

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160156

黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究

陈文媛¹ 张少妮¹ 华 瑞¹ 徐学选^{1,2}

(1 西北农林科技大学水土保持研究所 2 中国科学院水利部水土保持研究所)

摘要: 植被恢复可以改善土壤的入渗能力, 植被恢复方式不同及恢复进程中其土壤性质的改善对土壤水文特征的影响程度也将影响到植被恢复的格局。为确定林地、草地植被恢复年限对土壤水分入渗特征的影响, 以黄土丘陵区西部官山林场退耕后栽植的刺槐林地、撂荒草地为对象, 选取退耕年限为9年、15年、25年的林地、草地。于2014年5月对各样地的原状土土柱进行定水头入渗, 比较不同退耕年限林地、草地的入渗性能和湿润锋穿透60 cm土柱的时间, 并分析影响入渗特性的因素。结果表明: 退耕年限为25年林地的土壤稳定入渗率、平均入渗率、前120 min累积入渗量、湿润锋到达60 cm土柱的时间分别为1.86、2.60 mm/min、387.82 mm、23.00 min; 退耕年限为15年林地分别为1.38、1.90 mm/min、288.88 mm、35.33 min; 退耕年限为9年林地分别为0.35、1.03 mm/min、194.50 mm、40.00 min; 退耕年限为25年草地分别为3.17、3.17 mm/min、386.43 mm、24.00 min; 退耕年限为15年草地分别为1.86、2.60 mm/min、387.82 mm、34.33 min; 退耕年限为9年草地分别为1.86、2.60 mm/min、387.82 mm、38.33 min。6种样地的土壤入渗过程均能用通用模型进行高精度拟合。各样地土壤入渗速率与土壤有机质、>0.25 mm水稳性团聚体含量呈正相关关系, 与土壤密度呈负相关关系。土壤入渗能力随退耕年限增加而增强, 退耕还草比退耕还林更有利于土壤入渗能力增强。因此建议在水资源有限的黄土区以退耕还草为主以促进更多的降雨就地入渗。

关键词: 退耕年限; 林地; 草地; 入渗性能

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2017)01-0062-08

CHEN Wen-yuan¹; ZHANG Shao-ni¹; HUA Rui¹; XU Xue-xuan^{1,2}. **Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017) **39**(1) 62-69 [Ch 28 ref.]

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China.

Vegetation restoration can improve the soil infiltration capacity, the way and process of the vegetation restoration affect the soil properties in soil hydrological characteristics, and it will determine the distribution of vegetation restoration. In this paper, sites with different restoration types (secondary acacia forestland, secondary grassland) and the forestland and grassland whose vegetation restoration years were 9, 15 and 25 located in Guanshan Forest Farm in the west of loess hilly region were chosen as research objects. We aimed to illustrate the effects of vegetation restoration types and years on the hydraulic conductivity, the wetting front penetration time of 60 cm column and analyze the factors affecting the infiltration characteristics in soil layer of 0-60 cm using the constant head infiltration of undisturbed soil columns in May 2014. The results showed that: 1) the stable infiltration rate, mean infiltration rate, accumulative infiltration amount in 120 minutes and the wetting front penetration time of 60 cm column in the site of 25 years vegetation restoration forestland were 1.86, 2.60 mm/min, 387.82 mm, 23.00 min, respectively; in the 15 years vegetation restoration forestland, they were 1.38, 1.90

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471439, 41171421)。

第一作者: 陈文媛。主要研究方向: 流域管理。Email: chenwy92@163.com 地址: 712100 陕西省杨凌市西农路26号西北农林科技大学水土保持研究所。

责任作者: 徐学选, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 流域水文。Email: xuxue-xuan@nwsuaf.edu.cn 地址: 同上。

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

mm/min 288.88 mm 35.33 min; in the 9 years vegetation restoration forestland, they were 0.35, 1.03 mm/min, 194.50 mm 40.00 min. Comparatively, these values were 3.17, 3.17 mm/min, 386.43 mm, 24.00 min in 25 years vegetation restoration grassland; 1.86, 2.60 mm/min, 387.82 mm, 34.33 min in the 15 years vegetation restoration grassland, and 1.86, 2.60 mm/min, 387.82 mm, 38.33 min in 9 years vegetation restoration grassland. 2) Additionally, the universal empirical model was fitted to the undisturbed soil columns infiltration process of all the six experimental area. 3) The soil infiltration rate was positively correlated with the organic matter content and the >0.25 mm water-stable aggregates content, while was negatively correlated with the bulk density. In conclusion, soil infiltration capacity was enhanced with the restoration years increased; at the same restoration year, soil infiltration capacity of the grassland performed better than that of the forestland, so it is recommended to increase the secondary grassland to improve the soil rainfall infiltration rate on the loess hilly region area, where the water resource is limited.

Key words vegetation restoration year; forestland; grassland; infiltration property

黄土高原是我国水土流失最严重的区域,不合理的土地利用和植被破坏起到了负面的助推作用。自1999年逐步开展退耕还林还草工程以来,黄土区大力营造植被,强化了植被增加降雨的就地入渗,出现了部分流域地表径流趋减,这种现象是否会随着退耕还林草的时间进程而强化,需要研究土地利用改变后土壤水文性质的变化过程。在植被恢复的过程中,土壤入渗是其关键的限制因素^[1]。植被恢复通过改善土壤的物理性质来增加土壤入渗能力。目前国内外学者普遍认为土壤入渗能力主要受土壤机械组成、水稳性团聚体含量、土壤密度及有机质含量等影响^[2-6]。

不同土地利用方式的土壤入渗能力存在差异^[7-13]。土地利用方式是人类对土壤的各种活动的综合反映,土地利用方式不同引起土壤结构的差异和土壤的基本性质的变化会反映到土壤入渗规律和溶质运移特征上^[14]。席彩云等^[15]研究了北京密云山区4种典型林地的入渗特征,发现土壤稳渗率为灌木林地>刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林地>针阔混交林地>侧柏(*Platycladus orientalis*)林地。刘宇等^[16]对秦岭火地塘林不同土地利用下土壤入渗能力的研究发现松栎混交林>荒草地>农用地。

土壤入渗能力随退耕年限的增加多表现为增强趋势的影响^[17-18]。王进鑫等^[19]发现与退耕还林1年的新造幼林地相比,退耕还林后13年生的侧柏林地土壤清水、浑水累积入渗量均减小,而退耕还林后13年生的刺槐林地清水入渗能力明显增强,但浑水入渗能力因入渗水流特性的不同而异。赵勇钢等^[20]发现在退耕时间序列中,随着退耕年限的延长,样地的入渗率逐渐增加。

然而,已有研究反映了不同退耕年限、不同退耕方式下土壤入渗存在差异,但进一步将土壤入渗能

力的改善与土壤中的有机质、水稳性团聚体等影响因素综合分析尚不多见。而且目前对入渗的研究常采用人工降雨法、盘式入渗仪法、双环法、环刀法等,不能准确观察土壤入渗的湿润锋运移过程,本试验在此基础上采用原状土柱入渗的方法观测不同退耕年限林、草地的入渗性能,研究林草地土壤的理化性质对土壤入渗的影响,为退耕还林还草提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

样地位于黄土高原中部甘肃省泾川县官山林场,地理位置介于107°15′~107°45′ E、35°11′~35°31′ N,属温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,光照充足,年内降雨分配不均,主要集中在7—9月。年平均气温10℃,无霜期174 d,年均降水量553.4 mm,年蒸发量1 181.6 mm。海拔1 072~1 351 m,土壤为黄绵土。刺槐是黄土高原常见的退耕还林树种,退耕还草是1999年国家提出的适合黄土高原的退耕方式,官山林场于上世纪80年代将大面积耕地改造成刺槐林地和退耕撂荒地,近十年来由于退耕还草政策的推行,官山林场又进行退耕还林还草。官山林场3次大规模的退耕还林还草已分别实施了9年、15年和25年,这3个年龄段样地多、面积大。退耕9年后的草地逐渐出现小灌木种,25年时草本仍占有主要优势;刺槐林在幼林期生长较快,前几年郁闭度不足,第9年可以基本达到郁闭,为刺槐快速生长阶段,25年时林下小灌木较多,林冠郁闭好,可以代表刺槐的成熟林,另外该林场尚无超过25年的退耕草地。为了研究退耕还林还草年限对土壤入渗性能的影响,选择退耕年限分别为9年的林地(L_{9a})、草地(C_{9a}),15年的林地(L_{15a})、草

地(C_{15a}) 和 25 年的林地(L_{25a})、草地(C_{25a}) 6 块样地 为研究对象 样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Tab.1 Basic condition of sample plots

样地 Sample plot	退耕年限/a Vegetation restoration/ year	群落组成 Community composition	树高 Tree height/ m	胸径 DBH/ cm	地径 Ground diameter/ cm	郁闭度/ 覆盖度 Canopy density/ coverage/ %	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density/ (tree·ha ⁻¹)
L _{25a}	25	刺槐 + 茅莓 + 悬钩子 + 旱地芦苇 <i>Robinia pseudoacacia</i> + <i>Rubus parvifolius</i> + <i>Rubus corchorifolius</i> + <i>Arundo donax</i>	12 ± 2.5	14 ± 4.9	17.7 ± 6.8	90	833
L _{15a}	15	刺槐 + 杠柳 + 蛇葡萄 + 铁杆蒿 <i>Robinia pseudoacacia</i> + <i>Periploca sepium</i> + <i>Ampelopsis sinica</i> + <i>Artemisia sacrorum</i>	10 ± 1.1	11 ± 6.3	12.9 ± 6.5	85	500
L _{9a}	9	刺槐 + 悬钩子 + 旱地芦苇 <i>Robinia pseudoacacia</i> + <i>Rubus</i> <i>corchorifolius</i> + <i>Arundo donax</i>	8 ± 1.6	7 ± 3.2	8.4 ± 4.3	80	1 667
C _{25a}	25	中华隐子草 + 铁杆蒿 + 草地风毛菊 <i>Cleistogenes chinensis</i> + <i>Artemisia sacrorum</i> + <i>Saussurea amara</i>				95	
C _{15a}	15	狭叶艾蒿 + 胡枝子 + 刺儿菜 <i>Artemisia argyi</i> + <i>Lespedeza</i> <i>bicolor</i> + <i>Cirsium setosum</i>				90	
C _{9a}	9	甘草 + 滨草 + 胡枝子 <i>Glycyrrhiza uralensis</i> + <i>Ammophila</i> <i>breviligulata</i> + <i>Lespedeza bicolor</i>				85	

1.2 研究方法

1.2.1 土壤基本性质测定

采样于 2014 年 5 月进行 在 6 块样地中随机选取 3 个采样点 在土壤垂直方向上用大铝盒和 100 cm³ 环刀按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 和 50 ~ 60 cm 分层采样 将土样带回实验室后 100 cm³ 环刀用烘干法测定土壤密度和初始含水率; 将大铝盒中的土用小刀沿自然裂隙切成 1 cm 左右的小块 将土放在通风处自然风干 取风干土样 500 g 两份进行干筛 获得 >5 mm、2 ~ 5 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、<0.25 mm 的

各土壤团粒质量 计算各粒级土壤团粒质量百分比 按照干筛法获得的各粒级团粒比例配成 50 g 风干土样进行湿筛 用团聚体分析仪 湿筛 1 min 将各粒级的筛子取出 用水将筛子上的团聚体清洗到烧杯中 得到 >5 mm、2 ~ 5 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、<0.25 mm 各粒级的水稳性团粒 使用沙浴烘干 然后称质量 得出 >0.25 mm 粒级土壤水稳性团聚体的质量百分比; 将风干土样过 2 mm 筛 采用马尔文激光粒度仪测定土壤的机械组成; 将风干土样过 0.15 mm 筛 采用重铬酸钾法测定土壤有机碳含量。土壤基本性质见表 2。

表 2 样地土壤的基本性质

Tab.2 Basic soil properties of sample plots

样地 Sample plot	初始含水率 Initial moisture content/%	土壤密度 Soil density/(g·cm ⁻³)	水稳性团聚体含量 Water-stable aggregate content/%	有机质含量 Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)
L _{25a}	17.73 ± 0.29	1.25 ± 0.01	58.97 ± 1.63	8.75 ± 1.33
L _{15a}	15.96 ± 0.34	1.26 ± 0.02	57.20 ± 3.76	7.87 ± 1.09
L _{9a}	18.20 ± 0.54	1.29 ± 0.03	47.77 ± 2.74	6.15 ± 0.80
C _{25a}	14.07 ± 0.67	1.26 ± 0.04	54.20 ± 3.87	7.77 ± 0.63
C _{15a}	15.82 ± 1.04	1.27 ± 0.04	49.82 ± 4.41	6.74 ± 0.64
C _{9a}	18.78 ± 1.38	1.31 ± 0.03	43.66 ± 3.01	5.85 ± 0.67

1.2.2 原状土柱入渗实验

试验采用定水头入渗 观测原状土柱土壤的入

渗性能及湿润锋穿透 60 cm 的时间。在每个样地用有机玻璃管(直径 20 cm,厚 0.6 cm,长 65 cm)取表

层原状土,有机玻璃管上部预留出 5 cm,作为水头的位置。用马氏瓶控制水头 3 cm,在土柱下端的漏斗形接水装置中铺滤纸和石英砂作为反滤层,确保土壤中多余水分均能流出,并保证水分澄清,用 500 mL 的收集瓶在土柱下出口接取出流液,按 1、2、3、4、5、10、20、30、40、50、60、80、100、120、140、160、180、200 和 240 min 的时间间隔记录马氏瓶中的水量。试验在采集原状土柱后集中进行入渗试验,以便消除土柱蒸发耗水引起的初始含水量误差。装置如图 1 所示。

1.2.3 土壤水分入渗模型的选择

目前国内外学者建立了许多模拟入渗速率随时间变化的入渗模型,其适用条件各异。根据官山林场林、草地的具体特点,选取了 Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型 4 种模型对多样

地的入渗数据进行拟合,4 种模型的公式及参数说明见表 3。

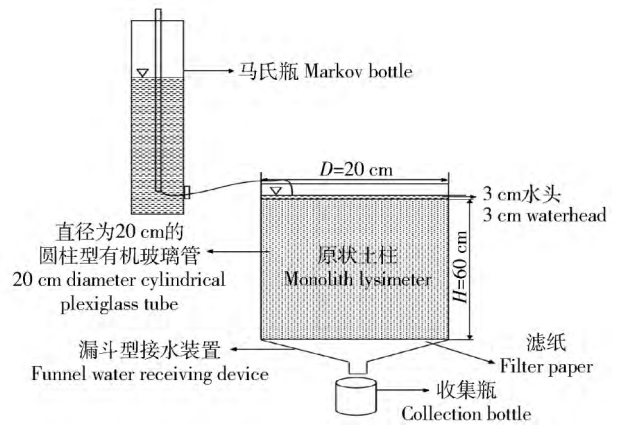


图 1 入渗装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

表 3 4 种模型的公式及参数说明

Tab. 3 Formula and parameter description of the four models

模型名称 Model name	公式 Formula	参数说明 Parameter description
Kostiakov 模型 Kostiakov model	$f(t) = at^{-b}$	a 为初始入渗率, mm/min; b 为衰减系数 a means initial infiltration rate, mm/min; b means decay factor
Horton 模型 Horton model	$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$	f_0, f_c 分别为初始入渗率和稳定入渗率, mm/min; k 为参数 f_0 means the initial infiltration rate and f_c means the stable infiltration rate, mm/min; k represents parameter
Philip 模型 Philip model	$f(t) = (1/2)st^{-1/2} + a$	s 为土壤吸湿率, mm/min ^{1/2} ; a 为常数, mm/min s means soil moisture absorption rate, mm/min ^{1/2} ; a represents the constant, mm/min
通用经验模型 Universal empirical model	$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)/t^a$	f_0, f_c 分别为初始入渗率和稳定入渗率, mm/min; a 为参数 f_0 means the initial infiltration rate and f_c means the stable infiltration rate, mm/min; a represents the parameter

1.2.4 数据统计与处理方法

采用 Excel 2013 软件对土壤入渗速率和湿润锋穿透 60 cm 土柱的时间进行统计分析,采用 SPSS 18.0 软件对土壤入渗速率与各影响因素进行 Pearson 相关分析,采用 SigmaPlot 12.5 软件对土壤入渗数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同年限林、草地对土壤入渗性能的影响

土壤入渗过程呈现初始时入渗较快,然后逐渐减慢并趋于稳定的过程(图 2)。随着退耕年限的增加,稳定入渗率增加。在入渗前 30 min 林地和草地的入渗速率受初始含水量影响,入渗率递减较快,30 min 后随着退耕年限的增加,入渗速率增大。不同退耕年限林地的稳定入渗率差值较小,而草地的稳定入渗率差值较大。

退耕年限相同的林地、草地的稳定入渗率均为草地 > 林地。 L_{9a} 和 L_{15a} 的入渗速率衰减速度快于相同

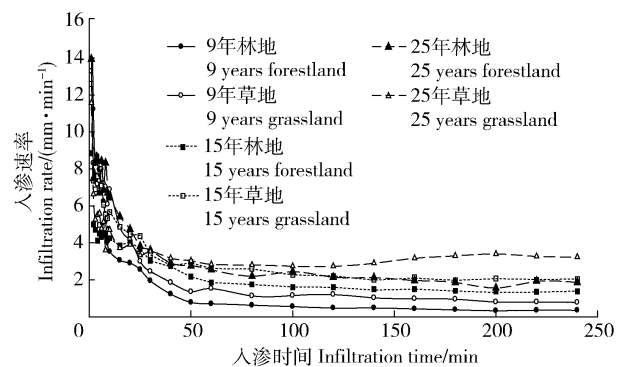


图 2 不同年限林地、草地土壤水分入渗过程

Fig. 2 Soil infiltration process of the forestland and grassland under different vegetation restoration years

年限的草地, C_{25a} 的入渗速率衰减速度快于 L_{25a} 。退耕年限相同时 L_{9a} 的初始入渗率大于 C_{9a} 。随着入渗时间的推移,入渗速率差值先逐渐减小再趋于稳定; L_{15a} 的初始入渗率小于 C_{15a} ,入渗 50 min 后,逐渐趋于稳定入渗,入渗速率的差值恒定; L_{25a} 的初始入渗率高于 C_{25a} ,入渗速率的差值先减小后增大,最后逐渐趋于稳定。

初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和累积入渗量是常用来评价土壤入渗能力的指标。从表3可以看出,不同退耕年限林地、草地的土壤入渗指标之间差异显著。随着退耕年限的增加,林地、草地的稳定入渗率、平均入渗率和前120 min累积入渗量均

增加。草地的初始入渗率随退耕年限的增加而减小,林地的初始入渗率随退耕年限的增加先减小后增加。随着退耕年限的增长,稳定入渗率和平均入渗率增幅均在1.3 mm/min内,前120 min累积入渗量的增幅在100 mm左右。

表3 不同年限林地、草地土壤入渗特征指标

Tab. 3 Soil infiltration characteristic indices of the forestland and grassland under different vegetation restoration years

样地 Sample plot	初始入渗率 Initial infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率 Stable infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率 Mean infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	前120 min累积入渗量 Accumulative infiltration amount in 120 minutes/mm
L _{25a}	13.94 ± 1.89ab	1.86 ± 0.33b	2.60 ± 0.34bc	387.82 ± 46.63b
L _{15a}	8.85 ± 1.27b	1.38 ± 0.29bd	1.90 ± 0.16ac	288.88 ± 14.31ab
L _{9a}	20.23 ± 4.36a	0.35 ± 0.12a	1.03 ± 0.17a	194.50 ± 23.29a
C _{25a}	11.57 ± 3.21b	3.17 ± 0.13c	3.17 ± 0.32b	386.43 ± 85.98b
C _{15a}	12.60 ± 2.14ab	2.03 ± 0.75bc	2.73 ± 0.81bc	377.77 ± 96.78b
C _{9a}	13.28 ± 1.48ab	0.78 ± 0.25ad	1.55 ± 0.25a	270.70 ± 29.20ab

注: 同列不同字母表示不同年限林地、草地土壤入渗特征指标之间差异显著($P < 0.05$)。Note: different letters in the same column mean significant differences between the soil infiltration characteristic indices of forestland and grassland under different vegetation restoration years at $P < 0.05$ level.

相同年限林地、草地的稳定入渗率、平均入渗率和前120 min累积入渗量均呈现草地大于林地。随着年限的增加,林地、草地的平均入渗率和前120 min累积入渗量的差值递减,其原因是林地的有机质含量高于相同年限的草地,土壤易形成团粒结构有助于水分的入渗。相同退耕年限林地、草地的初始含水率、平均入渗率和前120 min累积入渗量均为达到显著差异($P < 0.05$)。退耕年限为9年和15年的林地、草地的稳定入渗率差异不大,C_{9a}的稳定入渗率比L_{9a}高出0.43 mm/min,C_{15a}比L_{15a}高出0.83 mm/min,C_{25a}比L_{25a}的稳定入渗率差异显著,C_{25a}的稳定入渗率比L_{25a}高出1.57 mm/min。

2.2 湿润锋穿透60 cm土柱的时间

从表5可以看出,随着退耕年限的增加,林地、草地湿润锋穿透60 cm土柱的时间均减少。不同退耕年限林地、草地之间的湿润锋穿透60 cm土柱的时间差值较大,L_{25a}和L_{15a}、L_{15a}和L_{9a}之间的差值分别为12.33和4.67 min,C_{25a}和C_{15a}、C_{15a}和C_{9a}之间的差值分别为10.33和4.00 min。林地不同退耕年限的标准差都小于6.50 min,变异系数都小于20%;草地不同退耕年限标准差的差值较大,C_{25a}为7.81 min,C_{15a}为0.58 min,C_{9a}为9.07 min,变异系数也存在很大差异,C_{15a}为1.68%,C_{25a}和C_{9a}都在20%以上。

相同退耕年限的林地、草地,C_{15a}和C_{9a}湿润锋穿透60 cm土柱的时间短于相同年限的林地,并且时间差有缩短的趋势。C_{9a}湿润锋穿透60 cm土柱的时间比L_{9a}短1.67 min;C_{15a}湿润锋穿透60 cm土

柱的时间比L_{15a}短1 min;L_{25a}湿润锋穿透60 cm土柱的时间短于C_{25a},说明随着退耕时间的推移,林地土壤更有利于水分快速向深处运移。

表4 湿润锋到达60 cm的时间

Tab. 4 Wetting front penetration time of 60 cm

样地 Sample plot	最大值 Max. / min	最小值 Min. / min	均值 Average / min	标准差 SD / min	变异 系数 CV / %
L _{25a}	27	19	23.00a	4.00	17.39
L _{15a}	40	28	35.33a	6.43	18.20
L _{9a}	45	33	40.00a	6.24	15.61
C _{25a}	29	15	24.00a	7.81	32.54
C _{15a}	35	34	34.33a	0.58	1.68
C _{9a}	45	28	38.33a	9.07	23.67

注: 同列不同字母表示不同退耕年限林地、草地湿润锋到达60 cm的时间之间差异显著($P < 0.05$)。Note: different letters in the same column mean significant differences between the wetting front penetration time of 60 cm on the forestland and grassland under different vegetation restoration years at $P < 0.05$ level.

2.3 土壤入渗模型拟合

由表4可知,用Kostiakov模型拟合的初始入渗率 f_0 值介于7.7~19.9,L_{15a}最小,L_{9a}最大; b 值介于0.3~0.7, b 值反映了入渗速率的衰减速度,C_{25a}和C_{15a}的入渗速率衰减较慢,L_{9a}衰减最快;决定系数 R^2 在0.772~0.939,C_{25a}的决定系数最小,拟合效果最差。用Horton模型拟合的稳定入渗率 f_c 介于0.4~3.2,初始入渗率减稳定入渗率 $f_0 - f_c$ 介于9.8~14.2; k 值介于0.1~0.5, k 值反映了入渗速率的递

减情况, C_{25a} 的入渗速率递减最慢, L_{9a} 递减最快; 决定系数 R^2 在 0.702 ~ 0.940, L_{15a} 的决定系数最小, 拟合效果最差。用 Philip 模型拟合的参数 a 值介于 0.3 ~ 2.1, C_{9a} 值最小, C_{25a} 最大; 土壤吸湿率 s 值介于 13.6 ~ 28.2, 最小值出现在 L_{25a} , 最大值出现在 C_{9a} , 土壤密度越大, 吸湿率越小; 决定系数 R^2 介于

0.882 ~ 0.974, L_{15a} 和 L_{25a} 的决定系数最小, 拟合效果最差。用通用经验模型拟合的稳定入渗率 f_c 介于 0.5 ~ 3.0, 最小值出现在 L_{9a} , 最大值出现在 C_{25a} ; $f_0 - f_c$ 介于 9.1 ~ 13.2, 最大值出现在 L_{25a} , 最小值出现在 L_{15a} ; a 值介于 0.2 ~ 0.9; 决定系数 R^2 介于 0.905 ~ 0.983, L_{15a} 的决定系数最小, 拟合效果最差。

表 5 4 种入渗模型参数的回归结果

Tab. 5 Regression results of 4 model parameters

样地 Sample	Kostiakov 模型 Kostiakov model			Horton 模型 Horton model				Philip 模型 Philip model			通用经验模型 Universal empirical model			
	a	b	R^2	f_c	$f_0 - f_c$	k	R^2	a	s	R^2	f_c	$f_0 - f_c$	a	R^2
L_{25a}	13.2	0.3	0.925	2.2	14.2	0.2	0.830	1.8	13.6	0.901	1.9	14.4	0.3	0.929
L_{15a}	7.7	0.4	0.904	1.4	9.8	0.2	0.702	1.3	14.3	0.883	1.5	9.1	0.4	0.905
L_{9a}	19.9	0.7	0.982	0.4	9.9	0.5	0.809	0.4	25.7	0.974	0.5	10.1	0.6	0.983
C_{25a}	11.7	0.3	0.772	3.2	13.8	0.1	0.855	2.1	15.1	0.882	3.0	13.2	0.2	0.946
C_{15a}	12.3	0.3	0.939	1.9	10.9	0.2	0.847	1.5	21.4	0.935	1.7	10.9	0.4	0.941
C_{9a}	13.6	0.4	0.927	0.5	11.5	0.4	0.940	0.3	28.2	0.909	0.7	11.9	0.9	0.950

从各模型的决定系数 R^2 的大小可以判定不同模型的拟合效果, 通用经验模型的决定系数 R^2 介于 0.905 ~ 0.983, 这表明通用模型更适用于描述本研究区的土壤入渗特征。Kostiakov 模型除 C_{25a} 外均能很好地拟合其他 5 种样地的入渗过程, 除 L_{15a} 和 C_{25a} 外 Philip 模型拟合土壤入渗过程的决定系数均大于 0.900, Horton 模型除对 C_{9a} 的入渗过程拟合程度较好外, 对其他 5 种样地的入渗过程拟合效果均不理想。

2.4 土壤水分入渗性能的影响因素分析

对土壤入渗速率与土壤的理化性质进行

Pearson 相关性分析(表 6)得出, 土壤入渗速率与密度呈负相关关系, 与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、有机质含量呈正相关关系, 土壤入渗速率与密度、有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量均达到显著性水平, 其中稳定入渗率与密度、有机质, 平均入渗率与密度均达到极显著水平。土壤密度越大, 土壤越密实, 孔隙度越小, 水分入渗难度越大。有机质含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量越大, 土壤结构越好, 越有利于水分入渗。

表 6 土壤理化性质与土壤入渗速率的相关性

Tab. 6 Correlations between soil physical and chemical properties and soil infiltration rates

指标 Index	土壤密度 Soil bulk density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	有机质含量 Organic matter content/($g \cdot kg^{-1}$)	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 >0.25 mm water-stable aggregate content/%
初始入渗率 Initial infiltration rate	-0.606*	0.681*	0.532*
稳定入渗率 Stable infiltration rate	-0.782**	0.719**	0.646*
平均入渗率 Mean infiltration rate	-0.704**	0.658*	0.555*

注: ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$); * 表示显著相关 ($P < 0.05$)。Notes: ** means extremely significant correlation ($P < 0.01$); * means significant correlation ($P < 0.05$).

3 讨论

退耕方式和退耕年限对土壤入渗能力有显著影响。高朝侠等^[21]对长武塬区的主要土地利用方式进行了入渗试验, 发现入渗能力依次为: 刺槐林地 $>$ 草地 $>$ 小麦 (*Triticum aestivum*) 地 $>$ 苹果 (*Malus pumila*) 林地。李贵玉等^[22]对延安燕沟流域刺槐、

沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、草地 3 种植被类型的原状土柱的入渗能力的研究结果表明, 3 种植被类型的稳渗率分别为草地 $>$ 刺槐 $>$ 沙棘。王国梁等^[23]发现在植被恢复过程中草本和灌木的作用优于乔木, 更利于提高土壤的稳定入渗率。本研究也表明草地的入渗能力优于刺槐林地, 本试验主要研究土壤表层的入渗能力, 草地的根系主要集中表层,

根系能作为入渗通道,更有利于水分入渗。大量研究表明土壤的入渗速率随着退耕年限的增加而增加^[17-20]。本研究也表明随着退耕年限的增加,土壤的入渗性能越好。随着退耕年限的增加,土壤密度减小,水稳性团聚体和有机质含量增加,土壤结构越稳定,更有利于水分入渗。

随着退耕年限的增加,湿润锋穿透 60 cm 土柱的时间减少, C_{9a} 和 C_{15a} 的湿润锋穿透 60 cm 土柱的时间短于相同年限的林地, L_{25a} 湿润锋穿透 60 cm 土柱的时间短于 C_{25a} ,表明随着时间的推移,林地更利于水分向深处运移。其原因是草本的根系主要分布在表层且根径较小,而乔木的根系易于向土壤深处生长且根径较大更易形成水分向深处运移的通道。

4种模型对多样地的入渗数据进行拟合结果表明:通用经验模型对本试验6块样地的入渗过程的拟合最好,决定系数均在0.900以上。其中,Kostiakov模型当 $t \rightarrow \infty$ 时 $f(t) \rightarrow 0$,这与实际情况不相吻合,仅这点来说,该模型在物理概念上不够严谨。Horton模型中土壤渗透速率与时间之间存在着逆相指数曲线关系,改进的Horton模型即通用经验模型较好一些: $f(t) = f_c + (f_0 - f_c) / t^{-a}$,此时随着 t 无限大 $f(t)$ 就是 f_c 。因此,通用经验模型是适合于模拟黄土区原状土土柱入渗过程的模型。

土壤入渗性能受土壤密度、土壤有机质和 >0.25 mm水稳性团聚体含量等因素的影响。在植被恢复过程中,土壤基本性质如土壤密度的降低提高了土壤的总孔隙度^[22],裴青宝等^[24]认为在入渗初期密度对土壤入渗能力影响较大,入渗200 min后影响减弱,李卓等^[25]认为土壤稳定入渗率和前120 min累积入渗量均随密度的增加而减少。有机质含量、水稳性团聚体含量增加使得土壤孔隙结构稳定^[26],入渗通道相应地也就稳定。李雪转等^[27]认为有机质通过影响土壤的孔隙尺寸和分布来影响土壤的水力传导度。Zhang等^[28]认为随着水稳性团聚体的增加,土壤稳渗率增加。本文研究结果与这些结论基本吻合。

4 结 论

1) 退耕年限相同时草地的稳定入渗率、平均入渗率和前120 min累积入渗量大于林地;林地、草地随着退耕年限的增加,稳定入渗率、平均入渗率和前120 min累积入渗量增加。

2) C_{15a} 和 C_{9a} 的湿润锋穿透60 cm土柱的时间短于相同年限的林地,并且时间差有缩短的趋势, L_{25a} 的湿润锋穿透60 cm土柱的时间短于 C_{25a} 。随着退耕年限的增加,林地、草地湿润锋穿透60 cm土柱的

时间均减少,随着退耕时间的推移,林地土壤更有利于水分快速向深处运移。

3) 通用模型比Kostiakov模型、Philip模型、Horton模型更适用于描述本研究区的土壤入渗特征。

4) 本研究区多样地土壤入渗速率与密度呈显著负相关关系,与 >0.25 mm水稳性团聚体含量、有机质含量呈显著正相关关系。

植被恢复在25年内,土壤入渗能力上持续增强,必将引起地表径流减弱,向地下水传输能力增强,降低了土壤流失风险。基于林地、草地土壤入渗性能及其随退耕年限的差异变化,在黄土区有限的水资源环境下,退耕还草在退耕时间进程的前25年较退耕还林更有利于促进降雨入渗,25年以后退耕还林在提高土壤的降雨入渗率,促进该区生态环境的改善方面开始强于退耕还草。

参 考 文 献

- [1] 纪中华,李建增,闫帮国,等. 干热河谷典型区土壤功能对不同植被恢复措施的响应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 249-253.
JI Z H, LI J Z, YAN B G, et al. Response of soil functioning to ecological restoration practices in the typical arid-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 249-253.
- [2] 张昌顺, 范少辉, 官凤英, 等. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J]. 林业科学, 2009, 45(1): 36-42.
ZHANG C S, FAN S H, GUAN F Y, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors under *Phyllostachys edulis* forests in Northern Fujian Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(1): 36-42.
- [3] SHE D L, SHAO M, HU W, et al. Variability of soil water-physical properties in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(22): 3041-3049.
- [4] LEWIS C, ALBERTSON J D, XU X L, et al. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(10): 1527-1537.
- [5] BADORRECK A, GERKE H, HUTTL R. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment [J]. Soil & Tillage Research, 2013, 129(5): 1-8.
- [6] WANG Y Q, SHAO M, LIU Z P, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487(2): 13-23.
- [7] MSQUEEN D, SHEPPHERD T G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (typic endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 63(3): 93-107.
- [8] BODHINAYKE W, SI B C, NOBORIO K. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 964-970.
- [9] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文

- 效应[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 33-37.
- RAO L Y, ZHU J Z, BI H X. Hydrological effects of forest litters and soil in the Simian Mountain of Chongqing City[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(1): 33-37.
- [10] 王云琦, 王玉杰. 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(3): 102-108.
- WANG Y Q, WANG Y J. Soil water retaining capacity and infiltration property of typical forests in the Jinyun Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(3): 102-108.
- [11] 葛东媛, 张洪江, 王伟. 重庆四面山林地土壤水分特性[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 155-160.
- GE D Y, ZHANG H J, WANG W, et al. Soil water characteristics of forestlands in the Simian Mountains of Chongqing southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 155-160.
- [12] NERIS J, JIMENEZ C, FUENTES J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. Catena, 2012, 98(6): 55-62.
- [13] WANG L, ZHONG C, GAO P, et al. Soil infiltration characteristics in agroforestry systems and their relationships with the temporal distribution of rainfall on the Loess Plateau in China [J]. Plos One, 2015, 10(4): 1-15.
- [14] FRANZLUEBBERS A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.
- [15] 席彩云, 余新晓, 徐娟. 北京密云山区典型林地土壤入渗特性[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 42-47.
- XI C Y, YU X X, XU J, et al. Soil infiltration characteristics of typical plantations in mountainous area of Miyun, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 42-47.
- [16] 刘宇, 郭建斌, 邓秀秀. 秦岭火地塘林区3种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(3): 73-80.
- LIU Y, GUO J B, DENG X X, et al. Evaluation of potential water conservation function of the soil of three land use types in Huoditang of Qinling Mountains, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 73-80.
- [17] 陈瑶, 张科利, 罗利芳. 黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J]. 泥沙研究, 2005(5): 45-50.
- CHEN Y, ZHANG K L, LUO L F, et al. Study on beginning infiltration law of the being wild soil in Loess Plateau[J]. Journal of Sediment Research, 2005(5): 45-50.
- [18] ZHANG Y W, SHANGGUAN Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 574-581.
- [19] 王进鑫, 黄宝龙, 王迪海. 人工林地浑水入渗性能与通用入渗模型[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2841-2847.
- WANG J X, HUANG B L, WANG D H. Infiltrability of muddy water and universal model for both muddy water and tap water in planted forest site[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2841-2847.
- [20] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14-20.
- ZHAO Y G, ZHAO S W, CAO L H, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 14-20.
- [21] 高朝侠, 徐学选, 宇苗子. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1578-1584.
- GAO C X, XU X X, YU M Z, et al. Impact of land use types on soil macropores in the loess region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1578-1584.
- [22] 李贵玉, 徐学选, 王俊华. 黄土丘陵区不同植被下土体入渗性能研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 27-30.
- LI G Y, XU X X, WANG J H, et al. The comparing study on soil infiltration of vegetation land in hilly area of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 27-30.
- [23] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 529-535.
- WANG G L, LIU G B, ZHOU S L. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of loess gully region[J]. Journal of Nature Resources, 2003, 18(5): 529-535.
- [24] 裴青宝, 赵新宇, 张建丰. 容重对红壤水平入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 111-114.
- PEI Q B, ZHAO X Y, ZHANG J F, et al. Effects of density on horizontal infiltration characteristics of red loam soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 111-114.
- [25] 李卓, 吴普特, 冯浩. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 40-45.
- [26] 朱冰冰, 李鹏, 李占斌. 子午岭林区土地退化/恢复过程中土壤水稳性团聚体的动态变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 124-128.
- ZHU B B, LI P, LI Z B, et al. Dynamics of water stable aggregate in land degradation/restoration process of Ziuling Forest Farm[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(3): 124-128.
- [27] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- LI X Z, FAN G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 188-190.
- [28] ZHANG G S, CHAN K Y, OATES A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil Tillage Research, 2006, 92(1): 122-128.

(责任编辑 范娟
责任编委 杨晓晖)