

喀斯特地区块石出露坡面入渗特征

朱彤, 张科利, 马芊红, 张思琪

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

摘要: 为探明喀斯特地区不同块石出露坡面土壤入渗对降雨的响应特征, 通过野外人工模拟降雨试验, 研究喀斯特坡面 4 种块石出露条件和 5 种雨强对入渗的影响。结果表明: (1) 在雨强一定的情况下, 除在雨强为 30 mm/h 时块石裸露率的大小对坡面入渗无明显影响, 在其余较大雨强下, 块石裸露率为 5.4% 对入渗影响较小, 块石裸露率为 13.1% 抑制入渗, 块石裸露率为 42.9% 促进入渗, 在降雨前期, 块石的存在对入渗均有促进作用。 (2) 在块石裸露率及降雨量一定的情况下, 随着雨强的增大, 坡面的入渗量呈明显下降趋势, 而平均入渗速率整体呈现先增大后减小随后又增大的趋势; 在降雨前期, 随着雨强的增加, 入渗量呈先减少后增加的波动性变化, 前期入渗率随着雨强的增大而增加, 拐点均出现在雨强为 90 mm/h。 (3) 在对入渗过程进行模拟后发现, 方正三公式在有块石出露坡面上的拟合效果比 Kostikov 公式的拟合效果更好。

关键词: 喀斯特坡地; 降雨入渗; 块石出露; 人工降雨; 入渗模型

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)04-0118-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.018

Infiltration Characteristics of Boulder Outcropping Slope in Karst Area

ZHU Tong, ZHANG Keli, MA Qianhong, ZHANG Siqi

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,
Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: In order to investigate the response characteristics of soil infiltration on different boulder outcropping slopes to rainfall in karst area, the influence of four boulder outcropping conditions and five rain intensities on infiltration was studied. Field artificial rainfall simulation method was adopted. The results showed that: (1) When the rainfall intensity was 30 mm/h, the size of the boulder outcropping rate had no significant effect on infiltration. However, in the other rainfall intensities, the rate of boulder outcropping was 5.4%, which had little effect on infiltration; while the rate of boulder outcropping was 13.1%, which inhibited infiltration, and the rate of boulder outcropping was 42.9%, which promoted infiltration. In the early period of rainfall, the existence of boulder could promote the infiltration. (2) When the boulder outcropping rate and rainfall remained unchanged, the stronger the rain, the less the infiltration. While the average infiltration rate increased first, then decreased and then increased again. In the early period of rainfall, with the increases of rainfall intensities, the infiltration volume decreased first and then increased. And the early infiltration rate increased with the increases of rain intensities. In both cases, the inflection point occurred when the rain intensity was 90 mm/h. (3) After simulating the infiltration process, it was found that universal empirical model showed better fitting effect than Kostikov model on the boulder outcropping slope.

Keywords: karst slope; rainfall infiltration; boulder outcropping; artificial rainfall; infiltration models

我国西南地区是世界上面积最大的喀斯特连续分布带, 具有块石出露、土壤层薄且不连续、水土流失严重的特点^[1-2]。严重的水土流失加快了喀斯特地区的石漠化进程, 导致基岩裸露率增加, 土壤生产力持续下降。除大面积裸露的基岩外, 喀斯特地区暴露在地表的块石还包括数量众多的非基岩(如落石、滚石、

人类堆砌石等)^[3]。这些块石以镶嵌式结构存在于土体中, 并且多与土壤直接突变接触。这种独特的存在形式除改变微地貌特征外, 还会改变土壤性质和入渗特性。Poesen 等^[4]的研究表明, 砾石镶嵌于土壤中对入渗的影响不同于砾石覆盖于土壤之上对入渗的影响。因此, 在其他地区开展的均质土壤坡面入渗规

收稿日期: 2020-01-08
资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41730748); 国家重点研究发展计划项目(2016YFC0503704)
第一作者: 朱彤(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤资源利用与保护研究。E-mail: 2952722565@qq.com
通信作者: 张科利(1962—), 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

律研究结果,可能不适用于喀斯特块石出露坡面。

块石的存在一方面增大地表不透水面积,限制入渗;另一方面,又通过拦截阻挡地表径流而增加入渗量。具体的影响大小与雨强、降雨历时、地下裂隙度和块石裸露率有关^[5]。关于砾石的影响作用研究,此前多集中于粒径在 50 mm 以下的砾石。已有研究^[6-8]在黄土高原采用人工模拟降雨法探究了含砾石土壤坡面的入渗特征发现,含砾石土壤的入渗特征与雨强、砾石含量和坡度密切相关;党宏宇等^[9]采用室内土柱法研究了喀斯特地区土石隔层的位置对入渗的影响发现,碎石粒径与在土层中的位置均会影响入渗过程。也有学者探讨了喀斯特坡面的水分入渗过程,如方胜等^[10]探讨了喀斯特石灰岩坡地土壤稳定入渗率的空间分布特征;王明刚等^[11]在粤北石漠化地区采用人工模拟降雨法研究了不同雨强与不同土地利用方式下的坡面入渗规律;张治伟等^[12]、徐勤学等^[13]、李春茂等^[14]和曾江敏等^[15]都采用室内土柱法研究了喀斯特石质坡地不同土地利用类型对土壤入渗性能的影响。本文采用人工模拟降雨的办法,研究喀斯特地区不同块石裸露率和不同雨强对坡面入渗的影响,旨在明确喀斯特地区块石出露坡面的入渗特征,为喀斯特地区的石漠化治理及水土资源的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 小区布设

本试验在贵州省龙里水土保持科技示范园模拟石漠化小区进行。试验共设置 4 个块石出露程度不同的径流小区,块石裸露率分别为 0, 5.4%, 13.1% 和 42.9%, 其中块石裸露率为 0 的小区作为对照裸地小区。4 个小区除块石出露程度不同外,大小、坡度、坡向与土壤理化性质基本一致,水平投影尺寸均为 $10 \times 2.2 \text{ m}^2$, 坡度为 25° , 土壤类型为黄壤, 土壤厚度 $>1 \text{ m}$, 土壤容重为 1.16 g/cm^3 。径流小区主要由边埂、小区主体、集流槽、收集径流和泥沙的分流桶和集流桶组成。3 个块石出露小区上块石随机分布且部分出露地表,具体分布情况见图 1, 从图 1(1)~(3)依次为块石出露为 5.4%, 13.1% 和 42.9% 小区的 3D 扫描图片。

1.2 降雨装置

降雨设备为 Meyer 槽式下喷人工降雨机。共使用 8 台降雨机组合, 每台降雨机总长 5 m, 共有 5 个喷头, 喷头与喷头之间距离 1.1 m, 2 台降雨机喷头之间的距离为 1.5 m, 有效降雨面积为 $10 \times 2.2 \text{ m}^2$ 。率定结果表明, 降雨机距地面高度为 2.55 m, 降雨时压强控制在 0.04 MPa, 降雨均匀系数 $>80\%$ ^[16]。降雨强度的增加或减小是通过喷头摆动停留时间来实现,

通过不同的摆动方式, 实现不同的设计雨强。

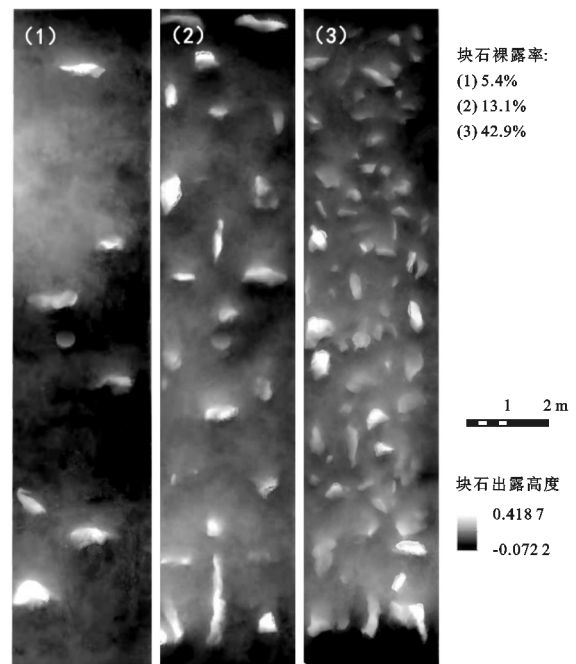


图1 块石出露小区块石分布情况

1.3 试验设计

降雨试验于 2019 年 7—9 月进行。每场降雨降雨量为 30 mm, 根据当地降雨特征及相关研究^[17], 共设置 5 个雨强, 分别为 30, 60, 90, 120, 150 mm/h, 共计 20 场模拟降雨。为消除土壤前期含水量的影响, 每场降雨前, 先对小区进行预湿润, 即用 5 mm/h 的雨强持续降雨 30 min; 然后, 覆盖防水布静置 12 h 后, 再进行正式试验。试验开始后, 开始产流时记录产流时间, 每隔 3 min 接取 1 个径流泥沙样, 直到 1 000 mL 取样瓶接满为止, 并记下取样的起止时间。试验过程中, 在小区不同坡位处放置多个雨量筒, 以统计每场降雨的实际降雨强度。降雨结束后, 量取集流桶水深, 并取浑水样装入取样瓶, 以计算径流量。为避免降雨后小区微地形的变化对下次降雨产生影响, 每场降雨后搁置小区, 使水分充分下渗, 在自然状态下风干, 取附近农地土回填, 恢复原状, 为下一场降雨试验做好准备。

2 结果与分析

2.1 不同块石出露程度下坡面土壤入渗特征

土壤的入渗性能常用入渗量和入渗速率表示。从图 2 可以看出, 块石裸露率越大, 对坡面入渗量和平均入渗速率影响越大。块石裸露率为 5.4% 的小区入渗量和平均入渗率与对照小区相比无明显差别, 块石裸露率为 13.1% 的小区入渗量和平均入渗率与对照小区相比均有所减少, 与此相反, 块石裸露率为 42.9% 的小区入渗量和平均入渗率与对照小区相比均大幅度增加。这种变化在雨强为 30 mm/h 时表现不明显, 随着降雨强度的增大, 这种变化趋势逐渐

明显,变化的幅度也越大。总体而言,除雨强为 30 mm/h 的降雨外,在其余较大雨强下,入渗量和平均入渗速率均在块石裸露率为 13.1% 时达到最小值,在块石裸露率为 42.9% 时达到最大值。在雨强一定时,入渗量随块石裸露率变化和平均入渗速率随块石裸露率变化的趋势相似。其原因可能是当块石裸露率为 5.3% 时,相较于大面积的裸露土壤,块石的存在不足以对土壤的入渗性能产生较大影响。当块石裸露率增加到 13.1% 时,坡面地表的不透水面积虽然有所增加,对径流产生了一定的阻碍作用,有促进入渗的作用,但根据现场实地观察,块石裸露率为 13.1% 的小区降雨时沿着块石的走向产生大量的细沟,促进了水流在坡面上的汇流作用,导致径流流速增大,入渗量和入

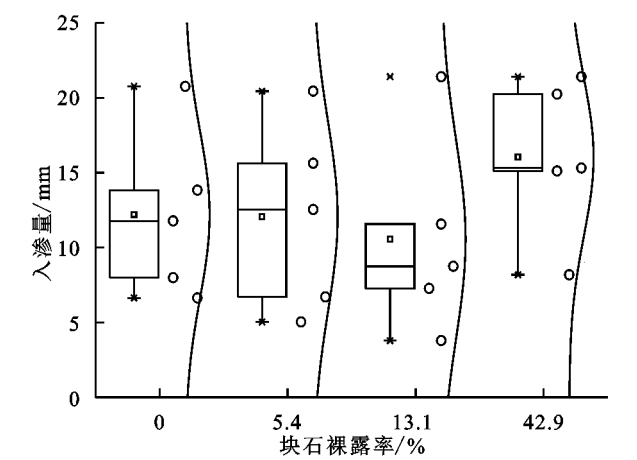
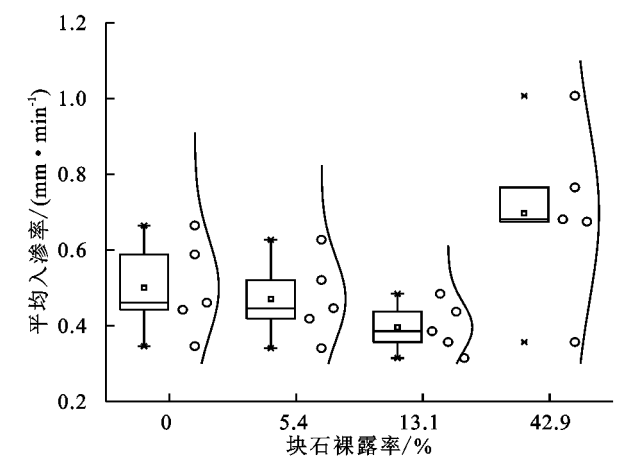


图 2 块石裸露率大小对入渗量和入渗速率的影响

从图 3 可以看出,降雨前期入渗量和前期的入渗速率随块石裸露率的变化与总入渗量和平均入渗速率随块石裸露率变化趋势类似。不同之处在于前期入渗量和前期入渗速率的变化幅度更大。有研究^[18]发现,喀斯特地区产流以蓄满产流为主,因此本研究在每场降雨开始之前进行了预湿润处理,使土壤水分接近饱和状态,以消除前期土壤含水量不同造成的差异。尽管只研究降雨前期的入渗量和入渗速率,结果与总体的趋势变化无较大差异。与总体情况相比,前期入渗最明显的区别就是块石的存在均使得前期的入渗量和入渗速率增加,特别是块石裸露率为 5.4% 的情况下,前期的入渗量和入渗速率达到最大值。究其原因可能是在降雨的前期,还未达到稳定入渗状态,是整场降雨过程中入渗速度最快的一段时期,块石的存在增加了土壤中大孔隙的数量,直接导致有块石出露的坡面前期入渗速率均高于裸坡;而且在降雨的前期,此时细沟还未发育或发育程度还不高,块石促进产流减少入渗的作用表现不明显,在这个阶段块石拦截径流延缓入渗的作用更多一些,因此直接导致有块石出露的坡面前期入渗量和入渗速率均高于裸坡。

渗速率反而减小。当块石裸露率增加到 42.9% 时,坡面地表有大面积块石出露,块石出露地表的部分能够有效拦截径流,块石隐藏地下的部分增加了土壤中大孔隙的数量,且增加了其弯曲度,从而增加了入渗时间,起到了延缓入渗的作用。现场观察也发现,在块石裸露率为 13.1% 时,坡面产生细沟的时间最早、数量最多且细沟最深最宽,而且细沟的位置多分布在块石的两侧,走向与块石走向一致;而在块石裸露率为 42.9% 的小区,由于块石交错分布,产生细沟的数量反而没有块石裸露率为 13.1% 的小区多。因此在块石裸露率足够高的条件下,对径流的拦截、消能、径流减速作用更明显,导致块石裸露率最高的时候入渗量和平均入渗速率最大。



2.2 不同雨强下坡面土壤入渗特征

由图 4 可知,随着雨强的增大,坡面入渗量呈明显下降趋势。但当雨强为 120,150 mm/h 时,总入渗量的差别不大,平均入渗速率整体呈现先增大后减小随后又增大的趋势。其原因可能是随着雨强增大,相同降雨量下的入渗时间缩短;而且高强度降雨发生时,土壤表面受雨滴打击形成结皮的时间越早,沟蚀现象越严重,限制入渗过程。因而,雨强越大总的入渗量越少。但当雨强达到 150 mm/h 时,较大的雨滴动能和径流冲刷又可能破坏地表结皮,从而在一定程度上促进入渗,表现出来的结果就是雨强为 120,150 mm/h 时入渗量反而差别较小。随着雨强的增大,雨滴对地表水分施加的压力越大,又会加速入渗过程。但当雨强达到 120 mm/h 时,雨滴击溅产生的地表结皮阻碍入渗,而且很早就有细沟出现,导致入渗速率变缓,从而在该雨强处出现拐点。总体而言,在雨强为 30 mm/h 时入渗量达到最大值,平均入渗速率达到最小值,这是因为雨强为 30 mm/h 时雨滴对地面的打击能力最小,入渗速率较为缓慢,但此时降雨历时最长,且在降雨的过程中不易出现土壤结皮,因而入渗量最大。

为了消除细沟汇流对坡面侵蚀的影响,比较了不

同雨强下降雨初期阶段的入渗过程,即最初 10 mm 降雨阶段的入渗量和平均入渗速率。由图 5 可知,随着雨强的增加,前期入渗量呈先减少后增加的波动性变化,前期入渗率则随着雨强增大而逐渐增加。当雨强 $<90\text{ mm/h}$ 时,前期入渗变化的趋势变化与总的变化趋势一致;当雨强 $>90\text{ mm/h}$ 时,前期阶段入渗与总体入渗趋势有所不同。究其原因:在较大雨强的情况下,雨滴打击地表的能力相应较大,因而对地表

水分的挤压力较大,促进了入渗,显示出来的结果就是入渗量增加且入渗速率增大,一方面在降雨的前期,细沟还未发育或发育程度不高,因而沟蚀对入渗的限制影响此时还不明显;另一方面,在较大雨强的作用下虽然更易形成土壤结皮,但是土壤结皮形成又不断被破坏,在较短的时间内,表现出来促进入渗的作用更明显。因此,入渗在雨强为 120,150 mm/h 处出现降雨前期和降雨全过程不一致现象。

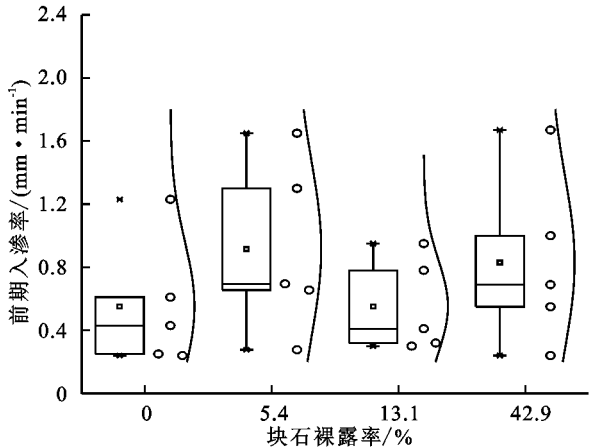
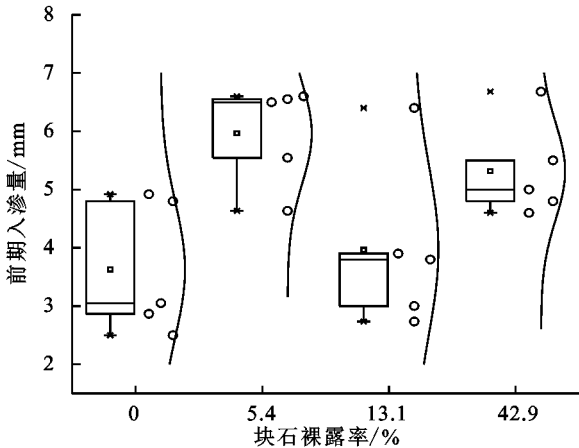


图3 块石裸露率大小对前期入渗量和入渗速率的影响

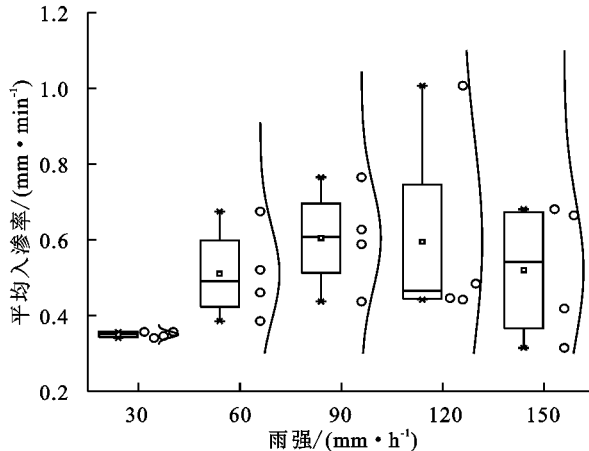
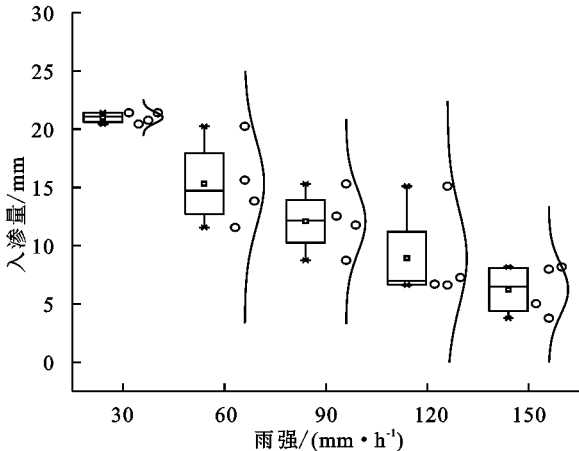


图4 雨强大小对入渗量和入渗速率的影响

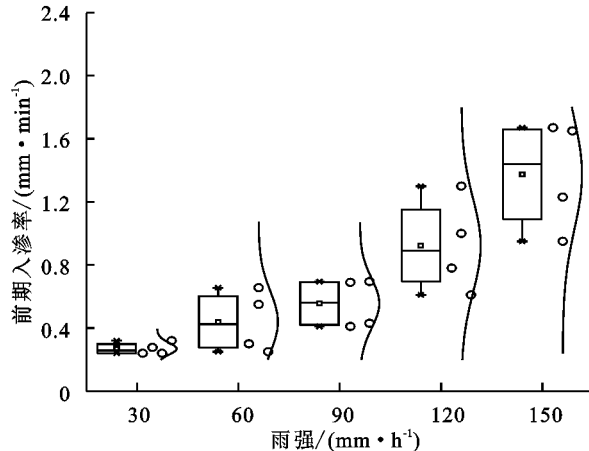
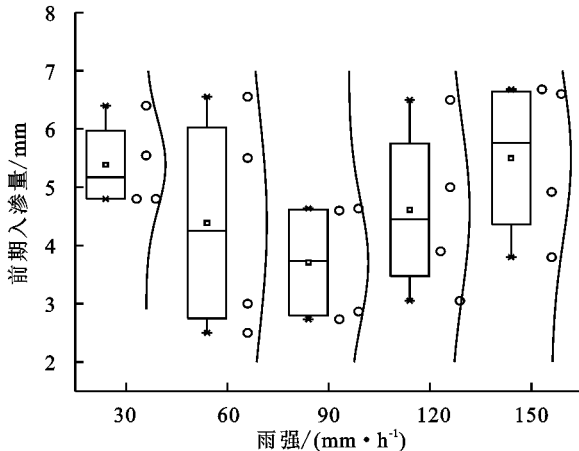


图5 雨强大小对前期入渗量和入渗速率的影响

2.3 入渗速率的模型拟合与评价

为了进一步研究块石出露程度和雨强大小对入

渗过程的影响,运用 Kostikov 公式^[19]和方正三公式^[20]对实测入渗速率与时间的关系进行模拟,结果

见表 1。2 个公式分别为：

$$f(t)=at^{-b} \tag{1}$$

式中： $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min)； t 为入渗时间 (min)； a 、 b 为由试验拟合出来的参数。

$$k_t=k+k_1/t^a \tag{2}$$

式中： t 为入渗速率 (mm/min)； t 为入渗时间 (min)； k 、 k_1 、 a 分别为与土壤质地、含水率以及与降雨强度有关的参数。

采用 Kostiakov 公式拟合的结果可知, α 为0.367~1.803, a 值反映了初始入渗速率, a 值越大初始入渗速率越高,结合图 5 中前期入渗速率随雨强的变化可以看出, a 值的变化大致符合实际情况。 b 为0.149~

0.636, b 值反映了入渗速率递减的快慢, b 值越大,入渗速率递减越快。采用 Kostiakov 公式拟合的相关系数 r^2 为 0.117~0.939,拟合效果不佳,但在雨强为 30 mm/h 时拟合效果较好。采用方正三公式拟合的结果可以看出,方正三公式拟合的相关系数 R^2 为 0.605~0.985,拟合效果较好。最终拟合结果与李春茂等^[14]在裸石地上得到的结果相似,而与吴冰等^[6]得到的结果不同。究其原因可能是因为本研究的研究对象是直径较大且形状不规则的块石,块石在坡面上的分布也没有任何规律,入渗的过程较复杂,因而公式的拟合精度不高。结果证明,在此条件下,方正三公式的拟合效果比 Kostiakov 公式的拟合效果更好。

表 1 土壤入渗速率的模型拟合

块石裸 露率/%	雨强/ (mm·h ⁻¹)	Kostiakov 公式			方正三公式			
		a	b	r^2	k	k_1	α	R^2
0	30	0.367	0.322	0.939	0.074	1.277	0.573	0.923
	60	0.419	0.428	0.457	0.158	1.911	3.380	0.770
	90	0.574	0.499	0.431	0.173	1.439	2.277	0.952
	120	0.722	0.473	0.353	0.294	1.642	5.312	0.952
	150	1.503	0.599	0.607	0.177	1.724	0.862	0.915
5.4	30	0.543	0.351	0.889	0.112	0.625	0.735	0.954
	60	0.943	0.296	0.817	0.081	0.900	0.357	0.893
	90	0.857	0.306	0.391	0.369	0.671	2.498	0.920
	120	1.324	0.425	0.323	0.126	1.297	0.587	0.605
	150	1.535	0.387	0.594	0.337	1.242	0.562	0.761
13.1	30	0.875	0.440	0.850	0.049	1.066	0.588	0.877
	60	0.484	0.434	0.543	0.138	1.718	2.205	0.973
	90	0.631	0.636	0.425	0.157	1.668	2.769	0.946
	120	0.913	0.379	0.407	0.431	2.384	7.341	0.777
	150	1.165	0.600	0.392	0.392	1.558	2.499	0.907
42.9	30	0.556	0.489	0.870	0.058	0.770	0.847	0.983
	60	0.810	0.339	0.688	0.273	0.914	1.147	0.936
	90	0.726	0.149	0.117	0.500	2.202	5.618	0.954
	120	1.073	0.248	0.295	0.627	1.299	3.717	0.901
	150	1.803	0.314	0.620	0.928	2.647	2.723	0.985

3 结 论

(1)在雨强及降雨量一定的情况下,入渗量随块石裸露率变化与平均入渗速率随块石裸露率变化的趋势相似。在雨强为 30 mm/h 时块石裸露率的大小对坡面入渗无明显影响,在其余较大雨强下,块石裸露率为 5.4%时对入渗影响较小,块石裸露率为 13.1%时抑制入渗,块石裸露率为 42.9%时促进入渗。在降雨前期,块石的存在可起到促进入渗的作用。

(2)在块石裸露率及降雨量一定的情况下,随着雨强的增大,坡面的入渗量呈明显下降趋势,而平均入渗速率整体呈现先增大后减小随后又增大的趋势,拐点出现在雨强为 90 mm/h。在降雨前期,由于地

表结皮和细沟未发育完全,对入渗的影响略有不同。随着雨强的增加,前期入渗量呈先减少后增加的波动性变化,前期入渗率随着雨强的增大而逐渐增加,拐点同样出现在雨强为 90 mm/h。

(3)本研究对 4 种块石裸露率和 5 种雨强下的入渗速率和时间的关系进行模拟后发现,方正三公式在有块石出露坡面上的拟合效果较 Kostiakov 公式更好。

参考文献：

[1] 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.
[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.

[3] 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.

[4] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. Earth Surface Processes Landforms,1990,15:653-671.

[5] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013,27(5):12-16.

[6] 吴冰,朱元骏,邵明安.降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):87-91.

[7] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.

[8] 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.

[9] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.

[10] 方胜,彭韬,王世杰,等.喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J].地球与环境,2014,42(1):1-10.

[11] 王明刚,李森,金昌宁.粤北石漠化地区坡地入渗产流规律试验研究[J].水土保持研究,2011,18(6):57-61.

[12] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.

[13] 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.

[14] 李春茂,徐勤学,吴攀,等.不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J].水土保持研究,2019,26(1):47-52,60.

[15] 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.

[16] 谢云,林小鹏,刘英娜,等.槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J].水土保持通报,2008,28(4):1-6.

[17] 任青青,严友进,甘艺贤,等.短历时强降雨对典型喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):105-112.

[18] 张志才,陈喜,程勤波,等.喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析:以陈旗小流域为例[J].地球与环境,2011,39(1):19-25.

[19] Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J].Soil Science,1932,97(1):17-21.

[20] 方正三.黄河中游黄土高原梯田的调查研究[M].北京:科学出版社,1958:53-59.

(上接第 117 页)

[27] 周萍,刘国彬,侯喜禄,等.黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J].水土保持学报,2008,22(1):7-12.

[28] 赵跃中,杨柳悦,穆兴民,等.黄土中渗流水潜蚀特征研究[J].灌溉排水学报,2015,34(10):37-39.

[29] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1981,1(3):1-9.

[30] 李斌兵,郑粉莉,张鹏.黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J].水土保持通报,2008,28(5):16-20.

[31] Wilson G V, Cullum R F, Romkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe[J].Catena,2008,73(1):98-106.

[32] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):103-108.

[33] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.

[34] 许建民.黄土高原浅沟发育主要影响因素及其防治措施研究[J].水土保持学报,2008,22(4):41-43.

[35] Bocco G. Gully erosion: Processes and models[J].Progress in Physical Geography,1991,15(4):392-406.

[36] 金珊,贾玉华,郭成久,等.陕北黄土区切沟内陷穴发育特征研究[J].土壤通报,2017,48(4):948-954.

[37] Bernatek-Jakiel A, Poesen J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs[J].Earth-Science Reviews,2018,185:1107-1128.

[38] Soufi M.澳大利亚一个林地环境下的切沟发展过程和侵蚀趋势研究[J].中国水土保持,2002(7):26-27.

[39] 王小平,贾志军,朱同新.黄土丘陵沟壑区洞穴侵蚀过程及其规律研究[J].中国水土保持,2005(6):23-24.

[40] 张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.