

不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟

李春茂^{1,2}, 徐勤学^{1,2}, 吴攀^{1,2}, 韦蔚来¹

(1. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,

广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:喀斯特峰丛坡地的水土过程基础研究相对短缺,阻碍了相关土壤水文机理认识和适合该区模型的构建。为探明峰丛坡地上土壤入渗性能及变化过程,提出适合峰丛坡地的土壤入渗模型,通过室内一维垂直入渗试验,研究了峰丛坡地上不同土地利用方式土壤的初渗率、稳渗率及平均入渗率,并利用 Horton, Philip, Kostiaikov 及经验通用模型拟合其入渗过程并进行评价。结果表明:(1) 峰丛坡地上灌木林地的土壤砂粒含量约占 50% 以上,土壤渗透性能较强,而梯田旱地黏粒含量较高、有机质含量低,土壤渗透性能较差。(2) 不同土地利用土壤前期入渗率均较高,为 1.33~3.17 cm/min,随后入渗速率急剧下降 82.2%~96.2%,在 20 min 左右达到稳定入渗率。灌木林地的前期入渗率下降幅度最大,而裸石地和梯田旱地相对缓慢。(3) Horton 模型适宜于描述喀斯特峰丛坡地的土壤入渗过程,而 Kostiaikov 和 Philip 模型的拟合值与实测值存在差距。本研究为进一步认识峰丛坡地土壤水分入渗机理及构建入渗模型提供了理论依据。

关键词:入渗; 土地利用; 入渗特征; 模型拟合; 峰丛坡地

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0047-06

Simulation Analysis on Soil Infiltration Under Different Land Use in Karst Hillsides

LI Chunmao^{1,2}, XU Qinxue^{1,2}, WU Pan^{1,2}, WEI Weilai¹

(1. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The basic research on water and soil processes in the karst peaks hillsides is relatively short, which hinders the understanding of relevant soil hydrological mechanisms and the construction of suitable models. In order to determine the soil infiltration performance and the process of variation on the karst hillsides, and to evaluate the fitting of several common infiltration models on infiltration process, the soil infiltration process and performance under different land use patterns on the karst hillsides were explored by one-dimensional vertical infiltration experiment, and evaluated by different infiltration models such as Horton, Philip, Kostiaikov and others. The results showed that: (1) the sand contents were more than 50% in shrub woodlands, thus exhibited higher soil permeability than the other land use patterns; while terraced fields had higher clay content and lower organic matter content, and soil permeability was poorer in these fields; (2) the early infiltration rates of different land uses were higher, and ranged between 1.33 cm/min and 3.17 cm/min, then the infiltration rate decreased by the range from 82.2% to 96.2%, and reached to the steady infiltration rate in about 20 min; in particular, the decline rate of pre-infiltration rate of shrub woodland was the most significant, while that of bare rock gravel and terrace was relatively slow; (3) the Horton model was more suitable for describing soil infiltration process in karst hillsides, and the simulated initial infiltration rate and steady infiltration rate were close to the measured values, while the values fitted by the Kostiaikov and Philip models were not very close to the measured values. The research provides the theoretical basis for further study of soil moisture movement and establish the infiltration model in karst hillsides.

Keywords: one-dimensional vertical infiltration; land use; infiltration characteristics; simulation fitting; Karst hill-slopes

土壤水分入渗是水分通过全部或部分地表向下流动进入土壤、在土壤中运动和存储,形成土壤水的过程,是“四水”转化的中心环节,与地表产流、土壤侵蚀、降雨后土壤水分再分配等问题密切相关^[1-2]。对土壤水分入渗的研究不仅有助于促进非饱和带水分入渗和迁移基础理论研究的发展,也可为综合评价地表、地下水资源,合理确定农田灌溉技术参数提供科学依据。

峰丛坡地是我国西南喀斯特地区的典型地貌。该区由于生境异质性强、人地矛盾紧张,农业经济效益等相对落后,坡地在开展退耕还林还草等生态恢复工程的同时需要合理兼顾农业开发利用。在此背景下,村民对坡面进行开垦、改造,长期以来形成了集合多种土地利用的峰丛坡地景观格局,原有生境条件下的土壤性质会随之变化,势必对坡面土壤入渗产生重要影响^[3]。土壤水分入渗有很多影响因素,不同土地利用方式下土壤入渗能力有显著差异,但形成这些差异的本质原因是土壤本身性状或地表结皮情况^[4]。目前喀斯特地区土壤入渗研究主要集中在不同土地利用及不同植被类型对土壤入渗影响等方面^[5-7],但对峰丛坡地上不同土地利用的入渗研究相对不足。另外,随着土壤入渗数值模型及其参数研究的发展,选择合适的入渗模型已成为研究入渗过程的重要手段^[8]。较多学者通过对土壤入渗特性进行无压积水试验,提出了具有不同特点和用途的入渗模型,其中 Kostiaikov 模型^[9]、Horton 模型^[10]、Philip 模型^[11]、Green-Ampt 模型^[12]等在田间和室内入渗试验中均得到很好的验证和广泛应用。Kostiaikov 模型的参数没有明确的物理意义,但因其形式简单、计算方便而被广泛应用;Horton 模型作为经验模型,其描述长历时入渗特征精度较高,在实践中有很强的实用性;Philip 和 Green-Ampt 模型有明确的物理意义,其参数均与土壤物理特征有紧密关系。

因此,为探究喀斯特峰丛坡地上不同土地利用方式土壤水分入渗差异,提出适宜于描述峰丛坡地土壤水分入渗的公式模型,本文以喀斯特峰丛坡地为对象,对比分析峰丛坡地上不同土地利用方式的土壤入渗过程,并选择 Horton、Philip、Kostiaikov 及经验通用模型对入渗过程进行拟合和评价,为进一步研究峰丛坡地不同土地利用的土壤入渗及其模型拟合提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于广西桂林灵川县枇杷塘村(25°17′32″N, 110°33′42″E),属典型的喀斯特峰丛坡地地貌。研究

区海拔在 300~400 m,多年平均气温为 18.7℃,多年平均降雨量为 1 785 mm,雨季一般在 4—9 月份。土壤属于黑色石灰土或棕色石灰土,一般呈微酸性到微碱性,土层薄、岩石碎屑多,细土物质黏粒含量高。峰丛洼地坡面中下部较缓地带在多年前开展梯田建设,梯田上无植被覆盖且一般靠人为灌溉种植旱生农作物,形成了梯田旱地的土地类型;中部的灌丛林地被人为开垦后经过多年石漠化转变成裸岩石砾地(简称“裸石地”),大量裸露岩石将坡面土壤分为“石隙土”和“石土”等形式的土壤斑块;同时保留上部的原生灌木林地(图 1),原有自然坡面受到较大扰动,且形成了不同人为扰动程度的土地类型。各土地利用方式的分类及土壤性质如表 1。该类型坡面在喀斯特地区数量较多,具有较强的代表性。

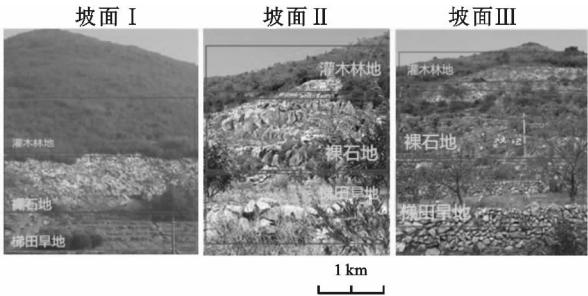


图 1 试验区及试验概况

表 1 土壤基本理化性质

坡面	土地利用 方式	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	机械组成/%		
				砂粒	粉粒	黏粒
I	梯田旱地	1.35	27.48	36.73	29.70	33.57
	裸石地	1.08	33.38	47.27	33.40	19.33
	灌木林地	0.97	34.72	51.30	32.30	16.40
	梯田旱地	1.41	27.36	37.60	26.80	35.60
II	裸石地	1.29	30.20	46.35	34.75	19.40
	灌木林地	0.94	33.33	65.10	23.70	11.20
	梯田旱地	1.44	24.55	45.60	22.70	31.70
III	裸石地	1.28	30.42	53.70	29.75	16.55
	灌木林地	1.13	32.13	54.70	27.10	18.20

注:机械组成粒径划分标准采用国际制;梯田旱地和裸石地均无植被覆盖,灌木林地植被类型为竹类。

1.2 试验方法

试验土壤于 2017 年 4 月 25 日采自研究区三组类似坡面,并在每种土地利用类型上取 2~3 组平行。去除表面的杂物后在 0—30 cm 土层取土,样土取回后于室内充分风干、碾磨过 2 mm 筛,等待装入土柱。同时在附近深度 15 cm 左右处取环刀样和散土样。环刀样于室内及时用于测定容重,散土样自然风干后及时用于测定土壤机械组成(比重计法)和有机质(低温外热重铬酸钾氧化—比色法)^[13]。

土柱入渗试验采用室内一维定水头垂直入渗的试验方法。土柱采用内径 19 cm、高 50 cm 的有机玻璃圆

柱,试验前将土壤按原位容重进行质量计算,取足量碾磨土分层(约 50 mm)装填入有机玻璃管圆柱中,为防止土柱底部流失和表层土壤受到强烈冲击,在土柱底部和表面垫放一层滤纸。马氏瓶内径 13 cm、高 50 cm 的有机玻璃圆柱,瓶身上贴刻度尺,精确到毫米,使马氏瓶底端在高于土层表面 3 cm 处供水从而保持恒定水头供水。为尽量减少温度影响,试验进行时室内温度控制在为 21℃左右。入渗过程中记录马氏瓶中的水面高度以计算初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率。前 10 min 每 1 min 记录一次数据,10—20 min 每 2 min 记录一次,20 min 后每 10 min 记录一次。

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0,Origin 8.0 软件对数据进行处理,SPSS 用于进行相关性分析,Origin 8.0 用于入渗模型拟合。4 种常见土壤水分入渗模型^[14]如下:

(1) kostiakov 模型

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

式中: $f(t)$ 为入渗速率 (cm/min); t 为入渗历时 (min); β 和 α 为经验参数。

(2) Philip 模型

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

式中: S 为吸渗率 (cm/min^{0.5}); A 为试验所得的参数。

(3) Horton 模型

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

式中: f_0 , f_c , k 为试验所得的参数。

(4) 通用经验公式

$$f(t)=a+bt^{-n}$$

式中: a , b , n 为试验所得的参数。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下坡面土壤入渗特征

不同土地利用方式的入渗特征见表 2。方差分析显示,不同土地利用方式间的入渗率差异显著,裸石地和灌木林地的初始入渗率显著高于梯田旱地,表现为灌木林地和裸石地的初始入渗率分别是梯田旱地的 2.01 倍和 1.86 倍,而灌木林地与裸石地的初始入渗率之间差异显著但并不规律。稳定入渗率是定量描述土壤渗透能力的综合指标^[15],表现为灌木林地的稳定入渗率最大,而裸石地与梯田旱地的稳定入渗率较小且基本接近,取平均值后其大小排序表现为灌木林地>梯田旱地>裸石地。平均入渗率能较好表征土壤的渗透性能^[16],灌木林地和裸石地的平均入渗率一般显著高于梯田旱地,取平均值后其大小排序表现为灌木林地>裸石地>梯田旱地。

这与喀斯特地区类似的研究结果一致,覆盖程度

高的灌木林地土壤入渗能力显著强于无植被覆盖的荒地和裸地^[17-18]。因为土地利用方式发生变化后,其土壤物化性质会随之发生变化,势必对土壤入渗性能产生重要影响,不同土地利用方式可以通过植被覆盖度、土壤有机质、土壤容重及孔隙度等因素间接或直接地影响土壤入渗性能^[19-20]。本文中的灌木林地因为地下土体构型为腐殖质层—母质层,土壤直接与母岩接触,因此土壤中砂粒含量较高。当砂粒含量较高时,土壤之间孔隙度较大、容重较小,从而导致入渗能力提高。李卓等研究^[21]指出,入渗能力随土壤黏粒含量增加递减,随砂粒含量增加递增。由于灌木林地土壤中砂粒含量较高,加之地表植被长期覆盖、土壤结构稳定,所以土壤通透性能良好。而梯田旱地的土壤颗粒细化(表 1),在常年有翻耕、过度利用等人为活动的影响下土壤团聚体下降,在遇水时易形成结皮阻碍水分运动。而裸石地是由灌木林地开荒而来,植被开垦后土壤性质处于变化阶段,其涵养水源的能力也有所下降,处于灌木林地和梯田旱地之间。

在不同坡面来看,同一土地利用方式的入渗性能也存在明显差异。3 个坡面的梯田旱地入渗特征相对接近,而裸石地的初始入渗率和灌木林地的稳定入渗率却存在显著差异,这说明了峰丛坡地不同坡面间有较高的异质性。在后期的试验开展中应对更多的坡面进行调查研究以得到更准确的结果。

表 2 各土地利用方式土壤入渗特征

坡面	土地利用方式	初始入渗率/ (cm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (cm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (cm·min ⁻¹)
I	梯田旱地	1.33a	0.19b	0.41a
	裸石地	2.27b	0.10a	0.74b
	灌木林地	2.30b	0.41c	0.98c
II	梯田旱地	1.67a	0.14ab	0.57ab
	裸石地	3.11c	0.13ab	0.72b
	灌木林地	2.10b	0.08a	0.67b
III	梯田旱地	1.77a	0.12a	0.55ab
	裸石地	1.63a	0.11a	0.52ab
	灌木林地	3.17c	0.16b	0.85c

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

2.2 不同土地利用方式下坡面土壤入渗动态过程

不同土地利用方式的入渗过程曲线(图 2)表明:灌木林地、裸石地和梯田旱地入渗过程的前期入渗率在 1.33~3.17 cm/min 之间,随入渗历时的延长,入渗速率急剧下降为 82.2%~96.2%,基本在 20 min 左右达到稳定入渗率后保持不变,这与类似研究的现象^[22-23]基本一致。这是因为在一维垂直入渗土柱中,入渗前期由于水头施加于土壤表面后的短时间内,表土含水量很快由初始值增大到某一接近饱和含水量

的值,此时地表处土壤水分向下运动的驱动力有基质势梯度、重力式梯度,基质势梯度的绝对值此时较大起主导作用,入渗速率亦较高。随着土壤水分入渗的进行,湿润锋不断下移,地表处的基质势梯度绝对值逐渐减小,地表水分入渗速率不断下降。当入渗历时达到足够大时,基质势梯度接近零,重力式梯度成为主要驱动力,此时入渗速率趋于平衡^[24]。

其中灌木林地的前期入渗率下降最为剧烈,而裸石地和梯田旱地相对缓慢,尤其是梯田旱地的前期入渗率下降速率明显较慢。可以看出,灌木林地能使土壤渗透性能得到明显改善,在大量降雨后延缓了发生地表径流的时间,降低了土壤侵蚀发生的可能性。相反梯田旱地较差的入渗性能会导致较多的水分在入渗前被蒸发,从而降低了土地的生态效益。

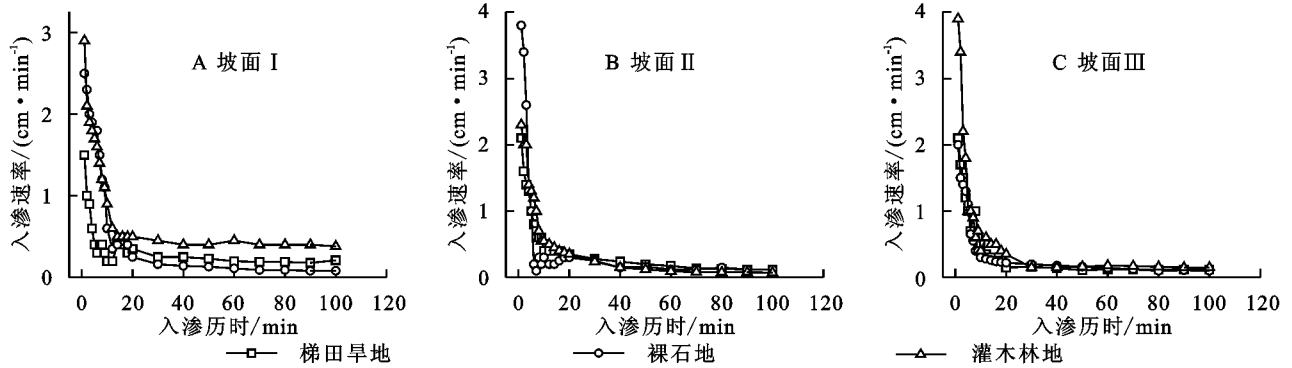


图 2 不同土地利用方式的土壤入渗过程

2.3 入渗速率的模型拟合与评价

对入渗试验数据进行拟合后的参数值见表 3。Philip 模型中参数 S 反映的是不同土地利用间土壤容重、土壤质地等差别,参数 A 反映的是稳定入渗率。可以看出 Philip 模型中 S 参数与土壤性质并无明显的关系,且参数 A 中存在负值,无法表示稳定入渗率,且 Philip 模型的拟合精度较低,因此其无法较好反映实际入渗过程。通用经验模型中的参数较 Kostiakov 和 Philip 模型多,其中参数 n 相当于入渗速率的下降速率,也就是裸石地较大、灌木林地较小,这与实际入渗情况不一致,但经验通用模型的拟合精度相对较高,说明其对该区域入渗过程的拟合具有一定局限性。Horton 模型中的参数 f_c 变化于 0.073~0.386,与表 1 中稳定入渗率 0.08~0.41 cm/min 区间基本接近,说明 f_c 能较好代表稳定入渗率;参数 f_0 变化于 1.560~3.828,与实测的初始入渗率也较接近,说明 f_0 能较好代表初始入渗率。可以看出 Horton 模型能较好地描述土壤入渗速率随时间的变化关系。Kostiakov 模型参数 β 变化于 1.222~5.120,参数 α 变化于 0.454~1.004, α 值越大入渗速率随时间递减越快。参数 α 值的变化表明,裸石地和灌木林地的前期入渗率下降最明显,而梯田旱地的入渗率下降最慢,这与实际入渗的部分特征基本相符,但 Kostiakov 模型无法较好反映稳定入渗后的过程。

这是由于 Kostiakov 模型是假设起始时的入渗速率是无穷大,当时间无限增大时,入渗速率将趋近于零。但在土柱模拟试验中,水分在重力势的作用下垂直入渗,最终的入渗速率不可能为零,而是会接

近于某一稳定入渗率并保持稳定^[25],这更符合土壤水分垂直入渗的情况。因此 Horton 模型和通用经验方程在 Kostiakov 模型的基础上增加了常数项以反映无限长时在重力作用下达到了稳定入渗,这正好解释了其参数与稳定入渗率几乎相等的结果。刘霞等^[26]指出 Horton 模型和经验通用公式能较好反映各种土壤的积水入渗过程,而 Philip 模型对入渗的拟合效果较差,这与 Philip 模型中指数 t 为固定常数而难以适应各种土壤在不同前期含水量条件下的入渗曲线有关。这与本研究的结果基本相似。而刘洁等^[27]对于干热河谷流域入渗规律研究后指出经验通用模型的拟合精度最高,Horton 模型最差,产生与本文结果不同的原因在于测定入渗过程方法的不同。与环刀法相比,本文的入渗过程在土柱中进行,土壤水分的入渗路径和历时较长,且当入渗历时足够大时,土柱仅有重力势梯度,入渗过程有明显的稳定入渗阶段,而 Horton 模型能较好地描述长时间、阶段变化明显的入渗过程^[28]。王佩将等^[7]在喀斯特地区采用渗透筒法测定土壤入渗过程,结果表明 Horton 模型的拟合效果最好,与本文结果相同,也进一步说明 Horton 模型较适宜于描述喀斯特地区土壤入渗过程。

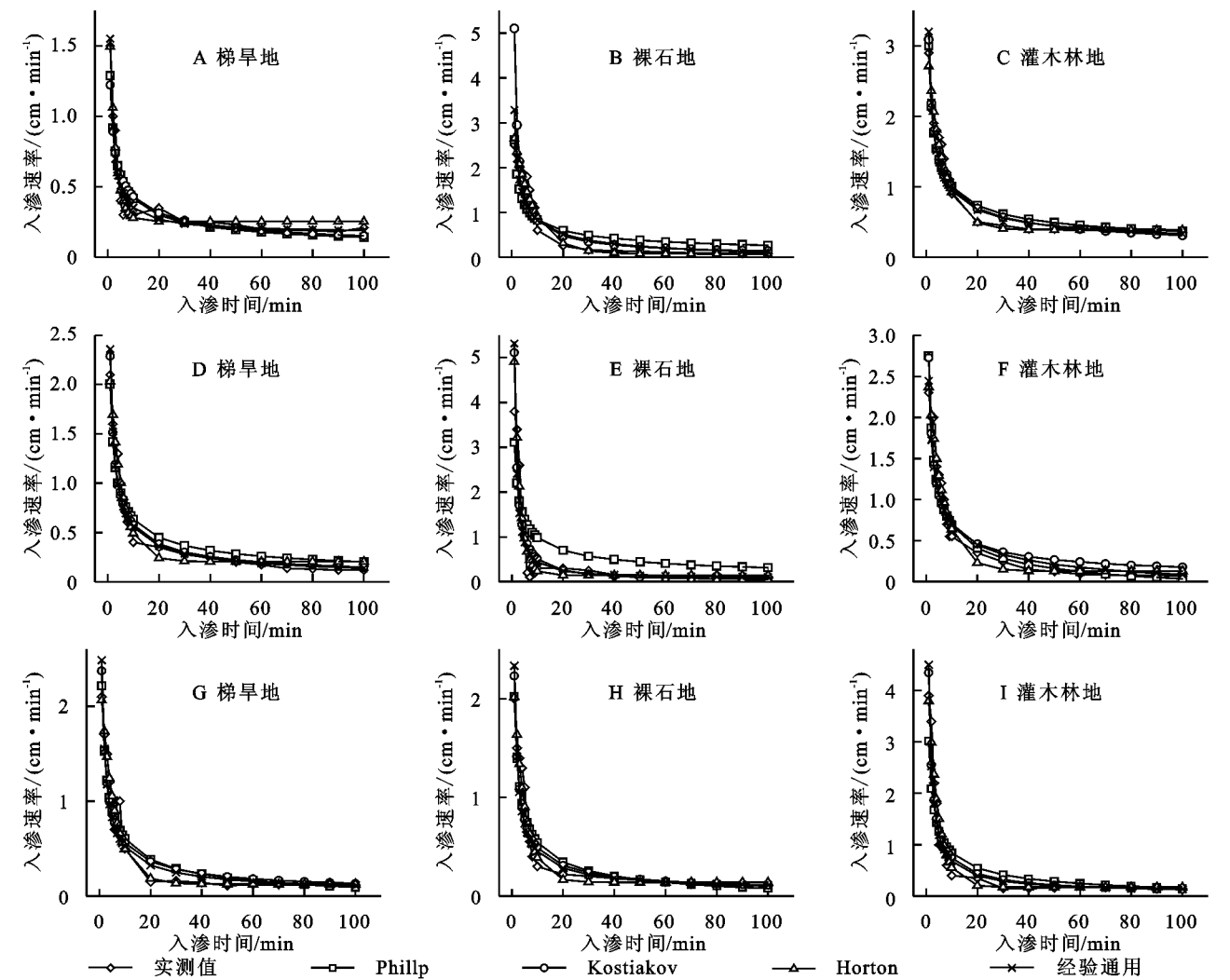
为评价上述 4 种入渗公式与实测值之间的拟合程度,将拟合值与实测值绘成曲线于图 3 进行比较。在不同入渗时期拟合值与实测值的变化程度不同,因此大致将土壤入渗过程分为 3 个阶段进行比对,分别为入渗剧变期(0—10 min)、入渗渐变期(10—60 min)以及入渗稳定期(60 min 以后)。

表 3 4 种入渗模型参数拟合结果

坡面	土地 利用	Kostiakov			Philip			Horton				通用经验公式			
		β	α	R	S	A	R	f_c	f_0-f_c	k	R	a	b	n	R
I	梯田旱地	1.222	0.454	0.844	2.548	0.014	0.868	0.253	1.307	0.429	0.939	0.165	1.382	0.872	0.922
	裸石地	5.106	0.794	0.451	7.029	0.003	0.827	0.073	2.927	0.126	0.963	-0.170	3.454	0.835	0.846
	灌木林地	3.089	0.499	0.925	0.580	0.077	0.922	0.386	2.737	0.163	0.973	0.106	3.093	0.568	0.918
II	梯田旱地	2.287	0.595	0.957	4.004	0.002	0.937	0.206	2.248	0.206	0.981	0.014	2.346	0.636	0.933
	裸石地	5.120	1.004	0.904	6.220	0.001	0.655	0.140	2.395	0.439	0.973	0.082	5.232	1.171	0.891
	灌木林地	2.726	0.594	0.896	6.037	-0.268	0.927	0.129	2.640	0.164	0.978	-0.257	2.702	0.448	0.916
III	梯田旱地	2.375	0.627	0.933	4.716	-0.142	0.945	0.126	2.331	0.184	0.969	0.002	2.484	0.680	0.927
	裸石地	2.231	0.658	0.904	4.327	-0.140	0.907	0.139	2.347	0.224	0.972	0.031	2.303	0.737	0.894
	灌木林地	4.345	0.769	0.934	6.368	-0.167	0.847	0.172	3.656	0.250	0.966	0.036	4.464	0.841	0.928

把拟合程度分为好(++)、较好(+)、差(-)3个等级来区分^[14],评价结果(表 4)表明:在入渗剧变期,Horton 模型及最佳,通用经验公式和 Philip 模型次之,而 Kostiakov 模型的拟合程度最差;而在入渗渐变期和入渗稳定期,Horton 模型较好,通用经验公式及 Kostiakov 模型次之,而 Philip 模型较差。另外比较不同入渗模型的 R^2 可知,Horton 模型的拟合相关系数在 0.939~0.981,Kostiakov 模型在 0.451~

0.957,Philip 模型在 0.655~0.945,通用经验模型在 0.846~0.933。因此 Horton 模型对实际入渗过程拟合较好,通用经验公式次之,而 Kostiakov,Philip 模型与实测值相当,这与王佩将等^[7]的研究结果一致,表明 Horton 模型比较适宜描述喀斯特地区的土壤入渗过程,但与刘丽红等^[5]在岩溶槽谷区提出 Kostiakov 模型对不同土地利用土壤水分拟合度较好的结果不同,分析原因是由于研究入渗过程的方法不同。



注:A—C为坡面 I,D—F为坡面 II,G—I为坡面 III。

图 3 入渗模型拟合

表 4 拟合值与实测值的对比状况

坡面	土地 利用	Kostiakov			Philip			Horton			通用经验公式		
		剧变期	渐变期	稳定期	剧变期	渐变期	稳定期	剧变期	渐变期	稳定期	剧变期	渐变期	稳定期
I	梯田旱地	—	+	+	—	—	+	—	—	—	+	+	+
	裸石地	+	—	—	—	—	—	+	+	+	—	—	+
	灌木林地	—	—	+	+	—	+	+	+	++	+	—	+
II	梯田旱地	—	+	—	+	—	—	+	—	+	+	++	++
	裸石地	—	+	+	—	—	—	—	+	++	—	+	++
	灌木林地	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
III	梯田旱地	—	—	—	—	—	+	+	+	++	—	—	+
	裸石地	—	—	+	+	—	+	+	+	++	—	+	++
	灌木林地	—	—	+	+	—	+	+	+	++	+	+	++

3 结 论

(1) 峰丛坡地上不同土地利用间的入渗特征差异显著。从表征土壤渗透性能的初始入渗率、稳定入渗率及平均入渗率来看,未被扰动的灌木林地的土壤入渗性能最好,其入渗特征明显高于梯田旱地和裸石地。可以看出人为扰动的强度在一定程度上显著影响了土壤入渗性能。

(2) 峰丛坡地上灌木林地的前期入渗率较强,能及时调节土壤水分的入渗量,延缓产生地表径流的时间。而梯田旱地由于人为扰动频繁土壤颗粒团聚体稳定性差,加之黏粒含量较高,在遇水后容易形成板结导致入渗性能较低。

(3) Horton 模型较适宜于描述喀斯特的土壤入渗过程,其中对灌木林地和裸石地的土壤入渗过程拟合效果最好。而 Kostiakov 和 Philip 模型拟合与土壤入渗实测值相当,拟合效果一般。

参考文献:

[1] 夏江宝,杨吉华,李红云.不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J].水土保持研究,2004,11(2):115-117.

[2] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].中国农学通报,2008,24(7):494-499.

[3] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92(1):122-128.

[4] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].灌溉排水学报,2011,30(5):124-130.

[5] 刘丽红,蒋勇军,王翱宇,等.岩溶槽谷区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2010,30(4):51-55.

[6] 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.

[7] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J].中国水土保持科学,

2012,10(6):12-18.

[8] 寇小华,王文,郑国权.土壤水分入渗模型的研究方法综述[J].亚热带水土保持,2013,25(3):53-55.

[9] Kostiakov 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 the purposes of amelioration [J]. Soil Science, 1932,97(1):17-21.

[10] Philip J R. The theory of infiltration [J]. Soil Science, 1957,83(5):345-357.

[11] Horton R. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity[J]. Soil Science America Proceedings, 1940(3):399-417.

[12] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics:flow of air and water through soils [J]. Journal of Agricultural Science, 1911(4):1-24.

[13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

[14] 陈建刚,李启军,侯旭峰,等.奶水河流域不同植被覆盖条件下土壤入渗及模型的比较分析[J].中国水土保持科学,2004,2(3):22-26.

[15] 黄高宝,罗珠珠,辛平,等.耕作方式对黄土高原旱地土壤渗透性能的影响[J].水土保持通报,2007,27(6):5-9.

[16] 刘艇,王继红.不同植被覆盖土壤水库容特征及渗透速率[J].四川农业大学学报,2010,28(4):471-475.

[17] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(3):597-604.

[18] Chen X, Zhang Z, Chen X, et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(4):811-820.

[19] 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.

[20] 赵锦梅,张德罡,刘长仲,等.祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响[J].生态学报,2012,32(2):548-556.

- [6] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Trans Asae, 1989,32(5):1587-1593.
- [7] Zhang W, Cundy T W. Modeling of two - dimensional overland flow[J]. Water Resources Research, 2010,25(9):2019-2035.
- [8] Wilson B N. Small-scale link characteristics and applications to erosion modeling[J]. Trans. Asae. , 1993,36(6):1671-1770.
- [9] Wilson B N, Storm D E. Fractal analysis of surface drainage networks for small upland areas[J]. Trans. Asae. , 1993,36(5):1319-1326.
- [10] 朱良君,张光辉. 地表微地形测量及量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学,2013,11(5):114-122.
- [11] 张利超,杨伟,李朝霞,等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. 农业工程学报,2014,30(22):155-162.
- [12] Luk S H, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiment [J]. Physical Geography, 1986,7(4):344-356.
- [13] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(3):95-103.
- [14] Darboux F, Huang C. An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(1):92-99.
- [15] 高树静,赵龙山,梁心蓝,等. 人工降雨条件下坡耕地地表糙度的时空变异分布研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):12-16,249.
- [16] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [17] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:429-437.
- [18] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952,63(11):1117-1141.
- [19] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. The fractal nature of river networks[J]. Water Resources Research, 1988,24(8):1317-1322.
- [20] Helming K, Römken M J M, Prasad S N, et al. Erosional development of small scale drainage networks [J]. Process Modelling and Landform Evolution, 1999,78:123-145.
- [21] Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I, Rigon R, et al. minimum energy and fractal structures of drainage networks[J]. Water Resources Research, 1992,28(9):2183-2195.



(上接第 52 页)

- [21] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [22] 范严伟,赵文举,冀宏. 垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 兰州理工大学学报,2012,38(2):51-55.
- [23] 李红星,樊贵盛. 非饱和土壤有压入渗经验模型研究[J]. 太原理工大学学报,2009,40(4):383-387.
- [24] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):84-88.
- [25] 韩冰,吴钦孝,李秧秧,等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. 防护林科技,2004(5):1-3.
- [26] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报,2004,18(6):1-5.
- [27] 刘洁,李贤伟,纪中华,等. 元谋干热河谷 3 种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报,2011,31(8):2331-2340.
- [28] 刘翔,周宏飞,刘昊,等. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J]. 生态学报,2016,36(18):5820-5826.