

不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响

云慧雅¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5}, 王珊珊¹, 赵丹阳¹, 崔艳红¹, 王宁¹, 兰道云¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083;5.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083)

摘要: 利用双环入渗法对黄土残塬沟壑区主要林分类型(刺槐林、油松林、刺槐×油松混交林、山杨栎类天然次生林)进行土壤入渗试验,分析 4 种林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响。结果表明:(1)研究区不同林分类型土壤理化特征存在一定差异,山杨栎类天然次生林的土壤理化性质总体最好,刺槐×油松混交林优于刺槐林和油松林;(2)0~90 min 测试时间内,不同林分类型的土壤入渗速率随时间的变化规律均表现为迅速递减(0~5 min)、逐渐递减(5~60 min)和趋于稳定(60~90 min)的过程;4 种林分的土壤初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率由大到小依次为山杨栎类天然次生林、刺槐×油松混交林、刺槐林、油松林;(3)4 种常见土壤入渗模型(Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型)中,通用经验模型对研究区不同林分类型土壤入渗过程拟合效果最好,拟合精度均在 0.990 以上;(4)相关性分析结果表明,不同林分类型的土壤入渗指标与土壤容重呈现极显著负相关($P < 0.01$),与非毛管孔隙度、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、砂粒含量以及有机质含量呈现极显著正相关($P < 0.01$);通过通径分析并计算主要影响因子的决定系数表明,对土壤初始入渗速率影响程度最大的因子是土壤容重(0.309),对土壤稳定入渗速率影响程度最大的因子是 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(0.251),对土壤平均入渗速率影响程度最大的因子是有机质(0.408)。研究结果为研究区营造水土保持林树种的选择与水土保持功能评价提供一定参考。

关键词: 黄土残塬沟壑区; 土壤理化性质; 土壤入渗; 拟合模型; 通径分析

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)06-0183-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.025

Soil Physical and Chemical Characteristics of Different Forest Types and Their Effects on Soil Infiltration Process

YUN Huiya¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5}, WANG Shanshan¹,

ZHAO Danyang¹, CUI Yanhong¹, WANG Ning¹, LAN Daoyun¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083; 3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083)

Abstract: The soil infiltration test was carried out under the main forest types (*Robinia pseudoacacia* Linn., *Pinus tabulaeformis* Carr., *Robinia pseudoacacia* × *Pinus tabulaeformis* mixed forest, and *Populus davidiana* and *Pinus communis* natural secondary forest) in the gully region of the Loess Plateau by the double-ring infiltration method, and the soils were analyzed for physical and chemical characteristics to analyze their influence on the process of soil infiltration. The results showed that: (1) There were certain differences in soil physical and chemical characteristics of different forest types in the study area, and the soil physical and chemical properties of the natural secondary forest of *Populus davidiana* and *Pinus communis* were generally the best. The mixed forest of *Robinia pseudoacacia* × *Pinus tabulaeformis* was better than that of *Robinia*

收稿日期: 2021-05-31

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501704); 国家自然科学基金项目(31971725)

第一作者: 云慧雅(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail: 15130579329@163.com

通信作者: 毕华兴(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

pseudoacacia Linn. and *Pinus tabulaeformis* Carr.; (2) Within the test period of 0~90 min, the soil infiltration rate of different forest types showed a rapid decrease (0~5 min) and a gradual decrease (5~60 min) over time, and the process of stabilization (60~90 min); the initial soil infiltration rate, stable infiltration rate and average infiltration rate of the four forests in descending order were as follows: *Populus davidiana* and *Pinus communis* natural secondary forests, *Robinia pseudoacacia* × *Pinus tabulaeformis* mixed forest, *Robinia pseudoacacia* Linn., and *Pinus tabulaeformis* Carr.; (3) Among the four common soil infiltration models (Kostiakov model, Horton model, Philip model and general empirical model), the general empirical model had the best fit for the soil infiltration process under different forest types in the study area, the fitting accuracy was above 0.990; (4) Correlation analysis results showed that the soil infiltration indices under different forest types were significantly negatively correlated with soil bulk density ($P < 0.01$), and were positively related to non-capillary porosity, > 0.25 mm water-stable aggregate content, sand content and the organic matter content ($P < 0.01$); through path analysis and calculation of the determination coefficient of the main influencing factors, the results showed that the factor that had the greatest influence on the initial soil infiltration rate was the soil bulk density (0.309). The factor that had the greatest influence on the stable soil infiltration rate was > 0.25 mm water-stable aggregate content (0.251), and the factor that had the greatest influence on the average soil infiltration rate was organic matter (0.408). These research results could provide a certain reference for the selection of tree species and the evaluation of soil and water conservation functions in the study area to build soil and water conservation forests.

Keywords: gully region of the Loess Plateau; soil physical and chemical properties; soil infiltration; fitting model; path analysis

土壤入渗是降水、地表水、土壤水和地下水水分循环的重要环节^[1],对土壤水分条件具有重要影响,同时也能作为林地水土保持功能评价的因素之一^[2]。土壤理化性质是水土保持功能评价的重要指标,其土壤容重、孔隙状况、有机质含量等对保持土壤、防治水土流失具有重要意义^[3]。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一^[4]。为控制水土流失,黄土残塬沟壑区于 1992 年开始实行退耕还林工程,营造了大量以刺槐、油松纯林为主的人工林^[5-6],然而随着林分的生长,土壤水分成为限制人工林生长发育及其水土保持功能发挥的关键因素^[7],林地土壤水分亏缺^[8]逐渐显露,究其原因是由于造林初期存在树种选择不合理或造林密度过大的问题^[9-10]。研究不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响,有助于科学地分析不同林分类型的土壤水分动态变化规律,为研究区造林树种的选择提供科学依据。

针对土壤理化特征及土壤入渗过程的研究已经有很多,主要围绕不同地区植被类型、土地利用类型及林分类型等展开了广泛的讨论。陈家林等^[11]对太行山低山丘陵区乔灌林地、灌草地、草地等的研究认为,不同植被类型下土壤入渗指标与土壤容重、总孔隙度、有机质含量等存在显著相关关系;杨振奇等^[12]在砒砂岩区对不同土地利用类型展开讨论认为,土壤

容重对土壤初始入渗速率解释效果最强;胡建朋等^[13]对山东石灰岩山地 7 种林分类型的研究表明,侧柏五角枫混交林对土壤入渗性能的改良效果优于五角枫纯林;王珊珊等^[14]对晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗的研究表明,与有机质含量、 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关。但已有研究中对黄土残塬沟壑区不同林分类型土壤入渗的对比研究还相对较少,因此本文以黄土残塬沟壑区刺槐林、油松林、刺槐 × 油松混交林以及山杨栎类天然次生林为研究对象,对不同林分类型土壤理化特征和入渗过程进行研究,利用相关性分析筛选出对土壤入渗速率有显著影响的土壤理化性质因子,进而通过通径分析计算主要影响因子总决定系数的大小,揭示其对土壤入渗能力的影响程度,研究结果可为研究区营造水土保持林树种的选择以及水土保持功能评价提供一定参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区地处山西省吉县蔡家川流域(110°39'45"—110°47'45"E,36°14'27"—36°18'23"N),流域面积约 40.15 km²,海拔高度为 897~1 515 m,气候特征为温带大陆性季风气候,年均降水量约 579.15 mm,属典型残塬沟壑地貌,水土流失严重,主要土壤

类型为褐土,呈弱碱性。试验区纯林树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.);混交林以刺槐油松混交、刺槐侧柏混交为主;山杨栎类天然次生林(*Populus davidiana* Dode.);灌木树种以黄刺玫(*Rosa xanthine* Lindl.)、丁香(*Syringa oblata* L.)和荆条(*Vitexnegundo* L. var. *heterophylla* (Franch.)Rehd.)等为主;草本植物主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)、茜草(*Rubia cordifolia* L.)等。

表 1 样地基本情况

林分类型	林分密度/ (株·hm ⁻²)	海拔/ m	坡度/ (°)	胸径/ cm	树高/ m	灌木 盖度/%	草本 盖度/%	郁闭度
刺槐林	1550	1150	25	9.98±0.11	7.49±0.32	57.00	14.10	0.48
油松林	1650	1120	14	9.56±0.34	8.59±0.21	15.00	1.00	0.43
刺槐×油松混交林	1650	1120	27	10.29±0.07	7.47±0.29	24.60	5.00	0.54
山杨栎类天然次生林	1650	1070	33	10.47±0.21	9.86±0.19	68.75	19.00	0.30

注:表中胸径和树高数据为平均值±标准差。

1.2.2 土壤入渗及理化性质的测定方法 于 2020 年 8 月采用双环入渗法进行土壤入渗试验。分别在不同林分各样地坡面的上、中、下 3 个位置选取较为平整的地段作为入渗测点。内、外环直径分别为 14.0, 21.5 cm, 环高 30 cm, 厚度 2 mm, 用橡胶锤压入土中 25 cm。在外环加入适当的水防止水分溢出, 内环记录一定时间水面下渗深度。在土壤入渗试验过程中, 前 5 min 每隔 30 s 记录 1 次入渗量, 5~15 min 每隔 1 min 进行记录, 15~60 min 每隔 5 min 进行记录, 60~90 min 每隔 10 min 进行记录, 每个试验记录入渗数据 33 次。

土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重及土壤孔隙度由环刀法和烘干法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾稀热法测定;>0.25 mm 水稳性团聚体含量由干筛法筛选样本,再利用湿筛法通过 TTF-100 型土壤团聚体分析仪测定其含量,最后由 Malvern 3 000 激光粒度分析仪测定土壤机械组成并按国际制粒级分类,分别为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、砂粒(>0.02 mm)。

1.2.3 土壤入渗模型 土壤入渗模型有多种表达方式,结合前人^[15]经验与研究成果,本文选取适用于黄土高原的 Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型模拟 4 种林分类型的土壤入渗过程^[13,16-17],其公式分别为 $f(t) = at^{-b}$, $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$, $f(t) = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}}$, $f(t) = a_1t^{-n} + b_1$ 。式中: a 、 f_0 、 a_1 为初始入渗速率(mm/min); f_c 、 b_1 为稳定入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); b

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置与样品采集 在研究区选择具有代表性、典型性的 25 年左右的人工林(刺槐林、油松林、刺槐×油松混交林)以及山杨栎类天然次生林为研究对象,每种林分设置 3 块 20 m×20 m 的标准样地,将林分密度控制在 1 500~1 700 株/hm²,对林分内的乔木进行每木检尺;采用基于 GIS 的树冠投影法计算林分郁闭度;分层调查灌草,每个样地均设置 5 m×5 m 灌木样方 5 个,1 m×1 m 草本样方 5 个,样地基本情况见表 1。

为衰减系数; S 为吸湿率(%); k 、 n 为参数。

1.3 数据分析

本文通过 Excel 2016、SPSS 25.0、Origin 2017 软件对土壤理化性质和土壤入渗指标进行数据分析,在 SPSS 25.0 中采用单因素方差分析法(ANOVA)对各指标差异性进行分析,利用以上 4 种模型对不同林分类型土壤入渗过程进行拟合,利用相关性分析和通径分析研究土壤理化性质与土壤入渗的关系。采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤理化特征

不同林分类型土壤理化性质存在较大差异,但总体呈现一定的规律(表 2)。从土壤容重来看,油松林(1.18±0.04a)>刺槐林(1.14±0.05a)>刺槐×油松混交林(1.11±0.08b)>山杨栎类天然次生林(1.09±0.03b);与土壤容重相反,土壤总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体含量均表现为山杨栎类次生林>刺槐×油松混交林>刺槐林>油松林;可以看出山杨栎类天然次生林与刺槐林、油松林均有显著差异($P < 0.05$),与刺槐×油松混交林差异不显著。土壤毛管孔隙度和有机质含量均表现为山杨栎类次生林>刺槐×油松混交林>油松林>刺槐林,且山杨栎类次生林、刺槐×油松混交林和 2 种纯林的土壤有机质含量均存在显著差异($P < 0.05$);土壤含水量表现为山杨栎类次生林(28.00±0.90a)>油松林(26.43±2.19a)>刺槐林(19.02±2.49b)>刺槐×油松混交林(10.65±2.14c)。土壤黏粒和粉粒含量无明显变化规律。综上所述,4 种林分类型中,山杨栎类次生林的土壤理

化性质总体较好,其次是刺槐×油松混交林,油松纯林土壤理化性质表现较差。

2.2 不同林分类型土壤入渗特性

图 1 为 4 种林分类型的土壤入渗过程,不同林分类型土壤入渗速率存在一定差异,但呈现的规律基本一致,均表现为 0~5 min 迅速递减、5~60 min 逐渐递减和 60~90 min 趋于稳定。山杨栎类天然次生林

表 2 不同林分类型土壤理化性质

林分类型	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	土壤 含水量/%	>0.25 mm 水稳性 团聚体含量/%	机械组成/%			有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)
							黏粒 ($<0.002 mm$)	粉粒 ($0.002 \sim 0.02 mm$)	砂粒 ($>0.02 mm$)	
刺槐林	1.14±0.05a	57.96±5.24b	9.15±0.92a	48.81±5.17a	19.02±2.49b	29.07±2.55b	2.55±0.32c	41.66±5.33b	74.98±5.30a	5.50±1.60c
油松林	1.18±0.04a	54.08±5.59c	5.25±1.92b	48.83±3.88a	26.43±2.19a	16.53±5.69c	4.82±0.59b	53.97±12.11a	59.82±13.40b	6.38±0.52c
刺槐×油松混交林	1.11±0.08b	58.95±5.53ab	8.77±0.53a	50.18±5.62a	10.65±2.14c	36.81±6.67a	8.85±3.41a	36.30±4.88b	74.21±6.07a	11.00±3.35b
山杨栎类天然次生林	1.09±0.03b	61.39±3.61a	8.56±0.28a	52.83±3.65a	28.00±0.90a	42.36±9.15a	3.97±0.91bc	34.58±3.24b	81.87±3.09a	17.05±4.29a

注:表中数据表示为平均值±标准差,同行不同字母表示不同林分类型下差异显著($P<0.05$)。

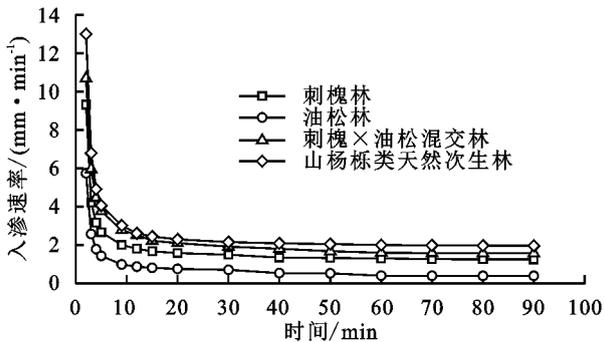


图 1 不同林分类型土壤入渗速率随时间的变化

土壤初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率是反映土壤入渗性能的重要指标,比较其大小关系可以了解不同林分类型林地土壤入渗能力的强弱^[18]。不同林分类型土壤入渗性能存在一定差异性(图 2),刺槐林、油松林、刺槐×油松混交林以及山杨栎类天然次生林的初始入渗速率分别为 9.32, 5.74, 10.69, 12.99 mm/min, 稳渗速率分别为 1.25, 0.39, 1.56, 1.96 mm/min, 平均入渗速率分别为 1.57, 0.67, 2.02, 2.38 mm/min。研究表明,不同林分类型

表 3 土壤入渗过程的拟合结果

林分类型	Kostiakov 模型			Horton 模型				Philip 模型		通用经验模型			
	a	b	R^2	f_c	f_0	k	R^2	S	R^2	a_1	n	b_1	R^2
刺槐林	11.747	0.697	0.788	1.462	42.627	0.838	0.976	17.556	0.752	26.679	2.172	1.383	0.991
油松林	11.604	1.167	0.904	0.581	23.978	0.766	0.971	9.829	0.738	20.263	1.978	0.515	0.990
刺槐×油松混交林	13.226	0.608	0.864	1.854	30.117	0.596	0.972	22.419	0.847	35.261	1.591	1.671	0.993
山杨栎类天然次生林	15.984	0.637	0.810	2.187	45.564	0.704	0.984	25.964	0.787	40.368	1.896	2.052	0.997

由表 3 可知,Kostiakov 模型拟合的 a 值为 11.604~15.984, 拟合参数 a 的值相当于不同林分类型前 2 min 的初始入渗速率^[19], 表现为山杨栎类天然次生林>刺槐×油松混交林>刺槐林>油松林,与实测数据呈现的规律一致。同样地, Philip 模型中, S 为土壤吸湿率,与土壤入渗能力呈正相关,通用经验模型

土壤入渗速率在 0~5 min 期间由 13.00 mm/min 降至 4.05 mm/min,降低 68.82%;人工林中刺槐×油松混交林在 0~5 min 期间由 10.69 mm/min 降至 3.76 mm/min,变化幅度为 64.82%。而油松林的入渗速率在 0~5 min 从 5.74 mm/min 下降为 2.43 mm/min,降低 75.08%,刺槐林由 9.32 mm/min 下降为 2.67 mm/min,变化幅度为 71.35%。

的土壤入渗能力表现为山杨栎类天然次生林>刺槐×油松混交林>刺槐林>油松林。

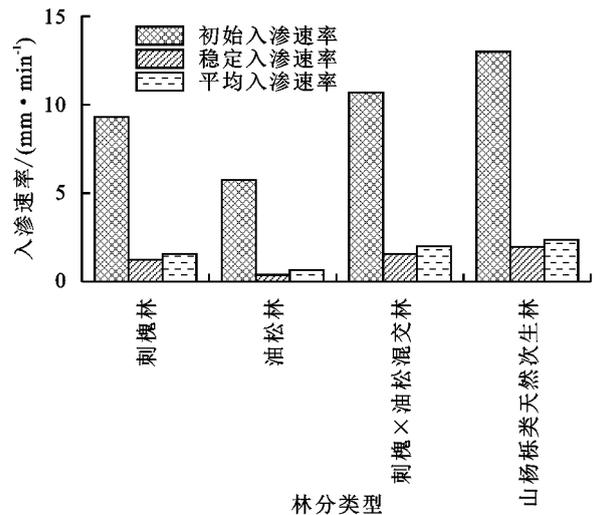


图 2 不同林分类型土壤入渗特性指标

2.3 不同林分类型土壤入渗过程拟合

利用 4 种土壤入渗拟合模型分别拟合 4 种林分类型的土壤入渗过程,得到的拟合参数及拟合效果见表 3。

中,初始入渗速率为 a_1 , 稳渗速率为 b_1 , 以上 2 种模型对土壤入渗过程进行拟合也能呈现与实测数据一致的规律。Horton 模型的拟合结果表明,稳定入渗速率 f_c 的拟合结果与实测结果得出的结论一致,但是初始入渗速率 f_0 拟合的结果为山杨栎类天然次生林最大,刺槐林次之,而实际测量中刺槐×油松混

交林大于刺槐林,与实际测量有所差异。

R^2 表示不同林分类型的土壤入渗过程在不同模型下的拟合效果, R^2 越大,拟合效果越好^[15]。Kostiakov 模型的拟合精度为 0.788~0.904, Horton 模型的拟合精度为 0.971~0.984, Philip 模型拟合效果较差,拟合精度为 0.738~0.847,而通用经验模型拟合精度均在 0.990 以上。可见,通用经验模型对不同林分类型土壤入渗过程的拟合效果最好。

2.4 土壤理化特征对土壤入渗的影响

本文选取的 10 个与土壤结构密切相关的因子与土壤入渗速率进行相关性分析(表 4)表明,土壤初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率与土壤容重、粉粒含量呈极显著负相关性($P < 0.01$),与土壤含水量呈负相关关系;与非毛管孔隙度、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、砂粒以及有机质含量呈现极显著的正相关性($P < 0.01$),与土壤总孔隙度呈显著相关

($P < 0.05$)。其中,土壤容重与初始入渗速率的相关性最高; >0.25 mm 水稳性团聚体含量和稳定入渗速率的相关性最强;有机质含量和土壤平均入渗速率的相关性最强。

经正态性检验对影响土壤入渗速率的 10 个土壤理化因子与土壤入渗指标进行逐步回归分析得出,影响土壤初始入渗速率 Y_1 、土壤稳定入渗速率 Y_2 和土壤平均入渗速率 Y_3 的主要土壤理化性质因子为土壤容重(X_1),有机质(X_2)、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(X_3)和非毛管孔隙度(X_4)。

由表 5 的简单相关系数大小及正负可知,土壤初始入渗速率的主要影响因子为土壤容重和有机质;土壤稳定入渗速率的主要影响因子为有机质、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和非毛管孔隙度;土壤平均入渗速率的主要影响因子为有机质和非毛管孔隙度。

表 4 土壤理化指标与土壤入渗相关性分析

土壤理化指标	土壤容重	总孔隙度	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	土壤含水量	>0.25 mm 水稳性团聚体含量	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 ($0.02\sim 0.002$ mm)	砂粒 (>0.02 mm)	有机质
初始入渗速率	-0.628**	0.370*	0.504**	0.228	-0.090	0.613**	0.018	-0.449**	0.473**	0.526**
稳定入渗速率	-0.612**	0.472**	0.596**	0.310	-0.104	0.703**	0.089	-0.576**	0.568**	0.614**
平均入渗速率	-0.594**	0.464**	0.586**	0.305	-0.140	0.679**	0.128	-0.573**	0.563**	0.713**

注: * 表示相关系数在 0.05 水平上显著相关; ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著相关。

表 5 主要土壤理化指标对土壤入渗速率的通路分析

入渗指标	主要土壤理化指标	直接通路系数	间接通路系数				总间接通路系数	简单相关系数
			土壤容重 X_1	有机质 X_2	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 X_3	非毛管孔隙度 X_4		
初始入渗速率	土壤容重 X_1	-0.492	—	-0.136	—	—	-0.136	-0.628
	有机质 X_2	0.312	0.214	—	—	—	0.214	0.526
	有机质 X_2	0.358	—	—	0.175	0.081	0.256	0.614
稳定入渗速率	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 X_3	0.318	—	0.197	—	0.188	0.385	0.703
	非毛管孔隙度 X_4	0.305	—	0.095	0.196	—	0.291	0.596
平均入渗速率	有机质 X_2	0.572	—	—	—	0.141	0.141	0.713
	非毛管孔隙度 X_4	0.456	—	0.130	—	—	0.130	0.586

注:“—”表示无数值。

通路分析中主要影响因子决定系数的大小即是主要影响因子的影响程度。研究主要土壤理化指标对土壤入渗产生的作用情况,能够更直观分析各指标对入渗速率的影响程度。由表 6 的决定系数可知,土壤初始入渗速率受主要土壤理化指标的影响程度表现为土壤容重 $>$ 有机质;土壤稳定入渗速率受主要土壤理化指标的影响程度表现为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 $>$ 有机质 $>$ 非毛管孔隙度;土壤平均入渗速率受主要土壤理化指标的影响程度表现为有机质 $>$ 非毛管孔隙度。

3 讨论

不同林分类型表现出不同的理化特征,且土壤入渗

能力差异性显著。本文得出,不同林分类型的土壤理化特征存在较大的差异,表现为山杨栎类天然次生林土壤理化性质优于人工林,且刺槐 \times 油松混交林优于纯林。主要体现在山杨栎类天然次生林和刺槐 \times 油松混交林的土壤容重较小,总孔隙度、毛管孔隙度较大, >0.25 mm 水稳性团聚体含量、有机质含量较高。研究结果表明,4 种林分类型土壤初渗速率、稳渗速率和平均入渗速率为山杨栎类天然次生林 $>$ 刺槐 \times 油松混交林 $>$ 刺槐林 $>$ 油松林。本研究中天然次生林的入渗能力最好,主要原因可能是天然次生林的植被覆盖度大,地下根系较人工林丰富,起到对土壤土质的改善作用,试验结果与阿茹·苏里坦等^[20]对天山群落不同群落类型的土壤入渗性能研究结论近似。3 种人工林中,刺槐 \times 油松

混交林的土壤入渗能力优于人工纯林,究其原因除了不同林分类型理化特征存在差异,可能与刺槐×油松混交林的枯落物和腐殖质较厚有关,枯落物和腐殖质在分解过程中促进土壤团聚体的形成,加上灌草丰富了土壤根系,使土壤孔隙度增加,增大土壤水分在垂直方向的渗透能力^[21-22]。而人工纯林林分结构太过单一,林下物种多样性缺乏,对土壤的改善作用小,影

响土壤入渗能力,使其不能更好发挥水土保持作用^[23],加上油松因其枯枝落叶含有油性物质,造成其难以分解,导致有机质含量变低、土壤结构稳定性差、土壤容重变大,故土壤入渗性能最差^[24]。不同林分类型土壤入渗能力存在差异的主要原因除了以上因素外,还可能与林分密度有关,关于不同密度下不同林分类型的土壤入渗能力还需要进一步研究。

表 6 主要土壤理化指标对土壤入渗产生的作用情况

入渗指标	主要土壤理化指标	直接决定系数	间接决定系数	总决定系数	排序
初始入渗速率	土壤容重 X_1	0.242	0.067	0.309	1
	有机质 X_2	0.097	0.067	0.164	2
	有机质 X_2	0.101	0.092	0.193	2
稳定入渗速率	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 X_3	0.128	0.122	0.251	1
	非毛管孔隙度 X_4	0.093	0.089	0.182	3
平均入渗速率	有机质 X_2	0.327	0.081	0.408	1
	非毛管孔隙度 X_4	0.208	0.059	0.267	2

土壤理化性质是研究土壤入渗的重要因素之一。与其他学者^[11,15]研究结果一致,土壤入渗速率与土壤容重、非毛管孔隙度呈显著相关。土壤容重在一定程度上反映土壤结构状况,其值越小,土壤孔隙度越大,渗透能力越强。本文得出土壤入渗速率与非毛管孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体含量以及有机质含量呈现极显著的正相关性($P < 0.01$),这是由于土壤的孔隙状况与团聚体大小有关,有机质有利于土壤团聚体的形成,进而改良土壤孔隙^[25],>0.25 mm 水稳性团聚体含量越高,土壤孔隙状况越好,入渗能力增强。土壤入渗速率与土壤含水量有一定的负相关性,主要因为水分下渗进入土体,水分所受重力与土壤的基质吸力共同作用,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^[26]。不同土壤入渗阶段主要土壤理化性质影响因子及影响程度也存有一定差异性。本研究得出,土壤稳定入渗速率的主要影响因子为有机质、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和非毛管孔隙度,主要由于有机质在改变土壤团聚体、孔隙状况的基础上,间接影响土壤稳定入渗速率^[26]。主要影响因子对入渗速率的影响与其通径系数有关,决定系数越大,影响程度越强。本研究所有影响因子的总决定系数都 < 1,这与李平等^[27]的研究结果一致,说明对土壤入渗产生重要影响的潜在因子没有考虑,如根系生物量、根系密度以及地下微生物等,今后在研究土壤入渗的影响因素时有待进一步探讨。

本文以不同林分类型为切入点对土壤入渗性能进行比较发现,天然次生林的土壤入渗能力优于 3 种人工林,且刺槐×油松人工混交林的土壤入渗能力优于刺槐纯林和油松纯林。研究土壤理化性质与土壤入渗的关

系时,利用通径分析揭示土壤入渗速率的主要影响因素以及影响程度的大小,并根据总决定系数将主要影响因子进行排序,起到简化指标的筛选作用。根据本文研究结果,建议研究区营造林分时可以采取近自然或者混交的方式;在对研究区的土壤入渗特性进行评价分析时,建议选择土壤容重、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和有机质含量作为评价指标。但在今后的研究中应尽可能将相关指标扩展,完善土壤入渗的主要影响因素,建立适用范围更广的有关不同林分类型土壤入渗性能评价指标体系,为不同林分类型土壤入渗性能评价和水土保持功能评价提供理论依据。

4 结论

(1) 研究区不同林分类型土壤理化特征存在一定差异,山杨栎类天然次生林的土壤理化性质总体最好,刺槐×油松混交林优于刺槐林、油松林,在营造水土保持林时,建议选择天然次生林和混交林。

(2) 不同林分类型土壤入渗速率呈现先迅速递减,后趋于缓慢,最后在 90 min 均达到稳渗的规律,入渗过程近乎相同;初始入渗速率、稳定入渗速率以及平均入渗速率均表现为山杨栎类天然次生林 > 刺槐×油松混交林 > 刺槐林 > 油松林。

(3) 4 种常见土壤入渗模型(Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型)中,通用经验模型是研究区不同林分类型土壤入渗过程的最佳模型,拟合精度均在 0.990 以上。

(4) 不同林分类型的土壤入渗指标与土壤容重呈现极显著负相关($P < 0.01$),与非毛管孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、砂粒以及有机质呈现极显著

正相关($P < 0.01$);土壤容重、有机质是土壤初始入渗速率的主要影响因子;有机质、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和非毛管孔隙度是土壤稳定入渗速率的主要影响因子;有机质和非毛管孔隙度是土壤平均入渗速率的主要影响因子;土壤初渗速率的主要决定因子为土壤容重(0.309);稳渗速率的主要决定因子为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(0.251),平均入渗速率的主要决定因子为有机质含量(0.408)。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Cao F, Huang L, et al. Comparative study and simulation of soil infiltration performance in open green space [J]. Tehnički Vjesnik, 2020, 27(3): 812-818.
- [2] 周巧稚. 晋西黄土区不同密度刺槐林水土保持功能评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [3] 林佳慧. 不同林分类型土壤水分及物理性质对比研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [4] 陈丽华, 余新晓. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 42-47.
- [5] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化 [J]. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424.
- [6] 张恒硕, 查同刚, 张晓霞. 晋西黄土区退耕年限对土壤物理性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 123-133.
- [7] 肖婧, 王兵. 黄土丘陵区不同坡度撂荒草地入渗特征影响因素试验研究 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 136-142.
- [8] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China [J]. Journal of Hydrology, 2005, 328(3): 548-558.
- [9] Wang Y, Yu P, Feger K H, et al. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China [J]. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 4(2): 277-287.
- [10] 茹豪. 晋西黄土区典型林地水文特征及功能分析 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [11] 陈家林, 孔玉华, 裴丙, 等. 太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 60-65.
- [12] 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.
- [13] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 54-58.
- [14] 王珊珊, 毕华兴, 刘俊, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 231-237.
- [15] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 等. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 62-69.
- [16] 席彩云, 余新晓, 徐娟, 等. 北京密云山区典型林地土壤入渗特性 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 42-47.
- [17] 李永涛, 魏海霞, 王振猛, 等. 黄河三角洲不同林分类型对土壤水分物理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(8): 106-112.
- [18] 蒋平海. 黄土丘陵区典型植被覆盖下土壤入渗特征及影响因素研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [19] 安倩. 吕梁方山不同土地利用类型土壤入渗性能对比研究 [D]. 山西 太谷: 山西农业大学, 2015.
- [20] 阿茹·苏里坦, 常顺利, 张毓涛. 天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟 [J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9111-9118.
- [21] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J/OL]. Journal of Hydrology, 2020, 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125535>
- [22] 王意锟, 金爱武, 方升佐. 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1431-1440.
- [23] 魏曦. 晋西黄土区典型人工林分结构与水土保持功能耦合关系研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [24] Xie C K, Cai S Z, Yu B Q, et al. The effects of tree root density on water infiltration in urban soil based on a Ground Penetrating Radar in Shanghai, China [J/OL]. Urban Forestry and Urban Greening, 2020, 50. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126648.
- [25] 冯娜, 刘冬冬, 赵荣存, 等. 岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 162-169.
- [26] 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.
- [27] 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.