

DOI: 10.11766/trxb201601110565

喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征*

彭旭东 戴全厚[†] 杨 智 赵龙山

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘 要 喀斯特地区特殊的地表、地下侵蚀产沙是引发石漠化发生发展的重要物理过程。以喀斯特山地石漠化过程中不同石漠化状况的裸坡面为研究对象, 通过模拟其地表微地貌及地下孔(裂)隙构造特征, 采用人工模拟降雨试验研究其地表及地下侵蚀产沙特征。结果表明: 无石漠化、潜在石漠化和轻度石漠化的裸坡在相同条件下的地表产沙量总体上高于地下产沙量, 且 10 min 降雨时段内地下产沙量在 0 ~ 100 g 之间。不同石漠化强度的裸坡地表、地下侵蚀产沙量均随雨强的增大而增加; 小雨强 (30 ~ 80 mm h⁻¹) 下, 随着石漠化强度加剧其地表越不易发生侵蚀, 而石漠化强度达到一定程度时 (基岩裸露率 40%) 土壤流失以地下流失为主; 大雨强 (150 mm h⁻¹) 下, 地表产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化不明显, 而地下产沙量则呈先增加后减小的变化且在基岩裸露率为 30 % 时达到最大。不同石漠化强度的裸坡地表产沙量及其分配比例随地下孔(裂)隙度变化不明显, 地下产沙量及其分配比例总体上随地下孔(裂)隙度增加而增加; 在不同地下孔(裂)隙度下 (1% ~ 5%), 地表、地下产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化 (10% ~ 50%) 差异较大。研究结果对认识喀斯特地区石漠化发生发展机制、揭示土壤侵蚀特征、防治地表地下水土流失具有重要的理论和现实意义。

关键词 喀斯特山地; 侵蚀产沙; 石漠化程度; 基岩裸露率; 地下孔(裂)隙度

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

喀斯特石漠化是中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源, 严重威胁到人们的生存环境^[2-3]。喀斯特地区长期的岩溶作用构成地表、地下双层空间结构^[4]。在人为因素和自然因素(降雨和地质地貌)共同作用下, 地表呈土层浅薄、土被不连续甚至岩石大面积裸露的石漠化景观, 而地下则由于碳酸盐岩溶蚀作用形成落水洞、竖井、漏斗、地下溶管、溶洞、浅层孔(裂)隙等^[5]。中国西南喀斯特历来受到国内外学者广泛关注, 国际著名喀斯特地貌学家 Sweeting 曾五次来贵州考察喀

斯特地貌, 并分析论述了贵州锥状喀斯特的地貌形成^[6-7]。水土流失是造成喀斯特石漠化发展的主要因子^[8-10], 深入揭示自然营力作用引发石漠化发展的重要物理过程—土壤侵蚀过程具有重要的理论和现实意义。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。目前, 国内外对喀斯特石漠化的研究主要涉及石漠化形成、演化^[11-12], 驱动因子^[13]及石漠化防治与生态恢复重建^[14]等, 且喀斯特地区土壤侵蚀的研究多侧重于地表侵蚀^[15-16], 且多以野外径流小区观测为主。

* 国家自然科学基金项目 (41461057, 41061029) 和贵州省重大专项 (黔科合 JZ 字 [2014] 2002) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41461057, 41061029) and the Important Science & Technology Specific Projects in Guizhou Province (in the year of 2014, Nos. 2002)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qhdairiver@163.com

作者简介: 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

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-03-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-03-25

近年来, 喀斯特山地石漠化过程中特殊的地下流失被广泛关注^[17-19]。张信宝等^[20]认为岩溶坡地土壤流失是化学、重力和流水侵蚀的叠加结果, 并提出其流失方式包括地表流失和地下漏失; 唐益群等^[21]阐明了喀斯特石漠化区特殊水土流失方式——地下漏失的过程及机理; 冯腾等^[22]通过分析岩溶裂隙中¹³⁷Cs剖面分布特征, 认为土壤的地下流失可能以沿裂隙、地下管道等的整体蠕移丢失为主; Wang等^[23]解释了土壤地下流失的侵蚀—蠕变—崩塌机理, 该机理解释为七个步骤, 即裂隙土扰动—内部侵蚀和局部坍塌—自由表面形成—土壤蠕变—土管形成—土管坍塌—地面塌陷与填充; 此外, Zhou等^[24]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。然而, 有关喀斯特山地石漠化过程中不同石漠化强度等级下的地下侵蚀产沙特征的研究甚少, 而且已有研究还未能揭示喀斯特地区地表、地下土壤流失在流失总量中的贡献率和喀斯特石漠化发展驱动力及其发生机制。熊康宁等^[25]研究认为, 地表特性的差异是喀斯特区土壤侵蚀量差异大的内在原因, 不同等级石漠化很好地体现了地表特性的差异。因此, 本文以25°条件下的不同石漠化状况喀斯特裸坡面为研究对象, 通过模拟喀斯特地区地表微地

貌及地下孔(裂)隙双层空间构造特征, 采用人工模拟降雨试验研究喀斯特山地石漠化过程中不同石漠化状况的裸坡地表、地下侵蚀产沙特征, 进一步探讨不同石漠化状况下石漠化发生发展的机制。研究结果对了解喀斯特地区石漠化发生发展机制和揭示土壤侵蚀特征、防治水土流失及维持生态环境健康持续发展具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤采集于贵阳市花溪区(26°28'32"N, 106°42'02"E)碳酸盐岩发育的石灰性黏壤土, 粒径组成见表1(卡庆斯基制)。为模拟喀斯特自然坡面, 选择直径≥35cm的碳酸盐块石测量并标记出30 cm以上部分露头面积, 随机排列在试验钢槽^[26]中, 使块石30 cm以上部分的裸露率达到设计水平; 同时, 自下而上按野外实测土壤紧实度分层装填土壤, 使填土表面与石灰岩块石30 cm标记处水平; 填土表面用特制木板耙平, 边界处人为用手压实以减小边缘效应, 最后调节地下孔(裂)隙度至试验设计水平。

表1 试验土壤颗粒组成特征

Table 1 Soil particle-size distribution (%)

粗砂粒 Coarse sand > 0.25mm	细砂粒 Fine sand 0.25 ~ 0.05mm	粗粉粒 Coarse silt 0.05 ~ 0.01mm	中粉粒 Medium silt 0.01 ~ 0.005mm	细粉粒 Fine silt 0.005 ~ 0.001mm	黏粒 Clay < 0.001mm
0.09	9.64	16.13	10.21	15.38	48.55

1.2 试验设计

以坡面基岩裸露率、地下孔(裂)隙度、土层厚度及分层特征作为典型喀斯特裸坡面特征模拟因子。在野外实地调查及文献资料分析基础上, 试验设计坡度为25°。坡面裸露基岩以直径大于35 cm的石灰岩块石随机排列于试验钢槽内进行模拟, 随后采集坡面垂直影片并利用ArcGIS校核坡面岩石裸露率; 基岩裸露率为裸露基岩占坡面水平投影面积的百分比, 包括10%、20%、30%、40%和50%五个水平, 分别相当于有9、18、27、36和44块直径≥35cm的石灰岩块石。由于径流泥沙在土层下的

岩石孔(裂)隙中运移过程复杂, 故本研究以钢槽底板圆孔来模拟喀斯特地区土层下的孔(裂)隙, 以此来分析坡面侵蚀过程中能够进入地下孔(裂)隙的侵蚀量。地下孔(裂)隙度为地下孔(裂)隙水平投影面积占钢槽底板总面积的百分比, 包括1%、2%、3%、4%和5%五个水平; 土层厚度为30 cm, 按分层厚度10 cm分为3层, 其土壤紧实度平均值依次为1 070、760、410 kPa。降雨强度根据贵州省不同暴雨频率的雨强计算得到, 采用30、50、80、120和150 mm h⁻¹五个梯度, 各场降雨历时90 min(产流产沙基本稳定), 每个雨强重复2

次试验。一场降雨结束后，更换表层10 cm土壤并达到设计要求后进行下一场降雨。

1.3 模拟降雨

试验在贵州大学林学院降雨大厅完成。试验采用QYJY-501(502)便携式全自动下喷式人工降雨设备和自行设计的可调孔(裂)隙度的变坡钢槽完成(图1)。降雨器降雨高度6 m,雨滴终点速度满足天然降雨特性,雨强可遥控或手动调节,其变化范围为10~200 mm h⁻¹,调节变化时间低于30 s,调节精度为7 mm h⁻¹,降雨有效范围6.5 m×6.5 m,均匀度高于85%。变坡钢槽规格为宽1.5 m×长4 m×深35 cm,坡度在0~45°任意可调,底板均匀打孔,孔径5 cm,孔(裂)隙度在0~8%任意可调。钢槽下端分别设有地表、地下孔(裂)隙流集流槽,集流槽出水口下方采用塑料小桶收集径流泥沙样。

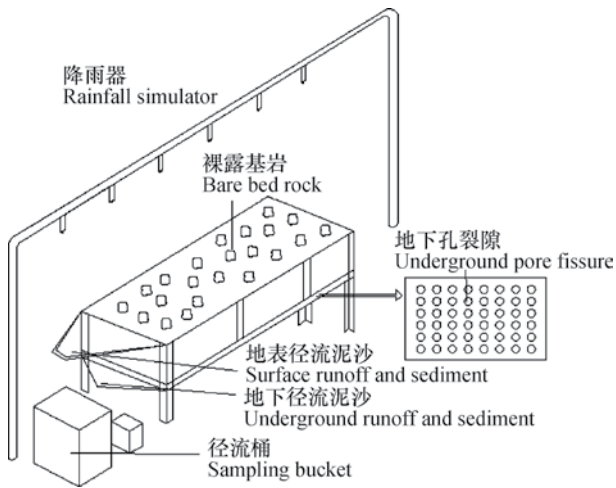


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Layout of the experimental setup

试验开始前,调节坡度和雨强至设计水平,并降小雨沉降至土壤水分饱和;同时,在土槽两侧放置两个雨量筒以测定本次试验的实际雨强。试验开始后,地表或地下开始产流便开始计时,每隔10 min接取1次地表和地下径流泥沙样,分别装在标有刻度的大桶内,以测定坡面产流量,悬移质和推移质均采用烘干法测定。

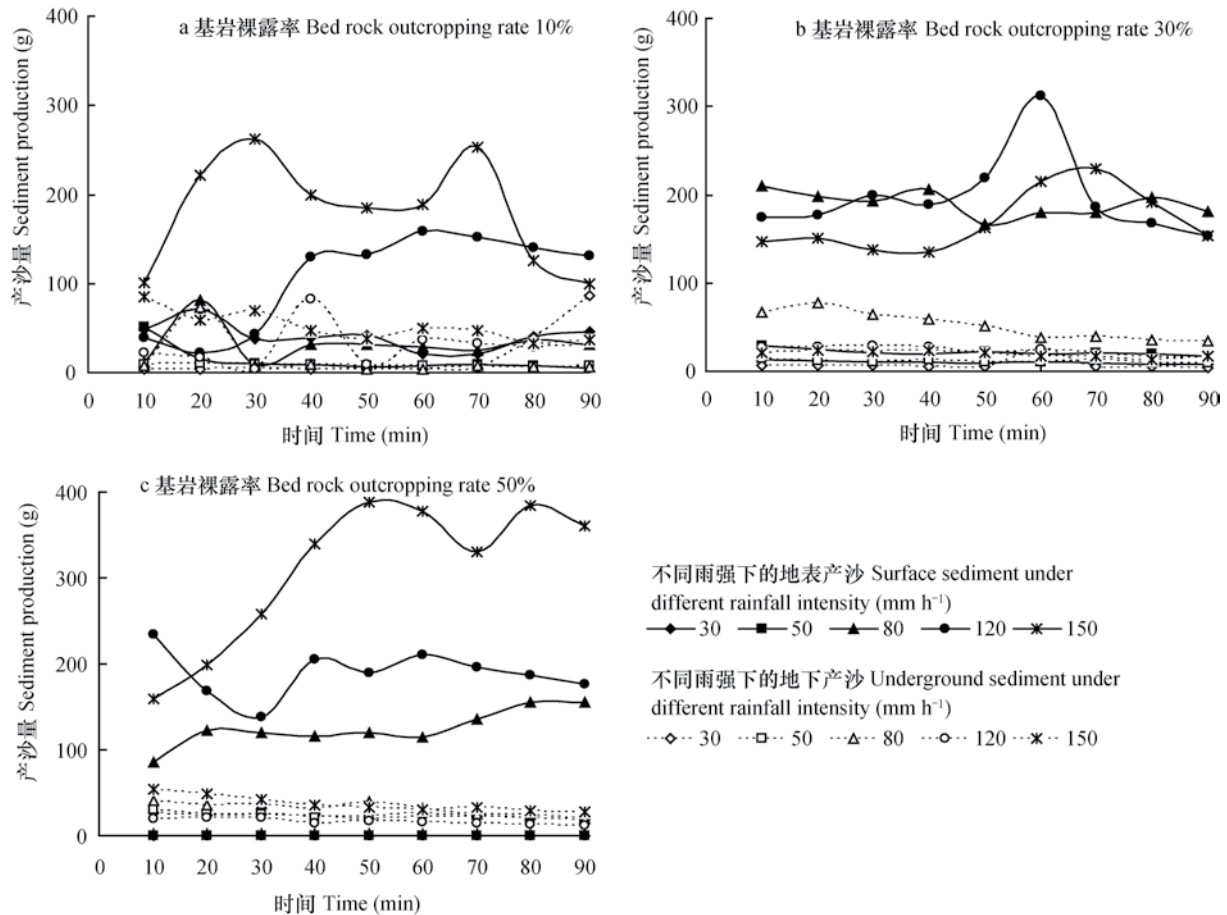
2 结果

2.1 不同雨强下地表和地下侵蚀产沙特征

降雨是喀斯特石漠化发生发展的主要驱动力之一。降雨强度作为影响坡面侵蚀产沙最重要的降雨

特性因子,它主要是通过降雨量及雨滴溅蚀结皮影响土壤入渗和下垫面对降水分配,进而影响坡面侵蚀产沙过程。为揭示不同石漠化强度等级的喀斯特裸坡在不同雨强下的侵蚀产沙特征,点绘地表、地下产沙量随降雨时间的变化趋势,如图2所示。可以看出,各雨强下的地表产沙量均随时间增加呈明显波动趋势且雨强越大则波动越强,而地下产沙量则呈比较平稳的减小趋势。

不同石漠化强度等级的裸坡地表和地下侵蚀产沙量总体上随雨强增大而增加,且不同石漠化强度等级的裸坡间地表、地下产沙特征差异明显。不同石漠化状况的裸坡地表、地下侵蚀产沙具有以下特征:(1)对无石漠化裸坡(基岩裸露率为10%)而言,地表产沙量及分配比例均随雨强增大而增加,雨强在30~150 mm h⁻¹之间地表产沙可达120.9~1 637 g,其分配比例为61.49%~78.12%;地下产沙量也随雨强增大而增加,但其占总产沙量比例则随雨强增大而减小,数值在10.30%~44.18%之间。(2)对潜在石漠化裸坡(基岩裸露率为30%)而言,地表产沙量随雨强增大而增加,但其分配比例则随雨强增大呈先增加后减小的变化,其数值在55.82%~89.70%之间;地下产沙量也随雨强增大而增加,但其分配比例则呈先减小后增加的变化,其数值在10.56%~38.51%之间。(3)对轻度石漠化裸坡(基岩裸露率为50%)而言,地表在小雨强(30和50 mm h⁻¹)时不产沙,此时地表土壤侵蚀形式主要表现为溅蚀,而入渗水流则对溅蚀形成的泥沙及坡面内部细颗粒进行输移侵蚀;当雨强增大到80 mm h⁻¹时地表开始产沙,说明该石漠化状况的裸坡渗流强烈,地表侵蚀性雨强增大。地下产沙量随雨强增大而增加,其分配比例则随雨强增大而减小。(4)就各种石漠化强度等级的裸坡而言,一定条件下的地表产沙量均高于地下产沙量(除轻度石漠化外),且降雨过程中各降雨时段的地下产沙量总体上在0~100 g之间变化(图2)。小雨强(30和50 mm h⁻¹)时,各石漠化状况裸坡的地表产沙量表现为轻度石漠化<潜在石漠化<无石漠化,而地下产沙量表现为无石漠化<潜在石漠化<轻度石漠化;大雨强(80和120 mm h⁻¹)时,地表产沙量表现为无石漠化<轻度石漠化<潜在石漠化,而地下产沙量则为潜在石漠化<无石漠化<轻度石漠化。大暴雨(150 mm h⁻¹)时,地表产沙量随石漠化强度等级



注：降雨历时90 min，地下孔（裂）隙度为3% Note: 90 min in rainfall duration and 3% in underground porosity (fissure density)

图2 不同强度石漠化等级裸坡在不同雨强下的地表地下产沙过程

Fig. 2 Surface and underground sediment yielding processes on bare karst slopes different in rocky desertification degree as affected by intensity of rainfall

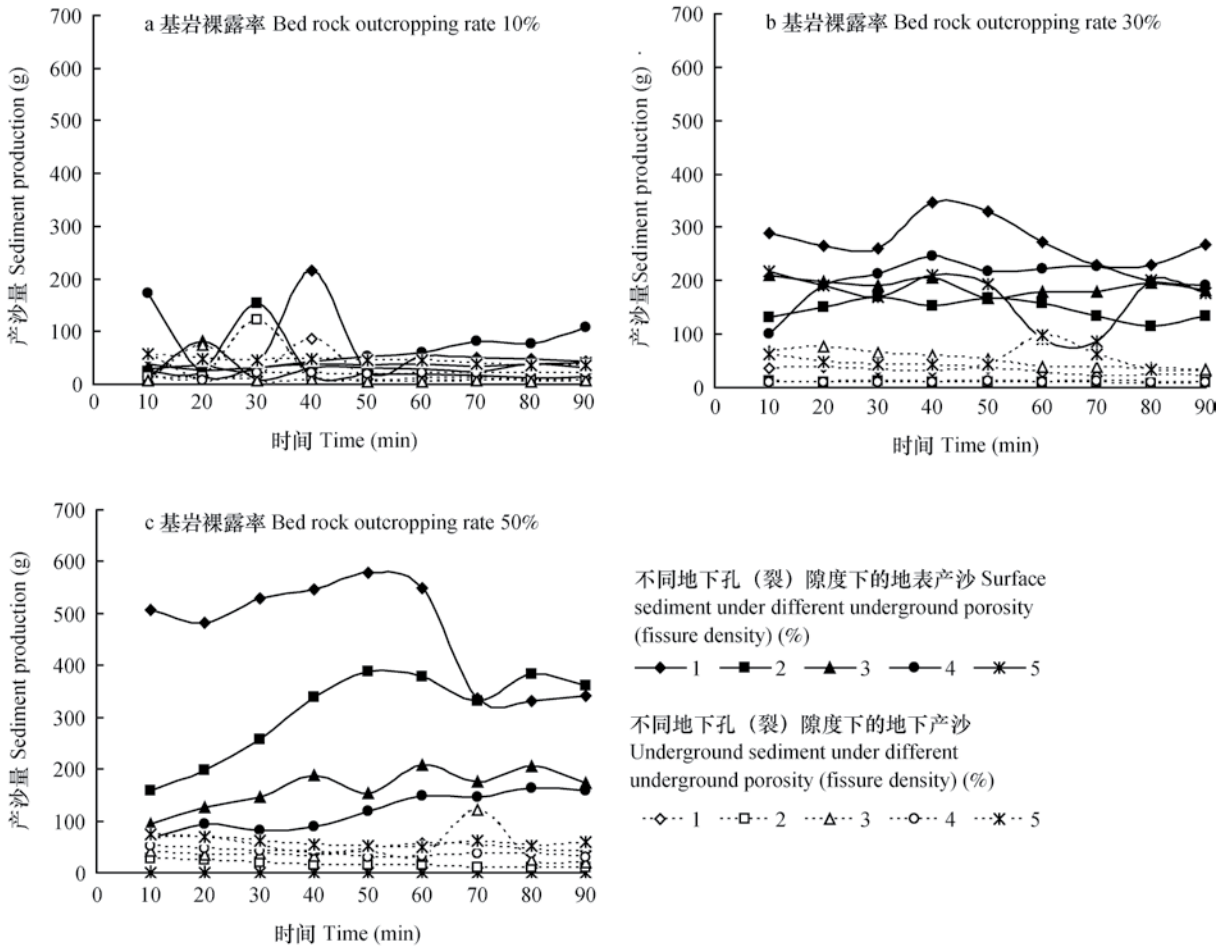
增加呈增加变化，即无石漠化 < 潜在石漠化 < 轻度石漠化，这可能是裸露岩石汇集降雨形成地表径流冲刷所致；地下产沙量则以轻度石漠化最小，无石漠化和潜在石漠化较大，主要是因为雨滴溅蚀导致土壤内部孔隙密闭。

2.2 不同地质构造因素下地表地下侵蚀产沙特征

受喀斯特地区特殊地表、地下双层空间构造影响，地下孔（裂）隙发育容易导致坡面水土漏失。降水下渗聚集在弱透水性的基岩界面上将发生二次分配，其中一部分顺坡向下形成壤中流；另一部分则沿重力方向通过岩溶裂隙、溶孔、溶管等岩溶导水介质流失^[27]。作为影响喀斯特地区坡面水土流失的重要因子，地下孔（裂）隙度是指地下岩层单位投影面积上，因溶蚀、断裂等营力作用形成的渗水孔（裂）缝的面积百分数^[19]。为揭示不同石漠化强度等级的喀斯特裸坡在不同地下孔（裂）隙度

下的侵蚀产沙特征，点绘地表、地下产沙量随降雨时间的变化趋势，如图3所示。可以看出，各基岩裸露率下的地表产沙量均随时间呈波动式变化且基岩裸露率越大则波动越大，而地下产沙量呈相对平稳的降低趋势。

不同石漠化强度等级的裸坡地表和地下的总侵蚀产沙量随地下孔（裂）隙变化不明显，但不同石漠化强度等级的裸坡间地表、地下产沙特征差异明显。不同石漠化状况的裸坡地表、地下侵蚀产沙随地下孔（裂）隙度变化具有以下特征：（1）就无石漠化裸坡而言，地表产沙量及分配比例随地下孔（裂）隙度变化不明显，地下孔（裂）隙度在1%~3%之间变化时地表产沙可到286.9~643.8 g，其分配比例为44.98%~74.91%；地下产沙量则随地下孔（裂）隙度增加而增加，但其分配比例随地下孔（裂）隙度变化亦不明显，数值在



注：降雨历时90min，降雨强度为80 mm h⁻¹ Note: 90 min in rainfall duration and 80 mm h⁻¹ in rainfall intensity

图3 不同石漠化强度等级裸坡在不同地下孔（裂）隙度下的地表和地下产沙过程

Fig. 3 Surface and underground sediment yielding processes on bare karst slopes different in rocky desertification degree as affected by underground porosity (fissure density)

25.09% ~ 55.02 %之间。(2) 对潜在石漠化裸坡而言，地表产沙量及分配比例均随地下孔（裂）隙度增加呈先增加后减小的变化趋势，其中产沙量在地下孔（裂）隙度为3%时取得最大值（2 489 g），其分配比例在地下孔（裂）隙度为2%时取得最大值（95.25%）；地下产沙量及分配比例总体上随地下孔（裂）隙度增加而增加，产沙量数值在89.5 ~ 465.6g之间，其分配比例在4.75 % ~ 23.10 %之间。(3) 对轻度石漠化裸坡而言，地表产沙量及分配比例随地下孔（裂）隙度变化关系不明显，而当地下孔（裂）隙度增大到5%时，地表不产沙；地下产沙量及分配比例总体上随地下孔（裂）隙度增加而增加，其中产沙量在143.0 ~ 535.6g之间，分配比例在4.87% ~ 100%之间，这些变化说明地下孔（裂）隙对地下产沙的影响高于地表产沙。

(4) 就各种石漠化强度等级的裸坡而言，相同条件下的地表产沙量总体上高于地下产沙量（除5%地下孔（裂）隙度的轻度石漠化外），且降雨过程中各降雨时段的地下产沙量均在0 ~ 100 g之间变化（图3）。对于地表产沙，地下孔（裂）隙度为1%和4%时，产沙量及分配比例均表现为无石漠化 < 潜在石漠化 < 轻度石漠化；而当地下孔（裂）隙度为2%和3%时，产沙量及分配比例则为无石漠化 < 轻度石漠化 < 潜在石漠化。对于地下产沙，地下孔（裂）隙度为1%和2%时，产沙量呈潜在石漠化 < 无石漠化 < 轻度石漠化的变化；当地下孔（裂）隙度在3% ~ 5%时，产沙量呈无石漠化 < 潜在石漠化 < 轻度石漠化的变化，而其分配比例变化不明显。综合分析表明，土壤孔隙是地下孔（裂）隙流侵蚀输沙过程中的过滤器，其大小及通透性在一定

程度上决定其泥沙输移量；地下孔（裂）隙流侵蚀产沙受地表侵蚀分离的土粒特性及坡面土壤孔隙特性共同制约；在降雨过程中，地表雨滴溅蚀及径流冲刷侵蚀的发生发展直接影响地下孔（裂）隙流侵蚀产沙的物质供给与泥沙输移路径。

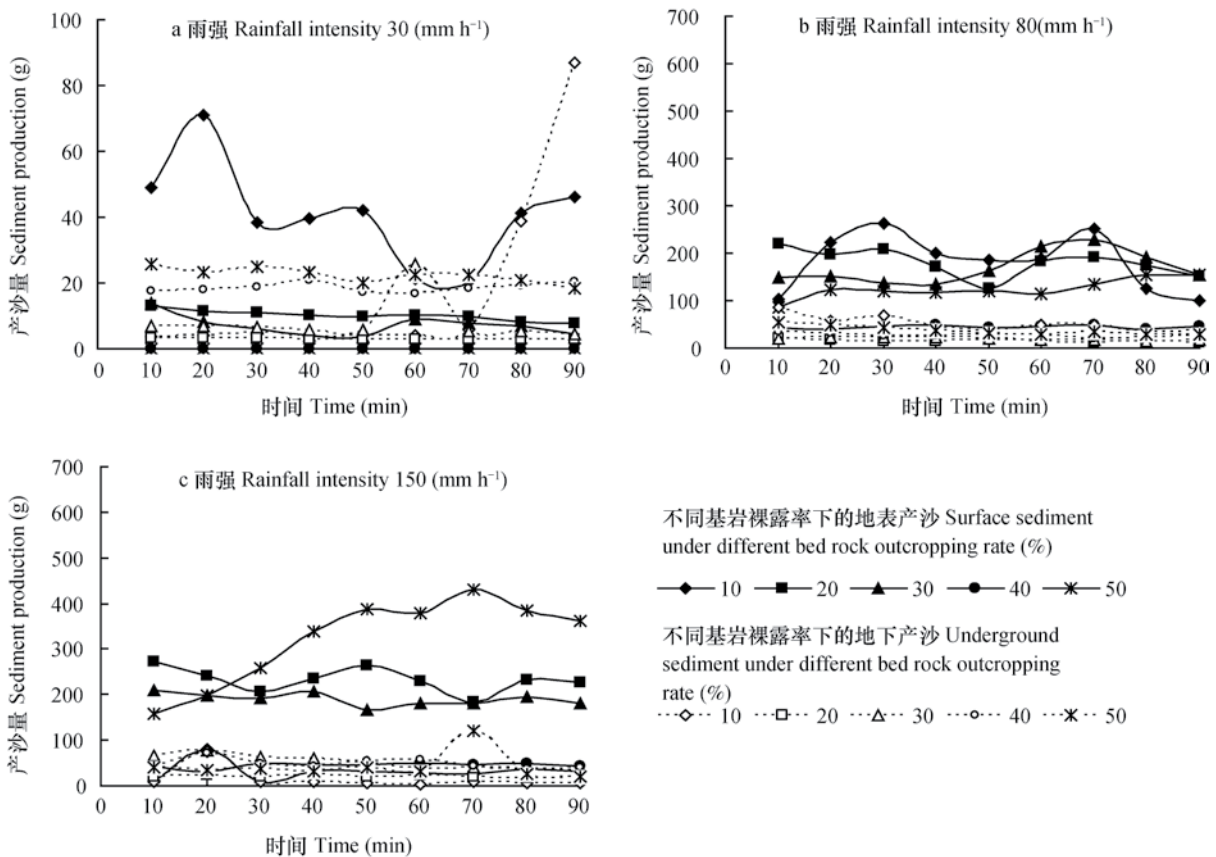
2.3 不同地表微地貌因素下地表地下侵蚀产沙特征

裸露基岩一方面增加地表不透水面积，促进坡面降雨径流汇集；另一方面减小地表可蚀面积，同时又增大地表径流拦截作用，有利于降雨径流下渗。岩石与土壤之间的软硬岩土界面，是土壤下渗水运移的主要通道之一，易引起风化物流失和块体滑移，不利于溶蚀残留物堆积，导致土壤呈不连续状，形成独特的喀斯特岩溶石漠化地貌景观^[28-29]。基岩裸露率反映了地表可蚀面积与容许下渗面积的大小，也表征了地表微地貌的破碎程度及地表特性的差异。为揭示喀斯特山地石漠化过程中的地表地下侵蚀产沙随基岩裸露率的变化特征，点绘地表、地下产沙量随基岩裸露率的变化趋势，如图4和图5所示。由图4可知，在不同雨强下，各基岩裸露率

的地表产沙量总体上呈波动式变化，且地表产沙量随雨强增大而提升，地下产沙量则随时间呈波动式减小的变化；图5中，地表产沙量总体上随时间无明显变化规律，而地下产沙量则亦呈波动式减小的变化。

喀斯特石漠化状况直接决定了该地区土壤流失的基本特点。不同雨强、地下孔（裂）隙条件下的地表地下侵蚀产沙随基岩裸露率变化差异明显。地表、地下侵蚀产沙随基岩裸露率变化具有以下特征。

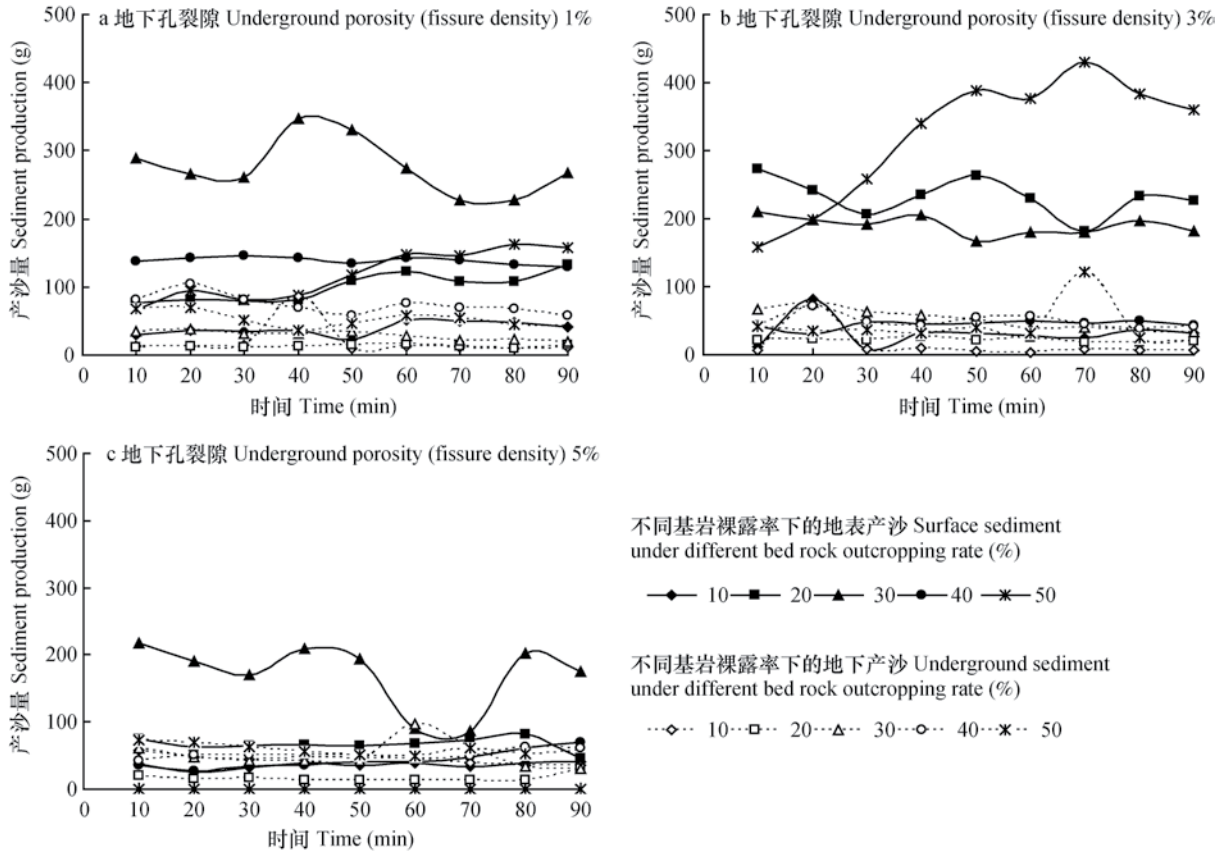
(1) 就不同雨强下地表、地下侵蚀产沙随基岩裸露率变化而言，相同条件下的地表产沙量总体上高于地下产沙量（除30 mm h⁻¹雨强外），同时降雨过程中各降雨时段的地下产沙量均在0~100 g之间变化（图4）。小雨强（30 mm h⁻¹）下，地表产沙量随基岩裸露率增加而减小，其分配比例变化不明显，这说明随着石漠化强度加剧其地表越不容易发生侵蚀；而地下产沙量则随基岩裸露率增加呈先减小后增加的变化趋势，其分配比例总体上则



注：降雨历时90 min，地下孔（裂）隙度为3% Note: 90 mm h⁻¹ in rainfall duration and 3% in underground porosity (fissure density)

图4 不同雨强下地表地下产沙量随基岩裸露率变化过程

Fig. 4 Variation of surface and underground sediment yields as a function of bedrock outcropping rate and density of rainfall



注：降雨历时90min，降雨强度为80 mm h⁻¹ Note: Rainfall duration is 90 min, rainfall intensity is 80 mm h⁻¹.

图5 不同地下孔（裂）隙下地表地下产沙量随基岩裸露率变化过程

Fig. 5 Process of surface and underground sediment yield as a function of bedrock outcropping rate under different underground pore fissures

呈增加趋势，这说明20%基岩裸露率是地下产沙量达到最低的一个临界值，同时随着石漠化强度加剧土壤流失以地下流失为主；当基岩裸露率为40%和50%时，地表不产沙而以地下产沙为主，这说明小雨强下随着喀斯特石漠化强度加剧地表产沙临界雨强增大且土壤流失逐渐过渡为地下流失。中雨强（80 mm h⁻¹）下，地表产沙量随基岩裸露率增加而减小，其分配比例则呈先增加后减小的变化，这表明随着石漠化强度加剧其地表越不易发生侵蚀；地下产沙量及其分配比例均随基岩裸露率增加亦呈先减小后增加的变化，且二者同时在基岩裸露率为20%取得最小值，这亦是地下产沙量达到最低的临界值，说明石漠化强度达到一定程度时地下产沙量会变大。大雨强（150 mm h⁻¹）下，地表产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化关系不明显；地下产沙量则随基岩裸露率增加呈先增加后减小的变化，其分配比例变化亦不明显，当基岩裸露率为30%时地下产沙量取得最大值（465.5g）。

(2) 就不同地下孔（裂）隙度下地表、地下

侵蚀产沙随基岩裸露率变化而言，相同条件下的地表产沙量总体上高于地下产沙量，且降雨过程中各降雨时段的地下产沙量均在0~100 g之间变化（图5）。地下孔（裂）隙度1%时，地表产沙量及其分配比例随基岩裸露率增加呈先增加后减小的变化，其存在一个临界值（基岩裸露率为30%），二者均在此时取得最大值，说明潜在石漠化区的裸坡地地表产沙量最大，石漠化加剧后地表产沙量会减少；地下产沙量总体上随基岩裸露率增加呈先减小后增加的变化，表明石漠化强度达到一定程度后地下产沙量会有增加趋势。当地下孔（裂）隙度为3%时，地表产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化关系不明显，而地下产沙量则随基岩裸露率增加亦呈先增加后减小的变化，其达到最大的临界基岩裸露率为30%，说明石漠化强度达到潜在石漠化程度时地下产沙量最大。当地下孔（裂）隙度为5%时，地表产沙量及分配比例总体上随基岩裸露率增加呈先增加后减小的变化；而地下产沙量则随基岩裸露率增加呈减小的变化，当基岩裸露率为10%时地下

产沙量最大,说明该条件下随着石漠化强度加剧地下产沙量有减小趋势。究其原因,主要是当基岩裸露率较小时,地表微地貌较为完整,地表径流阻力相对较小,同时基岩裸露面积较小则坡面可蚀面积较大,降雨径流侵蚀的泥沙量大;随基岩裸露率增加,地表微地貌破碎程度增大,地表径流阻力随之增强,然而基岩裸露面积大则坡面可蚀面积小,坡面侵蚀的泥沙量较少。

3 讨 论

3.1 雨强对喀斯特土壤侵蚀的驱动作用

坡面侵蚀产沙是降雨和土壤界面之间的响应过程^[30]。雨强主要是通过降雨量及雨滴溅蚀结皮影响土壤入渗和下垫面对降水分配,进而影响坡面侵蚀的形成^[31]。特定雨强条件下,雨水在喀斯特坡面将发生二次分配,一部分在坡面形成地表径流,一部分沿土壤孔隙向下入渗形成壤中流,另一部分则沿岩石与土壤界面下渗,而后两者均将沿地下岩溶裂隙、管道等进入地下水系统。这种类型的水循环模式决定该地区水土流失形式主要表现为降雨携带泥沙进入地下岩溶裂隙、管道、地下河^[32]。本研究中,喀斯特裸坡地表、地下侵蚀产沙量均随雨强增大而增加,相关研究亦表明雨强与喀斯特坡面产沙量呈正相关^[33],说明雨强是该区土壤侵蚀加剧的重要驱动因子。同时,本研究中相同条件下地表产沙量总体高于地下产沙量,且10 min降雨时段内地下产沙量在0~100 g之间。同位素¹³⁷Cs对岩溶坡地土壤地下漏失的研究结果亦显示,土壤地表流失高于地下漏失,其比例分别为75%和25%^[34],喀斯特坡地土壤颗粒有随降雨沿地表负地形向地下流失的趋势,但流失量轻微^[22],说明其土壤侵蚀形式也以地表侵蚀为主。但是,也有研究^[16, 21]认为,由径流产生的土壤地表流失量并不高,属微度侵蚀,介于0.05~62.25 t km⁻²,说明降水渗漏很可能是该区土壤地下漏失的主要诱因之一,为其提供了水动力条件。本研究通过试样钢槽底板圆孔来分析喀斯特地区土壤侵蚀过程中能够进入地下孔(裂)隙流失的径流泥沙量,而径流泥沙在浅层孔(裂)隙中的运移过程或机理还需进一步研究。

3.2 地表微地貌对喀斯特土壤侵蚀影响

岩溶区化学溶蚀的存在,导致地表流失和地

下漏失两种现象发生,且岩溶区的地下漏失并非到处可见,往往发生在岩石裸露率高、人为干扰性强的地区^[34]。喀斯特山地石漠化区大面积的裸露岩石是喀斯特环境特有的组成部分,通常用基岩裸露率来反映喀斯特石漠化发展程度。裸露率增大过程就是喀斯特石漠化的加剧过程。降雨条件下,裸露岩石一方面通过增加不透水面而促进坡面流形成,另一方面对降雨径流具有拦截作用,其截留的降水部分沿岩石裂缝、裂隙、节理等下渗,部分沿岩—土界面下渗。本研究中,裸露基岩对坡面土壤地表流失与地下漏失影响很大,在一定雨强条件下,地表产沙量随基岩裸露率增加而减小,地下产沙量则呈先减小后增加的变化且存在最低临界值(20%基岩裸露率),这表明随着石漠化强度加剧其地表越不容易发生侵蚀而石漠化强度达到一定程度时土壤流失以地下流失为主。相关研究亦表明,相同条件下喀斯特山区坡面地表侵蚀量随裸露率的增大而减小^[8]。究其原因,当基岩裸露率较小时,地表微地貌较为完整,地表径流阻力相对较小,同时基岩裸露面积较小则坡面可蚀面积较大,故地表产沙量大;随基岩裸露率增加,地表微地貌破碎程度增大,地表径流阻力随之增强,而基岩裸露面积大则坡面可蚀面积小,故地表产沙量较少。岩石与土壤存在的软硬界面,使土壤颗粒可能随水流沿岩—土界面运移^[22];同时,坡面通过裂隙漏失进入溶洞的地表土壤很少,而溶洞内的土壤来自土—石界面^[34],这说明土壤沿土—石界面运移可能是本研究中在一定程度石漠化时地下漏失为主导的原因之一。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^[20],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。

4 结 论

在不同雨强、地下孔(裂)隙度及基岩裸露率条件下,喀斯特山地石漠化过程中裸坡的地表、地下侵蚀产沙特征差异明显;相同条件下的地表

产沙量总体上高于地下产沙量。不同石漠化强度的裸坡地表、地下侵蚀产沙量均随雨强增大而增加，但其分配比例在不同石漠化强度裸坡间差异明显。地表产沙量及其分配比例与地下孔（裂）隙变化关系不明显，而地下产沙量及分配比例则随地下孔（裂）隙度增加而增加。小雨强和中雨强下，地表产沙量随基岩裸露率增加而减小，地下产沙量则呈先减小后增加的变化且其达到最低的临界基岩裸露率为20%，表明随着石漠化强度加剧其地表越不容易发生侵蚀而石漠化强度达到一定程度时土壤流失以地下流失为主；大雨强下，地表产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化不明显，而地下产沙量则随基岩裸露率增加呈先增加后减小的变化且其达到最大的临界基岩裸露率为30%。在不同地下孔（裂）隙度下，地表、地下产沙量及其分配比例随基岩裸露率变化差异较大，地下孔（裂）隙度较低时，石漠化强度达到一定程度后地下产沙量有增加趋势，而地下孔（裂）隙度较高时，随着石漠化强度加剧地下产沙量有减小趋势。

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. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22 (2) : 120—126
Wang S J. The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China—karst rocky desertification (In Chinese). Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 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. 地球与环境, 2006, 34 (3) : 9—14
Li Y B, Wang S J, Tan Q, et al. Research development and problems of karst rocky desertification (In Chinese). Earth and Environment, 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. Catena, 2011, 84 (1/2) : 21—28
- [4] 曹建华, 袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005: 2—3
Cao J H, Yuan D X. Karst ecosystem of southwest China constrained by geological setting (In Chinese). Beijing: Geology Press, 2005: 2—3
- [5] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环—西南喀斯特土壤—植被系统生源要循环. 北京: 科学出版社, 2009: 1
Liu C Q. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the earth's surface: Cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environment, Southwest China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2009: 1
- [6] Sweeting M M. Tectonics and fluvial denudation in the formation of cone karst, with particular reference to South China. T ü binger Geographische Studien, 1992, 109: 45—56
- [7] Sweeting M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China. Zeitschrift für Geomorphologie, 1993, 37: 127—136
- [8] 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. 中国岩溶, 2010, 29 (1) : 1—5
Wang J, Cai X F, Lei L, et al. Laboratory simulation on soil erosion under different bedrock outcrop rate in southwest karst area, China (In Chinese). Carsologica Sinica, 2010, 29 (1) : 1—5
- [9] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29 (3) : 274—279
Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area (In Chinese). Carsologica Sinica, 2010, 29 (3) : 274—279
- [10] 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. 土壤学报, 2005, 42 (3) : 419—427
Long J, Jiang X R, Deng Q Q, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (3) : 419—427
- [11] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22 (6) : 573—582
Wang S J, Li Y B. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification (In Chinese). Advances in Earth Science, 2007, 22 (6) : 573—582
- [12] 张磊, 王嘉学, 代云川, 等. 滇东喀斯特地区红裸土层团聚体稳定性及其影响因素研究. 土壤, 2015, 47 (4) : 790—796
Zhang L, Wang J X, Dai Y C, et al. Study on stability and influential factors on surface-layer aggregates of

- red bare soil in karst area of east Yunnan, China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (4): 790—796
- [13] 胡宝清, 廖赤眉, 严志强, 等. 基于RS 和GIS 的喀斯特石漠化驱动机制分析——以广西都安瑶族自治县为例. *山地学报*, 2004, 22 (5): 583—590
Hu B Q, Liao C M, Yan Z Q, et al. Driving mechanism diagnosis of karst rocky desertification in Du'an Yao Autonomous County of Guangxi based on RS and GIS (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2004, 22 (5): 583—590
- [14] 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. *中国土地科学*, 2008, 22 (4): 32—37
Su W C. Types division of karst rocky desertification and a tentative survey of its ecological Treatment Mode (In Chinese). *China Land Science*, 2008, 22 (4): 32—37
- [15] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *Catena*, 2012, 90: 53—62
- [16] 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. *农业工程学报*, 2012, 28 (16): 121—126
Chen H S, Yang J, Fu W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (16): 121—126
- [17] 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. *水土保持通报*, 2009, 29 (1): 7—11
Zhou N Q, Li C X, Jiang S M, et al. Models of soil and water loss and soil leakage in Puding Karst Area (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (1): 7—11
- [18] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 等. 典型喀斯特坡面产流过程试验研究. *水土保持学报*, 2010, 24 (4): 78—81
Yang Z, Dai Q H, Huang Q H, et al. Experimental study of runoff processes on typical karst slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4): 78—81
- [19] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study. *Solid Earth Discussion*, 2015, 7 (2): 1639—1671
- [20] 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. *地球与环境*, 2007, 35 (3): 202—206
Zhang X B, Wang S J, He X B, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes (In Chinese). *Earth and Environment*, 2007, 35 (3): 202—206
- [21] 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. *中国岩溶*, 2010, 29 (2): 121—127
Tang Y Q, Zhang X H, Zhou J, et al. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2010, 29 (2): 121—127
- [22] 冯腾, 陈洪松, 张伟, 等. 桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs 的剖面分布特征及其指示意义. *应用生态学报*, 2011, 22 (3): 593—599
Feng T, Chen H S, Zhang W, et al. ¹³⁷Cs profile distribution character and its implication for soil erosion on Karst slopes of Northwest Guangxi (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (3): 593—599
- [23] Wang J X, Zou B P, Liu Y, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding County, Guizhou, China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (8): 2751—2764
- [24] Zhou J, Tang Y, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual model. *Natural Hazards*, 2012, 62 (3): 1191—1215
- [25] 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. *地理学报*, 2012, 67 (7): 878—888
Xiong K N, Li J, Long M Z. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (7): 878—888
- [26] 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. CN101988886A. 2011-03-23
Dai Q H, Yu L F, Yang Z, et al. A simulation test device for studying overland flow and underground pole fissure flow (In Chinese). CN101988886A. 2011-03-23
- [27] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 不同石漠化程度岩溶峰丛洼地系统景观格局的比较. *土壤*, 2005, 37 (1): 74—79
Li Y B, Wang S J, Rong L. A comparative study on landscape patterns of peak cluster depressions different in rock desertification degree (In Chinese). *Soils*, 2005, 37 (1): 74—79
- [28] 李森, 魏兴琥, 张素红, 等. 典型岩溶山区土地石漠化过程——以粤北岩溶山区为例. *生态学报*, 2010, 32 (3): 674—684

- Li S, Wei X H, Zhang S H, et al. The processes of land rocky desertification in typical karst mountain area: A case study in the karst mountain area of North Guangdong (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (3): 674—684
- [29] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应. *土壤学报*, 2008, 45 (3): 544—549
- Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of soil moisture surface layer in depressed karst region and its scale effect (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (3): 544—549
- [30] 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. *水土保持研究*, 2012, 19 (3): 7—11
- Li R, Li Y, Liu Y F. Study of rainfall and soil erosion on slope in karst region of Guizhou Province (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19 (3): 7—11
- [31] Angulo-Martínez M, Barros A P. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains. *Geomorphology*, 2015, 228: 28—40
- [32] 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. *中国水土保持科学*, 2011, 9 (2): 52—56
- Cao J H, Lu S L, Yang D S, et al. Process of soil and water loss and its control measures in karst regions, Southwestern China (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (2): 52—56
- [33] 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. *水土保持学报*, 2009, 23 (6): 5—8
- Cai X F, Wang J, Lei L, et al. Laboratorial simulation of different rainfall intensity influence on soil erosion in Southwest Karst Area, China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (6): 5—8
- [34] 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. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23 (3): 462—473
- Wei X P, Xie D T, Ni J P, et al. Soil erosion and loss on slope in karst valley area, Chongqing with ^{137}Cs (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23 (3): 462—473

Sediment Yield of Surface and Underground Erosion in the Process of Rocky Desertification of Karst Area

PENG Xudong DAI Quanhou[†] YANG Zhi ZHAO Longshan
(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract 【Objective】 Karst is a landscape formed through dissolution of soluble rocks, including limestone, dolomite and gypsum and characterized by a double-layer structure of surface and underground spaces. This special double layer space structure is the key factor causing development of rocky desertification in karst regions. The non-uniform surface micro-landforms and unique underground hydrogeology in the karst regions complicates the process of soil erosion. As a result, large tracts of bedrocks pop out of the land discontinuing the soil cover, while fissures, ponors, cavities and underground drainage systems are formed underground through dissolution of carbonatite. As large volumes flow through fissures and ponors into underground rivers, water and soil loss in karst regions exists in two forms, surface loss and underground loss, which obviously differ from that in non-karst regions. Guizhou Province, China is one of the largest areas in the world's wet climate zone concentratedly distributed with karst. It has a total of 109, 084 km² of karst, which accounts for 73% of the total area of the province, moreover, about 17.42% of the karst landforms are developed from a large continuous tract of limestone. Under the interaction of natural factors (rainfall, and geology and relief) and human activities, soil erosion in this region is very severe. In recent years, the unique form of underground soil and water loss in the process of karst rocky desertification has aroused more and more concern, but so far little has been reported on the underground soil erosion in karst areas different in rocky desertification degree, and the studies that have been done failed to illustrate

either contribution rates of surface and underground soil losses to the total of the area or driving forces and mechanism of karst rocky desertification in the Karst region. Therefore, this study is oriented to determining and analyzing sediment generating process with surface and underground erosion in bare karst areas during the process of karst rocky desertification, and further to exploring effects of outcropping bed rock on soil erosion and effects of soil loss on development of karst rocky desertification. 【Method】 For that end, a simulated rainfall experiment was carried out to explore sediment yielding characteristics of surface and underground erosion on bare karst slopes different in rocky desertification degree, by simulating their surface micro topographies and structural characteristics of underground pores and fissures. 【Result】 Results show that on bare slopes with no rocky desertification, potential rocky desertification and light rocky desertification, sediment yield was generally higher on the surface than underground when other conditions were the same, and the underground sediment yield varied in the range of 0 ~ 100 g in during the initial 10 min of rainfall. On bare karst slopes different in rocky desertification strength, both surface and underground sediment yields increased with increasing rainfall intensity. Under rainfalls 30 ~ 80 mm h⁻¹ in intensity, the more intense the rocky desertification, the harder for surface erosion to occur, and on slopes with rock desertification reaching a certain degree (40% in bed rock outcropping rate), soil erosion became dominated by underground soil loss; under rainfalls 150 mm h⁻¹ in intensity, surface sediment yield and its contribution rate did not change much with increasing bedrock outcropping rate, while underground sediment yield first increased and then decreased, and peaked on slopes 30% in bedrock outcropping rate. On bare karst slopes, regardless of rocky desertification degree, surface sediment yield and its contribution rate did not vary much while underground sediment yield and its contribution rate increased with increasing underground porosity or fissure density; on slopes 1% ~ 5% in underground porosity or fissure density, surface and underground sediment yields and their respective contribution rates varied sharply with changes in bedrock outcropping rate in the range of 10% ~ 50%. 【Conclusion】 All these findings in this study demonstrate that they have some important theoretical and practical significance to understanding mechanism of the development of rocky desertification, revealing characteristics of the soil erosion and controlling surface and underground soil and water losses in Karst regions.

Key words Karst mountain; Erosional sediment yield; Rocky desertification; Bedrock outcropping rate; Underground porosity (fissure density)

(责任编辑: 檀满枝)