

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200122

## 晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析

崔艳红<sup>1</sup> 毕华兴<sup>1,2,3,4</sup> 侯贵荣<sup>5</sup> 王宁<sup>1</sup> 王珊珊<sup>1</sup>  
赵丹阳<sup>1</sup> 马晓至<sup>1</sup> 云慧雅<sup>1</sup>

(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, 山西 吉县 042200; 3. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室、北京市水土保持工程技术研究中心、林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083; 4. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206; 5. 四川农业大学林学院, 四川 成都 611130)

**摘要:**【目的】研究晋西黄土残塬沟壑区刺槐林在不同林龄和密度条件下土壤入渗特征及其影响因素, 为林分结构精准提升提供功能导向的调控依据。【方法】在野外采用双环法测定不同林龄(15、25 和 35 年)以及不同密度(800、1 200、1 600、1 800 和 2 200 株/hm<sup>2</sup>)刺槐林的土壤入渗过程, 并测定了土壤理化性质, 分析了土壤孔隙度、土壤密度、有机质含量等土壤理化性质与土壤渗透速率的相关性。【结果】(1)在一定程度上, 稳渗速率在同一密度条件下随林龄的增大而增大; 在同一林龄条件下, 随着密度的增大而增大; 初始入渗速率和平均入渗速率随林龄增大而增大; (2)对不同林龄及不同密度刺槐林的土壤入渗过程模拟发现常用的 4 种模型(Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型和通用经验模型)对该研究区刺槐人工林的模拟效果均较好, 其中通用经验模型的平均回归系数(0.977) > Horton 模型的平均回归系数(0.958) > Kostiakov 模型的回归系数(0.953) > Philip 模型的回归系数(0.945), 即认为通用经验模型拟合效果更好; (3)通过主成分和相关性分析可知, 土壤入渗性能与土壤密度、有机质含量和水稳性团聚体呈极显著相关性; 土壤初始含水量是影响初始入渗速率的主要因子; 1~2 mm 水稳性团聚体、土壤密度和毛管孔隙度是影响稳渗速率的主要因子; 影响平均入渗速率主要因子是土壤初始含水量和 0.5~1 mm 水稳性团聚体。【结论】在一定林分密度范围内(800~2 200 株/hm<sup>2</sup>), 随着刺槐林林龄和林分密度的增加土壤结构不断改善, 土壤入渗性能逐渐提升, 且在相同林分密度条件下 35 年刺槐人工林土壤入渗性能更好。

**关键词:** 晋西黄土残塬沟壑区; 土壤入渗; 入渗模型; 主成分分析; 刺槐林; 林分密度; 林龄

**中图分类号:** S714.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)01-0077-11

**引文格式:** 崔艳红, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 77-87. Cui Yanhong, Bi Huaxing, Hou Guirong, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 77-87.

### Soil infiltration characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully region of western Shanxi Province, northern China

Cui Yanhong<sup>1</sup> Bi Huaxing<sup>1,2,3,4</sup> Hou Guirong<sup>5</sup> Wang Ning<sup>1</sup> Wang Shanshan<sup>1</sup>  
Zhao Danyang<sup>1</sup> Ma Xiaozhi<sup>1</sup> Yun Huiya<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jixian County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Jixian 042200, Shanxi, China;

3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

收稿日期: 2020-04-28 修回日期: 2020-10-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31971725), 国家重点研发计划项目(2016YFC0501704)。

第一作者: 崔艳红, 博士生。主要研究方向: 林业生态工程。Email: cui1519326449@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 毕华兴, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持与林业生态工程。Email: bhx@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

4. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-Environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206, China;

5. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to study the soil infiltration characteristics and its influencing factors of *Robinia pseudoacacia* forest in the loess gully region of western Shanxi Province of northern China, which could provide functional guidance for the precise improvement of stand structure. [Method] We selected the stand age of 15, 25, and 35 years and the density of 800, 1 200, 1 600, 1 800, and 2 200 plant/ha *Robinia pseudoacacia* forest for double-ring infiltration test. Correlation between the physical and chemical properties of soil, such as soil porosity, bulk density, organic matter, and soil infiltration rate, was analyzed. [Result] (1) To some extent, the steady infiltration rate increased with the increase of forest age and stand density. The initial infiltration rate and average infiltration rate increased with the increase of stand age. (2) Four models (Horton, Kostiaikov, Philip, and general empirical model) were used to simulate the infiltration process of *Robinia pseudoacacia* forest in different stand ages and densities. The results showed that the average regression coefficient of general empirical model (0.977) > Horton model (0.958) > Kostiaikov model (0.953) > Philip model (0.945). Therefore, the fitting effect of general empirical model was best. (3) According to principal component and correlation analysis, the soil infiltration performance was significantly correlated with the soil bulk density, organic matter, and water-stable aggregates. The initial soil moisture content was the main factor affecting the initial infiltration rate. The 1–2 mm water-stable aggregates, soil bulk density, and capillary porosity were the main factors affecting stable infiltration rate. The main factors affecting average infiltration rate were the initial soil moisture content and 0.5–1 mm water-stable aggregates. [Conclusion] In a certain range (800–2 200 plant/ha), with the increase of age and density of *Robinia pseudoacacia* forest, the soil structure is improved, and the soil infiltration performance is gradually improved. Under the same stand density, the 35-year *Robinia pseudoacacia* forest shows better infiltration performance than others.

**Key words:** loess gully region in western Shanxi Province; soil infiltration; infiltration model; principal component analysis; *Robinia pseudoacacia* plantation; stand density; stand age

黄土高原在水力侵蚀的作用下,土壤结构破坏严重,水土流失量大,成为我国土壤侵蚀的重灾区。自国家实施三北防护林和退耕还林等项目以来,大面积刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等人工林的种植,使得植被覆盖率逐年增加,如黄土高原植被覆盖率由1999年的31.6%提高到2013年的56.9%,黄河输沙量减少到2亿t<sup>[1]</sup>。但由于植被耗水量大,黄土高原大部分地处干旱半干旱地区,降水量从西北到东南在150~800 mm之间,远低于年平均蒸发量1 400~2 000 mm<sup>[2-3]</sup>,水成为黄土高原森林植被生长的主要限制因子。

土壤水分入渗是补给水的必然通道以及重要补给方式,是影响水文循环、地表径流和土壤侵蚀等的重要因素<sup>[4]</sup>。其中,降雨和灌溉等地表水进入土壤或产生径流是由渗透所决定<sup>[5]</sup>。它在提高土壤剖面水和溶质的运移效率上以及在减少水分损失等方面发挥着关键作用<sup>[4]</sup>。然而,影响土壤入渗的因素有很多,吕振豫等<sup>[6]</sup>和Huang等<sup>[7]</sup>将其概括为两方面,一

方面是由土壤自身理化性质决定,如土壤结构、质地、容重和有机质等,另一方面由外部因素如降雨强度、植被覆盖和人为干扰等因素影响。李平等<sup>[8]</sup>在对黄土高寒区不同植被类型的土壤入渗性能研究中发现,影响土壤入渗的主要因素有孔隙度、水稳性团聚体和有机质;而阿茹·苏里坦等<sup>[9]</sup>对天山林区不同植被类型的土壤入渗性能的研究发现,土壤含水率、土壤毛管孔隙度、土壤容重和有机质对土壤入渗起决定作用。由此可知,因研究对象和研究区的不同,影响土壤入渗的主要因素也不尽相同。土壤入渗性能的研究大都集中在不同土地利用类型、不同植被类型、不同人为干扰等方面<sup>[7,10-11]</sup>,缺乏对同一植被类型不同林龄和密度的林分研究。

晋西黄土残塬沟壑区位于黄土高原半湿润向半干旱区的过渡带上,生态环境脆弱,水土流失严重,该区降水不足、分布不均,土壤贫瘠、肥力低<sup>[12]</sup>。为了改善生态环境和防治水土流失,分别于1993年和2003年左右在该区建立了大面积的刺槐人工林。但

随着森林植被的恢复,不合理种植、林分功能低下和土壤干化等问题也日益突出,迫切需要将低效林分结构进行合理调整,精准提升林分功能<sup>[2,13]</sup>。结构决定功能,功能反映结构的好坏。林分林龄、林分密度通过改变林下光照、温度和蒸发等,对枯落物的数量、分解以及林下植被多样性产生影响,造成土壤肥力和理化性质的差异<sup>[14-15]</sup>,进而影响土壤入渗。而林分密度又作为林分营造与调控的可控因子,故从土壤入渗性能角度出发,以晋西黄土残塬沟壑区刺槐林为研究对象,对其不同林龄不同密度林分土壤入渗性能特征、影响因素进行研究,并对入渗过程进行模拟。更好的了解刺槐林的入渗特征以及随林龄和密度的变化,为后续植被结构合理调整提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本试验选择以山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站(36°14'27"~36°18'23"N, 110°39'45"~110°47'45"E)为试验依托站点。该站点位于黄河中游黄土高原东南部山西省吉县,在该观测研究站建立了长期稳定的定位监测和调查点,具备较完善的

野外和室内试验条件。该研究区水土流失严重、生态环境脆弱以及水资源短缺,是典型的黄土残塬沟壑区,其海拔范围 900~1 513 m,年平均降雨量为 579.5 mm,年平均气温为 10℃,年蒸发量为 1 500~2 000 mm,约为降水量的 3~4 倍<sup>[16]</sup>。土壤类型为褐土,黄土母质,土壤质地为粉质壤土<sup>[17-19]</sup>。该研究区人工林多以刺槐、油松和侧柏(*Platycladus orientalis*)为主,其中刺槐林下灌木主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、杠柳(*Periploca sepium*)、丁香(*Syringa oblata*)和悬钩子(*Rubus corchorifolius*)等,草本层植物主要有细叶苔草(*Carex rigescens*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、茜草(*Rubia cordifolia*)等。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地布设

研究区位于山西省吉县蔡家川小流域,流域面积为 40.1 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。选取流域内植被恢复 15 年、25 年和 35 年的刺槐林为研究对象,通过对不同林龄的林分进行大量调查,并对每个恢复年限的刺槐林各筛选出 4 个主要的林分密度,在选取的刺槐林内各设置 20 m×20 m 的标准样地,对立地、植被进行调查,并进行土壤入渗测定和土壤理化性质取样等相关工作,样地分布以及概况见图 1、表 1。

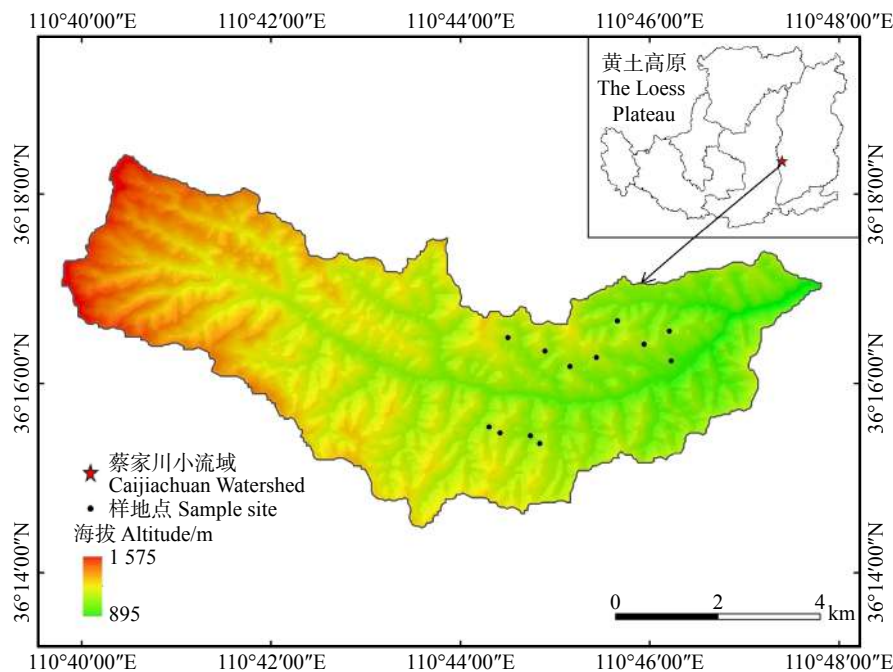


图 1 黄土高原蔡家川小流域刺槐林样地布设

Fig. 1 Sample plot layout of *Robinia pseudoacacia* plantation at Caijiachuan Watershed of the Loess Plateau

#### 1.2.2 土壤入渗及理化性质的测定

在选取的刺槐林内设置 20 m×20 m 的标准样地,在每个样地内选取较平整的地段 3 处进行双环入渗试验,在样地内设置重复试验,排除渗透的局部变异性。双环入渗试验选取内外直径分别为 15 cm

和 30 cm,环高 30 cm、厚 2 mm。测定时在外环与内环之间加入一定量的水(保持外环中的水深)后,在内环中加水 2 cm(从小钢尺的刻度判断加水量),当内环中水深下降 1 cm 时重新加水至 2 cm,并记录下渗 1 cm 水所用的时间(min)。当连续 3 次及以上下

表1 样地基本概况

Tab. 1 Basic situation of sample plots

| 林龄/a<br>Stand age/year | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> )<br>Density/(plant·ha <sup>-1</sup> ) | 海拔<br>Altitude/m | 坡度<br>Slope degree/(°) | 坡向<br>Slope aspect   | 平均树高<br>Average tree height/m | 平均胸径<br>Mean DBH/cm | 郁闭度<br>Canopy density |
|------------------------|---|------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|
| 15                     | 1 200   | 1 075            | 23                     | 阴坡 Shady slope       | 7.90                          | 9.15                | 0.50                  |
|                        | 1 600   | 950              | 18                     | 阳坡 Sunny slope       | 9.90                          | 11.21               | 0.68                  |
|                        | 1 800   | 980              | 13                     | 阳坡 Sunny slope       | 10.54                         | 12.98               | 0.62                  |
|                        | 2 200   | 1 090            | 28                     | 半阳坡 Semi-sunny slope | 8.04                          | 9.22                | 0.70                  |
|                        | 800   | 1 210            | 24                     | 半阴坡 Semi-shady slope | 7.81                          | 10.13               | 0.41                  |
| 25                     | 1 200   | 1 160            | 13                     | 半阳坡 Semi-sunny slope | 9.80                          | 13.32               | 0.48                  |
|                        | 1 600   | 1 150            | 25                     | 半阴坡 Semi-shady slope | 7.64                          | 9.98                | 0.52                  |
|                        | 2 200   | 1 170            | 20                     | 半阴坡 Semi-shady slope | 6.65                          | 8.08                | 0.58                  |
| 35                     | 1 200   | 1 220            | 28                     | 半阴坡 Semi-shady slope | 8.14                          | 11.51               | 0.58                  |
|                        | 1 600   | 1 230            | 24                     | 阳坡 Sunny slope       | 6.55                          | 8.94                | 0.58                  |
|                        | 1 800   | 1 229            | 37                     | 半阳坡 Semi-sunny slope | 7.87                          | 10.18               | 0.60                  |
|                        | 2 200   | 1 230            | 25                     | 半阴坡 Semi-shady slope | 7.25                          | 9.63                | 0.52                  |

渗 1 cm 水所用的时间  $t(\text{min})$  相同则认为土壤已经达到了稳渗, 此时的渗透速率就是稳渗速率。土壤渗透速率  $f_i = 10/t$ , 单位 mm/min。

每个样地沿任一对角线且在双环入渗试验点附近挖取 3 个 30 cm 深的剖面, 用环刀在垂直方向上每隔 10 cm 为一层采集原状土样, 且用铝盒取样测定土壤含水量, 每层 3 个重复, 各共 27 个样品, 并用自封袋取得 500 g 原状土 9 袋用于化学性质和团聚体的测定。所有样地共取得铝盒、环刀各 324 个, 500 g 自封袋土样 108 袋。

将取回的环刀用浸水法测定土壤密度、总孔隙

度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度; 将铝盒用烘干法测定土壤含水量; 将土样用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机质含量; 利用 XY-100 型土壤团聚体分析仪采用干筛、湿筛方法测定水稳性团聚体含量。测定结果如表 2。

### 1.2.3 土壤入渗模型

选取的 4 种渗透模型分别是 Horton 模型、Koistakov 模型、Philip 模型和通用经验模型<sup>[4,21]</sup>。这些模型对初始条件和边界条件的假设以及根据可观测数据估计的拟合参数的数目有所不同。采用不同的统计模型评价准则, 对模型拟合观测数据的性能

表2 土壤理化性质

Tab. 2 Physical and chemical properties of soil

| 林龄/a<br>Stand age/year | 密度/<br>(株·hm <sup>-2</sup> )<br>Density/<br>(plant·ha <sup>-1</sup> ) | 土壤初始<br>含水量<br>Initial moisture<br>content of soil/% | 土壤密度<br>Soil bulk<br>density/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤总<br>孔隙度<br>Total porosity<br>of soil/% | 毛管<br>孔隙度<br>Capillary<br>porosity/% | 非毛管<br>孔隙度<br>Non-capillary<br>porosity/% | 有机质含量<br>Organic<br>matter<br>content/% | 水稳性团聚体<br>Water-stable aggregate/mm |        |         |         |          |
|------------------------|---|--|--|---|--------------------------------------|---|---|-------------------------------------|--------|---------|---------|----------|
|                        |   |  |  |   |                                      |   |   | > 5                                 | 2~5    | 1~2     | 0.5~1   | 0.25~0.5 |
| 15                     | 1 200   | 10.76ab  | 1.26ab   | 0.48ab                                    | 0.45ab                               | 0.03de                                    | 1.01b                                   | 0.36c                               | 2.63c  | 3.92c   | 5.68b   | 11.13a   |
|                        | 1 600   | 7.30b  | 1.15ab   | 0.52a                                     | 0.50a                                | 0.02d                                     | 1.06b                                   | 0.77c                               | 4.22c  | 6.64bc  | 6.72b   | 9.24a    |
|                        | 1 800   | 10.57ab  | 1.13b  | 0.53a                                     | 0.51a                                | 0.02d                                     | 1.12b                                   | 4.29a                               | 6.77b  | 7.62b   | 7.25b   | 10.28a   |
|                        | 2 200   | 9.27b  | 1.09bc   | 0.54b                                     | 0.50ab                               | 0.04e                                     | 1.18b                                   | 2.55bc                              | 5.89bc | 8.51ab  | 9.99ab  | 12.38a   |
|                        | 800   | 8.76b  | 1.28a  | 0.45b                                     | 0.42b                                | 0.03c                                     | 1.08b                                   | 1.60bc                              | 3.96c  | 4.06c   | 6.42b   | 11.96a   |
| 25                     | 1 200   | 13.14a   | 1.18ab   | 0.51ab                                    | 0.46ab                               | 0.05c                                     | 1.12b                                   | 1.88bc                              | 5.30c  | 7.60b   | 10.15ab | 10.62a   |
|                        | 1 600   | 8.46b  | 1.16ab   | 0.52ab                                    | 0.49ab                               | 0.03d                                     | 1.22b                                   | 2.39bc                              | 5.49c  | 6.09bc  | 5.94b   | 8.85a    |
|                        | 2 200   | 6.70b  | 1.05bc   | 0.54a                                     | 0.48ab                               | 0.06b                                     | 1.26b                                   | 5.55da                              | 9.89a  | 10.15ab | 9.39b   | 10.86a   |
| 35                     | 1 200   | 6.76b  | 1.14b  | 0.49ab                                    | 0.42b                                | 0.07a                                     | 1.14b                                   | 1.38bc                              | 5.39c  | 8.77ab  | 12.13ab | 11.91a   |
|                        | 1 600   | 6.24b  | 1.11b  | 0.53ab                                    | 0.49ab                               | 0.04c                                     | 1.16b                                   | 3.02b                               | 5.86bc | 9.74ab  | 13.78a  | 10.60a   |
|                        | 1 800   | 9.98ab   | 1.11bc   | 0.53a                                     | 0.50ab                               | 0.03d                                     | 1.24b                                   | 3.28b                               | 4.32c  | 10.98a  | 13.68a  | 10.73a   |
|                        | 2 200   | 7.15b  | 0.97c  | 0.54ab                                    | 0.51ab                               | 0.03d                                     | 2.04a                                   | 2.51bc                              | 5.38c  | 9.56ab  | 11.3ab  | 12.78a   |

注: 小写字母表示在  $P < 0.05$  水平上的差异显著性。Note: lowercase letters mean significant differences at  $P < 0.05$  level.

进行评价。

Horton 模型

$$f_t = f_s + (f_0 - f_s) \cdot e^{-\beta t} \quad (1)$$

Koistakov 模型

$$f_t = a \cdot t^{-b} \quad (2)$$

Philip 模型

$$f_t = 0.5 \cdot S \cdot t^{-0.5} + f_s \quad (3)$$

通用经验模型

$$f_t = f_s + a \cdot t^{-b} \quad (4)$$

式中:  $f_0$  和  $f_s$  分别表示初始和稳定入渗速率(mm/min),  $f_t$  表示给定时间( $t$ )的入渗速率(mm/min)。 $a$ 、 $b$  和  $\beta$  为模型参数,  $S$  为吸渗率。

#### 1.2.4 数据分析

选取 4 种常用的模型即 Horton 模型、Koistakov 模型、Philip 模型和通用经验模型, 在 SPSS 20.0 中对不同林龄不同密度刺槐人工林的土壤入渗过程进行拟合。并在 SPSS 20.0 中进行 ANOVA 方差分析、LSD 多重比较、Pearson 相关分析和主成分分析, 并利用多元逐步回归提取主要因子, 在 Origin 中作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 刺槐林土壤入渗特征

由图 1 可知, 刺槐林在林分密度为 1 200、1 600 和 2 200 株/hm<sup>2</sup> 的条件下, 土壤的初始入渗速率表现出随林龄的增加而变大的趋势, 在同一林龄即 15 年、25 年和 35 年条件下, 刺槐林的土壤初始入渗速率随林分密度的增加其变化规律不明显。通过单因素方差分析可知, 在林分密度为 1 200 和 1 600 株/hm<sup>2</sup> 的条件下, 林龄为 15 年和 25 年的土壤初始入渗速率与 35 年的土壤初始入渗速率均表现出差异显著 ( $P_{1200-15a} = 0.015$ ,  $P_{1200-25a} = 0.015$ ,  $P_{1600-15a} = 0.001$ ,  $P_{1600-25a} = 0.003$ ); 在林分密度为 2 200 株/hm<sup>2</sup> 条件下, 仅 15 年的刺槐林土壤初始入渗速率与 35 年的初始入渗速率表现出差异显著 ( $P_{2200-15a} = 0.020$ )。而对同一林龄不同密度条件下, 35 年的刺槐林在林分密度为 1 200、1 600 和 2 200 株/hm<sup>2</sup> 条件下, 初始入渗速率与 1 800 株/hm<sup>2</sup> 的初始入渗速率表现出差异显著 ( $P_{35a-1200} = 0.003$ ,  $P_{35a-1600} = 0.001$ ,  $P_{35a-2200} = 0.007$ )。

刺槐林的稳渗速率在同一林龄条件下, 稳渗速率随着密度的增加而增大; 在同一密度的条件下, 稳渗速率随着林龄的增加而增大。其中, 本研究中刺槐林的稳渗速率范围为 1.23 ~ 2.45 mm/min, 平均值为 1.73 mm/min。通过单因素方差分析可知, 在林龄

为 15 年的条件下, 林分密度为 2 200 株/hm<sup>2</sup> 的刺槐林稳渗速率与林分密度为 1 200 和 1 600 株/hm<sup>2</sup> 的稳渗速率均表现出差异显著; 在林分密度为 1 200 株/hm<sup>2</sup> 的条件下, 林龄为 15 年的刺槐林稳渗速率与 35 年的表现出差异显著; 而在其他各条件下均表现出差异不显著(图 2)。

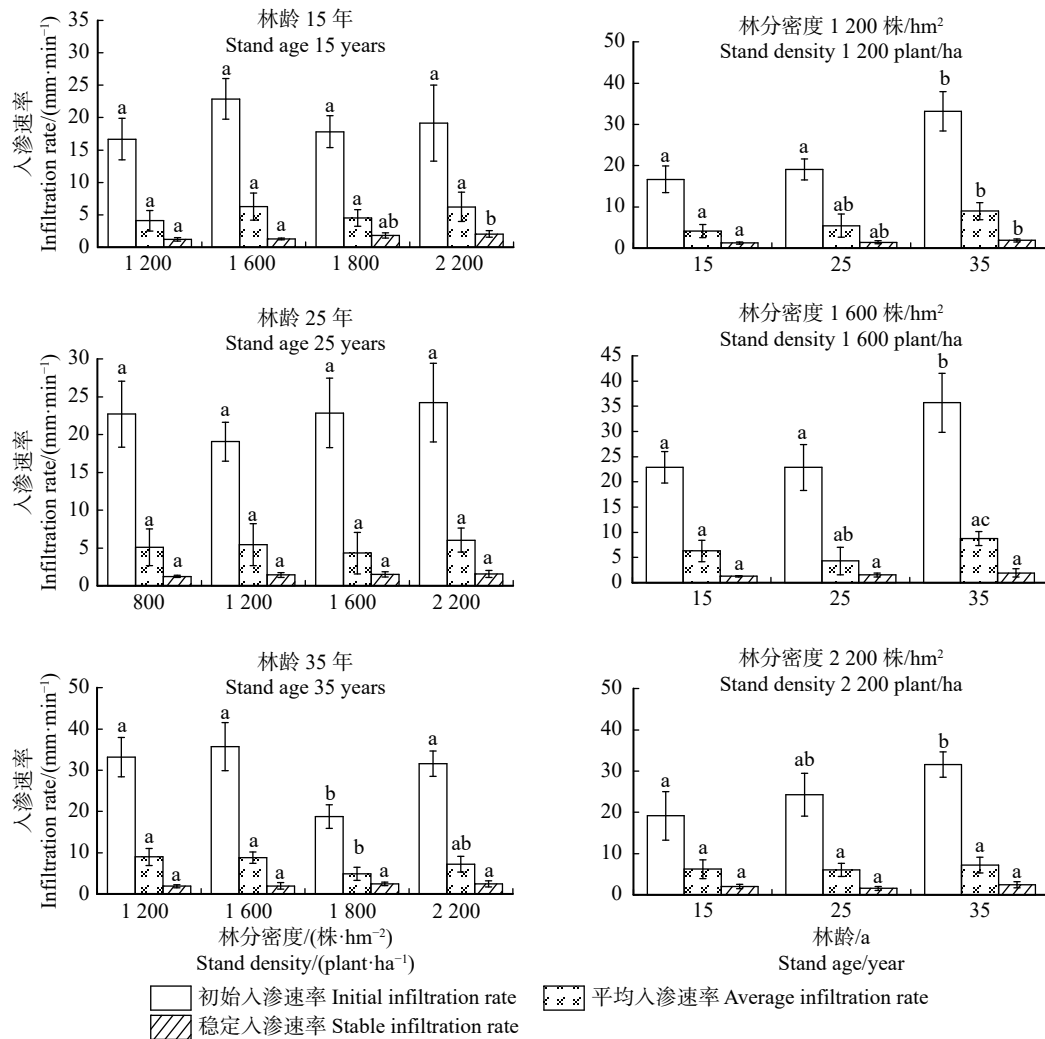
该研究中刺槐林的平均入渗速率的范围为 4.09 ~ 8.75 mm/min, 平均值为 5.98 mm/min。在林分密度为 1 200 株/hm<sup>2</sup> 条件下, 15 年的刺槐林平均入渗速率与 35 年的差异显著; 在林分密度为 1 600 株/hm<sup>2</sup> 条件下, 25 年的刺槐林平均入渗速率与 35 年的差异显著; 在林龄为 35 年的条件下, 林分密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup> 的刺槐林平均入渗速率与 1 200 株/hm<sup>2</sup> 和 1 600 株/hm<sup>2</sup> 的平均入渗速率均差异显著。

### 2.2 刺槐林土壤入渗过程模拟

土壤水分入渗过程通常会经历土壤入渗速率的急速下降、平缓下降和稳定 3 个阶段<sup>[22]</sup>。刺槐林在不同林龄不同密度的条件下, 均表现出在入渗 20 min 左右入渗速率渐于平稳, 在达到稳渗时, 表现出稳渗速率分别随着密度和林龄的增加而变大(图 3)。

将测量的渗透数据拟合到选定的渗透模型中, 即 Philip、Horton、Kostiakov 和通用经验模型结果如表 3 所示, 获得了渗透模型的一系列参数, 表明了不同模型对晋西黄土区刺槐林的土壤水分入渗过程模拟精度有所不同。

Horton 模型模拟的初始入渗速率和稳渗速率的值均比实测值大, 与实测值相差 1.29 ~ 5.43 mm/min 和 0.21 ~ 0.59 mm/min。在 Kostiakov 入渗模型中, 参数  $b$  是指入渗速率随时间减小的程度, 由表 3 可知,  $b$  的取值及其范围在 0.499 ~ 0.597 之间, 由此可得, 不同林龄不同密度刺槐林入渗速率随时间减小的程度相差不大。在 Philip 模型中,  $S$  为吸渗率, 且在一定程度上能够反映初始入渗速率的大小<sup>[4]</sup>;  $f_s$  为稳渗速率, 模拟的数值小于实测值, 与实测值相差 0.38 ~ 1.24 mm/min。Philip 模型中的  $S$  与 Horton 模型中 ( $f_0 - f_s$ ) 值在同一密度条件下随着林龄的增加而呈现明显的增加趋势, 表明刺槐林随着林龄的增加土壤入渗能力增强。回归系数  $R^2$  作为模型模拟效果判定依据, 其中  $R^2$  越大表明模型模拟的效果越好。通过表 3 中模型的回归系数  $R^2$  可知, 该 4 个模型对晋西黄土区不同林龄不同密度刺槐林土壤入渗过程的模拟效果均较好 ( $R^2 > 0.900$ ), 其中通用经验模型的平均回归系数 (0.977) > Horton 模型的平均回归系数 (0.958) > Kostiakov 模型的回归系数 (0.953) > Philip 模型的回归系数 (0.945)。即认为通用经验模型更适用于模拟本研究区刺槐林的土壤入渗过程。



不同小写字母表示初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率分别在同一林龄不同密度或同一密度不同林龄的条件下的差异显著性( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate the significant differences of initial infiltration rate, average infiltration rate, stable infiltration rate, respectively under the same forest age with varied densities or same density with varied forest ages ( $P < 0.05$ ).

图2 同一林龄不同密度和同一密度不同林龄的刺槐林土壤入渗特征

Fig. 2 Soil infiltration characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation at same forest age with different densities and same density with varied forest ages

## 2.3 土壤理化性质对入渗的影响

### 2.3.1 土壤入渗的相关性分析

本研究选取与土壤结构和土壤质地息息相关的11个影响因子,并将这些因子与土壤入渗的初始入渗速率、平均入渗速率和稳渗速率进行相关性分析,结果如表4可知,初始入渗速率与土壤初始含水量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ );平均入渗速率与土壤初始含水量呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),与非毛管孔隙度和0.5~1 mm水稳性团聚体呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),其中与土壤初始含水量相关性最高;稳渗速率与土壤密度呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),与1~2 mm水稳性团聚体和0.5~1 mm水稳性团聚体呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与有机质、土壤总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),其中与1~2 mm水稳性团聚体相关性最

高,表明稳渗速率受1~2 mm水稳性团聚体的影响最大。

### 2.3.2 影响土壤入渗的主导因素

将以上与土壤入渗息息相关的11个因子在SPSS中进行主成分分析,其中因子载荷是指原始变量与主成分的相关系数,相关系数越大,该主成分就越能代表该原始变量<sup>[23]</sup>。结果如表5所示:特征值大于1的成分有3个,其值分别为5.477、1.712和1.533,累积贡献率为79.287%,涵盖了大部分的信息,这表明前3个主成分能够代表最初11个因子对土壤入渗的影响,所以提取前3个因子,记作F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>。第1个主成分因子由水稳性团聚体决定,其贡献率为49.788%,其中1~2 mm水稳性团聚体载荷最高(0.946),而>5 mm、2~5 mm、0.5~1 mm的水稳性团聚体载荷均在0.7附近,0.5~0.25 mm水稳性团

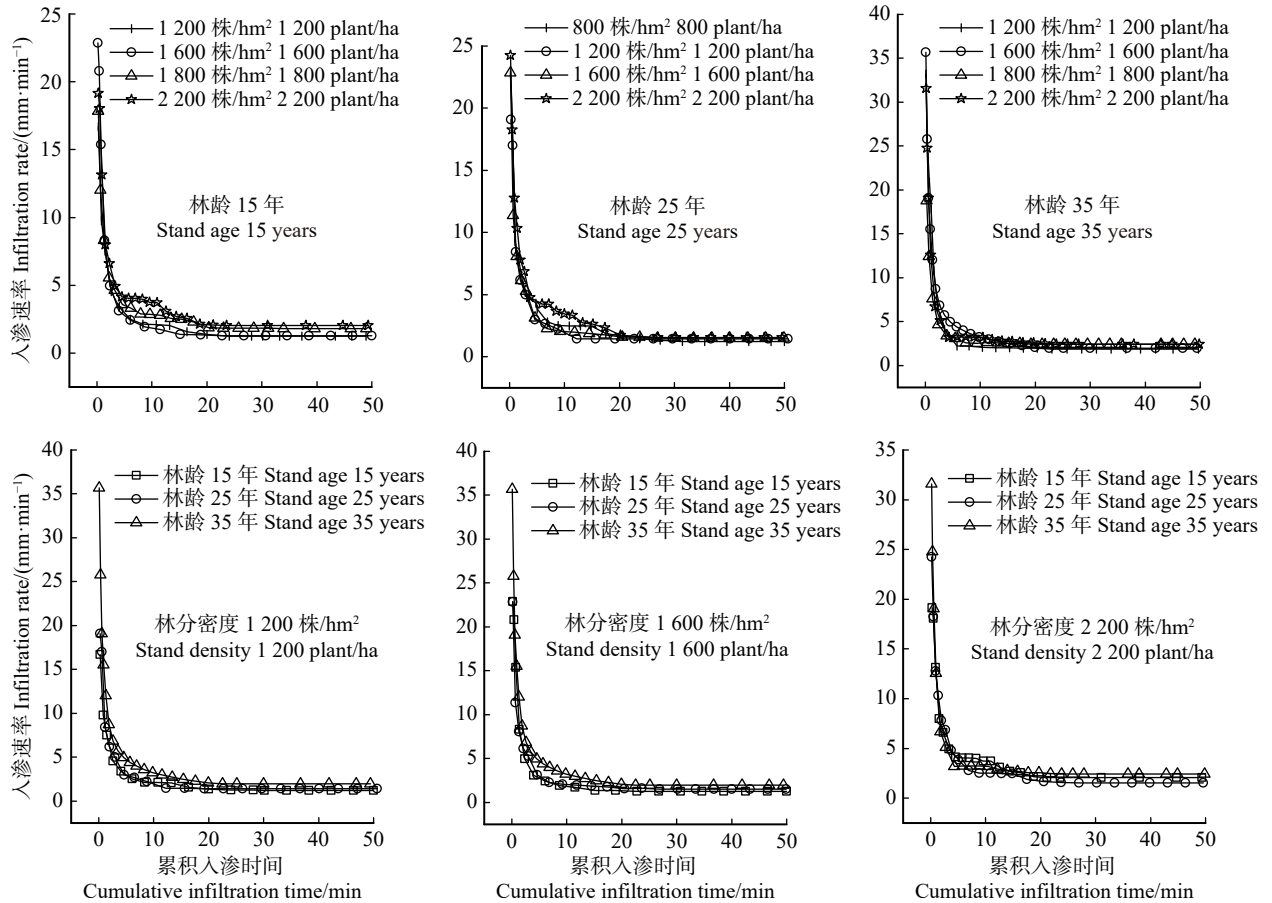


图 3 同一林龄不同密度和同一密度不同林龄的刺槐林的土壤入渗过程

Fig. 3 Soil infiltration process of *Robinia pseudoacacia* plantation at same forest age with different densities and same density with varied forest ages

表 3 土壤入渗模型模拟

Tab. 3 Simulation on soil infiltration model

| 林龄/a<br>Stand<br>age/year | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> )<br>Density/<br>(plant·ha <sup>-1</sup> ) | Horton 模型<br>Horton model |             |         |       | Koistakov 模型<br>Koistakov model |       |       | Philip 模型<br>Philip model |       |       | 通用模型<br>General model |       |       |       |
|---------------------------|---|---------------------------|-------------|---------|-------|---------------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
|                           |   | $f_s$                     | $f_o - f_s$ | $\beta$ | $R^2$ | $a$                             | $b$   | $R^2$ | $S$                       | $f_s$ | $R^2$ | $a$                   | $f_s$ | $b$   | $R^2$ |
| 15                        | 1 200   | 1.799                     | 18.046      | 0.806   | 0.979 | 8.384                           | 0.583 | 0.945 | 19.068                    | 0.843 | 0.954 | 8.490                 | 0.572 | 0.052 | 0.994 |
|                           | 1 600   | 1.605                     | 26.798      | 0.879   | 0.933 | 10.557                          | 0.587 | 0.942 | 21.402                    | 1.815 | 0.943 | 14.416                | 0.439 | 3.017 | 0.954 |
|                           | 1 800   | 2.410                     | 18.666      | 0.833   | 0.980 | 9.294                           | 0.522 | 0.973 | 22.028                    | 0.185 | 0.872 | 8.805                 | 0.555 | 0.355 | 0.994 |
|                           | 2 200   | 2.923                     | 20.600      | 0.757   | 0.975 | 10.857                          | 0.499 | 0.957 | 22.973                    | 0.144 | 0.917 | 12.727                | 0.419 | 1.504 | 0.960 |
| 25                        | 800   | 2.695                     | 25.103      | 1.014   | 0.955 | 10.629                          | 0.540 | 0.972 | 19.112                    | 0.624 | 0.973 | 11.595                | 0.495 | 0.701 | 0.973 |
|                           | 1 200   | 1.864                     | 21.811      | 0.829   | 0.979 | 9.470                           | 0.587 | 0.958 | 22.474                    | 1.379 | 0.964 | 11.835                | 0.471 | 1.839 | 0.964 |
|                           | 1 600   | 2.073                     | 24.885      | 1.117   | 0.960 | 9.180                           | 0.597 | 0.926 | 24.142                    | 0.958 | 0.989 | 8.690                 | 0.627 | 0.321 | 0.996 |
|                           | 2 200   | 2.262                     | 23.984      | 0.760   | 0.971 | 10.959                          | 0.540 | 0.973 | 25.635                    | 0.884 | 0.978 | 13.567                | 0.438 | 2.007 | 0.990 |
| 35                        | 1 200   | 1.954                     | 33.780      | 0.810   | 0.925 | 13.712                          | 0.502 | 0.920 | 19.426                    | 1.213 | 0.927 | 22.707                | 0.321 | 7.474 | 0.950 |
|                           | 1 600   | 3.207                     | 35.086      | 1.103   | 0.979 | 13.050                          | 0.539 | 0.936 | 27.598                    | 1.210 | 0.951 | 16.410                | 0.445 | 2.577 | 0.992 |
|                           | 1 800   | 2.642                     | 21.209      | 1.089   | 0.937 | 9.173                           | 0.546 | 0.961 | 29.314                    | 0.352 | 0.908 | 7.692                 | 0.651 | 1.028 | 0.986 |
|                           | 2 200   | 2.890                     | 34.562      | 1.229   | 0.918 | 12.139                          | 0.558 | 0.968 | 29.068                    | 1.208 | 0.969 | 13.691                | 0.504 | 1.134 | 0.969 |

聚体载荷极低(0.158), 其次土壤密度、土壤总孔隙度和毛管孔隙度在第 1 主成分中也有较高的载荷; 第 2 主成分主要由有机质决定, 贡献率为 15.559%, 其次非毛管孔隙度和 0.25 ~ 0.5 mm 水稳性团聚体有较高的载荷; 第 3 主成分因子主要有土壤初始含

水量决定, 其载荷量为-0.648。

将主成分分析结果显示载荷较高的 11 个因子(载荷大于 0.6)12 组数据作为自变量分别与因变量初始入渗速率( $Y_1$ )、稳渗速率( $Y_2$ )和平均入渗速率( $Y_3$ )在 SPSS 中进行多元逐步回归, 对选入的变量进

表4 土壤入渗性能与影响因子的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of soil infiltration performance and influencing factors

| 影响因素<br>Influencing factor                  | 初始入渗速率<br>Initial infiltration rate | 平均入渗速率<br>Average infiltration rate | 稳定入渗速率<br>Stable infiltration rate |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 土壤初始含水量<br>Initial moisture content of soil | -0.785**                            | -0.672*                             | -0.201                             |
| 土壤密度<br>Soil bulk density                   | -0.425                              | -0.440                              | -0.751**                           |
| 有机质含量<br>Organic matter content             | 0.418                               | 0.256                               | 0.647*                             |
| 土壤总孔隙度<br>Total porosity of soil            | 0.238                               | 0.277                               | 0.663*                             |
| 毛细孔隙度<br>Capillary porosity                 | -0.004                              | 0.006                               | 0.681*                             |
| 非毛细孔隙度<br>Non-capillary porosity            | 0.548                               | 0.614*                              | 0.054                              |
|   | > 5 mm                              | -0.016                              | 0.385                              |
|   | 2 ~ 5 mm                            | 0.504                               | 0.169                              |
| 水稳性团聚体<br>Water-stable aggregate            | 1 ~ 2 mm                            | 0.382                               | 0.789**                            |
|   | 0.5 ~ 1 mm                          | 0.666*                              | 0.754**                            |
|   | 0.5 ~ 0.25 mm                       | 0.360                               | 0.359                              |

注:\*\*表示在 $P < 0.01$ 水平呈极显著水平,\*表示在 $P < 0.05$ 水平呈显著水平。Notes:\*\* means very significant difference at  $P < 0.01$  level;\* means significant difference at  $P < 0.05$  level.

表5 土壤入渗影响因子的主成分分析

Tab. 5 Principal component analysis on influencing factors of soil infiltration

| 主成分<br>Principal component                  | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 土壤初始含水量<br>Initial moisture content of soil | -0.423         | 0.334          | -0.648         |
| 土壤密度<br>Soil bulk density                   | -0.926         | -0.121         | 0.104          |
| 有机质含量<br>Organic matter content             | 0.610          | 0.730          | -0.216         |
| 土壤总孔隙度<br>Total porosity of soil            | 0.923          | -0.070         | 0.206          |
| 毛细孔隙度<br>Capillary porosity                 | 0.799          | 0.252          | 0.456          |
| 非毛细孔隙度<br>Non-capillary porosity            | 0.391          | -0.695         | -0.504         |
|   | > 5 mm         | -0.176         | 0.456          |
|   | 2 ~ 5 mm       | -0.389         | 0.244          |
| 水稳性团聚体<br>Water-stable aggregate            | 1 ~ 2 mm       | -0.004         | -0.082         |
|   | 0.5 ~ 1 mm     | 0.203          | -0.329         |
|   | 0.25 ~ 0.5 mm  | 0.628          | -0.410         |
| 特征值<br>Characteristic value                 | 5.477          | 2.712          | 1.533          |
| 贡献率<br>Contribution rate/%                  | 49.788         | 15.559         | 13.939         |
| 累积贡献率<br>Cumulative contribution rate/%     | 49.788         | 65.347         | 79.287         |

行逐个检验,直到既无显著的自变量选入方程,也无不显著自变量从回归方程中剔除为止,并建立如下回归方程,经检验两者符合正态分布:

$$Y_1 = 44.823 - 2.41X_1 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.785, P = 0.002 < 0.01$$

$$Y_2 = 0.565 + 1.15X_2 - 0.754X_3 + 0.402X_4 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.825, P = 0.002 < 0.01$$

$$Y_3 = 6.936 - 0.422X_5 + 0.293X_1 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.845, P = 0.004 < 0.01$$

式中: $X_1$ 表示土壤初始含水率, $X_2$ 表示1~2mm水



稳性团聚体,  $X_3$  表示土壤密度,  $X_4$  表示毛管孔隙度,  $X_5$  表示 0.5 ~ 1 mm 水稳性团聚体。  $R^2$  为判定系数, 也称拟合优度, 其大小决定了相关的密切程度,  $R^2$  越大自变量对因变量的解释程度越高。由此可得, 影响初始入渗速率的显著因子为土壤初始含水量; 影响稳渗速率的显著因子有 1 ~ 2 mm 水稳性团聚体、土壤容重和毛管孔隙度; 影响平均入渗速率的显著因子为土壤初始含水量和 0.5 ~ 1 mm 水稳性团聚体。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 土壤入渗过程分析

土壤水分入渗一般会经历 3 个阶段, 即湿润阶段、渗漏阶段和渗透阶段, 在这 3 个阶段水分受到不同力的作用<sup>[9,24]</sup>。其中, 在湿润阶段, 水分在土壤中主要受分子力的作用, 被土壤颗粒吸附进而形成薄膜水, 使得初始含水量低的土壤, 在该阶段入渗速率高于初始含水量高的土壤, 同时在该阶段土壤入渗速率明显高于其他阶段。在渗漏阶段, 水分主要受重力和毛细管力的作用, 在土壤孔隙中移动, 即毛管孔隙度大的土壤, 在该阶段土壤入渗速率大, 直至填满孔隙, 土壤入渗速率趋于稳定。在渗透阶段, 水分已填满孔隙, 在重力的作用下下渗, 入渗速率基本稳定不变。土壤水分入渗的 3 个阶段解释了不同林龄不同密度刺槐人工林土壤入渗过程存在差异的原因, 即由土壤结构和性质决定。

#### 3.2 土壤入渗特征及影响因素分析

本研究发现, 在相同林龄条件下, 刺槐林土壤初始入渗速率随林分密度的增加其变化规律不明显。通过比较不同密度刺槐林土壤初始含水量(表 2)可知, 刺槐林土壤含水量低的密度其土壤初始入渗速率高。这一现象可用土壤入渗过程中湿润阶段水分在土壤中主要受分子力的作用来解释, 使得初始含水量低的土壤, 入渗速率高于初始含水量高的土壤<sup>[9,25-26]</sup>。同时表明与多元逐步回归筛选出影响初始入渗速率的显著因子为土壤初始含水量结果一致。

在一定范围内(800 ~ 2 200 株/hm<sup>2</sup>), 稳渗速率在同一林龄条件下, 随密度的增加而增大; 在同一密度条件下, 随林龄的增加而增大。这一结果表明在一定范围内密度和林龄的增加改善了土壤结构, 增加了入渗能力。由表 2 可知, 随着林分密度和林龄的增加, 土壤密度减小、有机质含量增加。这是因为随林分密度和林龄的增加, 林内枯枝落叶增加、地表植被越来越丰富、根系越来越发达, 提高了林内有机质含量, 进而促进了团聚体的形成, 改善了土壤结构<sup>[27]</sup>。但部分林分在一定范围内, 稳渗速率随密度的增加而增大, 随林龄的增加而增大, 其大小差异不

显著。王鑫浩等<sup>[28]</sup>在研究根系构型对土壤入渗性能的影响中发现水平根能阻止水分的下渗, 数量越多稳渗速率越小。而刘秀萍等<sup>[29]</sup>在对刺槐根系分布特征研究中发现, 刺槐以水平根为主, 无明显主根。而这一发现可解释以上现象的原因, 即随着刺槐林密度与林龄的增加, 根系越来越发达, 反而会阻止水分的下渗, 使稳渗速率变小。

本研究选取土壤自身理化性质息息相关的 11 个因子与土壤入渗速率进行相关性分析(表 4)可知, 各因子均与入渗速率表现出相关性。通过主成分分析将 11 个因子进行降维, 得到 3 个主成分, 累计贡献率为 79.287%, 并将相关因子作为自变量与土壤入渗速率作为因变量进行逐步回归。  $R^2$  为判定系数, 也称拟合优度, 其大小决定了相关的密切程度,  $R^2$  越大自变量对因变量的解释程度越高, 自变量引起的变动占总变动的百分比高。由此可知 3 个回归方程中的影响因素对各入渗速率均有较高的解释度和相关程度。其中, 土壤密度是土壤的基本物理性质, 它的大小间接反映了土壤的紧实松散程度、透气透水能力, 土壤密度越小, 土壤越松散, 土壤总孔隙度、毛管孔隙度增多, 土壤入渗性能越强<sup>[8,30]</sup>。土壤团聚体能反映土壤结构的优劣, 良好的团聚结构对保持土壤水分、肥力有着重要作用。土壤团聚结构越好, 其孔隙越多、持水性、通透性越好<sup>[31]</sup>。除本研究选取的影响因素外, 吕振豫等<sup>[6]</sup>在对土壤入渗研究进展及方向评述中提到土壤质地可通过改变颗粒表面能, 影响土壤孔隙尺度与分布, 进而影响土壤入渗能力。王意银等<sup>[32]</sup>对浙西南毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林的土壤渗透性研究中发现, 土壤中动物的多样性也会对土壤渗透性产生一定影响。王鑫浩等<sup>[28]</sup>研究了根系构型对土壤入渗性能的影响, 并发现水平根能阻止水分的下渗, 数量越多稳渗速率越小。故今后对土壤入渗影响因素的研究中可以更加全面的了解与揭示各影响因素的相关性与影响程度。

#### 3.3 结 论

(1)晋西黄土残塬沟壑区土壤入渗特征, 主要表现在一定范围内, 稳渗速率随林龄和密度的增加而变大, 初始入渗速率和平均入渗速率随林龄的增加而变大, 即随着恢复年限和密度的增加, 土壤结构不断改善, 土壤入渗性能逐渐提升, 当林龄为 35 年时土壤入渗性能最好。

(2)刺槐林在各密度和林龄条件下其土壤入渗均经过急速湿润阶段、平缓渗漏阶段和稳定渗透阶段。且通过对 4 种常用模型进行模拟可知, 通用经验模型更适用于模拟晋西黄土区刺槐林的土壤入渗过程。

(3)通过对选取的影响因子进行主成分分析可知,影响初始入渗速率的决定因子为土壤初始含水量;影响稳渗速率的主要因子有1~2 mm水稳性团聚体、土壤密度和毛管孔隙度;土壤初始含水量和0.5~1 mm水稳性团聚体对平均入渗速率起主要作用。通过选取的所有因子的贡献率为79.287%,说明仍存在其他因素或其他重要因素未被考虑,可做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 10(8): 739–741.
- [2] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1–8.
- [3] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(2): 311–330.
- [4] Babaei F, Zolfaghari A A, Yazdani M R, et al. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran[J]. *Catena*, 2018, 170: 25–35.
- [5] Dashtaki S G, Homaei M, Mahdian M H, et al. Site-dependence performance of infiltration models[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(13): 2777–2790.
- [6] 吕振豫, 刘姗姗, 秦天玲, 等. 土壤入渗研究进展及方向评述[J]. *中国农村水利水电*, 2019(7): 1–5.  
Lü Z Y, Liu S S, Qin T L, et al. Comment on the progress and major direction of soil infiltration research[J]. *Journal of Rural Water Conservancy and Hydropower in China*, 2019(7): 1–5.
- [7] Huang L, Zhang P, Hu T G, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 4: 255–263.
- [8] 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): 1–11.  
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): 1–11.
- [9] 阿茹·苏里坦. 天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.  
Sulitan A. Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019.
- [10] 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): 1–8.  
Sulitan A, Chang S L, Zhang Y T. Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 1–8.
- [11] 勃海锋, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 1–5.  
Bo H F, Liu G B, Wang G L. Changes of infiltration characteristics of abandoned cropland with plant restoration in loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(3): 1–5.
- [12] Deng L, Shanguan Z P, Li R. Effects of the grain-for-green program on soil erosion in China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27: 120–127.
- [13] Hou G R, Bi H X, Wei X, et al. Optimal configuration of stand structures in a low-efficiency *Robinia pseudoacacia* forest based on a comprehensive index of soil and water conservation ecological benefits[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106308 [2020-03-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20302454>.
- [14] 杨亚辉. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤理化性质影响分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
Yang Y H. Impacts of vegetation restoration on soil physical and chemical properties in the loess hilly gully region of Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [15] 赵小婵, 高楠, 李紫恬, 等. 不同林分密度对林地土壤物理性质的影响: 以华北土石山区油松人工林为例[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(34): 211–214.  
Zhao X C, Gao N, Li Z T, et al. Soil physical properties of pine forest under different forest management in rocky mountain area of northern China[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2015, 43(34): 211–214.
- [16] Zhang X, Zhang L, Movicar T, et al. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22: 1996–2004.
- [17] 王高敏. 晋西黄土区退耕16—20年间不同林地土壤理化性质和水文功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.  
Wang G M. Research on the soil physical and chemical properties and water capacity of forestlands converted of farmland during 16–20 years in western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [18] 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.  
Ru H. Analysis of hydrological characteristics and functions of typical forest stands in the Loess Plateau area of western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [19] 张孝中. 黄土高原土壤颗粒组成及质地分区研究[J]. *中国水土保持*, 2002(3): 11–13.  
Zhang X Z. Study on the composition of soil particles and texture zoning of the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2002(3): 11–13.
- [20] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 251–257.  
Hou G R, Bi H X, Wei X, et al. Comprehensive evaluation of water conservation function of litters of *Robinia pseudoacacia* forest lands in gully region on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2019, 33(2): 251–257.
- [21] 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62–67.
- Liu C C, Li Y, Ren X, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 62–67.
- [22] 徐敬华. 黄土丘陵区人工植被恢复对土壤水力性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Xu J H. The impact of artificial vegetation restoration on soil hydraulic and hydrological properties in loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [23] 刘江, 吕涛, 张立欣, 等. 基于主成分分析的不同种植年限甘草地土壤质量评价[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 162–171.
- Liu J, Lü T, Zhang L X, et al. Soil quality assessment by principal component analysis in *Glycyrrhiza uralensis* stands of differing ages[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6): 162–171.
- [24] 吴思萱, 刘卉芳, 陈彩虹, 等. 晋西黄土区土壤水分入渗的时空分布研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(4): 60–65.
- Wu S X, Liu H F, Chen C H, et al. Study on the temporal and spatial distribution of soil moisture infiltration in the west Shanxi Province[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(4): 60–65.
- [25] 陈楚楚, 黄新会, 刘芝芹, 等. 滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 82–87.
- Chen C C, Huang X H, Liu Z Q, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of surface soil in plateau wetland of northwest Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 82–87.
- [26] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 干旱半干旱区沙漠化土地水分动态研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 63–68.
- Liu X P, Zhang T H, Zhao H L, et al. Research advaaces on moisture dynamic of desertified lands in arid and semi-arid regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 63–68.
- [27] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter (I): distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 681–689.
- [28] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 等. 根系构型对土壤渗透性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73–82.
- Wang X H, Wang Y Q, Ma C, et al. Effect of root architecture on soil permeability[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 73–82.
- [29] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647–651.
- Liu X P, Chen L H, Chen J H. Study on the distribution of root density of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabuliformis* Carr.[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 647–651.
- [30] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40–45.
- Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 40–45.
- [31] 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.
- Ding K, Xu X Y, Chen W Y, et al. Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetation in Changwu tableland slope of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(12): 44–51.
- [32] 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.
- Wang Y K, Jin A W, Fang S Z. Effects of mulching management of *Phyllostachys heterocyclus* forests on the characteristics of soil infiltration and biometrics in southwest Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1431–1440.

(责任编辑 范娟  
责任编委 杨晓晖)