

退耕还林(草)对黄土高原丘陵沟壑区 土壤入渗特征的影响

翟明飞, 王春语, 孙贯芳, 孙烜泽, 王柏杨, 岑云峰, 高照良

(西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 土壤基本理化性质显著影响着土壤入渗性能, 解析黄土高原丘陵沟壑区植被恢复如何影响土壤理化性质进而作用于土壤入渗过程, 为退耕还林(草)对水文循环的影响提供依据。[方法] 以延河流域安塞区腰鼓山的林地、草地为研究对象, 采用双环入渗法定量分析了林地和草地的土壤入渗特征, 并通过与农地进行对照, 揭示退耕还林还草后土壤入渗特征的变化规律, 筛选最适于黄土高原延河流域安塞区腰鼓山土壤特性的入渗模型, 利用偏最小二乘法结构方程模型解析退耕还林(草)对黄土高原丘陵沟壑区土壤入渗特征的影响机制。[结果] 林地和草地的初始入渗速率(IIR)分别为 618.44 mm/h, 583.39 mm/h, 稳定入渗速率(SIR)分别为 349.8 mm/h, 146.45 mm/h, 平均入渗速率(AIR)分别为 449.52 mm/h, 250.1 mm/h, 分别较农地高 36.29%, 18.65%, 507.82%, 154.82% 以及 227.5%, 82.21%; 蒋定生公式以极佳的决定系数(0.95)和较小的相对误差值(2.23%~5.21%)成为延河流域安塞区腰鼓山的最优土壤入渗模型; 相较于农地, 林地和草地更低的黏粒含量(9.72%, 11.95%)、更高的有机质含量(3.83 g/kg, 3.42 g/kg)以及根系生物量(105.56 g/m², 170.22 g/m²), 增强了入渗能力。[结论] 植被恢复通过改变土壤黏粒含量、有机质含量和根系生物量等, 显著增强了黄土高原丘陵沟壑区的土壤入渗能力。

关键词: 黄土高原; 植被恢复; 双环入渗; 入渗能力

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0112-09

Impact of returning farmland to forest (grassland) on soil infiltration characteristics in hilly-gully regions of Loess Plateau

Zhai Mingfei, Wang Chunyu, Sun Guanfang, Sun Xuanze, Wang Baiyang, Cen Yunfeng, Gao Zhaoliang

(College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The basic physicochemical properties of soil significantly influence soil infiltration performance. This study aims to analyze how vegetation restoration in the hilly-gully regions of the Loess Plateau affects soil physicochemical properties and thereby influences the soil infiltration process, providing a basis for the impact of returning farmland to forest (grassland) on the hydrological cycle. [Methods] Forest and grassland in Yaogushan in Ansai District of the Yanhe River Basin were selected as the research objects. The double-ring infiltrometer method was employed to quantitatively analyze the soil infiltration characteristics of forest and grassland. By comparing them with farmland, this study revealed the changes in soil infiltration characteristics after returning farmland to forest and grassland. The most suitable infiltration model for the soil characteristics of Yaogushan in Ansai District of the Yanhe River Basin on the Loess Plateau was identified. Partial least squares path modeling (PLS-PM) was employed to analyze the impact mechanisms of returning farmland to forest

收稿日期: 2025-07-08

修回日期: 2025-08-06

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42307449); 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室开放基金(F2010121002-202320); 三门峡市重大科技专项(2023L01002); 大学生创新创业计划项目(202400860AB)

第一作者: 翟明飞(2001—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 17835380105@163.com

通信作者: 孙贯芳(1989—), 男, 河南灵宝人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: sunguanfang@nwfau.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

(grassland) on soil infiltration characteristics in the hilly-gully regions of the Loess Plateau. [Results] (1) The initial infiltration rates (IIR) of forest and grassland were 618.44 mm/h and 583.39 mm/h, respectively. The stable infiltration rates (SIR) were 349.8 mm/h and 146.45 mm/h, respectively, and the average infiltration rates (AIR) were 449.52 mm/h and 250.1 mm/h, respectively. Compared to farmland, forest exhibited higher IIR (36.29%), SIR (507.82%), and AIR (227.5%), while grassland showed higher IIR (18.65%), SIR (154.82%), and AIR (82.21%). (2) The Jiang Dingsheng formula, with an excellent coefficient of determination (0.95) and relatively small relative error values (2.23%~5.21%), became the optimal soil infiltration model for Yaogushan in Ansai District of the Yanhe River Basin. (3) Compared with farmland, forest and grassland had lower clay content (9.72%, 11.95%), higher organic matter content (3.83 g/kg, 3.42 g/kg), and higher root biomass (105.56 g/m², 170.22 g/m²), enhancing infiltration capacity. [Conclusion] Vegetation restoration significantly enhances soil infiltration capacity in the hilly-gully regions of the Loess Plateau by altering soil clay content, organic matter content, and root biomass.

Keywords: Loess Plateau; vegetation restoration; double-ring infiltration; infiltration capacity

为缓解黄土高原丘陵沟壑区水资源短缺、水土流失等问题^[1],国家于1999年全面实施退耕还林(草)工程,约2 980万hm²土地实施了退耕还林(草),取得十分显著的生态成果;自此黄土高原的植被覆盖度显著增加,从1999年的31.6%提高到2020年的65.0%,有效遏制了黄土高原生态环境进一步恶化^[2]。但是随着学者对退耕还林(草)工程生态水文效应的深入研究发现,该工程对地表径流、蒸散发以及入渗等水文循环过程有着显著的影响^[3],一定程度上加剧了当地水资源的供需矛盾^[4]。入渗能力直接决定降水输送到土壤表层和深层的快慢与数量,是陆地生态系统水文循环过程的关键一环,也深刻影响着黄土高原的地下水补给问题^[5]。因此,研究黄土高原丘陵沟壑区退耕还林(草)工程所造成的土地利用类型的转变对土壤入渗能力的影响及其机制是厘清黄土高原丘陵沟壑区水文循环的基础。

入渗是水文循环的重要组成部分,入渗性能也显著影响着土壤储水、植被生长与地下水补给^[6-7]。因此,已有大批学者对土壤入渗性能开展了广泛的研究:司琴等^[8]运用双环入渗法对比分析了西南喀斯特区梯田上不同土地利用类型的入渗速率和累积入渗量;Qiu等^[9]采用双环入渗仪分析了中国典型黄土丘陵沟壑区的入渗过程。刘志强等^[10]通过人工降雨探究了土壤结皮与入渗性能间的关系。经典土壤入渗模型能够在很大程度上反映局部土壤水分入渗规律^[11-12],研究特定植被恢复条件下土壤入渗模型的适应性,可为流域生态治理提供科学依据^[13]。然而,植被恢复工程实施多年后,黄土高原丘陵沟壑区土壤物理化学性质发生了较大改变,经典土壤入渗模型对于当地的适配性需进一步验证。此外,大量研究表明,土壤质地、容重、有机质等基本理化性质的改

变会显著影响土壤的入渗性能^[14-15],但黄土高原丘陵沟壑区植被恢复如何影响土壤理化性质进而作用于土壤入渗过程仍不明晰。

因此,本研究依托双环入渗法,在黄土高原丘陵沟壑区选取农林草地各3个共9个样地进行入渗特征的研究,验证并筛选出最适配的模型,并通过偏最小二乘法结构方程模型(Partial Least Squares Path Modeling, PLS-PM)探讨植被恢复如何影响土壤理化性质进而作用于土壤入渗过程,以期更好地理解黄土高原丘陵沟壑区植被恢复措施对土壤入渗特征的影响及机制,为退耕还林(草)对水文循环的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图1所示,研究区位于中国陕西省延安市安塞区腰鼓山(36°30'45"—37°19'3"N, 108°5'44"—109°26'18"E),地处内陆黄土高原腹地,沟壑纵横,生态环境脆弱,属于脆弱的黄土高原丘陵沟壑区。该地区为中温带大陆性半干旱季风气候,干旱少雨,雨季为7—9月,属于“三北防护林工程”的规划区域。年平均降雨量和年平均气温分别为505 mm和8.8℃,其土壤类型为黄绵土,质地为粉砂壤土,主要由母质发育而来,其特征是均匀、多孔、易碎、黄色或浅棕色。

本次试验时间为2024年的9月至11月。研究所选的农地对应的主要作物为洋芋、糜子(均已收获),林地为刺槐,草地为芦苇、茵陈蒿。在每一种土地利用类型上选择3个样地开展入渗试验,共计9组试验,每个样地基本信息见表1。

1.2 试验步骤与样品采集

1.2.1 试验步骤 本试验采用双环入渗法进行试

验。试验开展的先决条件为试验前后一周内不会产生降水。通过现场调查确定 3 种土地利用类型的 9 个样地后,即可开始进行双环入渗试验,具体步骤如下:准备剪刀,双环入渗仪,水桶,铁锹,纸板,清水,环刀,铝盒,取样袋,卷尺,土钻,塑料薄膜等试验材料。随后小心地清除地表枯枝落叶层(0—5 cm),露出土壤基质表面。分别在内环和外环内侧粘贴标尺,便于读取水位数据。参考张婧等提出的表置式双环入渗仪安装方法^[16],将内环边长为 30 cm,外环边长为 60 cm,高度为 8 cm 的双环轻轻地插入地表 1 cm,并调平,外环和内环外侧堆置一定土量以防侧渗,安装过程中,尽量保持水平,减少对地表扰动。为了减少加水过程中对土壤表层的冲刷,需在表面放置纸板,水加在纸板上缓冲水流内、外环均加入清水。试验开始时内外环同时迅速加入等高水位,第一次加水深度为 4 cm,以水桶倾倒入水为试验起始,加水的同时按下秒表,然后由秒表记录内环水位每下降 0.5 cm 所需时间(min)。内环水位下降到 1 cm 时,补水到 4 cm。整个入渗过程中尽量保证内外环水位相同,以确保内环为垂直一维入渗。直到连续三次测量时间几乎相同时,我们可以认为达到稳定入渗^[16],

停止加水。当土壤表层不再有水积聚,用塑料薄膜将双环入渗的地表覆盖,防止降水和其他野生动物破坏。24 h 以后,揭开塑料薄膜,移除双环,分别沿着距离内框边缘 5 cm, 15 cm 和 25 cm 处开挖 3 个宽为 30 cm,长 100 cm 的剖面以便后续取样。

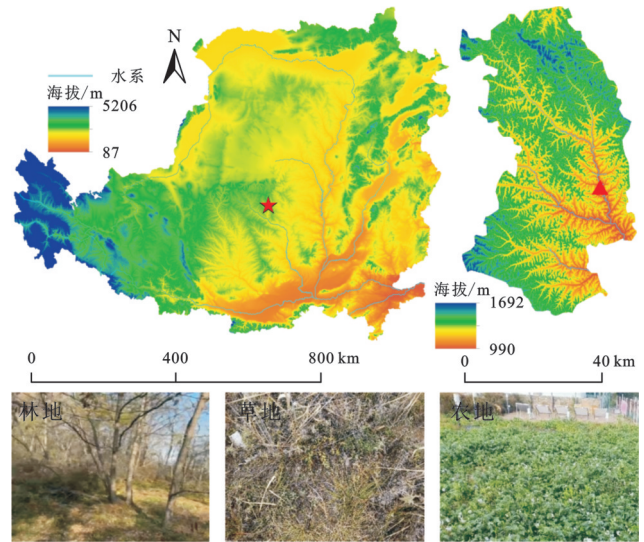


图 1 研究区概况及试验样地实况图

Fig. 1 Overview of study area and photos of experimental plots

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

土地利用类型	植被	位置	海拔/m	土壤质地	乔木林龄/a	植株高度/m	植被覆盖度/%
林地 1	刺槐	109°19'17"E, 36°51'21"N	1229	粉砂壤土	20	12	75
林地 2	刺槐	109°19'04"E, 36°51'08"N	1275	粉砂壤土	20	11	90
林地 3	刺槐	109°19'17"E, 36°51'21"N	1229	粉砂壤土	20	14	80
草地 1	芦苇	109°19'17"E, 36°51'22"N	1225	粉砂壤土	—	1.1	85
草地 2	芦苇	109°19'11"E, 36°51'14"N	1277	粉砂壤土	—	0.9	70
草地 3	茵陈蒿	109°19'12"E, 36°51'16"N	1274	粉砂壤土	—	0.2	65
农地 1	糜子	109°19'19"E, 36°51'23"N	1217	粉砂壤土	—	0.7	10
农地 2	洋芋	109°19'18"E, 36°51'23"N	1221	粉砂壤土	—	0.3	15
农地 3	糜子	109°19'18"E, 36°51'25"N	1209	粉砂壤土	—	0.8	13

1.2.2 土壤样品采集及指标测试 每个土坑挖完后,用环刀(100 cm³)和自封袋分别于入渗剖面自上而下收集土样,环刀取样位置为 20, 50, 80, 110 cm;草地和农地自封袋取样范围为 0—160 cm,取样间隔为 20 cm,林地自封袋取样范围为 0—200 cm,取样间隔为 20 cm,用带孔隙的网兜在内环表层连续取 5×5×10 cm³的土块 3 块用以计算土壤剖面的根系生物量(R-bio),所取土样和环刀送回实验室进行下一步基础指标测定,土壤容重(Bulk Density, BD)采用烘箱烘干法测定(105 °C,烘干至恒重);总孔隙度(Total Porosity, TP)、田间持水量(Field Capacity, FC)、毛管持水量(Capillary Moisture Capacity, CMC)、毛管

孔隙度(Capillary Porosity, CP)、非毛管孔隙度(Non-Capillary Porosity, N-CP)以及饱和导水率(Ks)均采用标准环刀法测定;使用重铬酸钾氧化—外加加热法^[17]测定土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM);使用 Masterizer-2 000 激光粒度仪测定土壤的颗粒组成。

1.3 数据分析

1.3.1 入渗特征参数及入渗过程模型拟合 在进行双环入渗试验的同时,取最初 3 min 的入渗速率为初始入渗速率(Initial Infiltration Rate, IIR);同时可以获取稳定入渗速率(Stable Infiltration Rate, SIR)和平均入渗速率(Average Infiltration Rate, AIR)^[18]。入渗率由下式计算:

$$i = \frac{\Delta I}{\Delta t} \times 600 \quad (1)$$

式中: i 是入渗率(mm/h); ΔI 是内环在 Δt 时段(min)的入渗水分(cm);600是转换系数。

本次入渗试验的入渗过程主要与Kostiakov, Philip, Horton以及适用于黄土高原的蒋定生公式进行拟合,进而比较不同模型的拟合优度。Kostiakov模型^[19]是描述土壤入渗过程的经验模型,因其具有简洁的数学形式和较高的预测精度而被广泛应用于水文模拟领域,其公式如下:

$$i = at^{-b} \quad (2)$$

式中: i 是入渗速率(mm/h); t 为入渗时间(h); a, b 均为拟合参数。

Philip模型^[20]是计算入渗速率的经典物理模型,其公式如下:

$$i = 0.5St^{-0.5} + A \quad (3)$$

式中: i 是入渗速率(mm/h); t 为入渗时间(h); S 为吸渗率(mm/h^{0.5}); A 为稳定入渗率(mm/h)。

Horton模型^[21]描述土壤入渗过程的物理—经验耦合模型,通过指数衰减函数表征入渗率随时间递减至稳定入渗率的动态特征,其公式如下:

$$i = i_f + (i_0 - i_f)e^{-nt} \quad (4)$$

式中: i 是入渗速率(mm/h); t 为入渗时间(h); i_f 为稳定入渗速率(mm/h); i_0 是初始入渗速率(mm/h); n 为入渗衰减系数。

蒋定生根据对Kostiakov和Horton公式的研究并结合大量黄土高原地区的实测资料,提出了符合黄土高原土壤水分入渗过程的蒋定生公式^[22],其公式如下:

$$f = f_c + \frac{f_1 - f_c}{t^a} \quad (5)$$

式中: f 为入渗速率(mm/h); t 为入渗时间(h); f_c 为土壤稳定入渗速率(mm/h); f_1 是第一分钟末土壤的入渗速率(mm/h); a 为经验参数。

1.3.2 统计分析 在本研究中,使用单因素方差分析入渗特征(IIR, SIR, AIR)之间的差异;在OriginPro 2025中完成各个入渗模型与入渗参数的拟合并优选;采用相关性分析对土壤基本理化性质与土壤入渗特征之间的相关性进行分析;采用偏最小二乘法结构方程模型(PLS-PM)来检验不同土地利用类型及其土壤基本理化性质对入渗特征的假设因果关系(在 $p < 0.05$ 水平上显著相关),并用Microsoft Excel 2019和R version 4.5.0进行结构方程模型的构建。

2 结果与分析

2.1 退耕还林还草后土壤基本理化性质的变化

如表2所示,土壤容重与有机质显著受到土地利用类型变化的影响($p < 0.05$):由农地向林草地的转变,土壤容重呈现下降趋势,农地的容重显著高于林地,为林地的1.03倍,草地容重与林地并无显著差异;土壤有机质表现出林草地高于农地的趋势,林地的有机质含量显著高于农地,是农地的1.69倍,与草地并无明显差异。另外,相比于农地,林地与草地有着更高的砂粒含量、总孔隙度、毛管孔隙度、田间持水量以及毛管持水量,分别高于农地11.11%,4.56%,9.19%,11.09%,9.66%,12.34%,17.92%,27.86%以及13.18%,15.29%。林地的土壤物理化学性质表现出最显著的增强作用,这进一步印证了退耕还林还草工程对土壤改良的显著成效。

表2 不同植被类型的土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of soil under different vegetation types

样地	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙/ %	田间持水量/ %	毛管持水量/ %	饱和导水率/ (mm·h ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	根系生物量/ (g·m ⁻²)
林地	9.72±1.30a	15.90±1.30a	74.38±2.50a	1.30±0.03b	54.44±2.37a	50.75±1.98a	3.69±0.74a	23.62±2.09a	39.08±2.11a	23.24±19.21a	3.83±0.20a	105.56±33.64a
草地	11.95±1.81a	18.06±1.65a	69.99±3.47a	1.31±0.02ab	55.39±4.23a	51.99±4.08a	3.40±0.16a	25.61±2.20a	39.81±3.45a	7.51±2.33a	3.42±0.79ab	170.22±143.26a
农地	12.78±1.81a	20.28±3.76a	66.94±5.47a	1.34±0.01a	49.86±1.97a	46.28±2.33a	3.58±0.41a	20.03±3.63a	34.53±1.81a	13.10±4.35a	2.26±0.68b	18.45±8.49a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土地利用类型之间存在显著差异($p < 0.05$)。

2.2 农林草地土壤入渗过程

如图2所示,整体来看,在所有样地中,入渗速率都有较大的初始值,并在随后的短暂时间内迅速衰减,并最终达到稳定。不同土地利用类型达到稳定入渗所需时间也不尽相同,林地达到稳定入渗的时间最短,一般在15~25 min;农地所需时间最长,农1和农3为60 min左右,而农2达到了90 min左右;草地达到稳定入渗所需时间介于二者之间,草3所需时

间较短为30 min左右,草1,草2分别为40,80 min左右。总的来说,不同土地利用类型达到稳定入渗所需时间长短顺序为农地>草地>林地。

从图2中可以看出,林地的入渗速率总是大于草地和农地,在1,2号样地草地略大于农地,在3号样地草地远大于农地。通过对不同土地利用类型的初始入渗速率(IIR)、稳定入渗速率(SIR)以及平均入渗速率(AIR)进一步计算可知:整体来说,林地的

IIR, SIR 和 AIR 均大于草地和农地。具体来看,林地的 IIR 大于草地和农地,分别高于草地、农地 6.01% 和 36.29%,草地的 IIR 也超出农地 28.57%;对于 SIR 而言,林地明显高于草地和农地,分别高出草

地、农地 138.85% 和 507.82%,同时,草地 SIR 高于农地 154.47%;平均入渗速率 AIR 也表现出与 IIR 和 SIR 一致的规律性,林地的 AIR 分别高于草地、农地 79.74% 和 227.50%,草地 AIR 超出农地 82.21%。

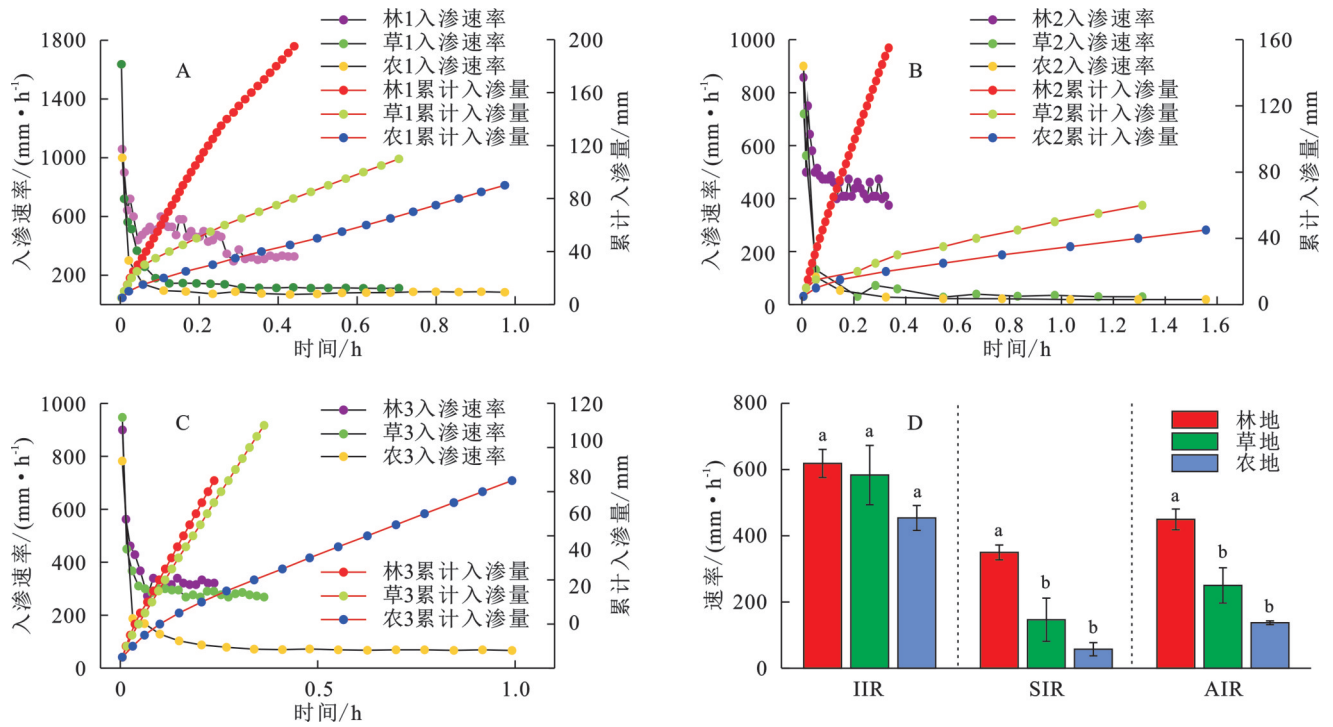


图 2 不同土地利用类型入渗速率、累计入渗量随时间的变化情况 及初始入渗速率 (IIR)、稳定入渗速率 (SIR) 和平均入渗速率 (AIR) 的对比

Fig. 2 Variations in infiltration rate and cumulative infiltration over time, and comparison of initial infiltration rate (IIR), stable infiltration rate (SIR), and average infiltration rate (AIR) under different land use types

2.3 土壤水分入渗模型优选

本研究主要采取了 4 种入渗模型分别来拟合不同土地利用类型的水分入渗过程。决定系数 (R^2) 和平均相对误差作为评判指标来筛选适合于黄土高原丘陵沟壑区的入渗模型 (表 3)。不同土壤入渗模型的决定系数存在差异。Kostiakov 模型的决定系数为 0.89~0.98, 平均值为 0.95; Philip 模型的决定系数为 0.93~0.98, 平均值为 0.96; Horton 模型的决定系数为 0.18~0.51, 平均值为 0.33; 蒋定生公式的决定系数为 0.93~1.00, 平均值为 0.98。不同土壤入渗模型的相对误差变化范围分别为 Kostiakov 模型: 5.96%~20.90%; Philip 模型: 5.21%~25.57%; Horton 模型: 10.41%~84.71%; 蒋定生公式: 2.23%~5.21%。蒋定生公式在各个样地均具有最佳的决定系数, 而 Horton 模型的决定系数在各个样地均为最欠佳值。同时, 结合图 3 也可知, 蒋定生公式模拟的土壤入渗曲线图与实测土壤入渗曲线图更加贴近。因此, 蒋定生公式更能全面地反映黄土高原丘陵沟壑区的实际水分入渗过程。综上所述, 蒋定生公式以极佳的决定系数和较小的相对误差值明显优于其他几种模

型。因此, 蒋定生公式更符合黄土高原丘陵沟壑区的土壤水分入渗过程, 可以相对精准地模拟其入渗过程并进行预测。

表 3 土壤入渗模型拟合参数及效果

Table 3 Fitting parameters and performance of soil infiltration models

土地利用类型	入渗模型	参数	参数值	
林地	Kostiakov	$i=at^{-b}$	a	291.31
			b	0.20
			R^2	0.89
			MRE	5.96
			S	91.55
			A	296.94
草地	Philip	$i=0.5St^{-0.5}+A$	R^2	0.93
			MRE	5.21
			i_j	557.00
			i_0	12.32
			n	1.00
			R^2	0.51
农地	Horton	$i=i_j+(i_0-i_j)e^{-nt}$		

续表 3

土地利用类型	入渗模型	参数	参数值	
林地	蒋定生公式	f_c	301.85	
		f_1	344.48	
		a	0.51	
		R^2	0.93	
		MRE	5.21	
	Kostiakov	$i=at^{-b}$	a	105.54
			b	0.43
			R^2	0.96
			MRE	13.76
			S	139.53
Philip	$i=0.5St^{-0.5}+A$	A	54.29	
		R^2	0.98	
		MRE	9.10	
草地	Horton	i_j	390.28	
		i_0	122.55	
		n	1.00	
		R^2	0.29	
		MRE	49.41	
	蒋定生公式	$f=f_c+(f_1-f_c)/t^a$	f_c	117.23
			f_1	140.61
			a	0.71
			R^2	1.00
			MRE	3.60
农地	Kostiakov	a	32.54	
		b	0.63	
		R^2	0.98	
		MRE	20.90	
		S	122.87	
	Philip	$i=0.5St^{-0.5}+A$	A	-18.20
			R^2	0.96
			MRE	25.57
	Horton	$i=i_j+(i_0-i_j)e^{-nt}$	i_j	231.91
			i_0	103.84
n			1.00	
R^2			0.18	
MRE			84.71	
蒋定生公式	$f=f_c+(f_1-f_c)/t^a$	f_c	49.89	
		f_1	57.18	
		a	0.90	
		R^2	1.00	
		MRE	2.23	

注: i 为入渗率(mm/h); T 为入渗时间(h); a, b 是Kostiakov模型的参数; S, A 是Philip模型的参数; i_j, i_0, n 是Horton模型的参数; f_c, f_1, a 是蒋定生公式的参数; R^2 为决定系数;MRE为相对误差;除Horton外,所有模型均在0.001水平上显著。

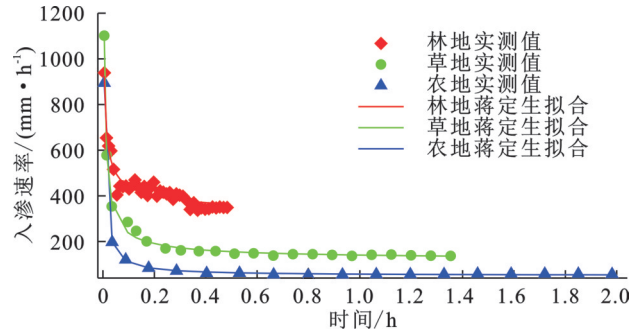


图 3 不同土地利用类型土壤入渗过程与最佳模型模拟曲线
Fig. 3 Measured curves of soil infiltration processes under different land use types and simulation curves of optimal model

2.4 土壤入渗能力的影响因素分析

土壤基本理化性质与入渗特征的相关性分析,见图4。土壤入渗能力与土壤基本理化性质和根系生物量显著相关。具体而言,IIR与CP,FC,CMC,SOM和R-bio($p<0.05$)呈显著正相关关系,而SIR和AIR与Clay($p<0.05$)呈显著负相关关系。在土壤和根系性质中,R-bio与TP,CP和CMC($p<0.01$)均呈极显著正相关关系。此外,BD与TP,CP,CMC和SOM($p<0.05$)均呈显著负相关关系;TP与CP,FC,CMC以及R-bio($p<0.01$)均呈现极显著正相关关系;同时,CP也与FC,CMC以及R-bio($p<0.01$)均呈现极显著正相关关系。

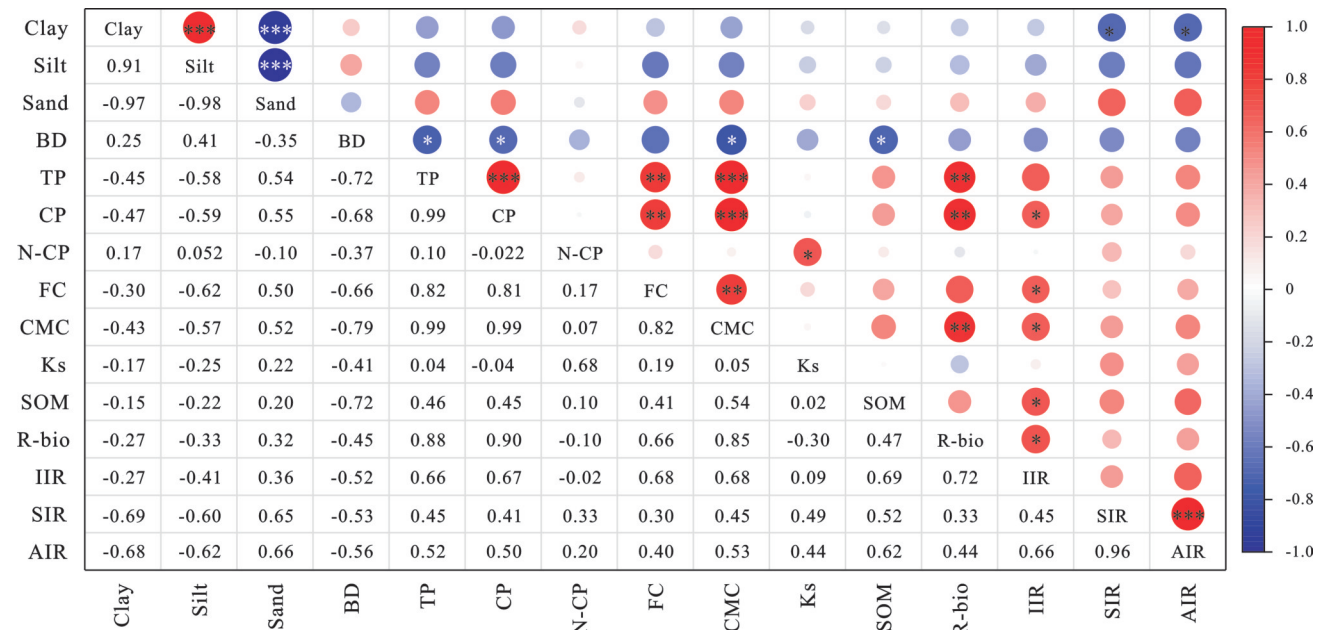
图5所构建的PLS-PM模型结果表明,在3个模型中不同土地利用类型与土壤黏粒含量之间均呈现显著正相关关系(路径系数分别为0.67,0.69,0.69),与有机质含量之间均呈现显著负相关关系(路径系数分别为-1.13,-1.05和-1.06),而黏粒含量与有机质含量之间均呈现显著正相关关系(路径系数分别为0.68,0.71,0.71)。在AIR模型中,土地利用类型与AIR之间呈现显著负相关关系(路径系数为-1.28),根系生物量与AIR之间呈现显著正相关关系(路径系数为0.47)。可见,不同土地利用类型对土壤基本理化性质和入渗特征均有着一定的影响,特别是根系生物量的提高显著增强了土壤的平均入渗能力。

3 讨论

本研究通过对黄土高原丘陵沟壑区农林草地各3个样地进行入渗特征的计算可得,农地向林草地的转变,整体上极大地提高了SIR,IIR以及AIR。由土壤理化性质与入渗特征之间的相关性分析(图4)可以得出,土壤入渗能力与土壤基本理化性质和根系生物量($p<0.05$)显著相关,这与之前的研究结论相似^[1],表明多年来的植被恢复措施整体上提高了当地的土壤

入渗能力。同时 Xu 等^[23]通过对不同供水条件和不同坡度的土壤样本横向和垂直流动进行研究,也表明植被恢复通过根系的改变进而影响黄土的土壤入渗特

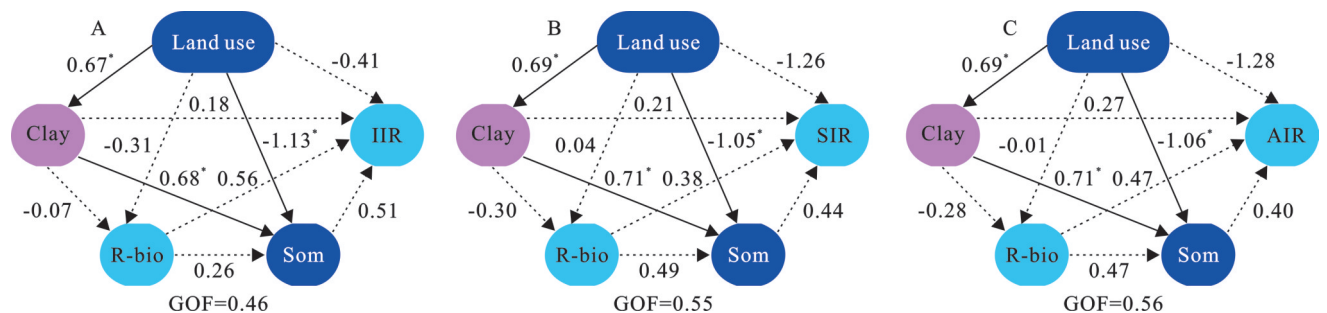
性。徐远慧等^[24]评估了不同植被恢复年限的土壤性质和入渗性能,也得到了退耕还草对土壤的改善作用随着退耕年限延长而不断增强的结论。



注:红色表示正相关,蓝色表示负相关;*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$,***表示 $p < 0.001$;BD表示土壤容重;TP表示土壤总孔隙度;CP表示土壤毛管孔隙度;N-CP表示土壤非毛管孔隙度;FC表示田间持水量;CMC表示毛管持水量;Ks表示饱和导水率;SOM表示土壤有机质;R-bio表示根系生物量;IIR表示初始入渗率;SIR表示稳定入渗率;AIR表示平均入渗率。

图 4 土壤基本理化性质与入渗特征的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between basic soil physicochemical properties and infiltration characteristics



注:A, B, C 分别探讨土地利用类型(Land use)、黏粒含量(Clay)、根系生物量(R-bio)以及 Som(土壤有机质)对初始入渗率(IIR)、稳定入渗率(SIR)以及平均入渗率(AIR)的影响。实线与虚线分别代表显著与不显著;*和**分别表示系数在 0.05, 0.01 的概率水平上显著;Fit 统计量的优良性在模型下方显示。

图 5 偏最小二乘法结构方程模型图(PLS-PM)

Fig. 5 Diagram of partial least squares path model (PLS-PM)

在入渗时间与速率方面,林地缩短了达到稳定入渗的时间,也提高了入渗速率;由于 2 号草地的选点靠近路边,可能由于人为踏实而造成达到稳定入渗的时间偏慢,但是总体来看草地也缩短了达到稳定入渗的时间。Qiu^[9]在中国典型黄土丘陵沟壑区采用双环入渗仪结合染色示踪技术也得出了入渗速率林地 > 草地 > 农地的结论。本次试验农地具有较小的人渗速率主要是由于农地的马铃薯和糜子刚刚收获完毕,农地残存根系偏少和土壤压实,从而使得农地土壤结构致密,主要表现在农地的容重(1.34 g/cm^3)均大于林地(1.3 g/cm^3)与草地(1.31 g/cm^3),因此产

生了较弱的人渗能力;IIR 与 SIR 整体大小趋势为林地 > 草地 > 农地,吕刚^[25]通过野外实地双环入渗试验和室内理化分析方法研究了海州露天煤矿排土场复垦区乔木林地、灌木林地、农用地、荒草地的土壤入渗特性,结果也表明土壤初始入渗率(IIR)、稳定入渗率(SIR)均表现为乔木林地 > 灌木林地 > 农用地 > 荒草地,这与本研究的结果相同。本试验发现 2 号草地入渗速率低于农地,主要是由于根系较少(见表 2),其根系生物量仅为 12.67 g/m^2 ,小于农地的平均根系生物量 18.44 g/m^2 ,导致入渗速率的降低^[26]。而 1 号草地由于庞大的根系系统分布于土壤表层,其

IIR 大于林地。总体来说,农地向林草地的转换提高了土壤的平均入渗能力,可见决定这一关键过程的可能是根系生物量。

PLS-PM的结果表明,土地利用类型与AIR显著负相关。这说明农地向林草地的转变显著对土壤入渗能力有着促进作用。Guan^[27]的研究也证实了这一点。同时,不同土地利用类型与黏粒含量呈显著正相关,说明农地向林草地的转变降低了黏粒含量,由于黏粒含量高的土壤具有很强的保水性^[28],对入渗有着阻碍作用,因此说明农地向林草地的转变提高了土壤的入渗能力。同时土地利用类型与土壤有机质含量显著负相关,说明农地向林草地的转变显著提高了土壤有机质含量,可能是由于枯枝落叶层增加了凋落物含量,进而提高了有机质含量,改善了土壤的团聚体结构^[29],促进了土壤的入渗能力。赵富王等^[30]分析不同植物根系特征时,也表明根系能够不同程度地增加土壤有机质含量。此外,根系生物量与AIR之间也呈现显著正相关关系,可能是由于根系的增多与延伸增加了土壤的孔隙度,进而提高了土壤的平均入渗速率。综上所述,植被恢复措施可以显著提高土壤入渗性能,促进水分向更深层的补给。

4 结论

(1) 植被恢复措施降低了土壤黏粒含量,提高了有机质含量、根系生物量、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、田间持水量以及毛管持水量。

(2) 植被恢复增强了土壤的入渗能力,整体来说,林地缩短了达到稳定入渗的时间,也提高了入渗速率;IIR, SIR和AIR均表现为林地>草地>农地。

(3) 农林草地3种土地利用类型的最优拟合模型均为蒋定生公式,平均拟合系数为0.98,相对误差值为2.23%~5.21%。

(4) 土壤入渗性能与土壤基本理化性质和根系生物量($p < 0.05$)显著相关,农地向林草地转变引起的根系生物量的增加增强了土壤的平均入渗速率。

参考文献(References):

- [1] Qiu D X, Xu R R, Gao P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2024, 241:108079.
- [2] Chen Y P, Wang K B, Fu B J, et al. 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, 22: 100442.
- [3] Liao Y, Dong L B, Li A, et al. Soil physicochemical properties and crusts regulate the soil infiltration capacity after land-use conversions from farmlands in semiarid areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130283.
- [4] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].*地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22. Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22.
- [5] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 151(4): 437-448.
- [6] 张贤林,冯梦蝶,何丙辉,等.喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗特征及适宜模型[J].*水土保持研究*, 2024, 31(4): 34-41. Zhang X L, Feng M D, He B H, et al. Soil infiltration characteristics and suitable models under different land use types in Karst Trough-Valley Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 34-41.
- [7] Shi P J, Huang Y N, Yang C Y, et al. Quantitative estimation of groundwater recharge in the thick loess deposits using multiple environmental tracers and methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126895.
- [8] 司琴,余佳峻,高泽超,等.西南喀斯特区不同土地利用梯田优先流定量分析[J].*中国农村水利水电*, 2023(8): 191-197. Si Q, Yu J J, Gao Z C, et al. A quantitative analysis of preferential flow in different land use terraces in the southwest karst region [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(8): 191-197.
- [9] Qiu D X, Xu R R, Wu C X, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltrability and preferential flow in hilly gully areas of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2023, 221: 106770.
- [10] 刘志强,张晓茹,焦钊栩,等.连续性与间歇性降雨下土壤结皮与入渗的关系模拟[J].*水土保持学报*, 2024, 38(3): 64-72, 81. Liu Z Q, Zhang X R, Jiao F X, et al. The relationship between soil crust and infiltration under simulated continuous and intermittent precipitation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 64-72, 81.
- [11] 李雨晨,平原,澹腾辉,等.红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响[J].*水土保持学报*, 2023, 37(5): 71-77. Li Y C, Ping Y, Tan T H, et al. Effects of biocrust with different coverage on water infiltration in red soil hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 71-77.
- [12] 张灯煜,冯梦蝶,徐绮雯,等.紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及影响因素[J].*水土保持学报*, 2024, 38(4): 114-121. Zhang D Y, Feng M D, Xu Q W, et al. Characteristics

- and influencing factors of soil infiltration in different agroforestry types in purple soil area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(4):114-121.
- [13] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].*水土保持学报*, 2023,37(2):67-75.
Ma X Y, Mu X M, Wang S Y, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 67-75.
- [14] 张珉瑞,王立娜,李盼,等.金沙江干热河谷区5种植被土壤入渗性能影响因素评价[J].*水土保持研究*,2024, 31(6):37-45.
Zhang M R, Wang L N, Li P, et al. Influencing factors of soil infiltration performance of five types of vegetation in Dry-Hot Valley Area of Jinsha River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(6):37-45.
- [15] Ren Z P, Zhu L J, Wang B, et al. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016,8(4):546-555.
- [16] Zhang J, Lei T W, Qu L Q, et al. Method to quantitatively partition the temporal preferential flow and matrix infiltration in forest soil [J]. *Geoderma*, 2019, 347: 150-159.
- [17] Dong L B, Li J W, Liu Y L, et al. Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: evidence from the Central Loess Plateau case[J]. *Catena*, 2022,208:105734.
- [18] 曾红,董天富,杨静,等.喀斯特区裸露基岩对土壤水分入渗过程的影响[J].*水土保持学报*,2025,39(2):144-154.
Zeng H, Dong T F, Yang J, et al. Effect of exposed bedrock on soil water infiltration in karst region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 144-154.
- [19] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. *Trans*, 1932,6:17-21.
- [20] Philip J R. The theory of infiltration:3. moisture profiles and relation to experiment [J]. *Soil Science*, 1957, 84(2):163-178.
- [21] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1941,5:399-417.
- [22] 蒋定生,黄国俊.黄土高原土壤入渗速率的研究[J].*土壤学报*,1986,23(4):299-305.
Jiang D S, Huang G J. Study on the filtration rate of soils on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986,23(4):299-305.
- [23] Xu Y G, Luo L, Guo W Z, et al. Vegetation roots-induced changes of loess infiltration: greatly promoting lateral flow[J]. *Catena*, 2025,250:108803.
- [24] 徐远慧,冯璐,屈媛媛,等.黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J].*水土保持学报*, 2022,36(2):57-63.
Xu Y H, Feng L, Qu Y Y, et al. Effects of different restoration years of grain for green on soil properties and infiltration performance in Loess Gully Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 57-63.
- [25] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征[J].*水土保持学报*, 2017,31(3):123-128.
Lv G, Fu X Y, Li Y X, et al. Soil infiltration characteristics under different land utilization types in the Dump Reclamation Area of the Haizhou Open-cast Coal Mine [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3):123-128.
- [26] Huang Y, Xiong T, Zhao M Q, et al. Influence of soil properties and near-surface roots on soil infiltration process in short-rotation *eucalyptus* plantations in southern subtropical China[J]. *Catena*, 2024,234:107606.
- [27] Guan N, Bi H X, Song Y L, et al. Vegetation restoration is affecting the characteristics and patterns of infiltration in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2024,243:108190.
- [28] 王祎萍.不同改良剂对风沙土水分运动的影响[D].重庆:西南大学,2023.
Wang Y P. Effects of different modifiers on water movement in aeolian soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [29] 白芹菲,王艳琪,鲍玉海,等.黑龙滩水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(3):168-176.
Bai Q F, Wang Y Q, Bao Y H, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(3):168-176.
- [30] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].*水土保持学报*,2019, 33(5):105-113.
Zhao F W, Wang N, Su X M, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(5):105-113.