

# 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验

李卓<sup>1</sup>, 吴普特<sup>2\*</sup>, 冯浩<sup>2</sup>, 赵西宁<sup>2</sup>, 黄俊<sup>3</sup>, 庄文化<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 通过人工改变土壤颗粒级配, 配制典型砂壤、中壤、黏壤, 并设置不同容重水平, 用土柱积水入渗模拟了土壤容重对其入渗能力的影响, 为土壤改良和促进天然降水转化利用提供理论依据。结果表明, 容重对土壤入渗能力有较大影响。试验土壤入渗能力随容重增大递减, 3 种典型土壤稳定入渗速率与容重均呈对数负相关, 砂壤 120 min 累积入渗量与容重呈幂函数负相关, 中壤、黏壤则呈线性负相关。考斯加科夫入渗模型中, 表征初始入渗速率的参数随容重增大递减, 表征入渗能力衰减速度的参数则随容重增大递增, 说明土壤初始入渗能力随容重增大递减, 入渗能力衰减速度随容重增大递增。

**关键词:** 土壤水分, 入渗, 土壤容重, 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.06.007

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>2, S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-6-0040-06

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.

Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J].

Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 40-45. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤水分入渗是水分通过全部或部分地表向下流动进入土壤、在土壤中运动和存储, 形成土壤水的过程<sup>[1,2]</sup>, 是大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节<sup>[3]</sup>。对土壤水分入渗的研究不仅有助于促进非饱和带土壤水分入渗和迁移基础理论研究的发展, 而且可为综合评价地表、地下水资源, 合理确定农田灌溉技术参数提供科学依据<sup>[4]</sup>。据有关研究, 土壤入渗能力主要受土壤机械组成、水稳性团聚体含量、土壤容重、有机质含量及土壤初始含水量等的影响<sup>[5-9]</sup>。土壤容重受土粒密度和孔隙两方面的影响, 但主要是受孔隙的影响, 所以土壤容重本质上是土壤紧实程度及气相比例的间接反映。土壤水分的入渗本质是水分在土体里流动而不断深入的过程, 其速率主要受水流通道——土壤孔隙的影响, 其他影响土壤入渗的因素大多是通过影响孔隙状况来影响的。所以土壤容重对水分入渗势必会有较大影响。关于土壤容重对入渗能力的影响学者们作了不少研究, 一个基本的结论是: 同一质地的土壤, 其水分入渗率会随容重的增大而减小, 因为随土壤容重的增加, 土壤团粒结构丧失、土壤孔隙减小、土壤变得紧密坚实, 导致入渗能力降低<sup>[10-13]</sup>。

虽然关于土壤容重对水分入渗的影响已有较多研究, 但主要是采用不同土壤容重区域多点采样的方法来完成。

采用这样的方法可以定性阐明土壤容重对入渗能力的影响, 但由于土壤性质空间变异性较大以及影响入渗性能参数较多和研究方法受限制等问题, 土壤容重对入渗能力影响的量化研究受到很多限制。本文采用自然土壤中添加沙粒及人工黏土、人工粗土的方法, 配制典型砂壤、中壤、黏壤, 研究容重对土壤水分入渗能力的定量影响和规律, 为土壤改良和促进农田降水转化提供理论依据。采用这样的方法可以控制其他参数不变, 有效排除影响入渗的其他因素对试验结果的影响, 克服了田间试验不可控制因素较多, 试验随机误差较大等缺点, 可以较好地得出容重对入渗影响的量化结果。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤制备

试验所用自然土壤采自陕西杨凌二道塬农田地表 40 cm 以下, 以减小耕层有机质的影响。将所采集土壤烘干、研磨, 过 0.45 mm 筛, 测定各级颗粒组成。所用沙子采自渭河沙滩, 过 0.45 mm 筛, 测定各级颗粒组成。黏土、粗土用自然土壤依据司笃克斯沉降原理采用沉降的方法制备, 即土粒沉降的速度依其粒径的大小而不同, 粒径越大, 沉降速度越快; 粒径越小, 沉降速度越慢。具体制备方法是: 在内径 50 cm, 高 70 cm 大桶中放入经研磨、过 0.45 mm 筛的自然土壤 10 kg 左右, 加水 100 kg 左右, 快速搅拌 10 min, 均匀至桶底无沉淀且使土粒尽量分散, 静置 30~50 h, 澄清后将水用虹吸的方法吸出, 取泥层上部 1/4 为黏土, 下部 3/4 为粗土。将所取土壤烘干, 研磨, 过 0.45 mm 筛。所需制备土壤经几次制备够用后, 将几次所制土壤放一起搅拌均匀, 测定各级颗粒组成。土壤颗粒分析用 MS2000 激光粒度仪。依据土壤质地三角图, 往自然土壤中添加砂粒、人工粗土、人工黏土, 配制典型的砂壤、中壤、黏壤。试验土壤原料成份见表 1。所用自然土

收稿日期: 2008-11-27 修订日期: 2009-05-18

基金项目: 国家 863 计划课题“降水资源转化利用技术”(2006AA100204);

新世纪优秀人才支持计划(01140602); 国家自然科学基金课题(40701092)

作者简介: 李卓(1979-), 男, 山西吕梁人, 博士生, 主要从事水土资源

高效利用方面研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。

Email: lizhuo\_2000@sina.com

\*通讯作者: 吴普特(1963-), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士生导师,

主要从事水土保持与节水农业等方面的研究工作。杨凌 中国科学院水利部

水土保持与生态环境研究中心, 712100。Email: gizwpt@vip.sina.com

壤、沙子、人工粗土、人工黏土等试验材料及配制成的试验土壤颗粒组成见表 2。

表 1 试验土壤原料比例

Table 1 Proportion of raw materials in experimental soil

	沙子/%	人工黏土/%	人工粗土/%	自然土壤/%
砂壤	50	0	10	40
中壤	15	0	20	65
黏壤	0	20	0	80

表 2 原料及试验土壤各级颗粒含量

Table 2 Particle size distributions of raw material and experimental soil

粒径/mm	自然土壤 /%	沙子 /%	人工黏土 /%	人工粗土 /%	砂壤 /%	中壤 /%	黏壤 /%
1~0.25	0.8	11.6	0.4	0.9	6.2	2.4	0.7
0.25~0.05	8.5	81.7	2.6	10.5	45.3	19.9	7.3
0.05~0.01	30.0	3.7	6.1	38.0	17.7	27.7	25.2
0.01~0.005	11.6	1.6	8.4	12.7	6.7	10.3	11.0
0.005~0.001	18.7	1.2	32.2	14.2	9.5	15.2	21.4
<0.001	30.4	0.2	50.3	23.7	14.6	24.5	34.4

1.2 试验设计

每种试验土样设置 5 个容重水平（见表 3），经前期土柱试填装后土壤紧实度仪测量结果显示 3 种土壤同一序数（1、2、3、4、5）的容重水平紧实度相近。将配制好的土壤充分混合均匀，按设计容重填装到直径 10 cm，高 35 cm 的 PVC 管中。装土前管底用纱网封住，网内放滤纸，管内壁涂凡士林。管内壁每 5 cm 做标记，再把每管用土均分为 6 份，每装一份压实至管内壁预定刻度处，装土至 30 cm。试验采用马氏瓶定水头供水，0~60 s 每 15 s 记录一次入渗数据，90、120 s 各记录一次，2~5 min

表 3 试验土壤容重水平

Table 3 Bulk density levels of experimental soils

砂壤		中壤		黏壤	
编号	容重/g·cm <sup>-3</sup>	编号	容重/g·cm <sup>-3</sup>	编号	容重/g·cm <sup>-3</sup>
S1	1.33	M1	1.15	C1	1.10
S2	1.40	M2	1.30	C2	1.25
S3	1.55	M3	1.45	C3	1.40
S4	1.70	M4	1.60	C4	1.55
S5	1.85	M5	1.71	C5	1.59

每分钟记录一次，7、9、12 min 各记录一次，15、20 min 各记录一次，20~400 min 每 10 min 记录一次，以后每 30 min 记录一次。每试验重复 3 次。

试验土壤各当量孔径时的孔隙度通过离心机测定土壤水分特征曲线计算。（当量孔径——由于土壤孔隙形状不规则，所以其直径难以测量，故用当量孔隙及其直径代替，即当量孔径。其原理是把土壤孔隙看作一组平行且笔直的圆管，采用逐步加压法或负压抽吸法，根据圆管中毛管水上升公式（茹林公式）计算相当于该压力（负压）下排除水量的管径，作为该级孔隙的当量直径。当测定时水的温度为 20℃ 时，计算公式可简化为： $d = 3/h$ 。d——当量孔隙直径，mm；h——土壤水分吸力（以水柱表示），cm。根据这一公式，可计算出不同大小当量孔隙的分布<sup>[14]</sup>。）

试验数据处理用 SPSS 统计软件。

2 结果与分析

2.1 土壤容重对土壤入渗能力的影响

2.1.1 稳定入渗速率

通过对 3 种配制土壤的试验及试验数据的分析，发现土壤容重对于表征土壤入渗能力的稳定入渗速率及累积入渗量均有显著影响。试验结果表明，入渗速率可以在 100 min 左右达到相对稳定，但由于本试验涉及土样较多，且控制条件差异较大，故不一概而论，以 100 min 后最先连续 5 个时刻记录点的入渗速率达到基本相同时的平均速率作为稳定入渗速率。稳定入渗速率表征土壤入渗后期的入渗能力。

图 1 所示为 3 种不同质地土壤容重与稳定入渗速率的关系。可以看出，砂壤容重从 1.33 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.85 g/cm<sup>3</sup>，稳定入渗速率从 0.0247 cm/min 递减到 0.0063 cm/min；中壤容重从 1.15 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.71 g/cm<sup>3</sup>，稳定入渗速率从 0.0179 cm/min 减小到 0.0057 cm/min；黏壤容重从 1.1 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.59 g/cm<sup>3</sup>，稳定入渗速率从 0.02 cm/min 减小到 0.0055 cm/min。试验土壤稳定入渗速率与容重均呈极显著对数负相关关系，相关方程见图 1 中。由上述结果可以看出，土壤稳定入渗速率受容重影响较大，试验土壤稳定入渗速率均随容重增大递减，稳定入渗速率与容重的关系曲线皆为近线性的对数关系，而且比较陡直。

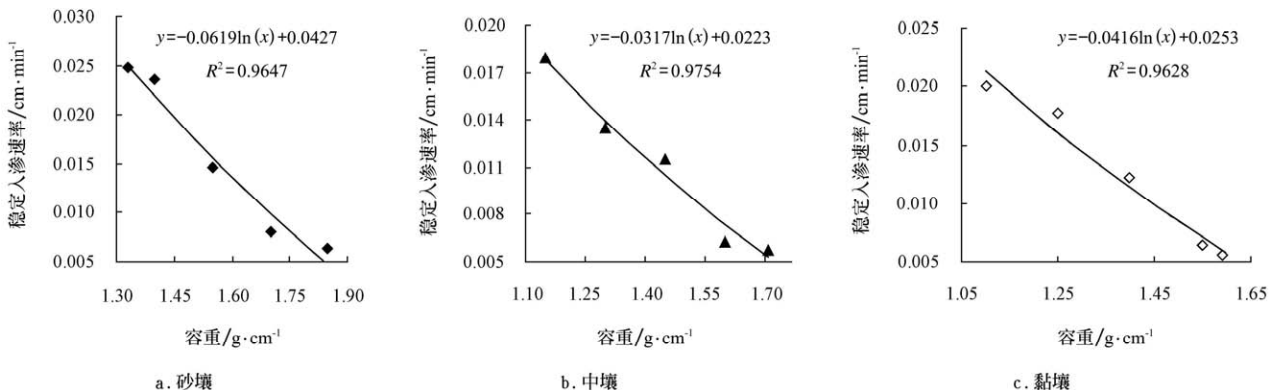


图 1 土壤容重与稳定入渗速率关系

Fig.1 Relationship between stable infiltration rate and soil bulk density

### 2.1.2 120 min 累积入渗量

土壤入渗过程在达到稳定之后可以用稳定入渗速率表征入渗能力,但在达到稳定入渗之前,常用累积入渗量来表征入渗能力。本试验过程各处理大多在 100 min 左右达到稳定入渗,故以 120 min 累积入渗量来衡量土壤前期入渗能力。如图 2 所示为试验砂壤、中壤、黏壤 120 min 累积入渗过程。从图中可以看出,3 种土样 120 min 累积过程中各时段累积入渗量均随容重增大递减。

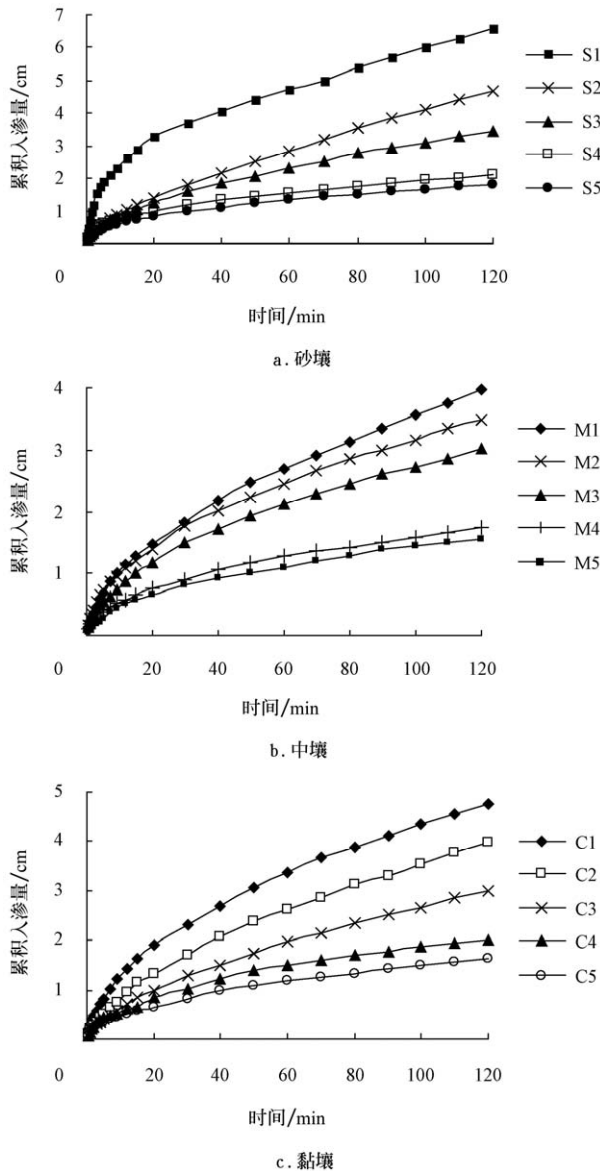


图 2 试验土壤 120 min 入渗累积过程

Fig.2 120-min cumulative infiltration process of experimental soils

由图 3 可知,当砂壤容重从  $1.33 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.85 \text{ g/cm}^3$ ,累积入渗量则从  $6.577 \text{ cm}$  减少到  $1.733 \text{ cm}$ ,二者呈极显著幂函数负相关;当中壤容重从  $1.15 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.71 \text{ g/cm}^3$ ,累积入渗量则从  $3.961 \text{ cm}$  减少到  $1.564 \text{ cm}$ ,二者呈极显著线性负相关;当黏壤容重从  $1.1 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.59 \text{ g/cm}^3$ ,累积入渗量则从  $4.766 \text{ cm}$  减少到  $1.621 \text{ cm}$ ,二者也呈极显著线性负相关。从以上结果可以看出,土壤累积入渗量即在达到稳定入渗之前的入渗

能力受容重的影响亦很大,呈现随容重增大,入渗能力急剧下降的趋势。

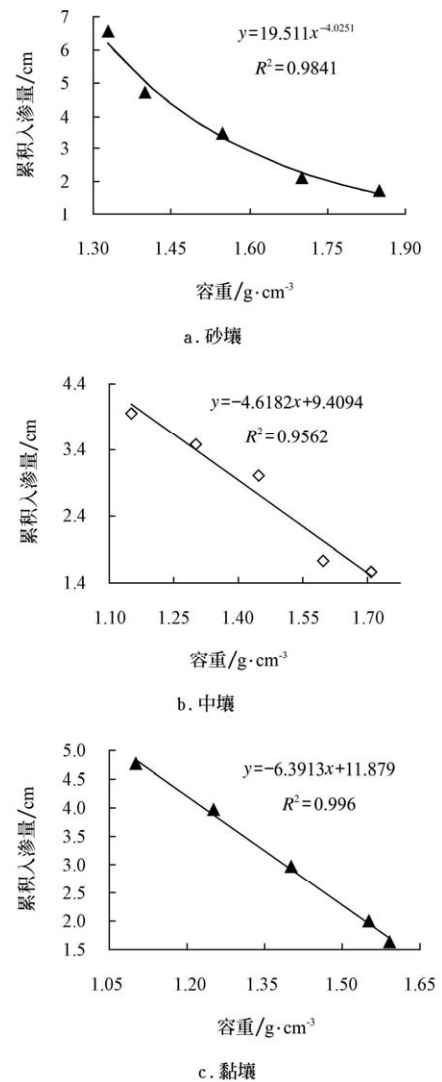


图 3 试验土壤 120 min 累积入渗量与容重关系

Fig.3 Relationship between 120-min cumulative infiltration volume and soil bulk density of experimental soils

土壤水分入渗过程中大孔隙及传导孔隙是水分流动的主要通道<sup>[15]</sup>,水分的移动能力、运动状态受土壤较大尺度孔隙含量及分布状况的直接影响。通常认为,毛管作用微弱的大孔隙越多,水分在土壤中的流动通道越畅通,水流的实际过水面积也越大,入渗能力越强。土壤容重是反映土壤紧密程度的一个重要指标,它直接影响着土壤的孔隙状况<sup>[16]</sup>,容重对同一质地土壤入渗能力的影响实际上就是通过对孔隙状况的影响实现的,所以,容重对入渗的影响主要通过影响大孔隙与传导孔隙实现。一般认为,当量孔径在  $0.1 \text{ mm}$  以上为大孔隙, $0.1 \sim 0.03 \text{ mm}$  为传导孔隙<sup>[14]</sup>。如表 4 所示为不同容重试验土壤大孔隙、传导孔隙含量。

从表 4 可以看出,3 种试验土壤大孔隙含量均随容重增大递减。当砂壤容重从  $1.33 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.85 \text{ g/cm}^3$ ,大孔隙含量从  $28.2\%$  减少到  $11.8\%$ ;中壤容重从  $1.15 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.71 \text{ g/cm}^3$ ,大孔隙含量从  $25.8\%$  减少到  $8.5\%$ ;黏

壤容重从 1.1 g/cm<sup>3</sup> 增加到 1.59 g/cm<sup>3</sup>, 大孔隙含量从 27.6% 减少到 8.2%。砂壤传导孔隙随容重增大呈减少趋势, 中壤与黏壤这种趋势不明显。从以上结果可以看出, 土壤大孔隙含量与容重关系密切, 随容重逐渐增大, 大孔隙含量与土壤入渗能力同呈下降趋势, 这也说明, 土壤大孔隙含量是影响其入渗能力的真正因素。

表 4 试验土壤不同容重下大孔隙、传导孔隙含量

Table 4 Macropore and conduction pore content of experimental soils with different bulk density levels

砂壤		中壤		黏壤	
编号	大孔隙 /%	传导孔隙 /%	编号	大孔隙 /%	传导孔隙 /%
S1	28.2	5.1	M1	25.8	4.8
S2	22.9	4.3	M2	20.0	4.8
S3	18.0	4.3	M3	15.0	5.8
S4	14.7	3.2	M4	10.6	4.9
S5	11.8	2.6	M5	8.5	4.2
			C1	27.6	5.5
			C2	21.0	5.9
			C3	15.4	6.2
			C4	8.2	6.9
			C5	8.2	6.7

另外从图 4 可以看出, 砂壤容重与大孔隙含量呈幂函数负相关, 中壤、黏壤容重与大孔隙含量都呈线性负相关。这跟容重与 120 min 累积入渗量的关系极为相似, 砂壤容重与大孔隙含量及 120 min 累积入渗量都呈幂函数负相关, 而中壤、黏壤容重与大孔隙含量及 120 min 累积入渗量都呈线性负相关, 且黏壤的斜率都大于中壤的。这进一步说明土壤入渗能力与大孔隙含量密切相关, 同一质地土壤入渗能力随容重增大减弱正是大孔隙含量降低所致。

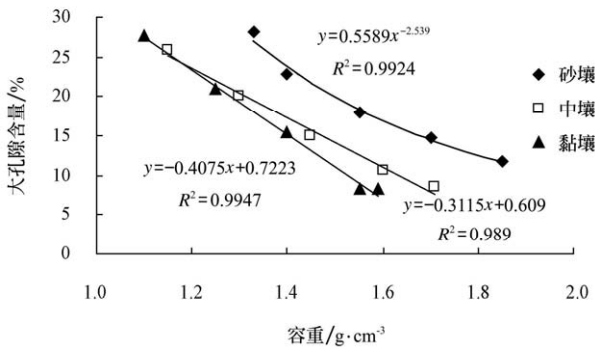


图 4 土壤容重与大孔隙含量关系

Fig.4 Relationship between soil bulk density and macropore quantity

2.2 容重对入渗模型参数的影响

农田水利工作及水土保持实践中常用考斯加科夫土壤入渗经验模型, 该模型与实际入渗情况吻合较好<sup>[17]</sup>。本试验入渗过程用此模型来描述, 虽然该模型是经验模型, 但其中的参数亦能反映土壤入渗的某些特征。入渗速率  $i$  及累积入渗量  $I_t$  计算公式如下<sup>[4,18]</sup>:

$$i_t = i_1 t^{-\alpha} \quad (1)$$

$$I_t = \frac{i_1}{1-\alpha} t^{1-\alpha} = K \cdot t^{1-\alpha} \quad (2)$$

式中  $i_t$ —— $t$  时刻的入渗速率, cm/min;  $i_1$ ——第一时间单位末时的入渗速率, cm/min;  $t$ ——入渗历时, min;  $I_t$ —— $t$  时刻的累积入渗量, cm; 模型中,  $K$ ——经验入渗

系数, 其物理意义是入渗开始后第一个单位时段末的累积入渗量, 在数值上也等于第一个单位时段内的土壤平均入渗速率, cm/min;  $\alpha$ ——经验入渗指数, 反映土壤入渗能力的衰减速度。入渗初始阶段, 参数  $K$  起主导作用, 随着入渗过程的持续进行, 参数  $\alpha$  则成了影响入渗大小的主要因素。

本试验根据 600 min 实测累积入渗过程, 利用 SPSS 统计软件拟合各处理模型参数  $K$  与  $\alpha$  值, 拟合结果表明, 在置信区间为 95% 的水平下, 相关系数  $R^2$  均在 0.97 以上, 故认为精度较高, 不再列出。下面根据各处理参数拟合结果, 分析土壤容重对入渗参数  $K$  和  $\alpha$  的影响。由图 5 可知, 试验土壤入渗模型参数  $K$  均随容重增大递减,  $\alpha$  均随容重增大递增。砂壤容重从 1.33 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.85 g/cm<sup>3</sup>,  $K$  值从 0.457 cm/min 减小到 0.161 cm/min,  $\alpha$  值则从 0.31 增大到 0.498, 容重与  $K$  值呈极显著指数负相关, 与  $\alpha$  值

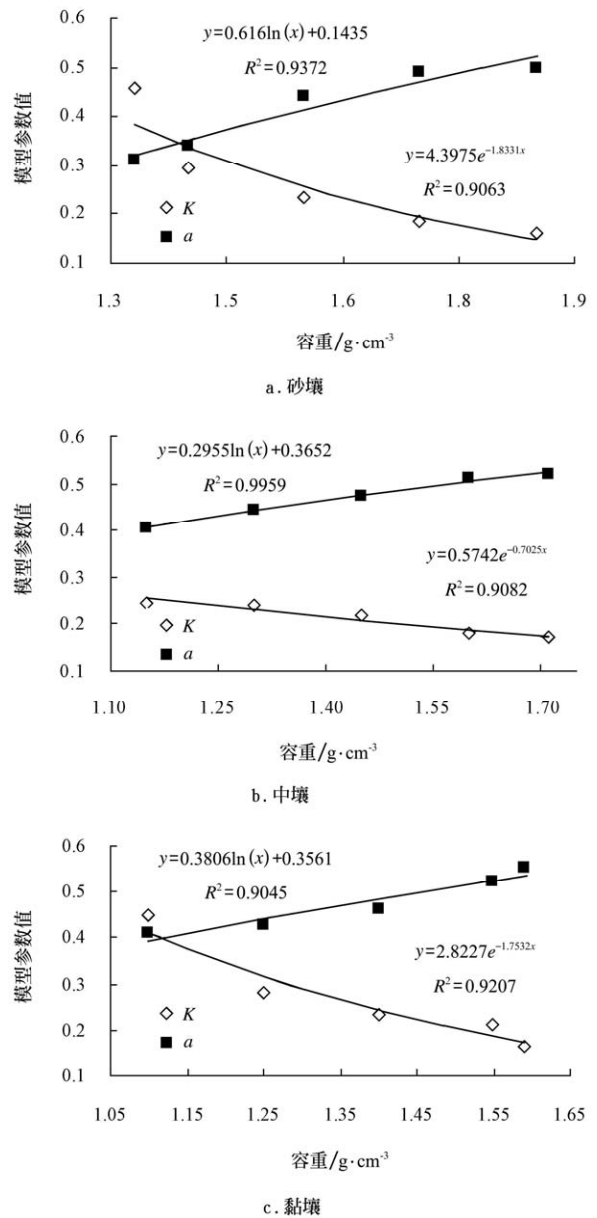


图 5 试验土壤模型参数与容重关系

Fig.5 Relationship between model parameters and soil bulk density of experimental soils

呈极显著对数相关。中壤容重从  $1.15 \text{ g/cm}^3$  增大到  $1.71 \text{ g/cm}^3$ ,  $K$  值从 0.243 减小到 0.171,  $\alpha$  值则从 0.407 增大到 0.521, 容重与  $K$  值呈极显著指数负相关, 与  $\alpha$  值呈极显著对数相关。黏壤容重从  $1.1 \text{ g/cm}^3$  增大到  $1.59 \text{ g/cm}^3$ ,  $K$  值从 0.447 减小到 0.163,  $\alpha$  值则从 0.409 增大到 0.554, 容重与  $K$  值呈极显著指数负相关, 与  $\alpha$  值呈极显著对数相关。

参数  $K$  是反映土壤入渗能力的一个重要指标, 它表示土壤入渗开始后第一个单位时间 (1 min) 内单位面积上的平均入渗速率或第一个单位时段末单位面积上的累积入渗量,  $K$  值的大小主要受入渗时土壤的结构和状况的影响<sup>[9]</sup>。当土壤质地、原始含水量等都基本一致时,  $K$  值的大小则主要取决于土壤孔隙度及其分布状况<sup>[4]</sup>。同一质地不同容重的土壤, 其孔隙度随容重增大递减, 特别是大孔隙含量, 更是与容重密切相关。容重小的土壤, 各种尺度孔隙都比较丰富, 随容重增大, 特大孔隙及大孔隙含量急剧下降, 细小孔隙也逐渐减少。在土壤入渗初期, 表层土壤中的特大孔隙先充满水, 这些水分在重力作用下向深层土体流动, 特大孔隙多的土壤因其气相比例较大而在开始时刻储蓄大量水分, 反映到入渗上就是入渗能力强。所以, 容重小的土壤, 特大孔隙多, 入渗初期入渗能力大, 随容重逐渐增大, 特大孔隙逐渐减少, 入渗初期入渗能力逐渐减弱。反映到模型参数上就是  $K$  值随着土壤容重的增大递减。

$\alpha$  为经验入渗指数, 反映土壤入渗能力的衰减速度,  $\alpha$  值越大, 入渗能力衰减速度越快, 反之则越慢。 $\alpha$  值的大小决定于由于土体润湿而引起的土壤结构的改变<sup>[9]</sup>。对于同一质地的土壤, 容重的变化也能引起  $\alpha$  值的较大变化。容重小的土壤, 大孔隙较多, 土壤内部的连通性较好, 即使遇水作用后土粒的膨胀对大孔隙体积不会产生大的影响, 孔隙内部的气体也可以较快地排放出来而减小入渗过程中的气相阻力, 所以入渗能力的衰减速度较慢。而随容重增大, 气相比例减小, 大孔隙逐渐减少, 土壤内部的连通性变差, 遇水作用后土粒的膨胀会使土体气相比例进一步减小, 孔隙内部的气体排出困难而导致入渗受到较大的气相阻力, 所以入渗能力的衰减速度较快。反映到模型参数上就是  $\alpha$  值随容重增大递增。

### 3 结论

1) 土壤容重对土壤入渗能力有较大影响, 表征土壤入渗能力的稳定入渗速率、120 min 累积入渗量均随容重增大递减。试验土壤稳定入渗速率与容重均呈对数负相关, 试验砂壤 120 min 累积入渗量与容重呈幂函数负相关, 中壤、黏壤 120 min 累积入渗量与容重均呈线性负相关。

2) 土壤容重与大孔隙含量密切相关, 大孔隙数量随容重增加递减, 二者关系与容重跟 120 min 累积入渗量关系极为相似, 说明容重对入渗能力的影响本质上是通过大孔隙数量的影响实现。

3) 土壤容重对考斯加科夫入渗模型参数有较大影响, 3 种试验土壤表征初始入渗速率的参数均随容重增大递

减, 与容重均呈指数负相关, 表征入渗能力衰减速度的参数均随容重增大递增, 与容重均呈对数关系, 说明土壤初始入渗能力随容重增大递减, 入渗能力衰减速度随容重增大递增。

### [参 考 文 献]

- [1] Bouwer H. Intake rate: Cylinder infiltrometer[A]. Klute A. Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods[C]. Madison, WI, Agronomy Monograph No.9 (second ed.): American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986: 825-844.
- [2] Hillel D. Environmental Soil Physics[M]. New York: Academic Press, 1998.
- [3] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [4] 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 Guishen. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 188-190. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈瑶, 张科利, 罗利芳, 等. 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 Yao, Zhang Keli, Luo Lifang, et al. Study on beginning infiltration law of the being wild soil in loess plateau[J]. Journal of Sediment Research, 2005, (5): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [6] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579-583.  
Yuan Jianping, Zhang Suli, Zhang Chunyan, et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully loess region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 579-583. (in Chinese with English abstract)
- [7] 田积莹. 黄土地区土壤的物理性质与黄土成因的关系[A]. 中国科学院西北水保所集刊[C]. 1987: 1-12.  
Relationship between soil physical properties and the cause of loess in loess region[A]. Scientific papers collection of Chinese Sciences Academy North West Water Conservancy Institute[C]. 1987: 1-12. (in Chinese)
- [8] 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(1-2): 45-51.
- [9] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.
- [10] 费良军, 谭奇林, 王文焰, 等. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 70-74.  
Fei Liangjun, Tan Qilin Wang Wenyan, et al. Infiltration character and influential factor of point source under adequate water supply[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(2): 70-74. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素

- 分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16—78.
- Wu Faqi, Zhao Xining, She Diao. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16—78. (in Chinese with English abstract)
- [12] 马履一, 王勇, 翟明普. 京西山地棕壤和淋溶褐土饱和导水率的分析[J]. 林业科学, 1999, 35(3): 109—112.
- Mai Luyi, Wang Yong, Zhai Mingpu. Analysis of saturated soil hydraulic conductivity of mountain brown earth and eluvial cinnamon soil in Beijing Xishan[J]. Scientia silvae sinicae, 1999, 35(3): 109—112. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Guoliang, Liu Guobin, Zhou Shenglu. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of Loess gully region[J]. Journal of Natural resources, 2003, 18(5): 529—535. (in Chinese with English abstract)
- [14] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 傅斌, 王玉宽, 朱波, 等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 39—43.
- Fu Bin, Wang Yukuan, Zhu Bo, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 39—43. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 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 Yonggang, Zhao Shiwei, Cao Lihua, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 14—20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李援农, 林性粹. 均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 88—93.
- Li Yuannong, Lin Xingcui. Regularity of the soil air-resistance change and its influences under water-accumulated infiltration in the homogenous soil[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(3): 88—93. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郭素珍. 土壤物理学[M]. 海拉尔市: 内蒙古文化出版社, 1998.
- [19] S A 泰勒. 华孟, 等译. 物理的土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- Taylor S A. Hua Meng, et al, trans. Physical Soil. Beijing: Agriculture Press, 1983. (in Chinese)

## Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity

Li Zhuo<sup>1</sup>, Wu Pute<sup>2\*</sup>, Feng Hao<sup>2</sup>, Zhao Xining<sup>2</sup>, Huang Jun<sup>3</sup>, Zhuang Wenhua<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

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

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Effect of soil bulk density on soil infiltration capacity was explored through simulated experiments. The experimental soils were different in soil texture (sandy loam, medium loam, clay loam) and bulk density by artificially altering composition of soil particle fractions. Infiltration capacity of experimental soils decreased along with increasing soil bulk density. The stable infiltration rate had negative correlation of logarithmic function with soil bulk density. The 120 min-cumulative infiltration showing negative correlation of power function with soil bulk density for sandy loam, and negative linear correlation for medium loam and clay loam. The parameter of Kostiaikov infiltration equation which meant initial infiltration rate decreased along with increasing soil bulk density, and the other parameter which meant infiltration decaying rate increased. The results showed that the capacity of initial infiltration rate went down and the infiltration decaying rate went up along with increasing soil bulk density. The results provided the theoretical basis for soil improvement and rainfall utilization.

**Key words:** soil moisture, infiltration, soil bulk density, models