

# 岩石裸露与水土流失关系研究现状及石漠化因子研究存在的问题

李瑞<sup>1,2</sup>, 盘礼东<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘要:** 基岩裸露是喀斯特地区的常见现象, 形成了类似荒漠景观的“石漠化”, 而石漠化的发生发展影响了区域土壤侵蚀机理和结果, 故需加大石漠化因子( $D$ )与水土流失定量关系研究, 以便修正土壤流失方程。因此, 在中外文献查阅的基础上, 总结了岩石裸露对坡面水土流失的影响相关研究现状。结果表明, 岩石裸露对坡面水土流失的影响研究结论较为离散, 主要观点可分为 2 大类: 一类观点认为, 随着坡面岩石裸露率的增加, 水土流失呈线性、二次函数及指数等趋势衰减, 其中以指数衰减为主要方式; 另一类观点认为, 岩石裸露对坡面水土流失的影响具有复杂性, 与坡度、土壤类型、降雨阶段及岩石裸露率区间等有关, 在一定条件下, 随着岩石裸露率的增加, 水土流失加剧。对于我国喀斯特区  $D$  因子研究现状, 主要存在 2 个方面的问题: 一是相关定量观测试验较少, 致使 RUSLE 等常用土壤流失方程在喀斯特地区的应用受到较大限制; 二是野外定位观测作为研究土壤侵蚀各因子的重要手段, 但在喀斯特地区建造天然岩溶裸露小区的难度极大。研究结果可为我国喀斯特区石漠化因子( $D$ )的定量研究及相关土壤流失方程的修正提供参考。

**关键词:** 喀斯特; 岩石裸露; 石漠化因子; 水土流失; 土壤流失方程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0010-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.002

## Research Status of the Relationship Between Rock Exposure and Soil and Water Loss and Discussion on the Existing Problems in the Research of Rocky Desertification Factors

LI Rui<sup>1,2</sup>, PAN Lidong<sup>1,2</sup>

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001)

**Abstract:** Bedrock exposure is a common phenomenon in karst area, which forms “rocky desertification” similar to desertscape. And the occurrence and development of rocky desertification affect the mechanism and results of regional soil erosion. Therefore, it is necessary to study the quantitative relationship between rocky desertification factors ( $D$ ) and soil and water loss in order to revise soil loss equations. On the basis of reviewing domestic and abroad literatures, this paper summarized the research status of the impact of rock exposure on soil erosion on slope. The results showed that the research conclusions were relatively discrete, and the viewpoints fell mainly into two categories. One was that the soil and water loss tended to decline in a linear, quadratic function and exponential trend with the increases of rock exposure rates, and the exponential attenuation was the main way; the other was that the effect of rock exposure on soil and water loss on slope was complex, which was related to slope gradient, soil type, rainfall stage and range of rock exposure rate. Under the certain conditions, with the increases of rock exposure rates, soil erosion would be intensified. For the research status of  $D$ -factor in karst areas in China, we think that there are two main problems: One is that there are few quantitative observation experiments between  $D$ -factor and soil and water loss, which limits the application of RUSLE and other commonly used soil loss equations in karst areas; the other is that field positioning observation is an important means to study soil erosion factors, but the construction of natu-

ral rock exposure runoff plot in karst areas is very difficult. The results can provide a reference for the quantitative study of  $D$ -factor and the correction of soil loss equation in karst areas of China.

**Keywords:** karst; rock exposure; rocky desertification factor ( $D$ -factor); soil and water loss; soil loss equations

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、地表土不连续和土地退化过程<sup>[1]</sup>。当前,我国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<sup>[2]</sup>。水土流失是喀斯特地区石漠化形成和发展的核心问题,影响了石漠化的发生和发展,也是当前石漠化治理的关键<sup>[3]</sup>;反之,喀斯特石漠化的发生发展同样影响区域水土流失。以贵州省 2016 年公布的水土流失公告<sup>[4]</sup>为例,贵州喀斯特地区土壤侵蚀模数仅  $279.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,而非喀斯特地区达  $1\ 189.43 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由此可见,受岩溶裸露的影响,贵州喀斯特区土壤侵蚀模数远小于非喀斯特区域。另有研究<sup>[5]</sup>表明,喀斯特地区的土壤侵蚀强度递减速率普遍大于非喀斯特地区。陈美淇等<sup>[6]</sup>的研究也证实了这一观点,他们对西南喀斯特区与黄土高原坡面侵蚀规律进行了比较分析表明,西南喀斯特区的坡面侵蚀量小于黄土高原地区。总之,水土流失影响石漠化的发生和发展,而石漠化的发生发展同样影响水土流失结果。因此,石漠化和水土流失之间存在较为直接的影响关系,两者间的直观关系见图 1。与非喀斯特地区相比,喀斯特地区岩溶基岩裸露率高、岩石渗透性强,土层瘠薄且不连续、土壤持水能力差,碳酸盐溶蚀作用下形成了裂隙、管道、漏斗、落水洞及地下河等系统<sup>[7]</sup>,导致喀斯特地区土壤侵蚀过程及机理极为复杂,呈现“二元”侵蚀特征。特殊的侵蚀环境和复杂的侵蚀机理,导致喀斯特地区土壤侵蚀相关研究开展相对较少,尤其是影响水土流失的石漠化因子( $D$ )的探讨更少。本文以  $D$  因子对坡面水土流失的影响为主旨,对国内外相关研究现状进行总结,在此基础上,结合笔者前期参与贵州喀斯特地区水土流失相关研究和生产实践,针对我国喀斯特地区影响水土流失的  $D$  因子研究存在的问题进行探讨,重点对常用土壤流失方程在喀斯特地区应用实践中存在的瓶颈等主要问题进行梳理,以期为我国喀斯特  $D$  因子的定量研究提供参考。

## 1 岩石裸露对水土流失的影响研究现状

目前,岩石裸露对水土流失的影响及机制相关研究以室内模拟试验居多,而野外定位观测相对较少。已开展的研究<sup>[8]</sup>结论较为离散,原因在于地表岩石裸

露对土壤侵蚀的影响是复杂和矛盾的(即岩石裸露有可能加剧土壤侵蚀和径流流失,也有可能减少土壤侵蚀和径流流失),故需要更多的关于岩石裸露对水文土壤过程影响的定量信息,以便改进土壤侵蚀模型<sup>[9]</sup>。虽然,岩石裸露对土壤侵蚀的影响是复杂的,但有一点已形成了较为广泛的共识,即从较大尺度(流域、区域)来看,喀斯特地区土壤侵蚀模数远低于非喀斯特地区<sup>[10-11]</sup>,也即喀斯特地区石漠化的发生发展降低了土壤流失。

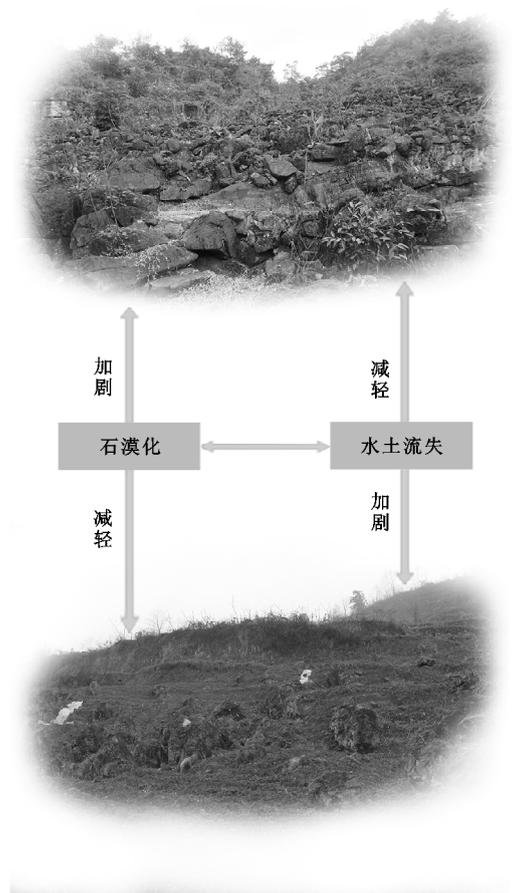


图 1 石漠化与水土流失直观关系示意

### 1.1 随岩石裸露率的增加,水土流失呈衰减趋势

岩石裸露减少水土流失的主要原理是通过抑制土壤可蚀性和径流的产生,提高地表径流入渗率,从而大幅度降低土壤侵蚀<sup>[12-15]</sup>。当然,岩石裸露方式也会影响水土流失结果。已有研究<sup>[16]</sup>表明,20%、40%和60%岩石裸露率与对照相比,随着裸露率的增加,土壤流失呈现降低趋势,减少土壤流失率达35.23%~76.84%;同时,不同的岩石裸露方式对土壤流失结果也有一定的影响,但总体来讲,裸露率的影响更大。岩石置于土层表面,岩石覆盖区域仍有径流下渗,从而影响

径流,而岩石嵌入表土层,则这种方式对入渗影响不大,2种岩石裸露方式对径流存在一定的影响<sup>[17]</sup>。

与对照相比,20%岩石覆盖降低径流率和土壤流失率分别达60%和81%,而40%岩石覆盖降低径流率和土壤流失率分别为64%和82%<sup>[18]</sup>。可以看出,2种岩石覆盖率均显著降低了坡面产流产沙量,但两者之间差异甚小。地中海喀斯特地区试验<sup>[8]</sup>表明,随着岩石裸露率的增加,土壤流失呈指数函数递减,但当岩石裸露率超过75%以后,土壤流失率总是非常小(20~1 000 kg/(hm<sup>2</sup>·h))。同样,Zavala等<sup>[9]</sup>在地中海地区的研究也认为,土壤流失率与岩石覆盖之间的关系可用指数函数描述。类似地,我国三峡地区的相关研究<sup>[19]</sup>表明,地表岩石的存在显著地降低了土壤侵蚀,并且土壤侵蚀速率与岩石裸露率之间的关系可以通过指数函数来表示。为建立北京市的土壤流失方程,刘宝元等<sup>[20]</sup>针对砾石覆盖因子研究认为,随地表砾石覆盖率的增加,土壤流失呈指数函数递减,同时认为砾石覆盖与地表枯落物(残茬覆盖)因子公式的系数和指数都非常接近,可以合并为1个公式

作为地表覆盖度因子公式。

已有研究<sup>[12]</sup>表明,地中海地区岩石裸露延缓了积水和地表径流,增加了稳定状态,减少了径流排放、泥沙含量和侵蚀速率,随着岩石裸露率的增加,径流和土壤流失均呈逐渐下降的趋势,这种趋势可近似采用线性关系表达。类似地,径流量随砾石覆盖度增加呈线性关系减小,而水流流速和土壤侵蚀量随砾石覆盖度的增加呈负指数递减<sup>[21]</sup>。重庆北碚喀斯特区紫色土室内模拟试验<sup>[22]</sup>表明,随着岩石裸露率从0到40%的增加,含沙量、土壤侵蚀速率和土壤流失率均显著降低,岩石裸露率与土壤流失间呈二次函数关系。我国西南喀斯特地区0,30%和60%3个裸岩率室内模拟试验<sup>[23]</sup>结果表明,随着裸岩率的增加,不管是同一坡度还是不同坡度,产流、产沙均呈减少趋势,但并未明确裸岩率与产流产沙之间的函数关系。

前述研究比较一致地认为,随着岩石裸露率的增加,水土流失呈衰减趋势,这种衰减关系可以用线性、二次函数或指数等关系表达,但呈指数函数关系的研究结论更多,国内外部分研究者给出的两者关系见表1。

表 1 岩石裸露与土壤流失的关系

序号	试验(目标)区域	主要试验方法	函数形式	关系式	参数说明	文献
1	地中海喀斯特区(西班牙)	野外人工模拟降雨	线性	$y=0.98-0.11x$	$y$ 为土壤流失率( $g/(m^2 \cdot h)$ ); $x$ 为岩石裸露率(%)	[12]
2	地中海喀斯特区(西班牙)	野外人工模拟降雨	指数	$y=a \cdot e^{-bx}$	$y$ 为土壤流失率( $10^3 kg/(hm^2 \cdot h)$ ); $x$ 为岩石裸露率(%) $a, b$ 为经验系数	[8]
3	地中海喀斯特区(西班牙)	野外人工模拟降雨	指数	$y=138.6e^{0.1002x} \quad R^2=0.836$	$y$ 为土壤流失率( $kg/(m^2 \cdot h)$ ); $x$ 为岩石裸露率(%)	[9]
4	中国三峡紫色土山区	野外人工模拟降雨	指数	$ER=a \cdot e^{-b(RFc)}$	$ER$ 为土壤侵蚀速率( $g/(m^2 \cdot min)$ ); $RFc$ 为岩石裸露率(%) $a, b$ 为经验系数	[19]
5	北京土石山区	室内人工模拟降雨	指数	$C_s=1.029e^{-0.0235Vr}$	$C_s$ 为地表覆盖因子,无量纲; $Vr$ 为地表覆盖率(%)	[20]
6	北京土石山区	室内人工模拟降雨	指数	$SI=a \cdot e^{-bCv}$	$SI$ 为土壤流失量; $a$ 为系数; $b$ 为指数; $Cv$ 为砾石覆盖率(%)	[21]
7	法国北部土石山区	室内人工模拟降雨	指数	$SI=e^{-cC}$	$SI$ 为土壤流失量( $g/(90 min)$ ); $c$ 为指数; $C$ 为岩石覆盖(出露)率(%)	[24]
8	重庆涪陵紫色土山区	室内人工模拟降雨	二次函数	$y=-0.0002x^2-0.004x+0.9867 \quad R^2=0.96$	$y$ 为土壤流失率( $g/(m^2 \cdot min)$ ); $x$ 为岩石裸露率(%)	[22]

## 1.2 岩石裸露对水土流失影响的复杂性

已有研究<sup>[25]</sup>表明,坡度为5°时,随着岩石裸露率的增加,径流减少;坡度为10°和20°条件下,随着岩石裸露率增加,径流呈增加的趋势,即不同坡度条件下,岩石裸露率对径流的响应关系出现了截然不同的结果。15°和30°2种坡度、不同岩石裸露率模拟降雨试验<sup>[26]</sup>表明,无论是缓坡还是陡坡,岩石裸露增加了坡面径流量,即随着裸露率增加,坡面产流呈增加趋势;而对土壤流失的影响较为复杂,降雨初期土壤流失随岩石裸露率的增加呈增加趋势,而降雨后期土壤流失随岩石裸露率的增加有所降低。四川盆地开展的研究<sup>[27]</sup>表明,适当增加岩石碎屑含量可以显著增加土壤透气孔,增加地表径流的下渗率,但碎屑含量过高不能满足植物正常生长所需的水分,也就是说碎屑含量过高影响了地表径流的下渗,即随着岩石碎屑含量的增加地表径流呈现出先减后增的趋势。西南

喀斯特地区人工模拟降雨试验<sup>[28-29]</sup>表明,随着坡面岩石裸露率的增加,产沙率先增加后减小。类似地,Bunte等<sup>[30]</sup>研究也认为,随着基岩裸露率的增加,土壤流失先增加再减少,同时认为20%岩石裸露率是土壤流失由增到减的临界点。此外,不同土壤类型也会影响到试验结果,黏土堆积物的平均侵蚀速率与岩石含量呈线性负相关关系(即随岩石含量的增加,土壤侵蚀减缓),而砂壤土堆积物的平均侵蚀速率与岩石含量呈线性正相关(即随岩石含量的增加,土壤侵蚀加剧)。由此可见,不同土壤堆积物岩石覆盖产生了截然不同的侵蚀结果,砂壤土堆积物岩石覆盖加剧了土壤侵蚀,而黏土堆积物岩石覆盖则减轻了土壤侵蚀<sup>[31]</sup>。另外,野外试验过程中,岩石裸露同其他侵蚀因子的交织,导致土壤流失结果的进一步复杂化,例如笔者参与的贵州毕节喀斯特地区坡度因子小区多年观测结果表明,随着坡度由5°增加至15°,土壤流

失呈增加趋势,但随着坡度继续增加至 $20^{\circ}$ 和 $25^{\circ}$ ,土壤流失却大幅下降(图2)。Zhang等<sup>[32]</sup>在毕节石桥小流域开展的试验中,共设置5个处理,坡度分别为 $5^{\circ}$ , $10^{\circ}$ , $15^{\circ}$ , $20^{\circ}$ 和 $25^{\circ}$ ,均为裸露小区,其中坡度为 $20^{\circ}$ 和 $25^{\circ}$ 的小区有岩石出露,结果表明,基岩裸露导致毕节石桥小流域 $20^{\circ}$ 及 $25^{\circ}$ 坡面径流小区土壤流失的减少;但相关研究<sup>[33]</sup>表明,基岩裸露导致土壤流失大幅度减少的机理不明。导致前述毕节石桥小流域 $20^{\circ}$ , $25^{\circ}$ 小区土壤流失大幅度减少的主要原因到底是岩溶裸露,亦或是存在某个“临界坡度”而致,目前尚无定论。

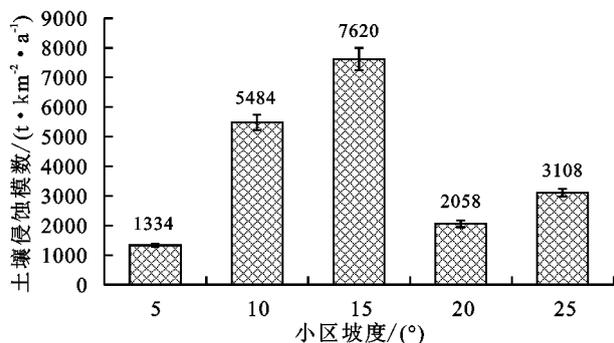


图2 贵州毕节石桥小流域不同坡度对土壤侵蚀的影响

综上,岩石裸露对水土流失的影响具有复杂性和不确定性,与坡度、土壤类型、降雨阶段及岩石裸露率区间等有关,在一定条件下,随着岩石裸露率的增加,水土流失加剧,这与前述随岩石裸露率的增加,水土流失呈减缓趋势的结论不同。当然,目前针对岩石裸露与水土流失定量关系的研究多基于人工模拟,主要关注的还是坡面水土流失,而天然岩石出露条件下,岩溶裂隙等复杂的地下通道的存在还可能“蠕滑”等土壤地下流失现象<sup>[34]</sup>,即考虑水土地下漏失的情况下,喀斯特区岩溶出露对水土流失的影响更为复杂。

## 2 我国喀斯特地区石漠化因子研究存在的问题

### 2.1 石漠化因子与水土流失关系定量研究较少,常用土壤流失方程的应用受到限制

笔者前期参与贵州省水土流失普查(公告)、水土保持规划、小流域水土流失监测等相关工作实践发现,基于目前常用的美国通用土壤流失方程(USLE/RUSLE)和中国土壤流失方程(CSLE)等估算的贵州省喀斯特地区土壤流失结果,往往较地面观测结果偏大。前述土壤流失方程建立的基础观测资料未涵盖喀斯特石漠化区,故未能充分考虑 $D$ 因子的影响。以RUSLE为例,其基本形式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中: $A$ 为土壤侵蚀模数; $R$ 为降雨侵蚀力因子; $K$

为土壤可蚀性因子; $L$ 为坡长因子; $S$ 为坡度因子; $C$ 为植被盖度和管理因子; $P$ 为水土保持措施因子。

从前述方程基本形式可以看出,该土壤流失方程的一级土壤侵蚀因子未考虑 $D$ 因子,但在覆盖与管理因子( $C$ )的子因子中考虑了地表覆盖因子(包括砾石覆盖因子)。不过与美国相比,世界其他国家有关基于作物各生长阶段土壤流失比例计算 $C$ 值的详细资料一般都相对缺乏<sup>[20]</sup>,因此在喀斯特地区的实际应用中,尤其是大尺度(流域、区域)的土壤流失估算,一般直接利用遥感影像数据提取植被覆盖信息,再利用植被盖度与 $C$ 因子之间的关系式推算 $C$ 值<sup>[35]</sup>,从而忽略了 $D$ 因子的影响,导致土壤流失估算结果发生较大的偏差。

由于喀斯特区石漠化问题的复杂性和特殊性,目前石漠化对土壤侵蚀影响的定量研究开展得较少<sup>[36]</sup>,导致前述土壤流失方程在喀斯特地区的应用实践中难以确定较为可靠的修正参考。但若直接采用前述USLE/RUSLE、CLSE等土壤流失方程的估算结果,则与实际偏差会很大,很难精准指导区域水土保持规划等工作。因此,一些研究者尝试着参考前人在非喀斯特地区开展的关于岩石覆盖因子相关研究成果,或直接采用石漠化出露比例等方法修正土壤流失方程,进而估算喀斯特地区土壤流失。例如,莫建飞等<sup>[37]</sup>通过引入石漠化因子研究了广西岩溶生态系统的水土流失情况,结果表明,引入石漠化因子可以较为合理地评估广西岩溶生态系统土壤流失的空间分布状况。此外,刘警鉴等<sup>[38]</sup>参考了刘宝元等<sup>[20]</sup>、符素华等<sup>[21]</sup>以及师长兴<sup>[39]</sup>前期研究认为,裸岩率为 $0 \sim 50\%$ 的石漠化因子与裸岩率近似符合线性衰减关系,裸岩率为 $50\%$ 以上的石漠化因子与裸岩率近似符合指数衰减关系,从而计算了广西壮族自治区喀斯特石漠化因子值,进一步估算了全区土壤侵蚀模数。应当说,前述研究参考前人研究成果,引入 $D$ 因子修正土壤流失方程(RUSLE)后,估算的土壤侵蚀结果较直接采用RUSLE方程估算的结果更符合喀斯特地区实际情况,但同时也应看到,前述研究所参考的 $D$ 因子计算公式均来自非喀斯特地区,这可能会导致 $D$ 因子计算结果存在一定的偏差,进而影响土壤流失估算结果;也有研究<sup>[40-41]</sup>直接采用地块内裸露岩石面积与该地块总面积的比值作为石漠化修正因子对RUSLE方程进行修正,进而估算研究区土壤侵蚀模数。这种方法一定程度上修正了RUSLE方程直接进行土壤流失估算导致结果偏大的问题,但应当指出,石漠化裸露率与土壤流失之间并不完全是简单的线性关系,

这可能会导致结果的偏差。

综上,目前喀斯特地区  $D$  因子研究的最大问题,笔者认为相关定量观测研究开展较少,以至于当前相关土壤流失方程在喀斯特地区应用实践中,可供修正参考的基础观测资料也较少,制约了 USLE/RUSLE、CSLE 等土壤流失方程在喀斯特地区的应用;此外,从前述国内外研究现状来看, $D$  因子对水土流失的影响具有复杂性,研究结论不尽一致,需要进一步加大  $D$  因子的研究。

## 2.2 石漠化因子研究方法存在的问题及困难探讨

从前述国内外针对  $D$  因子的研究现状来看,多数成果来源于人工模拟(人工模拟降雨、人工模拟岩石裸露率),且多为室内人工模拟。室内人工模拟较野外定位观测而言,具有诸多优势,例如其他影响因素可控性较好、试验周期短等。但从美国通用土壤流失方程的建立历史来看,野外定位观测又是一种不可或缺的技术手段,对研究各土壤侵蚀因子具有重要的意义<sup>[42]</sup>。但就喀斯特地区  $D$  因子而言,采取坡面径流小区野外定位观测的方法又存在诸多困难:(1)受喀斯特地区坡面破碎(不连续)等特征的影响,在不破坏天然裸露岩石的前提下建造坡面径流小区较为困难,而要按照一定的石漠化裸露率和一定的规格(一般按标准小区规格)来进行小区的建造更是难上加难,在强度石漠化区域建小区本身就很困难,而要按照  $15^\circ$ 、 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$  的规格,以及不同岩溶裸露率来建造,还总体上不要破坏天然岩石,这基本不可能实现;(2)扩大选址范围有可能解决前述问题,但若不同石漠化等级小区空间跨度过大,则土壤背景值、降雨等因素难以忽略,同时对管理和观测也带来了极大的挑战;此外,野外观测由于人力物力的限制,一般不设重复小区,而不设重复小区的情况下,要求各小区在布局、尺寸、材料和位置等方面需保持一致,并采取统一方式管理<sup>[43]</sup>。因此,针对喀斯特地区而言,建立不同石漠化等级的天然坡面径流小区开展水土流失观测困难很大。

建造天然石漠化小区较为困难,但可否考虑参照天然岩溶特征,采取人工模拟石漠化的方式建造坡面径流小区呢?笔者认为,在建造天然石漠化小区较为困难的情况下,野外人工模拟石漠化的方式具有一定可行性:(1)基于喀斯特地区的特点,野外模拟石漠化具有岩石来源丰富、搬运方便等优势,同时可最大限度地保持其天然性,对于较小的岩石甚至可以整体“移植”;(2)较天然石漠化小区,人工模拟石漠化可以做到既定岩石裸露率的基本准确,如 10%, 30%, 50%, 70% 等岩溶出露率,人工基本能够模拟准确,而

在同一区域要采用天然石漠化小区却很困难;(3)岩石人工嵌入表土层,虽对表层土有一定影响,但经过一段时间的自然沉降,这种影响将会大幅度降低,从而减少对水土流失观测结果的影响。具体模拟的方法也可根据研究区域天然岩溶出露情况,采取“移植”天然岩石的方式建造石漠化小区,或采取混凝土浇筑“岩石”的方式实现(图 3)。当然,野外人工模拟石漠化的方式获取的水土流失观测结果是否可靠,尚待实践的进一步检验。



图 3 人工模拟石漠化小区示意

## 3 结论

(1)从国内外研究现状来看,岩石裸露与水土流失的定量关系研究结论较为离散,不尽一致。研究结论主要可分为 2 类:一类是随着岩石裸露率的增加,水土流失呈指数、线性、二次函数等趋势衰减,其中指数衰减关系结论居多;另一类是在一定条件下,岩石裸露加剧了水土流失,即随着岩石裸露率的增加,水土流失呈上升趋势。

(2)常用的土壤流失方程如 USLE/RUSLE、CSLE 等在喀斯特地区的应用实践中有一定的局限性,需要采用  $D$  因子进行修正,但目前可供修正参考的地面观测资料有限,需要进一步加大相关研究,逐步建立起丰富、可靠的研究成果体系,以供相关土壤流失模型修正参考。

(3)针对  $D$  因子的野外观测试验,最大的困难是难以按照既定的设计建造天然石漠化径流小区。笔者认为在天然石漠化小区难以建造的前提下,可考虑采用“移植”天然岩石或人工浇筑的方式模拟石漠化,但结果的可靠性尚待实践检验。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [3] 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.

- [4] 贵州省水利厅.贵州省水土保持公告(2011—2015)[R/OL]. [2016-09-16].<http://www.gzsb.org.cn/Item/1624.aspx>.
- [5] 赵青松,兰安军,范泽孟,等.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].地理信息科学学报, 2020,22(7):1555-1566.
- [6] 陈美淇,张卓栋,王晓岚,等.西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J].中国水土保持科学,2016,14(6):53-60.
- [7] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- [8] Martínez-Zavala L, Jordán A. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain[J].Soil Use and Management, 2008, 24:108-117.
- [9] Zavala L M, Jordán A, Bellinfante N, et al. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment[J].Soil Science and Plant Nutrition,2010,56(1):95-104.
- [10] 魏兴萍,谢世友,张志伟,等.重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失[J].农业工程学报, 2011,27(6):42-46.
- [11] 李瑞,陈康,刘瑞禄,等.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.
- [12] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J].European Journal of Soil Science,2001,52:59-68.
- [13] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions[J].Journal of Hydrology,2018,563:811-817.
- [14] Sekucia F, Dlapa P, Kolláir J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments[J].Catena,2020,195:e104807.
- [15] Wu X L, Meng Z J, Dang X H, et al. Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China[J].Soil and Water Research,2021,16(3):151-163.
- [16] Lü J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events[J].Catena, 2019,172:179-189.
- [17] Smets T, Poesen J, Bochet E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water[J].Progress in Physical Geography,2008,32(6):654-677.
- [18] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(4):1708-1723.
- [19] Wang X Y, Li Z L, Cai C F, et al. Hydrological response of sloping farmlands with different rock fragment covers in the purple soil area of China[J].Journal of Hydrologic Engineering,2012,18(4):446-456.
- [20] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] 符素华,路炳军,叶芝茵.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18,34.
- [22] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope[J].Earth Surface Processes and Landforms,2019,44(12):2467-2478.
- [23] 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.
- [24] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J].Catena,1992,19(5):451-474.
- [25] Jean J S, Ai K F, Shih K, et al. Stone cover and slope factors influencing hillside surface runoff and infiltration: Laboratory investigation[J].Hydrological Processes,2000,14(10):1829-1849.
- [26] Liu D D, She D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J].Catena,2017,151:213-224.
- [27] Li J W, Han Z, Zhong S Q, et al. Pore size distribution and pore functional characteristics of soils as affected by rock fragments in the hilly regions of the Sichuan Basin, China[J].Canadian Journal of Soil Science,2020,101(1):74-83.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J].Water Resources Research,1993,29(5):1415-1424.
- [31] Lv J R, Luo H, Hu J S, et al. The effects of rock fragment content on the erosion processes of spoil heaps: A laboratory scouring experiment with two soils[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(4):2089-2102.

- 机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.
- [9] 程竞萱,程金花,郑欣,等.不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素[J].河南农业大学学报,2018,52(6):973-982.
- [10] 张建中,姚晶晶,张成梁,等.排矸场植被恢复初期不同植被类型土壤优先流特征[J].干旱区资源与环境,2021,35(4):165-172.
- [11] 陈晓冰,严磊,李振东,等.耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响[J].土壤,2019,51(4):786-794.
- [12] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient[J].Plant and Soil,2013,373(1/2):285-299.
- [13] Jiang X J, Liu W, Chen C, et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China[J].Geoderma,2018,320:161-171.
- [14] Huang Z, Tian F P, Wu G L, et al. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than graminaceous grasslands in arid regions[J].Land Degradation and Development,2016,28(1):309-316.
- [15] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J].Journal of Soils and Sediments,2018,19(3):1456-1466.
- [16] Liu Y, Guo L, Huang Z, et al. Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils[J].Agricultural Water Management,2020,235:e106153.
- [17] Guo L, Fan B, Zhang J, et al. Occurrence of subsurface lateral flow in the Shale Hills Catchment indicated by a soil water mass balance method[J].European Journal of Soil Science,2018,69(5):771-786.
- [18] Hao H X, Wei Y J, Cao D N, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils[J].Soil and Tillage Research,2020,198:e104542.
- [19] 曹丹妮,邸涵悦,郭忠录,等.演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J].水土保持研究,2021,28(2):99-107.
- [20] Shein E V. Soil hydrology: Stages of development, current state, and nearest prospects[J].Eurasian Soil Science,2010,43(2):158-167.
- [21] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J].BioScience,2011,61(11):869-879.
- [22] Bogner C, Trancón Y W B, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering[J].Ecological Informatics,2013,15:44-52.
- [23] Zhang Y H, Niu J Z, Zhang M X, et al. Interaction between plant roots and soil water flow in response to preferential flow paths in Northern China [J]. Land Degradation and Development,2017,28(2):648-663.
- (上接第 15 页)
- [32] Zhang X Q, Hu M C, Guo X Y, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J].Catena,2018,160:394-402.
- [33] 李瑞,张弛,顾再柯,等.贵州喀斯特区典型小流域坡面土壤侵蚀与主要影响因子的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):1-5.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [37] 莫建飞,陈燕丽,莫伟华.岩溶生态系统水土流失敏感性关键指标和评估模型比较[J].水土保持研究,2021,28(2):256-266.
- [38] 刘警鉴,卢远,刘斌涛,等.广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J].水土保持通报,2018,38(1):41-46.
- [39] 师长兴,砾石对土壤可蚀性的影响及土壤可蚀性值估算方法[J].土壤通报,2009,40(6):1398-1401.
- [40] 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.
- [41] 谢婷婷.基于 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀评价[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [42] Prosdoci M, Cerdà A, Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review [J]. Catena, 2016,141:1-21.
- [43] Hurlbert S H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments[J]. Ecological Monographs, 1984,54(2):187-211.