喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征

曾江敏，何丙辉，李天阳，陈展鹏，吴耀鹏，曾荣昌

（西南大学资源环境学院，三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆 400715）

摘要：为研究不同林草恢复模式对喀斯特槽谷区坡面的水土保持效应，采用野外调查和室内分析相结合的方法，对比分析了喀斯特槽谷区顺、逆向坡面不同林草模式（林地、花椒地、灌草地）下的土壤理化性质和入渗特征。结果表明：(1)顺、逆向坡面下林地容重最小，孔隙度最好，含水率和有机质含量最高，其次是花椒地和灌草地；顺向坡土壤有机质含量显著高于逆向坡（$P<0.05$），但其他理化指标间差异不显著（$P>0.05$）。(2)顺、逆向坡面下花椒地入渗曲线较陡峭，而林地、灌草地相对较缓；灌草地入渗率最先趋于稳定（20 min 左右），而花椒地和林地入渗率在 30 min 左右开始缓慢下降，直到 75 min 以后渐渐趋于稳定；各林草恢复模式下土壤入渗能力均为林地＞花椒地＞灌草地（$P<0.05$）。(3)入渗模型中，Horton 模型拟合效果最好（$R^2>0.712$），模拟稳定入渗率与实测值间的回归方程决定系数 R^2 高达 0.978 9。(4)研究区土壤稳定入渗率与总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量及 pH 均呈正相关，而与有机质呈负相关，其中总孔隙度对土壤入渗性能影响最大，有机质影响最小；利用上述指标建立的多元线性回归方程可精确预测土壤稳定入渗率。研究结果可为喀斯特槽谷区坡面植被恢复选择及土壤入渗性能评估提供理论参考。

关键词：喀斯特；林草措施；土壤理化性质；入渗模型；回归模型

中图分类号：S152.7^{+}2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2019)04-0058-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.009

Soil Infiltration Characteristics Under Different Forest and Grass Restoration Models in Karst Trough-valley Region

ZENG Jiangmin, HE Binghui, LI Tianyang, CHEN Zhanpeng, WU Yaopeng, ZENG Rongchang

(*Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400715)

Abstract: In order to study the effects of different forest and grass restoration models on soil and water conservation on the hill slope in Karst trough-valley areas, the physical and chemical properties and infiltration characteristics of soils under different forest and grass patterns (forest land, pepper land and shrub grassland) on the consequent and reverse hill slopes in Karst trough-valley area were compared and analyzed by field investigation and indoor analysis. The results showed that: (1) The bulk density of forest land was the smallest, and the porosity, soil moisture content and organic matter content were the highest, followed by pepper land and shrub grassland. The soil organic matter content of the consequent hill slope was significantly higher than that of the reverse hill slope ($P<0.05$), but there was no significant difference in other physical and chemical indexes ($P>0.05$).(2) The infiltration curve of pepper land was steeper both on the consequent and reverse hill slopes, while that of forest land and shrub grassland were relatively slow. The infiltration rate of shrub grassland tended to be stable earlier (about 20 minutes), while the infiltration rate of pepper land and forest land began to decline slowly in about 30 minutes, and became gradually stable after 75 minutes. The soil infiltration capacity of forest and restoration modes on the consequent and reverse slopes was forest land＞pepper land＞shrub grassland($P<0.05$). (3) In the infiltration model, Horton model had the best fitting effect ($R^2>0.712$), compared with Kostiakov and Philip models. The determining coefficient R^2 of the regression equation between simulated stable infiltration rate and measured value was as high as 0.978 9.

收稿日期：2019-01-08

资助项目：国家重点研发计划项目“喀斯特槽谷区土壤地上/下流/漏失过程与保护技术研发及示范”(2016YFC0502303)

第一作者：曾江敏(1994—)，女，硕士研究生，主要从事城市水土保持研究。E-mail：rlzk7326@163.com

通信作者：何丙辉(1966—)，男，教授，博导，主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail：hebinghui@swu.edu.cn

(4) The soil stable infiltration rate in the study area was positively correlated with total porosity, non-capillary porosity, saturated water content and pH value, but was negatively correlated with organic matter. Total porosity had the greatest impact on soil infiltration performance, while organic matter had the least impact. The multiple linear regression equation established by the above indexes could accurately predict the stable infiltration rate of soil. The results could provide a theoretical reference for the selection of vegetation restoration and the assessment of soil infiltration performance on the slopes of Karst trough-valley areas.

Keywords: Karst; forest and grass measures; soil physical and chemical properties; infiltration model; regression model

土壤入渗性能是土壤质量评估的重要因子,也是影响土壤侵蚀的重要因素之一[1],可用作评价土壤退化和干旱潜力的指标[2]。有研究[3]表明,不同土地利用方式下土壤的入渗性能有所差异,且影响土壤入渗性能的因素也显著不同。Sun 等[4]研究发现,与裸地相比,植被覆盖能提高土壤入渗率,减少土壤侵蚀,且退耕还林可促进土壤入渗;Yimer 等[5]研究表明,与林地相比,耕地和草地的入渗量和土壤含水量分别减小 70%和 45%,干容重增大 13%～20%;Neris 等[6]指出,植被覆盖物的损失或变化使土壤结构稳定性显著下降,从而使土壤入渗率显著降低;林代杰等[7]认为,四川盆地西缘的红叶李林的土壤有机质含量、总孔隙度和非毛管孔隙度与李园、梨园和桃园相比是最高的,且土壤渗透性最佳;李天阳等[8]研究认为,血橙与农作物混作模式较血橙纯林土壤入渗性能更优,土壤容重和孔隙度是影响该区土壤入渗能力的主要因素。

我国西南喀斯特槽谷区坡面生物覆盖率低,土层浅薄且不连续,土壤碎石含量高,石漠化严重,其植被恢复难度较大[9]。为解决石漠化环境退化问题,有学者[10]提出了以生态经济型林(果、药)草为主的石漠化地区植被恢复的生态经济模式。林草复合模式有利于疏松土壤,改善土壤结构,增加土壤含水量,改善土壤入渗能力[11]。植物根部穿透土壤而产生的大孔隙和通道往往形成优先的水分路径,从而增强土壤入渗,减少径流和土壤侵蚀[12-13]。但喀斯特地区地下系统高度发育,裂隙和地下河普遍存在,降水经土壤下渗到表层岩溶带,土壤稳定入渗率的大小和分布直接影响表层岩溶带的水文过程[14]。因此,比较分析喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤的入渗能力,将有助于筛选出水土保持效果显著的生态恢复方式,对石漠化治理意义重大。张治伟等[15]研究认为,岩溶生态系统类型中,土壤入渗性能最佳的是经营多年的果园和灌丛,其次是草地,最差的是旱地;且有机质和水稳性团聚体含量是影响岩溶坡地土壤入渗性能的重要因素。刘丽红等[16]研究结果表明,在岩溶槽谷区土壤入渗性能表现为旱地>林地>荒地。尽管国内外学者对不同土地利用方式下土壤入渗性能已有许多研究[7,16-17],但针对喀斯特槽谷区坡面不同林草恢复模式下的土壤入渗性能研究还有不足,对区域入渗模型适宜性评价结果尚有差异。本文以喀斯特槽谷区顺、逆向坡面林地、花椒地、灌草地为研究对象,阐明不同林草恢复模式对区域坡面土壤入渗性能的影响,探究适宜区域土壤入渗过程描述的最佳模型和恢复方式,为喀斯特槽谷区坡面石漠化综合治理关键技术研发提供理论支撑。

1　研究区概况

研究区(108°57′14″—108°57′37″E,29°22″—29°45″N)海拔高度 382～548 m,位于重庆市酉阳县龙潭槽谷内,槽谷全长约 35 km,槽谷流域面积为 1 677 km^2,其中喀斯特面积为 1 273 km^2,石漠化面积为 183 km^2,分别占流域面积的 76%和 11%。龙潭槽谷位于酉阳县桐麻岭背斜的东南翼,呈东北—西南走向,槽谷两侧岩层倾向一致,坡向相反,出现坡向与岩层倾向一致的顺向坡(位于龙潭槽谷的西侧)和坡向与岩层倾向不一致的逆向坡(位于龙潭槽谷的东侧)(图 1),为典型的喀斯特槽谷区。研究区属亚热带湿润季风气候区,地形性气候独特,全年雨量充沛,冬暖夏凉,多年平均气温 14.4 ℃,平均降水量 1 250 mm。槽谷两侧区域土层较薄,土壤为黄色石灰土,呈微酸性或中性,坡面多为石质坡地且断续分布,基岩裸露率较高,逆向坡土壤在岩层的阻挡下土层相对较厚。区域内原生植被破坏严重,植被以次生灌木、蕨类和人工花椒林及乔木疏林为主。母岩主要有二叠、三叠系的灰质砂页岩,志留系页岩、白垩系紫红色页岩。

2　研究方法

2.1　土壤样品采集

在研究区内选择顺向坡和逆向坡 2 种坡面(图 2),坡度为 23°～28°,采样时间为 2018 年 6 月。在各坡面上分别选择林地、花椒地和灌草地 3 种恢复模式土地(表 1),在每种土地的坡上、坡中、坡下分别设置 3 个样点,用环刀(100 cm^3)和铝盒沿坡上、坡中、坡下 3 种坡位分别采集不同林草恢复模式 0—20 cm 土

壤样，共计 54 个。同时按照“S”形 5 点法采集 0—20 cm 混合土样，共计 18 个。用四分法收集 1 kg 左右土样，装入密封袋，编号后带回实验室，弃除草根砾石等杂物，风干、过筛后备用。

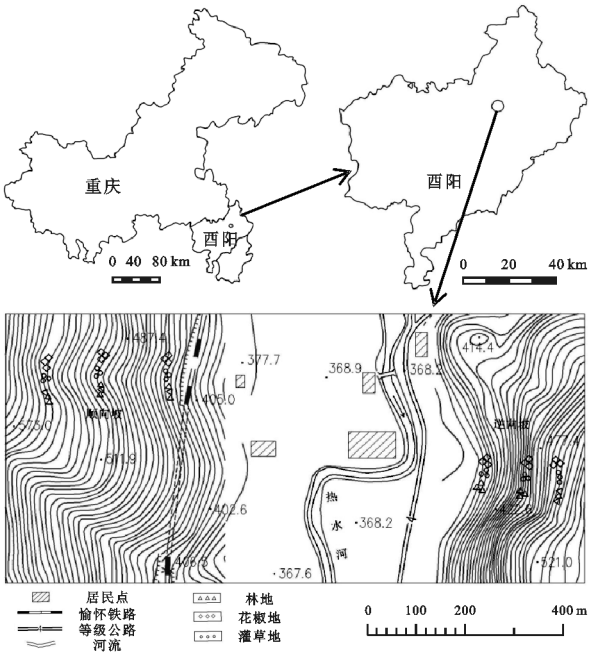

图 1 研究区位置

2.2 土壤理化性质的测定

土壤容重、孔隙度采用环刀浸水法测定；土壤含水率采用烘干法测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热氧化法测定；pH 采用电位法（土水比 1∶5）测定[18]。土壤入渗性能采用定水头环刀法测定。本研究选取入渗开始后的前 3 min 的入渗率表示初始入渗率，90 min 内的渗透总量为累积入渗量。试验过程中测得的水温为 23.0～23.5 ℃，为使不同温度下所测得的 K_t 值便于比较，将测得的渗透速率 K_t 统一换算成 10 ℃时的渗透系数 K_{10} 值，其公式为：

$$K_{10}=\frac{K_t}{0.7+0.03t}$$

式中：K_t 为温度为 t ℃时的渗透系数（mm/min）；T 为渗透测定时的温度（℃）。

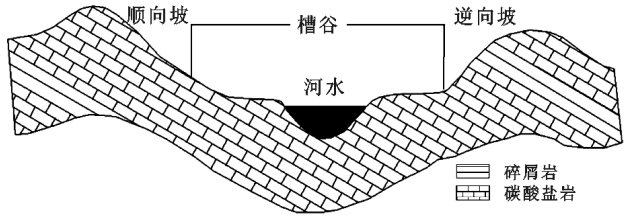

图 2 顺/逆向坡示意

表 1 不同林草恢复模式采样点基本情况

坡型	恢复模式	经度	纬度	海拔/m	植被类型
顺向坡	林地	108°57′14″	29°39″	435～548	杉木、杨树
	花椒地	108°57′14″	29°45″		花椒树、小蓬草、牛筋草
	灌草地	108°57′14″	29°44″		醉浆草、沿阶草、芒、插田泡
逆向坡	林地	108°57′37″	29°22″	382～505	枫香树、杉木、杨树
	花椒地	108°57′37″	29°25″		花椒树、小蓬草、牛筋草
	灌草地	108°57′37″	29°23″		醉浆草、沿阶草、芒、牛筋草

2.3 土壤入渗过程模拟

分别选取入渗经验模型（Kostiakov 模型）及物理模型（Philip 模型和 Horton 模型）来拟合顺、逆向坡面各林草恢复模式下土壤入渗变化过程[8]：

（1）Kostiakov 模型：$f(t)=kt^{-a}$

式中：t 为入渗时间；k、a 为拟合参数，且 a 值反映入渗方程斜率的大小，以此判断瞬时入渗率衰减的快慢。

（2）Philip 模型：$f(t)=mt^{-0.5}+A$

式中：t 为入渗时间（min）；A 为稳渗率（mm/min）；m 为经验参数。

（3）Horton 模型：$f(t)=A+(B-A)e^{-nt}$

式中：t 为入渗时间（min）；B、A 为初渗率和稳渗率（mm/min）；n 为经验参数。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图，SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析（$P<0.05$）及土壤入渗过程拟合。

3 结果与分析

3.1 不同林草恢复模式下土壤理化性质

从表 2 可以看出，顺向坡面下，3 种恢复模式的土壤容重、pH 差异均不显著（$P>0.05$）；林地土壤自然含水率、非毛管孔隙度与花椒地差异显著（$P<0.05$），而与灌草地差异不显著（$P>0.05$）；林地总孔隙度、有机质与花椒地差异不显著（$P>0.05$），而与灌草地差异显著（$P<0.05$）；林地毛管孔隙度、田间持水量、饱和含水率与花椒地、灌草地均差异显著（$P<0.05$）。逆向坡面下，3 种恢复模式土壤容重、自然含水率、田间持水量、饱和含水率及有机质均差异不显著（$P>0.05$）；林地总孔隙度、非毛管孔隙度与花椒地差异不显著（$P>0.05$），而与灌草地差异显著（$P<0.05$）；林地毛管孔隙度与花椒地、灌草地均差异显著（$P<0.05$）；林地 pH 与花椒地差异显著（$P<0.05$），而与灌草地差异不显著（$P>0.05$）。总体来看，无论顺向坡还是逆向坡，林地的孔隙状况最好，容重最小，其次

则为花椒地和灌草地。

顺、逆向坡面土壤理化性质比较,顺向坡 3 种恢复模式下的土壤容重均小于逆向坡对应值,pH 除花椒地以外,也均小于逆向坡,而自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度(林地除外)、田间持水量、饱和含水率均大于逆向坡,但上述指标在顺、逆坡面间差异不显著($P>0.05$)。而顺向坡的土壤有机质(53.55 g/kg)则显著高于逆向坡(37.93 g/kg)($P<0.05$)。

表 2　不同林草恢复模式下土壤基本理化性质

坡型	恢复模式	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	自然含水率/%	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	田间持水量/%	饱和含水率/%	有机质/($g\cdot kg^{-1}$)	pH
顺向坡	林地	1.08±0.24c	35.98±7.84a	59.20±8.14a	50.39±3.87a	8.80±6.34cd	49.05±14.02a	55.57±20.18a	62.55±13.24a	6.43±0.24ab
	花椒地	1.17±0.09bc	25.33±5.41b	55.68±4.99ab	39.26±6.89b	16.42±9.08a	33.71±6.71b	41.78±8.20b	50.97±8.91ab	5.43±0.82b
	灌草地	1.22±0.09abc	28.91±4.52ab	54.12±3.88b	43.01±3.56b	11.12±3.51bcd	35.73±5.34b	39.96±6.13b	47.12±13.32b	6.11±0.13ab
逆向坡	林地	1.26±0.09abc	24.92±2.21b	52.68±3.64b	40.06±3.61b	12.63±4.39abc	32.18±4.39b	36.63±5.43bc	42.39±2.54bc	6.86±0.40a
	花椒地	1.27±0.02ab	24.51±1.63b	52.12±2.76bc	37.94±2.47c	14.17±4.20ab	29.96±2.10b	35.59±3.96bc	38.28±3.05bc	5.23±1.46b
	灌草地	1.36±0.04a	25.04±2.15b	48.56±2.28c	40.78±2.09c	7.78±2.63d	29.98±2.27b	31.89±2.86c	33.13±4.43c	7.10±0.17a

注:表中数据为平均值±标准差;同列中不同字母表示不同恢复模式差异显著($P<0.05$)。下同。

3.2　不同林草恢复模式下土壤入渗性能

由图 3 可知,顺、逆向坡面下,花椒地入渗率变化曲线均较陡峭,其次则为林地入渗曲线,灌草地的入渗曲线相对较为平缓。此外,灌草地的入渗率在 20 min 左右趋于稳定,而花椒地和林地的入渗率则在 30 min 左右开始缓慢下降直到 75 min 以后渐渐趋于稳定。

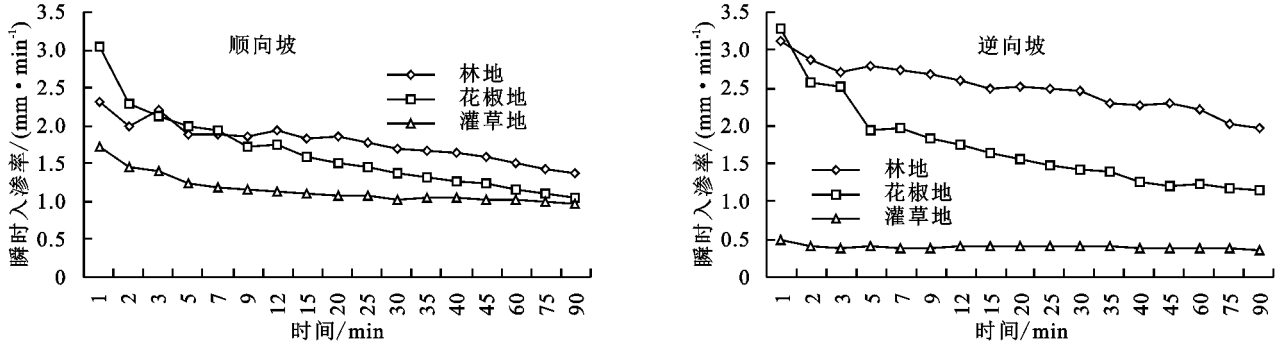

图 3　不同林草恢复模式下土壤入渗过程

从表 3 可以看出,顺向坡面 3 种林草恢复模式下土壤初始入渗率和累积入渗量差异显著($P<0.05$),而稳定入渗率和平均入渗率表现为林地和花椒地差异不显著($P>0.05$),而均与灌草地差异显著($P<0.05$)。逆向坡面 3 种林草恢复模式下土壤初始入渗率表现为林地与花椒地差异不显著($P>0.05$),而与灌草地差异显著($P<0.05$);稳定入渗率、平均入渗率及累积入渗量均差异显著($P<0.05$)。从累积入渗量来看,顺、逆向坡 3 种林草恢复下土壤入渗性能均表现为林地>花椒地>灌草地($P<0.05$)。顺、逆向坡面各土壤入渗参数差异均不显著($P>0.05$),其中顺向坡的初始入渗率(2.06 mm/min)略高于逆向坡(2.05 mm/min),而顺向坡稳定入渗率(1.42 mm/min)、平均入渗率(1.33 mm/min)、累积入渗量(239.34 mL)均小于逆向坡面对应参数值(1.46 mm/min,1.36 mm/min,245.51 mL)。

表 3　不同林草恢复模式下土壤入渗特征指标

坡型	恢复模式	初始入渗率/($mm\cdot min^{-1}$)	稳定入渗率/($mm\cdot min^{-1}$)	平均入渗速率/($mm\cdot min^{-1}$)	累积入渗量/mL
顺向坡	林地	2.17±0.17c	1.72±0.03b	1.61±0.06b	290.13±9.66b
	花椒地	2.49±0.08b	1.45±0.43b	1.33±0.07bc	238.54±10.82c
	灌草地	1.52±0.07d	1.09±0.05c	1.05±0.16c	189.36±8.08d
逆向坡	林地	2.90±0.13a	2.42±0.08a	2.28±0.42a	410.16±24.93a
	花椒地	2.79±0.08a	1.52±0.07b	1.39±0.13bc	250.47±8.62c
	灌草地	0.47±0.05e	0.43±0.04d	0.42±0.04d	75.91±4.35e

3.3　不同林草恢复下土壤入渗过程拟合

从表 4 可以看出,顺向坡面 Kostiakov 模型的拟合度 R^2 表现为花椒地>灌草地>林地,而 Philip 和 Horton 模型的拟合度 R^2 则表现为灌草地>花椒地>林地;逆向坡面 Kostiakov、Philip 和 Horton 模型的拟合度 R^2 均表现为花椒地>林地>灌草地。此外,

顺、逆向坡面，Kostiakov 模型的 a 均表现为花椒地＞林地＞灌草地，表明花椒地土壤入渗曲线的斜率最大，瞬时入渗率衰减最快，灌草地土壤入渗曲线的斜率最小，瞬时入渗率衰减最慢，这与图 2 显示的入渗曲线规律一致。

总体来看，Kostiakov 模型的拟合度 R^2 范围为 0.378～0.982，平均值为 0.842；Philip 模型的拟合度 R^2 范围为 0.462～0.991，平均值为 0.822；Horton 模型的拟合度 R^2 范围为 0.712～0.950，平均值为 0.885，表明 Horton 模型的拟合效果最佳，Kostiakov 模型次之，Philip 模型相对较差。但值得注意的是，Kostiakov 模型在 $t\to 0$ 时，$f(t)\to\infty$；$t\to\infty$ 时，$f(t)\to 0$，这与实际情况不符，而 Philip 和 Horton 模型中参数均具有明确的物理意义。

将拟合得到的 Philip 和 Horton 模型计算出稳定入渗率，并与实际入渗率进行回归分析（图 4），发现 Philip 模型下的预测稳定入渗率与实测稳定入渗率间的回归方程决定系数为 0.923 3，而 Horton 模型下决定系数为 0.978 9，这进一步表明 Horton 模型的拟合效果比 Philip 模型好。因此，可考虑利用 Horton 模型来拟合喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下的土壤入渗过程。

表 4 不同林草恢复模式下土壤入渗模型拟合

坡型	恢复模式	Kostiakov 模型			Philip 模型			Horton 模型			
		a	k	R^2	A	m	R^2	A	B	n	R^2
顺向坡	林地	2.308	0.095	0.873	1.510	0.892	0.754	1.314	2.127	0.025	0.879
	花椒地	2.879	0.221	0.978	0.977	2.087	0.965	1.227	2.816	0.114	0.908
	灌草地	1.594	0.123	0.930	0.899	0.807	0.991	1.041	1.829	0.251	0.950
逆向坡	林地	3.138	0.085	0.910	2.147	1.108	0.777	1.923	2.924	0.026	0.926
	花椒地	3.160	0.240	0.982	0.967	2.390	0.980	1.312	3.292	0.156	0.937
	灌草地	0.439	0.037	0.378	0.370	0.088	0.462	0.391	2.190	2.801	0.712

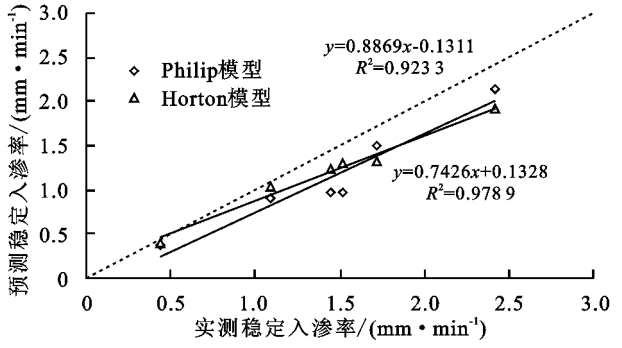

图 4 Philip 模型与 Horton 模型拟合的稳渗率与实测稳渗率关系

3.4 土壤入渗的影响因素

土壤入渗性能通常受土壤容重、孔隙度、含水率、有机质等因素的影响，但针对不同条件下的土壤，其影响因素及影响程度可能不同。选取土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量、饱和含水率、有机质、pH 与初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率及累积入渗量进行简单相关分析，发现土壤入渗参数与理化指标间的相关性不显著（$P>0.05$），这与王佩将等[19]的研究结果一致。可能是因为各变量间存在多重共线性[20]，即某些因素的变化往往同时影响若干变量向相同方向变化，引起多重共线性，导致变量的显著性检验失去意义，亦无法判断变量的单独影响[21]。因此，进一步采用向后多元线性回归方法，在 95%置信度下建立了稳定入渗率（y）与土壤容重（x_1）、总孔隙度（x_2）、毛管孔隙度（x_3）、非毛管孔隙度（x_4）、田间持水量（x_5）、饱和含水率（x_6）、有机质（x_7）、pH（x_8）之间的多元线性回归模型[22]：$y=132.431x_2+16.414x_4+5.597x_6-0.455x_7+1.358x_8-61.495$。该模型排除了土壤容重、毛管孔隙度和田间持水量等变量的影响，发现研究区土壤稳定入渗率（y）主要受由土壤总孔隙度（x_2）、非毛管孔隙度（x_4）、饱和含水率（x_6）、有机质（x_7）和 pH（x_8）的影响。其中，总孔隙度对土壤稳定入渗率的影响力最大，有机质影响力最小，且有机质对该区土壤稳定入渗率具有抑制作用，其他指标均为促进作用。另外，将该多元线性回归方程计算得到的预测稳定入渗率与实测的稳定入渗率进行回归分析得到方程：$y=1.0016x+0.0076$，且 $R^2=1.000$（图 5），结果表明，建立的多元线性回归方程能准确地预测该区的土壤稳定入渗率，具有较高的精度。

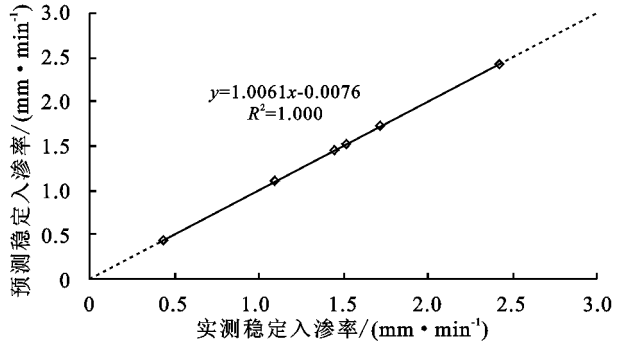

图 5 线性回归方程拟合的稳渗率与实测稳渗率关系

4 讨 论

植被恢复对土壤水分入渗具有较大影响[23]。本

研究结果显示,林地较花椒地和灌草地而言,有机质含量较高、孔隙状况较好、容重较小。选取累积入渗量来评价土壤入渗性能及地表产流的快慢[24],本研究结果表明,顺向林地累积入渗量分别是花椒地和灌草地的 1.22,1.53 倍,逆向坡林地累积入渗量分别是花椒地和灌草地的 1.64,5.40 倍,即林地的入渗效果最好,其次是花椒地和灌草地。因为林地的枯枝落叶层,不仅削弱了雨滴对土壤的打击力,且极易被分解为土壤所需的良好腐殖质,改善土壤结构[25],发达的植物根系再将有机物纳入土壤[26],促进了土壤孔隙的连续性[27],从而改善土壤入渗性能[28]。而花椒地林下植被覆盖和生物量较少,修剪的枝条不易分解,导致土壤表层较为坚实,但人为的翻耕等农事活动,使得土壤容重和孔隙度相比灌草地有所改善。灌草地土层较薄,植被根系较浅,加之雨滴击溅和降雨冲刷使得表层土壤板结,土壤孔隙状况较差,容重较大[29],有机质含量较低,限制了植物的径向生长。总体而言,在喀斯特地区自然灌草恢复对土壤入渗性能的改善效果不明显,而林地效果最佳,花椒地与林地入渗效果差距不大,故花椒恢复模式符合喀斯特地区生态经济模式的要求。

顺向坡较逆向坡而言,土壤有机质含量较高,孔隙度较大,容重较小,这可能与逆向坡存在土壤漏失有关[30],即地表细颗粒土壤优先随降水沿岩体的节理、裂隙和破碎带等优势的渗流通道渗漏到地下,表层土壤逐渐粗化,导致逆向坡土壤容重增大,孔隙度、含水率和饱和度有所下降[31]。土壤毛管孔隙度[32]和非毛管孔隙度[33]皆是影响土壤入渗率的重要因素。本研究中逆向坡土壤入渗效果比顺向坡好,且发现土壤总孔隙度是影响该区土壤稳定入渗率的主要驱动因素,有机质的影响力最小。土壤有机质对土壤入渗的作用是通过促进团聚体的形成和改善土壤孔隙度而间接影响的[15]。该区有机质含量对土壤稳定入渗速率为抑制作用,这与大部分研究[7-8,15,25]指出的土壤有机质含量与土壤稳定入渗速率呈正相关关系结果相反,而与梁向锋等[32]指出的土壤稳定入渗率随有机质含量的增加呈先增大后减小规律相似。可能是因为该区土壤有机质含量较高,对土壤水分的吸附作用将大于增加孔隙度的导水作用,从而阻碍或者延缓土壤水的入渗[32],但其作用机理尚不明确。顺向坡土壤孔隙度、容重等指标与逆向坡差异不显著,而顺向坡有机质显著大于逆向坡,故有机质的抑制作用比其他指标的促进作用更为突出,导致顺向坡土壤入渗不如逆向坡好。

土壤入渗模型拟合结果显示,Horton 模型拟合效果优于 Kostiakov 模型和 Philip 模型,虽然 Horton 模型和 Philip 模型中的参数都具有明确的物理意义,但是 Philip 模型对入渗过程的拟合效果较差。这与刘目兴等[24]在三峡库区的研究结果相似,也与徐勤学等[17]在喀斯特地区的研究结果相似。说明 Horton 模型适用范围广,在喀斯特地区同样具有较好的适用性,最适合估算土壤水分入渗速率[23]。

5　结 论

(1)顺、逆向坡面各林草恢复模式下,林地容重较小,孔隙度、含水率和有机质含量较高,其次是花椒地和灌草地。顺向坡面有机质是逆向坡面的 1.41 倍($P<0.05$),但其他指标差异不明显($P>0.05$)。顺、逆向坡面下花椒地土壤均呈强酸性(pH<5.5),故种植花椒可能会导致土壤酸化。

(2)顺、逆向坡面,灌草地入渗率 20 min 左右达到稳定,而花椒地和林地入渗率达则在 30 min 开始缓慢下降,直到 75 min 以后渐渐趋于稳定,3 种林草恢复下土壤入渗性能均为林地>花椒地>灌草地($P<0.05$),林地和花椒恢复对改善喀斯特土壤入渗较为适宜。而顺向坡与逆向坡土壤入渗性能差异不显著($P>0.05$)。

林地和花椒恢复对改善喀斯特地区土壤入渗较为适宜。

(3)入渗模型中 Horton 模型的拟合效果最佳,Kostiakov 模型次之,Philip 模型相对最差。Horton 模型拟合的稳定入渗率与实测的稳定入渗率的拟合度 R^2 为 0.978 9,表明 Horton 模型对该区不同林草恢复模式下土壤入渗过程具有较好的适用性。

(4)影响该区土壤入渗的因素影响力大小为总孔隙度>非毛管孔隙度>饱和含水率>pH>有机质,利用上述因子在 95%置信度下建立的多元线性回归模型可较精准地预测土壤稳定入渗率,具有一定的应用价值。土壤有机质含量过高表现的土壤疏水性在喀斯特地区还少有报道,关于林草恢复过程中有机质对土壤水分运移的影响需进一步展开研究。

参考文献:

[1] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型土壤渗透性[J].东北林业大学学报,2013,41(3):57-62.

[2] Wu G L, Yang Z, Cui Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity[J]. Journal of Hydrology,2016,535:54-60.

[3] 付同刚,陈洪松,王克林.喀斯特小流域土壤饱和导水率

垂直分布特征[J].土壤学报,2015,52(3):538-546.

[4] Sun D, Yang H, Guan D X, et al. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment,2018,626:1394-1401.

[5] Yimer F, Messing I, Ledin S, et al. Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia[J]. Soil Use and Management,2010,24(4):344-349.

[6] Neris J, Jiménez C, Fuentes J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. Catena,2012,98:55-62.

[7] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.

[8] 李天阳,何丙辉,田家乐,等.重庆璧山 5 种典型农林混作模式土壤理化性质及水分入渗特性[J].水土保持学报,2013,27(4):103-108.

[9] 吴清林,梁虹,熊康宁,等.石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前沿理论与对策[J].水土保持学报,2018,32(2):11-18.

[10] 苏维词.中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J].水土保持学报,2002,16(2):29-32.

[11] 任启文,毕君,李联地,等.冀北山地 3 种森林植被恢复类型对土壤质量的影响[J].生态环境学报,2018,27(10):1818-1824.

[12] Li X Y, Contreras S, Albert Solé-Benet, et al. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain[J]. Catena,2011,86(2):98-109.

[13] Benegas L, Ilstedt U, Roupsard O, et al. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2014,183:185-196.

[14] Paul W W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. International Journal of Speleology,2008,37(1):1-10.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 杨剑虹,王成林,代亨林,等.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.

[19] 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.

[20] 李天阳,何丙辉,张怡,等.重庆山地血橙园不同模式土壤水分物理性状[J].水土保持研究,2014,21(2):33-38.

[21] 赵东波.线性回归模型中多重共线性问题的研究[D].辽宁 锦州:渤海大学,2017.

[22] 刘青柏,刘明国,王玉涛,等.不同林型立地土壤水分性状及其持水能力的比较[J].干旱区研究,2011,28(5):775-779.

[23] Almeida W S D, Elói P, Oliveira P T S D, et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration [J]. Soil and Tillage Research,2018,175:130-138.

[24] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.

[25] 黄茹,黄林,何丙辉,等.三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(9):119-126.

[26] Prado E A F D, Vitorino A C T, Oliveira W H D, et al. Dispersion index of aggregates in a Rhodic Ferrasol cultivated with cane under stillage application[J].Semina: Ciencias Agrarias,2014,35(4):2347-2356.

[27] Santos M A D N D, Panachuki E, Alves S T, et al. Water infiltration in an Ultisol after cultivation of common bean[J]. Revista Brasileira De Ciência Do Solo,2014,62(38):1612-1620.

[28] Shao Q, Baumgartl T. Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences[J]. Soil Science,2016,181(2):45-56.

[29] 邵水仙,董智,李红丽,等.不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):263-267.

[30] 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.

[31] 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:以贵州普定县陈旗小流域为例[J].中国岩溶,2010,29(2):121-127.

[32] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].生态学报,2009,29(2):636-642.

[33] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.