

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.011 CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.011

曾红,董天富,杨静,等.喀斯特区出露基岩对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2025,39(2)

ZENG Hong, DONG Tianfu, YANG Jing, et al. Effect of exposed bedrock on soil water infiltration in Karst region[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2)

喀斯特区出露基岩对土壤水分入渗过程的影响

曾红^{1,2,3}, 董天富^{1,2}, 杨静^{1,2}, 张君^{2,3}, 聂云鹏^{2,3}, 陈洪松^{2,3}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100;
3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要: [目的] 碳酸盐岩强烈的可溶蚀性导致喀斯特地貌土壤和基岩在空间上镶嵌分布, 基岩出露地表现象普遍存在, 但其对水文过程的影响机制仍不明晰。 [方法] 为探明出露基岩对土壤水分入渗的影响, 以距离岩石 20 cm (岩脚) 和 100 cm (非岩脚) 土壤为研究对象, 通过单环入渗法测定出露基岩不同距离的土壤入渗速率, 并采用亮蓝染色示踪试验探讨优先流特征。 [结果] 非岩脚土壤毛管孔隙度、有机质质量分数显著高于岩脚土壤 ($p < 0.05$), 而土壤体积质量则显著偏小 ($p < 0.05$); 非岩脚土壤的入渗特征参数 (初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率) 均比岩脚土壤高。随距离出露基岩变远, 染色区域面积和优先流路径呈增加趋势, 表明非岩脚土壤的水分入渗能力和优先流发生频率均强于岩脚土壤。岩面粗糙度是影响土壤水分入渗过程的重要因子, 土壤入渗速率随岩面粗糙度的增加而增大, 且岩面粗糙度与土壤入渗特征指标均呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。基岩出露影响土壤水分入渗过程的最优拟合模型为 Kostiakov 模型 ($R^2 = 0.89$), 其次为 Horton 模型 ($R^2 = 0.80$), 最差为 Philip 模型 ($R^2 = 0.72$)。 [结论] 研究结果明确出露基岩对喀斯特土壤入渗特征的影响, 并强调岩面粗糙度的控制作用。

关键词: 喀斯特; 出露基岩; 入渗特征; 入渗模型

中图分类号: S715.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)02-0001-11

Effect of Exposed Bedrock on Soil Water Infiltration in Karst Region

ZENG Hong^{1,2,3}, DONG Tianfu^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, ZHANG Jun^{2,3}, NIE Yunpeng^{2,3}, CHEN Hongsong^{2,3}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: [Objective] The strong dissolvability of carbonate rock leads to the spatial distribution of karst soil and bedrock, and the outcroppings of bedrock are common, but the mechanism of their influence on hydrological processes is still unclear. [Methods] In order to investigate the influence of outcropped bedrock on soil water infiltration, the soil infiltration rate at different distances of outcropped bedrock was measured by single-loop infiltration method, taking the soil 20 cm and 100 cm away from the bedrock as the research objects, the characteristics of preferential flow were studied by the bright blue staining and tracing method. [Results] The capillary porosity and organic matter content of non-bedrock soil were significantly higher than those of bedrock soil ($p < 0.05$), but the soil bulk density was significantly lower ($p < 0.05$). The infiltration parameters (initial, stable and average infiltration rate) of non-bedrock soil were higher than that of bedrock soil. The area of staining area and preferential flow path increased with the distance from the exposed bedrock. These results indicate that the infiltration capacity and preferential flow frequency of non-bedrock soils are stronger than those of bedrock soils. Rock surface roughness was an important factor affecting soil water infiltration process, and soil infiltration

收稿日期: 2024-09-20 修回日期: 2024-10-26 录用日期: 2024-11-04 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-00-00

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42161009, 31971438, 42407485)

第一作者: 曾红 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: 79137725@qq.com

通信作者: 杨静 (1987—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态水文研究。E-mail: kinty920@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

rate increased with the increase of rock surface roughness, and there was a very significant positive correlation between soil roughness and soil infiltration characteristics ($p < 0.01$). Kostiakov Model ($R^2 = 0.89$), Horton Model ($R^2 = 0.80$) and Philip Model ($R^2 = 0.72$) are the best fitting models for soil water infiltration process considering the influence of bedrock outcrop. [Conclusion] This study identifies the influence of exposed bedrock on soil infiltration characteristics and emphasizes the controlling role of rock surface roughness.

Keywords: karst; exposed bedrock; infiltration characteristics; infiltration model

Received: 2024-09-20

Revised: 2024-10-26

Accepted: 2024-11-04

Online(www.cnki.net): 2024-00-00

土壤渗透性是衡量土壤水分保持和抗侵蚀能力的关键指标^[1],受植被、地形、土壤性质等多种因素的综合影响^[2]。土壤理化性质,包括土壤体积质量、碎石质量分数、孔隙度和持水能力等直接决定土壤的通气性和透水性^[3]。在地形复杂的山坡流域或浅土覆盖区的研究^[4-5]表明,裸露基岩是影响土壤水分入渗的重要因素;SOHRT等^[6]基于小区灌溉入渗试验和染色示踪试验发现,半干旱喀斯特地区岩土界面的平均垂直入渗速率远高于非岩土界面;许胜兵等^[7]通过环刀法探究岩-土界面与非岩-土界面的土壤入渗特征及入渗模型适应性发现,岩-土界面土壤的入渗能力总体上小于非岩-土界面,其初始入渗速率、平均入渗率、稳定入渗率小于非岩-土界面。可见,虽然认识到出露基岩对水文过程的重要意义,但获取的结果存在差异性,二者的相互作用机制仍有待进一步明晰。

已有研究通过水分动态监测^[8]、染色示踪^[6]、模拟试验^[9]等方法探究了基岩对入渗过程的潜在影响,结果表明,出露基岩与土壤共同构成的岩-土界面,由于土壤-基岩面间形成渗透差,为岩-土界面流的形成提供优先流路径,从而加快壤中流触发^[10]。出露基岩还具有“漏斗效应”,将接近50%的降雨转化为岩面径流,并将岩面物质带入土壤系统,间接导致土壤水分和养分的空间分布异质性^[11-12]。出露基岩的大小、形态等特征影响土壤特性,进而间接控制土壤水分运动规律^[13]。已有研究主要聚焦于土壤本身或岩土界面对入渗-产流过程的潜在影响,较少考虑基岩特性对水文过程的影响机制,限制了复杂地形区水文过程的系统理解。

由于碳酸盐岩强烈的可溶蚀性,形成的喀斯特地貌具有土层浅薄、成土速率慢和空间异质性极强的基本特征。我国喀斯特面积约占国土总面积的1/3,其中西南喀斯特面积达54万 km^2 ,是全球喀斯特连片出露面积的最大分布区^[14]。西南喀斯特区良好的水热环境,叠加古老且坚硬的碳酸盐岩岩层^[15],导致地表土层浅薄不连续,土壤和基岩空间镶嵌分布,基岩出露的地表线性普遍存在^[9,16]。因此,西南喀斯

特区是研究基岩出露对土壤入渗特性影响的天然试验场。已有在西南喀斯特地区开展的研究^[17]主要侧重于岩土结构对多界面径流过程的影响,出露基岩对入渗的潜在影响机制仍不明晰。基于此,本研究以桂西北典型喀斯特区不同类型出露基岩为研究对象,通过野外单环入渗试验和染色示踪试验,结合出露基岩不同水平距离的土壤理化性质,探究出露基岩对土壤入渗的影响机制,以为认识喀斯特区复杂的水土过程提供新的理解与参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验地设在广西壮族自治区河池市环江县中国科学院环江喀斯特生态系统研究观测研究站($24^{\circ}43' \sim 24^{\circ}44' \text{N}$, $108^{\circ}18' \sim 108^{\circ}19' \text{E}$)(图1a)。研究站为典型的喀斯特峰丛洼地地貌,三面环山,中间为地势较低的洼地^[17]。坡地占小流域面积约70%,其中 $\geq 20^{\circ}$ 的坡面占60%。土壤类型主要为深色或棕色石灰土,土层厚度为0~6.4 m。山坡土壤的平均厚度为30 mm,含有大量的岩石碎片,其颗粒 $> 2 \text{ mm}$ 。研究区土壤空间分布不均,基岩广泛出露,洼地裸岩率约为15%,坡地裸岩率 $\geq 30\%$ ^[18]。

研究区处亚热带季风气候区,多年平均气温为 19.4°C ,最冷月为1月(9.0°C),最热月为7月(27.4°C)。多年平均降水量1446 mm,雨季(4—9月)和旱季(10月至翌年3月)分别占全年降水量的61.9%和38.1%^[19]。植被多以灌木、藤本及草本为主,乔木覆盖率低。乔木主要有菜豆树(*Radermachera sinica*)、子弹树(*Celtis biondii*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、鹅掌柴(*Schefflera heptaphylla*)等,灌木以黄荆(*Vitex negundo*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主,草本以五节芒(*Miscanthus floridulus*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)及蕨(*Pteridium aquilinum*)为主^[20]。

1.2 试验设计

野外调查和入渗试验于2022年7—9月开展。前期野外调查出露基岩36块,出露岩石高度40~

200 cm,平均值为 74.18 cm;出露岩石岩面坡度 0~63.25°,平均值为 30.68°;出露岩石岩面粗糙度 0.69~5.94 cm,平均值为 2.05 cm。按照出露基岩高度、岩面坡度和岩面粗糙度等特征^[21],选择 9 块具有喀斯特地区代表性的出露基岩,记录其所处生境植被信息(乔木林、灌丛、纯林、草地和砍伐林)(表 1)。在各出露基

岩水平距离 20 cm(岩脚,RF)和 100 cm(非岩脚,NRF)处采集土壤样品,测定其体积质量、机械组成、碎石和有机质质量分数等,并开展单环入渗试验以获取入渗总量和入渗速率数据(图 1b)。随机选择入渗试验的 4 块出露基岩(R1、R7、R8 和 R9)进行染色示踪试验,以明晰岩周土壤优先流的发育情况。

表 1 出露基岩基本信息

Table 1 Basic information of exposed bedrocks

岩石编号	主要植被	植被类型	岩石高度/cm	岩面坡度/(°)	粗糙度/cm
R1	构树、乌桕、鹅掌柴、小巴豆、稀花八角枫	乔木林	94	30.14	4.66
R2	构树、乌桕、鹅掌柴、小巴豆、稀花八角枫	乔木林	84	22.23	3.28
R3	构树、乌桕、鹅掌柴、小巴豆、稀花八角枫	乔木林	120	34.75	4.08
R4	构树、稀花八角枫、黄荆	灌丛	45	28.75	2.05
R5	构树、稀花八角枫、黄荆	灌丛	133	60.00	1.67
R6	澳洲坚果	纯林	58	25.17	1.67
R7	澳洲坚果	纯林	40	14.50	1.21
R8	五节茅、鬼针草	草地	40	14.67	0.84
R9	稀花八角枫、黄荆	砍伐林	74	56.00	0.68

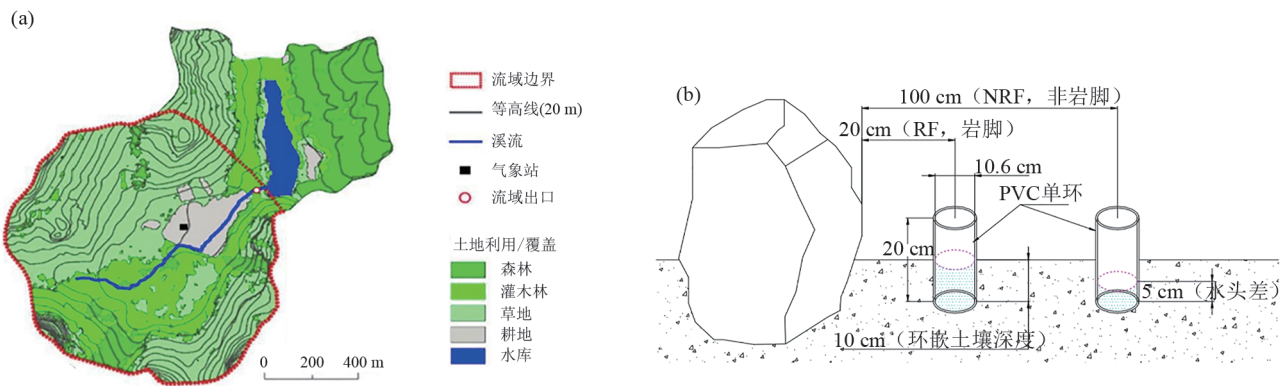


图 1 研究区域的位置(a)和土壤入渗试验示意(b)

Fig. 1 Location of the study area (a) and schematic diagram of soil infiltration test (b)

1.3 岩面粗糙度测定

通过自制的轮廓曲线仪测量出露基岩表面的粗糙度^[21-22]。轮廓曲线仪由 7 个主要部件组成:触头、绘图笔、平衡块、定迹平衡轴、基准底座、固定板和绘图纸。将轮廓曲线仪沿出露基岩表面固定放置,并使基准底座紧贴出露基岩表面;将触头匀速从仪器一端移动到另一端,绘制出露基岩粗糙度曲线(取样长度 30 cm),取曲线的最高点与基准面差值作为粗糙度量值。在每块出露基岩的表面横向、纵向各进行 3 次取样,取平均值。

1.4 土壤入渗速率测定

由于试验区野外试验条件所限,使用大直径的双环和更多的用水试验比较困难,因此采用单环入渗法测定岩脚与非岩脚的土壤入渗特性^[23],以比较出露基岩不同距离间入渗速率的差异,每个试点 3 次重复。首先,清除出露基岩岩脚和非岩脚表层土壤

的杂草和枯落物等,然后将 PVC 单环(直径 10.6 cm,高 20 cm,标记 5 cm 水头线)垂直打入土壤 10 cm,注水到 5 cm 水头高度,之后持续加水并保持水头恒定^[24]。在 90 min 入渗过程中,记录每次加入单环的水量。前 10 min,每 1 min 记录 1 次数据;10~30 min,每 5 min 记录 1 次;后 60 min,每 10 min 记录 1 次。初始入渗率采用前 1 min 的速率表示;稳定入渗速率采用后 10 min 的速率表示;平均入渗率采用整个入渗过程的人渗总量与时间间隔的比值;入渗总量为 90 min 内渗透总水量。

入渗速率计算公式为:

$$V = \frac{10Q_n}{ST_n} \quad (1)$$

式中:V 为入渗速率,mm/min;Q_n 为第 n 次测定时间的的加水量,mL;S 为内环横截面积,cm²;T_n 为第 n 次测定时间间隔,min。

1.5 土壤理化性质测定

入渗试验结束后,在各个出露基岩的岩脚与非岩脚进行土样采集,分别于0~10 cm(S1)、10~20 cm(S2)和20~30 cm(S3)3个土层采集原状土和扰动土。采用容积100 cm³的环刀采集原状土,每个土层3个重复,共81个环刀土样,用于测定土壤体积质量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度。使用塑封袋采集S1、S2、S3扰动土样品各1 kg,每个土层3个重复,采样数量共81份,用于测定土壤的机械组成(%)和有机质质量分数(g/kg)。

土壤颗粒组成使用马尔文激光粒度仪测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定,土壤碎石质量分数为碎石质量与土石混合物质量的比值,土壤体积质量、孔隙度采用环刀法测定^[25]。

1.6 岩周土壤亮蓝染色试验

随机选择入渗试验的4块出露基岩进行染色示踪试验。在岩周用自制的长方形框垂直打入土壤5 cm(长100 cm×宽30 cm×高25 cm),用10 L亮蓝染色剂(6 g亮蓝/L水)均匀喷洒在框内,之后覆盖地膜防止水分蒸发,经24 h土壤水分渗透后,挖掘土壤剖面,在旁边放置标尺,采用1 200万像素单反相机拍摄剖面图像。

土壤优先流剖面染色面积比是评价土壤优先流发育程度的指标,染色面积比越大,土壤优先流发育越发达。其计算公式为:

$$D_c = \left(\frac{D}{D + N_D} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_c 为剖面染色面积比; D 为剖面总染色面积,cm²; N_D 为剖面未被染色的面积,cm²。

1.7 数据处理与分析

采用Excel 2017和Origin 2018等软件进行数据

统计和作图,采用Matlab R2016a软件统计土壤优先流图像染色数据,并用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较分析(LSD),并进行土壤入渗特征与出露基岩特征及理化性质的Spearman相关性分析。采用Origin 2018软件对实测土壤入渗数据进行过程拟合。

采用Kostiakov模型、Philip模型和Horton模型拟合岩周土壤水分入渗过程,具体为:

1)Kostiakov模型

$$f(t) = \beta t^{-\alpha} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率,mm/min; t 为入渗时间,min; β 和 α 为经验参数。

2)Philip模型

$$f(t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率,mm/min; S 为吸渗率,mm/min; A 为稳定入渗率,mm/min。

3)Horton模型

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (5)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率,mm/min; f_0 为初始入渗率,mm/min; f_c 为稳定入渗率,mm/min; k 为经验参数。

2 结果与分析

2.1 岩周土壤理化性质

随着土层深度的增加,土壤体积质量、非毛管孔隙度均增大,毛管孔隙度、总孔隙度、碎石和有机质质量分数均降低(表2)。RF的S3土层与NRF的S1土层土壤体积质量具有显著差异性($p < 0.05$);RF的S3土层与NRF的S1土层毛管孔隙度具有显著性差异($p < 0.05$)。RF和NRF非毛管孔隙度为4.67%~6.60%,总孔隙度为52.78%~58.52%。RF的S2土层和S3土层与NRF的S1土层土壤有机质质量分数具有显著性差异($p < 0.05$)。

表2 岩脚与非岩脚土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of bedrock and non-bedrock soil

测量点	土层	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	碎石/%	有机质/(g·kg ⁻¹)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
	S1	0.93±0.12a	4.67±1.85	52.31±6.09a	56.98±5.75	8.47±8.49	91.90±20.88ab	55.15±9.19	26.50±1.12	18.35±8.92
RF	S2	1.06±0.06b	5.05±3.96	47.65±4.78ab	52.69±4.47	9.98±12.16	59.92±18.11c	56.14±10.74	25.14±2.69	18.72±9.73
	S3	1.21±0.07c	6.60±1.97	46.19±4.06b	52.78±2.99	8.87±16.22	43.50±6.72c	58.88±12.96	25.14±5.10	15.98±11.45
	S1	0.88±0.15a	6.24±2.76	52.28±5.16a	58.52±6.86	7.15±8.95	102.20±30.70a	54.45±8.05	26.88±2.50	18.67±7.48
NRF	S2	0.99±0.13ab	5.87±2.09	49.78±6.07ab	55.65±6.88	9.64±11.50	82.02±14.90b	57.91±11.56	24.64±4.04	17.45±9.28
	S3	1.04±0.06b	6.32±3.07	47.65±5.89ab	53.97±5.43	3.25±7.70	51.58±17.69c	58.49±7.75	28.00±2.68	13.52±6.01

注:RF表示岩脚;NRF表示非岩脚;S1、S2、S3分别表示0~10、10~20、20~30 cm土层。表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土层间存在显著差异($p < 0.05$)。

除岩脚S3外,土壤颗粒质量分数均随土层深度的增加而减少。RF与NRF的黏粒、粉粒和砂粒

不存在显著性差异。NRF的非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度和有机质质量分数大于RF,而土

壤体积质量和碎石质量分数小于 RF。整体而言, NRF 具有相对更好的透气性和更高的有机质质量分数。

2.2 岩周土壤水分入渗特征

2.2.1 岩脚与非岩脚土壤水分入渗特征 从图 2 可以看出,土壤水分入渗过程呈先快速下降后缓慢下降最后趋于稳定趋势。前 10 min 入渗速率最高,

达 69.66 mm/min;20~90 min 趋于土壤稳渗点,平均入渗速率为 21.42 mm/min。9 块出露基岩的岩脚与非岩脚初始入渗率到稳定入渗率降幅的平均值为 79.27%,变异系数为 20.40%。各岩周降幅最大的为 R3 的 NRF,降幅 94.27%,降幅最小的为 R1 的 NRF,降幅 39.57%。除 R2、R5 和 R8 这 3 块岩石外,入渗速率均表现为 NRF 大于 RF(图 3)。

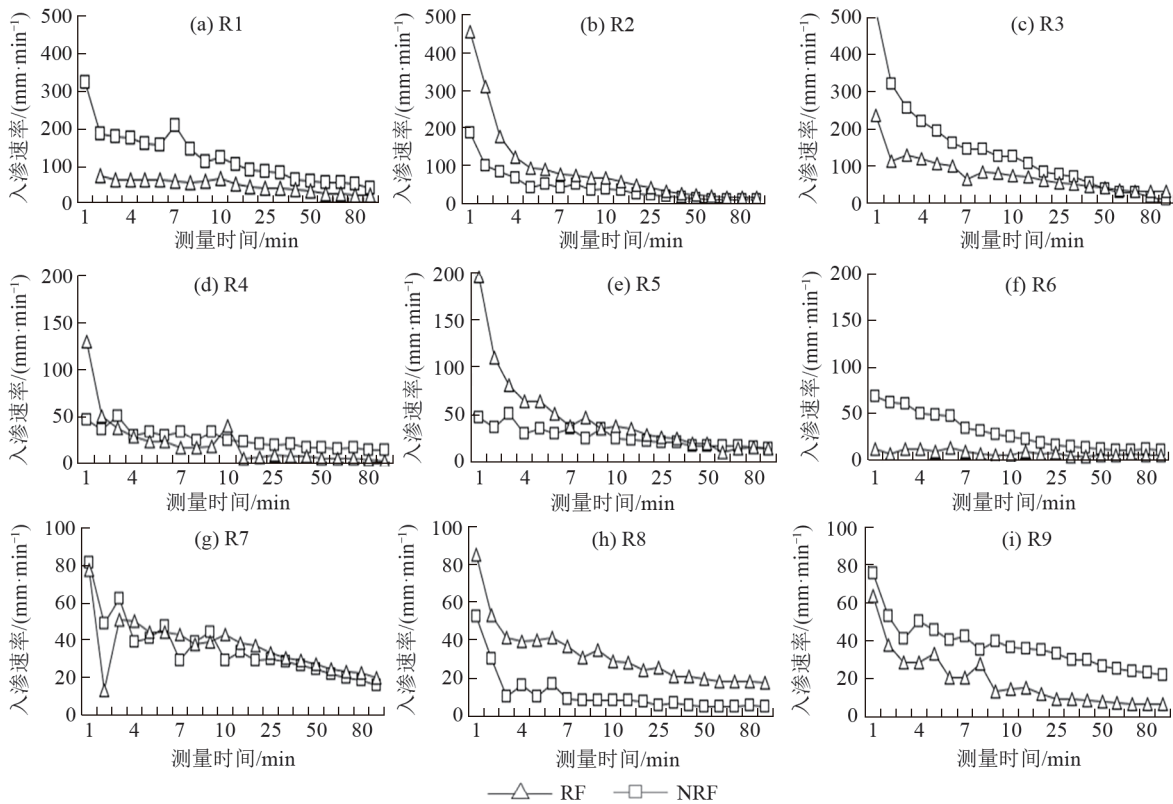


图 2 岩脚与非岩脚土壤入渗过程

Fig. 2 The infiltration process of bedrock and non-bedrock soil

从图 3 可以看出,土壤初始入渗率为 11.79~518.35 mm/min,其中 NRF3 最大,RF6 最小。土壤稳定入渗率为 4.24~63.38 mm/min,平均入渗率为 5.71~

104.95 mm/min,均为 NRF1 最大,RF6 最小。在 R1~R5 岩周入渗速率中,出露基岩的初始入渗率较高,除 RF1 外,均超过 100 mm/min,NRF3 高达 518.35 mm/min。

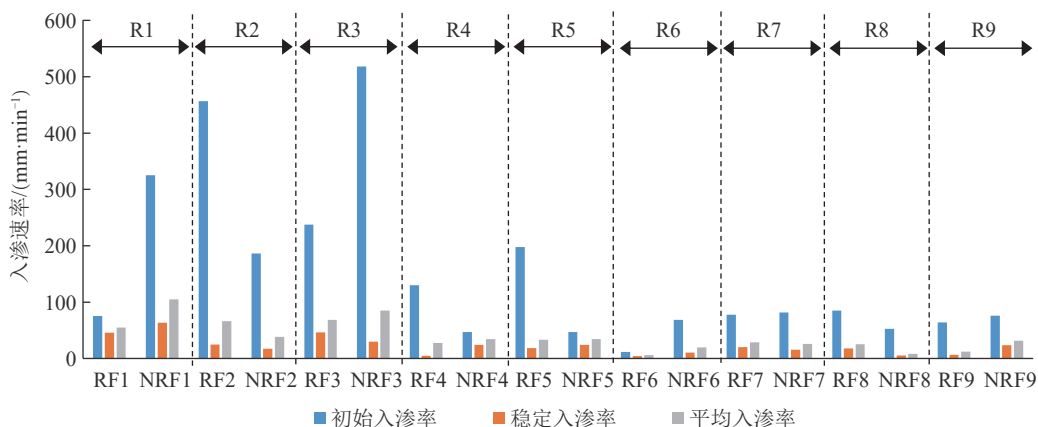


图 3 岩脚与非岩脚土壤入渗特征

Fig. 3 Soil infiltration characteristics of bedrock and non-bedrock soil

由表 3 可知,NRF 的入渗速率平均值(40.78 mm/min)大于 RF 的入渗速率平均值(35.74 mm/min)NRF 的土壤入渗特征(初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和入渗总量)的统计量(最小值、最大值和平均值)均

大于 RF,即 NRF 土壤入渗能力大于 RF。入渗特征指标的变异系数属于中等程度变异,分别为初始入渗率 0.97,稳定入渗率 0.77,平均入渗率 0.71,入渗总量 0.68。

表 3 岩脚与非岩脚土壤入渗特征统计

Table 3 Statistics of the infiltration characteristics of bedrock and non-bedrock soil

入渗特征	RF				NRF			
	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	入渗总量/ mm	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	入渗总量/ mm
最小值	11.79	4.24	5.71	4 232.00	46.94	5.03	8.14	5 367.00
最大值	456.68	46.01	68.67	39 171.00	518.35	63.38	104.95	60 400.00
平均值	148.34	20.89	35.74	19 731.22	158.22	22.16	40.78	23 942.78
标准差	135.08	15.83	22.64	11 787.24	162.29	17.36	32.42	18 473.41
变异系数	0.91	0.76	0.63	0.60	1.03	0.78	0.79	0.77

2.2.2 岩脚与非岩脚土壤入渗影响因素 从表 4 可以看出,RF 的入渗特征与土壤理化性质无显著相关性($p>0.05$);NRF 的初始入渗率、平均入渗率与黏粒和非毛管孔隙度均呈显著正相关($p<0.05$),与砂粒呈显著负相关($p<0.05$)。稳定入渗率与有机质质量分数呈

显著负相关($p<0.05$)。RF 的入渗速率与岩石高度、岩面粗糙度和岩面坡度均呈正相关($p>0.05$),而除岩石高度和岩面粗糙度外,NRF 的入渗速率与岩石特征呈负相关($p>0.05$)。除初始入渗速率外,RF 的入渗特征与岩面粗糙度均呈极显著正相关($p<0.01$)。

表 4 岩脚与非岩脚土壤入渗特征与出露基岩特征及土壤理化性质相关性分析

Table 4 Correlation analysis of infiltration characteristics, outcrop characteristics and soil physical and chemical properties of bedrock and non-bedrock soil

项目	影响因子	RF			NRF		
		初始入渗率	稳定入渗率	平均入渗率	初始入渗率	稳定入渗率	平均入渗率
土壤理化性质	黏粒	-0.042	0.159	0.243	0.762*	0.377	0.795*
	粉粒	-0.122	-0.219	-0.236	-0.379	-0.098	-0.353
	砂粒	-0.176	-0.293	-0.460	-0.745*	-0.310	-0.762*
	土壤体积质量	-0.092	0.192	0.209	-0.435	-0.234	-0.318
	非毛管孔隙度	-0.209	0.444	0.008	0.795*	0.644	0.762*
	毛管孔隙度	-0.059	0.192	-0.025	0.159	-0.109	0.042
	总孔隙度	0.025	0.276	0.126	0.243	0.025	0.142
	碎石质量分数	0.310	-0.393	-0.176	0.050	0.017	0.134
出露基岩特征	有机质质量分数	0.192	0.025	0.192	-0.092	-0.711*	-0.293
	岩石高度	0.469	0.620	0.603	0.276	0.364	0.359
	岩面粗糙度	0.433	0.802**	0.818**	0.846**	0.802**	0.934**
	岩面坡度	0.084	0.147	0.087	-0.067	-0.024	-0.053

注:*表示显著相关($p<0.05$);**表示极显著相关($p<0.01$);岩脚/非岩脚观测数 $n=9$ 。

从图 4 可以看出,将岩面粗糙度与稳定入渗率进行曲线拟合,得到拟合函数为:

$$y=3.6728x^2-10.367x+20.394(R^2=0.7425)$$

式中: y 为稳定入渗率,mm/min; x 为岩面粗糙度,cm。

岩周土壤入渗速率随岩面粗糙度呈先缓慢增长后快速增长趋势,且岩面粗糙度与土壤入渗特征指标呈极显著正相关($p<0.01$)(表 4),即出露基岩对土壤入渗具有极大影响,是岩周土壤入渗的重要影响因素。

2.2.3 岩脚与非岩脚土壤入渗模型拟合 从表 5 可以看出,RF 的 Kostiakov 模型拟合的决定系数(R^2)平均

值为 0.796,Horton 模型拟合的决定系数(R^2)平均值为 0.799,Philip 模型的拟合决定系数(R^2)平均值为 0.721;NRF 的 Kostiakov 模型拟合的决定系数(R^2)平均值为 0.888,Horton 模型的拟合决定系数(R^2)平均值为 0.869,Philip 模型的拟合决定系数(R^2)平均值为 0.851。

根据 R^2 平均值比较模型拟合效果,RF 表现为 Horton 模型>Kostiakov 模型>Philip 模型,NRF 为 Kostiakov 模型>Horton 模型>Philip 模型。对岩周土壤最优拟合模型数量占比中,Kostiakov 模型占

10 个, Horton 模型占 6 个, Philip 模型 2 个。综上可知, Kostiakov 模型对岩周土壤的入渗过程拟合适用性最好, 可以更好地模拟和预测岩周土壤的入渗过程。

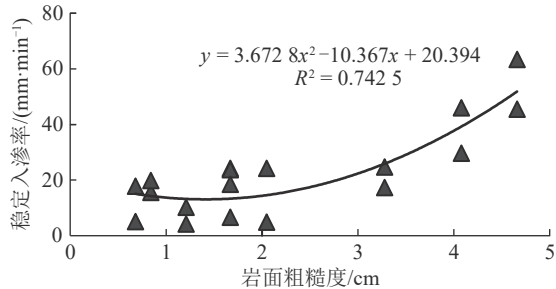


图 4 稳定入渗率随岩面粗糙度变化曲线

Fig. 4 The change curve of stable infiltration rate with surface roughness

2.3 岩周土壤优先流特征

从图 5 可以看出, 随土层深度增加染色面积比整体呈减小趋势, 不同剖面间染色面积比存在差异。喀斯特岩周土壤 0~85 cm 土层垂直剖面的染色面积比为 25.98%~39.67%, 其中 R1 最大, R9 最低。染色

区域不均匀地分布在 0~85 cm 土层, 染色面积比均在 0~10 cm 土层最高, 平均值为 90.30%~97.30%。之后随土层深度增加呈波动式下降, 到 70~85 cm 土层最低, 平均值为 0.94%~17.25%。距离岩石远的区域, 染色区域变密集, 染色面积增加, 土壤优先流发育高于距离岩石近的区域(图 6)。

3 讨论

在非喀斯特地区, 以往研究^[2, 26-27]通过双环入渗试验和定水头土柱模拟试验得到土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率的平均值分别为 0~30、0~5、0~5 mm/min。本研究发现, 岩周的土壤快速入渗, 其初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率的平均值分别为 149.88、19.02、47.04 mm/min(表 3), 均明显大于非喀斯特地区观测结果。相较于非喀斯特土壤, 喀斯特土壤具有体积质量小、孔隙度较大的特征, 直接导致土壤的渗透性高^[28-29]。因此, 在充足的降雨条件下, 雨水迅速穿透土壤剖面, 然后通过垂流传输到表层岩溶带, 加深了对喀斯特土壤快速渗透率和强烈脆弱性的理解^[30]。

表 5 岩脚与非岩脚土壤水分入渗模型拟合结果

Table 5 Fitting results of soil water infiltration models for bedrock and non-bedrock soil

土壤位置	岩石编号	Kostiakov 模型			Philip 模型			Horton 模型			
		α	β	R^2	A	S	R^2	f_c	$f_0 - f_c$	k	R^2
RF	RF1	0.165	72.262	0.485	34.84	77.859	0.287	11.964	53.254	0.019	0.769
	RF2	0.860	469.110	0.980	0	664.305	0.815	34.970	669.365	0.467	0.977
	RF3	0.452	212.227	0.925	10.122	407.181	0.930	45.997	196.129	0.252	0.852
	RF4	0.968	123.849	0.934	0	163.176	0.734	11.720	256.644	0.806	0.896
	RF5	0.712	190.502	0.983	0	306.797	0.904	23.320	248.756	0.431	0.949
	RF6	0.222	11.628	0.491	3.918	17.153	0.457	4.568	6.738	0.100	0.519
	RF7	0.202	59.694	0.484	22.386	84.519	0.467	20.695	29.133	0.036	0.451
	RF8	0.376	75.143	0.937	9.165	136.900	0.960	21.670	69.116	0.276	0.886
	RF9	0.543	61.089	0.945	0	116.447	0.939	9.046	58.435	0.240	0.892
NRF	NRF1	0.397	305.468	0.915	25.891	584.079	0.907	61.339	224.240	0.131	0.857
	NRF2	0.728	180.100	0.983	0	285.554	0.895	19.316	226.198	0.400	0.927
	NRF3	0.631	514.958	0.994	0	895.020	0.955	53.665	533.840	0.265	0.936
	NRF4	0.271	49.928	0.835	12.367	82.243	0.788	16.030	31.811	0.106	0.844
	NRF5	0.271	49.928	0.835	12.367	82.243	0.788	16.030	31.811	0.106	0.844
	NRF6	0.428	83.429	0.754	2.489	171.285	0.738	10.446	70.974	0.121	0.848
	NRF7	0.317	74.427	0.864	13.822	130.099	0.873	24.464	58.687	0.215	0.803
	NRF8	0.803	49.883	0.897	0	74.595	0.783	6.906	94.066	0.730	0.929
	NRF9	0.245	67.343	0.914	19.815	105.733	0.931	28.277	45.619	0.199	0.833

本研究得出, 非岩脚的入渗速率大于岩脚的入渗速率, 且非岩脚土壤的入渗特征(初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和入渗总量)均大于岩脚的相应特征(表 3), 与许胜兵等^[7]的研究结果相似。其原因在于, 岩脚土壤体积质量和碎石质量

分数更高, 而非岩脚土壤孔隙度和有机质状况更好, 即非岩脚土壤的入渗能力大于岩脚土壤的入渗能力。岩周土壤入渗速率随岩面粗糙度的增加而增大, 岩面粗糙度与土壤入渗特征指标呈极显著正相关($p < 0.01$)(图 4)。王庆贺等^[21]在喀斯特

区出露基岩的研究发现,出露基岩岩面径流输出与岩面粗糙度呈负相关。出露基岩对降水进行再分配,其差异受到岩面粗糙度的影响,岩面粗糙度

越大,径流输出越少,到达岩周土壤底部的雨水量越少,导致土壤体积质量相对减小,孔隙度增多,入渗能力增强。

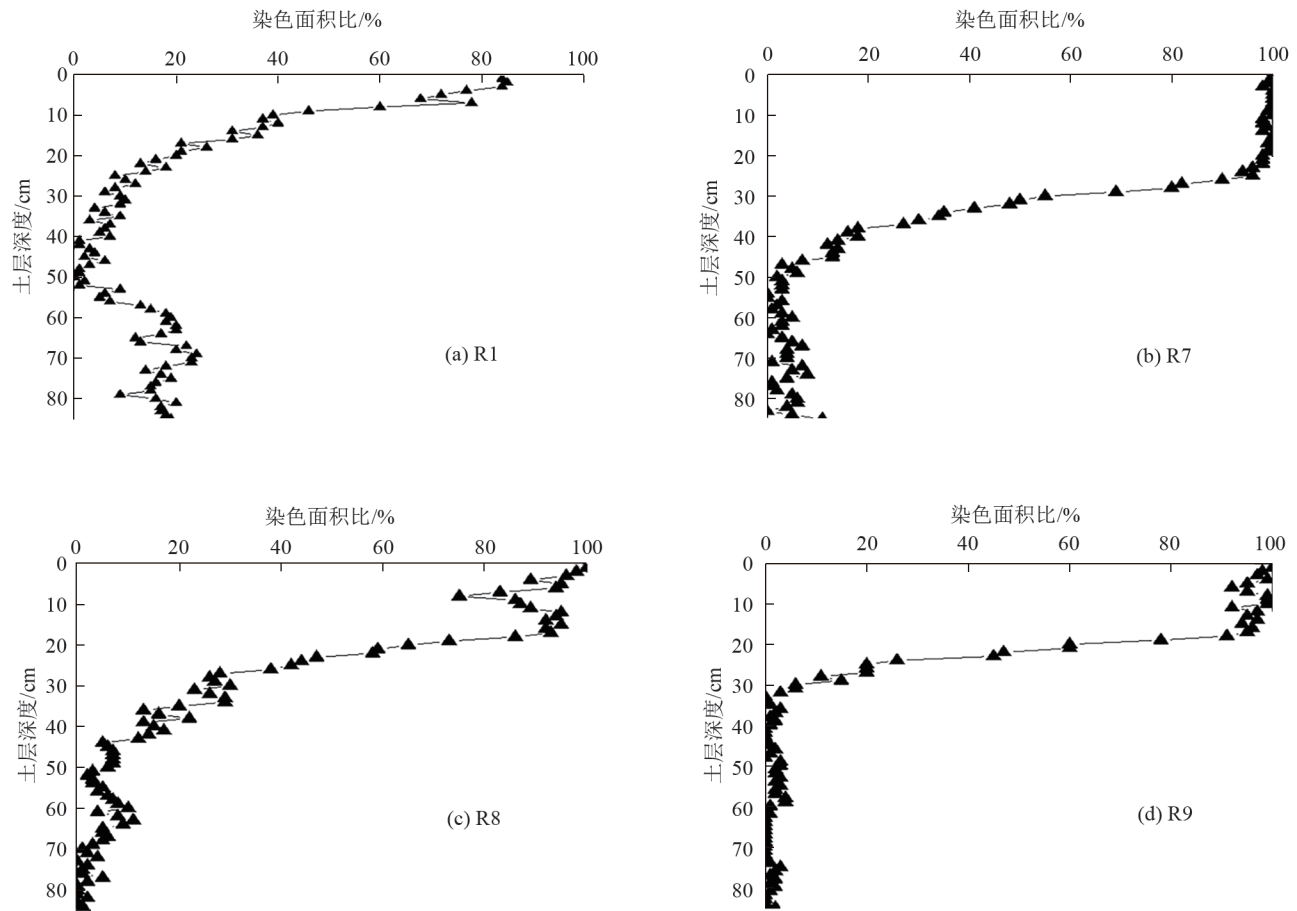


图5 岩周土壤优先流随土层深度变化特征

Fig. 5 Characteristics of changes of preferential flow in the soil around the rocks with soil depth

本研究发现,出露基岩越近的土壤优先流发育程度更弱(图6),再叠加低渗透特性,更加凸显出露基岩的“边壁效应”,即土壤和基岩界面之间形成渗透性相对更高的水流通通道。在降雨过程中,水分优先沿岩-土界面迅速下渗,形成侧向优先流通道。王发等^[31]在典型喀斯特白云岩小流域通过染色示踪试验得出,岩土界面流是喀斯特峰丛洼地重要的优先流类型,并受到地形和土壤质地的影响。土层厚度是影响并触发侧向界面流的关键因素,厚度越大界面流产生的几率越小^[32]。土壤厚度间接反映土壤质地、渗透性等性质,与本研究发现出露基岩影响下覆土壤理化性质、进而控制入渗特征的结果一致。因此,未来研究可适当侧重出露基岩对入渗和产流耦合过程的影响机制,进一步加深对喀斯特岩土结构和水文过程相互关系的理解。

本文采用3种入渗模型对岩周土壤入渗过程进行拟合表明,岩脚和非岩脚的最优拟合模型分别为

Horton模型和Kostiakov模型,最差拟合模型均为Philip模型。Philip模型适用于土壤初始含水量均匀且理化性质较均质性的土体入渗过程,Kostiakov模型适用于起始入渗速率较大的水分入渗过程,Horton模型的参数因子相对较多,适用于拟合非均质性土体的入渗过程^[33]。岩脚与非岩脚最优拟合模型存在差异,究其原因,相对于岩脚,非岩脚距离基岩较远,土层浅薄不连续,存在较多裂隙和孔隙,土壤入渗能力更强,初始入渗速率更高,使得渗透过程更符合Kostiakov模型。

综上,喀斯特区岩周土壤入渗不仅受到土壤理化性质的影响,还受到出露基岩岩面粗糙度的影响。尽管本研究已发现出露基岩岩周土壤入渗与岩面粗糙度的相关性,但是其内在作用机制尚不明确。因此,今后仍需设计相关试验进行研究,为岩周土壤水分入渗过程提供更加可靠的结果,也为水土流失防治、石漠化治理和生态修复提供理论支持。

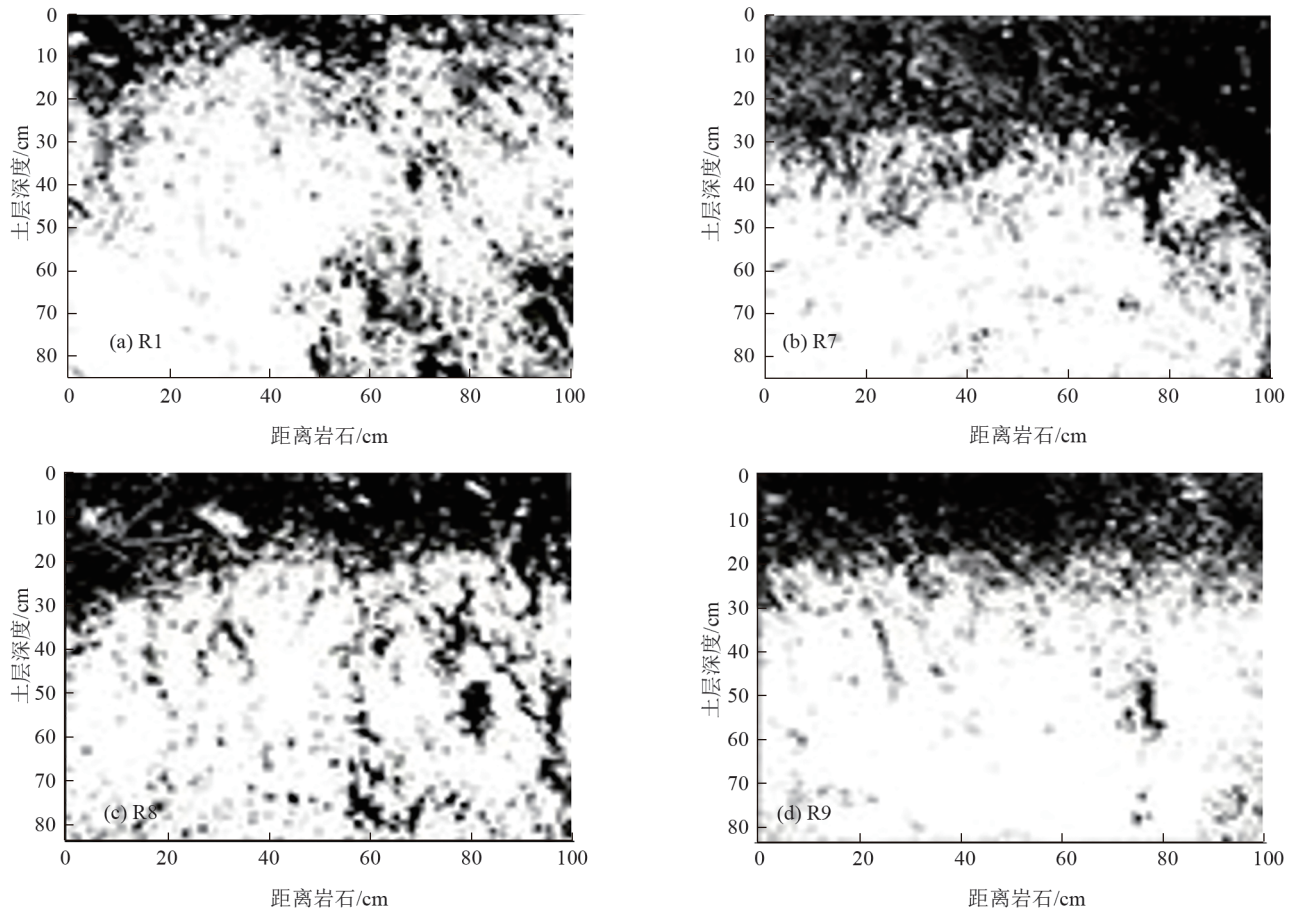


图6 岩周土壤优先流随距离岩石变化特征

Fig. 6 Characteristics of changes of preferential flow in the soil around the rocks the distance from the rocks

4 结论

1) 喀斯特岩周土壤入渗过程呈先快速下降后缓慢下降最后趋于稳定趋势, 初始入渗率到稳定入渗率的降幅很大(最高可达96.27%), 前10 min入渗率最高, 在20~90 min趋于土壤稳渗点。对比入渗指标平均值发现, 非岩脚的入渗特征(初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率)均大于岩脚, 即非岩脚土壤入渗能力大于岩脚。

2) 岩周入渗速率受到土壤理化性质的影响, 相对于岩脚土壤, 非岩脚土壤毛管孔隙度、有机质质量分数显著增大($p < 0.05$), 土壤体积质量显著减小($p < 0.05$)。随距离出露基岩变远, 染色区域面积增加, 优先流路径增加, 即非岩脚土壤的透气性和总渗透性高于岩脚土壤。岩周土壤入渗速率随岩面粗糙度的增大而增大, 岩面粗糙度与土壤入渗特征指标呈极显著正相关($p < 0.01$)。

3) 对比分析3种土壤水分入渗模型, 岩脚和非岩脚的最优拟合模型分别为Horton模型($R^2=0.799$)和Kostiakov模型($R^2=0.888$), 最差拟合模型均为Philip模型($R^2=0.721$)。

参考文献:

- [1] 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 Q X, LI C M, CHEN H S, 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, 2018, 34(8): 124-131.
- [2] 云慧雅, 毕华兴, 王珊珊, 等. 不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 183-189.
YUN H Y, BI H X, WANG S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 183-189.
- [3] 刘道平, 陈三雄, 张金池, 等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.
LIU D P, CHEN S X, ZHANG J C, et al. Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji County of Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 493-498.
- [4] 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.
- CHEN L, ZHANG K L, LI Y T, et al. Effects of rock outcropping on soil water infiltration in Karst cropland slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10):111-118.
- [5] 马芊红,柯奇画,张科利,等. 黔北山区坡面基岩出露特点及与坡面特征的关系[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(6):17-24.
- MA Q H, KE Q H, ZHANG K L, et al. Characteristics of exposed slope boulders and its relationship with slope features in the mountainous region of North Guizhou[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(6):17-24.
- [6] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid Karst environment[J]. Catena, 2014, 123:1-10.
- [7] 许胜兵,彭旭东,戴全厚,等. 喀斯特高原石漠化区露石岩-土界面与非岩-土界面土壤入渗特性差异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5):136-143.
- XU S B, PENG X D, DAI Q H, et al. Differences of soil infiltration characteristics between exposed rock-soil interface and non-rock-soil interface in rocky desertification area of Karst Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):136-143.
- [8] WANG D J, SHEN Y X, HUANG J, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in Karst landscapes [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(9):8610-8616.
- [9] 敖利满,蒋超华,徐勤学,等. 岩面形态对西南喀斯特坡地产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5):52-60.
- AO L M, JIANG C H, XU Q X, et al. Influence of rock surface morphology on runoff and sediment in Karst slope of Southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5):52-60.
- [10] ZHAO Z M, SHEN Y X, SHAN Z J, et al. Infiltration patterns and ecological function of outcrop runoff in epikarst areas of Southern China[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1):1-10.
- [11] SHEN Y X, WANG D J, CHEN Q Q, et al. Large heterogeneity of water and nutrient supply derived from runoff of nearby rock outcrops in Karst ecosystems in SW China[J]. Catena, 2019, 172:125-131.
- [12] 张志才,陈喜,石朋,等. 贵州喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5):803-807.
- ZHANG Z C, CHEN X, SHI P, et al. Characteristics of soil moisture distribution and its influence factor in the Karst cluster-peach mountain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5):803-807.
- [13] ZHAO Z M, SHEN Y X, JIANG R H, et al. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a Karst soil[J]. Vadose Zone Journal, 2020, 19(1):e20002.
- [14] 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.
- DAI Q H, YAN Y J. Research progress of Karst rocky desertification and soil erosion in Southwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2):1-10.
- [15] 李阳兵,侯建筠,谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002, 22(3):365-370.
- LI Y B, HOU J J, XIE D T. The recent development of research on Karst ecology in Southwest China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3):365-370.
- [16] 陈洪松,冯腾,李成志,等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1):10-16.
- CHEN H S, FENG T, LI C Z, et al. Characteristics of soil erosion in the Karst regions of Southwest China: Research advance and prospective [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1):10-16.
- [17] 张君,陈洪松,聂云鹏,等. 西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(4):985-996.
- ZHANG J, CHEN H S, NIE Y P, et al. Research progress on structure and hydrological processes in the Karst critical zone of Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4):985-996.
- [18] ZHANG J, FU Z Y, NIE Y P, et al. Microclimate stability on the critical zone of a Karst hillslope in Southwest China: Insights from continuous temperature observations at the air-soil-epikarst interface [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 336:e117656.
- [19] ZHANG J, CHEN H S, NIE Y P, et al. Temporal variations of precipitation driven by local meteorological parameters in Southwest China: Insights from 9 years of continuous hydro-meteorological and isotope observations [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46:e101345.
- [20] 张君,陈洪松,付智勇,等. 西南喀斯特小流域关键带含水介质分布特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(4):969-982.
- ZHANG J, CHEN H S, FU Z Y, et al. Investigation on the aquifer structure of small watershed critical zone on Karst dolomite in Southwest China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4):969-982.
- [21] 王庆贺,赵志猛,沈有信. 云南石林喀斯特露石径流输出及其影响因素探究[J]. 地球学报, 2021, 42(3):383-390.
- WANG Q H, ZHAO Z M, SHEN Y X. A study of runoff of Karst rock outcrops and its influencing factors in Shilin, Yunnan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3):383-390.
- [22] 杜时贵,葛军荣. 岩石节理粗糙度系数 JRC 测量新方法[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2):10-13.

- DU S G, GE J R. The new measuring method of joint roughness coefficients[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1999, 19(2): 10-13.
- [23] 王迪, 钱嘉鑫, 朱妮, 等. 高原鼠兔洞穴对土壤入渗的影响及机制[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 243-249.
- WANG D, QIAN J X, ZHU N, et al. Effect of plateau pika caves on soil infiltration and mechanism[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 243-249.
- [24] 董天富. 喀斯特不同土地利用方式下出露岩石对岩周土壤水分再分配的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- DONG T F. Effects of exposed rocks on soil moisture redistribution around Karst under different land use patterns[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [25] 国家林业和草原局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- National Forestry and Grassland Administration. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [26] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 101-107.
- LIU C, ZHANG J J, ZHANG H B, et al. Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 101-107.
- [27] 舒方瑜, 董勤各, 冯浩, 等. 不同有机物料对黄土高原沟壑地土壤水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 74-79.
- SHU F Y, DONG Q G, FENG H, et al. Effects of different organic materials on water movement in gully land consolidation soil on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 74-79.
- [28] 甘凤玲, 何丙辉, 覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 825-837.
- GAN F L, HE B H, QIN Z Y. Effect of bedding slope on hydrodynamic parameters in typical Karst valley[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 825-837.
- [29] 彭旭东. 喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土漏失过程及特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- PENG X D. Study on the process and characteristics of soil and water loss in shallow holes (cracks) on sloping land in Karst plateau[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [30] LIU M X, XU X L, SUN A Y, et al. Why do Karst catchments exhibit higher sensitivity to climate change? Evidence from a modified Budyko model[J]. Advances in Water Resources, 2018, 122: 238-250.
- [31] WANG F, CHEN H S, LIAN J J, et al. Preferential flow in different soil architectures of a small Karst Catchment[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-10.
- [32] ZHANG J, WANG S, FU Z Y, et al. Soil thickness controls the rainfall-runoff relationship at the Karst hillslope critical zone in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: e127779.
- [33] 赖坡, 程圣国, 陈勇, 等. 降雨入渗模型的研究方法综述[J]. 山西建筑, 2016, 42(26): 71-73.
- LAI P, CHENG S G, CHEN Y, et al. Review on research methods of rainfall infiltration model[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(26): 71-73.