

喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响

陈磊¹, 张科利^{1,2*}, 李业桐¹, 王国鹏¹, 张卓栋^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 块石出露是喀斯特石漠化地区典型的地貌景观特征之一。为探索喀斯特坡耕地中块石出露对土壤水分入渗的影响, 通过野外人工模拟降雨试验, 研究 3 个坡度 (15°、20°、25°)、3 个面积 (小、中、大)、5 种形状 (斜条形、横条形、近圆形、三角形、竖条形) 块石出露下的土壤水分入渗特征。结果表明: 1) 3 种坡度下, 各形状块石出露下和裸露坡的入渗率均随着坡度增加而减少。总体上, 块石面积越小坡度越缓, 入渗过程变化越平稳且入渗率高, 块石面积越大坡度越陡, 入渗过程变化波动大且入渗率低。2) 初始、稳定、平均入渗率的最大值均出现在 15° 坡面, 最小值均出现在 25° 坡面。总体上坡度和块石面积越大, 土壤的稳定入渗率越高。3) 与裸露坡面相比, 块石出露下, 15°、20°、25° 坡度对入渗增量的贡献率为 2.63%、20.88%、76.49%。小、中、大面积块石对入渗增量的贡献率为 46.39%、32.88%、20.73%。形状对入渗增量的贡献率为 31.50% (斜条形) > 27.66% (横条形) > 27.08% (近圆形) > 10.81% (三角形) > 4.36% (竖条形)。4) 3 种模型的拟合结果, 裸露坡拟合度最高, 均大于 0.89, 而斜条形块石拟合度都最低, 均为 0.60 左右。Horton 模型的拟合度最好, Kostiaikov 模型的拟合度良好, Philip 模型的拟合度一般, 故 Horton 模型更适用于喀斯特坡耕地不同块石出露下土壤水分入渗过程的拟合。研究结果有助于了解喀斯特坡耕地块石出露下的土壤水分入渗特征, 促进农业水土资源的管理保护和利用, 为该区水土流失和石漠化工程治理提供借鉴。

关键词: 土壤水分; 入渗; 降雨; 模型; 喀斯特; 块石出露

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.014

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0111-08

陈磊, 张科利, 李业桐, 等. 喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 111-118.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.014 <http://www.tcsae.org>

Chen Lei, Zhang Keli, Li Yetong, et al. Effects of rock outcropping on soil water infiltration in karst cropland slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 111-118. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.014 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国西南地区是世界三大喀斯特地貌集中分布的亚洲片区中心地带, 喀斯特坡耕地分布较广, 具有基岩裸露率高、土壤贫瘠、土层浅薄且不连续的特征^[1]。喀斯特坡耕地的土壤持水性和保水性较差, 区域生态环境脆弱, 土壤侵蚀呈地上地下双层二元侵蚀^[2]。工程性缺水和水资源的时空动态分布不均匀是制约喀斯特农业健康发展的最大阻碍^[3]。据 2016 年贵州省水土保持公告, 非喀斯特地区土壤侵蚀模数 (1 189.43 t/(km²·a)), 显著大于喀斯特地区 (279.47 t/(km²·a))^[4]。喀斯特坡耕地中出露的块石, 在地表水热资源交换过程中扮演着重要角色, 它不仅影响着降雨在地表径流产生、泥沙运移、深层入渗之间的再分配, 而且对土壤水分和侵蚀模数具有明显影响^[5-6]。降雨入渗是影响土壤侵蚀的重要因子, 入渗在产流预报、农业水土资源管理与评价、侵蚀评估中发挥着不可替代的作用^[7-8]。

入渗是把地表水转化为土壤水的重要水文过程, 土壤水是喀斯特地区农业生产中水土资源相互作用的关键枢纽, 土壤水分对降雨的响应主要表现为降雨时的地表径流, 或者通过碳酸盐溶蚀作用下形成的岩溶漏斗、落水洞、裂隙、地下暗河等系统快速下渗成为地下径流^[9]。目前对于影响产流入渗参数性能因子的已有研究主要涉及降雨量和降雨强度^[10]、土壤性质^[11]、根系性状^[12]、耕作方式^[13]、植被恢复^[14]、坡长^[15]、坡度^[16]、地下孔 (裂) 隙^[16]、初始含水量^[17]、地表粗糙度^[18]、岩层倾向^[19]和倾角^[20]等对土壤水分入渗的影响。但除受这些因子影响外, 喀斯特地区的基岩裸露和块石出露也是影响降雨入渗和水土流失的主要因子^[21]。符素华等^[22]发现地表不同砾石覆盖对降雨入渗有显著的影响, 径流量随砾石覆盖度增加呈线性减小。Jean 等^[23]通过人工模拟降雨试验研究了 3 种坡度和 4 种面积块石覆盖下降雨的入渗, 发现坡度、地下水位、地表径流量和截蓄水量之间的变化没有系统规律。Liu 等^[24]表明, 次暴雨期间岩石碎块情况随时间的变化会对径流和土壤流失产生影响。朱彤等^[25]研究了喀斯特坡面块石出露下雨强和岩石裸露率对降雨入渗的响应, 但并未考虑坡度和块石形状对土壤水分入渗的影响。

尽管这些研究已经从多个角度探索了土壤水分入渗的影响因子, 加深了对砾石覆盖和块石出露下土壤水分入渗规律的理解, 但关于喀斯特坡耕地块石出露下坡度、

收稿日期: 2021-12-07 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41730748)

作者简介: 陈磊, 博士生, 研究方向为水土资源利用与保护。

Email: 202031051014@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 张科利, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: keli@bnu.edu.cn

块石形状和走向对土壤水分入渗影响的研究较少。因此,本文在喀斯特黄壤坡耕地中通过野外人工模拟降雨,的综合影响下,研究不同坡度、块石形状、面积、走向的坡耕地的降雨入渗过程及特征,揭示喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响规律。这将有助于了解喀斯特坡耕地中块石出露对土壤水分入渗的影响,促进农业水土资源的管理保护和利用,为该区水土流失和石漠化工程治理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市播州区鸭溪镇汧洋水小流域,地处乌江流域赤水河中游,流域面积为 20.87 km²,流域内水土流失面积占比为 47.24%,土壤侵蚀以降雨侵蚀为主,多呈现坡面破坏侵蚀形式。降雨试验在仁和村(106°38'39" E, 27°35'44" N)进行,流域内地貌类型为喀斯特地区典型的峰丛、洼地。气候为中亚热带湿润季风气候,雨热同期,全年 70%~80%的降雨集中在 5—8 月,多年平均降雨量和气温分别为 1 024 mm、14.6℃。植被类型以中亚热带常绿阔叶林为主。该地是贵州省传统农业种植区,土地利用类型以农地为主,农地约占流域面积的 50%。坡面粮食作物与经果林间作是该地最常见的农地利用模式,20 世纪 70 年代坡改梯后,土壤厚度明显增加,平均土层厚度在 50~80 cm 间不等。坡耕地主要为酸性黄壤,是贵州典型的土壤类型,有机质含量较少,土壤肥力较低。土壤质地组成如下:黏粒占 37.55%、砂粒占 2.06%、粉粒占 60.39%。土壤容重 1.14 g/cm³,总孔隙度为 46.76%。

1.2 试验设计

基于课题组 2018 年 5—6 月对坡面 375 块出露块石特征的调查,出露块石形态各异,平均裸岩率小于 10%,属于潜在石漠化地区,出露面积变异较大。当块石出露面积较小时,条形、三角形、近圆形等多种形态均较常见,出露最长边在 25~50 cm 之间;当块石出露面积较大时,块石多为条形,长边从 0.5~3 m 不等。坡面块石分散出露会引起坡面土壤水分的再分配,制约农业机械化的推广应用,缩小实际种植面积,从而制约农业生产发展。为此,结合坡面块石出露特征,降雨试验在喀斯特坡面坡中位置农耕地中进行,降雨小区面积设置为 1 m²,耕地坡度为 15°、20°、25°。小区块石形状及走向共有 5 种:横条形、竖条形、三角形、近圆形、斜条形,块石出露高度为 2~5 cm,裸坡面作为对照分析。试验设备主要为自主设计的微型小区和降雨器。降雨喷头采用美国生产的 1/2HH-50WSQ 喷头,降雨高度为 3 m,喷头压力为 40 kPa,试验之前对降雨强度进行多次率定,确保降落地表的雨滴达到天然降雨的终点速度,降雨均匀性大于 85%。

降雨试验在 2021 年 6—8 月进行,遇到风速影响和降雨天气则停止试验。每场试验之前用时域反射仪测量小区内块石上下 4 个位置土壤含水率,确保前期土壤含水率保持在 30%~35%。块石出露下微型小区如图 1 所示,

依据每种块石形状分别选择了小、中、大 3 种面积(表 1),在 3 种坡度上共进行了 48 场试验,每个小区 16 场试验,小区上方无植被覆盖。因野外降雨试验利用的是坡面蓄水池中的天然降雨积水,水源有限且输送较难,资金成本较高,故未进行重复试验。每场降雨前整理小区,块石放置在小区正中间位置,确保小区表面无明显地形起伏。如果上一场试验中出现侵蚀沟,用试验样地周边与小区土壤性质相同的黄壤填补土面。结合喀斯特地区侵蚀性降雨特征^[26],大雨强下块石出露对土壤水分的影响更明显,为此选择降雨强度为 80 mm/h,为了保障降雨侵蚀力一致,每场降雨均在产流开始之后开始计时,降雨量统一控制为 30 mm,每 1.5 min 接取 1 次径流样品,产流之后降雨历时为 22.5 min。每场降雨过程收取 15 个径流样品,待试验结束后,带回实验室内用量筒测量体积。

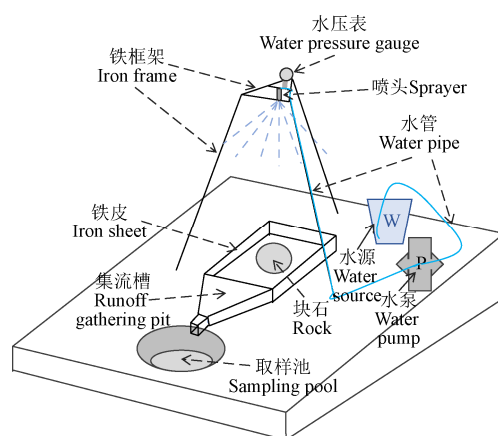


图 1 块石出露下人工模拟降雨微型小区

Fig.1 Simulated rainfall micro-plot under rock outcropping

表 1 5 种块石面积在 1 m² 小区中的占比

Table 1 Area proportion of five kinds of rocks in the 1 m² plot

块石形状 Rock shape	面积占比 Area proportion/%		
	小 Small	中 Moderate	大 Large
横条形 Horizontal strip	4.39	5.95	18.38
竖条形 Vertical strip	4.88	8.04	15.13
三角形 Triangle	4.71	11.56	13.84
近圆形 Circular	4.80	8.38	14.35
斜条形 Oblique strip	5.86	7.28	14.58

1.3 入渗率计算及入渗模型模拟

1.3.1 土壤入渗率计算

$$i = \frac{Pt \cos \alpha - 10R/S_1}{t_1} \quad (1)$$

式中 i 为入渗率, mm/min; P 为雨强, mm/min; t_1 为取样时间, min; α 为坡度, (°); R 为所收集的径流量, mL; S_1 为土槽的表面积, cm²。以产流开始后 1.5 min 时的入渗率为初始入渗率,降雨后期,土壤水分入渗趋于稳定,以 18~22.5 min 入渗率的平均值为稳定入渗率,平均入渗率为产流后至降雨结束期间的入渗速率。

1.3.2 入渗模型模拟

本文通过 SPSS26,选择已有的适用于研究区的 3 个

土壤水分入渗模型, Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型, 对降雨试验入渗结果进行模拟与评价, 以便深入探究不同块石出露下坡面的降雨入渗特征。

1) Kostiakov 模型

$$f(t) = at^{-\beta} \quad (2)$$

式中 $f(t)$ 为入渗速率, mm/min; t 为入渗时间, min; a 、 β 为拟合参数。

2) Philip 模型

$$f(t) = 0.5St^{-0.5} + f_c \quad (3)$$

式中 S 为吸水率, mm/min; f_c 为稳定入渗率, mm/min。

3) Horton 模型

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中 f_c 为稳定入渗率, mm/min; f_0 为初始入渗率, mm/min; k 为入渗衰减指数。该模型是 Horton1940 年提出的物理概念模型, 既包含入渗特征也包含入渗过程。

2 结果与分析

2.1 块石出露下土壤水分入渗过程

由 48 场降雨下土壤水分入渗过程可知 (图 2), 整

体上, 5 种形状块石周围土壤入渗率均随着产流历时的增加而呈下降趋势, 在产流前期入渗率较高, 在坡度、块石形状、面积的综合影响下, 入渗率平稳下降并趋近于一个相对稳定值。在产流之后的 9 min 内土壤入渗速率呈快速降低的趋势, 这是因为入渗初始阶段土壤水分处于非饱和状态, 降雨落到地表时依靠重力势能迅速进入土壤孔隙导致入渗速率较高, 随着降雨的进行, 土壤孔隙间的水分逐渐饱和, 入渗率迅速减小, 当土壤含水率达到峰值时入渗趋于稳定。15° 坡面上, 裸坡面入渗率最高, 20° 和 25° 坡面上, 裸坡面与其他块石出露的小区相比其入渗率明显降低, 说明随着坡度增加块石出露对径流有明显的阻挡作用, 从而增加了降雨入渗量。25° 坡面, 斜条形、横条形、近圆形块石周围入渗速率相比其他块石明显更高, 表明块石形状和走向对入渗量有不同影响。对比 3 种坡度下土壤水分入渗过程可以发现, 各形状块石周围和裸露坡的入渗率均随着坡度增加而减少。坡度越缓, 入渗率越高且入渗过程变化平稳, 坡度越陡, 入渗率越低且入渗过程变化强烈。总体上, 块石面积越小, 入渗过程变化越平稳且入渗率高, 块石面积越大, 入渗过程变化波动大且入渗率低。

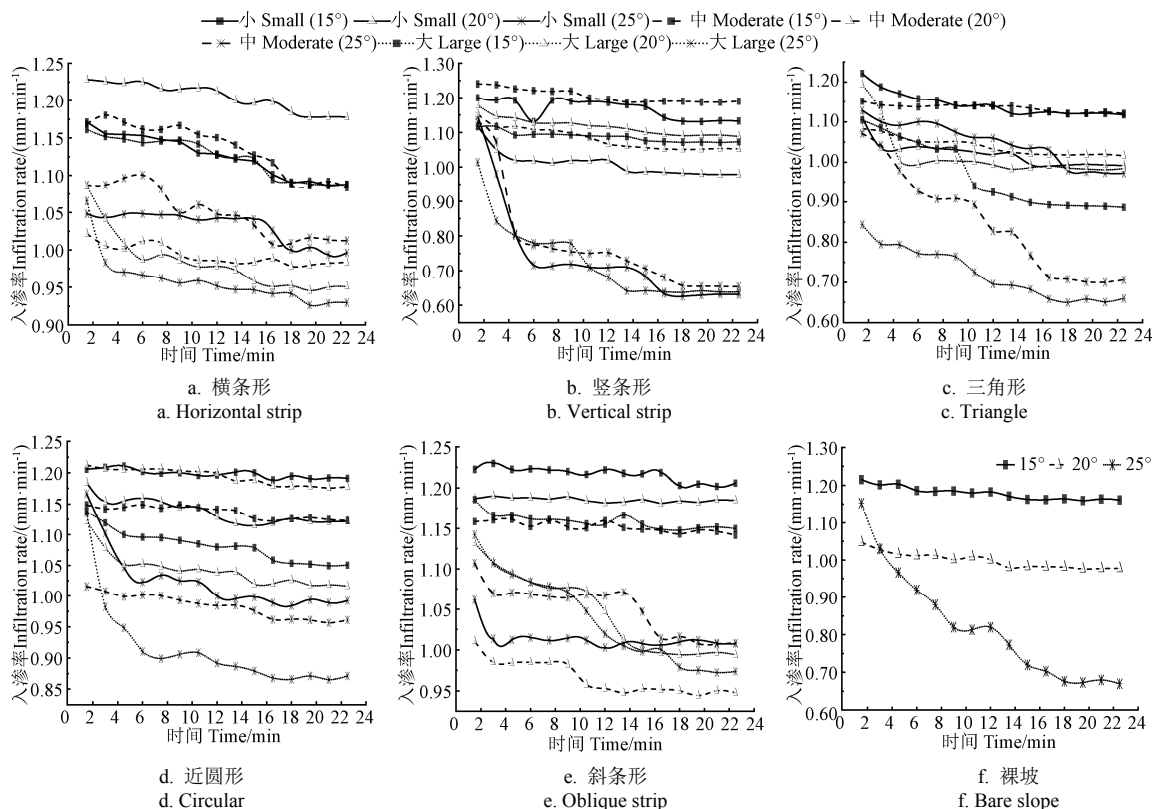


图 2 5 种块石和裸露坡土壤水分入渗过程

Fig.2 Soil water infiltration process of five kinds of rock and bare slope

2.2 块石出露下土壤水分入渗特征

块石出露下, 坡度和块石面积存在差异导致入渗性能存在一定差异。通过表 2 中 3 个入渗参数来描述土壤水分入渗特征。初始入渗率最大值出现在 15° 坡面竖条形块石出露下 (1.24 mm/min), 最小值为 25° 坡面大三角形石出露下 (0.84 mm/min)。平均土壤初始入渗率为 1.148 (近圆形) > 1.144 (竖条形) > 1.138 (裸坡面) > 1.134

(斜条形) > 1.115 (横条形) > 1.101 (三角形)。稳定入渗率最大值出现在 15° 坡面小斜条形块石出露下 (1.20 mm/min), 最小值为 25° 坡面竖条形小块石出露下 (0.63 mm/min)。平均土壤稳定入渗率为: 1.069 (斜条形) > 1.056 (近圆形) > 1.035 (横条形) > 0.947 (竖条形) > 0.940 (三角形) > 0.938 (裸坡面)。裸露坡面的平均稳定入渗率最低, 说明块石出露可以提高周围土壤水分入渗的稳

定性。初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率的最大值均出现在 15° 坡面, 最小值均出现在 25° 坡面。不同块石出露下整个降雨过程土壤水分均表现出初始入渗率最高, 平均入渗率次之, 稳定入渗率最低的入渗特征。总体上坡度和块石面积越大, 土壤的稳定入渗速率越大, 而受面积和坡度的综合影响土壤初始入渗速率却没有这一明显规律。

表 2 块石出露下土壤水分入渗参数特征

Table 2 Features of soil water infiltration parameters under rock outcropping

块石形状 Rock shape	坡度 Gradient/ (°)	初始入渗率 Initial infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	稳定入渗率 Stable infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	平均入渗率 Average infiltration rate /(mm·min ⁻¹)
横条形 Horizontal strip	15~25	1.02~1.23	0.93~1.18	0.96~1.21
竖条形 Vertical strip	15~25	1.01~1.24	0.63~1.19	0.72~1.21
三角形 Triangle	15~25	0.84~1.22	0.66~1.12	0.72~1.14
近圆形 Circular	15~25	1.02~1.21	0.87~1.19	0.91~1.20
斜条形 Oblique strip	15~25	1.01~1.22	0.95~1.20	0.97~1.22
裸露坡面 Bare slope	15~25	1.05~1.22	0.67~1.16	0.82~1.18

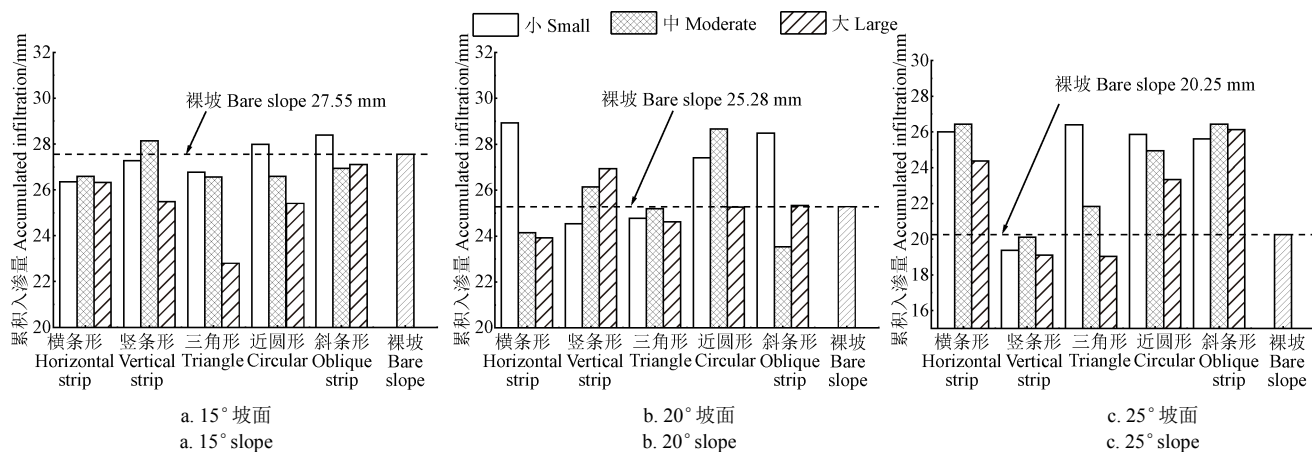


图 3 相同坡度不同面积下土壤水分累积入渗量

Fig.3 The amount of soil water accumulated infiltration under the same gradient and different areas

横条形、竖条形、三角形、裸坡面的平均累积入渗量由大到小为 15° 坡面、20° 坡面、25° 坡面 (表 3)。近圆形块石的平均累积入渗量由大到小为 20° 坡面、15° 坡面、25° 坡面。斜条形块石的平均累积入渗量由大到小为 15° 坡面、25° 坡面、20° 坡面。横条形、近圆形、斜条形块石在 3 种坡度间平均累积入渗量的差异较小 (0.81~2.40 mm), 而近圆形、竖条形块石在 20° 和 25° 坡面上平均累积入渗量差异大 (2.39~3.40 mm), 尤其是竖条形块石的差异几乎接近裸露坡面上的差异 (7.30~7.44 mm)。竖条形块石在 25° 坡面上平均累积入渗量最低, 表明竖条形块石对降雨有很好的纵向引流作用, 减少了降雨入渗。

表 3 坡度对平均累积入渗量的影响

Table 3 Influence of gradient on average cumulative infiltration

坡度 Gradient/(°)	横条形 Horizontal strip	竖条形 Vertical strip	三角形 Triangle	近圆形 Circular	斜条形 Oblique strip	裸坡 Bare slope
15	26.42	26.97	25.37	26.65	27.48	27.55
20	25.67	25.87	24.86	27.11	25.78	25.28
25	25.61	19.53	22.42	24.71	26.06	20.25

2.3 块石出露下土壤水分入渗差异及影响因素

2.3.1 坡度对土壤水分入渗的影响

由图 3 相同坡度不同面积下土壤水分累积入渗量可知, 15°、20°、25° 三个裸露坡面上累积入渗量分别为 27.55、25.28、20.25 mm, 裸露坡面随着坡度的增加入渗量减少。15° 坡面上, 只有 3 种块石出露下的入渗量大于裸露坡面, 为中竖条形、小近圆形、小斜条形块石, 和裸露坡面相比入渗量平均增加了 1.88 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 20%, 其余 12 种块石出露下的入渗量均小于裸露坡面。20° 坡面上, 有 7 种块石出露下的累计入渗量大于裸露坡面, 为小横条形、大和中竖条形、小和中近圆形、小和大斜条形块石, 和裸露坡面相比入渗量平均增加了 14.91 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 46.67%。25° 坡面上, 有 11 种块石出露下的入渗量大于裸露坡面, 入渗量增加了 54.62 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 73.33%, 竖条形和大三角形块石出露下入渗量小于裸露坡面。与裸露坡面相比, 块石出露下, 15°、20°、25° 坡面对入渗增量的贡献率为 2.63%、20.88%、76.49%。块石出露对雨水具有拦截作用, 坡度越大, 入渗量越高, 块石对入渗量增加的贡献率越大。

2.3.2 块石面积对土壤水分入渗的影响

当块石面积相近时, 由图 3 中不同坡度下土壤水分累积入渗量可知, 小面积块石出露下, 有 9 个面积块石出露下的入渗量大于其对应坡度裸露坡面的入渗量, 和裸露坡面相比入渗量增加了 33.13 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 60%。中面积块石出露下, 有 7 个面积块石出露下的入渗量大于其对应坡度裸露坡面的入渗量, 和裸露坡面相比入渗量平均增加了 23.48 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 46.67%。大面积块石出露下, 有 5 个面积块石出露下的入渗量大于其对应坡度裸露坡面的入渗量, 和裸露坡面相比入渗量平均增加了 14.80 mm, 块石出露对入渗量增加的发生率为 33.33%。与裸露坡面相比, 小、中、大面积块石对累积入渗增量的贡献率为 46.39%、32.88%、20.73%。块石出露面积越小, 入渗量越高, 块石对入渗量增加的贡献率越大。

横条形、三角形、近圆形块石平均累积入渗量均呈现小面积最高, 中面积次之, 大面积最低的变化特征 (表 4),

块石面积越大，平均累积入渗量越低。竖条形块石平均累积入渗量表现为中面积最高，大面积次之，小面积最低。斜条形块石平均累积入渗量表现为小面积最高，大面积次之，中面积最低。相比其他块石，竖条形块石在 3 种面积间平均累积入渗量差异最小（1.07 mm），三角形块石的差异则最大（3.84 mm），说明竖条形块石的面积大小对入渗量影响较小，而三角形的影响较大。

表 4 块石面积对平均累积入渗量的影响

Table 4 Influence of rock area on average cumulative infiltration mm

块石面积 Rock Area	横条形 Horizontal strip	竖条形 Vertical strip	三角形 Triangle	近圆形 Circular	斜条形 Oblique strip	裸坡 Bare slope
小 Small	27.10	23.73	25.98	27.08	27.50	
中 Moderate	25.73	24.80	24.53	26.73	25.64	24.36
大 Large	24.87	23.84	22.14	24.65	26.19	

2.3.3 块石形状对土壤水分入渗的影响

依据图 3，3 个面积中每个坡面各形状块石出露下累积入渗量大于裸露坡面入渗量的情况，平均累积入渗量为横条形 25.90 mm、竖条形 24.12 mm、三角形 24.21 mm、近圆形 26.16 mm、斜条形 26.44 mm、裸露坡面 24.36 mm。各形状块石出露对入渗量增加的发生率为：（斜条形）42.22%>（近圆形）37.78%>（横条形）35.56%>（竖条形）26.67%>（三角形）24.44%。3 个坡面上，和裸露坡面相比，块石出露下入渗量增量为斜条形 21.53 mm、横条形 19.72 mm、近圆形 19.34 mm、三角形 7.72 mm、竖条形 3.11 mm。形状对入渗增量的贡献率为（斜条形）31.50%>（横条形）27.66%>（近圆形）27.08%>（三角形）10.81%>（竖条形）4.36%。斜条形块石对土壤水分入渗增量的影响最大，而竖条形块石对土壤水分入渗增量的影响最小。

2.4 块石出露下土壤水分入渗特征模拟

表 5 为 3 种模型拟合的均值结果，5 种块石出露和裸露坡几种处理下参数拟合的均值存在一定的差异。Kostiakov 模型的 R^2 拟合度范围为 0.353~0.971，坡耕地各形状块石出露下， R^2 拟合均值结果为：横条形 0.753、竖条形 0.853、三角形 0.841、近圆形 0.815、斜条形 0.647、裸坡面 0.945。Kostiakov 模型中整体拟合效果较好，裸坡面 R^2 最大，除了横条形、斜条形块石 R^2 为 0.753、0.647 外，其余块石 R^2 拟合值均大于 0.810。Philip 模型的 R^2 拟合度范围为 0.272~0.976，Philip 模型中裸坡面 R^2 最大，除了横条形、斜条形块石 R^2 为 0.653、0.599 外，其余块石 R^2 拟合值均大于 0.760。Horton 模型的 R^2 拟合度范围为 0.216~0.985，各形状块石 R^2 拟合均值结果为横条形 0.872、竖条形 0.865、三角形 0.903、近圆形 0.869、斜条形 0.652、裸坡面 0.915。Horton 模型中整体拟合效果很好，裸坡面 R^2 最大，除了斜条形块石 R^2 为 0.652 外，其余块石 R^2 拟合值均大于 0.860。

对比分析 3 种模型的拟合结果可知，均是裸坡面拟合度最高，都达到了 0.89 以上，而斜条形块石拟合度均最低，均为 0.60 左右。3 种模型中， R^2 平均值为 Horton 模型最高，Kostiakov 模型次之，Philip 模型较低，Horton

模型的拟合度最好，Philip 模型的拟合度较好，建议 Horton 模型可以作为不同块石出露下坡面降雨入渗过程的最优模型。

表 5 不同处理下入渗过程的模型拟合均值比较

Table 5 Comparison of model fitting mean values of infiltration process under different treatments

块石 Rock	模型参数 Model parameter									
	Kostiakov			Philip			Horton			
	a	β	R^2	S	f_c	R^2	f_c	f_0	k	R^2
横条形 Horizontal strip	1.140	0.029	0.753	0.276	1.020	0.653	0.356	1.132	0.047	0.872
竖条形 Vertical strip	1.177	0.087	0.853	0.704	0.866	0.820	0.787	1.220	0.136	0.865
三角形 Triangle	1.144	0.066	0.841	0.579	0.891	0.785	0.638	1.139	0.091	0.903
近圆形 Circular	1.155	0.031	0.815	0.304	1.026	0.764	0.795	1.187	0.106	0.869
斜条形 Oblique strip	1.038	0.023	0.647	0.224	1.053	0.599	0.370	1.131	0.012	0.652
裸坡 Bare slope	1.195	0.084	0.945	0.722	0.873	0.893	0.826	1.158	0.050	0.915

3 讨 论

坡度和块石裸露率对土壤水分入渗的影响具有复杂性。关于块石出露和水土流失的定量关系研究结论主要有 2 类：一类是块石出露能增加地表产流，从而减少土壤水分入渗；另一类是块石出露会降低地表产流，增加土壤水分入渗。本试验中，初始、稳定、平均入渗率的最大值均出现在 15° 坡面，最小值均在 25° 坡面，稳定入渗率随着坡度的增大而降低，这与吴发启等^[27]的研究结果类似。喀斯特地区相同坡度或不同坡度下，随着基岩裸露率的增大地表产流量总体呈下降趋势^[28-29]，入渗量则增加。而 Liu 等^[24]研究与其相反，不同岩石裸露率下，无论 15° 还是 30° 坡度，坡面径流随着岩石裸露率的增加而增加，入渗量则减少。Jean 等^[23]的研究结果显示，当坡度为 5° 时，随着岩石裸露率的提升，地表径流减少，当坡度从 10° 增加至 20° 时，地表径流增加。这表明不同坡度背景下，地表径流和入渗量对于岩石裸露率的响应迥然不同。

在本研究中，20° 坡面上，竖条形块石出露，随着块石裸露率的提升，地表径流逐渐减少，15° 和 25° 坡面上三角形和近圆形块石及 20° 坡面上横条形块石，其地表径流均随着块石面积的增加而增加，而入渗量则呈相反的变化趋势。Dai 等^[30-31]研究表明，随着基岩裸露率的增加，地表和地下的平均产流产沙率呈先增加后减少的变化趋势，而且 Bunte 等^[31]认为 20% 的岩石裸露率是产流产沙由增到减的一个阈值。在本研究中，15° 和 25° 坡面上斜条形块石出露，地表径流均随着块石面积呈先增后减，这和他们的研究结果类似。表明不同坡度面上，地表径流对出露块石的形状响应存在差异性和复杂性，从而造成土壤水分入渗差异。

本文通过 3 个土壤水分入渗模型，对降雨试验入渗结果进行模拟，发现 Horton 模型的拟合度最好，Philip

模型拟合结果相对较差。这与程圣东等^[32]对解冻期坡面降雨入渗模型拟合的适用性,及甘凤玲等^[33]对地震灾区坡面滑坡堆积体入渗模型拟合的适用性相同。裸露坡面在没有块石出露的情况下,降雨与土壤的接触面积大,土壤水分入渗更充分,故模型的拟合度更高。徐勤学等^[34]研究结果同样表明 Horton 模型在喀斯特地区有较好的适用性,最适宜估算土壤水分入渗速率。Horton 模型在该区的适用性更好的原因,可能在于 Horton 模型的研究中加入了超渗产流和稳定渗透率的概念^[35],而喀斯特地区在雨季的雨型,多以短历时强降雨的超渗产流为主,具体原因有待继续深入研究。

土壤入渗是一个复杂的水文过程,受降雨特征、植被类型、地形地貌、土壤性质、人类活动的综合作用。此外,在野外人工模拟降雨试验过程中,裸露块石与其他影响入渗因子的交织,致使降雨入渗结果的进一步复杂化。因此,裸露块石对于降雨入渗的影响伴随着不确定性与复杂性,这与块石的面积、走向、出露高度、表面粗糙度、岩溶性质、坡度、土壤类型与性质等有关。本研究基于微型小区进行的人工模拟降雨试验,结果表明块石出露下,坡度、块石面积和形状对土壤水分入渗具有明显影响,不仅为喀斯特地区块石出露下土壤水分入渗的相关研究提供借鉴,有助于水土流失预防和石漠化治理,还为该区坡耕地土壤侵蚀预报模型的建立提供依据。但本研究尚有不足之处,今后的工作可以在更大空间尺度上,加深对不同块石形状、走向、表面粗糙度和降雨等级影响下的土壤水分入渗研究。

4 结 论

1) 3 种坡度下,块石出露小区和裸露坡的入渗率均随着坡度增加而减少。块石出露对土壤水分入渗的影响明显,总体上,块石面积越小,坡度越缓,入渗过程变化越平稳且入渗率高,块石面积越大,坡度越陡,入渗过程变化波动大且入渗率低。

2) 初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率的最大值均出现在 15° 坡面,最小值均出现在 25° 坡面。坡度越小,入渗率越高。块石出露小区土壤水分入渗过程均呈现初始入渗率最高,平均入渗率次之,稳定入渗率最低的入渗特征。坡度和块石出露率对土壤水分入渗的作用明显,总体上坡度和块石面积越大,土壤的稳定入渗率越高。

3) 与裸露坡面相比,块石出露坡面上 15°、20°、25° 对入渗增量的贡献率为 2.63%、20.88%、76.49%。小、中、大面积对入渗增量的贡献率为 46.39%、32.88%、20.73%。形状对入渗增量的贡献率为(斜条形) 31.50%>(横条形) 27.66%>(近圆形) 27.08%>(三角形) 10.81%>(竖条形) 4.36%。坡度对土壤水分入渗差异的影响最大,其次是块石面积,形状的影响最小。

4) 3 种入渗模型的拟合结果显示裸露坡拟合度最高,均大于 0.89,而斜条形块石拟合度都最低,均为 0.60 左右。Horton 模型的拟合度最好,更适用于喀斯特坡面不同块石出露下土壤水分入渗过程的拟合。

[参 考 文 献]

- [1] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] 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.
Ma Qianhong, Zhang Keli. Progresses and prospects of the research on soil erosion in karst area of southwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11): 1130-1141. (in Chinese with English abstract)
- [3] Wang S, Chen H S, Fu Z, et al. Temporal stability analysis of surface soil water content on two karst hillslopes in southwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24): 25267-25279.
- [4] 贵州省水利厅. 贵州省水土保持公告[R/OL]. (2011-2015) [2016-01-16]. <http://www.gzsb.org.cn/Item/1624.aspx>.
- [5] Wang X, Li Z, Cai C, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. *Geomorphology*, 2012, 151 (1): 234-242.
- [6] 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(1): 108-117.
- [7] Daly E, Porporato A. A review of soil moisture dynamics: from rainfall infiltration to ecosystem response[J]. *Environmental Engineering Science*, 2005, 1(22): 9-24.
- [8] Yang L, Yang G, Li H, et al. Effects of rainfall intensities on sediment loss and phosphorus enrichment ratio from typical land use type in Taihu Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(12): 12866-12873.
- [9] Liu Z, Li K, Xiong K, et al. Effects of *Zanthoxylum bungeanum* planting on soil hydraulic properties and soil moisture in a karst area[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 257: 107125.
- [10] 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: 218-226.
- [11] Wu X, Wei Y, Wang J, et al. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 621: 54-66.
- [12] Hao H, Wei Y, Cao D, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104542.
- [13] 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.
Chen Xiaobing, Yan Lei, Li Zhendong, et al. Tillage pattern effects on characteristics of soil preferential flow in sugarcane fields in the karst region[J]. *Soils*, 2019, 51(4): 786-794. (in Chinese with English abstract)
- [14] Jian S, Zhao C, Fang S, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85-96.
- [15] van de Giesen N, Stomph T, Ajayi A E, et al. Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West Africa: Field data and models[J]. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment, 2011, 142(1): 95-101.
- [16] 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.
- Peng Xudong, Dai Quanhong, Li Changlan, et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in Karst Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 131-140. (in Chinese with English abstract)
- [17] Guo K, Liu X. Effect of initial soil water content and bulk density on the infiltration and desalination of melting saline ice water in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70: 1249-1266.
- [18] Zhao L, Hou R, Wu F, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 47-53.
- [19] 曾江敏, 何丙辉, 李天阳, 等. 喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 58-64.
- Zeng Jiangmin, He Binghui, Li Tianyang, et al. Soil infiltration characteristics under different forest and grass restoration models in karst trough-valley region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 58-64. (in Chinese with English abstract)
- [20] Gan F, He B, Qin Z, et al. Contribution of bedrock dip angle impact to nitrogen and phosphorus leakage loss under artificial rainfall simulations on slopes parallel to and perpendicular to the bedrock dip in a karst trough valley[J]. Catena, 2021, 196: 104884.
- [21] Zhao Z, Shen Y, Jiang R, et al. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil[J]. Vadose Zone Journal, 2020, 19(1): e20002.
- [22] 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.
- Fu Suhua, Lu Bingjun, Ye Zhihan. Effects of rock fragments on runoff and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 15-18, 34. (in Chinese with English abstract)
- [23] Jean J, Ai K, 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.
- [24] Liu D, She D. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation?[J]. Catena, 2017, 151: 213-224.
- [25] 朱彤, 张科利, 马芊红, 等. 喀斯特地区块石出露坡面入渗特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 118-123.
- Zhu Tong, Zhang Keli, Ma Qianhong, et al. Infiltration characteristics of boulder outcropping slope in karst area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 118-123. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张文源, 王百田, 杨光徽, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
- Zhang Wenyan, Wang Baitian, Yang Guangxi, et al. Erosive rainfall and characteristics analysis of sediment yield on yellow soil area in karst mountainous[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1776-1782. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18.
- Wu Faqi, Zhao Xining, She Diao. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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.
- Wang Ji, Cai Xiongfei, Lei Li, et al. Laboratory simulation on soil erosion under different bedrock outcrop rate in Southwest karst area, China[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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.
- Liu Zhengtang, Dai Quanhong, Yang Zhi. Study of simulated soil erosion on a bare karst slope[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 356-362. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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 & Development, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [31] 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.
- [32] 程圣东, 张辉, 李占斌, 等. 解冻期坡面降雨入渗特征及模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 12-17.
- Cheng Shengdong, Zhang Hui, Li Zhanbin, et al. Study on rainfall infiltration characteristics and simulation test of slope surface during thawing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 12-17. (in Chinese with English abstract)
- [33] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 汶川震区滑坡堆积体降雨入渗产流特征人工模拟实验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 780-788.
- Gan Fengling, He Binghui, Wang Tao. Study on the characteristics of rainfall infiltration runoff using artificial simulation experiment in Wenchuan Earthquake Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 780-788. (in Chinese with English abstract)
- [34] 徐勤学, 李春茂, 陈洪松, 等. 喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 124-131.
- Xu Qinxue, Li Chunmao, Chen Hongsong, et al. Characteristics of soil moisture infiltration in shrub land and terraces dryland in Karst peaks hillslopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 124-131. (in Chinese with English abstract)
- [35] Clausnitzer V, Hopmans J W, Starr J L. Parameter uncertainty analysis of common infiltration models[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1477-1487.

Effects of rock outcropping on soil water infiltration in karst cropland slope

Chen Lei¹, Zhang Keli^{1,2*}, Li Yetong¹, Wang Guopeng¹, Zhang Zhuodong^{1,2}

(1. Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil erosion has posed a serious threat to the ecological environment in the karst hill-slope of southwest China. Among them, soil water can dominate the redistribution of rainfall through runoff, surface evaporation, infiltration, and soil erosion in the circulation of the terrestrial surface system water and heat resources. Particularly, the thin soil and bare rock outcropping can significantly determine surface runoff and sediment production. The abundant exposed rock has also been a typical geomorphic landscape on the karst cropland slope. However, only a few studies were focused on the infiltration characteristics of soil water under different slope gradients and various shapes of the rock outcropping. Thus, this study aims to explore the influence of rock outcropping on the soil water infiltration on the karst cropland slope. A series of artificial rainfall experiments were performed on the five shapes of rocks under three slope gradients in three areas in the field. The simulation results showed that: 1) There was a significant decrease in the infiltration rate for the rock of various outcropping slopes and bare slopes with the increase of slope gradient. In general, the more stable change with the higher infiltration rate was observed in the soil infiltration process under the smaller rock area and the lower slope gradient. In the larger rock area and the steeper slope gradient, the infiltration process fluctuated greater with the lower infiltration rate. 2) The maximum initial, stable and average infiltration rates all appeared on the slope gradient of 15° , and the minimum on the slope gradient of 25° . On the whole, the greater the slope gradient and rock area were, the greater the stable infiltration rate of soil water was. 3) The 15° , 20° , and 25° slope gradients of rock outcropping contributed 2.63%, 20.88%, and 76.49% to the infiltration increment, respectively, compared with the bare slope. Small, moderate, and large areas of rock contributed 46.39%, 32.88%, and 20.73% to the infiltration increment, respectively. The contribution rate of the shape to the infiltration increment was ranked in the descending order of the oblique strip rock (31.50%), horizontal strip rock (27.66%), circular rock (27.08%), triangle rock (10.81%) and vertical strip rock (4.36%). 4) The bare slope presented the highest fitting degree (> 0.89), while the oblique strip rock was the lowest (about 0.60) after fitting. The best fitting degree was achieved for the Horton model, followed by the Kostiaikov and Philip model. Therefore, the Horton model was more suitable for the fitting of soil water infiltration under different rock outcroppings on the karst cropland slope. The finding can greatly contribute to the soil water infiltration performance under the rock outcropping on the karst cropland slope, particularly for the characteristics of runoff and sediment yield subjected to the rainfall. In addition, this work can also provide a strong reference for the control of soil erosion and rocky desertification in karst areas, further promoting the management, protection, and utilization of agricultural water and soil resources.

Keywords: soil moisture; infiltration; precipitation; models; karst; rock outcropping