

中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展

彭旭东, 戴全厚, 李昌兰

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要: 西南喀斯特区坡耕地特殊的地表、地下双层空间结构,使得岩溶区的土壤侵蚀过程具有特殊性和复杂性,并产生了一系列特殊的环境地质问题,如水土流失、旱涝、石漠化等。开展喀斯特坡地水土流失/漏失研究,主要是揭示喀斯特坡地水土流失/漏失过程及驱动机制,为喀斯特石漠化的综合治理及其石漠化生态恢复提供理论依据和技术支撑。同时,系统论述了我国西南喀斯特坡地地表侵蚀和地下漏失过程与机理的最新研究进展,其中地表侵蚀过程与机理都进行了定性和定量化的研究,而地下漏失过程与机理则处于定性描述和室内模拟探索阶段;喀斯特坡地有关的模拟和野外观测研究均表明,喀斯特坡地的土壤侵蚀方式是一个从地下漏失到地表侵蚀的转变过程,即小雨时以漏失为主,而暴雨时则以二者并重甚至以地表流失为主;此外,还深入分析了喀斯特区坡地水土流失阻控的研究动态及研究不足,并指出该区水土漏失过程与机制在未来的研究方向和发展趋势。

关键词: 地表侵蚀; 地下漏失; 坡耕地; 喀斯特; 研究进展

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0001-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.05.001

Research Progress on the Process and Mechanism of Soil Water Loss or Leakage on Slope in Southwest Karst of China

PENG Xudong, DAI Quanhong, LI Changlan

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Cultivated land in Southwest Karst Area is characterized by a special double space structure with surface and underground, which cause particularity and complexity in soil erosion process in those areas, and produce a series of special environmental geological problems, such as soil erosion, drought and desertification. Aims of studies on the process and the driving forces of soil loss or leakage on karst slope land is to provide theoretical basis and technical support for the comprehensive controlling and ecological restoration of rocky desertification. Meanwhile, this paper had summarized the latest research progress on surface erosion and underground leakage loss mechanism in the karst slope of Southwest in China. So far, the process and mechanism of surface erosion have conducted qualitative, whereas the studies of underground leakage loss were in qualitative description and indoor simulation exploration stage. Simulations and field observations on karst slope lands showed that soil erosion type on karst slope farmland was a process of transition from underground leakage to surface erosion. That was, the soil loss type was dominated by underground leakage when small rainfall occurred, and the surface erosion and underground leakage loss was equal even the surface erosion was higher than the underground soil loss at heavy or storm rain conditions. Alternatively, analyzed deeply the research and development of soil and water loss control in Karst areas, and pointed out the future development of soil and water loss.

Keywords: surface erosion; underground leakage; cultivated land; Karst; research progress

我国“十三五”规划明确指出,要推进荒漠化、石漠化、水土流失综合治理,以更好地改善生态环境,实现中国美丽。西南喀斯特区位于全球三大岩溶集中分布区之一的东亚片区核心地带,是长江珠江上游重

要的生态屏障,同时也是国家生态环境建设的重点区域。喀斯特石漠化是我国西南地区最严重的生态环境地质问题^[1],已成为制约当地社会、经济可持续发展的核心问题之一,是该地区人民贫穷落后的主要根

收稿日期: 2017-04-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 国家自然科学基金项目(41671275, 41461057, 41061029); 贵州省重大专项(黔科合重大专项[2016]3022号); 贵州省应用基础重大专项(黔科合JZ字[2014]2002)

第一作者: 彭旭东(1989—),男,贵州毕节人,博士研究生,主要从事喀斯特土壤侵蚀与生态恢复研究。E-mail:bjpxd@126.com

通信作者: 戴全厚(1969—),男,陕西长武人,博士,教授,博士生导师,主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail:qhdairiver@163.com

源,严重威胁到人们的生存环境^[2-3]。喀斯特地区生态环境脆弱,表现在土层浅薄、土壤总量少、贮水能力低、岩石渗漏性强,致使该区水文过程变化迅速,旱涝时常发生。长期岩溶作用致使其内部出现多级多处与水、土、岩和生物联为一体的地表、地下双层结构,使岩溶区的水循环过程(含水的流失)和土壤侵蚀过程具有特殊性和复杂性^[4],产生一系列特殊的环境地质问题,如水土流失、旱涝、石漠化、水源枯竭、地面沉降和塌陷等^[5]。喀斯特地区水土流失是其生态环境退化的重要因素,严重制约着该区农业可持续发展,充分揭示喀斯特地区坡地水土流失发生、运移机制是控制石漠化发展和缓解季节性干旱的关键。

受特殊岩溶环境及人为活动影响,我国西南岩溶区水土流失危害程度日趋严重,局部区域已达到无土可蚀^[6],形成特殊的石漠化景观,严重影响该地区社会经济发展。特别是坡耕地,在作为长江和珠江两大水系的重要生态屏障的中国西南岩溶地区,坡耕地占耕地资源的比例高达 54.38%^[7],其中贵州省 246.23 万 hm^2 坡耕地全部为水土流失区域,其年均土壤流失量 16 303.16 万 t,是长江和珠江上游水土流失的主要策源地^[8]。尽管近年来喀斯特地区特殊的土壤侵蚀类型研究备受关注,包括地表流失及地下漏失等^[9-10],其中地表流失研究通过野外观测、室内模拟及同位素示踪等一系列的方法,其侵蚀过程、机理及影响因素都相对系统;但由于喀斯特地下径流泥沙野外直接观测难度系数大,且目前尚无切实可行的研究方法和手段,故基于喀斯特地区特殊的地下漏失机理研究较少,目前仅处于定性描述和室内模拟探索阶段,且已有研究未能揭示其侵蚀环境、驱动力及其漏失机制。因此,开展喀斯特坡地二元结构下的水土漏

失机制研究,并构建其生态阻控体系,是国家石漠化治理工程和生态环境建设的迫切需要,这对控制区域石漠化发展及促进区域可持续发展具有重要理论意义和现实意义。

1 土壤侵蚀研究目的

“二元”结构的存在,使得喀斯特水文循环涉及生物圈、水圈、岩石圈、土壤圈和大气圈的相互作用,是一个综合复杂的系统科学问题。由于岩溶区土壤总量有限,涵养水源能力低,浅层孔(裂)隙发育,大气降水部分在坡面产生坡面流,部分沿喀斯特包气带的土壤(soil)、表层岩溶带(epikarst zone)和传送带(transmission zone)垂直下渗^[11],在低洼处通过竖井、管道和落水洞等进入地下水系统。如此类型的水文循环模式决定了该区水土流失形式主要表现为降雨携带泥沙进入地下孔(裂)隙、管道和地下河。喀斯特水文循环中,水是造成土壤流失/漏失的传输介质,其将覆盖于岩石表面土壤带入“二元”双层水文网络^[12]。地表水通过浅层孔(裂)隙、漏斗、落水洞等直接与地下水系统发生水力联系,降水难以在地表滞留较长时间,致使该地区水文过程变化迅速、旱涝时常发生,加上降水变率大、季节分配不均,水土流失/漏失加重。因此,从坡面、流域、区域不同尺度去开展喀斯特坡地土壤侵蚀的研究,其目的是揭示喀斯特坡地水土流失/漏失过程及驱动机制,建立不同尺度下喀斯特地表和地下两个方向流失总的土壤侵蚀模型,形成喀斯特特殊环境下的土壤侵蚀及阻控的理论与方法,丰富土壤侵蚀与水土保持学科的内涵;通过探究喀斯特土壤侵蚀与全球变化的关系,有助于掌握我国西南喀斯特未来土壤侵蚀及其环境特征变化趋势,为地球表层系统科学的发展做出贡献(图 1)。

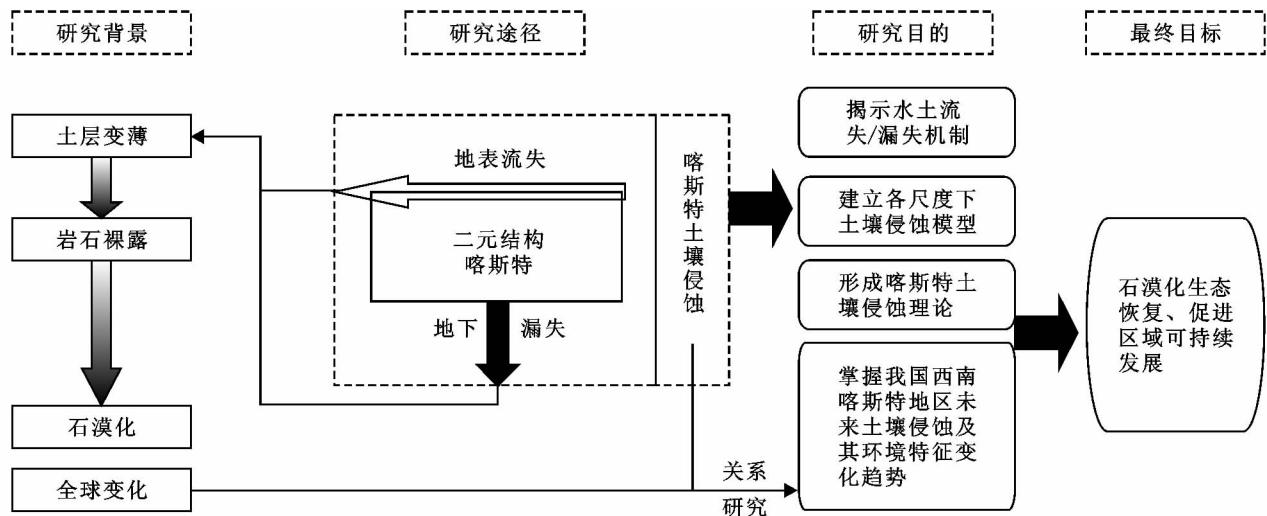


图 1 喀斯特坡地土壤侵蚀研究目标

2 研究现状及发展动态

近年来,喀斯特区坡地水文过程及土壤侵蚀过程

成为全球地理学界关注的焦点和前沿,得到许多国际组织的高度重视^[13]。总结而言,目前关于喀斯特区土壤侵蚀的研究涉及水土流失环境介质特征、地表侵

蚀和地下漏失过程与机理、水土流失研究方法及水土流失/漏失阻控等。

2.1 喀斯特水土流失的环境介质特征

喀斯特地区特殊的地表和地下二元三维侵蚀环境结构的存在,致使其水土流失类型、形式、发生机制及特点等明显不同于非喀斯特区。与非喀斯特地区相比,喀斯特地区坡地地表起伏度大、岩石裸露率高、岩石渗漏性强,土层浅薄而分布不连续、土壤总量少、土壤蓄持水分能力低,地下则由于碳酸盐岩的化学溶蚀作用发育形成孔(裂)隙、管道、漏斗、落水洞以及地下河等系统,形成了喀斯特区特有的侵蚀环境系统。

喀斯特区由于其地表微地貌及地下空间结构的复杂性,其侵蚀环境介质的相关专题研究较少。喀斯特作为可溶岩石溶蚀而引起地表、地下区域特征的总体^[14],其环境具有典型的脆弱性^[15],表现在环境承载容量小、物质循环和能流弱、植物生长量偏低3个方面。当然,也有学者认为喀斯特生态脆弱性表现为敏感度高、环境容量低、抗干扰能力弱和稳定性差^[16]。在自然因素(气候条件、地质地貌、土壤因素、植被覆盖)和人为因素的共同作用下^[17],喀斯特山区土壤侵蚀强度大,侵蚀类型、形式多样,其类型以水力侵蚀(面蚀、沟蚀、石隙刷蚀、潜蚀)为主,其次为重力侵蚀(崩塌、滑坡等)等。

气候因素中降雨作为土壤侵蚀驱动力^[18-19],我国西南地区雨热同期,降雨时空分布不均,暴雨发生频率高、强度大,且大暴雨和特大暴雨所占比例高^[20],这不仅造成区域严重的水土流失,还为石漠化的加速形成提供了强大的动力。碳酸盐岩是我国西南喀斯特区主要分布的地层岩石类型,而贵州省则是我国碳酸盐岩分布面积最大、岩溶发育最典型的省区^[21],其碳酸盐岩分布面积13万km²,垂直分布上总厚度可达6500~11000m,碳酸盐岩地层自元古代震旦纪至中生代三叠纪均有出露,且主要由方解石(CaCO₃)、白云石[MgCa(CO₃)₂]等碳酸盐类矿物组成,其作为一种可溶岩,在常温常压下碳酸盐类矿物能被水溶蚀并搬运,这奠定了岩溶发育的物质基础^[22]。喀斯特山区地形起伏大,峰林、山地、丘陵、洼地、槽谷及盆地等地貌类型多样^[23-25],坡陡且变化大,极利于水力侵蚀和重力侵蚀活动的发展。

喀斯特区碳酸盐岩风化残积而成的石灰土,其黏土矿物以高岭石、蛭石为主,成土速度慢;在土层与基岩之间不存在过渡结构(常缺过渡层C层),即岩—土界面存在明显软硬界面,这使得母岩和土壤间的黏着力和亲和力差,一遇降雨(暴雨)则极易发生水土流失或块体滑移。此外,在该区特殊气候条件下,强烈的化学溶蚀使风化物中的黏粒垂直下移,形成土层上

松下紧的特殊界面,这也极易造成水土流失^[26]。在自然状态下,由于土壤较高的渗透能力,地表不易产生径流或土壤流失,因此淋溶侵蚀常在该区占主导地位^[27]。植被作为喀斯特山区防治水土流失及促进生态恢复的关键因子,受人为因素影响,西南喀斯特区植被退化严重,生态系统受损^[28],植被重建和恢复已成为控制该区水土流失和石漠化发展及改善生态环境的根本措施。人为因素是喀斯特区侵蚀加剧的主要原因^[29],表现在人口密度大、人地矛盾突出、人为破坏植被以及土地粗放式经营等方面。可以看出,喀斯特区二元结构的侵蚀环境研究多侧重于地表,而针对地下空间结构的侵蚀环境研究还处于空白。

2.2 喀斯特坡地地表侵蚀过程与机理

喀斯特地区土壤侵蚀过程极其复杂,土壤不仅随地表径流流失,同时还沿岩溶孔(裂)隙、漏斗、落水洞等向地下流失。国内对喀斯特区特殊的水土流失(地表流失)研究起步于60年代^[30],到80年代时也只有少数人研究。90年代开始,科研工作者对喀斯特土壤侵蚀进行了深入研究,取得了一定成果,如韦启璠^[31]、林昌虎等^[32]研究了南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径,郑永春等^[33]分析了贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因,多数研究都是从宏观尺度上分析喀斯特区水土流失的方式、特征及其危害等,而对水土流失机理研究相对较少。直到21世纪,许多学者才对喀斯特区土壤侵蚀机理进行初步研究,苏维词^[34]从岩性、地貌、人类活动等方面剖析了土壤侵蚀性退化的成因机理,指出不合理的人类活动是该地区土壤侵蚀性退化的诱因和外动力,白占国等^[35]通过⁷Be和¹³⁷Cs示踪手段,揭示了喀斯特区受季节性降水和微地形控制的机理,张信宝等^[36]提出了岩溶坡地的土壤侵蚀是化学溶蚀、重力侵蚀和流失侵蚀叠加的观点,且提出不同碎屑岩含量碳酸盐岩区的土壤允许流失量为5~500t/(km²·a)^[37],曹建华等^[38-39]结合岩溶区水循环特征、土壤空间分布特征,根据不同空间尺度将岩溶区水土流失发生的基本单元分为坡地、洼地、谷地及流域并分析其侵蚀过程,熊康宁等^[27]从不同的地理视角(高原山地、盆地和峡谷)分析水土流失发生机制与空间差异,认为石漠化强度高的地区其地表产流产沙量有减小趋势,主要因为岩石发育的节理、裂隙、管道等能吸收或渗漏一部分降雨,且裸露岩石的截留汇流作用降低了地表径流速度。笔者研究^[40]也认为,随着石漠化强度加剧则越不容易发生地表侵蚀,然而地表裸露岩石对地表侵蚀的作用机理有待后续进一步研究和探索。

2.3 喀斯特坡地地下漏失过程与机理

喀斯特区特殊的“二元”结构及多孔介质特征,使

得降雨过程中径流在浅层孔(裂)隙、管道、漏斗中的流动会带走土壤,造成“土壤漏失”现象。土壤地下漏失是指喀斯特地下水溶蚀形成的孔隙、裂隙和管道,被上覆土壤通过蠕滑和错落等重力侵蚀方式充填,造成坡地地面土壤、土壤母质及其他地面组成物质如岩屑、松散堆积等沿溶沟、溶槽、洼地和岩石缝隙内进入岩溶地下含水层^[41]。水土漏失是地表、地下双层空间结构发育的岩溶地区,在水流机械侵蚀及化学溶蚀作用下,地表泥沙经过落水洞和岩溶裂隙等岩溶通道向下渗漏到地下河的过程^[42]。国外早在 20 世纪 60 年代就有研究指出土壤地下漏失的现象。由于地下漏失直接观测难度大,且目前尚无切实可行的研究方法和手段,导致人们对地下漏失的机理了解不深。

2.3.1 地下漏失研究动态 近年来,喀斯特区的地下流失被广泛关注,如张信宝等^[37]分析了岩溶坡地土壤地下漏失和土地石质化的过程,曹建华等^[43]指出岩溶地区的水土流失在坡地存在土壤充填囊状缝隙、孔洞的情况,大部分泥沙主要通过落水洞、漏斗流失,而漏失进入地下空间的土壤可能在裂隙、洞穴和地下河中沉积不再移动,也可能随地下河输移排入地表河中^[44],其中洞穴沉积土壤可来自地表水流携带土壤从洞口冲入、水流携带土壤沿裂隙、管道等排入等,周念清等^[45]建立了岩溶区水土漏失概念模型,并将水土流失过程概化为雨滴溅蚀、坡面侵蚀、落水洞漏失和地下暗河运移 4 个主要过程,Dai 等^[13]分析了坡耕地降雨侵蚀过程中能够进入地下孔(裂)隙的产流产沙量,唐益群等^[46]阐明了喀斯特石漠化区地下漏失的过程及机理,冯腾等^[47]指出土壤地下流失可能以沿裂隙、地下管道等的整体蠕移丢失为主,郭红艳等^[48]分析了石漠化地区水土地下漏失的危害及作用机制,Wang 等^[11]解释了土壤地下流失的侵蚀—蠕变—崩塌机理,包括裂隙土扰动—内部侵蚀和局部坍塌—自由面形成—土壤蠕变—土管形成—土管坍塌—地面塌陷与填充等 7 个过程,Zhou 等^[49]通过剪切试验和蠕变试验,建立了喀斯特管道中土壤地下流失的概念模型。相关研究^[47,50-51]表明,岩石与土壤存在的软硬界面,使土壤颗粒可能随水流沿岩石—土壤界面运移^[36];已有研究证实坡面土壤通过裂隙漏失进入溶洞的土壤颗粒少,溶洞内部土壤主要来自岩土界面,这说明土壤沿岩土界面蠕移可能是该区水土流失的重要部分。岩土界面作为一种介于岩土与土壤之间的特殊结构,许多研究均注意到喀斯特地区碳酸盐基岩—土壤界面清晰、突变接触过渡的现象,且多处呈现岩土界面蠕移擦痕(图 2),今后应加强岩土界面特性及其对喀斯特地区坡面水文循环及土壤侵蚀影响的研究。同时,土石界面、地下孔(裂)隙、落水洞对

喀斯特区土壤地下漏失的主导程度,土壤漏失迁移距离均还有待后续进一步的研究证实。



图 2 岩土界面蠕移擦痕

2.3.2 土壤孔(裂)隙漏失过程与机理 土壤是否能从岩溶裂隙进入地下管道从而进入地下河,现在学术界还存在分歧。岩溶地区的地下漏失与岩溶裂隙发育程度关系很大,而岩溶地区的裂隙发育受地质构造、岩溶、植被、水文等多重因素影响,不同的岩溶地区差异很大。喀斯特岩溶裂隙、管道、落水洞、溶洞等无疑是其水文过程的重要通道^[11,52-55],但对土壤漏失/流失而言,学术界还存在 2 种争议:其一是坡地土壤主要由连续贯通的裂隙、管道、孔洞流入地下空间,并且这种漏失还比较高^[37];其二是坡面土壤通过裂隙、管道等漏失较轻微^[47],这种漏失比较小(岩溶裂隙发育下的土壤漏失也仅占总流失的 3%~34%),即使在更大尺度(流域)其漏失率也仅有 4.5%^[56]。针对喀斯特岩溶孔(裂)隙土壤漏失,其也存在不同观点,有学者认为孔(裂)隙通常为土壤或风化物及其混合物充填,土壤沿裂隙漏失轻微^[51],也有学者认为土壤主要沿孔(裂)隙、地下管道等整体蠕移丢失为主^[47]。在国家自然科学基金项目“喀斯特坡耕地浅层孔(裂)隙水文过程及土壤侵蚀响应机制”“喀斯特坡耕地土壤养分地下孔(裂)隙流失特征与机理”和“喀斯特坡耕地产流产沙特征及过程研究”的资助下,课题组多年来围绕喀斯特坡耕地浅层孔(裂)隙水土漏失的研究结果表明^[12-13,40,57-61],喀斯特坡耕地的土壤侵蚀方式是一个从地下漏失到地表迁移的转变过程,即小雨(≤ 30 mm/h)时以漏失为主,而暴雨(≥ 50 mm/h)时则以二者并重甚至以地表流失为主。针对水土地下漏失的争议,笔者结合野外考察和观测认为,水土沿孔(裂)隙漏失的大小关键取决于孔(裂)隙的发育程度及裂隙下部的联通情况,当裂隙发育未能达到地下空间或裂隙下部闭合时,其漏失较轻微,且裂隙常被土壤或岩石风化物所填充(图 3),而当裂隙较发育且与地下空间系统联通时,其漏失就较大(图 4)。由此来看,基于岩溶多重介质环境的特殊性,喀斯特区土壤侵蚀机制方面的研究还很薄弱,尤其是浅层孔(裂)隙水土漏失机制以及基于水分运移下的土壤侵蚀过程、水—土—岩/孔(裂)隙结构单元的侵蚀机制等,都还有待进一步探索,这是该地区石漠化综

合治理工程实施的迫切需要,同时也是土壤侵蚀学科体系的重要补充。



图3 孔(裂)隙被土壤填充



图4 孔(裂)隙下部连接较大空间

2.4 喀斯特坡地水土漏失研究方法探索

现有喀斯特区土壤侵蚀研究方法主要有河流泥沙观测、坡地径流小区观测^[52]、人工模拟降雨^[62]、遥感影像^[63]、USLE/RUSLE模型^[64-65]、核素示踪^[35,41,47,66]以及探地雷达技术^[67]、洞穴沉积物^[68]和地下河监测^[69]等。传统方法有很多的局限性,很难适用于喀斯特区特殊的水土流失观测,且得到的数据只能反映流域坡面或流域尺度的侵蚀产沙状况,如插针法、径流小区观测、遥感影像、USLE/RUSLE模型等。探地雷达技术可用于分析喀斯特表层岩溶带结构特征及发育状况,为判别地下水流失的方式和途径提供基础数据;洞穴土壤作为一类洞穴沉积物,当前利用它来研究水土漏失的研究还较少,分析其颗粒组成及水文地球化学指标可指示洞穴漏失土壤的来源^[68-69];此外,通过地下河出口断面的连续定位监测,分析其含沙量及微量元素等可在一定程度上指示土壤地下漏失状况^[70]。可以看出,上述方法在定量揭示喀斯特坡地水土地下漏失方面具

有局限性,很难揭示土壤地下漏失过程与机理。众多研究表明,核素示踪是一种能够准确反映各尺度下土壤侵蚀特征的研究方法,且适用于喀斯特区特殊的水文循环及土壤侵蚀机制研究。如¹³⁷Cs核素示踪法,20世纪60年代美国率先将这一技术运用到土壤侵蚀研究中。张信宝等^[71]将¹³⁷Cs技术引进国内,开始了我国土壤侵蚀的¹³⁷Cs示踪法研究。运用¹³⁷Cs示踪法在土壤侵蚀研究上已经取得一定的成果,在理论上和实际操作过程中都较为成熟^[35,41,47,72]。该示踪技术依赖于局部空间均匀沉降的假设,包括大气沉降在空间上是均匀的、向土壤传输空间上也是均匀的和在传输过程中不再发生分配3个内容,然而,谢菲尔德大学Parsons等^[73]指出这些假设是无效的,并认为¹³⁷Cs示踪不能用来提供关于土壤侵蚀速率的信息。由此看来,在土被不连续、裸岩覆盖等地表特征的喀斯特区核素示踪应用具有一定的局限性。由于喀斯特水土地下漏失野外观测的高难度,寻求或探索新的用于喀斯特坡地水土地下漏失监测的新方法、新技术还需要较大努力。

2.5 喀斯特坡地水土流失/漏失阻控

水土漏失和季节性干旱构成了我国西南喀斯特区生态环境的典型特征,严重制约着该地区农业可持续发展。喀斯特区水土流失过程特殊、复杂,需要针对其环境的特殊性研发水土保持模式和技术^[42],包括地表侵蚀和地下漏失的阻控技术措施。总体而言,目前喀斯特区坡地水土流失的阻控措施主要包括工程措施、耕作措施和生物措施3大类。喀斯特山地旱坡耕作阻控措施主要包括等高耕作、水平沟种植、地膜覆盖、轮作和林农间作、粮草间作等^[74],其原理是改变地表糙度、小地形以减少降雨径流的产生,但是在减小地表径流产生的同时,间接增大了水土地下漏失的危险性;工程阻控措施主要采用坡改梯、小型蓄排水工程及沉沙池等^[75],其原理是通过拦、蓄地表径流以增加入渗或直接蓄存地表径流加以利用,这与耕作措施相同,虽然能减小地表水土流失,但未能起到阻控水土地下漏失的作用;生物阻控措施主要采用退耕还林还草^[76-78]、封山育林、人工植被恢复^[79]以及其他水土保持林草措施等,如扩种绿肥^[80]、裸露石芽植物篱技术、隔坡式植物篱技术等^[75],其原理是通过植被对降雨的再分配作用、削弱雨滴动能,尤其是改良土壤的作用,表现在增强土壤渗透性、持水性以及抗冲刷、抗分散能力,进而减少地表水土流失发生。当然,也有不少阻控措施将林草措施间及其与其他阻控措施进行合理配置的综合治理模式,如生态移民—封山育林—恢复自然植被模式、退耕还林—蓄水保土—人工造林恢复植被模式^[81]以及药—粮—油作物间作

套种技术^[82]等。生物阻控措施在发展经济作物或经济林的同时,还可通过产生侵蚀性有机物质以加速碳酸盐岩的溶蚀和成土过程,进一步达到土壤流失/漏失减小的目的。针对水土地下漏失关键部位或途径,如裂隙、漏斗、落水洞等,通过工程与生物措施的配置,可阻控水土进入地下系统。可以看出,耕作措施和工程措施主要以阻控地表径流为重点,而生态阻控措施既保留耕作和工程措施的优点,还可通过其强大的根系系统固持裂隙、管道中的土壤,减小土壤地下漏失,同时又可促进生态环境健康发展。Jiang 等^[83]认为,喀斯特区水土保持必须结合石漠化的综合防治,以水土资源的有效保护和充分合理利用为原则,以生物措施为主,其他措施为辅。但目前喀斯特区水土流失阻控措施总体以地表侵蚀阻控技术为主,而针对地下漏失阻控的技术较少,特别是生态阻控技术措施。

3 研究不足与展望

国内针对喀斯特区水土流失的研究较多,包括侵蚀环境、类型、方式、特征、机制、水分运移以及地下漏失等方面都取得了较好的研究成果,可为喀斯特区水土流失综合治理提供一定的理论依据。然而,基于特殊地表和地下二元结构的喀斯特坡地水土流失/漏失研究还存在以下几个方面的问题:

(1)有研究已证实喀斯特区水土地下漏失的存在,然而对于喀斯特区侵蚀环境的研究仅侧重于地表系统,针对地下系统的侵蚀环境研究仍处于空白。因此,有必要对喀斯特坡地的地下侵蚀环境进行探索研究,为进一步揭示水土地下漏失机制奠定基础。

(2)喀斯特坡地水分运移的研究还不够深入,已有研究仅着重于地表土壤入渗、土壤水分变化以及表层岩溶带水文调蓄功能,而针对地表以下岩—土界面、浅层孔(裂)隙水流路径以及水分运移与水土流失的交叉研究缺乏,而这对系统揭示喀斯特坡地水土流失的水分驱动作用具有重要意义。

(3)由于水土地下漏失难以直接观测,且目前尚无切实可行的研究方法,已有研究还未能准确揭示喀斯特坡地地表和地下水流失/漏失在总流失量中的贡献率。因此,有必要通过野外实地调研和室内模拟的方法,研究喀斯特坡地地表、地下水流失/漏失变化特征。

(4)喀斯特区水土漏失机制的研究还很薄弱。目前虽得到广泛学者的关注,但存在较大争议,有学者认为土壤沿孔(裂)隙漏失轻微,其漏失依赖于所选尺度,也有学者认为土壤主要沿孔(裂)隙、地下管道等整体蠕移丢失,因此有必要进一步采用同位素示踪等先进技术对其水土漏失机制开展研究。

(5)喀斯特区水土流失的阻控措施主要以地表阻控为重点,而针对地下漏失的阻控技术较少。因此,

有必要遵循生态学原理及生态工程原理,从坡地地面、岩—土界面及孔(裂)隙 3 个方面出发,建立该区水土漏失的阻控技术体系。

(6)如果能构建一个关于联系地表侵蚀和地下特征的模型,在观测地表侵蚀特征基础上,通过该模型就可以预测某个地方或区域的地下孔(裂)隙及土壤储量或生态容量,进而可直接为喀斯特石漠化的综合治理及其石漠化生态恢复提供依据。

4 结语

目前我国喀斯特区土壤侵蚀的研究还处于探索阶段,其土壤流失/漏失方式争议较大,不同区域的研究者有不同的研究结果,因此今后应着重研究并揭示喀斯特区土壤流失/漏失原因、方式、机制以及各影响因素之间的相互作用、机制,初步形成喀斯特区水土流失/漏失的基本理论体系;同时,构建喀斯特坡地水土漏失的阻控技术体系,为我国喀斯特石漠化综合治理工程的实施及其生态恢复提供理论依据和技术支撑。喀斯特区坡地土壤漏失的研究涉及水文学、水力学、土壤学、地质地貌学、生态学等方面内容,因此进行交叉学科的研究有助于推进各学科的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 等. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 9-14.
- [3] 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): 21-28.
- [4] Herman E K, Toran L, White W B. Clastic sediment transport and storage in fluvio-karst aquifers: An essential component of karst hydrogeology[J]. Carbonates and Evaporites, 2012, 27(3): 211-241.
- [5] 郭纯青. 中国岩溶生态水文学[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- [6] 蒋忠诚, 曹建华, 杨德生, 等. 西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6 (1): 37-42.
- [7] 谢俊奇. 中国坡耕地[M]. 北京:中国大地出版社, 2005.
- [8] 刘建忠, 韩德军, 顾再柯, 等. 贵州喀斯特地区坡耕地现状及整改策略[J]. 水土保持应用技术, 2007(5): 42-44.
- [9] 李渊, 刘子琦, 吕小溪, 等. 贵州石漠化地区地下漏失水土理化性质特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 111-117.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [15] 胡宝清, 金姝兰, 曹少英, 等. 基于GIS技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 103-107.
- [16] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2002, 18(1): 77-79.
- [17] 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.
- [18] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity in Europe[J]. Science of The Total Environment, 2015, 511(4): 801-814.
- [19] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, et al. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J]. Catena, 2012, 92(3): 38-48.
- [20] 黄晓亚, 陈喜, 张志才, 等. 西南喀斯特地区降雨集中度及其变化特征分析: 以乌江流域中上游为例[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 203-208.
- [21] 刘春茹. 贵州碳酸盐岩风化壳次生石英表面结构、裂变径迹测年及其指示意义[D]. 北京: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [22] 蓝家程, 傅瓦利, 甄晓君, 等. 岩溶山区土壤性质及其对土下溶蚀速率的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 58-62.
- [23] 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.
- [24] 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): 26-34.
- [25] 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(1): 112-124.
- [26] 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: 地球科学, 1999, 29(5): 441-449.
- [27] 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.
- [28] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤C、N、P含量和空间异质性[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [29] 李阳兵, 邵景安, 周国富, 等. 喀斯特山区石漠化成因的差异性定量研究: 以贵州省盘县典型石漠化地区为例[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 785-790.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.
- [34] 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.
- [35] 白占国, 万国江. 滇西和黔中表土中 ^7Be 与 ^{137}Cs 分布特征对比研究[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 43-48.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 曹建华, 鲁胜力, 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.
- [39] 曹建华, 袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [40] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [41] 张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 典型喀斯特坡地 ^{137}Cs 的分布与相关影响因子研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3152-3158.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 李晋, 熊康宁. 岩溶洞穴土壤颗粒分析及其对水土流失的研究意义[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 16-18.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Zhou J, Tang Y, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual model[J]. Natural Hazards, 2012, 62

- (3):1191-1215.
- [50] Zhang X, Bai X, He X. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China[J]. Carbonates and Evaporites, 2011, 26(2):149-153.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Fu Z, Chen H, Xu Q, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(5):795-811.
- [54] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. Geomorphology, 2015, 250(12):1-14.
- [55] Katsanou K, Lambrakis N, Tayfur G, et al. Describing the karst evolution by the exploitation of hydrologic time-series data[J]. Water Resources Management, 2015, 29(9):3131-3147.
- [56] Wei X, Yan Y, Xie D, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8):1-11.
- [57] 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.
- [58] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3):545-557.
- [59] Dai Q, Peng X, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area[J]. Catena, 2017, 152(3):218-226.
- [60] Dai Q, Peng X, Zhao L, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. Land Degradation and Development, 2017. DOI:10.1002/ldr.2711
- [61] 刘正堂, 戴全厚, 倪九派, 等. 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.
- [62] 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.
- [63] Kheir R B, Abdallah C, Khawlie M. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS[J]. Engineering Geology, 2008, 99(3/4):239-254.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 傅瓦利, 张治伟, 张洪, 等. 岩溶区坡面土壤侵蚀特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5):38-41.
- [67] 王升, 陈洪松, 付智勇, 等. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测[J]. 土壤学报, 2015, 52(5):1024-1030.
- [68] 周福莉, 李廷勇, 陈虹利, 等. 重庆芙蓉洞洞穴水水文地球化学指标的时空变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):253-259.
- [69] 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.
- [70] 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 等. 降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2014, 35(1):123-130.
- [71] 张信宝, 李少龙, 王成华, 等. ^{137}Cs 法测算梁崩坡农耕地土壤侵蚀量的初探[J]. 水土保持通报, 1988, 8(5):18-22, 29.
- [72] Basher L R. Surface erosion assessment using ^{137}Cs : Examples from New Zealand[J]. Acta Geologica Hispanica, 2000, 35(3/4):219-228.
- [73] 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.
- [74] 周玮, 熊康宁, 高渐飞, 等. 贵州毕节石桥小流域喀斯特石漠化耕地治理研究[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(9):110-113.
- [75] 罗为群, 蒋忠诚, 欧阳然, 等. 典型岩溶峰丛洼地水土保持技术研究[J]. 中国水土保持, 2013(1):37-41.
- [76] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价: 以贵州省毕节地区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(12):3255-3264.
- [77] 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.
- [78] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应[J]. 土壤学报, 2011, 48(6):1219-1226.
- [79] 国家林业局防治荒漠化管理中心, 国家林业局中南林业调查规划设计院. 石漠化综合治理模式[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [80] 龙健. 贵州喀斯特地区土壤障碍因素分析及其调控对策[J]. 土壤通报, 2005, 36(5):795-798.
- [81] 王荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4):1070-1080.
- [82] 颜萍, 熊康宁, 王恒松, 等. 喀斯特地区水土流失与水土保持研究进展[J]. 中国水土保持, 2016(1):54-59.
- [83] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(3):1-12.