石质荒漠化”等概念提出来的,其表征喀斯特地表由植被、土壤覆盖转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程^[12]。随着学科发展、研究深入和多学科的交叉,学界对石漠化概念和内涵认识不统一,存有一定争议,相关学者在研究过程中对石漠化概念提出了各自的理解。

屠玉麟^[13]从石漠化的自然背景和成因方面对石漠化进行定义,他认为石漠化是指在喀斯特自然背景下,人为活动对地表植被、土壤的破坏造成水土流失、基岩大面积裸露、土地生产力下降的土地退化过程。该定义忽略了气候环境对石漠化形成的影响,存在一定的局限性;王德炉等^[14]认为石漠化即石质荒漠化,指在我国南方湿润地区碳酸盐岩发育的喀斯特脆弱生态环境下,由于人为干扰造成植被破坏、退化,乃至丧失,从而导致地表水土资源流失,土地生产力降低,基岩大面积裸露于地表(或砾石堆积)的一种类似荒漠景观的土地退化过程;熊康宁等^[15]认为,喀斯特石漠化是在喀斯特脆弱生态环境下,人类不合理的社会经济活动,造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退丧失,地表在视觉上呈现类似于荒漠化景观的演变过程;王世杰^[16]认为,石漠化是一个广义的概念,指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,不合理的人类活动造成土壤严重侵蚀、土地生产力下降、地表呈现出类似荒漠化景观的土地退化过程。

综合来说,石漠化是在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,自然因素及不合理的人类社会活动造成地表植被破坏、退化,导致地表土壤资源大面积缺失,下伏碳酸盐岩大面积出露,土地生产力下降,地表呈现岩石大面积裸露类似荒漠化景观的土地退化过程。

1.2 石漠化类型界定

当前石漠化地区的工作重心已从研究初期的石漠化形成背景、机理等方面转移到喀斯特石漠化地区植被恢复和生态恢复重建。在此过程中正确地判别石漠化程度是制定科学、合理的石漠化治理方案的重要前提,具有重要的理论和实践作用。由于不同学者对石漠化概念的理解不同,在石漠化等级划分界定上亦存在多种划分标准。

喀斯特石漠化最醒目的景观特征是地表植被退化、土壤不连续和基岩大面积裸露,因此,一些学者采用地表裸露面积在土地面积所占的比例进行划分石漠化程度等级(表 1)^[17-18]。由于该分级指标过于单一,不能完全反映出各石漠化程度的特征,多数学者结合基岩裸露率、土被覆盖、土壤厚度、坡度等多项指标,划分石漠化程度等级,如蒋忠诚等^[19]考虑了石漠化分级的可操作性及简易性等方面,以岩石裸露率为主要界定指标,将石漠化划分为 5 个等级;熊康宁等^[15]综合植被覆盖率、土被覆盖度和岩石裸露率等因素,将石漠化划分为 6 个等级:无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化和极强度石漠化(表 2),该分类方法为现行通用的石漠化程度分级标准。苏维词^[20]参考了岩石裸露率、土被覆盖率、坡度、农业人口密度等因素作为界定石漠化程度的分级标准,将石漠化程度划分为 6 个等级:无土地石漠化区、潜在土地石漠化、轻度土地石漠化、中度土地石漠化、强度土地石漠化和极强度土地石漠化;张信宝等^[21]认为石漠化程度等级划分时应叠加考虑土壤流失程度和地面物质组成类型,并以土壤流失程度为主要指标将石漠化程度划分为 4 个一级类型和 13 个二级分类(表 3);宋同清等^[22]在参考前人的石漠化等级划分标准后提出,石漠化等级划分应包含直观性、主导性、可操作性、综合代表性和可推广性强原则,综合考虑了基岩裸露率和植被覆盖率将石漠化划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化 5 个等级。

表 1 以岩石裸露率为指标的喀斯特石漠化程度分级标准

石漠化等级	单位: %	
	基岩裸露率 ^[17]	基岩裸露率 ^[18]
轻度石漠化	>30~<50	>30~<50
中度石漠化	50~70	50~80
严重石漠化	>70	>80

笔者认为现行的石漠化分级标准具有可操作性和综合代表性,而这些石漠化类型划分方式均只从岩石裸露情况、植被和土被覆盖特征等景观特征作为主要的划分标准,缺乏对石漠化前后的地表植被、土被、土地生产力变化、土地恢复潜力等的考虑。这些石漠

化程度分级标准主要考虑的是目视范围内的土地石漠化情况,在坡面、小流域和区域尺度上,应有不同的分类分级标准。同时,这些划分标准在实际操作时也存在一些弊端。如贵州茂兰和广西木论的喀斯特地区地表林草覆盖度大,但是地表土被缺失,基岩大面积裸露。现行的分级标准在对这类土地进行石漠化程度分级时,常常无法准确地判定这类土地的石漠化程度,这也是当前科技工作者极为困惑的问题。土地生产力下降是石漠化的一个重要特征,从石漠化程度分级和植被恢复角度方面可知土地恢复潜力的变化。在喀斯特地区,假如将一块岩石出露,地表上不连续的林地植被全部采伐后,地表呈现出典型的喀斯特石漠化景观,但是该地块的土地恢复潜力仍未消失。通过人工造林等措施后,植被和生态系统也能够快速恢复。因此,为适应当前的研究工作,对石漠化程度的分级标准应重点考虑空间尺度和土地恢复潜力。

表 2 熊康宁等^[15]制定的石漠化程度分级标准

石漠化等级	基岩裸露率/%	土被覆盖度/%	坡度/(°)	植被+土被/%	土被厚度/cm
无明显石漠化	<40	>60	<15	>70	>20
潜在石漠化	>40	<60	>15	50~70	<20
轻度石漠化	>60	<30	>18	35~50	<15
中度石漠化	>70	<20	>22	20~50	<10
强度石漠化	>80	<10	>25	10~20	<5
极强度石漠化	>90	<5	>30	<10	<3

表 3 张信宝等^[21]制定的石漠化程度分级

一级分类	二级分类	划分指标
无石漠化	无石漠化土质坡地	土壤流失程度和地面物质组成类型
	无石漠化土质为主坡地	
	无石漠化土石质坡地	
	无石漠化石质为主坡地	
轻度石漠化	无石漠化石质坡地	土壤流失程度和地面物质组成类型
	轻度石漠化土质为主坡地	
	轻度石漠化土石质坡地	
	轻度石漠化石质为主坡地	
中度石漠化	轻度石漠化石质坡地	土壤流失程度和地面物质组成类型
	中度石漠化土质坡地	
	中度石漠化石质为主坡地	
强度石漠化	中度石漠化石质坡地	土壤流失程度和地面物质组成类型
	强度石漠化石质为主坡地	

2 石漠化成因

目前,学界普遍认为自然条件与不合理的人类生产活动是导致石漠化形成的两大主要原因。在前期研究中常将石漠化等同于水土流失,关于石漠化成因的研究,主要考虑的是单一或多种自然因素对石漠化形成和发展的影响,诸如地质地貌、岩性、气象(降雨、温度)等因素^[11,19,23-24]。随着多学科交叉和研究的深入,研究人员开始重视人文活动对石漠化的影响。

2.1 地质地貌背景

根据国际岩溶对比(IGCP 299、IGCP 379)表明,世界上各地区存在多种地质生态背景的喀斯特生态系统,不同的生态地质背景造就不同的喀斯特生态系统。如在第三系大孔隙性(16%~44%)碳酸盐岩广泛分布的美国东南部、中美洲和东南亚等地区,喀斯特双层水文结构带来的环境负效应和石漠化问题不是很严重^[25]。我国西南喀斯特地区位于青藏高原的东南翼,青藏运动挤压使得西南地区普遍发生褶皱作用,形成高低起伏的古老碳酸盐基岩,塑造了如峰林、山地、丘陵、洼地、槽谷及盆地等陡峻而破碎的喀斯特高原地貌景观^[26-30],造成地表切割度和地下坡度较大,地势高差悬殊,为该地区水土流失提供了驱动力^[20]。研究表明,喀斯特地区构造活动强烈的河流上游及河谷地带是典型石漠化的集中区域,如乌江流域上游、南盘江、北盘江流域等区域石漠化均较为严重。同时,因构造运动形成的不同喀斯特高原地貌,其石漠化发生率存在较大差异,石漠化更容易在地势高差较大的峰林洼地、峰丛洼地和岩溶断陷盆地区发生、发展^[31-32]。在新生代抬升运动挤压导致该地区分布的碳酸盐岩孔隙度小,持水性差。自震旦纪到三叠纪,西南喀斯特地区下伏地层沉积了巨厚的碳酸盐岩,为石漠化的形成奠定了物质基础^[33]。由于西南地区水分过程丰富,长期强烈的水化学过程使得喀斯特地区存在地表—地下双重空间结构,为地表水土资源丢失提供了有利条件^[34-35]。

2.2 岩性

岩性对土壤的成土速率、土壤理化性质、抗蚀性等都有直接的影响^[36]。碳酸盐岩风化成土是喀斯特地区最主要的成土机制,由于喀斯特地区成土母岩主要为海相碳酸盐岩,其特点为岩性坚硬,易在水化学过程中发生溶蚀作用,但是由于其组成成分主要为可溶性矿物,酸不溶物仅占很小一部分^[37]。研究表明西南喀斯特地区碳酸盐岩中可溶性矿物一般高达 90%,酸不溶物在 10%以下,而部分地区下伏的碳酸盐岩中酸不溶物含量低于 1%^[38]。成土物源匮乏导致碳酸盐岩的风化残余物很少,成土速率极为缓慢。喀斯特土壤资源的累积需要一个非常长的时间序列,柴宗新^[39]研究发现碳酸盐岩的风化成土速率为 11 t/(km²·a);王世杰等^[40]研究得到纯碳酸盐岩风化形成 1 cm 厚的土,需要 8 000 年左右。调查统计得到贵州省石漠化地区下伏基岩主要为纯石灰岩和连续型纯白云岩,分布面积高达 78 669 km²,占全省总面积的 44.66%,这也导致贵州省是西南喀斯特片区中石漠化最集中、面积最大、程度最严重的省份^[1,5]。喀斯特地区野外土壤剖面调查发现,碳酸盐岩发育的土壤缺少风化母质的过渡层

(C 层),使得土壤与岩石之间的亲和力和黏着力差,该界面易成为径流下渗流失的通道,极易发生水土流失和土体滑移^[41-42]。

受构造运动和强烈的溶蚀作用,西南喀斯特地区下伏的碳酸盐岩形成由溶缝、岩溶裂隙、落水洞等组成的地下岩溶管道系统,与地表的峰丛、峰林、洼地、槽谷等形成双层空间开放的水文系统^[26,29,32]。特殊的“二元结构”导致喀斯特地区水土流失存在地表和地下两个方向上的流失,在人为活动扰动下加速了石漠化的发展。

2.3 人为活动

人为活动干扰是石漠化发展的主导因素,其最主要的作用是对地表植被和土被的破坏加速水土流失,导致石漠化加剧。西南喀斯特地区多丘陵、山地,缺少平原支撑,人类活动对土地的影响主要建立在生产、生活的需求上。在很长的一段时期内,为满足用地需求,毁林开荒、陡坡耕作是该地区农业生产的主要方式。地表植被破坏,土壤结构改变,在降雨作用下发生水土流失,成为影响石漠化发生的主要因素^[43]。当前,关于人类活动对石漠化的影响主要从耕作方式、土地利用变化、人地关系等方面着手开展石漠化成因、植被演替和石漠化治理的研究^[44-45]。研究表明,毁林开荒减小土壤水稳性团聚体数量,加速土壤有机碳的分解和流失,同时也降低了土壤含水量^[46]。人口增长和农作物结构变化是加速西南喀斯特石漠化发展的主要驱动因素。在很长的一段农耕时代中,喀斯特石漠化地区农业生产力低,粮食产量仅能满足基本的温饱,这一时期内人口增长缓慢,对土地的破坏程度较低,石漠化发展也较为缓慢^[47]。粮食产量一直是制约喀斯特地区人口增加的关键因素,除开拓空间,增加开荒面积,引入高产粮食作物是一种高效的方法,对土地要求不高、抗逆性强、产量高的玉米的引入是第一次加速石漠化发展的一个重要导火线。研究表明,明清时期,玉米的引入是导致喀斯特地区石漠化面积大量增加的主要原因。玉米的种植使得人口增加,同时也对环境造成极大破坏,导致土地退化。如此为了满足日益增加的粮食需求,只能继续毁林开荒,形成恶性循环,出现第一次石漠化急速发展^[48-50]。建国以后,人口进入第二次急速增长阶段,对粮食的需求量更多,这时期出现第二次石漠化增加阶段。对喀斯特地区环境破坏最严重的是“大跃进”时期,除保留部分森林储备,其余的植被几乎全用于大炼钢铁^[51],这一时期对地表植被破坏最为严重,导致喀斯特地区生态系统近乎崩溃,也是第三次石漠化急速发展时期。此后,由于喀斯特地区工业薄弱,农业仍为该地区发展经济和解决温饱问题的主要产业(图 1)。目前,喀斯特地区地表土被资源愈为短

缺,玉米仍大量栽植于“石旮沓”上。

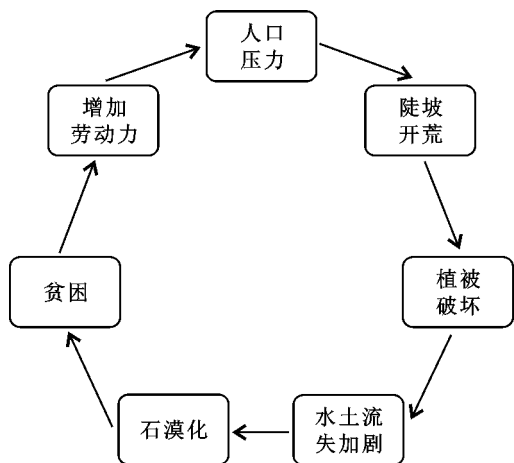


图 1 早期人类活动对喀斯特石漠化形成和发展的驱动模式

3 石漠化与水土流失辨析及相互作用

喀斯特地区开展石漠化和水土流失治理研究时,通常会把这两个概念混淆,特别是在以砾石堆积为景观特征的石漠化地区(图 2),通常会误以为是水土流失现象而非石漠化。正确区分石漠化和水土流失,对喀斯特地区制定科学、合理的石漠化治理和水土流失防治方案具有重要的实践意义。笔者从二者的发生背景、驱动因素、表现特征之间的差异进行论述,以期更好地区分喀斯特地区的石漠化与水土流失。



图 2 砾石堆积的石漠化坡地

3.1 自然背景

发生石漠化与水土流失的自然背景不同是导致二者间差异的根本原因。石漠化发生在亚热带脆弱的喀斯特环境,并且主要发生在下伏基岩为碳酸盐岩的地区,以贵州省为例,由图 3a 可见,碳酸盐岩广泛分布在贵州省除赤水及黔东南以外的大部分区域,而赤水市及黔东南大部分地区分布的岩石类型主要是碎屑岩,较碳酸盐岩,碎屑岩具有成土物质含量高、成土速率快等特点,这一差异导致贵州省赤水市及黔东南三穗、天柱、黎平、从江等县市无石漠化分布(图 3b)^[52]。水土流失则在各个环境下均有发生,没有特定的自然环境背景限制。

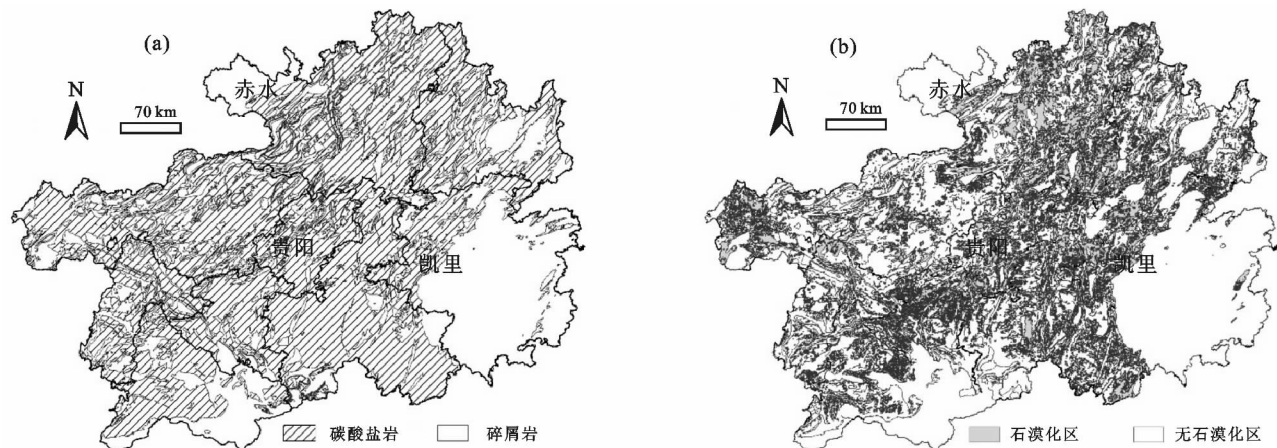


图3 贵州省岩石类型及石漠化分布

3.2 驱动因素与过程关系

自然因素(地形、降雨、土壤属性等)和不合理的人为活动(毁林开荒、陡坡耕作、开发建设等)均是石漠化和水土流失的主要驱动因素,从影响因子上二者无多大区别。在自然状态下或不合理的人为活动均可能产生水土流失;而石漠化更多地强调特殊的自然因素下受不合理的人类活动(如毁林开荒、陡坡耕作等活动)导致地表植被、土被大面积破坏、退化^[13-16,43]。笔者在前文中已表述了贵州喀斯特石漠化的发展史与人口迁移、新作物的引进等呈正相关关系。

3.3 表现特征与过程关系

水土流失包含了水资源的流失和土壤的分离、搬运和沉积,同时其主要的表现特征是地表水资源流失以及土壤受到破坏后经过短距离(坡度尺度)或长距离(进入河流受到悬移、跃移、推移)的搬运后沉积在山脚、谷底或湖泊、池塘中^[53];而石漠化主要体现出3种变化,即植被变化(植被破坏后林草覆盖率降低,植被层次结构可能由乔灌木退化到草地或裸地)、土被变化(地表土壤厚度降低,土被不连续)和自然景观变化(地表基岩大面积裸露/砾石堆积,呈现类似荒漠化的自然景观)。就过程关系而言,石漠化的本质是地表植被破坏后水土流失作用的结果,是一种不可逆或难以恢复的土地和生境退化过程。

4 喀斯特地区水土流失研究进展

喀斯特地区特殊的地表—地下“二元三维”水文系统,决定了该地区水土流失形式、发生机制等不同于常态地貌^[34,41]。开展喀斯特地区水土流失研究有助于该地区开展水土流失防治和石漠化治理。

4.1 国内外研究发展动态

黄土高原是我国最早开展水土流失研究的地区。因此,在早期喀斯特地区水土流失的研究中主要借鉴黄土高原水土流失研究方法。开展的研究工作也主

要集中在地表水土流失的影响因素、机制、监测、评价等方面^[14,54-55],忽视了地下流失的危害。在研究初期,人们采用黄土高原地区的水土流失评价标准来评价喀斯特地区水土流失,得出喀斯特地区水土流失轻微^[56],通过对喀斯特小流域地表水土流失监测得到喀斯特地区土壤侵蚀量远小于非喀斯特地区,而且石漠化程度越严重土壤侵蚀量越小^[12]。可见,仅通过地表水土流失研究是无法正确认识喀斯特地区水土流失的特征和机制,也无法科学地指导该地区开展水土流失防治工作。

随后国内外各学科的研究者在喀斯特地区发现了地下水土流失的现象,并认为地下水土流失是喀斯特坡地水土流失的重要组成部分。国外学者 Jones^[57] 和 Gosden^[58] 在地衣、孢粉等研究中发现附着在岩石上的地衣、孢粉存在断层现象,将其原因归为土壤随岩溶裂隙下陷造成的。1963年国内学者刘志刚^[59] 指出喀斯特地区地表土壤在径流的作用下沿落水洞进入地下岩溶系统。随后的80、90年代,仍只有部分研究者关注喀斯特地区地下水土流失。直到2000年后喀斯特地下水土流失的研究开始进入爆发阶段,蒋忠诚等^[19]、李德文等^[60]、张信宝等^[21,61] 开始对喀斯特地下水土流失的证据、发生机制、普遍性等展开研究,填补了部分空白。其后,越来越多的研究者们相继开展了地下水土流失机理^[20,60-63]、流失途径^[34,64-65]和概念模型^[66]等研究。

4.2 地下水土流失概念及途径

“地下漏失”的概念是张信宝等^[61]于2007年提出来的,认为喀斯特地区除地表流失外,还存在地下漏失,而且地下漏失是喀斯特主要的土壤流失方式。地下漏失是地表土壤以蠕滑和错落等重力侵蚀方式进入地下岩溶管道系统的过程,其主要流失途径为地下受化学溶蚀形成的岩溶裂隙或孔隙和管道侵蚀形成的地下溶洞、暗河等。土壤漏失的尺度局限在坡地

尺度上^[67]。对于喀斯特地下漏失的观点已得到学界的认同,但是部分学者对其内涵定义有着各自的看法。其中,唐益群等^[63]认为土壤漏失是指填充在岩溶管道中的土壤在水力或浸润后在重力作用下地表出现土壤向下蠕滑迁移的现象;蒋忠诚等^[19]认为土壤漏失是指在地表—地下“二元结构”发育的岩溶地区,土壤在径流驱动或岩石化学溶蚀作用下通过落水洞和地下岩溶裂隙等岩溶管道向下渗漏进入地下暗河的过程,其主要以流域为研究尺度,地下漏失的速率相对较快。

笔者通过大量野外自然剖面调查发现,填充在地下岩溶裂隙管道内的土壤分为两类:一种是地下岩溶裂隙形成后地表土壤在径流作用下迁移进入的;另一种是在岩石长时间水化学作用下形成的土壤。同时,地下裂隙内填充的土壤类型主要受地表成土母岩及形成岩溶裂隙管道的岩石所决定。土壤漏失受到地下岩溶管道发育情况和空间尺度的影响。流域尺度上可能存在发育的落水洞、地下暗河等岩溶管道系统,为土壤的向下流失提供有利的途径。较往常而言,大雨过后喀斯特地下暗河出口处的径流挟带着大量泥沙。相较于流域尺度而言,坡地上土壤漏失是一个长时间序列的过程,土壤在短时间内向下迁移量较少,而这也是部分学者认为水土漏失对喀斯特地区水土流失贡献不大的原因。

4.3 地下水土流失研究内容

目前,喀斯特地下水土流失研究主要集中在地下水土流失途径/通道、影响因素、地下水土流失总量/速率、过程机理、地下水文过程及地下水污染、研究方法探讨等方面。

4.3.1 流失途径/通道 当前,学界公认由地下岩溶裂隙、落水洞、地下暗河等组成的地下岩溶管道系统是喀斯特地下水土流失的主要途径/通道,而泥沙由岩溶裂隙或落水洞等途径的流失比例存在争议。熊康宁等^[1]、曹建华等^[68]认为由落水洞、竖井等途径向下运移的土壤是喀斯特地区地下暗河中泥沙的主要来源,而由岩石裂隙向下流失的土壤仅占小部分;魏兴萍等^[69]利用¹³⁷Cs 示踪得到重庆岩溶槽谷区地下暗河中的泥沙 74.55%来自落水洞、竖井等途径,而由岩溶裂隙向下流失的泥沙比重为 25.45%;而唐益群等^[63]、张信宝等^[70]、冯腾等^[71]认为地下水土流失途径与地下岩溶管道系统和地下暗河发育程度有关,在岩溶裂隙和地下暗河不发育地区,径流和泥沙则主要通过落水洞和漏斗等向下流失。笔者在野外考察过程中发现地下岩溶管道系统发育明显的地区,地表土壤受径流驱动进入繁杂

的地下岩溶管道系统后发生地下漏失。本课题组通过模拟研究得到喀斯特地下土壤漏失量与地下裂隙发育程度呈显著正相关关系^[62,72-75]。

由于喀斯特坡地地下岩溶管道系统的隐蔽性和复杂性,使得当前对地下水土流失途径/通道特征的研究多为描述性,而对地下岩溶管道系统的形态特征、连通特性等尚未有一个清楚的认识。大多数研究者进行喀斯特地下水土流失的研究时,通常将水、土在地下运移过程视为“黑箱”,只考虑地下水土流失的总量。已有的关于地下岩溶管道系统的研究主要是通过野外调查后进行人工模拟。例如,沈振中等^[76]利用有机玻璃管模拟地下岩溶裂隙,开展地下水文研究;张伟等^[77]采用钢槽制作用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置,该装置能够模拟不同岩土裂隙环境下土壤溶质的运移研究。本课题组通过对喀斯特坡地调查后,综合坡地坡度、岩石裸露率、土层厚度、土壤类型和地下孔裂隙特征,设计出一种用于喀斯特坡地产流、产沙的试验装置^[78],该装置能够初步模拟单位投影面积上地下孔裂隙占坡地面积的百分比,但是与自然状态的岩溶裂隙仍存在一定的差异。地下岩溶管道系统是水土流失的主要通道,对其进行科学、清楚的认识是进一步开展喀斯特水土流失的重要前提,今后的工作重心应关注地下岩溶裂隙形态特征的研究,以推动喀斯特地下水土流失的研究。

4.3.2 地下水土流失机理与研究方法 虽然在上世纪 60 年就有相关研究指出了喀斯特土壤地下漏失的问题^[57,79-80],而直到 21 世纪初,地下水土流失才开始得到学者的大力关注。同时,由于研究者们对地下漏失概念、途径/通道认识不足,使得该方面的研究方法、机理等研究仍处于初步探索阶段。在水土流失机理研究上,唐益群等^[63]在贵州普定县陈旗小流域监测过程中探讨了喀斯特石漠化区地下漏失的过程及机理;王恒松等^[81]在为期一个水文年的小流域监测中提出地下水土流失与地下岩—土—水—生物作用机理有着内在的关联性;Wang 等^[34]开展了喀斯特土壤的漏失—蠕变—塌陷机制研究;周念清等^[66]提出喀斯特地区水土流失过程可以概化为降雨溅蚀、坡面侵蚀、落水洞漏失和地下暗河输移 4 个主要过程。

近年来,相继有研究者运用核示踪技术^[61,69,71,82-83]、GIS 与遥感技术^[84]、USLE/RUSLE 模型^[85-86]、探地雷达^[87-88]、小流域/坡面定点监测^[64,74]、人工模拟降雨模拟^[62,72-75,89-90]等手段,探讨了喀斯特地下水土流失机理及其影响因素,并取得了一定成果。用于喀斯特地下水土流失的核示踪元素主要是张信宝从美国引

进的¹³⁷Cs示踪技术,并将其运用于喀斯特土壤漏失的研究;此后诸如魏兴萍等^[69]、冯腾等^[71]将¹³⁷Cs示踪运用到喀斯特小流域泥沙运移过程、土壤漏失速率等研究。而在2011年时,Parsons等^[91]研究表明运用¹³⁷Cs示踪得到的土壤侵蚀速率存在弊端。因此,关于喀斯特地下水土流失速率的研究仍需运用新的研究手段进行进一步的探索。早在20世纪90年代初,李双岱等^[92]运用航片判译探讨贵州省清镇市水土流失特点,指出落水洞、漏斗对喀斯特水土流失的影响,但是目前遥感技术只能判译解读地表水土流失特征,尚无切实可行的遥感监测技术可用于地下水土流失监测。通用土壤流失方程(USLE)、修正方程(RUSLE)及后期水蚀预报模型(WEEP)等均是世界范围内应用最广泛的土壤侵蚀预报模型,其是美国农业部以全美地形、径流和侵蚀特征整理形成的^[93],主要针对的是美国平原和缓坡地带;西南喀斯特地貌复杂,地形陡峭险峻,虽然国内学者将其用于喀斯特地下水土流失时进行了参数修改,而参数修改往往是基于调查某个小流域采集得到的数据,修改后得到的模型也仅仅适用于该流域,无实际的普适性。探地雷达的应用是多学科交叉应用的成果,该技术的应用使人们能够更直观地了解土壤漏失途径及地下岩溶管道系统的分布情况^[88]。小流域/坡面定点监测和人工模拟降雨研究是当前主要的地下水土流失手段,陈洪松等^[94]通过对喀斯特坡地野外径流小区定点监测,获得次降雨条件下地表产流系数小于5%。本课题组自2009年起在国家自然科学基金的支持下长期开展了岩石裸露率、坡度、岩溶裂隙程度、降雨强度等因子对地下漏失的影响。结果表明降雨是地下水土流失最主要的驱动因子,增大岩溶裂隙发育程度,能显著促进地下水土流失的发生^[92]。当前,喀斯特地下水土流失的研究方法和手段仍存在较大不足,尚需要革命性的创新以推动该领域的飞跃发展。

4.3.3 地下水土流失定量研究 量化地下水土流失既能充分证实地下水土流失的存在,也能为喀斯特地区石漠化治理提供理论依据。当前已有部分学者开展了喀斯特地下水土流失量的研究,并取得一定的成果。李晋等^[95]通过对贵州清镇市王家寨喀斯特小流域地下河出口断面的连续定位监测,初步得到地下土壤侵蚀模数为 $0.42 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,在一个完整水文年内地下土壤流失总量仅为整个流域地表—地下流失总量的0.81%;蒋忠诚等^[65]运用¹³⁷Cs示踪技术探索了广西岩溶峰丛水土漏失量,得到水土流失主要发生在坡面,地下漏失量在75%以上,而洼地则以地表流失为主;张信宝等^[70]对茂兰喀斯特地区水土流失研究时得出,该地区地下土壤漏失量为 $0 \sim 20 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;魏

兴萍等^[69]运用¹³⁷Cs配比法计算得到重庆岩溶槽谷区地下水土流失比例为25.45%。笔者研究团队在试验钢槽中模拟喀斯特坡地“二元结构”的基础上,通过人工模拟降雨研究得到,典型喀斯特坡耕地的水土流失主要以地下水土流失为主,特别是小雨强($\leq 30 \text{ mm/h}$)条件下,坡地地表无产流产沙出现,地下水土流失贡献率接近100%^[62,74]。综上所述,研究方法不同得到的地下水土流失量的结果也有所不同,但是这些研究证实了地下水土流失的存在,总体上也阐述了地下水土流失是喀斯特坡地水土流失中不容忽视的一部分。

4.3.4 坡地地下水污染问题 喀斯特地区独特的水文系统使该地区地表具有强烈的渗透性^[96],导致降雨几乎全部入渗,通过地下岩溶裂隙等通道进入地下暗河中,或成为地下水的一部分^[39]。强烈的渗透性不仅导致了喀斯特地区工程性缺水,也引发另一种危害——地下水污染。喀斯特地下水污染问题一直存在并造成严重的危害。如2008年云南省嵩明县发生泥磷废液入渗地表土壤由岩溶裂隙进入地下暗河,造成地下水源严重污染,造成直接的经济损失136万元,但其对生态环境的危害却无法直接衡量和消除^[97]。喀斯特石漠化地区耕地以坡耕地为主,土壤较为贫瘠。农民为获得生产收益,在耕作过程中大量施用人工肥料以促进产量。由于径流是养分流失的主要载体,在径流向下运动的过程中不仅驱动泥沙运移,也将其中的养分溶解于水中并随之流失。在喀斯特石漠化地区,坡耕地土壤养分的流失不仅造成土壤生产力下降,也对地下水体造成污染,危害地下水的安全。当前关于喀斯特坡耕地农业生产造成的地下水污染问题的研究较为匮乏,相关的报道也不多。李昌兰等^[98]和彭旭东等^[73]采用人工模拟降雨初步探索了降雨、地下岩溶裂隙发育程度等因素对典型喀斯特坡耕地养分随径流发生地下流失的特征。2017年国际岩溶研究中心国际合作项目暨国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室开放专项课题,指出了岩溶地区地下河污染源、迁移机制等问题的重要性^[99]。当前关于喀斯特坡耕地地下水污染的问题尚处于起步阶段,对坡耕地造成的地下水污染源、污染量、迁移机制、防治对策等的研究十分匮乏,需要广大科技工作者加大对该方面的投入。

5 不足与展望

5.1 现有研究的不足

国内外对喀斯特石漠化和水土流失已开展了大量的研究工作,并在二者的自然背景、发生机制、表现特征等方面取得了大量成果,研究结果对喀斯特石漠化治理和水土流失防治提供了一定的理论依据。然而,由于当前喀斯特石漠化地区工作重心的转变以及

喀斯特特殊的“二元结构”导致的研究者对西南喀斯特地区地下水土流失的认识和研究不足。存在的主要问题为:

(1)当前,西南喀斯特石漠化地区研究工作的重心由原先的发生背景、影响因素、机制和机理等方面转变为石漠化治理和植被修复,而现行的石漠化程度等级界定方法已无法满足当前的工作需求,因此需要结合当前工作的需求,制定新的石漠化程度界定标准,并重点考虑空间尺度和土地恢复潜力等指标,以期制定喀斯特地区石漠化治理和植被修复方案提供理论依据。

(2)喀斯特地下漏失的隐蔽性和复杂性给喀斯特地下漏失的研究带来极大的困难和严峻的挑战,当前关于地下漏失的研究尚处于起步阶段,无较好的研究方法,对地下漏失的发生机制、地下漏失占坡地水土流失的比重等方面仍无重大突破。因此,有必要对研究方法进行创新,开发新的研究方法,量化地下水土流失总量,关注喀斯特坡地地下漏失的机理。

(3)由于喀斯特地下水土流失的研究开展的相对较晚,喀斯特坡耕地地下水污染的问题尚未引起研究者的重视,关于喀斯特坡地污染物来源成分及其随径流、泥沙的迁移机制和防治对策等方面的研究仍十分缺乏。在今后的研究中应重视该方面的问题。

5.2 展望

西南喀斯特石漠化形势日趋严峻,已对该地区生态环境安全、人民生活、生产造成严重的危害,开展石漠化治理已刻不容缓。为了更好地开展石漠化治理工作,应根据当前工作重心重新制定石漠化类型界定标准。此外,由于西南喀斯特环境的特殊性,今后的研究工作应结合该地区的环境特征,重视研究方法和技术的革新,以便推进喀斯特地下水土流失机理及量化研究。与此同时,重视喀斯特坡地地下水污染问题,运用同位素示踪、探地雷达等技术,研发科学、有效的地表—地下水流失防治措施。

参考文献:

- [1] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):120-126.
- [3] Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: Indications for restoration strategies [J]. Land Degradation and Development,2013,24(1):47-56.
- [4] Chen H S, Liu J W, Wang K L, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. Catena,2011,84(1/2):21-28.

- [5] 国家林业局. 中国石漠化状况公报[N]. 中国绿色时报,2012-06-18(3).
- [6] 谢俊奇. 中国坡耕地[M]. 北京:中国大地出版社,2005.
- [7] Peng W X, Wang K L, Song T Q, et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(2):811-820.
- [8] Wu X Q, Cai Y L, Zhou T. Effects of land use/land cover changes on rocky desertification: A case study of a small karst catchment in Southwestern China[J]. Energy Procedia,2011,5(22):1-5.
- [9] Xiong Y J, Qiu G Y, Mo D K, et al. Rocky desertification and its causes in karst areas: A case study in Yongshun County, Hunan Province, China[J]. Environmental Geology,2009,57(7):1481-1488.
- [10] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical Karst of South China[J]. Z. Geomorph. N. F.,1997,108(1):81-90.
- [11] 张殿发,王世杰,李瑞玲,等. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制:以贵州省喀斯特山区为例[J]. 农村生态环境,2002,18(1):6-10.
- [12] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展,1997,19(5):41-43.
- [13] 屠玉麟. 岩溶生态环境异质性特征分析:以贵州岩溶生境为例[J]. 贵州科学,1997,15(3):176-181.
- [14] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 石漠化的概念及其内涵[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(6):87-90.
- [15] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002:183.
- [16] 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.
- [17] 王宇,张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J]. 地球科学进展,2003,18(6):933-938.
- [18] 王连庆,乔子江,郑达兴. 渝东南岩溶石山地区石漠化遥感调查及发展趋势分析[J]. 地质力学学报,2003,9(1):78-84.
- [19] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清. 广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [20] 苏维词. 喀斯特土地石漠化类型划分及其生态治理模式探讨[J]. 中国土地科学,2008,22(4):32-37.
- [21] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议[J]. 地球与环境,2007,35(2):188-192.
- [22] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报,2014,34(18):5328-5341.
- [23] 覃小群,蒋忠诚. 石漠化的地质指标体系[J]. 地质通报,2011,30(11):1769-1773.
- [24] 谷晓平,于飞,刘云慧,等. 降雨因子对喀斯特石漠化发生发展的影响研究[J]. 水土保持通报,2011,31(3):65-70.
- [25] 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,2001,166(4):461-466.

- [26] 王世杰,李阳兵,李瑞玲.喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J].第四纪研究,2003,23(6):657-666.
- [27] 张伟,陈洪松,王克林,等.喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J].土壤学报,2006,43(4):554-562.
- [28] Sweeting M M. Tectonics and fluvial denudation in the formation of cone karst, with particular reference to South China [J]. Tübinger Geographische Studien, 1992,109:45-56.
- [29] Waele J D, Mucedda M, Montanaro L. Morphology and origin of coastal karst landforms in Miocene and Quaternary carbonate rocks along the central-western coast of Sardinia (Italy)[J]. Geomorphology,2013,106(1/2):26-34.
- [30] Kan H, Urata K, Nagao M, et al. Submerged karst landforms observed by multibeam bathymetric survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, southwestern Japan [J]. Geomorphology,2015,229(S1):112-124.
- [31] 张殿发,王世杰,周德全,等.贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制[J].水土保持通报,2001,21(4):1-5.
- [32] 魏兴萍.岩溶槽谷区水土流失特征及机理研究[D].重庆:西南大学,2011.
- [33] 单洋天.我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J].中国岩溶,2006,25(2):163-167.
- [34] Wang J, Zou B, Liu Y, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding county, Guizhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(8):2751-2764.
- [35] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. International Journal of Speleology,2008,37(1):1-10.
- [36] 杨珊,何寻阳,苏以荣,等.岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2010,21(6):1596-1602.
- [37] Stumm W, Morgan J J. Aquatic chemistry[M]. New York: John Wiley Sons, 1981:1-780.
- [38] 冯志刚,王世杰,刘秀明,等.酸不溶物对碳酸盐岩风化壳发育程度的影响[J].地质学报,2009,83(6):885-893.
- [39] 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.
- [40] 王世杰,季宏兵,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,1999,29(5):441-449.
- [41] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3):419-427.
- [42] 曹建华,袁道先,章程,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J].地球与环境,2004,32(1):1-8.
- [43] 郭红艳,周金星.石漠化地区水土地下漏失治理[J].中国水土保持科学,2012,10(5):71-76.
- [44] Peng T. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in south-west China[J]. Catena,2012,90(1):53-62.
- [45] Xu E, Zhang H, Li M. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China[J]. Science of the Total Environment,2013,458/460(3):419.
- [46] 李阳兵,高明,邵景安,等.岩溶山区不同植被群落土壤生态系统特性研究[J].地理科学,2005,25(5):606-613.
- [47] 白晓永,熊康宁,李阳兵,等.喀斯特山区不同强度石漠化与人口因素空间差异性的定量研究[J].山地学报,2006,24(2):242-248.
- [48] 胥思省.清代贵州开发及其影响初探[D].重庆:西南大学,2010.
- [49] 何炳棣.美洲作物的引进、传播及其对中国粮食生产的影响[J].世界农业,1979(4):34-41.
- [50] 严奇岩.清代玉米的引进与推广对贵州石漠化的影响[J].贵州师范大学学报(社会科学版),2010(3):48-53.
- [51] 吕文春,陈性平.贵州盘县石漠化现状及综合防治对策[J].中国水土保持,2013(8):34-36.
- [52] 张信宝,王世杰,白晓永,等.贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系[J].地球与环境,2013,41(1):1-6.
- [53] 杨子生.论水土流失与土壤侵蚀及其有关概念的界定[J].山地学报,2001,19(5):436-445.
- [54] 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.
- [55] 林昌虎,朱安国.贵州喀斯特山区土壤侵蚀与防治[J].水土保持研究,1999,6(2):109-113.
- [56] 陈晓平.喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究[J].水土保持学报,1997,3(4):31-36.
- [57] Jones R J. Aspects of the biological weathering of limestone pavement [J]. Proceedings of the Geologists' Association,1965,76(4):421-433.
- [58] Gosden M S. Peat deposits of scar close, Ingleborough, Yorkshire[J]. Journal of Ecology,1968,56(2):345-353.
- [59] 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(4):354-360.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. Solid Earth,2015,6(3):985-995.
- [63] 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.
- [64] 张笑楠,王克林,张伟,等.典型喀斯特坡地¹³⁷Cs的分布与相关影响因子研究[J].环境科学,2009,30(11):

- 3152-3158.
- [65] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 等. 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.
- [73] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [74] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [75] 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.
- [76] 沈振中, 陈雾, 赵坚. 岩溶管道与裂隙交叉渗流特性试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 137-145.
- [77] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等. 一种适用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置: 中国, 103454403A[P]. 2013-12-18.
- [78] 戴全厚, 喻理飞, 杨智, 等. 一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置: 中国, 101988886A[P]. 2011-03-23.
- [79] Gunn J. Encyclopedia of caves and karst science[M]. New York: Fitzroy Dearborn, 1997: 46.
- [80] Palmer A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [81] 王恒松, 熊康宁, 刘云. 喀斯特区地下水土流失机理研究[J]. 中国水土保持, 2009(8): 11-14, 64.
- [82] Hao L I, Zhang X B, Wang K L, et al. ^{137}Cs redistribution in thin stony soil of a carbonate rock slope in Southwest China [J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 37-45.
- [83] Yan D X, Zhang X B, Wen A B, et al. Assessment of sediment yield in a small karst catchment by using ^{137}Cs tracer technique [J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 27(4): 547-554.
- [84] Navas A, López-Vicente M, Gaspar L, et al. Assessing soil redistribution in a complex karst catchment using fallout ^{137}Cs and GIS[J]. Geomorphology, 2013, 196(S1): 231-241.
- [85] 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 and Assessment, 2008, 141(1/3): 275-286.
- [86] Li Y, Bai X, Zhou Y, et al. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical mountainous karst basin in SW China, based on GIS and RUSLE[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(1): 209-221.
- [87] 张志才, 陈喜, 程勤波, 等. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析: 以陈旗小流域为例[J]. 地球与环境, 2011, 39(1): 19-25.
- [88] 付磊, 白晶. 基于探地雷达的地下水土流失研究[J]. 中国水土保持, 2016(8): 52-55, 73.
- [89] 王济, 蔡雄飞, 雷丽, 等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 1-5.
- [90] 蔡雄飞, 王济, 雷丽, 等. 不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 5-8, 13.
- [91] Parsons A J, Foster I D L. What can we learn about soil erosion from the use of ^{137}Cs [J]. Earth Science Reviews, 2011, 108(1/2): 101-113.
- [92] 李双岱, 李兴中. 从航片判译对清镇县跳登河流域水土流失特点的探讨[J]. 贵州地质, 1990(1): 77-82.
- [93] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [94] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 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.
- [95] 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, 76.
- [96] 姜光辉, 陈坤琨, 于爽, 等. 峰丛洼地的坡地径流成分划分[J]. 水文, 2009, 29(6): 14-19.
- [97] 黄英. 喀斯特地区突发性地下水污染事故分析: 以云南省嵩明县喷水洞泥磷污染为例[C]//中国水利学会. 2008 学术年会论文集(下册). 北京: 中国水利学会, 2008: 6.
- [98] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 等. 喀斯特坡耕地浅层地下孔(裂)隙发育过程中径流产污特征[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4437-4445.
- [99] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 2018 年度国际岩溶研究中心国际合作项目暨国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室开放课题申请指南[EB/OL]. (2017-05-17) [2017-09-04]. http://www.karst.cgs.gov.cn/tzgg_4227/201705/t20170517_429793.html.