

晋西黄土区长期植被恢复对土壤表层入渗与水分储量差异的影响

刘茜茹^{1,2}, 冯天骄^{1,2}, 王平^{1,2}, 张羽飞^{1,2}, 熊瑛楠^{1,2}, 高琦^{1,2}, 白杨^{1,2}

(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)

摘要: [目的] 探究晋西黄土高原残源沟壑区长期不同植被恢复类型对土壤表层入渗与水分储量差异的影响, 为未来筛选和增强黄土高原地区天然植被恢复以及人工植被恢复的生态效益评估提供科学参考。[方法] 以黄土残源沟壑区典型的 4 种植被恢复类型(油松纯林、刺槐纯林、侧柏纯林、天然林)为研究对象, 测定 4 种植被恢复类型下表层 30 cm 内土壤入渗过程, 同时测定土壤容重、机械组成等土壤理化性质, 并且监测土壤水分动态变化, 核算土壤水分储量并进行差异性、相关性和主成分分析, 最后通过 3 种土壤入渗模型对实测过程进行拟合比较得出其在黄土残源沟壑区植被恢复区域内的适宜性, 对比不同植被恢复类型之间土壤入渗过程及储水量的差异, 补充并完善黄土高原地区不同植被恢复类型下的表层土壤水分入渗规律。[结果] ①天然林相较于人工纯林对 0—30 cm 表层土壤物理性质改善效果更为明显, 天然林表层土壤的水分含量较多且保水性较好, 人工林相较于天然林对研究区土壤入渗能力改善效果更佳; ②在不同植被类型下土壤的稳定入渗速率从大到小表现为: 天然林 > 刺槐纯林 > 油松纯林 > 侧柏纯林 (0—10 cm), 油松纯林 > 刺槐纯林 > 侧柏纯林 > 天然林 (10—20 cm), 油松纯林 > 刺槐纯林 > 侧柏纯林 > 天然林 (20—30 cm); ③Horton 模型对研究区土体入渗拟合效果相较于 Kostiaikov 模型和 Philip 模型表现更优 ($R^2=0.94$) 更适用于描述研究区的土壤入渗规律; ④影响土壤入渗速率的主要物理特征为土壤容重 (BD)、土壤有机质 (SOC)、土壤储水量 (SWS)、土壤黏粒含量。[结论] 不同长期植被恢复类型下的土壤入渗性质具有显著性差异, 长期天然林相较于长期人工林其植被恢复效益更大, 更能有效改善黄土高原的土壤质量, 提升土壤保水性能。

关键词: 植被恢复; 土壤入渗; 土壤理化性质; 入渗模型; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0050-10

中图分类号: S152, F301.2

文献参数: 刘茜茹, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期植被恢复对土壤表层入渗与水分储量差异的影响 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 50-59. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.007; Liu Xiru, Feng Tianjiao, Wang Ping, et al. Effect of long-term vegetation restoration on surface soil water infiltration and and water storage in loess area of Western Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 50-59.

Effect of Long-term Vegetation Restoration on Surface Soil Water Infiltration and and Water Storage in Loess Area of Western Province

Liu Xiru^{1,2}, Feng Tianjiao^{1,2}, Wang Ping^{1,2},

Zhang Yufei^{1,2}, Xiong Yingnan^{1,2}, Gao Qi^{1,2}, Bai Yang^{1,2}

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

2.Jixian Forest Ecosystem National Field Observation and Research Station, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: [Objective] The effects of different long-term vegetation restoration types on differences of soil surface infiltration and water storage in the loess gully region of Western Shanxi Province were studied in

收稿日期: 2022-07-27

修回日期: 2022-09-15

资助项目: 中央高校基本科研业务费“黄土高原长期人工林恢复对生态系统土壤持水功能的影响”(BLX202005); 国家自然科学基金项目 (41901021, 52179056)

第一作者: 刘茜茹 (1999—), 女 (汉族), 河南省驻马店市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文学。Email: liuxiru990428@163.com。

通讯作者: 冯天骄 (1991—), 男 (蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 讲师, 主要从事生态水文研究。Email: fengtianjiao1991@bjfu.edu.cn。

order to screen and enhance the ecological benefits of natural vegetation restoration as well as artificial vegetation restoration in Loess Plateau in the future, thereby providing a scientific reference for an in-depth understanding of the ecological benefits of vegetation restoration. [Methods] We measured infiltration in the top 30 cm of soil under four types of restored vegetation (*Pinus tabulaeformis* pure forest, *Robinia pseudoacacia* pure forest, *Platycladus orientalis* pure forest, natural forest). We also measured soil physical and chemical properties such as soil bulk density and mechanical composition, and monitored soil moisture dynamics in the four types of restored vegetation in the loess hilly-gully region. We calculated soil water storage and analyzed differences due to vegetation type, and conducted correlation analysis and principal component analysis. Three soil infiltration models were then fitted to the measured processes in order to compare their suitability for use in vegetation restoration areas of the loess hilly-gully region. Differences in soil infiltration and water storage between different vegetation restoration types were also determined. We also evaluated the ability of the models to supplement and improve the surface soil water infiltration pattern under different vegetation restoration types in the Loess Plateau region. [Results] ① Natural forest was more effective in improving the physical properties of the 0—30 cm surface soil compared with pure planted forests. Natural forest had greater water content and better water retention, and planted forests were more effective in improving the infiltration capacity of the soil in the study area compared with natural forest. ② The stable infiltration rate of soil under different vegetation types from largest to smallest followed the order of natural forest > *Robinia pseudoacacia* pure forest > *Pinus tabulaeformis* pure forest > *Platycladus orientalis* pure forest (for the 0—10 cm layer); *Pinus tabulaeformis* pure forest > *Robinia pseudoacacia* pure forest > *Platycladus orientalis* pure forest > natural forest (for the 10—20 cm layer); *Pinus tabulaeformis* pure forest > *Robinia pseudoacacia* pure forest > *Platycladus orientalis* pure forest > natural forest (for the 20—30 cm layer); ③ The Horton model performed better than the Kostiakov and Philip models in fitting soil infiltration in the study area ($R^2=0.94$), and will be helpful in better understanding the soil infiltration pattern in the study area. ④ The main physical characteristics affecting soil infiltration rate were soil bulk density, soil organic carbon, soil water storage capacity and soil clay particle content. [Conclusion] There were significant differences in soil infiltration properties due to different long-term vegetation restoration types. Compared with long-term replanted forests, the long-term natural forest had greater vegetation restoration benefits, and could effectively improve soil quality and enhance soil water retention capacity for the Loess Plateau.

Keywords: vegetation restoration; soil water infiltration; soil physical and chemical properties; infiltration model; Loess Plateau

黄土高原地区植被退化严重,导致水分亏缺、水土流失和环境问题严重^[1],当地政府为预防水土流失和改善生态环境,不断通过植被恢复进行生态修复^[2]。黄土高原长期植被恢复过程中,不同土地利用方式会影响土壤水分含量及其运移情况^[3],因此充分了解各种长期植被类型下的土壤水分变化规律有助于黄土高原土地资源高效利用^[4]。植被恢复对地表水文过程有着重要影响,如降雨再分配,其中在众多地表水文过程中,土壤水分入渗是黄土高原地区降雨水分补给的重要物理过程^[5],特别是土壤表层入渗特性,直接关系到降雨条件下水分补给转化为土壤水分的效率,以及水分运移的流通性和水分储量的大小。前人已对其黄土高原复杂多样的土壤入渗特征以及退耕还林后土壤类型进行了一系列研究。例如,焦峰等^[6]研究了黄土高原过去 20 a 间植被覆盖度的

变化规律,得出植被能有效地改善土壤结构,使当地生态环境得到明显改善;王红梅等^[7]研究了黄土高原退耕还林过程中坡地土壤水分动态特征及影响因素,得出植被可以影响土壤水分运移情况,提高土壤入渗性能;王志强等^[8]研究了退耕还林政策下黄土丘陵半干旱区土壤水分恢复变化规律,得出了在人工林地内土壤容重、水分以及有机质含量与裸地相比有显著提高;彭舜磊等^[9]探讨了短期植被恢复下土壤理化性质与土壤入渗性质之间的关系,得出林地相较于农田、灌木草地土壤理化性质及其土壤入渗特征有明显改善作用。然而值得注意的是,绝大多数研究都只是针对退耕还林以及短期植被恢复内土壤水分渗透特性,而对长期不同植被恢复类型下不同土层深度的水分入渗规律的研究尚不深入,无法系统地阐明在长期天然植被恢复类型和人工植被恢复类型下土壤物理性

质对土壤水分入渗规律的影响,开展长期典型植被恢复的土壤水分入渗特征及其影响因素的研究,可进一步了解黄土高原地区土壤入渗特征,掌握黄土高原土壤水分的垂向运动动态,有助于加深对黄土高原水土流失发生机理的认识。

土壤入渗规律的常用研究方法有测定土壤入渗过程^[10]以及土壤入渗方程拟合效果评价等^[11]。常用的土壤入渗方程主要有 Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型。其中 Kostiakov 模型适用于土壤入渗率较高的情况^[12]; Philip 模型适用于均质土壤垂直入渗过程,但如果土壤前期含水量不同,该模型对其入渗曲线的变化适应性较差^[13]; Horton 模型因操作简单目前得到广泛应用,但在土壤入渗速率变化较大时适应性较差^[14]。因此目前土壤入渗过程的模拟缺乏统一且普适的方程,需要针对不同土壤类型、植被恢复类型、水分条件等进行进一步研究,从而选用多种模型进行拟合选出拟合结果最优的入渗模型。基于此,为了研究长期植被恢复和退耕还林后不同植被恢复模式下的土壤水分入渗规律和土壤性质差异,本文以对晋西地区黄土高原蔡家川流域 4 种常见不同的植被恢复类型下的原状土壤作为研究对象,采用常水头入渗方法探究不同植被恢复类型下土壤的入渗性能及其影响因素,探讨不同土壤渗透模型的适宜性,以加深对晋西黄土高原残塬沟壑区土壤入渗特征的理解,并提升该区域脆弱的生态环境,为以后植被恢复结构优化提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域,该地区处于黄土高原东南部半湿润地区,属于黄土高原残塬沟壑区。海拔 900~1 590 m,地理坐标为 36°14'27"—36°18'23"N,110°39'45"—110°47'45"E。多年平均年降水量 579 mm,年蒸发量 1 729 mm,年平均气温 9.9℃。土壤主要为褐土,按其碳酸钙的淋溶程度可分为 3 类,农田和部分侵蚀沟为丘陵褐土,呈微碱性反应(pH=7.9)。研究区有丰富的植被资源,目前用于植被恢复的树种主要有:油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 林地取样 在研究流域内选取具有代表性且坡度、坡向、海拔等基本相同的刺槐纯林、油松纯林、侧柏纯林、天然林样地作为研究对象。详细样地土壤基本情况详见表 1。在选取的 4 个不同植被恢复类型样地的 0—30 cm 土壤剖面上,于生长季中后期在 0、15 和 30 cm 深度采集原状土样,具体方法为每个样地随机选取三处作为取样点,在每个土层尽量相同地理条件下,各土层分别取 3 个样品作为重复,以确保取样和试验结果的科学合理。取样完成后立刻加盖密封,防止水分蒸发。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of the study sample site

项目	样地类型			
	油松纯林	刺槐纯林	侧柏纯林	天然林
研究样地面积/hm ²	21	35	30	26
海拔高度/m	1148	1135	1210	1081
坡度	26°	24°	25°	23°
坡向	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡
植被株高/m	6.87±0.34	8.45±0.82	4.87±0.87	9.11±0.85
植被胸径/cm	13.69±0.67	8.77±0.81	4.88±0.23	9.9±0.78
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.37±0.05	1.33±0.08	1.30±0.07	1.16±0.06
林下植被覆盖率/%	34	38	25	41
主要植被恢复类型	油松	刺槐	侧柏	辽东栎
黏粒/%	20.75±4.03	21.96±3.70	20.32±3.76	17.38±3.89
粉粒/%	69.53±3.26	67.79±2.95	68.92±2.84	71.84±2.96
砂粒/%	9.72±1.37	10.25±0.88	9.84±0.98	10.77±1.19

注:数据为平均值±标准差。下同。

1.2.2 数据收集 将野外取回的原状土样,利用烘干法测定土样的容重;使用 Mastersizer 2000 激光颗粒仪测定土壤机械组成;通过重铬酸钾氧化—油浴加热法测定土样中有机质含量;与 2021 年 12 月 1—15 日

使用常水头渗透装置来测定土壤的入渗速率。

1.2.3 土壤入渗过程的模型拟合

(1) Kostiakov 模型。

$$f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为土壤入渗速率(cm/s); t 为入渗时间(min); a, b 为模型参数。

(2) Philip 模型。

$$f(t) = 0.5S_i^{-1/2} + f_c \quad (2)$$

式中: S_i 为模型参数,表示土壤入渗能力的强弱; f_c 为稳渗率(cm/s)。

(3) Horton 模型。

$$f(t) = f_c + (F_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: F_0 为初渗率(cm/s); k 为衰减指数,值越大表示土壤入渗衰减地越快。利用 Excel 2010 对数据计算结果进行整理,通过单因素方差分析(ANOVA)对比不同林地土壤入渗特征及理化性质的差异,再选取 Kostikov 模型、Philip 模型、Horton 模型对 4 种不同林地的土壤入渗过程进行拟合^[15-16]。

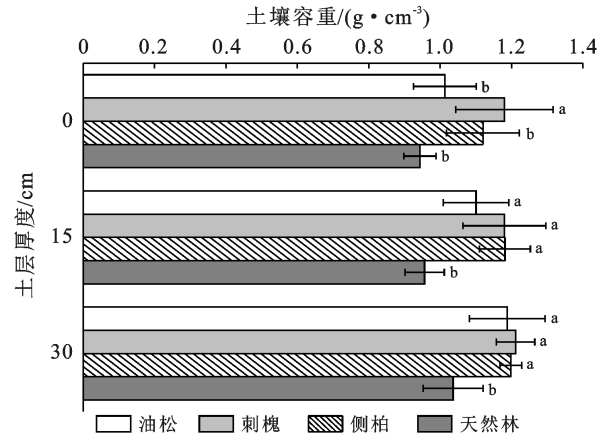
1.2.4 统计分析方法 采用描述性统计和方差分析等方法对数据进行处理,相关数据采用平均值±标准差(Mean±SD)来表示,同一因素不同水平间差异显著性采用最小显著差数法(LSD)进行检验,显著性水平 $p \leq 0.05$ 。通过 PCA 主成分分析得出土壤入渗系数与土壤理化性质之间的关系。统计分析和图表绘制分别用 SPSS Statistics 20 和 Origin Pro 9.0,以及 R 1.4.116 0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式下土壤理化性质的变化规律

土壤容重和机械组成不仅是反映土壤质量以及生产力水平的重要参数指标,而且还能间接反映土壤渗透特性和持水能力等性质。从图 1 可以看出,不同植被恢复类型下 0—30 cm 表层土壤容重平均值从大到小排序为:刺槐纯林>侧柏纯林>油松纯林>天然

林。随着深度的增加,不同植被恢复类型下土壤容重差异减小,但天然植被恢复下的土壤容重要显著低于其他 3 种人工植被恢复类型(图 1)。



注:不同小写字母表示不同植被恢复类型差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同植被恢复类型条件下各土层土壤容重比较

Fig.1 Comparison of soil bulk density in different soil layers under different vegetation restoration types

研究区土壤粒径组成复杂,由图 2 可知,4 种不同植被恢复类型下土壤粒径分布范围较宽,土壤砂粒体积分数百分比为 75.36%~78.57%,粉粒体积分数百分比为 10.18%~14.03%,黏粒体积分数百分比为 7.40%~13.15%。由此可知,不同植被恢复类型对土壤质地有显著影响。4 种植物恢复类型下 0—30 cm 深度的土壤砂粒体积分数百分比差值较小(0.2%~6.7%),且均以砂粒为主(75.68%~81.42%)。根据美国制土壤质地分类标准^[17],研究区 4 种不同植被恢复类型下的 0—30 cm 土壤质地均属于壤砂土。粉粒体积分数百分比随着土层厚度的增大而增大,黏粒体积分数百分比恰恰相反,且天然林土壤黏粒体积分数百分比要显著低于其他 3 种人工林。

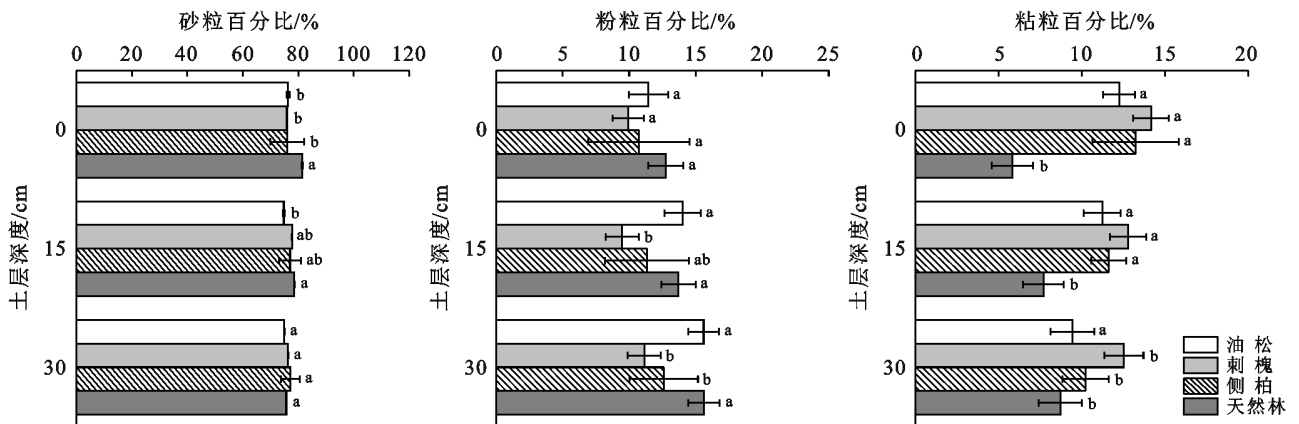


图 2 不同植被恢复类型条件下各土层的土壤机械组成比较

Fig.2 Comparison of soil mechanical composition in different soil layers under different vegetation restoration types

由图 3 可知,0—30 cm 土层土壤有机质含量分别为:天然林(27.61 g/kg) > 侧柏纯林(26.56 g/kg) > 油松纯林(19.86 g/kg) > 刺槐纯林(15.91 g/kg)。天然林、侧柏纯林与刺槐纯林的土壤有机质含量在 0—30 cm 土层深度的垂直分布一致,均表现为随着土层深度的增加而减少,而油松纯林则与之不一致,表现为 0—20 cm 土层的有机质含量随着土层深度增加而减少,20—30 cm 土层有机质含量随着土层深度增加而增加。

2.2 土壤入渗性质差异分析

2.2.1 不同林地类型下各层土壤入渗特征 4 种不同植被恢复类型下的土壤入渗过程变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,其渗透过程存在显著差异,但均呈现快速降低—缓慢降低—基本稳定的变化趋势。其中 0—10 cm 土层深度的天然林在整个入渗过程中的入渗速率都显著大于其他 3 种人工林。由表 2 可知,在 4 种长期植被恢复类型下土壤入渗特征指标变化较大,呈现的规律均为:初始入渗速率 > 平均入渗速率 > 稳定入渗速率。在同一植被恢复类型下的不同土层中,初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率

率均表现为随着土层深度的增加而减少。0—30 cm 土壤处初始入渗速率最大值均出现在天然林,最小值均出现在侧柏纯林。0—30 cm 土壤相同时间内累计的入渗水量为:天然林 > 油松纯林 > 刺槐纯林 > 侧柏纯林(图 5),天然林 0—30 cm 土壤表现为随着土层厚度的增加,土壤单位时间内累积入渗量随之减少。

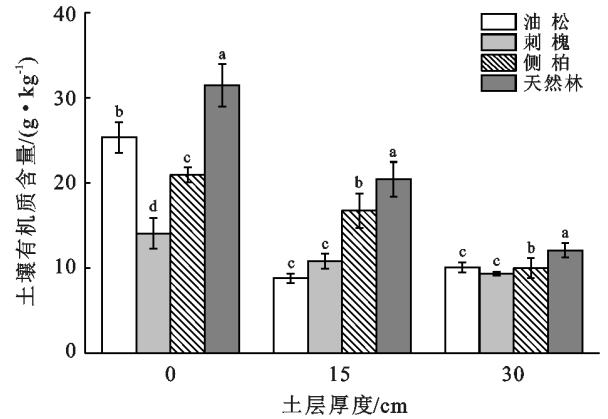


图 3 不同植被恢复类型条件下各土层的土壤有机质含量比较
Fig.3 Comparison of soil organic matter content in different soil layers under different vegetation restoration types

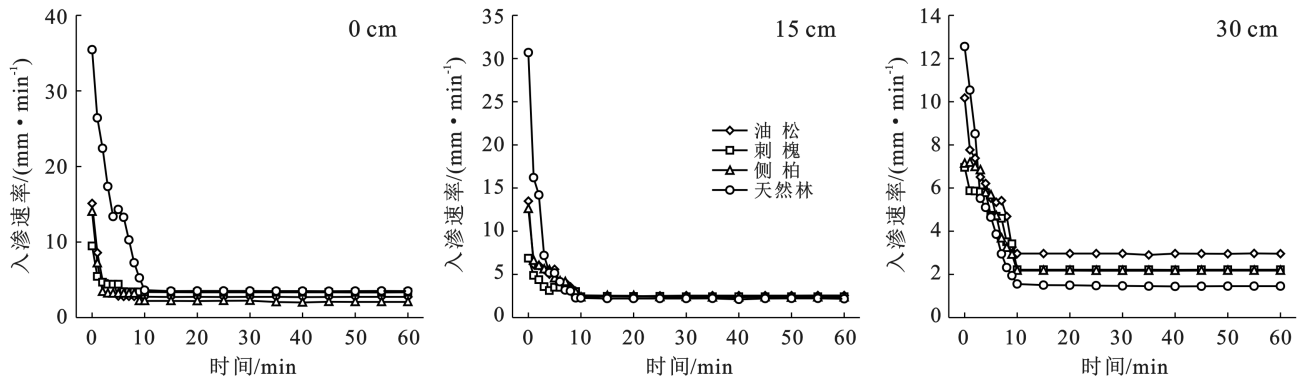


图 4 不同植被恢复类型下各层土壤入渗过程比较

Fig.4 Comparison of soil infiltration processes in different layers under different vegetation restoration types

表 2 不同植被恢复类型下土壤入渗特征指标

Table 2 Soil infiltration characteristics under different vegetation restoration types

植被类型	土层深度/cm	初始入渗速率/(mm·min ⁻¹)	稳定入渗速率/(mm·min ⁻¹)	平均入渗速率/(mm·min ⁻¹)
油松纯林	0—10	15.109±4.054	2.751±0.140	3.914±2.851
	10—20	13.479±2.80	2.567±0.850	4.026±2.481
	20—30	10.172±1.800	2.976±0.996	4.516±2.053
刺槐纯林	0—10	9.476±1.825	3.38±0.127	3.966±1.367
	10—20	6.879±1.134	2.418±0.422	3.141±1.087
	20—30	6.957±1.073	2.217±0.974	3.602±1.630
侧柏纯林	0—10	14.022±3.466	2.205±0.426	3.309±2.642
	10—20	12.594±2.591	2.355±0.759	3.897±2.388
	20—30	7.139±1.589	2.179±1.036	3.717±1.954
天然林	0—10	35.454±8.351	3.659±2.892	9.721±8.880
	10—20	30.683±8.478	2.265±0.844	5.506±6.797
	20—30	12.555±3.408	1.555±0.953	3.533±3.191

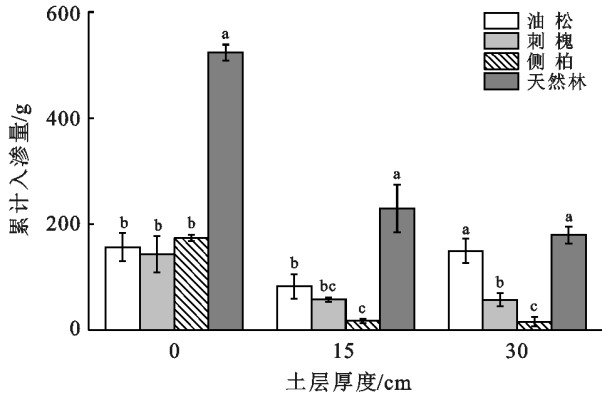


图 5 不同植被恢复类型下各层土壤 1 h 之内累积入渗量
Fig.5 Accumulated infiltration of soil layers within one hour under different vegetation restoration types

2.2.2 不同植被恢复类型下各层土壤入渗过程拟合

将 4 种不同植被恢复类型下不同土层的土壤入渗速率(y)随时间(t)的变化过程采用 Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型进行拟合,拟合之后得到了各项参数结果以及决定系数 R^2 (表 3)。不同入渗方程对不同植被恢复类下土壤的拟合结果也不同,从表 3 可知,3 种模型拟合状况良好,都能较准确地描述土壤入渗速率和时间的关系。

不同入渗方程对不同植被恢复类型土壤的拟合结果有所不同,Kostiakov 模型中, a 表示初始单位时间内的累计入渗量,即初渗速率,从拟合结果中得出在不同植被恢复类型下相同土层深度 a 值从大到小:排列为侧柏纯林>刺槐纯林>油松纯林>天然林,该结果与实测值结果规律一致。 b 表示入渗速率随着入渗时间的增大而减小的程度, b 值越大,入渗速率减小的程度也就越大, b 值在侧柏纯林林地最大,天然林林地最小,表明随着入渗时间的增大,侧柏纯林入渗速率减小的程度最大,反之,天然林最小。Horton 模型中, F_0 为初渗速率, f_c 为稳渗速率,不同植被恢复类型下表层土壤 F_0 从大到小排列顺序为:侧柏纯林>刺槐纯林>油松纯林>天然林,与实测初渗速率(侧柏纯林>油松纯林>刺槐纯林>天然林)不符。但 f_c 值的大小顺序与实测值一致,表现为:侧柏纯林>刺槐纯林>油松纯林>天然林。Philip 模型中, S 为土壤持水率, S 值越大,土壤入渗能力越强,由表 2 可知相同土层深度下 4 种植被恢复类型土壤入渗能力从大到小排序为:侧柏纯林>刺槐纯林>油松纯林>天然林。 R^2 为决定系数,可以用来表示不同模型对于土壤入渗过程的拟合情况。 R^2 值越大,则表示模型拟合效果越好。3 种入渗模型决定系数 R^2 均在 0.9 以上,则说明拟合效果较好,可以一定

程度上反映研究区域土壤的入渗情况。在表层土壤与次表层土壤中,4 种不同林地类型土壤入渗过程 Horton 模型的 R^2 平均值均为 0.96,表明 Horton 模型更适用于模拟和预测黄土高原植被恢复下的土壤入渗过程。

2.3 不同植被恢复模式下土壤水分储量差异

由图 6 可知,该研究区域内 3 a 内 0—30 cm 土层的土壤储水量为:天然林 71.040 2~99.641 4 mm,刺槐纯林 64.264 5~79.792 3 mm,油松纯林 59.233 ~80.599 mm、侧柏纯林 71.546~97.238 mm,其中中位值大小排序依次为:天然林(81.46 mm)>油松纯林(80.73 mm)>侧柏纯林(70.42 mm)>刺槐纯林(67.45 mm)。其中,土壤储水量的最小值出现在油松纯林的 20—30 cm 土层,只有 62.54 mm;而其最大值出现在天然林样地的 10—20 cm 土层,达到了 99.64 mm。天然林的土壤储水量都显著高于侧柏纯林和刺槐纯林。侧柏纯林的 0—30 cm 土壤储水量相较于其他 3 种植被恢复类型的变化更小。

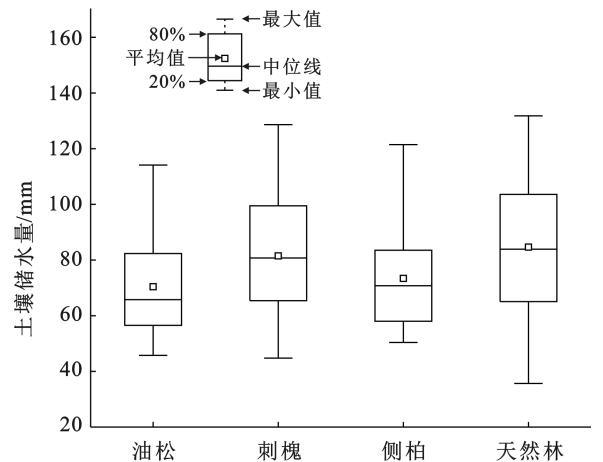


图 6 不同植被恢复类型条件下各土层的土壤储水量比较
Fig.6 Comparison of soil water storage in different soil layers under different vegetation restoration types

2.4 土壤理化性质与土壤入渗过程及其水分含量之间的关系

由图 7 可知,研究区域内土壤渗透系数和土壤容重与黏粒含量之间具有显著的正相关性,土壤入渗达到峰值的时间与土壤有机质含量和砂粒含量之间具有显著的正相关性,土壤储水量与粉粒含量的多少存在显著关系。天然林区域内土壤性质与其他 3 种人工林相似度较低,侧柏纯林和刺槐纯林两个区域内土壤性质具有较高的相似度。在 4 种不同植被恢复类型下 0—10,10—20 cm 和 20—30 cm 这 3 个土层的样本间有一定程度的聚类。其中,0—10 cm 土层与

其他两个土层的样本之间存在明显分离;10—20 cm 和 20—30 cm 的土层样本点重叠范围较大,具有较高的相似度。土壤储水量(SWS)随着土壤容重(BD)的

增加而增加。随着土层的不断加深,土壤储水量(SWS)、土壤容重和渗透系数呈现先增大后减小的趋势。

表 3 不同植被恢复类型下各层土壤入渗方程模拟结果

Table.3 Simulation result of soil infiltration equation in different vegetation restoration types

植被类型	土层深度	Kostiakov 模型参数					
		a	b	R^2	RMSE	SSE	
刺槐	0	1.38×10^{-2}	0.17	0.78	5.92×10^{-4}	3.51×10^{-6}	
	15	6.67×10^{-4}	1.47×10^{-1}	0.92	1.32×10^{-5}	3.15×10^{-9}	
	30	7.31×10^{-4}	6.28×10^{-2}	0.85	1.19×10^{-5}	2.26×10^{-9}	
侧柏	0	2.21×10^{-2}	0.28	0.99	1.88×10^{-4}	4.24×10^{-7}	
	15	2.20×10^{-4}	2.21×10^{-2}	0.05	1.06×10^{-5}	1.68×10^{-9}	
	30	2.37×10^{-3}	0.74	0.93	1.76×10^{-6}	6.19×10^{-11}	
油松	0	2.12×10^{-3}	6.87×10^{-2}	0.47	9.47×10^{-5}	1.70×10^{-7}	
	15	2.04×10^{-3}	0.21	0.99	1.12×10^{-5}	1.90×10^{-9}	
	30	2.14×10^{-3}	8.56×10^{-2}	0.90	3.39×10^{-5}	2.19×10^{-8}	
天然林	0	8.01×10^{-4}	0.12	0.89	1.07×10^{-5}	1.50×10^{-9}	
	15	1.02×10^{-3}	0.32	0.98	7.80×10^{-6}	1.03×10^{-9}	
	30	3.68×10^{-3}	0.23	0.92	1.01×10^{-4}	1.55×10^{-7}	
植被类型	土层深度	Philip 模型参数					
		S	f_c	R^2	RMSE	SSE	
刺槐	0	2.56×10^{-2}	5.22×10^{-3}	0.71	6.76×10^{-4}	4.57×10^{-6}	
	15	1.40×10^{-3}	2.71×10^{-4}	0.90	1.47×10^{-5}	3.89×10^{-9}	
	30	9.12×10^{-4}	5.02×10^{-4}	0.88	1.08×10^{-5}	1.87×10^{-9}	
侧柏	0	4.49×10^{-2}	4.43×10^{-3}	0.97	3.37×10^{-4}	1.37×10^{-6}	
	15	1.93×10^{-4}	1.92×10^{-4}	0.09	1.03×10^{-5}	1.60×10^{-9}	
	30	1.85×10^{-3}	-1.85×10^{-5}	0.92	1.84×10^{-6}	6.80×10^{-11}	
油松	0	2.77×10^{-3}	1.41×10^{-3}	0.36	1.03×10^{-4}	2.04×10^{-7}	
	15	5.23×10^{-3}	5.10×10^{-4}	0.98	1.47×10^{-5}	3.25×10^{-9}	
	30	3.27×10^{-3}	1.28×10^{-3}	0.85	4.25×10^{-5}	3.44×10^{-8}	
天然林	0	1.81×10^{-3}	3.78×10^{-4}	0.90	1.00×10^{-5}	1.32×10^{-9}	
	15	2.73×10^{-3}	9.50×10^{-5}	0.97	8.34×10^{-6}	1.18×10^{-9}	
	30	8.14×10^{-3}	8.78×10^{-4}	0.88	1.27×10^{-4}	2.42×10^{-7}	
植被类型	土层深度	Horton 模型参数					
		f_c	F_0	K	R^2	RMSE	SSE
刺槐	0	1.07×10^{-2}	9.21×10^{-3}	-1.43×10^{-2}	0.96	2.47×10^{-4}	6.10×10^{-7}
	15	2.75×10^{-4}	4.70×10^{-4}	1.15×10^{-2}	0.91	1.37×10^{-5}	3.35×10^{-9}
	30	5.46×10^{-4}	6.85×10^{-4}	4.15×10^{-2}	0.86	1.14×10^{-5}	2.09×10^{-9}
侧柏	0	6.68×10^{-3}	1.57×10^{-2}	5.14×10^{-2}	0.99	2.13×10^{-4}	5.48×10^{-7}
	15	2.00×10^{-4}	3.50×10^{-4}	8.00×10^{-2}	0.25	9.41×10^{-6}	1.33×10^{-9}
	30	2.96×10^{-5}	2.30×10^{-4}	1.24×10^{-2}	0.95	1.52×10^{-6}	4.59×10^{-11}
油松	0	1.72×10^{-3}	1.70×10^{-3}	-1.83×10^{-2}	0.89	4.35×10^{-5}	3.60×10^{-8}
	15	0.70×10^{-3}	1.29×10^{-3}	2.19×10^{-2}	0.98	1.55×10^{-5}	3.58×10^{-9}
	30	0.88×10^{-3}	1.72×10^{-3}	4.01×10^{-3}	0.94	2.59×10^{-5}	1.28×10^{-8}
天然林	0	4.51×10^{-4}	6.47×10^{-4}	2.49×10^{-2}	0.91	9.72×10^{-6}	1.23×10^{-9}
	15	1.90×10^{-4}	4.80×10^{-4}	2.01×10^{-2}	0.98	7.33×10^{-6}	9.14×10^{-10}
	30	5.74×10^{-4}	2.24×10^{-3}	1.03×10^{-2}	0.97	6.07×10^{-5}	5.53×10^{-8}

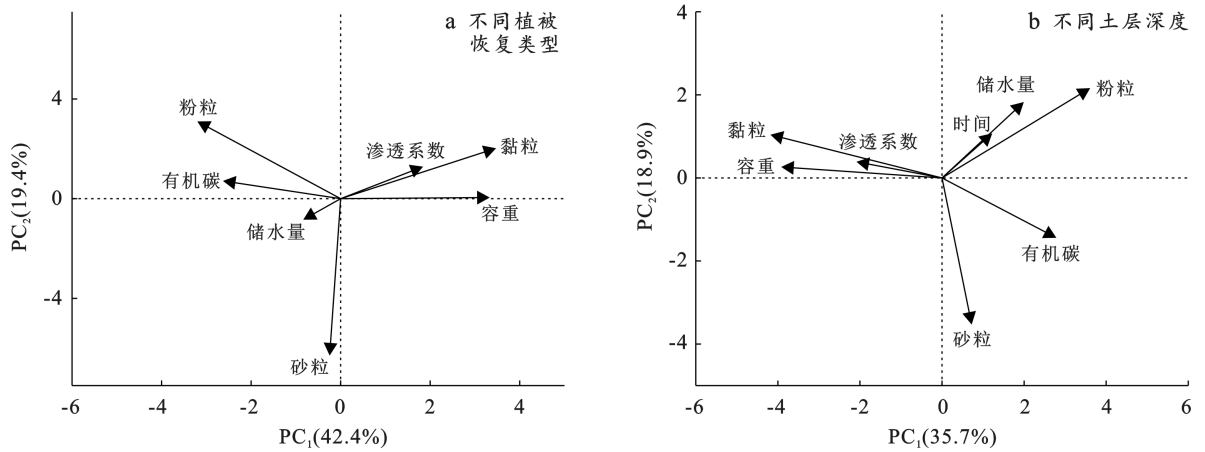


图 7 不同植被恢复类型(a)和土层深度(b)下土壤入渗系数与土壤性质之间的主成分分析

Fig.7 Principal component analysis of soil infiltration coefficient and soil properties under different vegetation restoration types (a) and soil depths (b)

3 讨论

为探究晋西黄土残垣沟壑区长期植被恢复下土壤入渗与水分储量差异的影响,对山西吉县蔡家川流域 4 种常见植被恢复类型土壤物理性质研究结果表明,天然林的土壤容重、有机质含量、储水量等与土壤持水性有关的物理性质均高于其他 3 种人工植被恢复纯林,说明在晋西黄土区长期天然植被恢复对于土壤物理性质的改善效果要优于人工植被恢复,这与谭学进^[18]对近 40 a 来延河流域植被恢复对土壤容重以及机械组成等土壤理化性质的影响进行的研究结果相似。在 0—30 cm 土层中,随着土层深度的增加,天然林黏粒含量显著低于其他 3 种人工林地,其主要原因因为不同植被类型可以通过影响降雨、蒸发等条件直接或者间接影响土体的风化程度或机械组成,风化程度越高则黏粒含量越高^[19]。

研究表层土壤入渗规律对于理解植被恢复条件下的水分运移至关重要。对于表层土壤入渗曲线及其入渗特征分析表明,晋西黄土地区土壤入渗过程表现为入渗速率先迅速降低,后缓慢减小,最终平稳,并且所有植被恢复类型入渗速率变化过程均表现为:初始入渗>平均入渗>稳定入渗,符合入渗过程中的一般规律^[19],主要原因是土壤入渗过程分为渗润阶段、渗吸阶段和渗透阶段^[20]。在渗润阶段中,土壤表层含水量较低,水分从接触到土壤表层向下渗透的过程中,被土壤颗粒迅速吸附,因此土壤渗透速率较大;在渗吸阶段中,在重力还有毛细管力的作用下,水分开始逐渐填满土壤孔隙,因此土壤渗透速率有所减慢;在渗透阶段,随着土壤孔隙被逐渐填满,毛细管力逐渐消失土壤逐渐饱和,水分只受重力作用形成饱和

水,因此土壤渗透速率逐渐稳定在一定范围内。在本研究选取的 3 种土壤入渗模型中,Kostiakov 模型适用于土壤入渗率较高的情况,Philip 模型适用于均质土壤垂直入渗过程,Horton 模型适用于非饱和土壤垂直一维入渗,目前在晋西黄土地区应用范围较广,前人在晋西黄土其他区域得到的结论与本研究相同^[21]。

本研究针对 4 种不同植被恢复类型下的土壤水分差异进行了比较,结果发现在 0—30 cm 的土层中,天然植被恢复林中的土壤储水量显著高于人工植被恢复纯林土壤储水量。这与赵文智等^[22]研究结果一致,主要是因为 7—8 月为该地区的雨季,随着降雨量增加使得土壤水分开始得到累积,这是由于天然林能更好的利用降雨来补充土壤水分,因此土壤储水量的变化也与降雨量的变化直接相关。此外李民义等^[23]在研究中发现,相较于其他土地覆盖方式,林下植被物种丰富度越高,该地保留的土壤水分也就越高,更全面解释了本研究结果。在 0—30 cm 土层中,侧柏纯林的土壤水分动态变化幅度不明显,结合样地的实地调查,可能是由于侧柏纯林的林下物种丰富度较低,但地表枯落物较厚,可以遮蔽地表阳光,减少土壤表层水分的蒸发^[24],然而地表枯落物对于表层土壤水分的影响还需要进一步探究。此外,本研究为未来筛选黄土高原地区不同类型植被恢复提高生态效益提供了科学参考,但受取样时间与批次的限制,目前得到的趋势性结论为下一步定量化的规律分析提供基础,通过长时间尺度、多批次水分入渗规律探索是未来研究的细化方向。

在对不同植被恢复类型下土壤入渗能力综合比较的结果显示,在 0—30 cm 表层土壤中,人工林的入

渗性能要大于天然林,这是因为人工林的林下植被物种丰富度较低,土质较为疏松,而且刺槐纯林中的地表植被大多为草本,并且覆盖度也较低,油松纯林中的地表又因松类植物的毒害作用导致其几乎没有植被生长^[25]。在祁连山中的研究表明,灌木林地的土壤入渗大于乔木林。本研究中通过比较不同林分土壤入渗达到峰值的时间发现(图 5),在 0—30 cm 土层中,侧柏的峰值时间显著早于其他林地的现象,这可能是与黏粒含量较高,植被根系较少导致土壤孔隙度较低有关^[19],同时也与研究结果中 0—10 cm 土壤入渗规律显示天然林在整个入渗过程中的入渗速率都非常低的现象不谋而合。土壤入渗速率低则表明该区域内土壤表层更容易产生径流,而植被根系多集中在表层,这样就可以让植被根系尽可能多地汲取水分,从而在有益于植被生长的同时也达到了减少地表径流的效果,使得土壤性质得到提高,从而实现良性循环。

在不同植被类型与土层深度下土壤入渗系数和土壤物理性质之间主成分分析结果表明,土壤渗透系数与土壤性质之间存在显著的联系,土壤入渗系数与土壤容重(BD)、土壤储水量(SWS)、土壤黏粒含量的相关性较强,并呈现显著的正相关关系,这说明土壤水分入渗的本质特征则是水分在土壤孔隙通道内不断流动渗透的过程^[26],当水分接触土壤表层时,水分会先通过非毛管孔隙进入土壤,与此同时,受到土壤容重质地等影响,土壤容重越高,质地越细,土壤入渗能力也就越弱,这是由于土壤非毛管孔隙通道的减少,使得土壤入渗能力减弱。土壤有机质含量与砂粒含量具有较高的正相关性,则主要是因为砂粒含量越高其土壤孔隙度越高,留给植被根系以及地下动植物的生存空间也越高,进而使得土壤有机质含量的增高。

4 结论

(1) 晋西黄土高原区不同植被恢复类型的土壤理化性质存在显著性差异($p < 0.05$)。在 0—30 cm 的土层深度中,植被恢复类型对土壤物理性质和土壤入渗性质具有一定影响,从容重、质地等土壤物理性质变化规律来看,天然林相较于人工纯林对土壤物理性质改善效果更为明显。

(2) 不同植被恢复类型条件下各土层的土壤储水量大小排序依次为:天然林>油松纯林>侧柏纯林>刺槐纯林。对于预测未来 4 种不同植被恢复类型下各土层的土壤含水量的变化,侧柏纯林相较于其他 3 种不同林分的土壤储水量变化预测更加可靠。

(3) 晋西黄土高原地区不同林分中不同土层深度的土壤入渗过程变化规律一致,即快速入渗、缓慢入渗和稳定入渗这 3 个阶段。在不同植被类型下土壤的稳定入渗速率从大到小表现为:天然林>刺槐纯林>油松纯林>侧柏纯林(0—10 cm)、油松纯林>刺槐纯林>侧柏纯林>天然林(10—20 cm)、油松纯林>刺槐纯林>侧柏纯林>天然林(20—30 cm)土壤入渗特征指标以及前一个小时的累计入渗量在不同林分类型下不同土层深度中差异显著($p < 0.05$),这就说明,不同植被恢复类型下的不同土层深度的土壤入渗性质有明显差异。

(4) 使用 Kostikov 模型、Philip 模型、Horton 模型对黄土高原森林植被恢复区域土壤入渗过程拟合,发现 Horton 模型更适用于描述黄土高原植被恢复下的土壤入渗过程。

(5) 侧柏纯林和刺槐纯林内的土壤渗透系数和土壤容重(BD)与黏粒含量之间具有显著的相关性,油松纯林内的土壤有机质含量与砂粒含量具有较高的相关性,而侧柏和刺槐分布区的样本有较好的相似性。表层(0—10 cm)土壤与次表层(10—30 cm)土壤之间存在明显差异。次表层土壤(10—20 cm, 20—30 cm)具有较高的相似度。

因此,不同植被恢复类型下的土壤入渗性质具有显著性差异,天然林的植被恢复效益相较于人工林的植被恢复效益更大,通过长期天然林植被恢复能够更有效地改善黄土高原的土壤质量,提升区域植被恢复后的土壤保水性能。以及关于在不同植被恢复类型下不同土层深度优先流对于土壤入渗差异的影响,还需要运用其他技术与方法进行进一步探究。

[参 考 文 献]

- [1] 张金屯.黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题[J].水土保持学报,2004,18(5):120-124.
- [2] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2011,16(5):433-438.
- [3] 王莉,张强,牛西午,等.黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].中国生态农业学报,2007,60(4):53-56.
- [4] 聂发辉,李田,姚海峰.上海市城市绿地土壤特性及对雨洪削减效应的影响[J].环境污染与防治,2008,30(2):49-52.
- [5] 王承书,高峰,孙文义,等.黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J].生态学报,2021,41(8):3111-3122.
- [6] 焦峰,温仲明,李锐.黄土高原退耕还林(草)环境效应分析[J].水土保持研究,2005,12(1):26-29.
- [7] 王红梅,谢应忠,陈来祥.黄土高原坡地土壤水分动态特

- 征及影响因素[J].宁夏农学院学报,2004,25(4):62-66.
- [8] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J].农业工程学报,2007,122(11):77-83.
- [9] 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.
- [10] Wilk S A, Eló P, Paulo T S, et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration [J]. Soil & Tillage Research, 2018,175(2):84-89.
- [11] Maria I Y, Israel C S, Humberto G R, et al. Effects of land use change and seasonal variation in the hydro-physical properties in Vertisols in Northeastern Mexico [J]. Soil Use and Management, 2019,35(3):143-145.
- [12] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [13] 傅渝亮,费良军,聂卫波,等.基于 Green-Ampt 和 Philip 模型的波涌灌间歇入渗模型研究[J].农业机械学报,2016,47(9):194-201.
- [14] Abdulkadir A, Wuddivira M N, Abdu N, et al. Use of Horton infiltration model in estimating infiltration characteristics of an Alfisol in the Northern Guinea Savanna of Nigeria [J]. Journal of Agricultural Science and Technology A, 2011,1(10):47-64.
- [15] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [16] 宋爱云,董林水,刘世荣,等.不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素[J].水土保持研究,2018,25(3):41-45.
- [17] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [18] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [19] 党宏忠,周泽福,赵雨森,等.祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J].林业科学研究,2006,19(1):39-44.
- [20] 何艺玲,傅懋毅.人工林林下植被的研究现状[J].林业科学研究,2002,15(6):727-733.
- [21] 焦若禹,宋孝玉,赵新凯,等.黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J].干旱区地理,2022,45(1):208-218.
- [22] 赵文智,刘鸽.干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):243-249.
- [23] 李民义,张建军,王春香,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):125-131.
- [24] Bates J D, Svejcar T S, Miller R F. Litter decomposition in cut and uncut western juniper woodlands [J]. Journal of Arid Environments, 2007,70(2):222-236.
- [25] 席彩云,余新晓,徐娟,等北京密云山区典型林地土壤入渗特征[J].北京林业大学学报,2009,31(5):42-47.
- [26] 金建新,桂林国,尹志荣,等.宁夏典型土壤持水性能及收缩特性[J].水土保持研究,2017,24(4):279-283.

(上接第 49 页)

- [13] 路建国,张明义,张熙胤,等.冻融过程中未冻水含量及冻结温度的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1803-1812.
- [14] 晏长根,王婷,贾海梁,等.冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6):1252-1260.
- [15] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根—土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1270-1280.
- [16] 王恒星,杨林.冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J].冰川冻土,2018,40(4):792-801.
- [17] 李云鹏,李劲松,张利东,等.季冻区公路边坡植物根系对冻融作用的影响[J].水土保持通报,2020,40(2):134-139.
- [18] 王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2378-2382.
- [19] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [20] 覃绮平.土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D].陕西 西安:长安大学,2005.
- [21] 何平,程国栋,杨成松,等.非饱和冻土的强度分析[J].冰川冻土,2002,24(3):260-263.
- [22] 马巍,吴紫汪,盛煜.围压对冻土强度特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):7-11.
- [23] 刘振亚,刘建坤,李旭,等.毛细黏聚与冰胶结作用对非饱和粉质黏土冻结强度及变形特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1551-1559.
- [24] 刘宽,叶万军,景宏君,等.季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):192-197.