

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.021.

张贤林, 冯梦蝶, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗特征及适宜模型[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 34-41.

Zhang Xianlin, Feng Mengdie, He Binghui, et al. Soil Infiltration Characteristics and Suitable Models Under Different Land Use Types in Karst Trough-Valley Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 34-41.

喀斯特槽谷区不同土地利用方式下 土壤入渗特征及适宜模型

张贤林, 冯梦蝶, 何丙辉, 曾 成, 尚琰隼, 李天阳

(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: [目的]探究喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗规律, 提出适合喀斯特槽谷区的土壤入渗模型。[方法]以喀斯特槽谷区 4 种典型土地利用类型(林地、草地、耕地、园地)为研究对象, 分析不同土地利用类型土壤入渗特征差异及影响因素, 评价了 Horton, Kostiakov 和 Philip 这 3 种常见入渗模型在该区的适应性。[结果](1) 不同土地利用类型土壤容重、含水率和电导率存在显著差异($p < 0.05$), 耕地土壤容重(1.1 g/cm^3)、含水率(26.9%)以及电导率(75.43 mS/cm)低于其他土地利用类型, 园地土壤容重(1.32 g/cm^3)、林地含水率(35.02%)以及草地电导率(164.6 mS/cm)分别高于其他土地利用类型。(2) 不同土地利用类型土壤入渗过程均表现为迅速下降、缓慢下降以及趋于稳定。(3) Horton 模型、Kostiakov 模型和 Philip 模型对喀斯特槽谷区不同土地利用方式拟合结果存在差异, 其中, Horton 模型结果最优, 拟合度 R^2 达到 $0.922 \sim 0.951$, Philip 模型拟合结果最差, 拟合度 R^2 为 $0.754 \sim 0.908$ 。(4) pH 值与初始入渗速率和平均入渗速率呈极显著正相关关系($p < 0.01$), 与稳定入渗速率呈显著正相关关系($p < 0.05$); $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 和 $< 0.05 \text{ mm}$ 微团聚体分别与稳定入渗率和平均入渗率呈显著正相关和负相关($p < 0.05$)。多元线性回归模型表明, 容重、含水率以及 $< 0.05 \text{ mm}$ 微团聚体是主要影响入渗速率的因子, 且与入渗性能指标存在负相关关系。[结论]不同土地利用方式下耕地具有更好的渗透性能, Horton 模型更适合模拟喀斯特槽谷区土壤入渗, 研究结果可为喀斯特槽谷区土壤入渗性能评估及植被配置等提供科学依据。

关键词: 喀斯特; 土地利用方式; 土壤理化性质; 入渗特征; 回归模型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0034-08

Soil Infiltration Characteristics and Suitable Models Under Different Land Use Types in Karst Trough-Valley Region

Zhang Xianlin, Feng Mengdie, He Binghui, Zeng Cheng, Shang Yanjun, Li Tianyang

(Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the soil infiltration patterns under different land uses in karst trough valley and to propose a suitable soil infiltration model for karst trough valley. [Methods] Four typical land uses (forest, grassland, cropland and orchard) in the karst trough valley were taken as the research objects to determine the differences in soil infiltration characteristics and influencing factors as affected by different land uses, and to evaluate the adaptability of three common infiltration models: Horton, Kostiakov and Philip, the in this area. [Results] (1) Soil bulk density, water content and electrical conductivity were markedly different among different land uses ($p < 0.05$). Soil bulk density (1.1 g/cm^3),

收稿日期: 2023-05-19

修回日期: 2023-09-13

资助项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFF1302903); 西南大学先导计划(SWU-XDZD22003)

第一作者: 张贤林(2001—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与流域治理。E-mail: zxl001208@163.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 湖南汨罗人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、森林培育与林业生态工程研究。E-mail: hebingshui@swu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

water content (26.9%) and electrical conductivity (75.43 mS/cm) in cropland were lower than those in other land uses. Soil bulk density (1.32 g/cm^3) in orchard, water content in forest (35.02%) and electrical conductivity in grassland (164.6 mS/cm) were higher than those in other land uses, respectively. (2) The infiltration process of different land use types showed rapid decline, slow decline and stabilization. (3) There were differences in the fitting results of Horton model, Kostiakov model and Philip model for different land use modes in karst trough valley. Horton model had the best results, with the fit R^2 reaching $0.922 \sim 0.951$, and Philip model had the worst results, with the fit R^2 ranging from 0.754 to 0.908. (4) The pH value was highly significantly positively correlated with initial infiltration rate and average infiltration rate ($p < 0.01$) and significantly positively correlated with stable infiltration rate ($p < 0.05$); $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ and $< 0.05 \text{ mm}$ fractions of micro-aggregates were significantly positively and negatively correlated with stable infiltration rate and average infiltration rate, respectively ($p < 0.05$). The multiple linear regression model showed that soil bulk density, water content and $< 0.05 \text{ mm}$ fraction of micro-aggregates were the main factors influencing infiltration rate, which had an inhibitory effect on infiltration. [Conclusion] Cropland has better infiltration performance among different land uses, and the Horton model is more suitable for modeling soil infiltration in karstic troughs and valleys. The results of the study can provide a scientific basis for the assessment of soil infiltration performance and vegetation allocation in karst trough valley areas.

Keywords: karst; land-use type; soil physical and chemical properties; infiltration characteristics; regression model

土壤入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程,它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节^[1]。土壤入渗性能作为影响水土流失的重要因子,对地表径流的产生有较强的调节作用。入渗能力强的土壤,能够保证降水短时间内快速就地入渗,一方面可以减少坡面地表径流产生,从而减少土壤侵蚀量;另一方面促进地下径流以及壤中流的形成,提升土壤涵养水源能力^[2]。

土壤理化性质是影响土壤入渗的重要影响因素,土壤容重、初始含水量以及有机质含量与土壤入渗较为相关,但不同区域影响土壤入渗的主导因子不一致^[3]。杨振奇等^[4]在砒砂岩区林地、水浇地、草地和裸地土壤的研究中发现,有机质含量和土壤容重分别对稳定入渗速率以及初始渗透速率具有最强的解释能力;李松阳等^[5]在云南泥石流多发区的研究中表明,毛管孔隙度以及土壤质地是影响土壤入渗特征的主要因素。土壤入渗模型是描述土壤入渗过程的重要工具,然而各模型在不同区域适宜性存在一定差异;马雪燕等^[6]在黄土高原植被恢复区研究结果认为,Philip模型更适合用于描述该区土壤入渗过程;吴佩瑶等^[7]在砒砂岩区裸露坡面发现 Kostiakov 模型拟合结果最优。

喀斯特槽谷区是中国南方喀斯特分布面积最广的地貌类型区,生态环境脆弱,石漠化严重。该区域地形起伏大,土层浅薄,蓄水能力差,具有典型的地表

地下“二元”空间结构,导致土壤的地上流失与地下漏蚀时有发生^[8]。近年来,受人类活动的影响,喀斯特槽谷区土地利用类型发生显著改变,导致土壤入渗特性及理化性质发生变化,但其变化程度并未量化,土壤入渗特性及理化性质变化会直接影响地表径流的产生,进而引成土壤侵蚀程度的改变。基于此,本文以喀斯特槽谷区林地、园地、草地和耕地4种典型土地利用方式为研究对象,研究不同土地利用方式下土壤入渗特征,揭示其主要影响因子,并探讨最优土壤入渗模型,以为喀斯特槽谷区土壤入渗模型建立以及土壤水分运移提供基础理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于重庆市酉阳土家族苗族自治县境内龙潭槽谷($108^{\circ}51'28'' \sim 109^{\circ}1'26''\text{E}$, $28^{\circ}37'4'' \sim 29^{\circ}5'26''\text{N}$),属于武陵山区一部分。该槽谷呈东南—西北走向,槽谷两侧岩层倾向一致,坡向相反,流域总面积为 $1\,677 \text{ km}^2$,石漠化面积占流域面积的11%。槽谷底部宽 $1 \sim 4 \text{ km}$,海拔 $382 \sim 548 \text{ m}$,轴部构成龙潭河的河道,东西两翼山体海拔 $900 \sim 1\,100 \text{ m}$,高差为 $400 \sim 800 \text{ m}$ 。研究区为典型的亚热带湿润季风气候区,年均降雨量为 $1\,400 \text{ mm}$,降雨主要集中在4—8月,年平均日照时数为 $1\,131 \text{ h}$,年均气温 14.6°C ,研究区土壤以黄色石灰土为主,林地植被类型主要以杉木

(*Cunninghamia lanceolata* Hook)、杨树(*Populus* L.)为主;园地主要种植柑橘(*Citrus reticulata* Blanco);耕地为玉米(*Zea mays* L.)小麦(*Triticum aestivum* L.)轮作;草地主要以沿阶草(*Ophiopogon bodinieri* levl)、牛筋草(*Eleusine indica* Gaertn)、芒(*Miscanthus sinensis*)为主。

1.2 土壤样品采集

2020 年 8 月,分别选择龙潭槽谷内相同海拔高度、坡度及坡向下 4 种土地利用类型(林地、园地、草地、耕地)土壤作为研究对象。在各土地利用类型的样地分别选取采样点 3 个,共计 12 个样点,每个样地间相距至少 1 km。每个样点分别采集表层 0—10 cm 原状环刀土样 5 个(容积 100 cm³)和 5 个铝盒土样,用于测定土壤容重、含水率及入渗。同时每个样点按照“S”形五点采样法采集 0—10 cm 土层混合土样,并用四分法剔除多余土壤,最终收集 1 kg 左右的土样装入密封袋并编号,室内弃除土壤中的杂草、碎石等杂物后,风干、研磨,过筛后备用,用于测定土壤 SOC 含量、pH 值、含水率、电导率和微团聚体组分。

1.3 土壤理化性质测定

土壤入渗、容重的测定采用环刀法^[9];土壤含水率的测定采用烘干法^[9];用重铬酸钾容量法测定土壤 SOC 含量^[10];采用 pH 计(PHSJ-5, REX 公司,中国上海)和电导率仪(DDSJ-318, REX 公司,中国上海)测定土壤 pH 值和电导率(EC)值,土壤、水比例为 1 : 2.5^[11];微团聚体组成采用 Rise-2008 型激光粒度仪测定^[12]。本研究选取入渗开始前 3 min 的入渗率取平均值为初始入渗率,90 min 内的入渗率取平均值为平均入渗率,取 60 min 渗率取平均值和 75 min 渗率取平均值的入渗率的平均值为稳定入渗率^[13]。

1.4 土壤入渗过程模拟

分别选取入渗物理模型 Horton, Philip 以及经验模型 Kostiakov 对不同土地利用方式下土壤水分入渗过程进行模拟^[14]:

(1) Horton 模型。

$$f(t) = A + (B - A)e^{-nt} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); B 为初始入渗率(mm/min); A 为稳定入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); n 为模型参数。

(2) Philip 模型。

$$f(t) = mt^{-0.5} + A \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); A 为稳定入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); m 为模型参数。

(3) Kostiakov 模型。

$$f(t) = kt^{-a} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 和 k 为模型参数。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 中对数据进行整理。在 SPSS 25.0 中采用单因素方差分析(ANOVA)对土壤理化性质和土壤入渗指标进行差异性分析,采用 Horton, Philip 和 Kostiakov 入渗模型对土壤入渗过程进行非线性拟合,利用 Person 相关性分析解析土壤理化性质与土壤入渗指标关系,采用向后多元线性回归建立土壤理化性质与土壤入渗指标间的模型。采用 Origin 2021 进行制图。

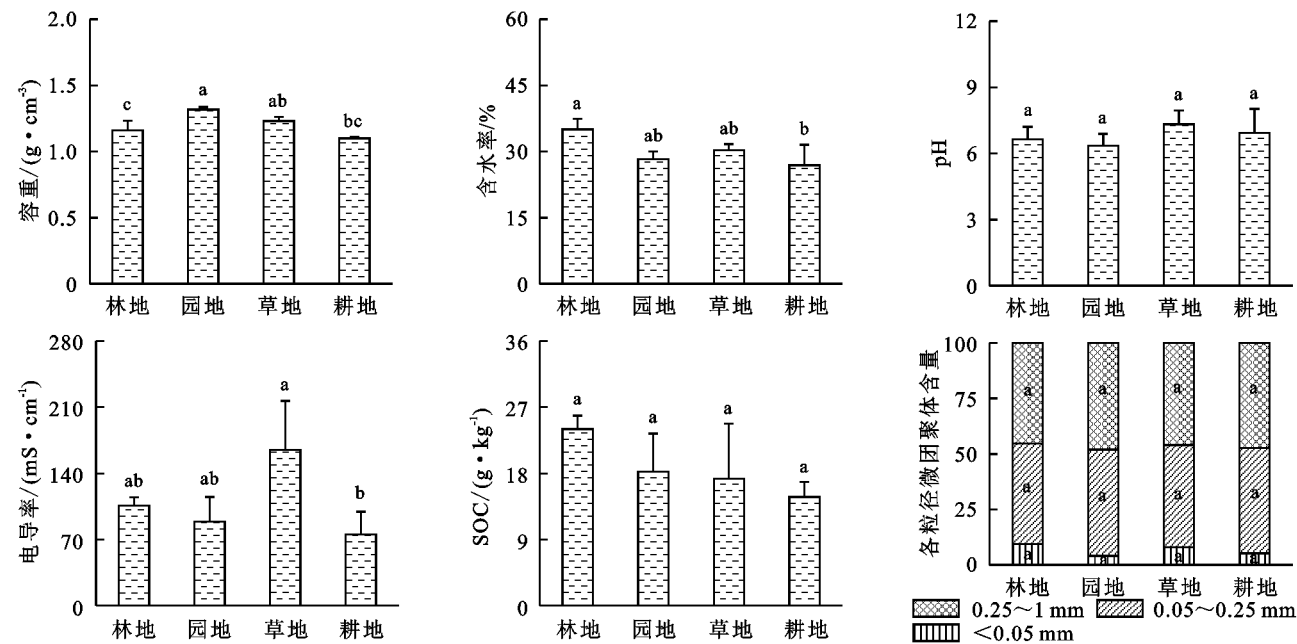
2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

不同土地利用类型土壤理化性质的差异如图 1 所示。不同土地利用类型下土壤容重差异显著($p < 0.05$),且园地容重显著高于林地和耕地,草地容重显著高于耕地。4 种土地利用方式下仅有林地和耕地的含水率以及草地和耕地的电导率差异显著($p < 0.05$),其中,林地含水率是耕地的 1.3 倍,草地电导率为耕地的 2.18 倍。不同土地利用方式 SOC 含量表现为林地>园地>草地>耕地,林地是耕地的 1.63 倍;pH 值表现为草地>耕地>林地>园地,范围在 6.36~7.32,仅有草地呈弱碱性,但不同土地利用方式下 SOC 和 pH 值差异均不显著($p > 0.05$)。4 种土地利用类型下微团聚体含量均表现为:0.25~1 mm 微团聚体含量最低,<0.05 mm 微团聚体含量最高,不同土地利用方式下各粒径微团聚体含量差异均不显著($p > 0.05$)。总体上看,林地、园地和草地的 SOC、容重、电导率以及含水率均高于耕地。

2.2 不同土地利用方式土壤入渗过程及特征

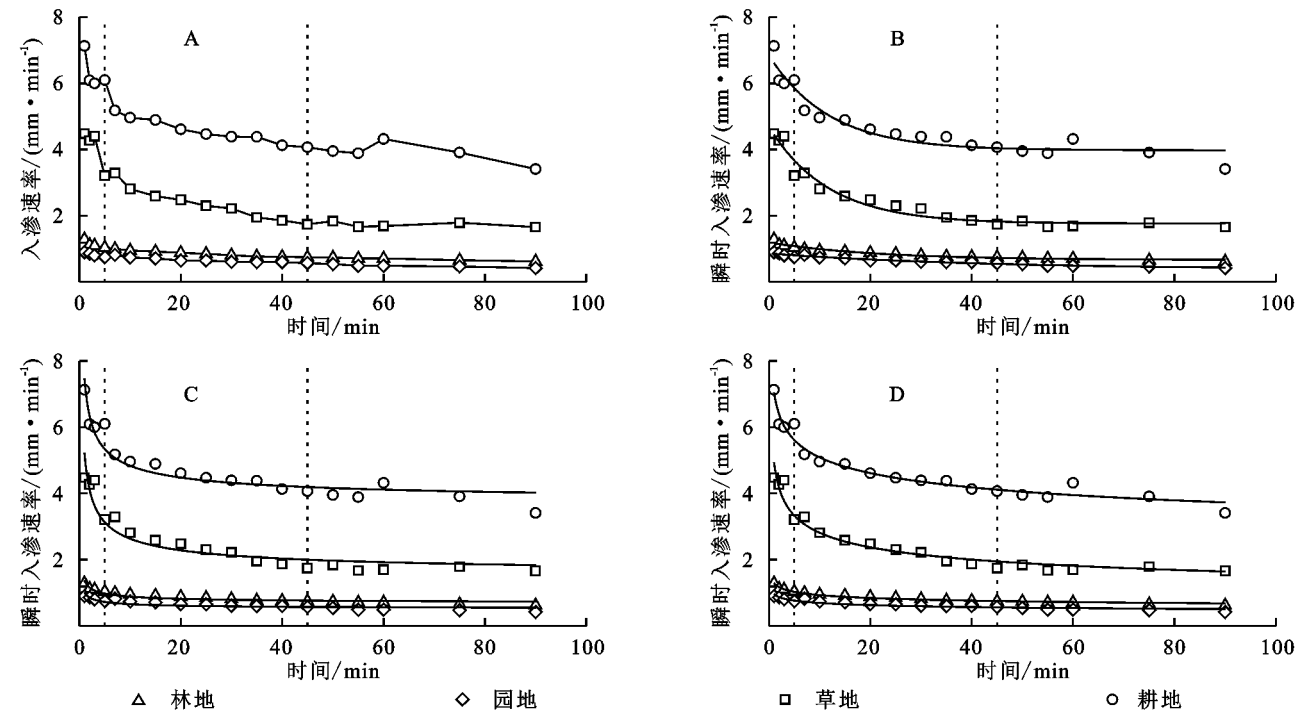
不同土地利用类型土壤入渗过程如图 2A 所示,在不同的土地利用方式下,土壤入渗速率随着时间推移而先迅速下降,后缓慢降低,最后趋于稳定。本文选取初始入渗率、稳定入渗率以及平均入渗率作为土壤入渗指标。不同土地利用方式下土壤入渗特征值见表 1,4 种土地利用方式的土壤入渗指标均无显著性差异($p > 0.05$)。耕地的初始入渗率、稳定入渗率以及平均入渗率分别是草地的 7.36 倍、8.13 倍和 7.34 倍。初始入渗率到稳定入渗率下降幅度最大的是草地,初渗率是稳渗率的 2.55 倍;下降幅度最小的是林地,初渗率是稳渗率的 1.93 倍。



注:不同小写字母表示不同土地利用类型理化性质差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同土地利用方式土壤理化性质

Fig. 1 Physicochemical properties of soils with different land uses



注:A 为入渗实际过程;B,C,D 分别为 Horton,Philip,Kostiakov 模型拟合曲线过程。

图 2 不同土地利用类型土壤入渗过程

Fig. 2 Soil infiltration processes in different land use types

2.3 不同土地利用土壤入渗方程模拟

3 种入渗模型对喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤水分入渗过程的拟合效果存在一定差异,结果见表 2。不同土地利用下,3 种模型 R^2 拟合度达 0.754 以上,平均拟合度呈现 Horton 模型(0.95) > Kostiakov 模型(0.943) > Philip 模型(0.862)。在林地和耕地的土壤入渗模拟结果中,Kostiakov 模型模

拟效果最好, R^2 分别为 0.976,0.959;在园地和草地的土壤入渗模拟结果中,Horton 模型模拟结果最好, R^2 分别为 0.964,0.965。不同土地利用类型各模型对应的模拟入渗过程曲线与实际入渗过程对比分析如图 2B,C,D 所示,Horton 模型模拟效果最好,在入渗各阶段均表现良好,实测点均匀分布在曲线两侧;Kostiakov 模型在 0~35 min 模拟值接近实测值,而

35 min 后模拟值大部分大于实测值,模拟结果较差; Philip 模型在 5~35 min 模拟值小于实测值,在 35 min 后模拟值大于实测值,拟合效果最差。

表 1 不同土地利用方式下土壤入渗特征指标

Table 1 Indicators of soil infiltration characteristics

土地利用 方式	under different land uses			mm/min
	初始 入渗率	稳定 入渗率	平均 入渗率	
林地	1.18±0.57a	0.64±0.51a	0.87±0.51a	
园地	0.87±0.12a	0.45±0.17a	0.65±0.20a	
草地	4.38±3.40a	1.72±1.93a	2.57±2.43a	
耕地	6.40±0.51a	3.66±2.81a	4.77±3.67a	

注:不同小写字母表示不同土地利用类型土壤入渗指标差异显著($p<0.05$)。

Kostiakov 模型中的参数 k 在数值近似等于入

渗前 2 min 平均入渗速率,与初始入渗速率成正比, k 值大小为:耕地>草地>林地>园地;参数 a 代表入渗速率随时间变化的快慢,耕地和园地 a 值大于林地和草地,与实际情况相符合。Philip 模型中的参数 m 代表土壤入渗能力的大小, m 值越大,土壤入渗能力就越强,参数 m 拟合结果为耕地>草地>林地>园地,与图 2A 结果一致。Horton 模型的参数 A 为稳定入渗率,其拟合结果为耕地>草地>林地>园地,与实际测试值结果一致;参数 B 为初始入渗率,其结果显示园地大于林地,与实测结果相反;参数 n 是经验常数,值越大,代表到达稳定入渗的时间越短,草地和耕地 n 值大于林地和园地,与耕地最晚到达稳定入渗率结果不相符。

表 2 不同土地利用下土壤入渗过程模型模拟结果

Table 2 Model simulation results of soil infiltration processes under different land uses

土地利用 方式	Horton 模型				Philip 模型			Kostiakov 模型		
	A	B	n	R^2	A	m	R^2	a	k	R^2
林地	0.665	0.193	0.047	0.951	0.659	0.707	0.894	0.144	0.294	0.976
园地	0.378	0.86	0.023	0.964	0.497	0.506	0.754	0.142	0.959	0.890
草地	1.764	4.684	0.085	0.965	0.435	3.787	0.890	0.244	4.935	0.949
耕地	3.978	6.844	0.085	0.922	3.619	3.845	0.908	0.141	7.047	0.959

2.4 土壤入渗与土壤理化性质的相关性

土壤入渗性能与土壤理化性质的相关性结果见表 3。pH 值与初始入渗速率和平均入渗速率呈极显著正相关关系($p<0.01$),与稳定入渗速率呈显著正

相关关系($p<0.05$);0.25~0.05 mm 和<0.05 mm 微团聚体与稳定入渗速率和平均入渗率分别呈显著正相关和显著负相关($p<0.05$)。

表 3 土壤入渗性能与影响因素的相关性

Table 3 Correlation of soil infiltration properties with influencing factors

入渗 指标	容重	含水率	pH 值	电导率	微团聚体含量			SOC
					1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	<0.05 mm	
初始入渗率	-0.509	-0.477	0.720**	0.325	0.305	0.479	-0.557	-0.272
稳定入渗率	-0.559	-0.487	0.683*	0.193	0.269	0.606*	-0.659*	-0.389
平均入渗率	-0.540	-0.491	0.708**	0.234	0.283	0.584*	-0.643*	-0.364

注:*,** 表示相关性分别达到 0.05,0.01 显著水平。

由表 3 可知,大多数土壤理化性质与土壤入渗指标相关性不显著,可能由于各变量之间存在多重共线性^[15]。因此,进一步采取后退多元线性回归方法,在 95%置信度下建立初始入渗率(y_1)、稳定入渗率(y_2)和平均入渗率(y_3)分别与容重(x_1)、含水率(x_2)、pH 值(x_3)、电导率(x_4)、SOC(x_5)、0.25~1 mm 微团聚体含量(x_6)、0.05~0.25 mm 微团聚体含量(x_7)、<0.05 mm 微团聚体含量(x_8)之间的多元线性回归模型见表 4。3 个土壤入渗指标受控因素存在一定差异,容重、含水率以及<0.05 mm 微团聚体对 3 个入渗指标均会产生影响,此外,初始入渗率还会受到电导率和 SOC 的影响,稳定入渗率会受到 pH 值的影响,平均入渗率会受到电导率的影响。其中,含水率对土壤入渗指标影

响最大,电导率对初始入渗率和平均入渗率影响最小,pH 值对稳定入渗率影响最小。容重、含水率以及<0.05 mm 微团聚体与土壤入渗指标存在负相关关系,电导率、pH 值和 SOC 为正相关关系。

多元线性回归模型拟合结果见表 5,初始入渗率模型模拟值与实测值相对误差范围在-0.45%~23.99%,除林地外拟合结果均接近实际值;稳定入渗率模型误差范围则在-43.76%~53.38%,拟合结果较差;平均入渗率模型误差范围在-3.27%~22.84%,整体上模拟值大于实测值。总体上看,上述模型对耕地入渗速率预测结果最好,初渗率、稳渗率以及平均入渗率相对误差分别为 0.44%,4.64%,3.27%,园地、草地次之,林地模拟结果最差。

表 4 多元线性回归模型
Table 4 Multiple linear regression model

入渗指标	模型	R^2	p
初始入渗率(y_1)	$y_1 = 48.69 - 21.034x_1 - 76.09x_2 + 0.04x_4 + 0.2x_5 - 7.39x_8$	0.94	<0.01
稳定入渗率(y_2)	$y_2 = 17.76 - 9.836x_1 - 21.43x_2 + 0.83x_3 - 5.06x_8$	0.92	<0.01
平均入渗率(y_3)	$y_3 = 34.86 - 14.53x_1 - 41.638x_2 + 0.02x_4 - 6.6x_8$	0.92	<0.01

表 5 多元线性回归模拟结果
Table 5 Results of Multiple linear regression simulation

土地利用 方式	初始入渗率			稳定入渗率			平均入渗率		
	实测值/ (mm·min ⁻¹)	模拟值/ (mm·min ⁻¹)	相对 误差/%	实测值/ (mm·min ⁻¹)	模拟值/ (mm·min ⁻¹)	相对 误差/%	实测值/ (mm·min ⁻¹)	模拟值/ (mm·min ⁻¹)	相对 误差/%
林地	1.18	1.46	23.99	0.64	0.92	-43.76	0.87	0.77	11.67
园地	0.87	0.90	3.64	0.45	0.21	53.38	0.65	0.57	22.84
草地	4.38	4.12	-6.05	1.72	1.60	7.16	2.57	2.50	2.75
耕地	6.40	6.37	-0.45	3.66	3.83	-4.64	4.77	4.93	-3.27

3 讨论

不同土地利用方式下,土壤理化性质存在显著差异。其中,耕地土壤容重、含水率、SOC、电导率以及 0.25~1 mm 微团聚体含量均小于其他土地利用类型,林地和园地 pH 值小于耕地。相较于林地、园地以及草地,耕地人为干扰活动多,耕作会使表层土壤疏松多孔,土壤孔隙度增大^[16],容重减小;此外,长期耕作会促进土壤有机质矿化分解^[17],减少土壤有机质含量,而土壤有机质含量的减少影响稳定性胶结剂形成^[18],进而阻碍大粒径微团聚体形成(0.25~1 mm)。土壤电导率反映土壤可溶性盐含量^[19],耕地相较于其他土地利用类型渗透性能最强,在灌溉和降水作用下土壤可溶性盐随水分下渗,表层土壤盐分减少,电导率更低。林地、园地和草地较耕地具有枯枝落叶层和更高的植被盖度,枯枝落叶层的存在会对多种土壤理化性质产生影响:枯枝落叶层不仅可以避免雨滴直接击溅土壤,防止土壤板结,同时能拦截地表径流,促进水分就地入渗,枯落物的覆盖以及更高的植被盖度还可以减少表层土壤水分蒸发,使水分更易储存在土壤中^[20],增加土壤含水率;枯落物的分解一方面会促进更多的碳输入到土壤中^[21],增加土壤有机碳含量,另一方面枯落物中含有的单宁、木质素等物质,在微生物的分解作用下,会释放一些酸性物质,引起表层土壤酸化^[22],pH 值降低。

土壤理化性质与土壤入渗能力存在密切关系,这是造成不同的土地利用方式下土壤入渗能力存在差异的主要原因^[23]。4 种土地利用类型的入渗指标均表现为:耕地>草地>林地>园地。多元线性回归模型表明土壤入渗速率与容重、含水率以及<0.05 mm 微团聚体存在负相关关系。土壤容重是土壤在单位

体积内排列松紧的程度,它间接反映了孔隙度的大小,而土壤孔隙是水分渗入土壤的通道,其大小程度决定了土壤渗透性能^[24],容重越小,孔隙度越大,渗透速率越快;土壤水分入渗主要在本身重力和土壤基质吸力共同作用下进行,而土壤基质吸力与含水率相关,含水率低的土壤,下面土层与饱和土层间的吸力梯度小,水分传导慢,入渗速率就会降低^[25],本试验实际条件下测得耕地具有更小的容重和含水率,故其具有更大的渗透速率。土壤不同粒径微团聚体含量对土壤入渗能力也有一定影响,耕地相较于其他土地利用类型,土壤中小粒径微团聚体含量更少,小粒径微团聚体含量越多,不利于土壤大孔隙的形成^[9],进而降低土壤入渗速率。有机碳与初始入渗速率表现为正相关关系,有机碳含量大小表现为:林地>园地>草地>耕地,与实测初渗速率顺序相反,造成这种差异的原因可能是,土壤有机碳主要通过影响团聚体形成,改变孔隙状况间接影响土壤入渗速率^[24],相较于初始含水率以及容重的抑制作用,有机质影响效果不明显。土壤 pH 值的增加在一定范围会促进有机质的形成^[26],有机质作为土壤团聚体的胶结剂,进而影响土壤孔隙度的大小,故土壤 pH 值的增加能够间接提升入渗性能。

从整体上看,Horton 模型对喀斯特槽谷区不同土地利用方式下的土壤入渗过程模拟结果最好,Philip 模型结果最差,这与曾江敏等^[13]在喀斯特槽谷区的研究结果一致。本文将模拟过程线与实测点绘制在同一张图上,可以更加直观观测模型的拟合效果,Horton 模型在入渗整个阶段模拟结果均良好,但 Kostikov 模型在 40 min 后模拟值整体大于实测值,这与马雪燕等^[6]在黄土丘陵区的研究结果不一致,其研究结果表明 Kostikov 模型在 17 min 后拟合效果

较好,拟合值接近实测值。模拟过程线与实测点对比图和各模型拟合度 R^2 的结果均显示 Horton 模型模拟结果最优,说明在喀斯特槽谷区用 Horton 模型研究土壤入渗过程更具有代表性。

4 结论

(1) 喀斯特槽谷区不同土地利用方式对土壤理化性质具有一定影响,耕地具有最低的土壤容重、含水率及电导率,园地土壤容重、林地含水率及草地电导率最大。

(2) 不同土地利用类型土壤入渗过程均表现为迅速下降、缓慢下降以及趋于稳定。

(3) 相较于 Kostikov 模型和 Philip 模型, Horton 模型对喀斯特槽谷区不同土地利用方式拟合结果最好,其结果更接近实际情况,更适合模拟喀斯特槽谷区的土壤入渗。

(4) 相关性分析与多元线性回归模型表明, pH 值、容重、含水率以及 <0.05 mm 微团聚体是影响土壤入渗速率的主要因子,且除 pH 值外,均与土壤入渗指标具有负相关关系。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
He M M, Liu Z Q, Wang K Q, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors under different vegetation cover types in Dianchi Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):181-187.
- [3] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.
Li P, Wang D M, Ding C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(5):1610-1620.
- [4] 杨振奇,秦富仓,李旻宇,等.砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J].生态环境学报,2020,29(4):733-739.
Yang Z Q, Qin F C, Li M Y, et al. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in feldspathic sandstone region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(4):733-739.
- [5] 李松阳,刘康妮,余杭,等.云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响[J].山地学报,2021,39(6):867-878.
Li S Y, Liu K N, Yu H, et al. The influence of soil physical properties on the infiltration of soil covered by different vegetation types in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2021,39(6):867-878.
- [6] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].水土保持学报,2023,37(2):67-75.
Ma X Y, Mu X M, Wang S Y, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):67-75.
- [7] 吴佩瑶,秦富仓,董晓宇,等.坡度影响下的砒砂岩区裸露坡面水分入渗特征及模拟[J].水土保持学报,2022,36(2):64-69.
Wu P Y, Qin F C, Dong X Y, et al. Water infiltration characteristics and simulation on exposed slope in Pisha rock area under the influence of slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):64-69.
- [8] Wang S, Fu Z Y, Chen H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on Karst slope[J]. Journal of Hydrology, 2020,580:124370.
- [9] 郭海云,王根绪,孙守琴.氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):238-245.
Guo H Y, Wang G X, Sun S Q. Effects of nitrogen addition on soil structure and water infiltration of subalpine coniferous forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):238-245.
- [10] 蔡雅梅,冯民权.汾河河岸带土壤氮、磷的时空分布规律及其影响因素研究[J].水土保持学报,2021,35(4):222-229,236.
Cai Y M, Feng M Q. Study on the spatial and temporal distribution and influencing factors of soil nitrogen and phosphorus in riparian zones of Fenhe River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):222-229,236.
- [11] 冯璐,刘京涛,韩广轩,等.黄河三角洲滨海湿地地下水位变化对土壤种子库特征的影响[J].生态学报,2021,41(10):3826-3835.
Feng L, Liu J T, Han G X, et al. Effects of groundwater level fluctuation on characteristics of soil seed banks in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J].

- Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3826-3835.
- [12] 董远鹏, 刘喜娟, 董梦阳, 等. 腐殖质和硝酸钙对赤泥团聚体形成的促进作用[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(10): 1205-1210.
- Dong Y P, Liu X J, Dong M Y, et al. Improvement effect of calcium nitrate and humus on the aggregate formation in bauxite residue[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(10): 1205-1210.
- [13] 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.
- Zeng J M, He B H, Li T Y, et al. Soil infiltration characteristics under different forest and grass restoration models in Karst trough-valley region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 58-64.
- [14] de Almeida W S, Panachuki E, de Oliveira P T S, et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 130-138.
- [15] 岳海晶, 樊贵盛. 土壤入渗模型参数的多元线性预测模型精度的对比分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 73-77, 96.
- Yue H J, Fan G S. Comparison of multivariate linear prediction model precision of soil infiltration model parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 73-77, 96.
- [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] 洪艳华. 长期耕作对黑土理化性质及微生物群落结构的影响[D]. 黑龙江大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
- Hong Y H. Effects of Long-Term Tillage on Physico-chemical Properties and Microbial Community Structure in Black Soil [D]. Daqing, Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.
- [18] 王欢, 付威, 胡锦昇, 等. 渭北旱塬管理措施对冬小麦地土壤剖面物理性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1097-1106.
- Wang H, Fu W, Hu J S, et al. Effects of agricultural measures on soil profile physical properties of winter wheat field in Weibei highland, China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(7): 1097-1106.
- [19] 张一清, 王文娥, 胡明宇, 等. 容重及含水率对土壤电导率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 162-169.
- Zhang Y Q, Wang W E, Hu M Y, et al. Influence of bulk density and water content on soil electrical conductivity[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 162-169.
- [20] Bai Y X, Zhou Y C, Du J J, et al. Effects of a broad-leaf-oriented transformation of coniferous plantations on the hydrological characteristics of litter layers in subtropical China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 25: e01400.
- [21] Mitchell E, Scheer C, Rowlings D, et al. Trade-off between 'new' SOC stabilisation from above-ground inputs and priming of native C as determined by soil type and residue placement[J]. Biogeochemistry, 2020, 149(2): 221-236.
- [22] 李学斌, 陈林, 樊瑞霞, 等. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 41(1): 101-110.
- Li X B, Chen L, Fan R X, et al. Effects of four typical plant community litter input on soil physical and chemical properties under the fenced condition in desert steppe[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2015, 41(1): 101-110.
- [23] 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.
- [24] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13-17.
- Mo B, Chen X Y, Yang Y C, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 13-17.
- [25] 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.
- Yun H Y, Bi H X, Wang S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 183-189.
- [26] 丁燕芳, 赵凤霞, 米琳, 等. 豫中植烟土壤有效态微量元素与 pH 和有机质的关系[J]. 土壤, 2022, 54(1): 88-94.
- Ding Y F, Zhao F X, Mi L, et al. Relationship between available trace elements and pH and organic matter in tobacco-planting soil in central Henan Province[J]. Soils, 2022, 54(1): 88-94.