

红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗特征

刘焕焕¹, 王改玲^{1*}, 殷海善², 贺润平³,

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2.山西省农业科学院 植物保护研究所, 太原 030031; 3.山西省农业科学院 农业资源与经济研究所, 太原 030006)

摘 要:【目的】模拟不同植被覆盖土壤水分入渗过程并选择该研究区的最适模型。【方法】采用野外双环入渗试验方法, 测定了不同植被覆盖下土壤水分入渗特征, 采用 Philip 模型、Horton 模型、Kostiakov 模型对不同植被覆盖区土壤水分入渗过程进行拟合。【结果】①不同植被覆盖区土壤水分入渗速率均表现为初始入渗速率最大, 平均入渗速率次之, 稳定入渗速率最小; ②自然生草区土壤初始入渗速率最大, 清耕区土壤的平均入渗速率和稳定入渗速率最大, 且清耕区与自然生草区土壤初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率均差异显著; ③Horton 入渗模型对不同小区土壤入渗过程拟合效果最好, Philip 入渗模型拟合效果次之, Kostiakov 入渗模型拟合效果最差。【结论】红枣经济林不同植被覆盖下土壤水分入渗特征具有显著差异, Horton 入渗模型更适合研究该区域红枣经济林土壤水分入渗过程。

关 键 词: 红枣经济林; 植被覆盖; 水分入渗; 土壤

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggpps.2019244

刘焕焕, 王改玲, 殷海善, 等. 红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗特征[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 52-58.
LIU Huanhuan, WANG Gailing, YIN Haishan, et al. Characteristics of Soil Water Infiltration in Different Vegetation Cover of Jujube Economic Forest [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 52-58.

0 引 言

入渗过程是水分自土表垂直进入土壤的过程, 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, 决定着降水进入土壤的数量。土壤水分入渗性能是评价土壤水土保持能力和抗侵蚀能力的重要指标^[1-2], 直接影响降水再分配过程中地表径流与土壤储水量的大小。红枣产业是山西省重要的经济林产业, 红枣栽培面积 $33.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 年总产量达 $60 \times 10^4 \text{ t}$ 以上, 是山区农民的主要经济来源之一。其中, 吕梁山区是山西省最大的红枣生产区, 红枣种植面积为 $13.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省红枣种植面积的 40%。然而, 吕梁山位于黄土高原北部, 地形破碎、植被覆盖稀少, 降雨少而集中, 水分流失严重。如何促进水分入渗, 提高降水资源的利用率, 提高枣园生产力, 是实现该区生态及经济协同发展的关键。

土壤入渗能力受土壤干湿程度、孔隙状况和地表覆盖等因素的影响。国内外研究表明, 植被覆盖通过

根系形成的大孔隙, 以及枯枝落叶层形成的有机质改良土壤结构, 进而提高土壤渗透能力^[3-5]; 此外, 植被还可以拦截降雨, 减少径流, 增加入渗^[6-7]。目前, 国内外学者已就不同植被类型、植被覆盖度土壤入渗性能进行大量研究^[8-9,19]。果园生草栽培是 20 世纪 40 年代兴起的现代化果园土壤管理模式, 目前已在美国、日本、法国等国家广泛推广。我国于 1988 年将果园生草制作为绿色果品生产主要技术措施在全国推广, 生草栽培对果园土壤水分及果树生长、产量的影响也有较多报道。但截至目前, 生草的果园面积不足 10%。林下生草覆盖对土壤入渗的影响还未见报道。吕梁山枣园采用的管理方式主要有 2 种: 第一, 清耕, 即除去地表所有覆盖物, 包括杂草等; 第二, 林下种植大豆等粮食作物。通过双环法对比研究红枣经济林不同管理方式下土壤水分入渗特征, 并运用模型对入渗过程进行模拟, 以期控制红枣经济林水土流失提供一定理论基础。

1 研究区概况

试验地位于山西省吕梁市临县庞家庄, 地理位置为 $110.532013^\circ \text{E}$, 38.037807°N , 海拔 $928 \pm 1 \text{ m}$, 属于大陆性季风气候, 多年平均气温 9.4°C , 多年均降雨

收稿日期: 2019-09-10

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (201801D121245); 山西省农业科学院特色产业重点研发项目 (YCX2018D2T08)

作者简介: 刘焕焕 (1991-), 女。硕士研究生, 主要从事土壤退化与生态重建研究。E-mail: 2246816615@qq.com

通信作者: 王改玲 (1971-), 女。教授, 博士, 主要从事矿区土地复垦研究。E-mail: gailingwang@qq.com

466.7 mm，雨热同期，降雨主要集中在夏季。土壤为黄土母质上发育的黄绵土。按照典型性和代表性的原则，选择该地多年清耕作业的红枣经济林地进行试验，枣树树龄为 6 a。设置有 A 清耕作业区；B 自然生草区；C 大豆种植区，3 个处理，每个处理 3 次重复，共 9 各小区，小区大小为 5 m×4 m。试验区地形坡度为 20°，半阳坡，试验采用随机区组设计。清耕作业区 1 a 内 3 次耕作，除去地表所有覆盖物，包括杂草；自然生草区不采取任何管理措施，任杂草自然生长；大豆种植区，大豆播种时间为每年的 5 月，播种方式为穴播，播种密度为 12 穴/m²，播种后定期拔除杂草。试验开始于 2017 年 3 月，2018 年为试验的第 2 年，各个小区的布设与 2017 年保持一致，小区布设示意图见图 1。入渗试验进行时对样地植被进行调查，样地基本情况见表 1。

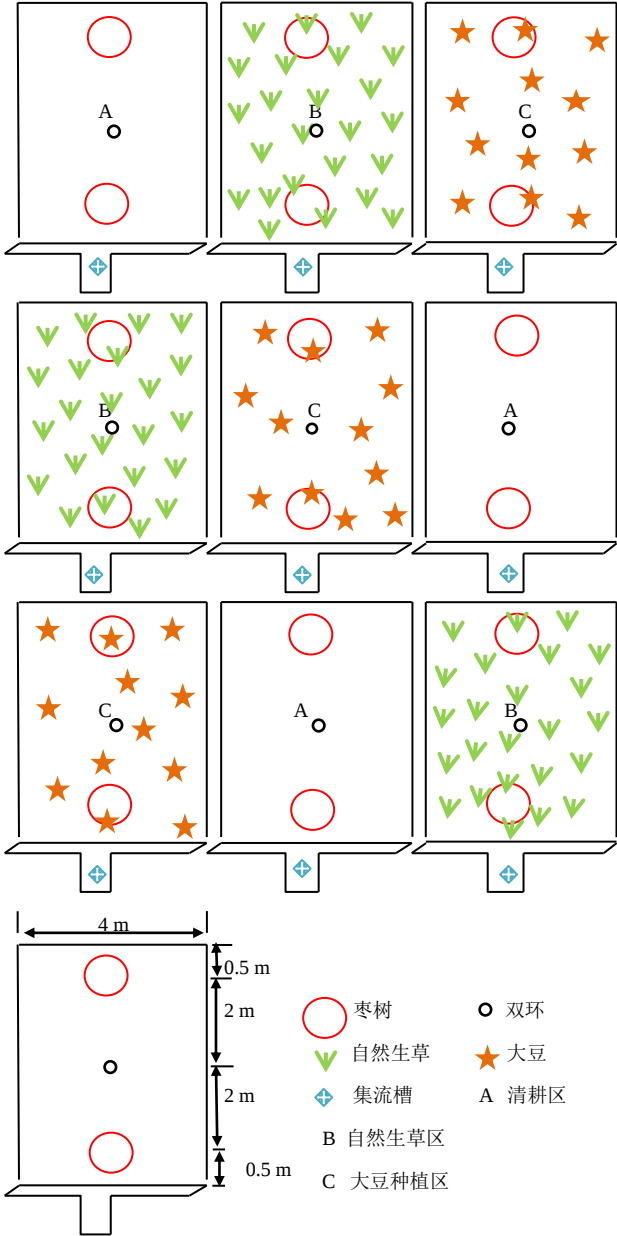


图 1 不同植被覆盖区布设示意图

Fig.1 Schematic diagram in different vegetation coverage areas

表 1 不同植被覆盖区样地基本情况

Table 1 Basic conditions in different vegetation coverage areas		
植被覆盖类型 Vegetation cover type	植被覆盖度/% Vegetation coverage	主要林下植被 Main forest vegetation
清耕 Clear farming	0	无植被
自然生草 Natural grass	60%	蒿子、苦菊菜、 鹅观草、牵牛花
大豆 Soy	30%	大豆

2 材料与方法

2.1 野外双环入渗试验

采用双环法测定土壤水分入渗率，内环直径为 20 cm，外环直径为 35 cm，高 30 cm，用橡皮锤将内环和外环均垂直打入土壤，深度为 12 cm。开始测定时向内环和外环同时注水，并使水层深度始终保持 8 cm，利用医用注射器随时往内环内注水，以此保持内环水位一定，测定单位时间内内环所加的水量。测定开始时，每 5 min 记录 1 次消耗的水量，直到入渗达到稳定，总入渗时间为 120 min，进而计算土壤水分入渗速率，入渗率的计算式^[10]为：

$$f=v/a \quad (1)$$

式中：f 为入渗率 (mm/min)；v 为单位时间加水量 (mm³/min)；a 为内环面积 (mm²)，本试验中，a 为 31 415.926 mm²。选取土壤初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率作为评价土壤入渗性能的基本指标，其中土壤初始入渗速率 (mm/min) 为最初入渗时土壤的入渗速率，本试验选择前 5 min 的平均入渗速率作为初始入渗速率；平均入渗速率 (mm/min) 为测定时段内各入渗速率的平均值；稳定入渗速率 (mm/min) 为入渗达到稳定时土壤水分的入渗速率。

2.2 土壤体积质量和孔隙度的测定

在 3 个不同植被覆盖区内用环刀采集原状土，同时采集混合土样，采样深度均为 0~20 cm，采集后带回实验室内进行土壤体积质量、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及土壤含水率的测定。其中，体积质量采用环刀法的测定，总孔隙度根据体积质量计算，计算公式为：土壤总孔隙度=[(土壤比重-土壤体积质量)/土壤比重]×100%；毛管孔隙度、非毛管孔隙度采用圆筒浸透法^[11]的测定；含水率采用烘干法^[12]的测定。入渗试验和体积质量、孔隙度及含水率的测定于 2018 年 10 月 9 日进行。

2.3 土壤入渗模型选择

本研究选择 Philip 模型、Horton 模型、Kostiakov 模型^[13-14]对不同处理小区果园土壤入渗过程进行模型拟合，如表 2 所示。

表 2 土壤水分入渗模型公式及参数说明

Table 2 Soil water infiltration model formula and parameter description

模型名称 Model name	公式 Formula	参数说明 Parameter description
Philip	$f(t) = (1/2)St^{1/2} + fc$	S 为土壤吸水系数; fc 为土壤稳定入渗速率(mm/min); $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)
Horton	$f(t) = fc + (f_0 - fc)e^{-kt}$	f_0 与 fc 分别为初始入渗速率和稳定入渗速率; k 为经验参数; $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)
Kostiakov	$f(t) = at^{-b}$	a 为初始入渗率(mm/min); b 为衰减系数; $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)

2.4 数据处理

采用 SPSS 21.0 进行显著性检验, 模型拟合采用 Origin8.0, 利用 Excel 2010 进行制图。

3 结果与分析

3.1 不同植被覆盖区土壤的物理特征

如表 3 所示, 不同植被覆盖区 0~20 cm 土层土壤体积质量和孔隙度不同, 具体表现为自然生草区紧实, 体积质量最大, 总孔隙度最小; 清耕区相对疏松, 体

积质量最小, 总孔隙度最大; 大豆区则介于自然生草区和清耕区之间。从大小孔隙的分布情况看, 自然生草区毛管孔隙度最小, 非毛管孔隙度最大; 大豆区则表现为毛管孔隙度最大, 非毛管孔隙度最小, 清耕区 2 种孔隙孔隙度介于自然生草区和大豆区之间。

清耕区 0~20 cm 土层土壤初始含水率最高, 为 10.44%, 自然生草区最低, 为 9.43%, 大豆区则介于清耕区和自然生草区之间。不同植被覆盖区 0~20 cm 土层土壤饱和含水率为 36.34%~39.22%。

表 3 不同植被覆盖区 0~20 cm 土层土壤物理性质

Table 3 0~20 cm soil layer soil physical properties in different vegetation cover areas

植被覆盖类型 Vegetation cover type	体积质量/(g cm ⁻³) Bulk density	初始含水率/% Initial moisture content	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙/% Non-capillary porosity
清耕 Clear farming	1.36±0.05	10.44±0.02a	48.65±1.92	40.37±1.56	8.08±0.74
自然生草 Natural grass	1.41±0.02	9.43±0.02c	46.91±0.63	38.02±2.04	8.89±1.14
大豆 Soy	1.38±0.02	10.08±0.06b	47.78±0.89	41.25±0.68	6.53±0.12

注 同列不同字母表示差异达到显著水平($p<0.05$), 下同。

Note Different letters in the same column indicated that the difference reached a significant level ($p<0.05$); The same as below.

3.2 不同植被覆盖区土壤水分入渗特征

不同植被区土壤入渗过程总体上可以分为 3 个阶段(图 2)。①入渗瞬变阶段(0~5 min): 入渗初期土壤含水率较低, 入渗水分在分子力的作用下, 使下渗锋面快速延伸。此阶段内土壤入渗速率较高, 入渗速率随时间急剧下降。②入渗渐变阶段(5~35 min), 此阶段主要是水分在毛细管引力和重力作用下填充土壤孔隙过程, 土壤入渗速率迅速降低。不同小区中, 自然生草区入渗速率的减少速度明显快于其他 2 种类型小区, 至 35 min 时自然生草区与其他 2 种小区的入渗速率已基本相当。③稳定入渗阶段(35 min 后), 土壤孔隙被水分充满达到饱和后, 水分在重力作用下向下渗透, 入渗速率相对稳定, 即为稳渗速率。

由表 4 可知, 不同植被覆盖区土壤水分入渗速率具有相同的变化趋势, 初始入渗速率最大, 平均入渗速率次之, 稳定入渗速率最小。3 种小区土壤初始入渗速率表现为: 自然生草区最大, 为 4.902 0 mm/min, 清耕区次之, 为 4.058 5 mm/min, 大豆区最小, 为 4.055 3 mm/min。自然生草区土壤初始入渗速率明显高于清耕区、大豆区 ($p<0.05$), 而清耕区、大豆区差异不显著。稳定入渗速率为: 清耕区最大, 自然生草区次

之, 大豆区最小, 其值依次为: 1.952 8、1.743 5、1.559 7 mm/min, 3 种小区之间土壤稳定入渗速率均有显著差异 ($p<0.05$)。平均入渗速率表现为: 清耕区最大, 大豆区次之, 自然生草区最小, 且清耕区与自然生草区、大豆区土壤的平均入渗速率差异明显, 而自然生草区与大豆区差异不明显。

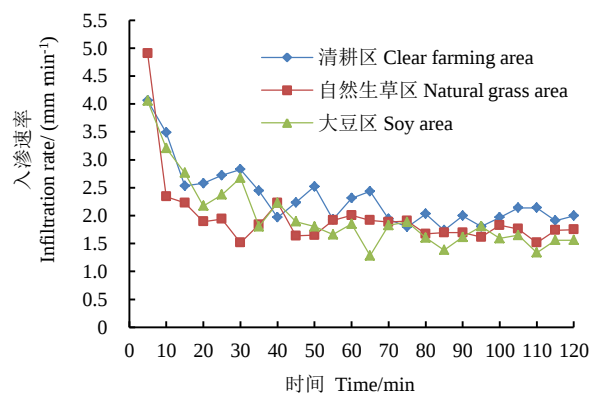


图 2 不同植被覆盖区土壤水分入渗过程

Fig.2 Soil water infiltration process in different vegetation cover areas

表 4 不同植被覆盖区土壤入渗特征
Table 4 Characteristics of soil infiltration in different vegetation cover areas

植被覆盖类型 Vegetation cover type	初始入渗速率 Initial infiltration rate/ (mm min ⁻¹)	平均入渗速率 Average infiltration rate/ (mm min ⁻¹)	稳定入渗速率 infiltration rate/ (mm min ⁻¹)
清耕 Clear farming	4.058 5±0.163 1b	2.312 2±0.023 8a	1.952 8±0.035 1a
自然生草 Naturagrass	4.902 0±0.009 8a	1.960 8±0.015 5b	1.743 5±0.004 5b
大豆 Soy	4.055 3±0.041 0b	1.982 6±0.010 5b	1.559 7±0.000 5c

3.3 土壤入渗模拟分析

采用 Philip 模型、Horton 模型和 Kostiakov 模型对不同植被覆盖区土壤水分入渗过程进行拟合, 比较不同模型的拟合优度 (表 5)。

Philip 模型中, S 表示土壤吸渗率, 反映了土壤入渗能力的大小, S 值越大, 表示土壤入渗能力越强。从拟合结果来看, S 值大小依次为大豆区最大, 其次为自然生草区, 清耕区最小, 与实测值存在一定偏差。

表 5 不同植被覆盖区土壤入渗模型拟合效果

Table 5 Fitting effect of soil infiltration model in different vegetation cover areas

植被覆盖类型 Vegetation cover type	Philip 模型 Philip model			Horton 模型 Horton model				Kostiakov 模型 Kostiakov model		
	S	f_c	R^2	f_0	f_c	k	R^2	a	b	R^2
清耕 Clear farming	12.053	1.365	0.846	4.543	2.006	-0.059	0.824	5.667	0.236	0.829
自然生草 Natural grass	13.244	0.919	0.704	15.826	1.796	-0.302	0.932	6.102	0.302	0.630
大豆 Soy	14.595	0.835	0.900	4.594	1.592	-0.056	0.886	6.624	0.320	0.895

4 讨论

土壤水分入渗是水分循环的一个重要环节, 决定了降水转化为土壤水以及径流水的大小, 直接影响降水资源的利用率。初始入渗速率、稳定入渗速率以及平均入渗速率是反映土壤入渗能力的常用指标。其中, 表层土壤的初始入渗率与超渗产流密切相关。本试验结果表明, 自然生草区土壤初始入渗速率明显高于清耕区和大豆区, 这与自然生草区植被覆盖度大 (60%)、土壤的初始含水率低有关。受草本植物根系影响, 土壤大孔隙 (非毛管孔隙) 多, 而在降雨 (入渗) 初期土壤水处于不饱和状态, 入渗率主要受土水势和土壤大孔隙流的控制^[17]。这与武晓莉等^[18]、胡阳等^[19]研究结论相一致。武晓莉等^[18]对晋西黄土区典型植被类型土壤水分特性研究发现, 非毛管孔隙对土壤入渗的影响最大, 其与初始入渗速率呈显著正相关关系。同样, 胡阳等^[18]对岩溶坡地荒地、草地、灌丛和

土壤稳定入渗速率 f_c 清耕区最大, 其次是自然生草区, 大豆区最小, 与实测值大小顺序一致, 但与实测值存在一定偏差。

Horton 模型中, f_0 代表初始入渗速率, 清耕区与大豆区土壤初始入渗速率分别为 4.543 mm/min, 4.594 mm/min 与实测值相差极小。土壤稳定入渗速率 f_c 清耕区最大, 为 2.006 mm/min, 其次是自然生草区, 为 1.796 mm/min, 大豆区最小, 为 1.592 mm/min, 其拟合结果与实测值大小顺序一致且偏差较小。

Kostiakov 模型中, 参数 a 为经验入渗系数, a 的主要影响因素有土壤含水率、结构、质地 和有机质等^[16], a 值的大小与初始入渗速率呈正比。清耕区、自然生草区、大豆区的 a 值分别为 5.667、6.102、6.624 与实测初始入渗速率的大小不一致, 说明拟合结果与实测存在一定偏差。

Philip 模型、Horton 模型和 Kostiakov 模型的决定系数 R^2 分别介于为: 从决定系数上来看和各参数所反映的结果来看, Horton 模型对土壤入渗过程拟合效果最好, Philip 模型次之, Kostiakov 效果较差。

林灌不同植被类型土壤水分入渗特征及影响因素的研究亦发现, 影响土壤初始入渗速率、稳定入渗速率的主要因素为土壤非毛管孔隙度, 且呈正相关关系。自然生草区土壤自然含水率最低, 而自然生草区土壤的初始入渗速率最高, 这与郭晓霞等^[20]研究结果一致, 其对黄土高原土壤水分入渗特性进行研究发现, 当 0~20 cm 土壤含水率较低时, 土壤水分初始入渗速率较高。稳定入渗速率是评价土壤物理特性的一个重要指标, 本试验结果表明, 不同小区土壤稳定入渗率为清耕区>自然生草区>大豆区。而赵梦杰等^[21]研究表明, 植被覆盖对稳定入渗率的影响比较明显, 植被覆盖度越高, 稳渗率越大; 何子淼等^[22]对黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟的研究也得出相似结论。清耕区植被覆盖度为 0, 而清耕区稳定入渗率大于自然生草区和大豆区, 这是由于清耕区人为的耕作除草, 土壤较为疏松, 不仅总孔隙度大, 大孔隙也相对较多。而大豆区初始入渗率和稳定入渗率

均最小,这可能与大豆区土壤体积质量大,且大孔隙少有关。刘澄静等^[23]研究亦表明,土壤渗透特性与土壤体积质量、总孔隙度存在显著相关关系,其中总孔隙度对土壤渗透性能产生的影响作用最大;陈家林等^[8]对太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素的研究也得出相同结论。土壤体积质量越小,总孔隙度越大,土壤水分入渗速率越大,入渗速率与体积质量呈负相关,与总孔隙度呈正相关。不同植被覆盖区土壤入渗速率均表现为:初始入渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率,这与闫建梅等^[17]研究川中丘陵区甜橙林、核桃林、水保林、梯平地、缓坡耕地这 5 种不同土地利用方式土壤入渗特征的研究结果一致。

运用 Philip、Horton、Kostiakov 模型这 3 种经典模型对红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗过程进行拟合发现,Horton 入渗模型对红枣经济林不同植被覆盖区土壤入渗过程拟合效果最好,这与武晓莉等^[18]对晋西黄土区的研究结论相似。而张志华等^[25]对太行山低山丘陵区土壤渗透性进行研究则发现,Kostiakov 拟合效果最好,Horton 模型次之,Philip 模型拟合效果最差。研究区域的不同可能是造成模型拟合效果差异的主要原因,但还需进一步深入研究

5 结 论

1)植被覆盖影响红枣经济林土壤水分入渗特征。清耕对照区土壤的初始入渗速率和稳定入渗速率分别为 4.058 5 mm/min 和 1.952 8 mm/min,自然生草区明显提高了土壤初始入渗速率,达 4.902 0 mm/min;大豆区土壤初始入渗速率和稳定入渗速率均低于自然生草区和清耕区。

2)自然生草提高了植被盖度,还有效提高了土壤非毛管孔隙度,从而提高了初始入渗速率;与清耕相比,大豆区降低了土壤总孔隙度和非毛管孔隙度,降低了土壤初始入渗速率和稳定入渗速率。

3)Horton 模型拟合效果最好,Philip 模型次之,Kostiakov 模型的拟合效果较差。

参考文献:

- [1] 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 Xuezhuan, FAN Guisheng. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 188-190.
- [2] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.
ZHANG Zhiwei, ZHU Zhangxiong, WANG Yan, et al. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in Karst slope[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 71-76.
- [3] 刘敏,王玉杰,赵洋毅,等.重庆缙云山水源涵养林地土壤水文效应[J].中国水土保持,2010(5):41-44,68.
LIU Min, WANG Yujie, ZHAO Yangyi, et al. Hydrological effects of soil in water conservation forest in Jinyun mountain of Chongqing[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(5): 41-44, 68.
- [4] 陈文静,祁凯斌,黄俊胜,等.川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响[J].生态学报,2017,37(15):4998-5006.
CHEN Wenjing, QI Kaibin, HUANG Junsheng, et al. Effect of reforestation with different tree species on soil water-holding capacity in western Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 4998-5006.
- [5] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].中国农学通报,2008,24(7):494-499.
LYU Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.
- [6] SEEGER M. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations[J]. Catena, 2007, 71(1): 56-67.
- [7] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 131-136.
- [8] 陈家林,孔玉华,裴丙,等.太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素[J].水土保持研究,2016,23(4):60-65.
CHEN Jialin, KONG Yuhua, PEI Bing, et al. Characteristics and influencing factors of soil infiltration under different vegetation types in hilly region of Taihang mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 60-65.
- [9] 侯秀丽,付登高,阎凯,等.滇中不同植被恢复策略下土壤入渗性能及其影响因素[J].山地学报,2013,31(3):273-279.
HOU Xiuli, FU Denggao, YAN Kai, et al. Soil infiltration and correlative analysis with some factors in the different restoration method in central Yunnan[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 273-279.
- [10] 彭新德,夏卫生.不同植被土壤水分入渗特征初探[J].热带作物学报,2012,33(10):1910-1913.
PENG Xinde, XIA Weisheng. Infiltration characteristics of soil moisture in different types of vegetation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(10): 1910-1913.
- [11] 陆欣,谢英荷.土壤肥科学[M].北京:中国农业大学出版社,2002.
LU Xi, XIE Yinghe. Soil and Fertilizer[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002.
- [12] 中科院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Laboratory of Soil Physics, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese

- Academy of Sciences. Method for determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [13] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- SHAO Mingan, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] 王则宇, 蒙仲举, 崔向新, 等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 112-117.
- WANG Zeyu, MENG Zhongju, CUI Xiangxin, et al. Soil infiltration characteristics of different plant communities in the Xilamuren grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 112-117.
- [15] 李天阳, 何丙辉, 田家乐, 等. 重庆璧山 5 种典型农林混合模式土壤理化性质及水分入渗特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 103-108.
- LI Tianyang, HE Binghui, TIAN Jiale, et al. Soil Physical and Chemical Properties and Soil Infiltration Characteristics of Five Agroforestry Types in Bishan, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 103-108.
- [16] 郭华, 樊贵盛. 土壤水分入渗参数的非线性预报模型[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 78-82.
- GUO Hua, FAN Guisheng. Nonlinear prediction model of soil water infiltration parameter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 78-82.
- [17] 闫建梅, 何丙辉, 田太强, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 53-57, 62.
- YAN Jianmei, HE Binghui, TIAN Taiqiang, et al. Soil infiltration and water-holding characteristics of different land use in Sichuan hilly basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 53-57, 62.
- [18] 武晓莉, 吕相海, 李国会, 等. 晋西黄土区典型植被类型的土壤水分特征[J]. 林业科学研究, 2014, 27(4): 487-492.
- WU Xiaoli, LV Xianghai, LI Guohui, et al. Comparative analysis of soil moisture characteristics under typical vegetation types in loess area of west Shanxi[J]. Forest Research, 2014, 27(4): 487-492.
- [19] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 597-604.
- HU Yang, DENG Yan, JIANG Zhongcheng, et al. Soil water infiltration characteristics and their influence factors on Karst hill slopes under different vegetation types[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 597-604.
- [20] 郭晓霞, 刘景辉, 田露, 等. 轮作条件下免耕对黄土高原旱作土壤水分入渗特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 112-117.
- GUO Xiaoxia, LIU Jinghui, TIAN Lu, et al. Effects of no-tillage on dryland soil water infiltration characteristics under rotation in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 112-117.
- [21] 赵梦杰, 姚文艺, 王金花, 等. 植被覆盖度对黄土高原地区土壤入渗及产流影响的试验研究[J]. 中国水土保持, 2015(6): 41-43, 67, 77.
- ZHAO Mengjie, YAO Wenyi, WANG Jinhua, et al. Experimental study on influence of vegetation coverage to soil infiltration and runoff-producing of the loess plateau region[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(6): 41-43, 67, 77.
- [22] 何子淼, 肖培青, 郝仕龙, 等. 黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 74-79.
- HE Zimiao, XIAO Peiqing, HAO Shilong, et al. Study on the change and simulation of soil infiltration parameters on the field grass slope in the loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 74-79.
- [23] 刘澄静, 角媛梅, 高璇, 等. 哈尼梯田水源区不同景观类型土壤水分的入渗特性及影响因子[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 99-105, 111.
- LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, GAO Xuan, et al. Soil water infiltration characteristics and its influencing factors in different landscape types in water source area of Hani terrace[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 99-105, 111.
- [24] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄丘区自然草地对坡面土壤入渗的影响机制[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 82-85, 98.
- LI Kun, YAO Wenyi, XIAO Peiqing, et al. Effects of vegetation on slope soil infiltration in the loess hilly region[J]. Yellow River, 2017, 39(6): 82-85, 98.
- [25] 张志华, 桑玉强, 孔玉华, 等. 太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 43-47, 78.
- ZHANG Zhihua, SANG Yuqiang, KONG Yuhua, et al. The variation of water infiltration rate over various slopes in Taihang mountain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 43-47, 78.

Characteristics of Soil Water Infiltration in Different Vegetation Cover of Jujube Economic Forest

LIU Huanhuan¹, WANG Gailing^{1*}, YIN Haishan², HE Runping³

(1. Institute of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030801, China;

2. Institute of Plant Protection, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China;

3. Agricultural Resource and Economy Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract: 【Objective】 We aimed to study the effects of different vegetation cover on soil water infiltration characteristics of jujube economic forest, to simulate the soil water infiltration process of different vegetation cover and select the optimal model of the study area. 【Method】 The soil water infiltration characteristics of jujube

economic forest under different vegetation cover were conducted by using the field double-ring infiltration test method. The soil water infiltration process of different vegetation cover areas was stimulated by using Philip model, Horton model and Kostikov model. **【Result】** ①The soil infiltration rate of different vegetation cover areas showed the initial infiltration rate was the highest, the average infiltration rate being second, and the stable infiltration rate was the lowest; ②The initial infiltration rate of soil in natural grassland was the largest, while the average infiltration rate and the stable infiltration rate of the soil in the clearing area were the highest, and the initial infiltration rate, the average infiltration rate and the stable infiltration rate of the soil in the clearing area and the natural grass area were significantly different. ③The Horton infiltration model had the best fitting effect on soil infiltration process in different areas. The fitting effect of Philip infiltration model was second, and the Kostikov infiltration model had the worst fitting effect. **【Conclusion】** The characteristics of soil water infiltration under different vegetation cover of red jujube economic forest were significantly different. The Horton infiltration model is more suitable for studying the soil water infiltration process of the jujube economic forest in this area.

Key words: Jujube economic forest; vegetation cover; water infiltration

责任编辑:白芳芳

(上接第 51 页)

Three-dimensional Model and Verification of Soil Wetting Front Migration in Negative Head Environment

ZHU Jun, LI Ting, XIE Tian, ZHANG Aiming*

(China Institute for Radiation Protection Key Laboratory of Nuclear Environmental Simulation and Evaluation Technology, Taiyuan 030006, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to control soil water content more effectively and guide water-saving irrigation. **【Method】** The sand and loam in Yuci area of Shanxi Province were selected to establish soil wetting front migration experiments under three kinds of negative head height (0 m, -0.5 m, -1.0 m). The negative head soil moisture wetting front migration test and Hydrus-3D soil moisture migration numerical model were used to research the law of soil moisture wetting front migration and the validity of the model. **【Result】** The cumulative infiltration increases with the increase of time, and also can be expressed by power function. With the increase of time, the wetting front gradually expands to horizontal and vertical directions, and not only the curve presents a 1/4 elliptic shape, but also the maximum wetting distance with the square root of time can be expressed by linear relation. The infiltration velocity of wetting front decreases with the increase of negative head height and can be expressed by power function too. The measured wetting front envelope area at negative head of -0.5 m and -1.0 m was used as model validation data. The deviation of wetting front envelope area between numerical calculation and measured, is 0.51%~7.21% for sandy soil and 0.22%~16.03% for loam. **【Conclusion】** The three-dimensional model can be used to describe the migration characteristics of soil wetting front in negative head environment, and to predict the movement and distribution of moisture content under different conditions.

Key words: negative head; cumulative infiltration; water front; infiltration velocity; Hydrus-3D

责任编辑:韩洋