

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.005.010

内蒙古黄土丘陵区 4 种柠条林 土壤水分入渗特征

江 磊¹, 秦富仓^{1*}, 曾令建¹, 赵 琦¹, 宋秀敏², 王立宇², 史芮嘉³

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017010;
3. 鄂尔多斯市水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017001)

摘要: [目的] 研究内蒙古黄土丘陵区 4 种柠条林土壤入渗特征及其影响因素, 为当地合理造林及植被恢复提供参考。[方法] 以柠条、山杨 × 柠条、山杏 × 柠条、油松 × 柠条林下土壤为研究对象, 采用环刀进行多点取样并测定土壤理化性质, 单环土柱法观测原状土壤水分入渗, 并将入渗特征与土壤理化性质进行相关性分析。[结果] 4 种林地初始入渗率、稳定入渗率、5 h 累计入渗量、湿润锋前进速率均表现为山杏 × 柠条 (8.60 mm·min⁻¹, 1.05 mm·min⁻¹, 279.83 mm, 2.5 mm·min⁻¹) > 山杨 × 柠条 (5.6 mm·min⁻¹, 0.76 mm·min⁻¹, 255.65 mm, 2.2 mm·min⁻¹) > 油松 × 柠条 (4.80 mm·min⁻¹, 0.73 mm·min⁻¹, 243.03 mm, 2.0 mm·min⁻¹) > 柠条 (3.16 mm·min⁻¹, 0.53 mm·min⁻¹, 178.64 mm, 3.4 mm·min⁻¹); 入渗后土壤饱和含水率、田间持水率表现为: 山杏 × 柠条 > 山杨 × 柠条、油松 × 柠条 > 柠条; 土壤密度和孔隙状况是影响 4 种林地入渗能力和水分状况的主要因素。[结论] 在研究区内, 山杏 × 柠条较其他林地有更好的调节作用和涵养水源功能, 有效减少地表径流和土壤侵蚀。

关键词: 黄土丘陵区; 柠条林; 入渗率; 湿润锋; 土壤水分状况

中图分类号: S714.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)05-0089-08

森林土壤的入渗特征和含水率变化受到许多因素的影响, 而直接影响因素是土壤孔隙, 影响土壤孔隙状况的因素包括土壤质地、林分类型、林龄等因素^[1-3]。在同一地区, 同一土壤剖面, 林龄相近的条件下, 不同林分类型对林下土壤结构的影响主要是根系、枯落物和林下动物活动对土壤孔隙度及养分进行了有效的改善^[4]。黄土丘陵区是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一, 合理的植被布局和树种选择对该地区植被恢复建设意义重大。内蒙古黄土丘陵区主要水土保持林中灌木林以柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 为主, 研究表明, 单一的种植结构和粗放管理, 随着林龄的增长, 土壤水分越来越

成为限制人工柠条林生长的主要因素。为了合理利用水资源, 采取多样配置, 如山杨 (*Populus davidiana* Dode) × 柠条、山杏 (*Armeniaca sibirica* (L.) Lam) × 柠条和油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) × 柠条, 这些混交林在该地区发挥着防风固沙, 减少地表径流和冲刷、涵养水源的作用^[5]。但这些柠条混交林也同样存在粗放管理, 生长状况差、蓄水保土能力差异较大的问题。对于黄土丘陵区柠条林的研究, 多数学者针对柠条纯林的不同密度和林龄进行水分动态研究, 如张文文^[6]探讨了不同密度柠条生长情况和土壤的水分特征, 单一的柠条林种植过密, 吸收水分较多且生长不良, 种植稀

收稿日期: 2022-01-20 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 内蒙古自治区重大项目: 黄河流域砒砂岩区沟坡侵蚀机理研究 (2021ZD07); 中央引导地方科技发展资金项目“砒砂岩坡面水力侵蚀过程与植被斑块格局演变互馈机制研究”(2021ZY0023); 内蒙古自治区高校青年科技英才项目 (项目编号 NJYT22046); 内蒙古自治区国有林区和林场土地资源所有者职责代理履职主体履职范围研究项目资助。

* 通讯作者: 秦富仓, 博士, 教授, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治、林业。E-mail: qinfu@126.com

疏则覆盖度低, 土壤裸露容易被雨水冲刷。梁海滨等^[7]探讨了不同林龄的柠条林土壤水分变化特点, 随着林龄增大则水分状况变差。而混交模式的柠条林土壤水分入渗情况和水分变化特点还鲜有报道。

本研究采用单环土柱法^[8]进行入渗, 观察 4 种柠条林土壤水分入渗特征及水分状况。土柱使用定制的较厚的透明 PVC 管, 根据 10~15 a 植被根系在土层中的分布特征、天然降水入渗平均深度及土壤理化性质差异^[9], 采用 0~60 cm 原状土, 考虑当地自然降水或灌溉的积水及土柱的高度, 确定了 5、10、20 mm 3 种供水头进行对比, 测定 4 种柠条林土壤水分入渗特征并分析土壤理化性质对入渗特征和土壤实际含水率的影响, 以期了解不同柠条林土壤结构状况、养分特征和水分入渗特征, 为该地区合理造林及植被恢复提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区选取在内蒙古清水河县韭菜庄乡境内, 39°43'~40°01' N, 111°45'~112°6' E, 海拔 1 461~1 791 m, 总面积 501.28 km²。属于内蒙古高原与黄土高原交接处, 是典型的黄土丘陵区。地处中温带, 属半干旱典型的大陆性气候, 年平均降水量 413.8 mm。黄土覆盖较厚, 土壤类型主要为栗褐土。主要人工林植被有油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.)、山杨 (*Populus davidiana* Dode)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、山杏 (*Armeniaca sibirica* (L.) Lam), 草本植物有冷蒿 (*Artemisia frigida* Willd.)、赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.)、狗尾草 (*Setaria*

viridis (L.) Beauv.)、针茅 (*Stipa capillata* L.)、沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)、早熟禾 (*Poa annua* L.) 等。

1.2 样地选取及实验方法

2021 年 8 月在试验区选取立地类型较一致、海拔在 1 600 m 左右, 林龄都为 13~15 a 的柠条、山杨 × 柠条、山杏 × 柠条、油松 × 柠条为研究对象。每种林地选择长势良好, 地形平坦, 近似正方形的面积约 400 m² 样地 3 片, 共计 12 片样地, 样地基本情况见表 1。样地内采用 5 点取样法, 取样时将表层杂草、未分解的枯落物除去后, 挖土壤剖面 (1.0 m × 1.0 m)。土壤理化性质采用环刀、铝盒、塑封袋, 每 20 cm 一层采集 3 层土样。土壤粒径分布测定采用马尔文 3000 激光粒度分析仪, 用王国梁等^[10]计算方法计算土壤分形维数。环刀、铝盒法测定土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、初始含水率, 采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定测有机质含量^[11]。

土壤入渗和含水率测定采用单环土柱法。土柱为定制的高 80 cm, 直径 15 cm 的圆柱形透明 PVC 硬管, 硬管壁有 3 个小孔, 与底座分开的带有水龙头的基座。研究区石砾较少, 直接向下取原状土柱。在原来土壤理化性质取样点附近将表层杂草除去后, 将管壁抹上一层凡士林防止形成大孔隙流, 将土柱轻砸进土中, 并抠去土柱周围的土, 将土柱取出后, 填上直径 5 mm 左右的石砾后将底座安装, 在土柱上方放入铁丝网和孔板, 防止水的击溅。将 3 个水分探头分层插入土柱中, 并连接 HOBO 仪器。马氏瓶直径 15 cm、高 40 cm, 保证连续供水, 中途不加入水。湿润锋观察与测定时, 为水平

表 1 样地概况

Table 1 Sample plot overview

| 林地类型 Stand type | 林龄 Age/a | 郁闭度 Canopy density | 平均树高 Average tree height/m | 平均胸径 Average DBH/cm | 林分密度 Stand density/ (tree·hm ⁻²) | 枯落物平均厚度 Average litter thickness/cm | 海拔 Altitude/m | 草本盖度 The herb coverge | 林下植被 Undergrowth vegetation |
|--|-------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|--|--|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 柠条 <i>C. korshinskii</i> | 13 | 0.72 | 1.4 | -- | 1 000 | 0.3 | 1 648 | 0.47 | 长芒草、赖草 |
| 山杨 × 柠条 <i>P. davidiana</i> × <i>C. korshinskii</i> | 15/13 | 0.75 | 8.4/1.0 | 10.3/-- | 500/600 | 1.4 | 1 655 | 0.52 | 冷蒿、狗尾草 |
| 山杏 × 柠条 <i>A. sibirica</i> × <i>C. korshinskii</i> | 12/13 | 0.76 | 3.0/1.7 | -- | 400/500 | 1.4 | 1 644 | 0.65 | 冷蒿、沙蓬 |
| 油松 × 柠条 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>C. korshinskii</i> | 15/12 | 0.74 | 7.2/1.2 | 15.3/-- | 500/500 | 1.1 | 1 681 | 0.45 | 狗尾草、冷蒿 |

注: “/”前后表示混交林不同树种林龄、树高、胸径、密度; 灌木没有胸径, 密度为每公顷从数; “--”表示无数据。

Note: “/”Indicates the height, DBH and density of different tree species in the mixed forest; while the shrub has no DBH, density is clumps per hectare; “--” Indicates no data.

视角下与土柱刻度线垂直的湿润界面, 开始前 10 min 由于入渗速度较快, 湿润锋迁移速度快, 由相机拍摄湿润锋前进过程, 之后每隔 5 min 记录 1 次, 1 h 后 10 min 记录 1 次。

1.3 数据处理

土壤体积分形维数 D_v 采用美国土壤粒径分级制度: 黏粒 ($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒 ($2 \sim 50 \mu\text{m}$)、砂粒 ($50 \sim 2000 \mu\text{m}$) 计算。计算公式 (1) [10]:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D_v} = \frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{V_T} \quad (1)$$

式中: \bar{d}_i 为相邻两个粒径 d_i 与 d_{i+1} 间的平均粒径 (μm); \bar{d}_{\max} 表示最大粒径的平均粒径 (μm); $V(\delta < \bar{d}_i)$ 为粒径小于 \bar{d}_i 的颗粒累计体积百分比; V_T 表示各级颗粒的体积之和百分比。

入渗率 f 采用 Kostikov 公式 [12], 对各时段入渗率计算后进行模型拟合, 公式 (2):

$$f = at^{-1/2} \quad (2)$$

式中, f 为入渗率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); a 为常数; t 为时间 (min)。

湿润锋前进速率 M 计算公式 3:

$$M = \frac{H_s}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: H_s 为湿润锋通过的土层深度 (mm); Δt 为时段 (min)。

土壤饱和含水率和田间持水率均由 HOBO 水分记录仪得出, 数据和绘图采用 Excel 2010 和 Spss 23 软件。

2 结果与分析

2.1 不同林地土壤理化性质差异

不同林地土壤理化性质差异见表 2, 土壤理化性质随土层深度变化差异性逐渐变小。表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 土壤的理化性质差异最大。柠条表层土壤密度最大在 $1.32 \sim 1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 山杏 \times 柠条最小在 $1.18 \sim 1.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 油松 \times 柠条、山杨 \times 柠条土壤密度差异较小。山杏 \times 柠条和山杨 \times 柠条的土壤毛管孔隙度较大, 在 $45.62\% \sim 52.49\%$ 之间。土壤非毛管孔隙度: 山杏 \times 柠条 ($6.21\% \sim 8.71\%$) $>$ 山杨 \times 柠条 ($4.02\% \sim 6.26\%$) $>$ 油松 \times 柠条 ($1.76\% \sim 3.05\%$)、柠条 ($2.02\% \sim 3.44\%$)。从前 3 种物理性质来看, 柠条纯林表层土壤紧实, 通透性较差, 3 种混交柠条林地土壤疏松多孔, 山杏 \times 柠条的土壤孔隙状况最好。土壤初始含水率在同时监测, 地理环境一致条件下, 山杨 \times 柠条的 3 层土壤的含水率均较高, 山杏 \times 柠条在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的含水率与山杨 \times 柠条相当。

表 2 不同林地土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil in different woodlands

| 土层 Soil layer/cm | 林分类型 Stand type | 土壤密度 Soil bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 毛管孔隙度 Capillary porosity/% | 非毛管孔隙度 Non capillary porosity/% | 初始含水率 Initial water content/% | 土壤体积分形维数 D_v | 有机质含量 Organic matter content/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|------------------------|-----------------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--|
| 0~20 | I | 1.34 ± 0.02 c | 41.35 ± 1.23 c | 2.89 ± 0.55 c | 3.92 ± 0.26 b | 2.313 2 ± 0.021 6 | 7.32 ± 2.26 bc |
| | II | 1.26 ± 0.01 b | 48.17 ± 2.32 a | 5.14 ± 1.12 b | 6.18 ± 0.77 a | 2.312 4 ± 0.031 5 | 18.34 ± 2.96 a |
| | III | 1.20 ± 0.02 a | 49.52 ± 3.61 a | 7.46 ± 1.25 a | 6.05 ± 0.33 a | 2.331 4 ± 0.030 5 | 10.25 ± 1.25 b |
| | IV | 1.25 ± 0.02 b | 45.70 ± 1.23b | 2.07 ± 0.31 c | 4.09 ± 0.49 b | 2.335 8 ± 0.025 6 | 12.23 ± 2.56 b |
| 20~40 | I | 1.37 ± 0.03 b | 38.35 ± 0.29 b | 1.74 ± 0.17 b | 5.21 ± 0.31 b | 2.323 1 ± 0.024 7 | 4.95 ± 1.69 b |
| | II | 1.33 ± 0.03 a | 43.80 ± 1.22 a | 5.24 ± 1.20 a | 5.81 ± 0.35 a | 2.332 3 ± 0.044 4 | 8.89 ± 1.17 a |
| | III | 1.29 ± 0.02 a | 41.55 ± 0.66 a | 4.61 ± 0.05 a | 4.98 ± 0.36 b | 2.347 4 ± 0.051 2 | 5.24 ± 0.69 b |
| | IV | 1.38 ± 0.01 b | 43.26 ± 0.78 a | 1.88 ± 0.46 b | 4.89 ± 0.21 b | 2.329 8 ± 0.042 5 | 5.91 ± 0.59 b |
| 40~60 | I | 1.39 ± 0.02 | 39.12 ± 0.43 b | 2.47 ± 0.41 b | 5.01 ± 0.53 b | 2.355 7 ± 0.027 4 | 4.54 ± 1.02 b |
| | II | 1.36 ± 0.01 | 40.12 ± 0.96 b | 4.25 ± 0.69 a | 6.46 ± 0.34 a | 2.334 3 ± 0.021 2 | 6.15 ± 0.84 a |
| | III | 1.36 ± 0.02 | 41.08 ± 0.35 b | 5.10 ± 0.76 a | 5.16 ± 1.22 b | 2.353 8 ± 0.019 6 | 4.56 ± 0.63 b |
| | IV | 1.38 ± 0.02 | 44.25 ± 0.91 a | 1.53 ± 0.56 b | 5.23 ± 1.36 b | 2.357 0 ± 0.022 4 | 4.68 ± 0.55 b |

注: I-柠条; II-山杨 \times 柠条; III-山杏 \times 柠条; IV-油松 \times 柠条; 不同小写字母表示不同林地同一土层的土壤性质差异 ($P < 0.05$)。

Note: I - *C. korshinskii*; II - *P. davidiana* \times *C. korshinskii*; III - *A. sibirica* \times *C. korshinskii*; IV - *P. tabulaeformis* \times *C. korshinskii*; Different lower-case letters indicate the differences of soil properties in the same soil layer of different woodlands ($P < 0.05$).

土壤体积分形维数是反映土壤颗粒分布重要指标^[13],不同林地的土壤体积分形维数在 2.281 9~2.409 0 之间,粉砂粒较多,黏粒较少,在同一土层差异不显著,说明 4 种林地的土壤质地相似。4 种林地的有机质含量都集中在 0~20 cm 的土层,山杨×柠条(11.72~21.3 g·kg⁻¹)>山杏×柠条(5.52~11.5 g·kg⁻¹)、油松×柠条(7.93~14.7 g·kg⁻¹)>柠条(3.00~9.58 g·kg⁻¹),20 cm 以下土层,山杨×柠条有机质含量最多,其余林地差异不显著。说明 4 种林地土壤理化性质差异较大的分别为土壤密度、孔隙度和有机质。

2.2 不同林地的土壤入渗特性

2.2.1 初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量
用 3 种不同的供水头压力作为对比,不同供水头会对初始入渗率有一定影响,供水头压力越大,初始入渗率会加强^[14]。由于前 1 min 入渗率受供水头影响较大,因此取开始 2 min 的入渗率为初始入渗率,稳定入渗率为入渗曲线平稳时的平均入渗率。在确定的入渗时间下,用 Kostiakov 公式保留初始入渗率和稳定入渗率将中间入渗率较散乱的点拟合后得到的入渗曲线(图 1),曲线均接近模型中的系数 1/2,相关系数均大于 0.8。由图 1 可知,在 3 种供水头压力下,初始入渗率 5 mm、

10 mm 供水头差异较小,但与 20 mm 供水头差异较大,而稳定入渗率、累计入渗量相同林地的差异不显著。初始入渗率均值依次为:山杏×柠条(8.6 mm·min⁻¹)、山杨×柠条(5.6 mm·min⁻¹)、油松×柠条(4.80 mm·min⁻¹)、柠条(3.16 mm·min⁻¹)。判断到达稳定入渗的状态为入渗曲线一直趋于平缓的时为稳定入渗,4 种林地中,山杏×柠条稳定入渗率最高,均值为 1.05 mm·min⁻¹;柠条林地的稳定入渗率最小,均值为 0.53 mm·min⁻¹;山杨×柠条 0.76 mm·min⁻¹、油松×柠条 0.73 mm·min⁻¹,2 种林地稳定入渗率差异较小;国内外研究一般把 30 min 累计入渗量作为衡量土壤入渗性能指标,但本研究中 30 min 水分仅仅渗入到 10 cm 左右土层,而 180 min 前土壤理化性质差异较大,5 h 时,除柠条外,其余林地水分基本渗入底层,能代表整个土层的情况。3 种供水头下 30 min,3 h,5 h 累计入渗量均值依次为:山杏×柠条(82.24 mm, 241.40 mm, 279.83 mm)、山杨×柠条(58.95 mm, 173.25 mm, 255.65 mm)、油松×柠条(53.58 mm, 161.83 mm, 243.03 mm)、柠条(36.31 mm, 117.44 mm, 178.64 mm)。根据 4 种林地的初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量来看,山杏×柠条的入渗能力最强。

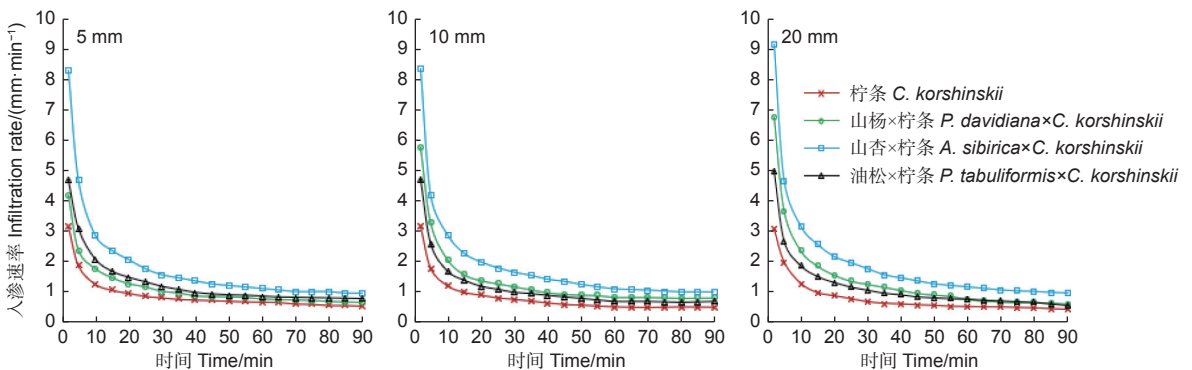


图 1 不同林地土壤入渗速率

Fig. 1 Soil infiltration rate of different woodlands

2.2.2 不同林地入渗期间湿润锋变化规律 湿润锋指土壤下渗过程中,土壤被湿润的部位与干土层形成的明显的交界面。湿润锋转移过程是土壤水分入渗的特征之一,反映了灌溉或降水量是否满足要求,同时也反映了土壤对水的吸附能力和土壤的理化性质^[15]。由图 2 可知,不同林地湿润锋前进到 60 cm 土层深度所用时间在 4~6 h 之间。3 种供

水头下不同林地湿润锋速率都是减小,直到湿润锋消失。不同供水头对前期短时间的湿润锋前进速率有一定影响,但 3 种供水头下整个湿润锋前进速度差异不明显。不同林地湿润锋平均用时:山杏×柠条最快 240 min,山杨×柠条 270 min,油松×柠条和柠条都在 300 min 以上。4 种林地的湿润锋前进速率均值:山杏×柠条(2.5 mm·min⁻¹)>山杨×

柠条 ($2.2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 油松 × 柠条 ($2.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 柠条 ($1.9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)。不同林地表层土壤的前进速率最快, 差异最大, 0~20 cm 土层的平均值: 山杏 × 柠条 ($6.1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 山杨 × 柠条 ($4.1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) >

油松 × 柠条 ($3.9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 柠条 ($3.4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$); 在单环土柱中, 湿润锋湿润面积及前进速度可以直接判断土壤入渗强度, 因此山杏 × 柠条土壤的入渗强度最大, 而柠条林下土壤入渗强度最小。

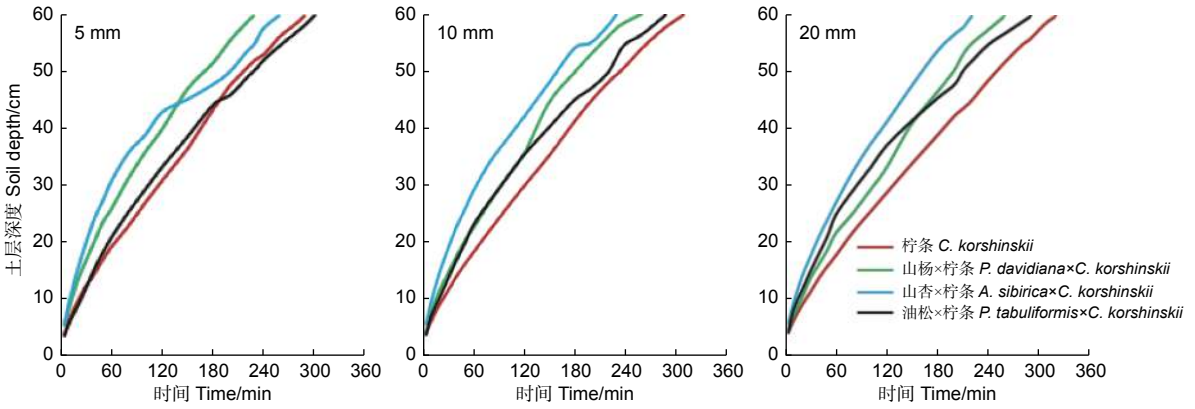
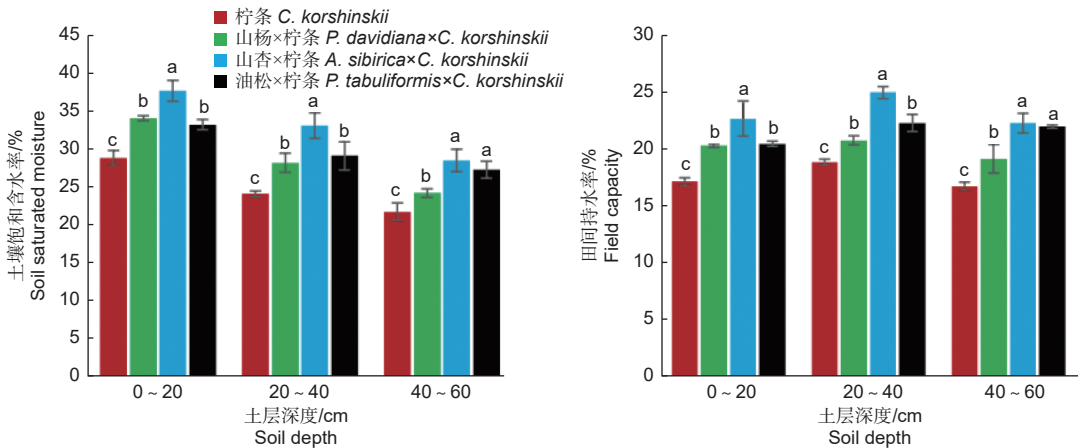


图 2 不同林地湿润锋前进过程

Fig. 2 Advancing process of wetting front in different woodlands

2.2.3 不同林地土壤水分状况 利用 HOBO 水分探头记录 3 种供水头压力下土壤饱和含水率及田间持水率实际值 (图 3)。土壤饱和含水率为底座出水供水头与入供水头的流量相等时达到稳定的 HOBO 读数, 田间持水率为模拟室外田间状态下排水良好的土壤, 土柱下方有砂石保证土壤排水良好并将土柱移至室外, 为停止供水头 2 d 的 HOBO 读数。土壤体积含水率的变化是对入渗的响应, 指土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值, 比值越高, 说明土壤中的孔隙占有和储存的水分越多,

饱和含水率说明土壤所能容纳水分的多少, 田间持水率说明土壤能稳定保持的最高含水量^[16]。入渗前的天然状态下, 0~60 cm 土层土壤初始含水率与铝盒测量的数据较一致 ($P < 0.05$), 说明受到天气影响较小; 入渗过程中, 土层从上到下依次达到饱和, 入渗结束土壤水分达到饱和后, 停止供水头, 非毛细孔隙中的水分及重力水向下运动, 由上到下土壤水分迅速下降, 一段时间后达到田间持水率, 土壤饱和含水率、田间持水率山杏 × 柠条较大, 各层土壤饱和含水率都在 27 % 以上, 田间持水率在



注: 不同小写字母表示不同林地同一土层土壤含水率差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicate that the soil moisture content of the same soil layer in different forest lands is significantly different ($P < 0.05$)

图 3 不同林地土壤饱和含水率及田间持水率

Fig. 3 Soil saturated moisture content and field water holding capacity in different woodlands

21% 以上；柠条纯林较小，各层土壤饱和含水率都小于 29%，田间持水率在 19% 以下。而山杨 × 柠条和油松 × 柠条差异较小。说明山杏 × 柠条林地土壤的保水能力、涵养水源能力强，柠条纯林最弱。

2.3 不同林地土壤水分入渗特征与土壤理化性质的关系

不同林地土壤入渗特性与土壤理化性质相关关

系见表 3，初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量、湿润锋前进速率、土壤饱和含水率、田间持水率都与土壤密度呈显著负相关，与毛管孔隙度、非毛管孔隙度呈显著正相关，与初始含水率、土壤体积分形维数及有机质没有形成显著相关性。说明土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度是影响研究区土壤入渗的主要因素。

表 3 不同林地土壤入渗特性与土壤理化性质的关系

Table 3 Relationship between soil infiltration characteristics and soil physical and chemical properties in different woodlands

| 相关因子 Correlation factor | 土壤密度 Soil bulk density | 毛管孔隙度 Capillary porosity | 非毛管孔隙度 Non Capillary porosity | 初始含水率 Initial water content | 土壤体积分形维数 Dv | 有机质含量 Organic matter content |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------------|
| 初始入渗率 Initial infiltration rate | -0.668** | 0.527* | 0.749** | 0.480 | -0.011 | 0.084 |
| 稳定入渗率 Stable infiltration rate | -0.622* | 0.584* | 0.657** | -0.308 | -0.114 | 0.067 |
| 累计入渗量 cumulative infiltration | -0.676** | 0.544* | 0.727** | -0.125 | 0.300 | 0.150 |
| 湿润锋前进速率 Wetting front advance rate | -0.712** | 0.761** | 0.530* | -0.244 | 0.353 | 0.412 |
| 土壤饱和含水率 Soil saturated moisture | -0.722** | 0.776** | 0.540* | -0.407 | 0.353 | 0.342 |
| 田间持水率 Field capacity | -0.793** | 0.812** | 0.651** | -0.423 | 0.256 | 0.157 |

注：“***”表示相关性极显著($P < 0.01$)，“**”表示相关性显著($P < 0.05$)

Note: “***”Indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$), “**” indicates significant correlation ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 影响 4 种林地入渗能力的因素

不同林地土壤体积分形维数差异不显著，表明研究区土壤质地相似，4 种林地中有 2 种林地具有相似的土壤前期含水率，排除了由于土壤本身质地差异及前期含水率影响导致入渗结果差异。研究表明，土壤密度和孔隙度是影响研究区入渗的主要因素。4 种林地通过改变林下土壤密度和孔隙度而影响入渗率和水分状况。不同林地的表层土壤密度、孔隙度差异显著，但随着土壤深度变化这种差异逐渐减小。毛管孔隙度反映土壤贮水能力，毛管孔隙中的水易于被植物吸收；非毛管孔隙能快速吸收雨水，减少地面径流，反映土壤通气性、透水性和涵养水源能力^[17]。4 种林地中，山杏 × 柠条林地土壤密度最小、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均较大，说明山杏 × 柠条对表层土壤孔隙度改善更好，土壤越疏松多孔而导致其入渗能力强、土壤饱和含水率、田间持水率高。4 种林地入渗能力表现为山杏 × 柠条 > 山杨 × 柠条 > 油松 × 柠条 > 柠条，混交林有明显提高土壤孔隙、贮水量和土壤入

渗率的作用^[18]。柠条纯林与 3 种混交林相比，一是柠条纯林的枯落物明显较少(表 1)，而枯落物覆盖量越大，土壤入渗速率明显较大^[19]；二是混交林根系结构复杂，在挖取土壤剖面时发现混交林土壤有明显根孔，其中山杏 × 柠条土壤的根孔最明显，因为 2 种灌木的主要根系比乔木分布较浅；三是混交林地下动物活动较多，如动物巢穴等，山杏 × 柠条混交林由于山杏可供动物取食，这可能是导致其动物活动明显较多的原因；四是由于研究区属于农牧交错区，会不时有牛羊踩进低矮的柠条纯林的情况，导致土壤更紧实。而 3 种混交林中，表层草本植物覆盖依次为山杏 × 柠条、山杨 × 柠条、油松 × 柠条，如冷蒿、沙蓬等(表 1)，这些草本植物根系发达，在土壤中穿插、分割等作用增加了土壤中大孔隙，改善了土壤渗透能力^[20]。而山杨 × 柠条与油松 × 柠条相比，草本植物覆盖度、枯落物覆盖量均是山杨 × 柠条较高，因此其入渗率较高。

3.2 未显著影响 4 种林地入渗能力的因素

实测数据表明在同时段测定土壤初始含水率前提下，山杏 × 柠条、山杨 × 柠条的表层土壤初始

含水率差异不显著且都较高,油松×柠条和柠条表层土壤初始含水率差异不显著且低于前2种林地,李平^[21]对黄土高原植被类型的入渗特征研究表明,入渗率与初始含水率呈负相关,而本研究前期含水率对入渗率没有形成显著相关,是因为取样时间为距上次降雨后连续10个晴朗日取土,土壤水分蒸发导致4种林地初始含水率都偏小。山杏×柠条、山杨×柠条的表层土壤初始含水率高,说明两者的土壤保水率高,这是由于两者地表枯落物较多,导致水分蒸散减弱。土壤质地主要取决于成土母质类型,有相对的稳定性,是影响入渗的因素之一^[22]。4种林地除柠条纯林表层土壤体积分形较小外,其余林地土壤质地差异不显著,虽然植被恢复过程中其枯落物、植被下的动物、微生物活动会增加土壤黏粒、团聚体,但这4种林地的林龄较小,对土壤质地影响较小,当林龄增大后有待进一步研究。而柠条表层土层土壤体积分形维数较小的原因是柠条林地抵抗水力侵蚀、风蚀的能力较弱,地表细小颗粒被带走,而剩下较粗的土壤颗粒。在4种林地有机质差异较大的条件下,土壤入渗率、水分状况与有机质没有形成显著相关,这是由于4种林地虽然差异显著,但有机质水平处于土壤养分分级中的最低水平,而在粉砂土地区,有机质分解速度较快。用5, 10, 20 mm供水头对比入渗后发现,5 mm供水头与10 mm供水头初始入渗率、前期湿润锋速率及差异较小,但与20 mm供水头差异较大,2种供水头差异较小的原因可能是土柱上有防止水的击溅和土壤塌陷的过滤网造成^[12]。

4 结论

(1) 研究区4种林地土壤密度、孔隙度、有机质在土壤理化性质中差异较大,其中山杏×柠条土壤密度最小,毛管孔隙度、非毛管孔隙度均最大;山杨×柠条有机质含量最大;柠条土壤密度最大而有机质含量最小。

(2) 以初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量、湿润锋前进速率来判断入渗能力,以入渗后土壤饱和含水量、模拟田间持水率来判断保水能力,研究区4种林地入渗能力表现为:山杏×柠条>山杨×柠条>油松×柠条>柠条,保水能力表现为山杏×柠条>山杨×柠条、油松×柠条>柠条。

(3) 随着供水头增加会使初始入渗率、前期湿润锋前进速率增强,前期累计入渗量增加:5 mm供水头与10 mm供水头差异较小,但两者与20 mm供水头差异较显著,但不会改变稳定入渗率及土体最终的累计入渗量。

(4) 研究区4种林地由于不同的枯落物覆盖率,林下植被覆盖量、根系分布层次、动物活动程度,影响林下土壤密度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度,导致入渗能力及保水能力的差异。山杏×柠条配置能显著改善土壤孔隙和密度,能更好发挥保水固土功能。

参考文献:

- [1] Brooks K N, Folliott P F, Gregersen H M, et al. Hydrology and the Management of Watersheds [M]. Ames: Iowa State University Press, 1997: 69-78.
- [2] 彭舜磊, 梁亚红, 陈昌东, 等. 伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 29-33.
- [3] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 117-126.
- [4] Hassler S K, Zimmermann B, van Breugel M, et al. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(5): 1634-1642.
- [5] 薛蕙, 刘国彬, 张超. 黄土丘陵区人工灌木林土壤抗蚀性演变特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3143-3150.
- [6] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 等. 黄土丘陵旱半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 725-732.
- [7] 梁海斌, 史建伟, 牛俊杰. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 143-148.
- [8] 魏瑶瑶, 王俊, 张永旺, 等. 黄土高原不同植被类型土壤入渗特征研究[J]. 延安大学学报:自然科学版, 2021, 40(2): 16-20.
- [9] 梁胜发, 茹豪, 雍鹏, 等. 晋西北黄土丘陵区柠条锦鸡儿根系分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(8): 24-28.
- [10] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [11] 卜瑞瑛, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同林分密度华北落叶松的土壤养分特征[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 140-147.
- [12] 王芳. 入渗供水头对土柱入渗特性影响的试验研究[D]. 山西太原: 太原理工大学, 2005.
- [13] 李易珺, 杨自辉, 郭树江, 等. 青土湖干涸湖底2种典型固沙植物群落土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 62-67.
- [14] 杜晓婧. 密云水库水源涵养林土壤水分运移及营养物质前进研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [15] 唐士劫, 窦超银. 滴头流量对风沙土滴灌湿润锋运移影响的试验研

- 究[J]. 节水灌溉, 2018 (11): 56-72.
- [16] 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.
- [17] 张金武, 王 立. 白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗和持水特征[J]. 西北林学院学报, 2021, 36 (4): 41-47.
- [18] 王梦军, 张光灿, 刘 霞, 等. 沂蒙山林区不同森林群落土壤水分贮存与入渗特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6 (6): 26-31.
- [19] 朱方方, 程金花, 郑雪慧, 等. 马尾松林地不同枯落物覆盖下土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (4): 85-97.
- [20] 吕 渡, 杨亚辉, 赵文慧, 等. 不同恢复类型植被细根分布及其与土壤理化性质的耦合关系[J]. 生态学报, 2018, 38 (11): 3979-3987.
- [21] 李 平, 王冬梅, 丁 聪, 等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特性及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40 (5): 1610-1620.
- [22] 李贵玉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

Soil Water Infiltration Characteristics of Four *Caragana korshinskii* Forests in Loess Hilly Area of Inner Mongolia

JIANG Lei¹, QIN Fu-cang¹, ZENG Ling-jian¹, ZHAO Qi¹, SONG Xiu-min², WANG Li-yu², SHI Rui-jia³

(1. College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Ordos Forestry and Grassland Development Center, Ordos 017010, Inner Mongolia, China; 3. Ordos Water Conservancy Development Center, Ordos 017001, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To study the soil infiltration characteristics of four *Caragana korshinskii* forests in the loess hilly area of Inner Mongolia for providing a reference for reasonable local forest planting and vegetation restoration and construction. [Method] The cutting ring knife was used for sampling and analyzing soil physical and chemical properties in *Caragana korshinskii* and *Populus davidiana* × *Caragana korshinskii*, *Armeniaca sibirica* × *Caragana korshinskii*, *Pinus tabuliformis* × *Caragana korshinskii* forests. The single ring soil column method was used to observe the undisturbed soil water infiltration, and the correlation between infiltration characteristics and soil physical and chemical properties was analyzed. [Results] The initial infiltration rate, steady infiltration rate, 5 h cumulative infiltration amount, and the rate of wetting front of the four forests were the largest in *A. sibirica* × *C. korshinskii* forest (8.60 mm · min⁻¹, 1.05 mm · min⁻¹, 279.83 mm, 2.5 mm · min⁻¹), followed by *P. davidiana* × *C. korshinskii* (5.6 mm · min⁻¹, 0.76 mm · min⁻¹, 255.65 mm, 2.2 mm · min⁻¹), *P. tabuliformis* × *C. korshinskii* (4.80 mm · min⁻¹, 0.73 mm · min⁻¹, 243.03 mm, 2.0 mm · min⁻¹), *C. korshinskii* (3.16 mm · min⁻¹, 0.53 mm · min⁻¹, 178.64 mm, 3.4 mm · min⁻¹). After infiltration, the soil saturated moisture content and field water holding capacity were shown as follows: *A. sibirica* × *C. korshinskii* > *P. davidiana* × *C. korshinskii*, *P. tabuliformis* × *C. korshinskii* > *C. korshinskii*. Soil bulk density and porosity were the main factors affecting the infiltration capacity and water status of the four woodlands. [Conclusion] Comparing with other forests, *A. sibirica* × *C. korshinskii* has better regulation and water conservation function, and can effectively reduce surface runoff and soil erosion.

Keywords: Loess hilly area; *Caragana korshinskii* forest; soil infiltration rate; wetting front; soil moisture status

(责任编辑: 彭南轩)