

科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究

印家旺^{1,2}, 阿拉木萨¹, 苏宇航^{1,2}, 蒋绍妍³

(1.中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.辽宁生态工程职业学院, 辽宁 沈阳 110101)

摘要: [目的] 探究科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征的差异, 为干旱—半干旱区包气带水分与物质运移等相关研究提供科学参考。[方法] 利用双环入渗仪野外实测和室内土壤物理性质分析相结合的方法, 研究了科尔沁沙地具有代表性的 8 种土地利用类型(樟子松林地、小叶锦鸡儿林地、白柠条林地、撂荒草地、草甸草地、疏林草地、玉米农田以及裸沙地)土壤入渗特征及其影响因素, 同时采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和 G-P 综合模型对其水分入渗过程进行了拟合, 比较其拟合优度。[结果] ①不同土地利用类型土壤入渗特征存在显著差异, 初始入渗率变化范围为 1.595~12.020 mm/min, 由大到小依次为: 裸沙地>白柠条林地>玉米农田>樟子松林地>小叶锦鸡儿林地>草甸草地>撂荒草地>疏林草地; 15 min 入渗率变化范围为 0.617~3.690 mm/min, 由大到小依次为: 裸沙地>白柠条林地>樟子松林地>小叶锦鸡儿林地>玉米农田>撂荒草地>草甸草地>疏林草地; 土壤稳定入渗率变化范围为 0.576~3.495 mm/min, 由大到小依次为: 裸沙地>白柠条林地>玉米农田>小叶锦鸡儿林地>樟子松林地>撂荒草地>草甸草地>疏林草地; ②不同土地利用类型入渗率与土壤容重、细砂含量呈极显著负相关, 与中砂含量呈极显著正相关; 稳定入渗率与非毛管孔隙度呈显著正相关; ③各模型对科尔沁沙地土壤入渗过程的拟合优度依次为: Horton 模型>G-P 综合模型>Kostiakov 模型>Philip 模型, 其中 Horton 模型决定系数最高且相对误差最小, 能更准确地模拟科尔沁沙地土壤入渗的实际情况。[结论] 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征存在差异, 土壤性质对其入渗特征影响显著; Horton 模型在科尔沁沙地拟合度较高, 可应用此模型来估算水分入渗过程。

关键词: 科尔沁沙地; 不同土地利用类型; 水分入渗; 入渗模型; 模型拟合

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0090-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 印家旺, 阿拉木萨, 苏宇航, 等. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 90-98. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.012; Yin Jiawang, Ala Musa, Su Yuhang, et al. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 90-98.

Comparative Study on Soil Infiltration Characteristics of Different Land Use Types in Horqin Sandy Land

Yin Jiawang^{1,2}, Ala Musa¹, Su Yuhang^{1,2}, Jiang Shaoyan³

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang,

Liaoning 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China; 3. Liaoning Vocational College of Ecological Engineering, Shenyang, Liaoning 110101, China)

Abstract: [Objective] The differences in water infiltration characteristics between different land use types in Horqin sandy land were determined in order to provide a scientific reference for the study of water and material transport in the vadose zone in arid and semi-arid regions. [Methods] Soil infiltration and its influencing factors for eight typical land use types (*Pinus sylvestris* plantation, *Caragana korshinsk* plantation, *Caragana microphylla* plantation, abandoned grassland, meadow grassland, sparse forest grassland, corn field, and bare sandy land) in Horqin sandy land were measured in the field using a double ring infiltration

收稿日期: 2022-01-04

修回日期: 2022-02-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“科尔沁沙地沙丘生态水文调节作用研究”(31670712)

第一作者: 印家旺(1996—), 男(汉族), 吉林省通化市人, 硕士研究生, 研究方向为沙地水文学、生态学。Email: yinjiawang19@mails.ucas.ac.cn.

通讯作者: 阿拉木萨(1969—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事沙地生态水文学、沙生植物水分生理生态学、水土保持与荒漠化防治方面的研究。Email: alamusa@iae.ac.cn.

apparatus and a laboratory analysis of soil physical properties. At the same time, the Kostiakov model, the Horton model, the Philip model, and the G-P comprehensive model were used to simulate the water infiltration process, and goodness of fit values for the models were compared. [Results] ① There were significant differences in soil infiltration characteristics among different land use types. The initial infiltration rates ranged from 1.595 mm/min to 12.020 mm/min, and followed the order of bare sandy land > *Caragana korshinskii* plantation > corn field > *Pinus sylvestris* plantation > *Caragana microphylla* plantation > meadow grassland > abandoned grassland > sparse forest grassland. The infiltration rate at 15 min varied from 0.617 mm/min to 3.690 mm/min, and followed the order of bare sandy land > *Caragana korshinskii* plantation > *Pinus sylvestris* plantation > *Caragana microphylla* plantation > corn field > abandoned grassland > meadow grassland > sparse forest grassland. The saturated infiltration rate varied from 0.576 mm/min to 3.495 mm/min, and followed the order of bare sandy land > *Caragana korshinskii* plantation > corn field > *Caragana microphylla* plantation > *Pinus sylvestris* plantation > abandoned grassland > meadow grassland > sparse forest grassland. ② The infiltration rate of different land use types was negatively correlated with soil bulk density and fine sand content, and positively correlated with medium sand content. Stable infiltration rate was positively correlated with non-capillary porosity. ③ The goodness of fit values for the models to estimate soil infiltration in Horqin sandy land followed the order of Horton model > G-P comprehensive model > Kostiakov model > Philip model. The Horton model had the highest coefficient of determination and the smallest relative error, and could accurately reflect the actual situation of soil infiltration in Horqin sandy land. [Conclusion] The characteristics of soil infiltration were different among different land use types in Horqin sandy land. The Horton model had high fitting ability in Horqin sandy land, and can, therefore, be used to estimate water infiltration.

Keywords: Horqin sandy land; different land use types; water infiltration; infiltration model; model simulating

入渗是指水分通过土壤表面进入土壤和地下水的运动过程^[1],是降水、地表水、土壤水和地下水相互转化过程中的重要环节^[2],对于分析、表征土壤侵蚀过程以及防治水土流失都发挥着重要作用^[3-5]。土壤入渗率是指单位时间内地表单位面积土壤的入渗水量,它是土壤水分平衡研究中的关键参数,影响着地表的水分入渗、径流及蒸散的分配关系^[6-7]。

沙地作为一种特殊的自然环境,入渗是其水分循环的重要环节,也是荒漠生境 SPAC 系统水分运移的重要过程之一^[8],它影响着降水的储存和水分的利用,这对沙地植被的生长与维持尤为重要^[9]。因此,研究沙地的渗透特征对认识沙地水分来源、水分运移和沙漠生态系统水分的贮存转化、植被的维持及恢复具有重要意义。此外,沙地的土地利用模式具有多样性,不同的土地利用类型,其土壤特性与入渗特征差异性较大。在科尔沁沙地的相关研究中,针对多种土地利用类型的土壤特性与入渗特征的研究较少。为探索不同土地利用类型土壤特性及其入渗特征,本试验选取土壤类型为沙土的 8 种具有代表性的土地利用类型:樟子松林地、小叶锦鸡儿林地、白柠条林地、撂荒草地、草甸草地、疏林草地、玉米农田及裸沙地,利用双环入渗仪对其入渗特征进行测定。以期为干旱、半干旱区包气带水分与物质运移、土壤水分入

渗、地下水补给、土壤特性及其他相关研究提供资料参考。

1 研究区概况

研究区设置于中国科学院沈阳应用生态研究所乌兰敖都荒漠化防治试验站周边,该站位于科尔沁沙地西部内蒙古翁牛特旗境内。气候属于温带半干旱气候,年均气温 6.2 °C,年均风速 4.2 m/s,年无霜期 140~160 d;年均降水量 284.4 mm,年内降水分布不均匀,6—8 月降水量占全年降水量的 70%以上,春季(3—5 月)降水量仅占全年降水量的 10%,年蒸发潜力 2 000~2 500 mm。试验样地的土壤类型主要为风沙土、沙质栗钙土、草甸土等。主要固沙植物包括小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、山竹子(*Hedysarum fruticosum*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、乌丹蒿(*Artemisia wudanica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

综合考虑研究区实际土壤类型、植被类型及地质条件,选取沙地 8 种不同土地利用类型作为研究对象,土壤类型为风沙土亚类的白柠条林地、小叶

锦鸡儿林地、裸沙地;土壤类型为生草沙土亚类的撂荒草地、玉米农田以及土壤类型为草甸沙土亚类的

樟子松林、草甸草地、疏林草地。样地基本情况详见表 1。

表 1 试验样地基本情况

样地类型	样地特征
樟子松林地	株行距为 3 m×4 m 的 35 a 生人工林地,土壤类型为沙土类草甸沙土亚类,地表存在枯枝落叶物,地形平坦
白柠条林地	围封 13 a 林地,土壤类型为沙土类风沙土亚类,地形较平缓
小叶锦鸡林地	天然放牧林地,土壤类型为沙土类风沙土亚类,伴生植物有沙蓝刺头、籽蒿等,地形较平缓
撂荒草地	放牧草地,土壤类型为沙土类生草沙土亚类,伴生植物有小叶锦鸡儿、沙蓝刺头、沙蓬等,地形较平坦
草甸草地	围封 4 a 草地,土壤类型为沙土类草甸沙土亚类,伴生植物有狗尾草、籽蒿、野韭菜等,地表覆盖少量凋落物,地形平坦
疏林草地	围封 4 a 榆树疏林草地,土壤类型为沙土类草甸沙土亚类,伴生植物有榆树、羊草、狗尾草等,地表覆盖少量凋落物,地形平坦
玉米农田	人工种植农田,土壤类型为沙土类生草沙土亚类,地形较平坦
裸沙地	自然裸沙地,土壤类型为沙土类风沙土亚类,伴生植物为少量沙蓬、虫实、沙蒿等,地形为平缓沙丘

2.2 土壤入渗试验

本研究采用双环法测定土壤入渗,此方法测量结果准确性高且适用于异质性较强的土壤^[10-11]。本研究试验样地均位于中国科学院乌兰敖都荒漠化防治试验站周边 10 km² 范围内,同时为尽可能确保各样地主要试验环境的一致性(温度、湿度、风速等),本试验于 2021 年 8 月 1—15 日内集中开展,测定顺序依次为樟子松林、裸沙地、小叶锦鸡林、撂荒草地、玉米农田、疏林草地、草甸草地及白柠条林。利用双环入渗仪(内环直径 30 cm,外环直径 60 cm)在各土地利用类型中选择平整的典型区域作为入渗率测定样点,每种类型样地内设 3 个重复。使用橡胶锤将入渗仪垂直砸入待测土壤中 15 cm,保留其枯枝落叶层,并将纱布折叠铺设于原状待测土壤表面,防止土壤结构在试验过程中遭到破坏。在试验进行阶段,同时向双环入渗仪的内、外环注水,使水面保持在 5 cm 高度,此后用马氏瓶向内、外环持续补水,以保持内、外环水位维持在 5 cm 高度。对水分入渗量分时段进行记录,前 5 min 记录间隔为 1 min/次,5—15 min 记录间隔为 2 min/次,15—60 min 记录间隔为 5 min/次。

土壤水分入渗率的计算公式为:

$$K = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

式中: K 为土壤入渗速率(mm/min); ΔV 为记录间隔内的加水量(ml); A 为内环横截面积(cm²); Δt 为记录间隔时间(min)。

为消除温度对入渗速率的影响,使不同温度条件下测得的 K 值便于比较,将所测入渗结果统一转换为 10 °C 时的渗透系数 K_{10} 值,其计算公式为:

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中: K_t 为温度为 t °C 时的渗透系数(mm/min); t 为试验过程中所测定的土壤温度。

本试验将土壤的初始入渗率、稳定入渗率、15 min 入渗率作为评价土壤水分入渗特征的指标。初始入渗率为第 1 min 时的土壤入渗速率;15 min 入渗率为第 15 min 时的土壤瞬时入渗速率;稳定入渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率。

2.3 土壤物理性质测定

土壤样品的采集与入渗试验同步进行,采集时间为 2021 年 8 月 1—15 日,在每个土壤入渗观测点附近(5 m 以内)设置 3 个土壤采样点,使用土钻与环刀(高度与直径均为 5 cm)采集土壤样品,共计 24 个采样点。按照多点采样法对样点进行样品采集,具体操作为:在 0—60 cm 土层深度内,每间隔 10 cm 采集一次土壤样品,将其迅速置于铝盒中密封带回实验室,通过烘干称重法测定土壤含水量。并挖掘深度为 60 cm 的土壤剖面,按 0—20,20—40,40—60 cm 深度将其分为 3 层。使用环刀分别在各土层中取 3 个重复土样,密封带回实验室,测定其土壤容重、毛管孔隙度及非毛管孔隙度。待土壤自然晾干后将其混合,过 2 mm 土壤筛剔除枯枝落叶残留物,用筛分法测定土壤的机械组成,将其按照粒径划分为粗砂(>0.25 mm)、中砂(0.25~0.10 mm)和细砂(<0.10 mm)3 个等级。

2.4 土壤入渗模型拟合优度比较

在获取土壤水分入渗速率的众多方法中,模型模拟法也是应用较为普遍的一种方法,Kastiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和 G-P 综合模型是常用的土壤入渗模型。为比较 4 者在科尔沁沙地的适用性,本文将实测结果与各模型进行拟合分析并绘制相应拟合曲线,根据决定系数及相对误差来判断 4 种模型对水分入渗过程的拟合优度。4 种土壤入渗模型形式为:

(1) Kastiakov 模型;

$$f(t) = at^{-n} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为 t 时刻的入渗速率(mm/min); t 为入渗

时间(min); a, n 为根据试验结果计算求得的模型参数。

(2) Horton 模型:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为 t 时刻的入渗速率(mm/min); f_c 为稳定入渗率(mm/min); f_0 为初始入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); k 为根据试验结果计算求得的模型参数。

(3) Philip 模型:

$$f(t) = 0.5 S t^{-0.5} + A \quad (5)$$

式中: S 为根据试验结果计算求得的模型参数; A 为稳定入渗率(mm/min)。

(4) G-P 综合模型:

$$f(t) = M t^{-0.5} + N \quad (6)$$

式中: M, N 分别为根据试验结果计算求得的模型参数。

3 结果与分析

3.1 土壤物理性质分析

由表 2 可见, 8 种土地利用类型的土壤初始含水量变化范围为 1.724%~4.173% (白柠条林地最低, 樟子松林地最高); 在土壤机械组成中, 粒径处于 0.25~0.10 mm 范围内的土壤颗粒含量最多, 占整体的 52.411%~71.296% (小叶锦鸡林地最高, 疏林草地最低)。粒径处于 1~0.25 mm 范围内的土壤颗粒含量变化范围为 10.484%~24.139% (裸沙地最高, 小叶锦鸡林地最低), 而粒径处于 0.10~0.05 mm 之间的土壤颗粒含量最低, 占整体的 8.219%~25.750% (草甸草地最高, 白柠条林地最低)。土壤容重随土地利用类型的具体变化为: 裸沙地 > 玉米农田 > 白柠条林地 > 小叶锦鸡儿林地 > 樟子松林地 > 撂荒草地 > 疏林草地 > 草甸草地。

表 2 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤物理性质

土地利用类型	土壤初始含水量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	机械组成/%		
					1~0.25 mm	0.25~0.1 mm	0.1~0.05 mm
樟子松林	4.173±0.148	1.582±0.015	22.095±0.855	19.646±1.302	20.553	59.436	20.010
白柠条林	1.724±0.239	1.493±0.045	22.159±0.428	22.495±1.929	20.484	71.296	8.219
小叶锦鸡	3.030±0.541	1.541±0.025	23.361±0.340	19.724±1.181	13.093	71.436	15.469
撂荒草地	3.436±0.483	1.572±0.031	16.367±1.881	25.710±2.905	19.505	63.675	16.818
草甸草地	3.127±0.403	1.609±0.010	23.666±0.883	17.179±1.219	17.948	56.301	25.750
疏林草地	2.106±0.229	1.626±0.021	23.030±1.111	17.254±1.750	23.350	52.411	24.238
玉米农田	3.376±0.164	1.541±0.041	21.332±1.667	21.753±3.004	18.315	60.631	21.052
裸沙地	3.377±0.178	1.500±0.032	23.430±0.644	21.000±1.631	24.139	63.429	12.429

3.2 土壤入渗特征分析

3.2.1 不同土地利用类型入渗过程差异 由图 1 可知, 不同土地利用类型的土壤初始入渗率变化范围为 1.595~12.020 mm/min; 15 min 入渗率变化范围为 0.617~3.690 mm/min; 土壤稳定入渗率为 0.576~3.495 mm/min。初始入渗率由大到小依次为: 裸沙地(12.020 mm/min) > 白柠条林地(10.272 mm/min) > 玉米农田(7.215 mm/min) > 樟子松林地(7.099 mm/min) > 小叶锦鸡儿林地(5.673 mm/min) > 草甸草地(5.655 mm/min) > 撂荒草地(5.271 mm/min) > 疏林草地(1.595 mm/min)。对初始入渗率进行显著性检验后发现, 裸沙地显著高于其他类型, 疏林草地显著低于其他类型($p \leq 0.05$)。科尔沁沙地土壤类型主要为沙土, 其结构松散, 持水时间短, 保水能力差, 而裸沙地粗砂含量在 8 种土地利用类型中粗砂含量最高, 细砂含量最低, 土壤孔隙度最大, 土壤结构尤为松散, 因此较其他土地利用类型初始入渗率大。而疏林草地土壤表面的枯枝落叶层对水分具有一定的截留作用, 同时其土壤表层细砂含量最高, 土层相对致密,

土壤初始含水量也相对较高, 因此较其他植被类型初始入渗率最小。15 min 入渗率由大到小依次为: 裸沙地(3.690 mm/min) > 白柠条林地(2.796 mm/min) > 樟子松林地(2.533 mm/min) > 小叶锦鸡儿林地(2.250 mm/min) > 玉米农田(2.241 mm/min) > 撂荒草地(1.882 mm/min) > 草甸草地(1.603 mm/min) > 疏林草地(0.617 mm/min)。由于水分对土壤间隙的不断占据, 使土壤含水量持续上升, 土壤水饱和度增加, 入渗率也随之降低。与初始入渗率相比, 各土地利用类型入渗率分别降低了 69.3%, 72.78%, 64.32%, 60.32%, 68.93%, 64.29%, 71.63% 和 61.29%。对 15 min 入渗率进行显著性检验后发现, 裸沙地入渗率最高, 疏林草地入渗率最低, 二者与其他土地利用类型间均存在显著性差异; 白柠条林地入渗率高于撂荒草地、草甸草地, 且入渗率间的差异达到显著性水平($p \leq 0.05$)。在裸沙地之外的其他植被类型中, 白柠条林地 15 min 入渗率最大, 这是因为白柠条林地与其他植被类型相比, 其土壤表面不具备枯枝落叶层且其容重、细砂含量及土壤初始含水量最低。土壤

稳定入渗率由大到小依次为:裸沙地(3.495 mm/min) > 白柠条林地(2.571 mm/min) > 玉米农田(2.161 mm/min) > 小叶锦鸡儿林地(2.140 mm/min) > 樟子松林地(2.077 mm/min) > 撂荒草地(1.807 mm/min) > 草甸草地(1.191 mm/min) > 疏林草地(0.576 mm/min)。随着入渗过程在时间上的延续,土壤水分达到饱和状态,土壤入渗速率也达到稳定状态。与初始入渗率相比各土地利用类型稳定入渗率分别降低了 70.91%, 74.96%, 70.04%, 62.26%, 70.73%, 65.71%, 78.92% 和 63.85%。对稳定入渗率进行显著性检验后发现,裸沙地入渗率最高,疏林草地与草甸草地入渗率较低,二者与其他土地利用类型间存在显著性差异;白柠条林地入渗率高于撂荒草地,二者入渗率间存在显著性差异($p \leq 0.05$)。裸沙地土壤结构疏松,容重较小且土壤表面无植被生长,土壤性质得不到改善,在各样地中土壤保水性最差,稳定入渗率最高;疏林草地土壤表面存在相对较厚的枯枝落叶层,土壤容重相对最大且细沙含量较高,致使其稳定入渗率最低。

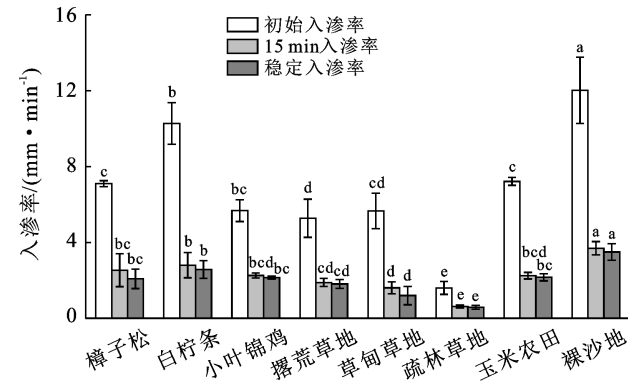


图 1 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征值

为进一步探讨各样地入渗过程间的差异,本研究根据样地内的生长植被对其进行分组,分别为林地(樟子松、白柠条、小叶锦鸡)、草地(撂荒草地、草甸草地、疏林草地)、农田(玉米农田)以及裸沙地。由图 2 可知,在入渗过程中各组入渗速率均表现为:裸沙地 > 林地 > 农田 > 草地,裸沙、农田与林地和草地入渗过程间存在显著性差异($p \leq 0.05$),而林地与农田入渗过程间的差异未达到显著性水平。按照裸沙、林地、农田、草地的分类顺序,土壤机械组成逐渐变细,土壤容重逐渐上升,孔隙度减小,土壤越发致密,进而水分入渗速率表现为依次递减。此外,虽然裸沙地的土壤入渗率大于林地,但二者的土壤机械组成、土壤孔隙度较为接近,所以二者间的差异并未达到显著性水平。

3.2.2 不同土壤亚类入渗过程差异 在本研究中虽

然各样地土壤类型均为沙土,但共涉及到 3 种土壤亚类,即风沙土、生草沙土及草甸沙土。对不同土壤亚类样地进行分组比较分析表明(图 3),在整个入渗过程中土壤入渗速率均表现为:风沙土 > 生草沙土 > 草甸沙土。且三者间存在显著性差异($p \leq 0.05$)。在 3 种土壤亚类中,草甸沙土细沙含量高,土壤机械组成最细,且表面有枯枝落叶覆盖,因此其入渗速率最低。而风沙土细沙含量低,土壤机械组成较粗,同时表面不具备枯枝落叶,因此其入渗率最高。

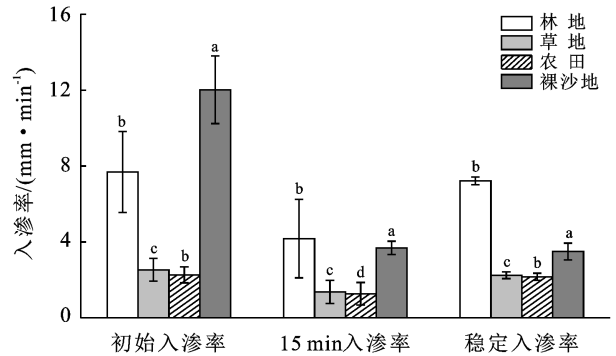


图 2 科尔沁沙地不同组分土壤入渗特征值

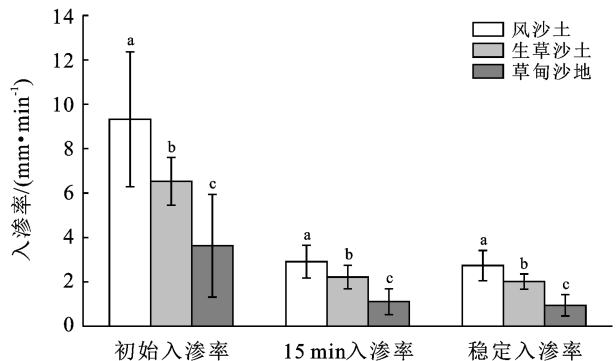


图 3 科尔沁沙地不同土壤亚类入渗特征值

3.3 土壤入渗速率影响因素分析

由表 3 可知,在本研究中,土壤入渗速率与容重、非毛管孔隙度、中砂及细沙含量存在显著的相关关系。初始入渗率、15 min 入渗率与土壤容重、细沙含量之间呈极显著负相关,与中砂含量呈极显著正相关。稳定入渗率与容重、细沙含量呈极显著负相关,与中砂含量呈极显著正相关,与非毛管孔隙度呈显著正相关。同时,粗砂含量、初始含水率、毛管孔隙度与入渗速率相关性未达到显著性水平。

3.4 土壤入渗速率拟合模型比较

运用数值模拟的方法研究土壤水分运动是一种定量分析土壤水分入渗特性的有效手段。在科尔沁沙地,土壤砂粒含量高、有机质含量少,不易产生团聚体,土壤水分运移更加纯粹,更有利于模拟土壤水分

的运动过程。但在土壤水分的入渗过程中,入渗速率是随时间变化的,且在不同土地利用类型条件下其速率变化也不同。为了分析各土地利用类型的入渗率变化过程,比较不同土壤入渗模型对其拟合情况,将

采用 Kostiakov, Horton, Philip 和 G-P 综合模型对科尔沁沙地不同土地利用类型水分入渗过程进行拟合,比较各模型的拟合优度。图 4 为各模型与实测数据拟合曲线。

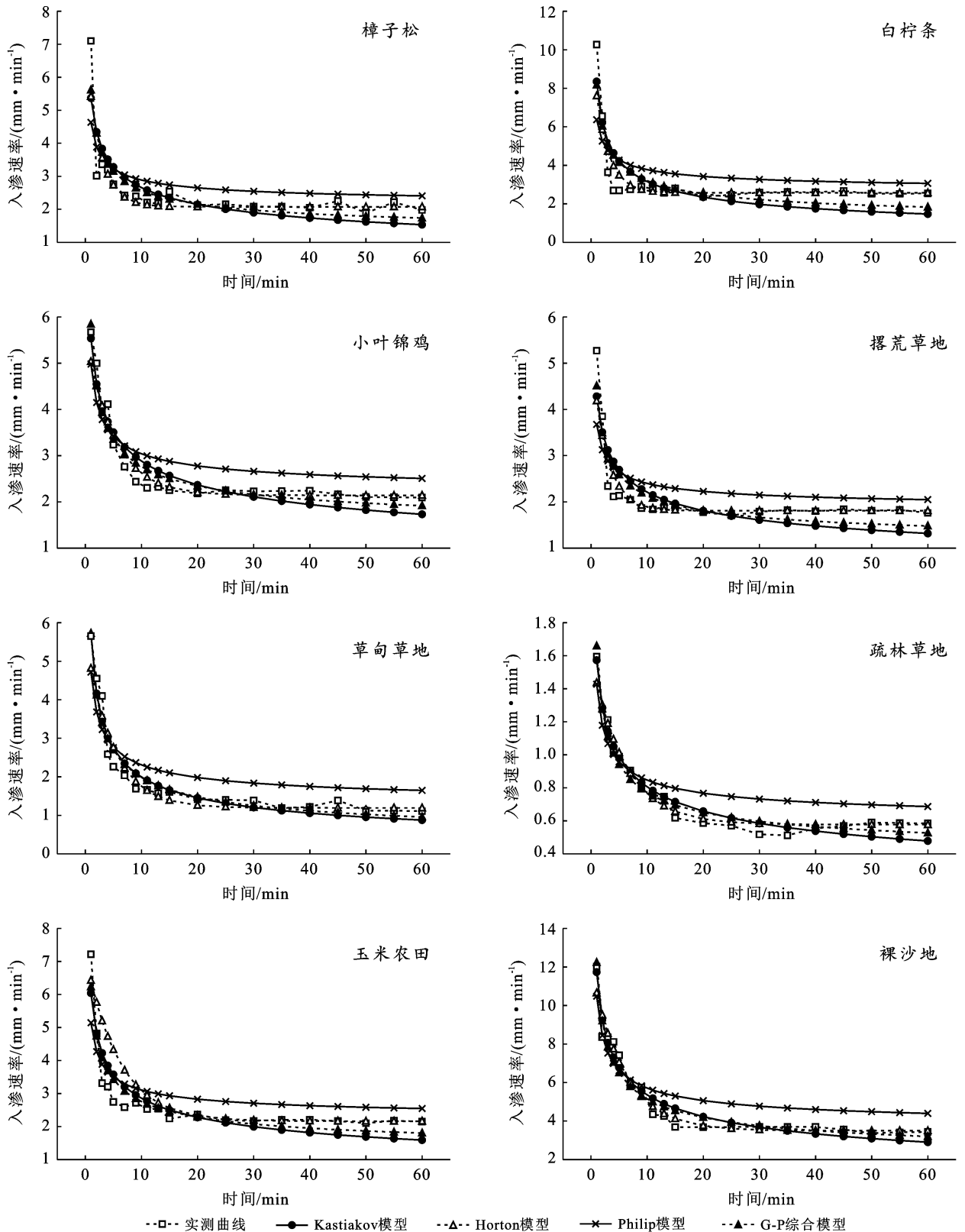


图 4 不同土地利用类型水分入渗实测曲线与拟合曲线

表 3 土壤入渗性能与土壤物理性质的相关分析

入渗特征值	土壤初始 含水量	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管 孔隙度	机械组成		
					粗砂	中砂	细砂
初始入渗率	0.110	-0.790**	0.104	0.350	0.234	0.518**	-0.721**
15 min 入渗率	0.231	-0.752**	0.059	0.363	0.116	0.569**	-0.708**
稳定入渗率	0.200	-0.833**	-0.021	0.470*	0.139	0.604**	-0.760**

注：* 表示在 5% 水平下相关性显著；** 表示在 1% 水平下相关性显著。

由表 4 可知,在模型对各土地利用类型入渗过程的拟合结果中,虽然各模型对实测值的拟合程度均达到了显著性水平,但其拟合的决定系数是不一致的,具体表现为:Horton 模型>Philip 模型>G-P 综合模型>Kastiakov 模型。Horton 模型决定系数变化范围为 0.896~0.975,均值为 0.956;Philip 模型决定系数变化范围为 0.673~0.962,均值为 0.879;G-P 综合模型决定系数变化范围为 0.673~0.962,均值为 0.838;Kastiakov 模型决定系数变化范围为 0.615~0.938,均值为 0.791。

从对入渗过程的拟合情况来看,4 种模型中 Horton 模型的系数最高。同时 Kastiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型、G-P 综合模型的绝对误差范围依次为 0.046~0.835,0.035~0.415,0.117~1.079,0.044~0.720 mm/min,相对误差范围依次为 7.312%~27.567%,4.579%~10.277%,17.977%~32.963%,6.378%~22.737%。经对比后发现 Horton 模型的绝对误差与相对误差更小,模拟结果更接近土壤水分入渗实测值,能更准确地模拟科尔沁沙地土壤水分入渗过程。

表 4 科尔沁沙地土壤入渗模型拟合结果

土地利用 类型	Kastiakov 模型				Horton 模型				Philip 模型				G-P 综合模型			
	绝对误差	相对误差	R ²	p 值	绝对误差	相对误差	R ²	p 值	绝对误差	相对误差	R ²	p 值	绝对误差	相对误差	R ²	p 值
樟子松	0.471	16.904	0.658	0.05<	0.266	10.357	0.797	0.05<	0.366	12.666	0.577	0.05<	0.366	12.665	0.773	0.05<
白柠条	0.835	27.567	0.615	0.05<	0.173	5.347	0.831	0.05<	0.720	22.734	0.506	0.05<	0.720	22.737	0.746	0.05<
小叶锦鸡	0.293	11.462	0.840	0.05<	0.093	3.084	0.946	0.05<	0.214	7.912	0.751	0.05<	0.214	7.912	0.935	0.05<
撂荒草地	0.387	17.705	0.668	0.05<	0.084	3.674	0.860	0.05<	0.301	13.556	0.562	0.05<	0.301	13.554	0.808	0.05<
草甸草地	0.249	13.480	0.925	0.05<	0.162	9.379	0.934	0.05<	0.224	11.290	0.772	0.05<	0.224	11.290	0.946	0.05<
疏林草地	0.046	7.312	0.938	0.05<	0.346	4.395	0.971	0.05<	0.044	6.378	0.799	0.05<	0.044	6.378	0.966	0.05<
玉米农田	0.419	15.160	0.778	0.05<	0.150	5.964	0.889	0.05<	0.307	10.704	0.667	0.05<	0.307	10.703	0.883	0.05<
裸沙地	0.455	9.719	0.909	0.05<	0.296	4.861	0.961	0.05<	0.402	7.741	0.805	0.05<	0.402	7.741	0.951	0.05<

4 讨论

科尔沁沙地土壤结构松散,组成相对单一,土壤孔隙以大孔隙为主,渗水快,保水能力低,不同土地利用类型入渗特征差异显著。对其入渗特征的研究可为包气带水分与物质运移、土壤水分入渗、地下水补给等相关研究提供资料参考。

4.1 影响沙地土壤入渗率的因素比较分析

影响入渗过程的因素较多,包括土壤初始含水量、容重、孔隙度、机械组成、有机质含量等。土壤容重体现了土壤的紧实度与孔隙状况,容重越大土壤紧实度越高,渗透性越差。吴发启等^[12]通过人工模拟降雨的方式研究了土壤水分入渗的影响因素,结果表明土壤容重与稳定入渗率呈指数负相关关系。土壤机械组成影响着土壤水分运动的驱动力和水力传导度。机械组成越细,土壤整体的比表面积越大,表面能越高,吸附能力就越强,其导水能力越弱,入渗能力越

差^[13]。李卓等^[14]对不同黏粒含量的土壤水分入渗能力进行了研究,结果表明土壤的水分入渗能力随着其机械组成的变细而递减。非毛管孔隙作为水分入渗的主要通道,影响着土壤渗透能力的强弱^[15]。Helalia 等^[16]分别对黏土、黏壤土、壤土进行了田间入渗试验,结果表明土壤有效孔隙度与稳定入渗率相关性显著,可达到极显著水平。与以往研究结果相比,本研究发现土壤初始入渗率、15 min 入渗率、稳定入渗率与容重、细砂含量呈极显著负相关,与中砂含量呈极显著正相关;与初始含水量、非毛管孔隙度和粗砂含量呈正相关,但只有稳定入渗率与非毛管孔隙度间达到了显著性水平。经分析后发现,产生此结果的原因主要取决于土壤本身的性质,本研究在科尔沁沙地开展,其土壤类型属沙土范畴,土壤水分入渗过程更多地受到机械组成的影响。同时,其他土壤物理参数也受到土壤质地的影响,使得沙地土壤水分入渗过程具有其特殊性。

纳磊^[1]和莫斌等^[17]的研究结果表明土壤入渗率与容重呈正相关。姚淑霞等^[18]的研究结果表明土壤入渗率与细砂含量呈负相关。周宏飞等^[15]的研究表明稳定入渗率与非毛管孔隙度呈显著正相关。这些都与本试验的研究结果一致。但本试验研究结果显示入渗率与中砂含量呈极显著关系,其原因可能是因为研究区内中砂在土壤机械组成中占据绝对优势,比例高达52%~71%,因此与入渗率相关性极显著。本研究中裸沙地入渗特征值与其他土地利用类型相比均为最大,这与张强等^[19]对毛乌素沙地的研究结果:无植被沙地土壤入渗特征值>有植被沙地相一致。这主要是因为风沙土的孔隙度大,土壤持水时间短,保水能力差,而其他土地利用类型由于植被根系的存在增强了土壤蓄水能力,对土壤有一定的改良效果,使得土壤入渗特征值表现为:无植被沙地>有植被沙地。

土壤性质的不同会造成入渗过程的差异,虽然本研究中各样地土壤类型均为沙土类,土壤性质较为接近,但其所属的土壤亚类不同,各亚类间土壤的结构与性质一定程度上存在差别,从而在机械组成、土壤容重、土壤孔隙度等相关参数上表现出差异。陈娟等^[20]对不同土壤类型水分入渗的研究表明,风沙土入渗性能最好,基岩风化残积土次之,灰钙土入渗性能最差。刘目兴等^[21]对土壤水分入渗的研究表明,粉壤土入渗能力大于砂质黄壤。武敏等^[22]对水分入渗规律的研究表明,稳定入渗率表现为:壤质砂土>砂质壤土>粉砂壤土。此外已有研究^[3]表明,不同的土地利用方式在不同的程度上改变了土壤性质,使土壤中各因子发生了较大的变化,从而造成到土壤入渗速率之间的较大差异。Wang等^[23]对不同植被条件下的饱和导水率进行了测定,结果表明在土壤表层至植物根区下边界范围内,土壤饱和导水率随着土层深度的增加而增加。赵景波等^[24]对沙层的水分入渗率进行了研究,结果表明饱和导水率由大到小依次为半固定沙丘、流动沙丘、丘间洼地。纳磊等^[1]对各晋西黄土区的研究表明,不同土地利用类型土壤稳定入渗率表现为:灌草坡>天然次生林>河漫滩>刺槐林>油松林>紫穗槐林>侧柏林>坡耕地>土质路面。本研究中发现,土壤稳定入渗率呈现:裸沙地>白柠条林地>玉米农田>小叶锦鸡儿林地>樟子松林地>撂荒草地>草甸草地>疏林草地趋势,以上研究均表明不同植被类型之间土壤水分入渗存在明显的差异。科尔沁沙地土地利用方式的不同,引起土壤有机质含量、物理性质、地表结构以及植物根系分布等方面的差异,进而造成各类土壤之间容重、机械组成及孔隙度上的差异,从而影响其水分入渗过程。

4.2 土壤入渗特征与沙地土地利用

在水资源匮乏的沙地生态系统中,如何有效提高水资源的合理利用是沙区植被建设和生态系统稳定的重要方面。不同土地利用类型影响沙区的土壤水分入渗及再分配过程,较高的土壤入渗率利于沙区地下水分补给可促进水分循环,而较低入渗率可增强土壤表层含水量利于植被对水分的利用。由表2可知,在水分入渗过程中白柠条林地、玉米农田、小叶锦鸡儿林地、樟子松林地入渗率相对较高,这几种土地利用类型与其他土地利用类型相比更能促进科尔沁沙地地下水分补给及水分循环,有益于沙区水资源保护与维持。而撂荒草地、草甸草地和疏林草地入渗率相对较低,对土壤表层水分的维持及植被对水分的利用具有积极的作用,利于沙区地表植被的保存和防止土壤侵蚀及控制风沙。在沙区植被的维持与重建及维持荒漠生态系统结构、功能稳定方面应考虑不同土地利用类型的入渗特征差异,根据实际情况来选择相适宜的土地利用类型,从而确保沙区的可持续稳定发展。

5 结论

(1) 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征存在显著差异,初始入渗率变化范围为12.020~1.595 mm/min,由大到小依次为:裸沙地>白柠条林地>玉米农田>樟子松林地>小叶锦鸡儿林地>草甸草地>撂荒草地>疏林草地;15 min入渗率变化范围为3.690~0.617 mm/min,由大到小依次为:裸沙地>白柠条林地>樟子松林地>小叶锦鸡儿林地>玉米农田>撂荒草地>草甸草地>疏林草地;土壤稳定入渗率变化范围为3.495~0.576 mm/min,由大到小依次为:裸沙地>白柠条林地>玉米农田>小叶锦鸡儿林地>樟子松林地>撂荒草地>草甸草地>疏林草地。

(2) 科尔沁沙地不同土地利用类型的初始入渗率、15 min入渗率及稳定入渗率与容重、细砂含量呈极显著负相关与中砂含量呈极显著正相关;同时与初始含水量、非毛管孔隙度和粗砂含量呈正相关关系,但只有稳定入渗率与非毛管孔隙度达到显著性水平。

(3) 在不同土地利用类型中,土壤入渗过程回归模型的拟合优度存在差异,其拟合优度依次为:Horton模型(0.898)>G-P综合模型(0.876)>Kostiakov模型(0.827)>Philip模型(0.679),Horton模型决定系数最高、相对误差最小,能准确地模拟科尔沁沙地土壤入渗的实际情况。

[参考文献]

[1] 纳磊,张建军,朱金兆,等.晋西黄土区不同土地利用类型

- 坡面土壤饱和导水率研究[J].水土保持研究,2008,15(3):69-73.
- [2] 雷泽勇,刘心玲,周凯,等.辽西北沙地人工林植物水分亏缺与恢复研究[J].水土保持学报,2009,23(4):86-90.
- [3] 夏江宝,杨吉华,李红云.不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J].水土保持研究,2004,11(2):115-117.
- [4] 方胜,彭韬,王世杰,等.喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J].地球与环境,2014,42(1):1-10.
- [5] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
- [6] 郑纪勇,邵明安,张兴昌,黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [7] Julià M F, Monreal T E, del Corral Jiménez A S, et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction [J]. *Geoderma*, 2004, 123(3/4):257-277.
- [8] 刘元波,陈荷生,高前兆,等.沙地降雨入渗水分动态[J].中国沙漠,1995,12(2):143-150.
- [9] 汤英,周宏飞,徐利岗.荒漠植被影响下的沙地稳定入渗率变化特征[J].土壤通报,2009,40(2):235-239.
- [10] 孙蓓,马玉莹,雷廷武,等.农地耕层与犁底层土壤入渗性能的连续测量方法[J].农业工程学报,2013,29(4):118-124.
- [11] Vanderlinden K, Gabriels D, Giráldez J V. Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Córdoba [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48(4):303-315.
- [12] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.
- [13] 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.
- [14] 李卓,吴普特,冯浩,等.不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):71-77.
- [15] 周宏飞,汤英,周宝佳.荒漠灌木及冻融影响下的风沙土入渗特征[C]//土壤资源持续利用和生态环境安全:中国土壤学会第十一届二次理事扩大会议暨学术会议论文集,2009.
- [16] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils [J]. *Agricultural water Management*, 1993,24(1):39-47.
- [17] 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.
- [18] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J].土壤学报,2013,50(3):469-477.
- [19] 张强,孙向阳,黄利江,等.毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J].林业科学研究,2004,17(S1):9-14.
- [20] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.
- [21] 刘目兴,杜文正,张海林.三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(3):299-306.
- [22] 武敏,冯绍元,孙春燕,等.北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J].中国农业大学学报,2009,14(4):98-102.
- [23] Wang T, Zlotnik V A, Wedin D, et al. Spatial trends in saturated hydraulic conductivity of vegetated dunes in the Nebraska Sand Hills: Effects of depth and topography [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,349(1/2):88-97.
- [24] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J].水土保持通报,2011,31(3):12-16.