

容重对红壤条件下涌泉根灌水分入渗能力影响

刘风华¹, 代智光², 费良军³

(1. 河北水利电力学院水利工程学院, 河北 沧州 061001;

2. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099; 3. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: 为研究红壤地区土壤容重对涌泉根灌水分入渗能力的影响, 以江西红壤为例, 采用室内试验, 研究了不同容重条件下红壤涌泉根灌水分运移及其分布特性。结果表明: 容重对土壤入渗能力有显著影响。随着容重的减小, 湿润锋、累积入渗量、入渗率均呈增大趋势, 且容重越小, 减小的幅度越大。湿润锋、累积入渗量以及稳渗率与土壤容重均呈幂函数负相关关系; 对于同一深度土层, 土壤容重越大, 对应的土壤含水率越小, 在水分再分布过程中容重对含水率分布的影响逐渐减弱。通过 Kostiakov 入渗模型表明, 土壤初始入渗速率随容重增大而减小, 且容重越大, 入渗能力的衰减速度也越快。研究结果可为涌泉根灌技术在红壤地区的推广应用提供理论依据。

关键词: 容重; 红壤; 涌泉根灌; 水分入渗

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0086-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.015

The Influence of Bulk Density on Water Infiltration Capacity in Red Soil Under Surge-root Irrigation

LIU Fenghua¹, DAI Zhiguang², FEI Liangjun³

(1. Department of Transportation Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering,

Cangzhou, Hebei 061001; 2. School of Water Resources and Ecological Engineering, Nanchang Institute of

Technology, Nanchang 330099; 3. Research Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to explore the effect of soil bulk density on the water infiltration capacity under surge-root irrigation (SRI) in red soil regions, an experiment of water infiltration was carried out under different soil bulk density levels of red soil for SRI in soil bins. The results showed that the bulk density had a significant effect on soil infiltration capacity. With the decrease of soil bulk densities, wetting front migration, the cumulative infiltration and the infiltration rates showed increasing trends. The smaller the bulk density was, the greater decrease occurred. The wetting front migration, the cumulative infiltration and the steady infiltration rates and soil bulk densities were negatively correlated as power functions. For the same depth soil layer, the smaller the soil moisture content was observed in the larger the soil bulk density. The effect of bulk densities on the water content distribution was gradually weakened during the water redistribution process. The Kostiakov infiltration model showed that the initial infiltration rates of the soil decreased with the increase of bulk densities. Under the greater the bulk density, the infiltration capacity decreased more fastly. This research could lay the foundation for the popularization and application of SRI technology in red soil areas.

Keywords: bulk density; red soil; surge-root irrigation; water infiltration

红壤作为中国南方分布最广的地带性土壤之一, 合理和科学利用红壤资源, 对我国农业意义重大。红壤地区气候条件优越, 光热充足, 生长季节长, 因此生产潜力很大^[1]。随着农业的发展, 红壤贫瘠的缺点日益凸显, 人们往往通过过量灌溉的方法来提高作物产

量, 这不仅导致灌溉水利用效率低下, 而且破坏了土壤结构, 造成当地土壤侵蚀和养分流失问题突出。因此, 要保证红壤地区农业的可持续发展, 必须进行合理的灌溉。

涌泉根灌是在滴灌基础上改进的一种微灌新技术

术,其通过微管把水肥直接输送到作物根区,有效减少了土壤水分的无效蒸发,并有显著的增产效益^[2-3]。与常规滴灌技术相比,具有流量大、抗堵能力强等优点,特别适用于经济林木的灌溉。

土壤入渗能力对提高灌溉水利用效率意义重大。相关学者对涌泉根灌土壤水分入渗特性进行了大量研究,刘显等^[4]研究了肥液浓度对土壤水分分布的影响,结果表明,湿润体内土壤含水率随着肥液浓度的增大而增大;樊晓康^[5]研究了滴头流量、灌水量及滴头埋深对均质黏壤土湿润体变化的影响,结果表明滴头流量和灌水器埋深对土壤入渗湿润体影响较大;李耀刚等^[6]利用 Hydrus-3D 模型对涌泉根灌土壤水分运移进行了模拟,并用实测资料进行了验证;汪有科等^[7]利用剖面法研究了孔径和孔深对涌泉根灌土壤水分运移规律的影响;费良军等^[8]研究表明容重对黄壤土条件下涌泉根灌土壤水分运移特性影响显著。大量研究表明,土壤质地、埋深、初始含水量以及容重等因素对土壤水分入渗能力的影响均较大,其中土壤容重的影响尤为显著。近年来,相关学者关于容重对土壤入渗的影响也开展大量研究^[9-12],迄今为止,关于容重对红壤条件下土涌泉根灌水分入渗能力影响的研究还未见报道。基于此,本文通过室内土箱开展红壤条件下涌泉根灌水分入渗试验,研究容重对红壤土涌泉根灌土壤水分入渗能力的影响,确定容重与红壤涌泉根灌水分入渗能力的定量关系,以期对涌泉根灌技术在红壤地区的推广应用提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验土壤

试验于 2018 年 4 月在南昌工程学院灌溉排水实验室进行,供试土壤取自江西省进贤县田间表层 0—50 cm 熟土,土壤经自然风干后进行研磨,过 2 mm 筛备用。土壤颗粒组成用激光粒度分析仪(MS2000 型,马尔文,英国)测定,粒径为 $0 < d \leq 0.002$ mm, $0.002 < d \leq 0.02$ mm, $0.02 < d \leq 2$ mm 的颗粒分别占 9.14%, 40.24%, 50.62%(体积分数),按国际制分级标准判定为壤土。

1.2 试验装置

试验装置主要由马氏瓶、土箱和灌水器组成(图 1)。马氏瓶用于提供恒定水头,其内径为 14 cm,高为 100 cm,通过调整出口开关来控制出流流量;土箱材质为有机玻璃,尺寸为 50 cm×50 cm×100 cm(长×宽×高);灌水器长度为 20 cm,内径为 4 cm,在其下部 10 cm 范围内均匀开孔,开孔率为 20%,取 1/4 用玻璃胶粘于土箱一角,并用纱布包裹以避免土壤颗粒堵塞灌水器。

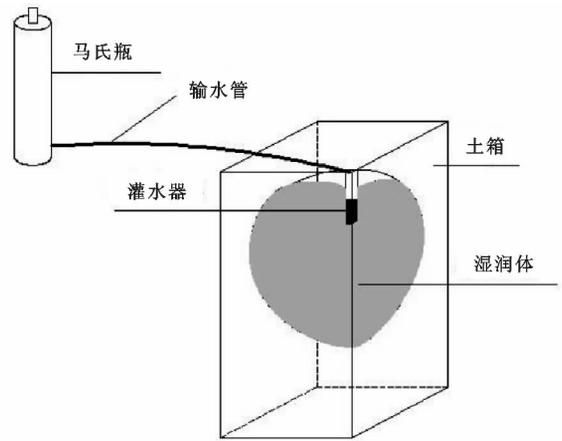


图 1 试验装置示意

1.3 试验设计

试验土壤初始含水量为 7.60%,设定初始流量为 5 L/h,灌水时间为 120 min。土壤容重设置 5 个水平,分别为 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45 g/cm³。将试验土壤按容重分层(每层 5 cm)装入土箱,层间打毛,自然沉降 24 h 后开始试验,按先密后疏的原则设定时间间隔,观测马氏瓶读数,同时以灌水器底部为起点,用直尺测量湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离,试验结束后用塑料薄膜覆盖以防止蒸发。在试验结束时、重分布 1, 3 天在距离灌水器水平距离 5 cm 处使用土钻取土,每隔 10 cm 取 1 次样,取土深度为 100 cm。每组试验重复 3 次,取其平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤容重对剖面湿润锋运移特性的影响

由图 2 可知,在同一容重条件下,剖面各向湿润锋运移距离均表现出随着时间的延长而增大的趋势,但增长速度逐渐变慢。在不同容重条件下,各向湿润锋的运移距离存在明显差异,当试验结束时,除容重为 1.25, 1.30 g/cm³ 外,其他 3 个容重对应湿润锋向上运移均未达到土箱表面;容重为 1.25 g/cm³ 时,湿润锋向下运移距离最大,其值为 20.4 cm,相比其他容重,分别增大了 7.93%, 16.57%, 23.63% 和 30.77%;湿润锋水平最大运移距离也出现在容重为 1.25 g/cm³ 时,其值为 29.1 cm,相比其他容重,分别增大了 10.64%, 21.75%, 32.27%, 40.58%。这是由于容重小的土壤,大孔隙较多,土壤内部的连通性较好,因此土壤水分运移距离也较远;而随着土壤容重的增大,特大孔隙及大孔隙含量急剧下降,细小孔隙也逐渐减少,土壤内部的连通性变差,土壤水分的运移也受到了严重阻碍,因此湿润锋运移距离也逐渐减小,这与曾健等^[13]的研究结果一致。

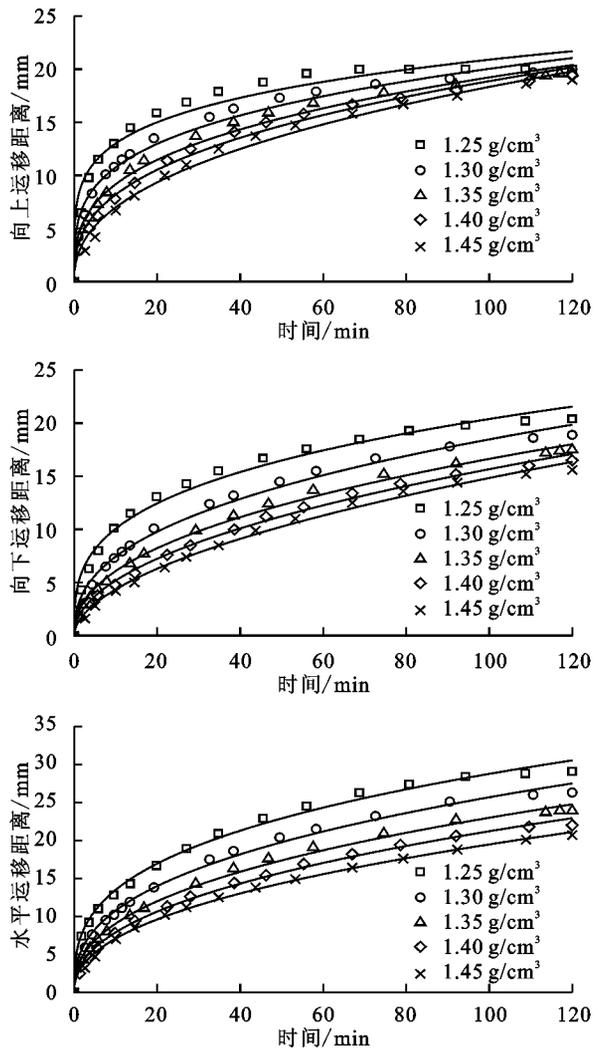


图 2 不同容重土壤剖面湿润锋运移距离

表 1 土壤剖面湿润锋运移距离拟合

容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	竖直向上		竖直向下		水平	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
1.25	$Z=8.104t^{0.206}$	0.928	$Z=4.974t^{0.306}$	0.976	$Z=6.329t^{0.329}$	0.992
1.30	$Z=5.777t^{0.270}$	0.975	$Z=2.997t^{0.395}$	0.988	$Z=4.512t^{0.378}$	0.994
1.35	$Z=4.378t^{0.321}$	0.984	$Z=2.224t^{0.437}$	0.994	$Z=3.569t^{0.404}$	0.994
1.40	$Z=3.558t^{0.362}$	0.987	$Z=1.721t^{0.480}$	0.996	$Z=2.940t^{0.429}$	0.995
1.45	$Z=2.667t^{0.419}$	0.985	$Z=1.277t^{0.533}$	0.993	$Z=2.573t^{0.440}$	0.997

注: Z 为湿润锋运移距离(cm); t 为入渗历时(min)。

表 2 土壤剖面湿润锋运移模型参数拟合

运移方向	拟合参数			
	A	R^2	b	R^2
竖直向上	$A=40.307r^{-7.304}$	0.996	$b=1.397\ln r-0.102$	0.996
竖直向下	$A=31.119r^{-8.845}$	0.985	$b=1.456\ln r-0.005$	0.981
水平	$A=22.875r^{-6.027}$	0.978	$b=0.740\ln r+0.175$	0.953

2.2 土壤容重对累计入渗量及入渗率的影响

通过对试验数据分析,发现容重对土壤累计入渗量及入渗率均有显著影响。当容重为 1.25 g/cm^3 时,累计入渗量为 9.57 L ,而容重为 1.45 g/cm^3 对应的累计入渗量仅为 5.19 L ,减小了 45.77% (图 3),这是由于土壤水分入渗主要受土壤中的大孔隙和传导孔隙影响,当容重较小时,毛管作用弱的大孔隙较

经分析,红壤涌泉根灌条件下水分入渗在竖直向上、竖直向下和水平方向上的湿润锋运移距离均与时间(t)呈幂函数关系,即

$$Z=At^b \quad (1)$$

式中: Z 为红壤涌泉根灌湿润锋随时间运移距离(cm); A 、 b 为拟合参数。

用公式(1)分别对图 2 中湿润锋运移距离数据进行拟合,可得土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系见表 1。

由表 1 可知,拟合公式的相关系数 R 均大于 0.963 ,且大于其对应的临界相关系数($R_{0.01}=0.6055$),说明涌泉根灌土壤水分入渗过程中各方向剖面湿润锋运移距离与时间的变化规律符合幂函数正相关关系。

为进一步分析容重对湿润锋运移特性的影响,本文对参数 A 和 b 与土壤容重之间进行相关分析,结果见表 2。

$$\text{竖直向上: } Z=(40.307r^{-7.304})t^{1.397\ln r-0.102}$$

$$\text{竖直向下: } Z=(31.119r^{-8.845})t^{1.456\ln r-0.005} \quad (2)$$

$$\text{水平: } Z=(22.875r^{-6.027})t^{0.740\ln r+0.175}$$

式中: r 为土壤容重(g/cm^3); t 为入渗时间(min)。

为验证模型精度,采用该模型拟合容重为 1.25 g/cm^3 的涌泉根灌水分入渗湿润锋剖面运移距离,拟合结果见表 3。

由表 3 可知,红壤涌泉根灌各方向湿润锋运移距离的拟合值与实测值的相对偏差均在 $\pm 10\%$ 以内,因此认为采用公式(2)来预测不同容重条件下红壤涌泉根灌水分入渗的剖面湿润锋运移距离是合理的。

多,对应的过流面积也较大,因此水分的流动通道也越畅通^[14]。同时可以看出,当容重从 1.25 g/cm^3 增大到 1.35 g/cm^3 时,累计入渗量和入渗率的下降速率均较快,当容重从 1.35 g/cm^3 增大到 1.45 g/cm^3 时,累计入渗量和入渗率的下降速率开始变慢。

为进一步分析容重对累计入渗量和稳定入渗率的影响,本文对土壤累计入渗量以及稳渗率与土壤容重关系进行了拟合(图 4)。土壤累计入渗量及稳定入渗率与土壤容重均符合幂函数负相关关系($R_{0.01}=0.9587$),这说明当土壤容重较小时,土壤累计入渗量及稳定入渗率受容重的影响很大,随着容重的增大,容重的影响逐渐变小。

表 3 湿润锋运移距离实测值与模型拟合值对比

运移方向	入渗距离	入渗时间/min							
		10	20	30	45	60	80	100	120
竖直向上	拟合值/cm	12.80	14.81	16.12	17.55	18.64	19.80	20.75	21.56
	计算值/cm	13.00	15.90	16.50	18.00	19.50	20.00	20.00	20.00
	相对偏差/%	-1.55	-7.39	-2.36	-2.56	-4.60	-1.00	3.61	7.23
竖直向下	拟合值/cm	9.03	11.27	12.83	14.61	16.02	17.57	18.86	20.00
	计算值/cm	9.50	12.10	14.10	15.20	17.00	18.30	19.50	20.40
	相对偏差/%	-5.19	-7.33	-9.86	-4.02	-6.11	-4.18	-3.37	-2.01
水平	拟合值/cm	13.04	16.51	18.95	21.76	23.99	26.46	28.55	30.37
	计算值/cm	12.80	16.70	19.20	22.10	24.20	27.00	28.80	29.10
	相对偏差/%	1.87	-1.14	-1.30	-1.58	-0.86	-2.04	-0.89	4.19

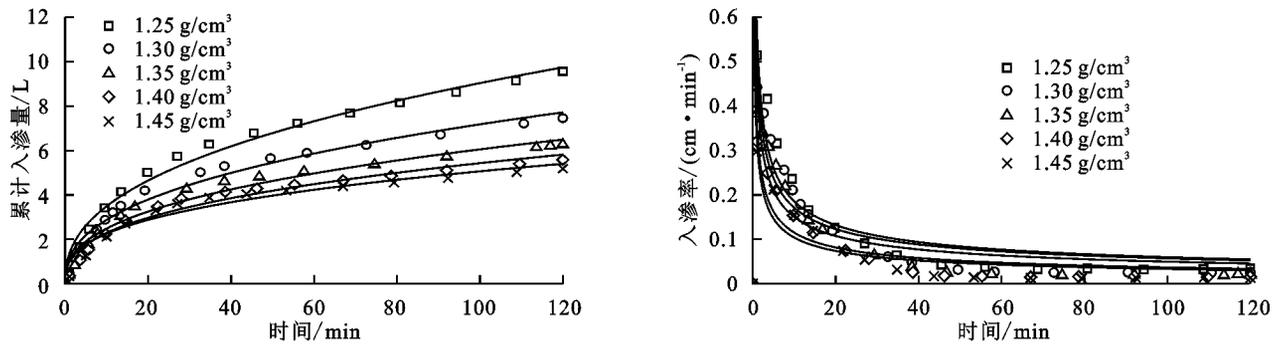


图 3 不同容重土壤累计入渗量及入渗率随时间的变化

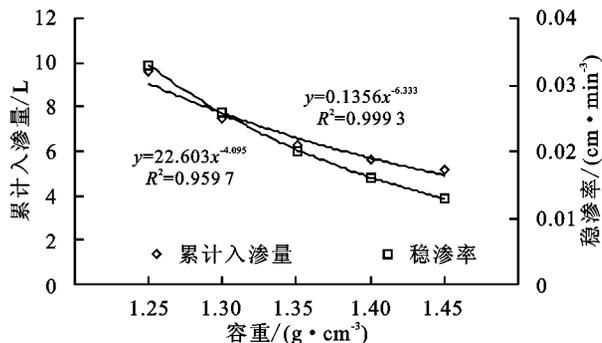


图 4 土壤累计入渗量及稳定入渗率与土壤容重的关系

2.3 容重对土壤剖面含水率分布的影响

土壤中水分再分布对各层土壤中水分含量的分布影响较大,进而直接影响土壤水分的有效性以及植物的水分吸收^[15-16],一般认为灌水后 2~3 天土壤水分运动基本稳定。图 5 为不同土壤容重影响下灌水结束时刻以及重分布 1,3 天时各土层质量含水量分布。可以看出,在灌水结束时,土壤含水率的最大值均出现在 20 cm 深度处,且土壤容重越小,土壤含水率越高,而在重分布阶段,剖面含水率的峰值有所减小且其对应深度也有所下降,这是由于水分向土壤深层运动造成的。无论在灌水结束时刻或再分布,对于同一深度而言,土壤容重越大其含水率越小,含水率与土壤容重呈负相关的关系,与刘乐等^[17]的研究结果一致,这是由于土壤容重越大其空隙含量越少,土壤中持水能力减弱造成的。土壤水分再分布过程中,在基质势以及重力势的作用下,土壤中水分向水平以及竖直深层运动,而容重越大,土壤水分再分布运移距离越小。

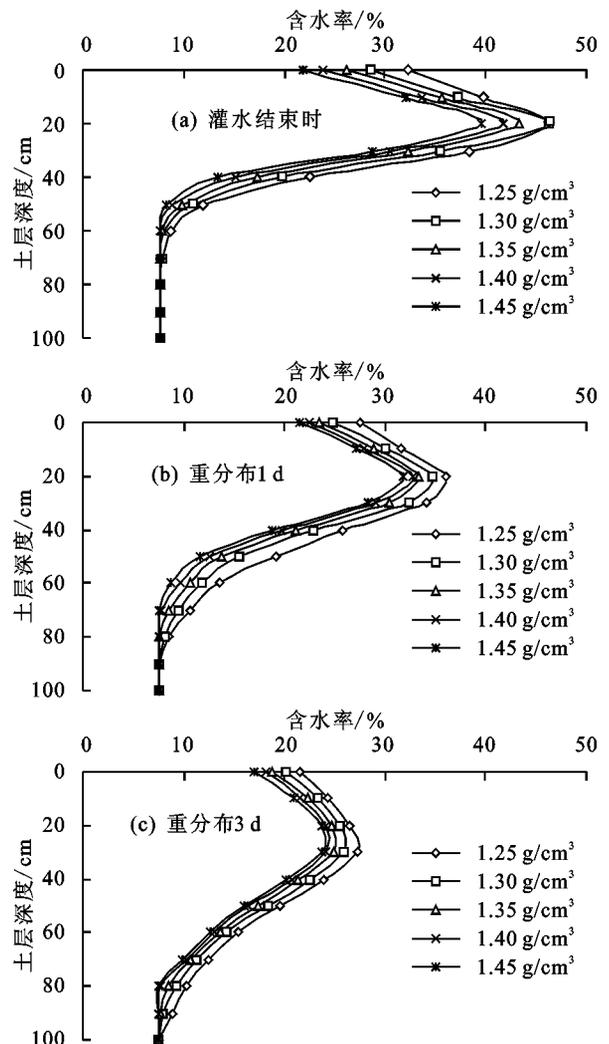


图 5 不同土壤容重下各土层含水量分布

2.4 土壤容重对入渗模型参数的影响

基于土壤水分入渗的基本理论—达西定律,国内外学者相继提出了 Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Horton 模型以及 Philip 模型等一系列模型,其中 Kostiakov 模型由于公式简单精确,在生产实践中得到了大量应用^[18],其公式为:

$$f(t) = Kt^{-\alpha} + A \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(cm/min); t 为累计入渗时间(min); A 为稳定入渗率(cm/min); K 为模型参数,主要反映入渗开始后第 1 个单位时段内的平均入渗速率; α 为土壤入渗的经验指数,其大小反映土壤入渗能力的衰减速度。

由表 4 和图 6 可知,随着容重的增大, K 值逐渐减小,而 α 值逐渐增大,当容重从 1.25 g/cm^3 增大至 1.45 g/cm^3 时, K 值从 0.544 减小到 0.312, α 值从 0.511 增大到 0.562。在置信区间为 95% 的水平下,土壤容重与模型参数 K 值表现出幂函数关系,与模型参数 α 表现出对数函数关系。

表 4 Kostiakov 模型拟合结果

容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Kostiakov 模型	K	α	R^2
1.25	$f(t) = 0.544t^{-0.511} + 0.033$	0.544	0.511	0.863
1.30	$f(t) = 0.487t^{-0.532} + 0.026$	0.487	0.532	0.861
1.35	$f(t) = 0.435t^{-0.546} + 0.020$	0.435	0.546	0.856
1.40	$f(t) = 0.346t^{-0.555} + 0.016$	0.336	0.555	0.848
1.45	$f(t) = 0.312t^{-0.562} + 0.013$	0.312	0.562	0.832

注 $f(t)$ 为入渗率(cm/min); t 为累计入渗时间(min)。

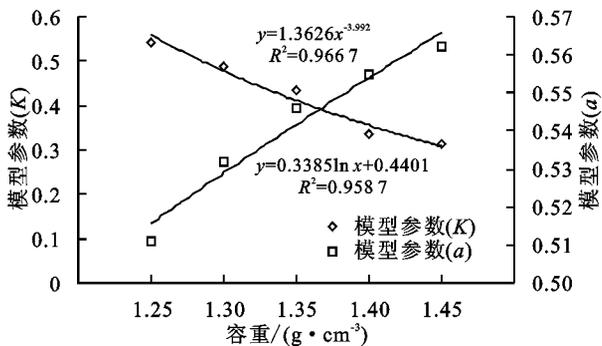


图 6 土壤容重与 Kostiakov 入渗模型参数关系

模型参数 K 的物理意义是指土壤第 1 个单位时间段(1 min)的平均入渗速率,是反映土壤入渗能力的一个重要指标,主要受土壤质地、土壤容重以及初始含水率等的影响^[19]。对于同一质地土壤而言,当其初始含水率一致时,土壤容重则成为决定 K 值大小的主要因素,而土壤容重与孔隙度密切相关,当土壤容重小时,土壤孔隙度大,特别是大孔隙含量较多,这都为土壤水分入渗提供了极其便利的条件。随着土壤容重的逐渐增大,土壤孔隙度逐渐减小,特别是大孔隙数量的急剧减小,导致入渗初期土壤的导水能

力迅速下降,土壤入渗能力也表现出逐渐降低的趋势^[18]。 K 值作为土壤初始入渗能力的特征参数,也表现出随着土壤容重增大而减小的趋势。

模型参数 α 为经验入渗指数,是反映土壤入渗能力的衰减速度的一个重要指标, α 值越大,土壤入渗能力的衰减速度也越快。对于同一质地的土壤,当土壤容重较小时,土壤内空隙主要以大孔隙为主,连通性好,土壤导水能力强,随着土壤水分的入渗,土壤内部的气体能快速排出,对土壤结构影响较小,因此入渗速度的衰减较慢^[7]。随着土壤容重的逐渐增大,土壤内的大孔隙数量急剧减小,土壤空隙以细小空隙为主且彼此连通性差,此时,随着入渗的进行,土壤排气通道不畅,土壤导水能力低,因此土壤入渗能力也迅速衰减,此时在模型上也表现出随着容重的增大, α 逐渐增大的趋势。

3 结论

容重对红壤涌泉根灌水分入渗能力存在显著影响,随着容重的增大,剖面湿润锋运移距离、累计入渗量以及入渗率均呈逐渐递减趋势,容重越大,递减的速率越小;剖面各向湿润锋的运移距离随时间的变化均呈现幂函数正相关关系,随着容重的增大,土壤累计入渗量和入渗率逐渐减小,累积入渗量以及稳渗率与容重均呈幂函数负相关关系;红壤涌泉根灌水分入渗过程符合 Kostiakov 模型,参数 K 与容重呈幂函数负相关关系,参数 α 与容重呈对数正相关关系,这说明土壤初始阶段入渗能力随着容重的增大而降低,而土壤水分的入渗衰减速度则随着容重的增大而增大。

参考文献:

- [1] 史志华,杨洁,李忠武,等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J]. 水土保持学报,2018,32(1):6-9.
- [2] 费良军,傅渝亮,何振嘉,等. 涌泉根灌肥液入渗水氮运移特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(6):121-129.
- [3] Dai Z G, Fei L J, Li P, et al. Suitable strategy of water-nitrogen management for surge-root irrigation of jujube in China [J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1390-1401.
- [4] 刘显,费良军,刘扬,等. 肥液浓度对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):166-170.
- [5] 樊晓康. 涌泉根灌土壤湿润体影响因素的试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [6] 李耀刚,王文娥,胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(6):546-552.
- [7] 汪有科,黎朋红,马理辉,等. 涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(5): 449-454.

- Biogeochemistry, 2006, 77(1): 1-23.
- [5] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1266-1273.
- [6] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 446-452.
- [7] Shi Z, Yue B, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 257-267.
- [8] Ma W, Li Z, Ding K, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation [J]. Geomorphology, 2014, 226: 217-225.
- [9] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 62-66.
- [10] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.
- [11] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 30-33.
- [12] Lin C, Tu S, Huang J, et al. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 105(2): 307-312.
- [13] 罗付香, 刘海涛, 林超文, 等. 不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 12-20.
- [14] 马波, 吴发启, 陈宇, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 118-123.
- [15] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 81-88.
- [16] 王全九, 穆天亮, 王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 176-179.
- [17] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2492-2500.
- [18] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 玉米植株冠层截留分异特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 208-211.
- [19] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 954-963.
- [20] Kalbitz K, Solinger S, Park J H. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. Soil Science, 2000, 165(4): 271-277.
- [21] Kaiser K, Kaupenjohann M, Zech W. Sorption of dissolved organic carbon in soils: Effects of soil sample storage, soil-to-solution ratio and temperature [J]. Geoderma, 2001, 99(3/4): 311-317.
- [22] 喻艳红, 张桃林, 李清曼, 等. 温度和水土比对红壤吸附低分子量有机酸的影响[J]. 土壤, 2011, 43(1): 42-50.
- [23] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2014, 51(4): 172-180.
- (上接第90页)
- [8] 费良军, 刘显, 王佳, 等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 219-228.
- [9] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 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.
- [10] 裴青宝, 赵新宇, 张建丰, 等. 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.
- [11] 脱云飞, 费良军, 董艳慧, 等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 6-11.
- [12] 刘小刚, 朱益飞, 余小弟, 等. 不同水头和土壤容重下微润灌溉体内水盐分布特性[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 189-197.
- [13] 曾健, 费良军, 裴青宝. 土壤容重对红壤水分垂直入渗特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1081-1087.
- [14] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126.
- [15] Liang W L, Kosugi K, Mizuyama T. Soil water redistribution processes around a tree on a hillslope: The effect of stemflow on the dry in process [J]. Ecohydrology, 2016, 8(8): 1381-1395.
- [16] Guhr A, Borken W, Spohn M, et al. Redistribution of soil water by a saprotrophic fungus enhances carbon mineralization [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(47): 47-51.
- [17] 刘乐, 费良军, 曾健, 等. 土壤容重对土壤水氮垂直运移影响特征研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 网络优先出版.
- [18] 郭华, 樊贵盛. 考虑土壤结构变形的 Kostiakov 入渗模型参数非线性预报模型[J]. 节水灌溉, 2015(12): 11-15.
- [19] S A 泰勒. 物理的土壤学[M]. 华孟, 陈志雄, 杨苑璋, 等译. 北京: 农业出版社, 1983: 27-86.