

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.032

张灯煜,冯梦蝶,徐绮雯,等.紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及影响因素[J].水土保持学报,2024,38(4):114-121.

ZHANG Dengyu, FENG Mengdie, XU Qiwen, et al. Characteristics and influencing factors of soil infiltration in different agroforestry types in purple soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 114-121.

紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及影响因素

张灯煜, 冯梦蝶, 徐绮雯, 李天阳, 何丙辉

(西南大学资源环境学院, 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: [目的] 为探究紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及其影响因素。[方法] 通过野外调查和室内试验, 分析紫色土区无作物(CK)、花生(HS)、花椒(HJ)、花生+花椒(HS+HJ) 4 种农林复合模式下土壤物理性质与入渗过程变化特征, 评价了 3 种土壤入渗模型(Kostiakov、Horton、Philip)的适用性。[结果] (1) HJ 模式下土壤总孔隙度与 CK、HS+HJ 模式差异不显著, 但显著高于 HS 模式 ($p < 0.05$); CK 和 HS 模式的土壤抗剪强度差异不显著, 但均显著高于 HJ 模式和 HS+HJ 模式 ($p < 0.05$); 各模式下土壤容重、含水率、温度、斥水性、紧实度、土壤硬度差异均显著 ($p < 0.05$)。 (2) 4 种模式土壤水分入渗过程差异较大, CK 和 HS 下土壤水分入渗在 20 min 左右进入稳渗阶段, 而 HJ 和 HS+HJ 模式下土壤入渗分别在 70, 80 min 左右进入稳渗阶段。HS+HJ 模式的土壤稳定入渗率分别比 CK、HS、HJ 模式高出 162%, 140%, 82% ($p < 0.05$)。 (3) 与 Horton 和 Philip 模型相比, Kostiakov 模型拟合入渗过程的效果最佳 (决定系数 $R^2 = 0.933 \sim 0.991$); Horton 模型拟合效果相对较差 ($R^2 = 0.849 \sim 0.979$)。 (4) 相关性与多元线性回归分析发现, 土壤总孔隙度与土壤抗剪强度是影响土壤入渗的关键因素。[结论] 研究结果为紫色土区农林复合模式的优化选择提供科学依据。

关键词: 紫色土; 土壤水分; 农林复合; 土壤入渗模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0114-08

Characteristics and Influencing Factors of Soil Infiltration in Different Agroforestry Types in Purple Soil Area

ZHANG Dengyu, FENG Mengdie, XU Qiwen, LI Tianyang, HE Binghui

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] To investigate the soil infiltration characteristics of different agroforestry composite modes and their influencing factors types in the purple soil area. [Methods] We analyzed the changes in the soil physical properties and infiltration processes under four agroforestry types in the purple soil area, namely, no crop (CK), peanut (HS), pepper (HJ), and peanut + pepper (HS + HJ), through field surveys and laboratory experiments, and evaluated the applicability of three soil infiltration models including Kostiakov, Horton, and Philip. [Results] (1) The total soil porosity in HJ was not significantly different from that in CK and HS + HJ, but was considerably higher than that in HS ($p < 0.05$); the soil shear strength in CK was similar to that in HS, but were both significantly higher than that of HJ and HS+HJ ($p < 0.05$); the soil bulk density, water content, temperature, water repellency, compactness, and soil hardness were also significantly different among the four agroforestry types ($p < 0.05$). (2) The soil water infiltration process varied significantly among the four types, showing the steady infiltration stage around 20 min under CK and HS, while around 70 and 80 min under HJ and HS + HJ, respectively. The steady infiltration in the HS + HJ was 162%, 140% and 82% higher than that in CK, HS, and HJ, respectively ($p < 0.05$). (3) Compared with the Horton and Philip models, the Kostiakov model was the most effective in

收稿日期: 2024-03-20

修回日期: 2024-04-13

录用日期: 2024-04-23

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-06

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U21A20187)

第一作者: 张灯煜 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zhangdy1001@163.com

通信作者: 何丙辉 (1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态学研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

fitting the infiltration process (coefficient of determination $R^2 = 0.933 \sim 0.991$), while the Horton model fitted relatively poorly ($R^2 = 0.849 \sim 0.979$). (4) The correlation and multiple linear regression analyses found that the total soil porosity and soil shear strength were the key factors affecting soil infiltration. [Conclusion] The results of the study provide scientific basis for the optimal selection of agroforestry types in the purple soil area.

Keywords: purple soil; soil moisture; agroforestry; soil infiltration model

Received: 2024-03-20

Revised: 2024-04-13

Accepted: 2024-04-23

Online(www.cnki.net): 2024-06-06

土壤入渗是指水从土壤表面渗入土壤内部的现象^[1],与地表产流密切相关,对土壤侵蚀具有重要影响。土壤入渗能力较强时,土壤快速吸收水分并储存,减少地表径流和土壤侵蚀^[2]。研究土壤入渗有助于深入理解土壤水分运动和土壤侵蚀机理,以减轻土壤侵蚀对土地资源的不良影响。为提升农业综合效益与生态环境质量^[3],学者们提出了许多农林复合模式,并对其土壤入渗性能开展研究。孟凡旭等^[4]研究不同果农种植模式的土壤入渗发现,林下种植作物能够显著增加土壤入渗;李天阳等^[5]研究表明,不同农林混作模式下土壤基本物理性质与入渗特征差异显著;李建兴等^[6]通过对紫色土坡耕地6种植模式土壤入渗性能进行研究发现,不同种植模式下土壤入渗性能均与土壤深度呈负相关;WANG等^[7]研究发现,与单一种植模式相比,混合种植更能促进土壤入渗;祁栋灵等^[8]认为,混合种植经营模式的综合效益更高。由于区域自然环境与人为活动的差异,不同的农林复合模式下土壤入渗特性具有显著差异。深入研究不同农林复合模式下土壤水分入渗特性及其影响因素,对于筛选合理的区域农林复合模式具有重要的理论价值和实践意义。

紫色土养分丰富、肥力高,是我国重要的土壤资源^[9-10]。但紫色土风化作用弱、质地结构松散,加之自然因素(降雨、干旱等)与人类活动(耕作、灌溉、施肥等)等的影响下,水土流失严重。通过在紫色土区营建不同农林复合模式,有助于实现生态与经济共赢。目前,紫色土区关于农林复合模式的研究多集中于农林混种模式对紫色土土壤理化性质的影响,对不同农林复合模式土壤的入渗规律及其影响因素还认识不足。因此,本研究以紫色土区4种农林复合模式[无作物(CK)、花生(HS)、花椒(HJ)、花生+花椒(HS+HJ)]土壤为研究对象,分析不同模式的土壤物理性质、入渗过程及其适宜性,辨析土壤入渗主要影响因素,以期对紫色土区农林复合模式的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在重庆市江津区(29°07'16"N,106°13'04"

E)慈云镇国家现代农业产业园花椒基地开展。研究区属亚热带季风气候,年平均气温 3.8~24.5℃,年平均日照时间 1 131 h,年平均降水量 1 000~1 500 mm,降雨主要集中在 4—8 月。研究区域选取西南地区典型坡耕地,土壤类型为西南地区典型紫色土。供试植物为花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)与花生(*Arachis hypogaea* Linn.)。花椒品种为“早熟九叶青”,于 2018 年种植;花生品种为“天府 38 号”,按照 1 年 2 季的种植方式,分别于 2020 年 10 月和 2021 年 3 月、2021 年 10 月和 2022 年 3 月进行种植。

1.2 土壤样品采集与测定

2022 年 7 月,分别采集 4 种农林复合模式(CK、HJ、HS、HS+HJ)土壤样品。在各模式样地分别随机选取采样点 3 个,共计 12 个样点,其中“花生+花椒”模式土壤样品采集点距花椒树冠与花生植株各 50~60 cm。每个样点采集 5 个 0—10 cm 土层环刀(100 cm³)样和 5 个铝盒样,用于测定土壤容重、含水率、孔隙度、土壤田间持水量、土壤斥水性及土壤入渗。

土壤容重、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量、土壤抗剪强度、土壤硬度、土壤紧实度参照《土壤物理性质测定法》^[11]测定;土壤含水率测定采用烘干法^[12];土壤斥水性采用滴水穿透时间法(WDPT)^[13]进行测定;依据 WDPT 值的大小,将斥水性分为不斥水(<5 s)、轻微斥水(5~60 s)、强烈斥水(60~600 s)、严重斥水(600~3 600 s)和极端斥水(>3 600 s)5 个等级;土壤入渗采用定水头环刀法^[5]测定。本研究选取入渗开始前 3 min 的入渗速率平均值为初始入渗率;90 min 内的入渗速率平均值为平均入渗率;60~75 min 入渗速率的均值和 75~90 min 入渗速率的均值的平均值为稳定入渗率。

1.3 土壤入渗过程模拟

采用 Kostikov 模型、Horton 模型和 Philip 模型对不同模式下土壤入渗过程进行拟合^[5]。

(1)Kostikov 模型

$$I(t) = at^{-n} \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 和 n 为模型拟合参数。

(2) Horton 模型

$$I(t) = I_f + (I_i - I_f) e^{-ct} \quad (2)$$

式中: I_i 为初始入渗速率(mm/min); I_f 为稳定入渗速率(mm/min); c 为模型参数。

(3) Philip 模型

$$I(t) = A + b t^{-0.5} \quad (3)$$

式中: A 为稳定入渗速率(mm/min); b 为模型参数。

1.4 数据处理

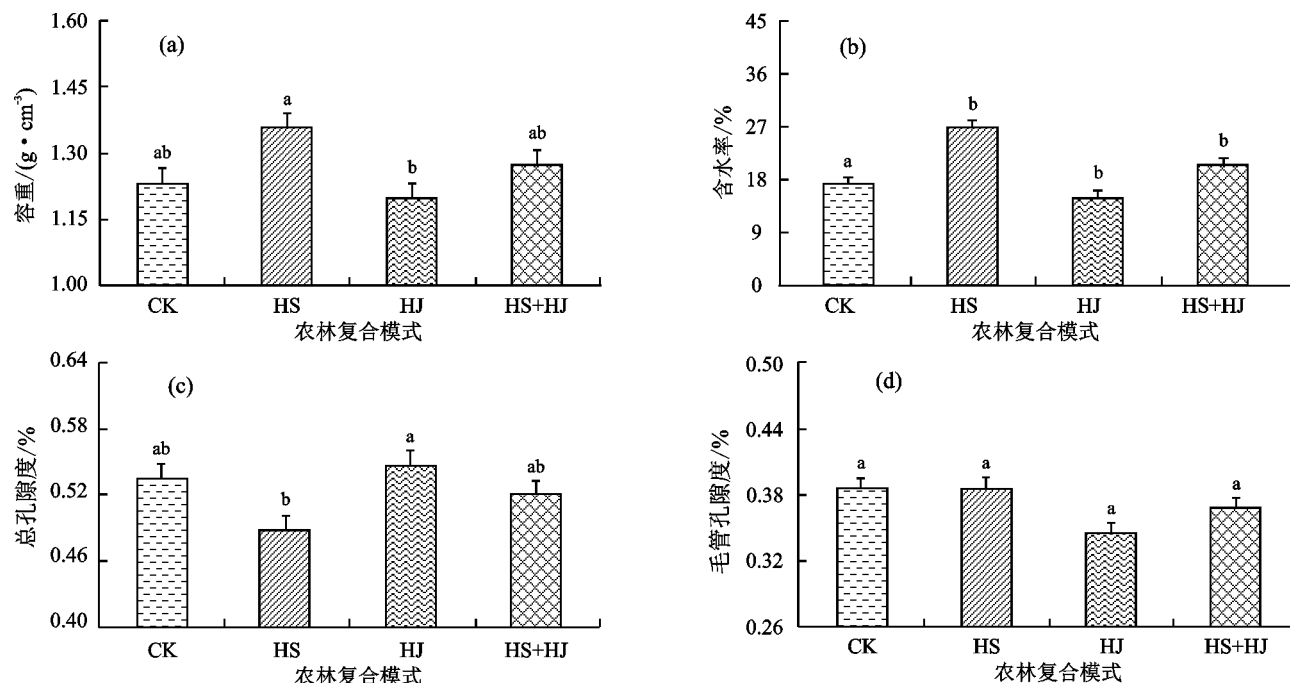
采用 SPSS 26.0 和 Excel 2019 软件进行数据整理分析、图表绘制与土壤入渗过程模型拟合。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同农林复合模式土壤物理性质与入渗指标的差异,并采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较;采用 Pearson 相关性分析探究各土壤入渗指标同土壤物理性质之间的关系;采用多元线性回归分析建立土壤入

渗与土壤物理性质间的数学关系。

2 结果与分析

2.1 不同农林复合模式下土壤物理性质差异

由图 1 可知,不同农林复合模式下土壤容重、含水率、总孔隙度差异显著($p < 0.05$)。HS 模式土壤容重与 CK、HS+HJ 模式土壤容重差异不显著,但显著高于 HJ 模式($p < 0.05$),提高 13.15%。HS、HJ、HS+HJ 模式间土壤含水率差异均不显著,CK 土壤含水率显著高于 HJ、HS 模式以及 HS+HJ ($p < 0.05$),分别提高 23.40%, 15.06%, 14.18%。HJ 的土壤总孔隙度与 CK、HS+HJ 模式土壤总孔隙度差异不显著,但显著高于 HS 模式($p < 0.05$),提高 12.19%;不同农林复合模式下土壤毛细孔隙度间无显著性差异($p > 0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同农林复合模式土壤容重、含水率、总孔隙度、毛细孔隙度变化

Fig. 1 Changes in soil bulk density, water content, total porosity, and capillary porosity under different agroforestry systems

由图 2 可知,不同农林复合模式下各作物土壤斥水性均表现为轻微斥水(WDPT 属于 5~60 s)。HJ、HS+HJ 与 CK 模式间土壤斥水性差异均不显著,HS 土壤斥水性显著低于 HJ、HS+HJ 与 CK($p < 0.05$),分别降低 60.78%, 38.33%, 46.79%。不同农林复合模式下土壤紧实度表现为 HS>CK>HS+HJ>HJ,其中 HS 模式土壤紧实度显著高于 HJ 与 HS+HJ($p < 0.05$),分别提高 81.79%, 47.96%;CK 土壤紧实度显著高于 HJ($p < 0.05$),提高 27.98%。HS 与 CK 之间土壤硬度差异不显著,但显著高于 HJ 与 HS+HJ($p < 0.05$),HS 土壤硬度分别比 HJ 与 HS+HJ 提高 2.43,

2.40 倍;CK 土壤硬度分别比 HJ 与 HS+HJ 提高 1.70, 1.67 倍,HJ 与 HS+HJ 模式之间土壤硬度无显著性差异。CK 和 HS 模式的土壤抗剪强度差异不显著,但均显著高于 HJ 和 HS+HJ($p < 0.05$),CK 土壤抗剪强度分别比 HJ 和 HS+HJ 提高 13.14%, 94.54%;HS 分别比 HJ 和 HS+HJ 提高 20.90%, 72.76%, HJ 土壤抗剪强度比 HS+HJ 提高 42.89%。CK 土壤温度与 HJ、HS+HJ 之间差异不显著,但 CK 土壤温度显著高于 HS($p < 0.05$),提高 7.22%。不同农林复合模式下,土壤田间持水量无显著性差异。总体来看,不同农林复合模式对土壤物理性质存在较大影响。

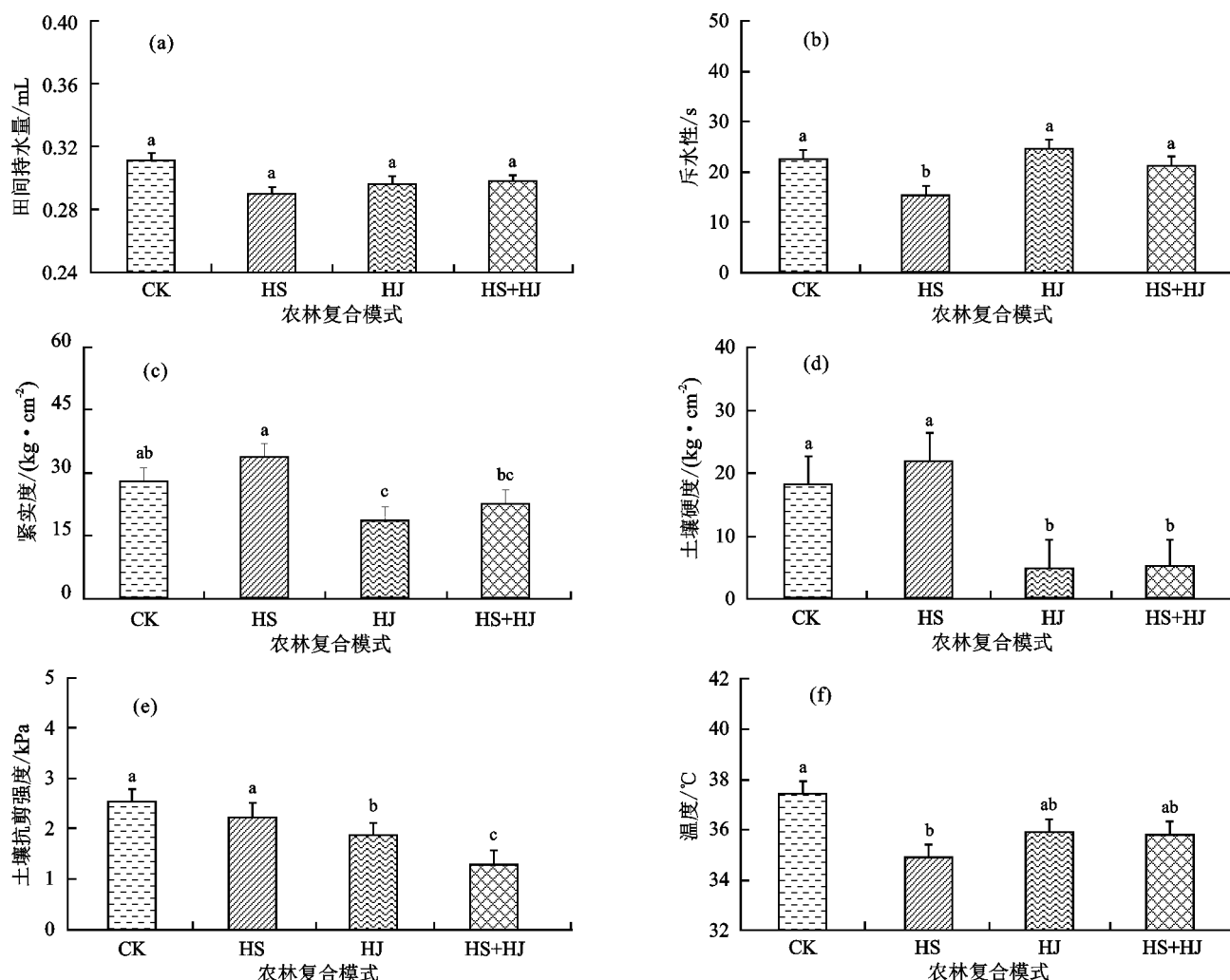


图2 不同农林复合模式土壤田间持水量、斥水性、紧实度、土壤硬度、土壤抗剪强度和温度变化

Fig. 2 Changes in soil field water holding capacity, water repellency, compactness, soil hardness, soil shear strength and temperature under different agroforestry systems

2.2 不同农林复合模式下土壤入渗特征分析

由图3可知,4种不同农林复合模式下的土壤整体入渗过程均呈波动下降趋势;初始入渗速率阶段整体曲线斜率较大,入渗速率衰减较快;除HS+HJ之外的其余3种模式HJ、HS、CK的入渗速率在20 min左右曲线斜率降低速率变缓,整体入渗速率呈稳步下降态势;HS+HJ在60 min左右达到稳定入渗速率,HS和CK在70 min左右达到稳定入渗速率,HJ则在80 min左右达到稳定入渗速率。

由图4可知,不同农林复合模式下土壤入渗能力在稳定入渗阶段以及全过程平均入渗速率均表现为HS+HJ>HJ>HS>CK。不同农林复合模式下的土壤入渗速率差异显著($p<0.05$)。CK初始入渗速率显著低于HS+HJ($p<0.05$),减少64.51%;HS+HJ稳定入渗速率显著高于HS和CK($p<0.05$),分别比HS和CK增多1.40,1.63倍;各模式之间平均入渗速率无显著性差异($p>0.05$)。

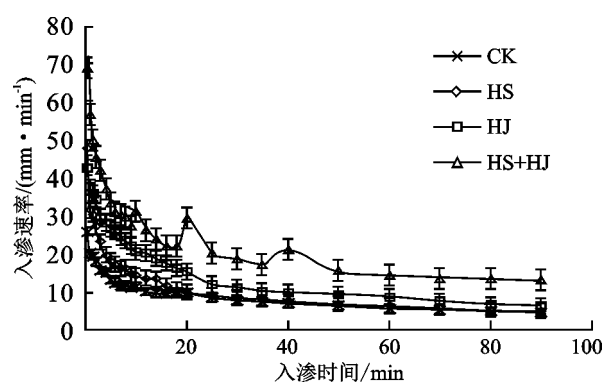


图3 不同农林复合模式土壤入渗速率

Fig. 3 Soil infiltration rates under different agroforestry systems

2.3 不同农林复合模式下土壤入渗过程拟合

Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型拟合结果见表1和图5。Kostiakov入渗模型中 a 值越大,入渗曲线斜率越大,瞬时入渗率衰减的速度越快。不同农林复合模式下 a 值大小关系表现为HS+HJ>HJ>HS>CK,这与实测入渗结果相符。但该

模型在初始入渗阶段拟合结果显示 $HJ > HS$, 与实际情况相反; 同时, 该模型对 $HS + HJ$ 拟合效果较差, 高于实测初始值, 且低于实测稳定值。Horton 入渗模型中参数 I_i 与 I_f 分别表示初始入渗速率与稳定入渗速率, 拟合结果与实测入渗速率基本一致, 均为 $HS + HJ > HJ > HS > CK$, 反映出不同农林复合模式下土壤入渗过程的差异。Philip 入渗模型中, 参数 b 可以反映初始入渗速率的变化过程, 拟合结果与实测入渗速率大小基本一致, 均为 $HS + HJ > HJ > HS > CK$ 。但是该模型对初始入渗的拟合结果显示 $HJ > HS$, 与实际情况相反。

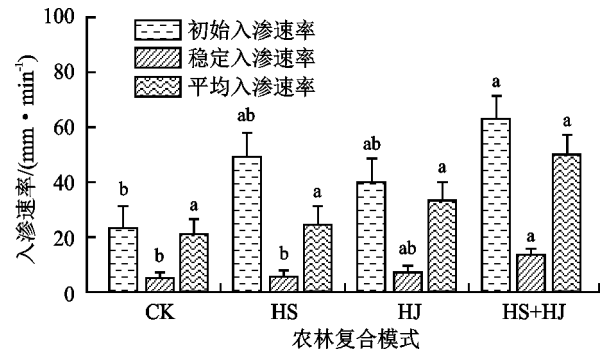


图 4 不同农林复合模式土壤入渗速率差异

Fig. 4 Differences in soil infiltration rates under different agroforestry systems

表 1 不同农林复合模式土壤入渗模型

Table 1 Modeling equations for soil infiltration under different agroforestry complexes

种植 模式	Kostiakov 模型		Horton 模型		Philip 模型	
	$I(t) = at^{-n}$	R^2	$I(t) = I_f + (I_i - I_f)e^{-ct}$	R^2	$I(t) = A + bt^{-0.5}$	R^2
花生	$I(t) = 35.272t^{-0.407}$	0.991	$I(t) = 5.82 + 43.67e^{-0.244t}$	0.849	$I(t) = 5.82 + 27.914t^{-0.5}$	0.955
花椒	$I(t) = 39.206t^{-0.306}$	0.933	$I(t) = 7.68 + 32.56e^{-0.086t}$	0.979	$I(t) = 7.68 + 32.156t^{-0.5}$	0.851
花生—花椒	$I(t) = 56.647t^{-0.643}$	0.980	$I(t) = 13.97 + 49.13e^{-0.139t}$	0.892	$I(t) = 13.97 + 41.837t^{-0.5}$	0.946
无作物	$I(t) = 21.324t^{-0.397}$	0.987	$I(t) = 5.31 + 17.71e^{-0.118t}$	0.901	$I(t) = 5.31 + 15.936t^{-0.5}$	0.945

3 种入渗模型对紫色土区不同农林复合模式下的土壤入渗过程拟合决定系数 R^2 均大于 0.750, 表现为 Kostiakov 模型 (0.973) $>$ Philip 模型 (0.924) $>$

Horton 模型 (0.905)。Kostiakov 模型对 HS、HS + HJ 以及 CK 的拟合效果最佳; Horton 模型对 HJ 的拟合效果最佳。

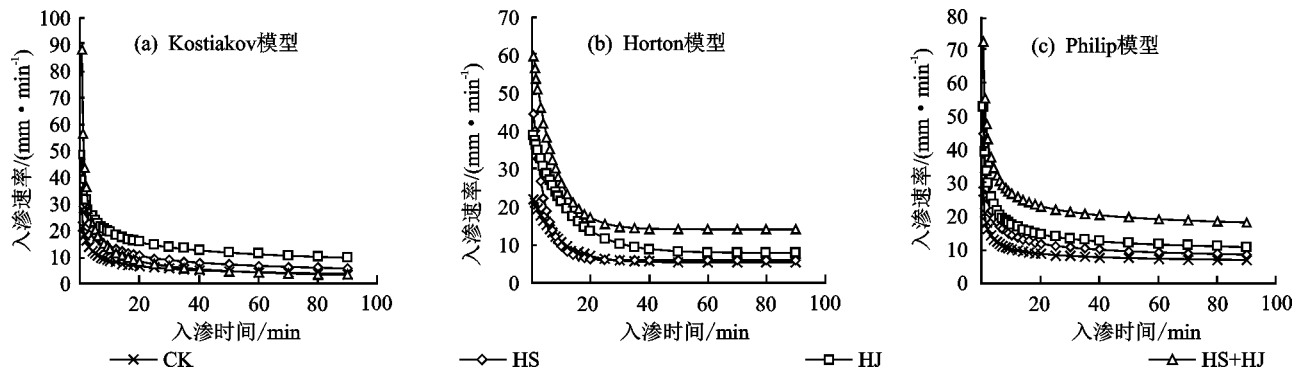


图 5 Kostiakov、Horton、Philip 模型拟合曲线过程

Fig. 5 Shows the curve fitting process of Kostiakov, Horton, and Philip models

2.4 土壤入渗参数影响因素分析

土壤物理性质与土壤入渗参数的相关性分析结

果见表 2。土壤的初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率与土壤抗剪强度呈显著负相关 ($p < 0.05$)。

表 2 土壤物理性质对土壤入渗能力的影响

Table 2 Impact of soil physical properties on soil infiltration capacity

变量	容重	含水率	总孔隙度	温度	田间持水量	斥水性	紧实度	硬度	抗剪强度
初始入渗率	0.100	-0.399	0.100	-0.534	-0.196	0.046	-0.308	-0.376	-0.659 *
稳定入渗率	-0.122	-0.167	-0.122	-0.407	0.050	0.263	-0.407	-0.504	-0.740 * *
平均入渗率	-0.123	-0.320	-0.123	-0.408	0.007	0.289	-0.479	-0.478	-0.679 *

注: *, * * 表示相关性分别达到 0.05 和 0.01 显著水平。

根据相关性分析结果, 土壤物理性质与土壤入渗存在多重共线性。因此, 采用多元线性回归分析, 在 95% 置信度下建立初始入渗率 (y_1)、稳定入渗率 (y_2)、平均入渗率 (y_3) 分别与容重 (x_1)、含水率 (x_2)、总孔隙度 (x_3)、毛管孔隙度 (x_4)、田间持水量

(x_5)、抗剪强度 (x_6)、土壤紧实度 (x_7)、土壤硬度 (x_8)、土壤温度 (x_9)、土壤斥水性 (x_{10}) 之间的回归模型 (表 3)。结果表明, 初始入渗率与平均入渗率仅与土壤抗剪强度呈显著负相关, 而稳定入渗率与土壤总孔隙度呈显著正相关, 与土壤抗剪强度呈显著负相关。

表 3 多元线性回归模型

Table 3 Multiple linear regression model

变量	模型	R^2	p	VIF
初始入渗速率	$y_1 = 108.572 - 31.862x_6$	0.722	<0.01	<5
稳定入渗速率	$y_2 = 2.679 + 42.456x_3 - 7.957x_6$	0.854	<0.05	<5
平均入渗速率	$y_3 = 90.611 - 28.016x_6$	0.680	<0.01	<5

3 讨论

不同农林复合模式下,土壤物理性质差异显著。HS 土壤容重显著高于 HJ,而总孔隙度显著低于 HJ。HJ 较 HS 有更庞大复杂的根系系统,根系在土壤中穿透、延伸、挤压及死亡形成通道^[14],致使土壤愈加疏松,表现为容重降低而孔隙度增大。CK 土壤含水率显著高于其他 3 种模式,这是由于 CK 土壤未受到耕作扰动,保留较好的土壤结构,提升土壤的保水性能^[15]。HS+HJ 土壤硬度、紧实度及抗剪强度均低于 CK 和 HS。一方面,HS+HJ 受耕作活动扰动更为剧烈^[16],破坏土壤团聚体,影响团聚体的稳定性;另一方面,HS+HJ 下作物在同样处理的土壤上生长对养分与能量的需求更大,导致土壤有机质降低,土壤细颗粒间的胶结作用下降,土壤内部黏结力降低,最终表现为土壤抗剪强度降低^[17]。HS 土壤斥水性显著低于其他 3 种模式。这可能是因为在在本试验中,花椒树龄已达 4 年,花生为试验同年新种,HS 土壤受耕作扰动更为剧烈,土质更为疏松^[18],更易被水分润湿,导致土壤斥水性较低。CK 土壤温度高于 HS,由于土壤温度于土壤样品采集当日中午测量,CK 土壤未受耕作影响且地表无植被覆盖,更易受日照光线与大气环境温度干扰导致迅速升温或者降温^[19]。

试验结果表明,不同农林复合模式下土壤入渗能力大小为 HS+HJ>HJ>HS>CK。已有研究^[20]表明,混种条件下可以促进土壤入渗,HS+HJ 更加庞大的根系系统能够更好地联结土壤颗粒^[21],保持土壤孔隙结构,有效减缓土壤侵蚀,促进土壤入渗。4 种农林复合模式下,CK 土壤的初始、稳定及平均入渗速率均为最低,原因可能是 CK 土壤含水率最高,土壤孔隙已被水分占据^[22],导致后续水分运动困难,阻碍入渗进行。HS+HJ 土壤稳定入渗速率显著高于 HS 与 CK,原因除 HS+HJ 根系系统外,还可能是 HS+HJ 具有的更完备发达的树冠—地面覆盖的地上立体结构系统^[23],能更好地减缓雨滴对地表的击溅侵蚀,从而保持土壤结构,促进入渗进行。土壤稳定入渗速率能够反映土壤入渗能力的大小^[5],在整体入渗过程中,初始入渗速率高于稳定入渗速率,原因可能是在入渗开始阶段,土壤孔隙能不断接纳水分,表现为促进入渗^[24];随着入渗进行,土壤中大团

聚体被破坏分解为微团聚体,堵塞土壤孔隙^[25],整体入渗速率降低,直至形成稳定水流通路,表现为稳定入渗速率基本恒定。

土壤入渗与土壤物理性质关系密切,多元线性回归结果表明,土壤入渗与土壤抗剪强度呈负相关,而与土壤总孔隙度呈正相关。潘剑君^[26]在利用土壤入渗与土壤抗剪强度评估水土流失的研究中发现,土壤入渗速率和抗剪强度越大,土壤侵蚀越小,与本试验结果相符。土壤抗剪强度受土壤含水率影响^[27],随着入渗持续进行而降低,使土壤更容易受到侵蚀,从而抑制入渗。张轩铭等^[28]在三峡库区研究紫色土砂岩土壤入渗特性发现,土壤入渗特性同土壤总孔隙度关系密切,与本试验结果相符。土壤总孔隙度可以反映土壤容纳空气及水分的能力的大小^[29],土壤孔隙是水分从地表运动到地下的关键通道,土壤总孔隙度越高,土壤入渗能力越强。

不同入渗模型模拟效果存在差异,综合模拟效果为 Kostiakov 模型>Philip 模型>Horton 模型,与在紫色土坡耕地对不同裂隙发育程度埂坎土壤入渗研究的罗莹丽等^[30]及在三峡库区对多种人工林土壤入渗特性进行研究的何文华等^[31]得出的模型拟合效果为 Horton 模型>Kostiakov 模型>Philip 模型的结论不符。Kostiakov 模型拟合所得结果在考虑极限情况(即入渗时间为 0 或 ∞)时仅存在理论上的可能,与实际情况不符^[5]。Horton 模型与 Philip 模型中的参数意义较 Kostiakov 模型更为贴近客观现实,其中 Horton 模型在初始入渗阶段拟合较实际入渗速率偏小,Philip 模型在入渗模拟过程中与实际过程相仿,模型决定系数(R^2)均值较 Horton 模型更高,因此,在本研究中,Philip 模型的综合拟合效果最佳,更适合对本研究区域内不同的农林复合模式下的土壤水分入渗过程进行拟合研究。

4 结论

(1)各农林复合模式土壤容重、含水率、总孔隙度、温度、斥水性、紧实度、土壤硬度及土壤抗剪强度均差异显著($p<0.05$)。

(2)HS 和 CK 模式土壤水分入渗过程在 20 min 左右进入稳渗阶段,HS+HJ 与 HJ 模式土壤则分别在 70,80 min 左右进入稳渗阶段。各农林复合模式的土壤入渗速率大小为 HS+HJ>HJ>HS>CK。

(3)Kostiakov 模型拟合效果最佳($R^2=0.933\sim 0.991$);Horton 模型拟合效果最差($R^2=0.849\sim 0.979$);考虑各入渗模型参数现实意义及实用性,推荐使用 Philip 模型对紫色土土壤入渗过程进行拟合。

(4)土壤总孔隙度与土壤抗剪强度是影响土壤入

渗的关键因素。

研究结果为紫色土区农林复合模式优化提供科学依据,对提高区域水资源利用率具有重要的理论价值和实践意义。

参考文献:

- [1] 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.
LÜ G, WU X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.
- [2] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
ZHAO X N, WU F Q. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 42-45.
- [3] 潘康乐,郭梁,陈欣,等.农林复合生态系统服务功能研究进展[J].生态与农村环境学报,2022,38(12):1535-1544.
PAN K L, GUO L, CHEN X, et al. Advance in the research on agroforestry ecosystem services[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(12): 1535-1544.
- [4] 孟凡旭,王树森,马迎梅,等.不同果农复合种植模式土壤入渗能力及其影响因素[J].干旱区研究,2020,37(6):1469-1477.
MENG F X, WANG S S, MA Y M, et al. Soil infiltration ability and influencing factors under different intercropping patterns in orchards in the Gully Region of Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1469-1477.
- [5] 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):103-108,200.
LI T Y, HE B H, TIAN J L, et al. Soil physical and chemical properties and soil infiltration characteristics of five agroforestry intercropping types in Bishan, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 103-108, 200.
- [6] 李建兴,何丙辉,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.
LI J X, HE B H, MEI X M, et al. Effects of different planting modes on the soil permeability of sloping farmlands in purple soil area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 725-731.
- [7] WANG L, ZHONG C G, GAO P X, et al. Soil infiltration characteristics in agroforestry systems and their relationships with the temporal distribution of rainfall on the Loess Plateau in China[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0124767.
- [8] 祁栋灵,杨小波,谢贵水,等.以橡胶为主的农林复合生态系统对调控资源利用和生态服务功能的影响[J].生态学报,2020,39(11):3844-3852.
QI D L, YANG X B, XIE G S, et al. The influence of rubber-based agroforestry system on regulating resource use and ecological services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3844-3852.
- [9] 魏艳,刘有斌,刘泉宏,等.紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根-土复合体抗剪性能研究[J].草业学报,2023,32(8):82-90.
WEI Y, LIU Y B, LIU X H, et al. Study on shear strength of root-soil composite of *Dolichos lablab* and *Medicago sativa* in purple soil region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(8): 82-90.
- [10] ZHU X Y, ZHU B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 39-46.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Institute of Soil Physics, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Physical properties of soil[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [12] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
YANG J H, WANG C L, DAI H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [13] DEKKER L W, RITSEMA C J. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency[J]. Water Resources Research, 1994, 30(9): 2507-2517.
- [14] 李鸿,湛芸,刘泉宏,等.紫色土坡耕地地埂草篱根系土壤抗蚀与抗冲性能特征研究[J].草业学报,2023,32(11):40-52.
LI H, SHEN Y, LIU X H, et al. Factors affecting the soil erosion and scouring resistance of bank hedgerows in purple soil sloping cropland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(11): 40-52.
- [15] 郑凤君,王雪,李生平,等.免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J].中国农业科学,2021,54(3):596-607.
ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 596-607.
- [16] 邓子正,黄明镜,张吴平,等.旱作条件下保护性耕作对土壤结构和容重影响试验研究[J].土壤通报,2023,54(1):46-55.
DENG Z Z, HUANG M J, ZHANG W P, et al. Effects of conservation tillage on soil structure and bulk density under dryland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 46-55.
- [17] 邢书昆,张光辉,朱平宗.黄土丘陵沟壑区退耕年限对

- 根—土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):41-48,54.
- XING S K, ZHANG G H, ZHU P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 41-48, 54.
- [18] 吴小雨,涂安国,李国辉,等.土壤斥水性影响因素及管理措施研究综述[J].中国水土保持,2023(1):27-30.
- WU X Y, TU A G, LI G H, et al. Review on the influencing factors and management measures of soil water repellency[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(1): 27-30.
- [19] 魏卫东,刘育红,马辉,等.三江源区退化高寒草甸浅层土壤冻融作用特征[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):352-359.
- WEI W D, LIU Y H, MA H, et al. Freeze-thaw action characteristics of shallow soil on degraded alpine meadow in the source region of three rivers[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(3): 352-359.
- [20] 何方燕,熊康宁,朱大运,等.喀斯特山地不同混农林模式的土壤入渗特征及模拟[J].福建农业学报,2020,35(2):200-209.
- HE F Y, XIONG K N, ZHU D Y, et al. Characteristics and simulations of soil infiltration in agroforestry on Karst Mountains[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2020, 35(2): 200-209.
- [21] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.
- ZHAO F W, WANG N, SU X M, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 105-113.
- [22] 淡彩虹,许欢欢,王兵,等.模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):31-36.
- DAN C H, XU H H, WANG B, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment yield on loess slope under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 31-36.
- [23] 易兴松,戴全厚,严友进,等.西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展[J].生态学报,2023,43(3):925-936.
- YI X S, DAI Q H, YAN Y J, et al. Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in Karst areas of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 925-936.
- [24] 李志熙,白岗栓,邹超煜,等.自然生草对渭北旱塬苹果园土壤孔隙和水分入渗的影响[J].中国农业大学学报,2022,27(5):146-156.
- LI Z X, BAI G S, ZOU C Y, et al. Effects of self-sown grass on soil porosity and soil infiltration in apple orchard in Weibei dry plateau[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 146-156.
- [25] MA G G, LI G L, MU X D, et al. Effect of raindrop splashes on topsoil structure and infiltration characteristics[J]. Catena, 2022, 212: e106040.
- [26] 潘剑君.利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级[J].水土保持学报,1995,9(2):93-96.
- PAN J J. Determination of soil erosion grade by soil infiltration rate and soil shear resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 93-96.
- [27] 杨浩,王文龙,姜义宝,等.黄土塬沟壑区典型植被沟头土壤渗透性和抗剪强度特征[J].应用生态学报,2023,34(7):1862-1870.
- YANG H, WANG W L, LOU Y B, et al. Infiltration and shear strength characteristics of gully heads soil of typical vegetation on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7): 1862-1870.
- [28] 张轩铭,戴翠婷,李朝霞,等.三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(4):92-98.
- ZHANG X M, DAI C T, LI Z X, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of purple sandstone with different degrees of development in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 92-98.
- [29] 赵恩辉,吴磊,赵生华.黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,2023,30(6):255-263.
- ZHAO E H, WU L, ZHAO S H. Comprehensive evaluation of soil water conservation function of different vegetation types in the Yellow River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 255-263.
- [30] 罗莹丽,韦杰,刘春红.紫色土坡耕地埂坎裂隙发育对土壤入渗的影响[J].农业工程学报,2021,37(21):116-123.
- LUO Y L, WEI J, LIU C H. Water seepage in soil bunds under different crack development degrees on the purple-soil sloping farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 116-123.
- [31] 何文华,张洪江,程金花,等.重庆四面山5种人工林土壤入渗特性对比[J].中国水土保持科学,2015,13(2):50-55.
- HE W H, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Comparison of infiltration characteristics of five typical plantations in Simian Mountain of Chongqing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 50-55.