

喀斯特槽谷区岩层倾向对土壤入渗特性的影响

苟俊菲^{1,2}, 张林星^{1,2}, 石海龙^{1,2}, 甘凤玲^{1,2}, 刘 涓^{1,2}

(1.重庆师范大学三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆 401331;

2.三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站,重庆 401331)

摘要: 为了解岩层倾向对喀斯特槽谷区土壤入渗特性的影响,以重庆市青木关岩溶槽谷区顺/逆层坡为研究对象,分析 5 种典型土地利用方式裸地(AL)、辣椒地(PL)、玉米地(CL)、林地(FL)、草地(GL)在顺/逆层坡的土壤入渗能力差异,并探讨土壤物理性质对土壤入渗能力的影响。结果表明:(1) >0.25 mm 水稳性团聚体含量、毛管持水量、黏粒以及粉粒含量在顺/逆层坡存在显著差异($p<0.05$),其中在 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和毛管持水量方面,分别为 PL 与 FL 的顺/逆层坡差异最大,在黏粒和粉粒方面,CL 的顺/逆层坡差异最大,且均为逆层坡 $>$ 顺层坡。(2)除 FL 顺层坡的土壤渗透能力低于逆层坡外,其余 4 种土地利用方式下的土壤入渗能力均表现为顺层坡高于逆层坡。(3)土壤渗透特性在顺/逆层坡均与容重呈极显著负相关关系($p<0.01$),在顺层坡与总孔隙度、非毛管孔隙度、 >5 mm 水稳性团聚体含量和饱和持水量呈极显著正相关关系($p<0.01$),在逆层坡与非毛管孔隙度、饱和持水量、粉粒含量呈极显著正相关关系($p<0.01$);通过多元逐步回归分析与通径分析发现,顺/逆层坡土壤入渗能力的首要决策因素均为容重,其次分别为 >5 mm 水稳性团聚体含量和粉粒含量。(4)对比 4 种土壤入渗过程的拟合模型,Philip 模型对顺/逆层坡的土壤入渗过程拟合效果最佳。研究结果可为喀斯特槽谷区不同岩层倾向的水土流失防治以及植被恢复提供数据支撑。

关键词: 岩层倾向; 土壤入渗; 入渗模型; 喀斯特槽谷区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0083-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.012

Effects of Rock Strata Dip on Soil Infiltration Characteristics in Karst Trough Valley Area

GOU Junfei^{1,2}, ZHANG Linxing^{1,2}, SHI Hailong^{1,2}, GAN Fengling^{1,2}, LIU Juan^{1,2}

(1.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2.Three Gorges Reservoir Area Earth Surface Ecological Processes of Chongqing Observation and Research Station, Chongqing 401331)

Abstract: In order to understand the impact of rock strata dip on soil infiltration characteristics in karst trough valley area, taking the dip/anti-dip slope of Qingmuguan karst trough valley area in Chongqing as the research object, the differences of soil infiltration capacity of five typical land use patterns, namely abandoned land (AL), pepper land (PL), corn land (CL), forest land (FL), grassland (GL) in dip/anti-dip slope were analyzed, and the influence of soil physical properties on soil infiltration capacity was discussed. The results showed that: (1) There were significant differences in >0.25 mm water-stable aggregate content, capillary water holding capacity, clay and silt content between the dip and anti-dip slope ($p<0.05$). In terms of >0.25 mm water-stable aggregate content and capillary water holding capacity, the greatest differences were found between the dip and anti-dip slope of PL and FL, respectively, and in terms of clay and silt content, the greatest differences were found between the dip and anti-dip slope of CL, and both were anti-dip slope $>$ dip slope. (2) Except for the soil infiltration capacity of FL, the soil infiltration capacity of the dip slope was lower than that of the anti-dip slope, and the soil infiltration capacity of the other four land use patterns was higher than that of the anti-dip slope. (3) Soil infiltration characteristics showed highly

收稿日期:2022-11-29

资助项目:国家自然科学基金项目(42107355);重庆市科委科学研究项目(CSTB2022NSCQ-MSX1053);重庆市教委科技项目(KJQN202100518, KJQN202100542)

第一作者:苟俊菲(1996—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:815950112@qq.com

通信作者:甘凤玲(1989—),女,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:359140315@qq.com

significant negative correlation with bulk density on dip and anti-dip slope ($p < 0.01$), and had significantly positive correlation with total porosity, non-capillary porosity, >5 mm water-stable aggregate content and saturated water holding capacity in the dip slope ($p < 0.01$), and had significantly positive correlation with non-capillary porosity, saturated water holding capacity and silt content in the anti-dip slope ($p < 0.01$). The multiple stepwise regression analysis and path analysis revealed that the primary decision factor for the soil infiltration capacity on dip and anti-dip slope was both the bulk density, followed by >5 mm water-stable aggregate content and silt content, respectively. (4) Compared with the four fitting models of soil infiltration process, Philip model had the best fitting effect on the soil infiltration process of the dip and anti-dip slope. The research results can provide data support for soil erosion control and vegetation restoration in different rock strata dips in karst trough valley area.

Keywords: rock strata dip; soil infiltration; infiltration model; karst trough valley area

土壤入渗是水分由地表渗入地下,形成土壤水的过程^[1-2]。土壤入渗能力的大小对地表产流以及土壤水分的再分配过程具有重要影响^[3]。土壤入渗能力强,水分下渗可形成地下径流补给地下水,则地表径流量减少,能够有效减少地表水土流失^[4]。因此,研究土壤入渗特性对控制水土流失、提升土壤涵养水源能力具有重要意义。

入渗能力是一种复杂的土壤特性^[5],目前在紫色土区和黄土区对土壤入渗进行了大量研究。张冠华等^[6]对三峡库区不同结皮盖度的土壤入渗能力研究发现,有机碳、土壤容重和结皮盖度是土壤入渗的主要影响因素,其中土壤容重是决策因子;李建兴等^[7]认为,影响紫色土区土壤入渗性能的关键因素是土壤孔隙度;刘畅等^[8]研究黄土区退耕还林后的土壤入渗特征,提出有机质与非毛管孔隙度是影响土壤入渗能力的主要因素。由此可见,影响土壤入渗的因素较多,但基本上是由土壤性质决定^[9],且不同区域土壤入渗的决策因素存在差异。因此不能将其他地区的土壤入渗结论直接应用于喀斯特槽谷区的土壤入渗研究中。此外,与紫色土区以及黄土区相比,喀斯特槽谷区具有独特的“一山二岭一槽”特征,存在典型的顺/逆倾向。目前关于岩层倾向对土壤入渗能力的影响研究结果存在差异,贾洪杰等^[10]认为,在岩层倾向与坡向一致的顺层坡,岩层对土壤的阻挡作用小,易导致水土流失,使裸岩率增加,裸岩会减慢水流流速以及吸收水分,有利于水分入渗;而覃自阳等^[11]认为,在岩层倾向与坡向相反的逆层坡,岩层对水流的阻挡促使雨水下渗;曾江敏等^[12]认为,顺/逆层坡土壤入渗能力差异是由于有机质对土壤水分的吸附作用,阻碍水分下渗所致。

综上所述,岩层倾向对土壤入渗能力的影响结论不一。由于土壤理化性质具有高度的空间异质性,不同的土壤质地会导致土壤入渗也产生差异^[13]。因此本研究以喀斯特槽谷区不同岩层倾向的原状土为研究对象,通过入渗试验分析影响顺/逆层坡入渗的决

策因素,以及明确土壤入渗的最佳模型。研究结果对有效减少喀斯特槽谷区不同岩层倾向的地表径流,因地制宜地研发水土流失防治技术具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青木关岩溶槽谷区($29^{\circ}40'40''-29^{\circ}47'00''N$, $106^{\circ}16'48''-106^{\circ}20'10''E$),地处重庆市西部,位于沙坪坝区、北碚区和璧山区的交界处。该研究区属亚热带湿润季风气候,年平均降水量 1 100 mm,雨季主要集中在夏秋两季。年平均气温为 $18^{\circ}C$,具有冬暖夏热、春秋多变的特点。青木关岩溶槽谷区属于川东平行岭谷缙云山温塘峡背斜南段,地势总体呈东北高西南低,两翼海拔约 600 m,槽谷海拔约 480 m,即“二岭”与“一槽”相对高差在 200~300 m,起伏较小^[14]。该区土壤以黄壤为主,土层普遍较薄,多在 2 m 以下。由于人类过度开发利用资源导致的石漠化现象严重,自 1988 年启动长江防护林建设工程以来,该区通过植被恢复治理水土流失现象^[15]。目前区内的主要土地利用类型草地、林地和耕地分别占槽谷区总面积的 19.62%, 61.52%, 9.42%^[16]。

1.2 样品采集与测定

试验于 2021 年 9—12 月进行。在青木关岩溶槽谷区顺/逆层坡内以裸地(AL)为对照,分别选取辣椒地(PL)、玉米地(CL)、林地(FL)和草地(GL)4 种土地利用方式为采样地,共选取 10 个采样地(表 1)。采样前,先去除采样点植物地上部分,露出新鲜土壤面。每个采样地随机设置 6 个采样点,每个采样点用 100 cm^3 的环刀(直径 50.46 mm,高 50 mm)采集 2 个原状土样,并用密封袋密封后带回实验室分别用于测定土壤入渗率和容重、孔隙度、持水量。同时在上述采样点采集土壤 1 kg,用于测定土壤团聚体和机械组成。土壤入渗率采用定水头法测定^[17]。土壤容重、孔隙度、持水量用环刀法与烘干法测定,土壤团聚体采用湿筛法^[4]测定,土壤机械组成采用马尔文 MS 2000 激光粒

度分析仪(英国马尔文仪器有限公司)测定^[6]。

表 1 样地概况

土地利用类型	岩层倾向	海拔/m	主要植被类型	土层厚度/cm	枯枝落叶层厚度/cm
AL	顺层坡	462.7	ns	20—50	ns
	逆层坡	427.6	ns	30—60	ns
PL	顺层坡	405.2	辣椒	30—40	ns
	逆层坡	433.1	辣椒	40—50	ns
CL	顺层坡	452.6	玉米	50—60	ns
	逆层坡	431.5	玉米	50—60	ns
FL	顺层坡	536.3	杉树和马尾松	50—70	1~2
	逆层坡	453.7	杉树和马尾松	50—80	2~3
GL	顺层坡	462.5	葛藤和芭茅	50—80	ns
	逆层坡	442.3	葛藤和芭茅	60—80	ns

注:ns 表示未统计。

试验装置主要由玻璃缸、量筒、烧杯、支架、玻璃漏斗、装有原状土样的环刀、无上盖以及底盖的空环刀等组成(图 1)。将采集的原状土环刀的上盖和底盖取下,在底盖上放置 1 张同等大小的滤纸后盖上底盖,用胶带固定好环刀底部。将环刀置于洁净的玻璃缸内,并向缸内加水至距离环刀顶部 1 mm 处,置于阴凉处浸泡约 24 h,待环刀土样完全饱和后,取出环刀。在完全饱和的环刀土样上套 1 个规格大小相同的空环刀,用胶带密封接口处,确保试验过程不会有水渗出。将连接好的环刀置于玻璃漏斗上,玻璃漏斗下放置烧杯。首先向上部的空环刀中加水,在试验过程中始终保持空环刀内装满水(环刀高 50 mm)。水通过饱和后的原状土样,经漏斗流入至烧杯中,待漏斗滴下第 1 滴水后开始计时。由预试验及朱列坤等^[18]对喀斯特土壤入渗特性研究可知,在 90 min 后入渗速率基本稳定,因此本试验入渗时间设定为 90 min。在前 60 min 按照时间间隔为 1,2,3 min 更换烧杯并记录入渗量,每个时间间隔测定 10 次;之后每 5 min 记录 1 次,测定 6 次。以第 1 min 的入渗量作为初始入渗率;单位时间内土壤入渗量趋于稳定的值作为稳定入渗率;取 90 min 内的渗透量作为总渗透量;利用总渗透量与时间的比值计算平均入渗率。

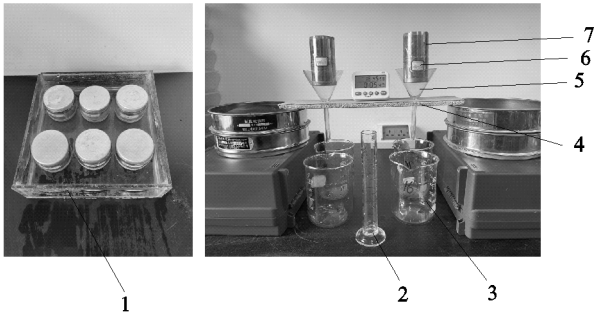
1.3 土壤入渗模型

土壤入渗模型可分为经验模型、半经验模型、物理模型^[19]。经验模型和半经验模型分别以 Horton 和 Kostiakov 为代表^[19],可表征入渗速率变化趋势。为了更贴合实际情况,对 Kostiakov 模型进行改进,即为 Mezencev 模型,其为纯数学模型^[20]。物理模型以 Philip 为代表,该模型可反映土壤入渗能力的大小和土壤吸渗率^[20]。

Kostiakov 模型公式:

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

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 为系数, a 表示初始入渗速率, b 表示入渗指数, b 值越大,入渗率随入渗时间减小得越快。



注:1 为玻璃缸;2 为量筒;3 为烧杯;4 为支架;5 为玻璃漏斗;6 为装有原状土样的环刀;7 为无上盖及底盖的空环刀。

图 1 试验装置

Mezencev 模型公式:

$$f(t)=c+at^{-b}$$
(2)

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); a 、 b 、 c 均为系数, a 、 b 表示意义与 Kostiakov 模型一致, c 表示稳定入渗率。

Horton 模型公式:

$$f(t)=f_s+(f_i-f_s)e^{-kt}$$
(3)

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); f_s 为稳定入渗率(mm/min); f_i 为初始入渗率(mm/min); k 为系数,反映入渗能力衰减的快慢程度, k 值越大,表明入渗率随入渗时间减小得越快。

Philip 模型公式:

$$f(t)=f_s+Bt^{-0.5}$$
(4)

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); f_s 为稳定入渗率(mm/min); B 为系数,表示土壤入渗能力大小, B 越大,说明土壤入渗能力越强。

Kostiakov 模型多适用于长历时土壤入渗,而 Philip 模型适用于短历时且初始含水量均匀的土壤,Horton 模型需要引入初始入渗率和稳定入渗率,考虑较多外界因素^[4]。鉴于以上各模型的特性,为了解入渗过程中的入渗速率变化和入渗能力大小,本研究选用 Kostiakov、Mezencev、Horton 和 Philip 4 种模型对不同岩层倾向与不同土地利用方式下的土壤入渗过程进行拟合,并对各模型的拟合精度与适用性进行评价。

纳什效率系数(N_{SE})和均方根误差(RMSE)可用来评价拟合模型的有效性,计算公式为:

$$N_{ES}=1-\frac{\sum_{i=1}^n(M_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^n(M_i-\overline{M})^2}$$
(5)

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(M_i-P_i)^2}{n}}$$
(6)

式中: M_i 为第 i 次试验实测值; P_i 为第 i 次模型预测值; $\overline{M}$ 为试验实测值的平均值; $\overline{P}$ 为试验预测值的平均值; n 为试验总次数。

数据分析利用 SPSS 21.0 软件完成。对土壤入渗特

性以及物理特性的差异显著性进行独立样本 T 检验分析和单因素方差分析。数据作图均利用 Origin 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同岩层倾向的土壤入渗特征

2.1.1 土壤入渗过程 由图 2 可知,顺/逆层坡的土壤入渗速率随入渗时间变化均可分为 3 个阶段,即快速下降(0~10 min)、缓慢下降(10~60 min)和稳定阶段(60~90 min)。在快速下降阶段,顺/逆层坡的土壤入渗速率均呈陡降趋势,平均下降幅度分别为 31.12%和 30.81%,尤其在前 3 min 内下降最为明显,平均分别下降 20.46%和 21.02%。在缓慢下降阶段,顺/逆层坡的土壤入渗速率明显变缓,顺层坡的平均下降幅度略高于逆层坡,为逆层坡的 1.07 倍;在此阶段,顺/逆层坡均在 AL 下降速率最快,此后顺层

坡依次表现为 GL(24.27%)>FL(13.37%)>CL(12.19%)>PL(11.85%),逆层坡依次表现为 PL(19.99%)>GL(18.96%)>FL(18.34%)>CL(7.25%)。随入渗时间延长,在 60 min 时,顺/逆层坡的土壤入渗速率基本趋于稳定。在顺层坡,AL 的稳定入渗率最大为 8.92 mm/min,分别为 GL、CL、PL、FL 的 1.80,5.12,5.89,8.23 倍;在逆层坡,FL 的稳定入渗率最大为 4.38 mm/min,分别为 AL、GL、CL、PL 的 1.36,2.94,4.26,4.47 倍。综上可知,在不同土地利用方式下,顺/逆层坡的入渗速率存在明显差异。FL 入渗速率在逆层坡条件下大于顺层坡,顺/逆层坡的平均入渗率差值为 3.66 mm/min,而其余 4 种土地利用方式下均为顺层坡大于逆层坡,其中 AL 的顺/逆层坡平均入渗率差值最大为 6.69 mm/min,此后依次为 GL(4.13 mm/min)、CL(0.83 mm/min)、PL(0.54 mm/min)。

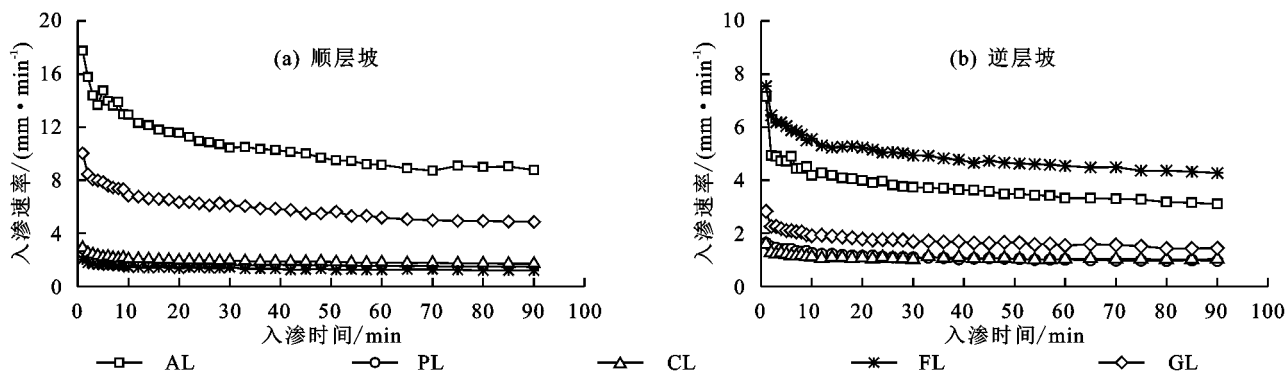
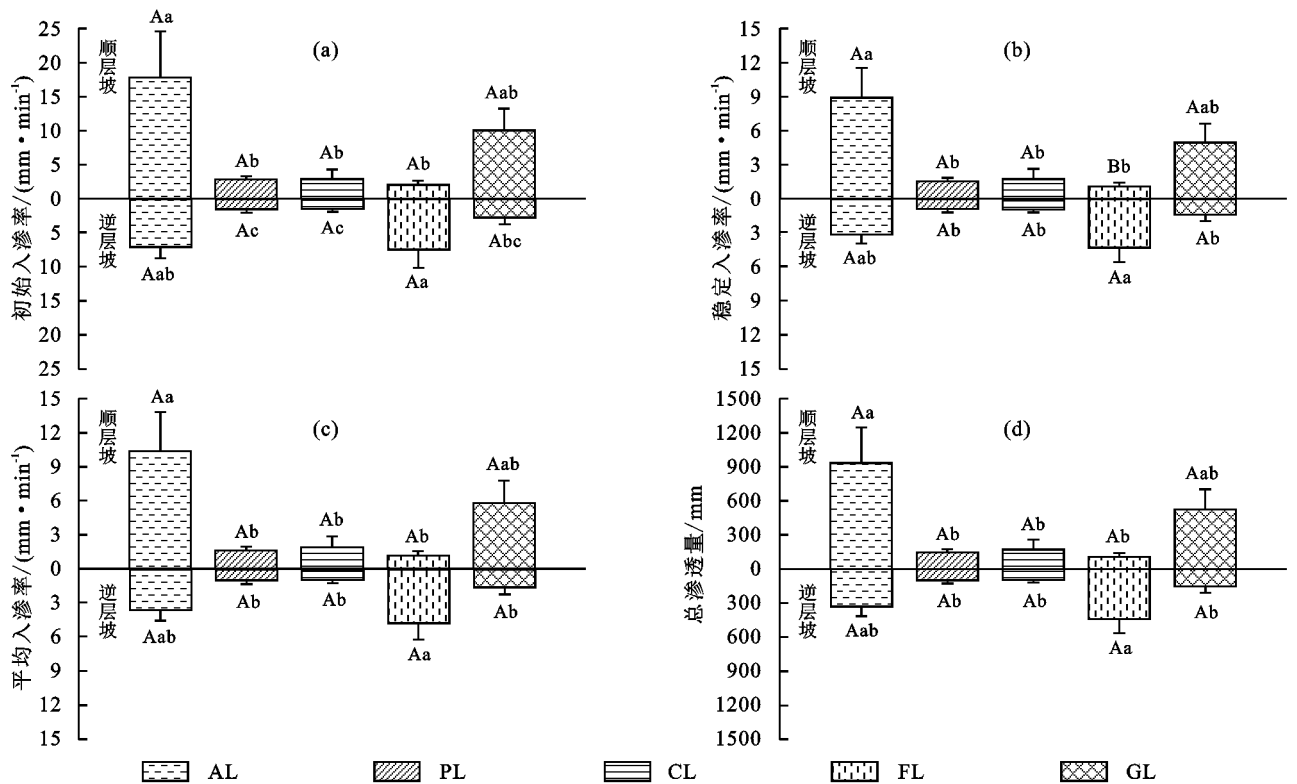


图 2 不同岩层倾向下土壤入渗过程

2.1.2 土壤入渗特征 初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和总渗透量等土壤渗透特性指标是评价水分入渗快慢的重要指标。顺/逆层坡的土壤渗透特性指标变化规律均为初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率(图 3)。顺层坡土壤初始入渗率在 2.04~17.76 mm/min,其中 AL 初始入渗率最大,为 17.76 mm/min,分别是 FL、PL、CL、GL 的 8.71,6.32,6.11,1.77 倍。逆层坡土壤初始入渗率为 1.59~7.54 mm/min,其中 FL 初始入渗率最大,为 7.54 mm/min,分别是 CL、PL、GL、AL 的 4.74,4.60,2.66,1.05 倍。由此可知,顺/逆层坡的不同土地利用方式下土壤初始入渗率存在差异,初始入渗率在顺层坡下为 AL 最大,FL 最小;逆层坡下 FL 最大,CL 最小。此外 AL 顺/逆层坡初始入渗率差值最大,为 10.60 mm/min,此后依次为 GL(7.20 mm/min)、FL(5.50 mm/min)、CL(1.32 mm/min)、PL(1.17 mm/min),但除 FL 外,其余 4 种土地利用方式的初始入渗率均为顺层坡>逆层坡。从土地利用方式来看,顺/逆层坡初始入渗率均值在 AL 最大为 12.46 mm/min,此后依次表现,为 GL(6.44 mm/min)>FL(4.79 mm/min)>CL(2.25 mm/min)>PL(2.22 mm/min)。顺/逆层坡的稳定入

率、平均入渗率和总渗透量分别为 0.98~8.92 mm/min,1.06~10.37 mm/min,95.63~933.43 mm,三者在不同岩层倾向与不同土地利用方式间的变化规律与初始入渗率的变化规律基本一致。在顺层坡三者大小均表现为 AL>GL>CL>PL>FL;在逆层坡稳定入渗率表现为 FL>AL>GL>CL>PL,平均入渗率与总渗透量表现为 FL>AL>GL>PL>CL;除 FL 外,其余 4 种土地利用方式下三者均为顺层坡>逆层坡,且 AL 的顺/逆层坡差异最大,此后依次表现为 GL>FL>CL>PL。结合对各样地的入渗性能进行独立样本 T 检验以及单因素方差分析可知,当岩层倾向相同时,不同土地利用方式之间存在明显差异($p < 0.05$);当土地利用方式相同时,除 FL 的稳定入渗率在顺/逆层坡存在显著差异($p < 0.05$)外,其余土地利用方式下,不同岩层倾向之间的土壤渗透特性指标均没有显著差异($p > 0.05$)。

综上可知,不同岩层倾向间土壤入渗特性存在差异,但差异基本不显著($p > 0.05$),其中 AL 的顺/逆层坡差异最大,PL 最小。土地利用方式变化对土壤渗透特性影响显著($p < 0.05$),其中 AL 土壤渗透性最好,其次为 GL 与 FL,CL 与 PL 最差。



注:图柱上方不同大写字母表示相同土地利用方式下不同岩层倾向之间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示相同岩层倾向向下不同土地利用方式之间差异显著($p < 0.05$)。

图3 不同岩层倾向下土壤入渗特征

2.2 不同岩层倾向的土壤物理特性

土壤容重、孔隙度、持水量、团聚体含量、机械组成等物理特性可以反映土壤结构状况,并直接影响土壤入渗能力。对顺/逆层坡物理特性进行独立样本 T 检验(表2)可知, >0.25 mm 水稳性团聚体含量、毛管持水量、黏粒以及粉粒含量在顺/逆层坡存在显著差异($p < 0.05$),容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、 >5 mm 水稳性团聚体含量、 >2 mm 水稳性团聚体含量、饱和持水量以及砂粒含量在顺/逆层坡无显著差异($p > 0.05$)。在土壤容重方面,CL 的顺/逆层坡容重均值最大,为 1.42 g/cm^3 ,显著区别于其他土地利用方式,分别为 PL、GL、FL、AL 的 $1.04, 1.09, 1.11, 1.15$ 倍。在孔隙度方面,顺/逆层坡总孔隙度均值在 AL 最大,CL 最小,具体表现为 $\text{AL}(51.85\%) > \text{FL}(49.35\%) > \text{PL}(48.36\%) > \text{GL}(47.61\%) > \text{CL}(45.98\%)$;顺/逆层坡的非毛管孔隙度均在 AL 最大,分别为 19.07% 与 18.66% ,整体来看,顺/逆层坡非毛管孔隙度均值依次为 $\text{AL}(18.86\%) > \text{PL}(15.15\%) > \text{CL}(14.06\%) > \text{GL}(13.52\%) > \text{FL}(11.59\%)$ 。在水稳性团聚体方面,顺/逆层坡的 $>5, >2, >0.25$ mm 水稳性团聚体含量均值均表现为 $\text{GL} > \text{FL} > \text{AL} > \text{PL} > \text{CL}$,其中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量在顺层坡表现为 $\text{GL} > \text{FL} > \text{AL} > \text{CL} > \text{PL}$,在逆层坡表现为 $\text{GL} > \text{FL} > \text{AL} > \text{PL} > \text{CL}$ 。虽然 GL 的水稳性团聚体含量显著高于其他土地利用方式,但 >0.25

mm 水稳性团聚体含量在 GL 的顺/逆层坡差值却最小为 3.29% ,在 PL 最大为 29.38% ,且二者均为逆层坡 $>$ 顺层坡。在持水量方面,顺/逆层坡饱和持水量均值在 AL 最大,为 424.29 g/kg ,显著高于其他土地利用方式,分别为 FL、GL、PL、CL 的 $1.07, 1.12, 1.18, 1.27$ 倍。顺/逆层坡毛管持水量均值在 FL 最大,为 301.91 g/kg ,分别为 AL、GL、PL、CL 的 $1.13, 1.13, 1.23, 1.32$ 倍,其中 FL 在顺/逆层坡下的毛管持水量差异也最大,为 104.23 g/kg ,此后依次为 CL、PL、GL、AL。除 FL 与 CL 的毛管持水量为逆层坡 $>$ 顺层坡外,其余 3 种土地利用方式均为顺层坡 $>$ 逆层坡。在机械组成方面,不同岩层倾向与土地利用方式下土壤机械组成存在差异,但根据美国制土壤分类标准可知^[21],其土壤质地均为粉壤土。顺/逆层坡黏粒差异在 CL 最大,逆层坡显著高于顺层坡,差值为 2.26% ,其余 4 种土地利用方式的顺/逆层坡差异较小且呈相反趋势,依次为 GL(1.94%)、AL(1.53%)、PL(1.44%)、FL(1.16%)。除 FL 的粉粒含量为顺层坡 $>$ 逆层坡外,其余 4 种土地利用方式的粉粒含量均为逆层坡 $>$ 顺层坡,但 CL 的顺/逆层坡粉粒含量差异最大。此外,CL(7.61%)的顺/逆层坡砂粒含量差异也明显高于 FL(2.62%)、PL(1.43%)、AL(1.03%)、GL(0.52%)。综上,在 >0.25 mm 水稳性团聚体含量与毛管持水量方面,分别为 PL 和 FL 的顺/逆层坡差异

最大,在黏粒和粉粒方面,CL 的顺/逆层坡差异最大,且均为逆层坡>顺层坡。

表 2 不同岩层倾向下土壤物理特性

岩层倾向	土壤物理特性	AL	PL	CL	FL	GL
顺层坡	$BD/(g \cdot cm^{-3})$	1.23±0.05Ab	1.32±0.06Aab	1.48±0.09Aa	1.37±0.08Aab	1.20±0.09Ab
	$TP/\%$	52.60±1.02Aa	50.55±1.65Aab	43.07±2.71Ac	45.20±2.89Bbc	49.38±2.46Aabc
	$NCP/\%$	19.07±2.21Aa	15.69±2.64Aa	13.70±3.03Aa	11.42±2.20Aa	17.78±1.76Aa
	>5 mm WSA/%	10.51±1.72Ab	5.34±1.38Ab	5.23±0.62Ab	7.63±2.46Bb	17.77±1.89Aa
	>2 mm WSA/%	19.84±4.20Ab	11.76±3.31Ab	15.62±3.55Ab	21.40±6.63Aab	36.61±7.26Aa
	>0.25 mm WSA/%	63.64±2.60Abc	35.51±4.76Bd	55.37±2.87Ac	66.13±4.56Bb	79.03±1.05Aa
	$DWHC/(g \cdot kg^{-1})$	431.25±27.45Aa	388.42±24.94Aab	301.53±37.70Ab	337.68±31.80Bab	431.46±53.52Aa
	$CWHC/(g \cdot kg^{-1})$	271.93±10.14Aa	260.00±8.11Aa	201.18±11.99Bb	249.79±20.47Bab	273.39±27.77Aa
	Clay/%	16.14±0.34Aab	17.08±0.33Aa	14.19±0.35Bc	15.65±0.44Ab	17.15±0.65Aa
	Silt/%	79.45±0.37Bab	79.85±0.31Aa	72.91±0.74Bc	80.85±0.46Aa	78.00±0.69Bb
	Sand/%	4.40±0.26Abc	3.07±0.32Bc	12.90±0.83Aa	3.50±0.24Abc	4.85±0.27Ab
	$BD/(g \cdot cm^{-3})$	1.24±0.04Abc	1.41±0.05Aa	1.35±0.05Aab	1.18±0.03Bc	1.40±0.02Aa
	$TP/\%$	51.10±1.74Aab	46.17±1.95Ac	48.89±1.28Abc	53.50±1.43Aa	45.84±0.78Ac
	$NCP/\%$	18.66±1.72Aa	14.60±2.02Aab	14.42±1.47Aab	11.77±1.08Abc	9.26±0.96Bc
逆层坡	>5 mm WSA/%	12.33±3.61Ab	5.44±0.76Ac	1.21±0.25Bc	18.33±0.84Aa	20.33±0.83Aa
	>2 mm WSA/%	26.08±7.29Aa	18.75±4.11Aab	5.80±1.25Bb	35.17±7.15Aa	35.86±7.22Aa
	>0.25 mm WSA/%	67.47±5.63Ab	64.89±2.14Ab	32.20±1.16Bc	81.02±1.75Aa	82.32±1.24Aa
	$DWHC/(g \cdot kg^{-1})$	417.33±24.10Aab	331.98±25.41Ac	366.17±22.02Abc	454.01±20.34Aa	328.32±10.08Ac
	$CWHC/(g \cdot kg^{-1})$	263.77±9.81Ab	225.09±7.62Bb	257.42±13.52Ab	354.03±21.39Aa	261.66±8.98Ab
	Clay/%	14.62±0.58Bab	15.64±0.28Bab	16.45±0.54Aa	14.49±0.98Ab	15.21±0.33Bab
	Silt/%	82.02±0.19Aa	79.86±0.25Aa	78.25±0.61Aa	79.39±2.67Aa	80.46±0.31Aa
	Sand/%	3.37±0.50Aa	4.50±0.36Aa	5.29±0.38Ba	6.12±1.94Aa	4.33±0.28Aa

注:BD 为容重;TP 为总孔隙度;NCP 为非毛管孔隙度;>5 mm WSA 为>5 mm 水稳性团聚体;>2 mm WSA 为>2 mm 水稳性团聚体;>0.25 mm WSA 为>0.25 mm 水稳性团聚体;DWHC 为饱和持水量;CWHC 为毛管持水量;Clay 为黏粒;Silt 为粉粒;Sand 为砂粒;表中数据为平均值±标准误差;不同大写字母表示相同土地利用方式下不同岩层倾向间差异显著($p<0.05$);同行不同小写字母表示相同岩层倾向下不同土地利用方式间差异显著($p<0.05$)。

2.3 不同岩层倾向的土壤物理特性对入渗的影响

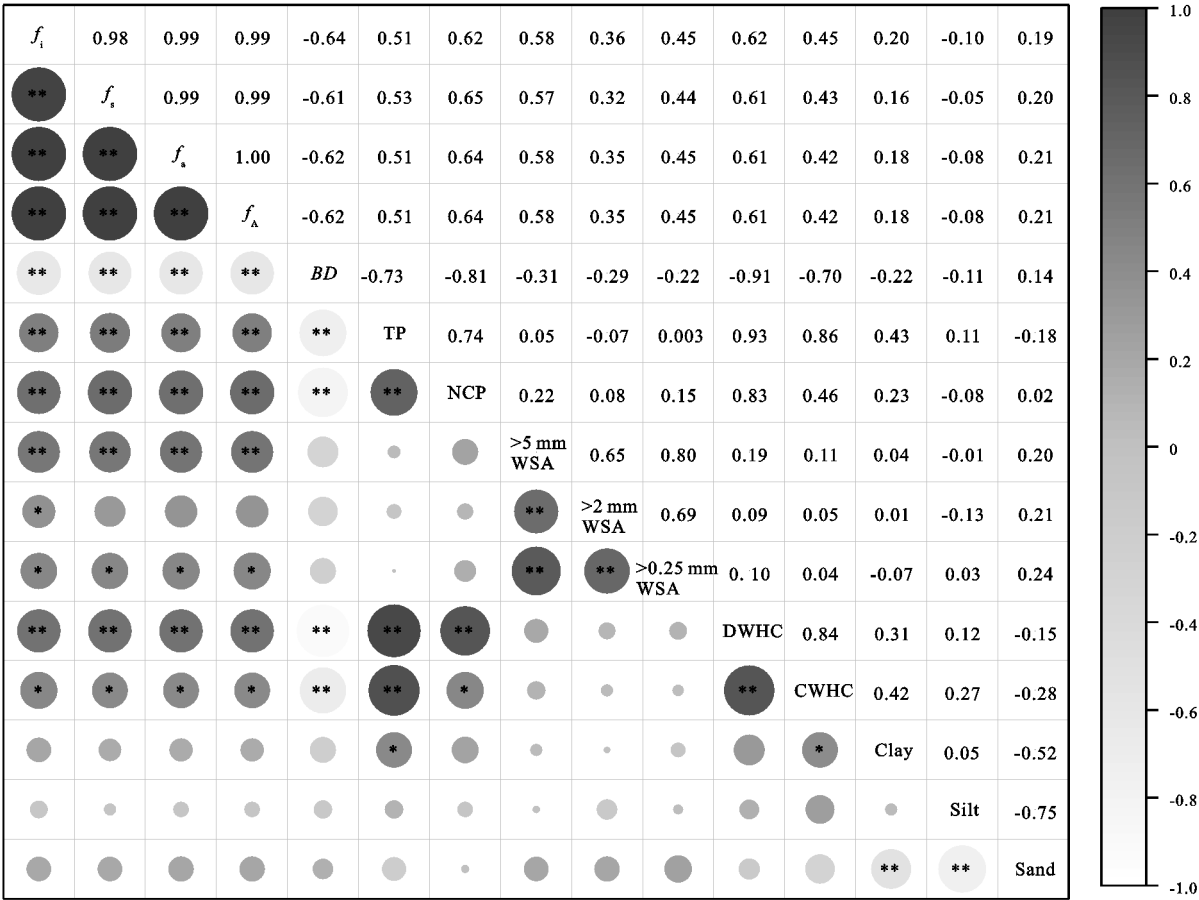
皮尔森(Pearson)相关系数与斯皮尔曼(Spearman)相关系数均可用于描述两变量相关性,但 Pearson 相关系数要求数据服从正态分布,Spearman 相关系数则不需要^[22]。对 4 种土壤渗透特性指标经正态性检验结果可知,均呈偏态分布,因此本研究选用 Spearman 相关系数分析土壤的物理特性与渗透特性的相关关系(图 4,图 5)。在顺层坡,土壤渗透特性与容重呈极显著负相关关系($p<0.01$),与总孔隙度、非毛管孔隙度、>5 mm 水稳性团聚体含量和饱和持水量均呈极显著正相关关系($p<0.01$),与>0.25 mm 水稳性团聚体、毛管持水量均呈显著正相关关系($p<0.05$),但与土壤机械组成相关性均不显著($p>0.05$)。在逆层坡,4 种土壤入渗特性指标与容重均呈极显著负相关关系($p<0.01$),与非毛管孔隙度、饱和持水量和粉粒含量均呈极显著正相关关系($p<0.01$),与黏粒含量呈显著负相关关系($p<0.05$),与团聚体含量均不显著($p>0.05$)。此外,在顺/逆层坡,土壤容重与总孔隙度和非毛管孔隙度

二者均呈极显著负相关关系($p<0.01$)。

单因子相关性分析仅能表明,土壤物理特性和入渗特性二者之间的密切程度,并不能准确表达影响土壤入渗的主要因素,因此通过多元逐步回归分析和通径分析,识别出影响水分入渗的主要因素。杜家菊等^[23]研究指出,因变量需呈正态分布才能进行回归分析和通径分析。对 4 种土壤渗透特性指标进行平方根变换后[令因变量为(因变量)^{0.5}],均呈正态分布。经分析后发现对 4 种土壤渗透特性指标的影响因素均相同,因此本研究仅对顺/逆层坡下的平均入渗率(f_a)进行多元逐步回归分析与通径分析。由多元逐步回归方程 1、方程 2(表 3)可知,顺/逆层坡影响平均入渗率(f_a)的首要因素均为土壤容重(BD)。剔除容重(BD)后,继续对顺/逆层坡的平均入渗率(f_a)进行多元逐步回归分析与通径分析,明确其余因子的影响程度。由回归方程 3、方程 4(表 3)可知,在顺层坡,影响平均入渗率(f_a)的关键因素为土壤饱和持水量(DWHC)与>5 mm 水稳性团聚体(>5 mm WSA),在逆层坡,为土壤饱和持水量(DWHC)与粉粒含

量(Silt)。由表 4 可知,饱和持水量、 >5 mm 水稳性团聚体含量和粉粒含量的直接途径作用、间接途径作用均大于 0,表明三者对土壤入渗特性均为促进作用。在顺层坡, >5 mm 水稳性团聚体含量对平均入渗率的总作用最大,直接作用为 0.059,通过饱和持水量的间接作用

为 0.114,且 >5 mm 水稳性团聚体含量的决策系数也最大。在逆层坡,粉粒含量对平均入渗率的总作用最大为 0.274,直接作用为 0.087,通过饱和持水量的间接作用为 0.187,间接作用大于直接作用。此外,粉粒的决策系数也大于饱和持水量为 0.099。



注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关; f_i 为初始入渗率; f_s 为稳定入渗率; f_a 为平均入渗率; f_A 为总渗透量。下同。

图 4 顺坡层土壤物理特性与渗透特性的相关性

综上可知,平均入渗率的决策因素在顺层坡依次为容重、 >5 mm 水稳性团聚体含量、饱和持水量,在逆层坡依次为容重、粉粒含量、饱和持水量。因此,在本研究中要提高土壤入渗率,最关键是在顺/逆层坡降低土壤容重,其次在顺层坡需要提高 >5 mm 水稳性团聚体含量,在逆层坡需要提高粉粒含量。

2.4 不同岩层倾向下土壤入渗过程拟合模型

在 Kostiakov 模型中,由拟合结果可知, a 值为 1.67~17.99,在顺层坡的大小排序依次为 AL>GL>CL>PL>FL,逆层坡依次为 FL>AL>GL>PL>CL,这与实测的初始入渗速率规律一致。 b 值为 0.08~0.16,顺/逆层坡大小排序均为 AL>GL>PL>FL>CL,表明随时间延长,AL 入渗率下降得最快,CL 下降得最慢。PL 的 b 值在逆层坡>顺层坡,表明 PL 入渗率在逆层坡下降得最快,而其余土地利用方式下均在顺层坡下降得最快。Mezencev 模型与 Kostiakov 模型相比较, a 值的变化规律基本一致,且

除极少数情况外,Mezencev 模型中 a 值基本小于 Kostiakov 模型。这可能是因为当 $t \rightarrow 1$ 时,Kostiakov 模型中 $f(t)$ 为初始入渗率,Mezencev 模型中 $f(t)$ 为稳定入渗率 c 加上 a ,因此 Mezencev 模型中 a 值较小。但 Mezencev 模型中 b 值基本大于 Kostiakov 模型,这可能是因为 Mezencev 模型中 $f(t)$ 为稳定入渗率 c 加上 at^{-b} ,当两模型在同等时间内需达到同一入渗速率时,Mezencev 模型必须以更快的入渗速率下降,则 b 值较大。Horton 模型中 k 值与 Mezencev 模型以及 Kostiakov 模型中的 b 值表征意义相同,均反映入渗能力衰减的快慢程度。 k 值为 0.06~0.24,在顺层坡 k 值从大到小依次为 PL(0.24)>CL(0.12)>GL(0.07)=AL(0.07)>FL(0.06),在逆层坡 k 值从大到小依次为 CL(0.23)>AL(0.14)>GL(0.10)>FL(0.09)>PL(0.07)。由此可知,在不同岩层倾向下,各土地利用方式的土壤入渗率衰减速率差异较大,CL、AL、GL 以及 FL 的入渗率衰减速率均为逆层坡>顺层坡,而 PL 的

入渗率衰减速率为顺层坡>逆层坡。在 Philip 模型中,拟合结果显示, B 值为 0.36~9.92,较为分散,说明不同土地利用方式的入渗强度差异较大。在顺层坡土壤入渗能力从大到小依次为 $AL(9.92)>GL(5.56)>FL(1.13)>CL(1.08)>PL(0.87)$;在逆层坡土壤入渗能力从

大到小依次为 $AL(3.23)>FL(3.18)>GL(1.28)>PL(0.75)>CL(0.36)$ 。由此可见,FL 入渗能力为逆层坡>顺层坡,而 PL、AL、CL 和 GL 均呈相反趋势。总体来看,AL 土壤入渗强度最大,PL 和 CL 入渗强度较小,GL 与 FL 居中。

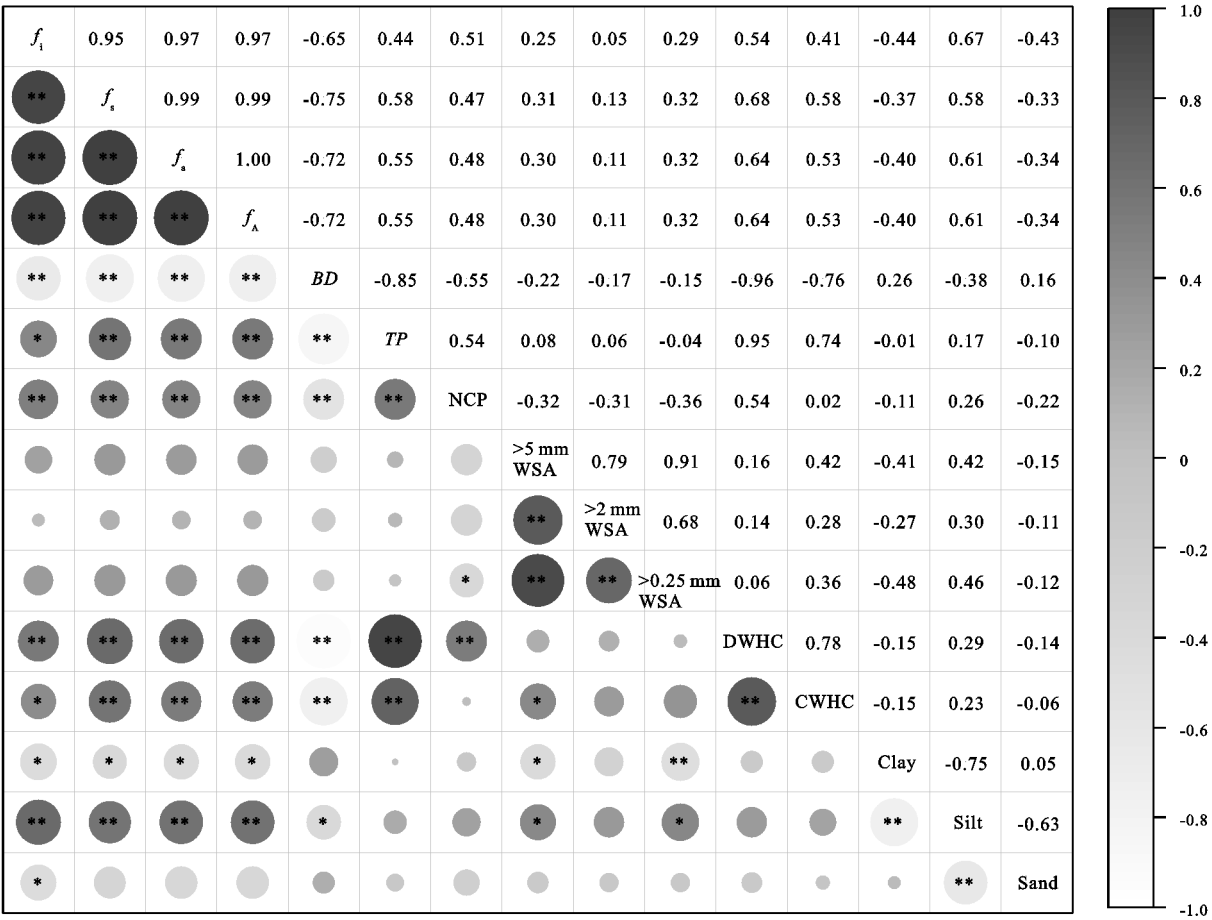


图 5 逆坡层土壤物理特性与渗透特性的相关性

表 3 顺/逆层坡下多元逐步回归方程

回归方程	岩层倾向	回归方程表达式	p	R^2
方程 1	顺层坡	$(f_a)^{0.5}=6.257-3.428\times BD$	<0.01	0.372
方程 2	逆层坡	$(f_a)^{0.5}=5.672-3.236\times BD$	<0.01	0.371
方程 3	顺层坡	$(f_a)^{0.5}=-1.009+0.006\times DWHC+0.059\times(>5\text{mm WSA})$	<0.01	0.444
方程 4	逆层坡	$(f_a)^{0.5}=-7.521+0.005\times DWHC+0.087\times \text{Silt}$	<0.01	0.450

表 4 土壤物理特性对平均入渗率的通径分析

岩层倾向	影响因素	与 $(f_a)^{0.5}$ 的简单相关系数	直接作用	间接作用		总作用	决策系数
				饱和持水量	>5 mm 水稳性团聚体		
顺层坡	饱和持水量	0.615	0.006		0.108	0.114	0.007
	>5 mm 水稳性团聚体	0.580	0.059	0.114		0.173	0.065
	剩余因素		0.746				0.556
逆层坡	饱和持水量	0.644	0.005		0.177	0.182	0.006
	粉粒	0.611	0.087	0.187		0.274	0.099
	剩余因素		0.742				0.550

不同模型对顺/逆层坡土壤入渗过程的拟合精度与适用性存在差异(表 5)。决定系数(R^2)与纳什系数(N_{ES})两者越接近于 1,均方根误差(RMSE)越接近于 0,表明模型拟合精度越高。Mezencev 模型和

Kostiakov 模型的拟合效果明显高于 Horton 模型和 Philip 模型。Mezencev 模型 R^2 均在 0.92 以上, N_{ES} 基本接近于 1,RMSE 接近于 0;其次为 Kostiakov 模型, R^2 、 N_{ES} 、RMSE 分别为 0.77~0.98,0.77~0.98,

0.02~0.32;而后是 Philip 模型, R^2 、 N_{ES} 、RMSE 分别为 0.74~0.93,0.74~0.93,0.06~0.78;Horton 模型对土壤入渗过程的拟合优度最差, R^2 与 N_{ES} 最小仅为 0.47, RMSE 为 0.03~0.63。Kostiakov 模型虽对不同岩层倾向的土壤入渗过程拟合效果较好,但当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$ 与实际趋近于稳定入渗率不

符^[19]。Mezencev 模型中的常数项稳定入渗率 c 值可以较好避免 Kostiakov 模型的问题,但 c 值存在负数,这与实际不符。此外,使用 Philip 模型的模拟值与入渗实测值进行独立样本 T 检验, p 均 >0.05 ,表明模拟值与实际值不存在显著差异。综上,Philip 模型对顺/逆层坡的土壤入渗过程拟合适用性最高。

表 5 入渗模型拟合

模型	指标	顺层坡					逆层坡				
		AL	PL	CL	FL	GL	AL	PL	CL	FL	GL
Kostiakov 模型 $f(t)=at^{-b}$	a	17.99	2.32	2.72	1.93	9.88	6.20	1.67	1.37	7.23	2.65
	b	0.16	0.11	0.10	0.11	0.15	0.15	0.12	0.08	0.11	0.13
	R^2	0.97	0.81	0.97	0.96	0.98	0.91	0.98	0.77	0.98	0.96
	N_{ES}	0.97	0.81	0.97	0.96	0.98	0.91	0.98	0.77	0.98	0.96
	RMSE	0.35	0.10	0.05	0.04	0.17	0.22	0.02	0.05	0.09	0.05
	c	-64.49	1.53	1.42	0.89	-14.93	2.57	-1.34	1.01	1.54	0.76
Mezencev 模型 $f(t)=c+at^{-b}$	a	81.86	1.21	1.44	1.12	24.55	4.05	2.98	0.56	5.77	1.95
	b	0.03	0.81	0.32	0.27	0.05	0.38	0.06	0.75	0.16	0.21
	R^2	0.98	0.96	0.99	0.97	0.98	0.93	0.98	0.92	0.98	0.97
	N_{ES}	0.98	0.96	0.99	0.97	0.98	0.93	0.99	0.93	0.98	0.97
	RMSE	0.32	0.04	0.03	0.03	0.16	0.20	0.02	0.03	0.09	0.05
	f_s	8.92	1.51	1.74	1.08	4.94	3.22	0.98	1.03	4.38	1.49
Horton 模型 $f(t)=f_s+(f_i-f_s)e^{-kt}$	f_i-f_s	8.84	1.30	1.17	0.96	5.10	3.94	0.66	0.56	3.16	1.34
	k	0.07	0.24	0.12	0.06	0.07	0.14	0.07	0.23	0.09	0.10
	R^2	0.92	0.75	0.82	0.47	0.84	0.66	0.96	0.84	0.84	0.77
	N_{ES}	0.92	0.75	0.82	0.47	0.84	0.66	0.96	0.84	0.84	0.77
	RMSE	0.63	0.11	0.11	0.13	0.47	0.44	0.03	0.04	0.28	0.14
	f_s	8.92	1.51	1.74	1.08	4.94	3.22	0.98	1.03	4.38	1.49
Philip 模型 $f(t)=f_s+Bt^{-0.5}$	B	9.92	0.87	1.08	1.13	5.56	3.23	0.75	0.36	3.18	1.28
	R^2	0.87	0.83	0.93	0.89	0.90	0.89	0.87	0.74	0.92	0.91
	N_{ES}	0.87	0.83	0.93	0.89	0.90	0.89	0.87	0.74	0.92	0.91
	RMSE	0.78	0.09	0.07	0.06	0.37	0.25	0.06	0.06	0.21	0.08

3 讨论

3.1 岩层倾向对土壤入渗特性的影响

土壤入渗是地表最重要的过程之一,对地表水、地下水和土壤水库间的水循环有重要影响^[24]。通过多元逐步回归分析与通径分析可知,影响本研究顺/逆层坡土壤入渗率的首要决策因素均为土壤容重,其次分别为 >5 mm 水稳性团聚体含量和粉粒含量。这与许胜兵等^[25]、李建兴等^[7]认为,土壤入渗率的决策因素为土壤孔隙度的研究结果不一致。一般认为容重越大,土壤越紧实,孔隙度越少,土壤入渗能力越差^[24],这与本研究结果土壤容重与孔隙度(总孔隙度与非毛管孔隙度)呈极显著负相关关系一致,表明土壤容重与孔隙度关系密切。有学者^[26]指出,团聚体的粒径分布以及稳定性均会影响水分入渗。在团聚体的粒径分布方面, >5 mm 水稳性团聚体含量越高,土壤颗粒间孔隙越大,则入渗率能力越大^[27];在团聚体稳定性方面, >5 mm 水稳性团聚体含量越高土壤结构越稳定,遇水被分散的颗粒越少,则土壤孔隙被堵塞程度明显降低^[28]。在机械组成上,当土壤机械组成越细化,即黏粒含量越高,粉粒、砂粒含量越低,则土壤吸附能力和孔隙度越低,土壤入渗

能力越弱^[29]。土壤入渗是水分在孔隙中不断深入的过程^[30],土壤的各物理性质均会对孔隙度产生影响,因此土壤容重、土壤团聚体、机械组成对入渗能力的影响其实质均为土壤孔隙度对土壤入渗能力的影响。

本研究发现,FL 的入渗能力在逆层坡 $>$ 顺层坡,这可能是因为顺层坡的土壤容重显著高于逆层坡,而土壤容重与入渗能力呈负相关关系,从而导致逆层坡入渗能力大于顺层坡;其次与顺层坡土层厚度 50—70 cm,枯枝落叶层厚 1~2 cm 相比,逆层坡的马尾松和杉树林土层较厚,可达 80 cm,微生物多^[11],枯枝落叶层厚 2~3 cm,枯枝落叶层的分解有利于团聚体的形成^[27],改善土壤结构,从而改善土壤入渗能力。这与覃自阳等^[11]、Fabioc 等^[31]认为,逆层坡以地下产流为主,顺层坡以地表产流为主的研究结果一致,与贾洪杰等^[10]认为,顺层坡土壤含水率高、通透性好,入渗能力强于逆层坡的研究结果相反。可能是因为土壤水分差异所致,贾洪杰等^[10]认为,顺层坡的岩石裸露率高,裸岩会促进土壤水分汇集,使顺层坡土壤水分高于逆层坡。不仅裸岩会影响土壤水分运移,土层厚度也有重要影响^[32]。在本研究中逆层坡 FL 的土层厚度大于顺层坡,土层

厚度越大,土壤含水率越高^[32]。而土壤水分是土壤中物质运输和转化的载体^[10],土壤水分的不同导致顺/逆层坡的容重、孔隙度等也产生差异,从而影响土壤入渗能力。AL、PL、GL 和 CL 的入渗能力均为顺层坡>逆层坡,究其原因可能是 AL、PL、GL 的土壤容重均为顺层坡<逆层坡,孔隙度(总孔隙度与非毛管孔隙度)均为顺层坡>逆层坡,由于土壤容重与土壤入渗率呈极显著负相关关系,孔隙度与土壤入渗率呈显著或极显著正相关关系,则 AL、PL 和 GL 的入渗能力均为顺层坡>逆层坡。CL 的容重虽为顺层坡>逆层坡,喀斯特地区存在水土流/漏失现象,顺层坡下黏粒等细颗粒易顺着岩层走向流失,逆层坡黏粒等细颗粒易发生漏失^[12],使土壤机械组成存在差异,导致 CL 顺层坡土壤机械组成的粗化程度显著高于逆层坡。已有研究^[33]表明,土壤机械组成越粗化,即砂粒含量越高,土壤质地越疏松,入渗能力越强。因此 CL 的入渗能力为顺层坡>逆层坡。

3.2 土地利用方式对土壤入渗特性的影响

土地利用方式可能对自然现象及环境产生巨大影响^[34],合理的土地利用方式可提高土壤抗蚀能力、改善土壤质地等,而不合理的土地利用方式,则会导致土壤退化,增加土壤流失量^[35]。通过比较不同土地利用方式下的土壤入渗特征可知,AL 入渗性能最好,其次为 GL 与 FL,CL 和 PL 最差。这可能是因为 AL 容重最小,孔隙度最大,因而入渗率最大。GL、FL 与 CL、PL 相比人为扰动较少,而土壤入渗率与土壤的扰动程度有密切联系^[36]。已有研究^[24]表明,在植被的恢复过程中,自然恢复状态下由于土壤扰动减少以及土地管理方式的影响,致使土壤渗透性能显著提升。FL 虽然所受扰动较少,但 FL 土样表层可能存在生物结皮,结皮层的存在堵塞土壤表层的基质孔,导致入渗开始时具有较强的拒水性^[37],这与本研究发现,GL 孔隙度大于 FL 研究结果相符,因此 FL 入渗率小于 GL。已有研究^[38]认为,植被恢复等级越高,土壤入渗能力越强。但本研究中,AL 的入渗能力大于 GL 与 FL,这可能是因为 GL 与 FL 由于根系新陈代谢以及植被的长期覆盖减少水土流失作用,则其有机质含量较高,而较高的有机质可能对水分的吸附作用大于增加孔隙度的导水作用,从而阻碍入渗^[12];其次可能与测定方法有关,定水头法由于花费较少且操作简单被广泛用于测定土壤入渗率,但此方法在采集环刀时对土壤扰动较大^[17],与 AL 相比,GL 与 FL 中的根系对土壤具有锚固、胶结作用^[39],因此在采集环刀时,AL 容重可能会降低,从而导致入渗能力测定结果偏大。

本研究通过通径分析可知,剩余因子的通径系数与决策系数均较大,虽然其包含本研究的首要决策因素土

壤容重,但影响土壤入渗性能的因素较多,包括土壤化学性质、根系、植被覆盖度等,本研究仅探讨了土壤部分物理性质,今后将进一步开展多因素综合分析。

4 结论

(1)顺/逆层坡的土壤入渗过程规律基本一致,均可分为 3 个阶段,即快速下降(0~10 min)、缓慢下降(10~60 min)和稳定阶段(60~90 min),其中在前 3 min 内下降最为明显。除 FL 的土壤渗透能力为顺层坡<逆层坡,差值为 3.66 mm/min 外,其余 4 种土地利用方式下的土壤入渗能力均表现为顺层坡>逆层坡。

(2)土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、>5 mm 水稳性团聚体含量、>2 mm 水稳性团聚体含量、饱和持水量以及砂粒含量在顺/逆层坡无显著差异($p>0.05$),>0.25 mm 水稳性团聚体含量、毛管持水量、黏粒以及粉粒含量在顺/逆层坡存在显著差异($p<0.05$)。其中在>0.25 mm 水稳性团聚体含量和机械组成方面,分别为 PL 与 FL 的顺/逆层坡差异最大,在黏粒和粉粒方面,CL 的顺/逆层坡差异最大,且均为逆层坡>顺层坡。

(3)土壤渗透特性在顺/逆层坡均与容重呈极显著负相关关系($p<0.01$),在顺层坡下与总孔隙度、非毛管孔隙度、>5 mm 水稳性团聚体含量和饱和持水量呈极显著正相关($p<0.01$);在逆层坡下与非毛管孔隙度、饱和持水量和粉粒含量呈极显著正相关($p<0.01$);通过多元逐步回归分析与通径分析发现,顺/逆层坡土壤入渗能力的首要决策因素为容重,其次分别为>5 mm 水稳性团聚体含量和粉粒含量。

(4)对比 4 种土壤入渗过程的拟合模型,Philip 模型对顺/逆层坡的土壤入渗过程拟合效果最佳,其次为 Horton 模型。

参考文献:

- [1] 耿林昇,李红丽,董智,等.放牧对希拉穆仁草原土壤入渗过程影响的定量评估[J].水土保持学报,2022,36(2):70-77.
- [2] 魏瑶瑶,王俊,张永旺,等.黄土高原不同植被类型土壤入渗特征研究[J].延安大学学报(自然科学版),2021,40(2):16-20.
- [3] 蒋忙舟.黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):99-104,111.
- [4] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(3):181-187.
- [5] Fu T G, Gao H, Liang H Z, et al. Controlling factors of soil saturated hydraulic conductivity in Taihang Mountain Region, northern China[J]. Geoderma Regional, 2021, 26: e00417.
- [6] 张冠华,易亮,丁文峰,等.三峡库区苔藓生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].应用生态学报,2022,33(7):

- 1835-1842.
- [7] 李建兴,甘凤玲,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [8] 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.
- [9] Xiao B, Sun F H, Hu K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J].Journal of Hydrology, 2018,568:792-802.
- [10] 贾洪杰,甘凤玲,李振轮,等.岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(16):6107-6113.
- [11] 覃自阳,甘凤玲,何丙辉.岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):68-75,80.
- [12] 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.
- [13] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.
- [14] 张强.青木关岩溶槽谷地下水水源地质脆弱性评价[J].中国岩溶,2012,31(1):67-73.
- [15] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6):836-844.
- [16] 陈英,魏兴萍,张爱国,等.基于复合指纹法的岩溶洼地小流域泥沙来源解析[J].水土保持学报,2020,34(5):131-136,144.
- [17] 康文蓉,张勇勇,赵文智,等.荒漠绿洲过渡带土壤饱和和导水率的空间变异特征[J].水土保持学报,2021,35(5):137-143.
- [18] 朱列坤,戴全厚,李焱秋,等.喀斯特浅层裂隙土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(2):47-54.
- [19] Albalasmeh A A, Alghzawi M Z, Gharaibeh M A, et al. Assessment of the effect of irrigation with treated wastewater on soil properties and on the performance of infiltration models[J].Water,2022,14(9):e1520.
- [20] 王幼奇,阮晓晗,白一茹,等.不同种植年限压砂地土壤水分入渗过程及模型分析[J].排灌机械工程学报,2022,40(10):1048-1055.
- [21] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [22] 于群,霍筱东,何剑,等.基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测[J/OL].中国电机工程学报:1-12[2023-02-16]http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220824.1625.012.html.
- [23] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J].生物学通报,2010,45(2):4-6.
- [24] 程汉亭,李勤奋,王晓敏,等.不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):110-116.
- [25] 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.
- [26] 丁康,徐学选,陈文媛,等.长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征[J].北京林业大学学报,2017,39(12):44-51.
- [27] 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.
- [28] Ma G A, Li G L, Mu X D, et al. Effect of raindrop splashes on topsoil structure and infiltration characteristics[J].Catena,2022,212:e106040.
- [29] Zhang Y Y, Zhao W Z, Li X B, et al. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desert-oasis ecoregion[J].Land Degradation and Development,2020,32(4):1751-1760.
- [30] 张玉琪,梁婷,张德罡,等.祁连山东段退化高寒草甸土壤水分入渗的变化及团聚体对水分入渗的影响[J].草地学报,2020,28(2):500-508.
- [31] Fábirc C N, Romain D, Fritz S, et al. Bedrock bedding, landsliding and erosional budgets in the Central European Alps[J].Terra Nova,2015,27(5):370-378.
- [32] 张志才,陈喜,石朋,等.岩石对喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征的影响[J].水土保持通报,2008,28(6):41-44.
- [33] 张磊,王家文,王嘉学,等.滇东喀斯特山原红壤退化过程中剖面颗粒分形特征[J].水土保持研究,2015,22(4):18-23.
- [34] Kalhor S A, Xu X X, Ding K, et al. The effects of different land-uses on soil hydraulic properties in the Loess Plateau, Northern China[J].Land Degradation and Development,2018,29(11):3907-3916.
- [35] 秦川,何丙辉,蒋先军.三峡库区不同土地利用方式下土壤养分含量特征研究[J].草业学报,2016,25(9):10-19.
- [36] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India [J].Catena,2016,140:155-163.
- [37] Wang H, Zhang G H, Liu F. et al. Temporal variations in infiltration properties of biological crusts covered soils on the Loess Plateau of China[J].Catena, 2017,159:115-125.
- [38] 李青林,杨静,王琨,等.不同植被类型人工绿地土壤饱和和导水能力、持水特征的比较[J].土壤通报,2021,52(4):828-835.
- [39] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of southwest China [J].Plant Ecology,2014,215:1099-1109.