

Experimental Study on Vertical Unsaturated Infiltration in Soil Column Based on the Seasonal River Sand

Ningning Li, Guizhi Wu*, Zengshuai Feng, Fan Yang

School of Environmental & Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong
Email: lining6457@163.com, *guizhiwu701@163.com

Received: Dec. 27th, 2015; accepted: Jan. 8th, 2016; published: Jan. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the seasonal river sand, laboratory test was carried out by vertical unsaturated infiltration and it studied the main factors influencing the vertical infiltration. The results show that the unsaturated infiltration can be divided into three stages changing with time. In the first stage, the infiltration rate drops rapidly. In the second stage, the infiltration rate declines slowly. And in the third stage, the infiltration rate is asymptotically stable. The initial moisture content of sample and sample texture obviously influence on infiltration characteristics. Vertical infiltration velocity decreases with the increase of initial moisture content, as the sample decreases with the increase of dry density. When the initial moisture content was 1.02% and 5.11%, the stability infiltration rate of fine sand was about 0.027 mL/(s·cm²) and 0.021 mL/(s·cm²). When the initial water content rate was 1.38% and 3.51%, the stability infiltration rate of medium sand was about 0.028 mL/(s·cm²) and 0.026 mL/(s·cm²). The initial moisture content was about 1.83% and 5.92% when the stability infiltration rate of coarse sand was about 0.030 mL/(s·cm²) and 0.029 mL/(s·cm²). The stability infiltration rate of the coarse sand is greater than the fine sand. The test results provide a scientific basis for the further study of seasonal river seepage law.

Keywords

Unsaturated Infiltration, Infiltration Rate, Experimental Study, Seasonal River

基于季节性河床砂样的垂向非饱和入渗试验研究

李宁宁, 武桂芝*, 冯增帅, 杨帆

作者简介: 李宁宁(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源管理、保护与水环境模拟方面的研究。

*通讯作者。

文章引用: 李宁宁, 武桂芝, 冯增帅, 杨帆. 基于季节性河床砂样的垂向非饱和入渗试验研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(1): 16-22.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.51002>

青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛
Email: lining6457@163.com, *guizhiwu701@163.com

收稿日期: 2015年12月27日; 录用日期: 2016年1月8日; 发布日期: 2016年1月15日

摘 要

基于季节性河床砂样, 开展了垂向非饱和入渗室内试验, 研究了影响垂向入渗的主要因素。结果表明, 非饱和入渗随时间的变化可分为3个阶段, 第1个阶段为入渗率迅速下降期, 第2个阶段为入渗率缓慢下降期, 第3个阶段为入渗率渐近稳定期; 砂样的初始含水率、砂样质地对入渗特性产生明显影响。垂向入渗速度随着初始含水率的增大而减小, 随着砂样干容重的增大而减小; 当初始含水率分别为1.02%和5.11%时, 细砂的稳定入渗率约为0.027 mL/(s·cm²)和0.021 mL/(s·cm²); 当初始含水率分别为1.38%和3.51%时, 中砂的稳定入渗率约为0.028 mL/(s·cm²)和0.026 mL/(s·cm²); 当初始含水率分别为1.83%和5.92%时, 粗砂的稳定入渗率约为0.030 mL/(s·cm²)和0.029 mL/(s·cm²)。粗砂的稳定入渗率大于细砂。试验结果对于深入研究季节性河道渗漏规律提供了科学依据。

关键词

非饱和入渗, 入渗率, 试验研究, 季节性河道

1. 引言

干旱或半干旱地区的河流一般为季节性河流, 汛期河道洪水往往具有暴涨暴落的特点, 行洪期内的河道渗漏补给是本区域地下水资源的主要来源, 也是当地人民生活和生产的主要水源。确定河道渗漏量及渗漏规律, 不仅对于确定地下水补给量, 而且对于季节性河道的洪水演进计算也具有重要意义[1]-[4]。

土壤入渗主要包括垂向入渗和侧向入渗。聂卫波等在非饱和土壤水分运动理论基础上, 利用 Richards 模型模拟不同试验处理下的一维垂向入渗过程, 并用 SWMS-1D 软件对模型求解, 通过试验得出, 土壤质地、容重对一维垂向入渗累计入渗量、入渗率和湿润锋运移距离影响较大, 土壤初始含水率和入渗水头对其影响较小[5]。马东豪等利用一维垂向入渗试验确定了 Brooks-Corey 模型参数, 并对其方法进行检验。结果表明, 只要入渗历时足够长, 利用预测的参数, 数值解和提出的近似解均能很好的模拟土壤水分入渗过程[6]。范严伟等通过对不同初始含水率条件下多种典型的土壤垂直一维入渗特性进行模拟, 发现土壤累积入渗量变化过程符合 Philip 模型, 提出了包括初始含水率、饱和含水率和饱和导水率的 Philip 模型参数的确定方法, 通过验证表明, 所建模型可反映土壤水分垂直一维入渗特点[7]。

本文采用季节性河床砂样, 进行了垂向土柱非饱和入渗试验, 研究季节性河道行洪前期影响垂向入渗的主要因素, 为后续开展现场入渗试验、建立季节性河道入渗模型以及研究季节性河道渗漏对洪水演进影响提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 供试样品

试验砂样采自青岛大沽河干流河床, 选取河道表面砂土以下 10 cm 的砂样。采样点为有代表性的大沽河上游、中游和下游, 上游取样点位于莱西市的孙受镇, 中游取样点位于即墨市的李家庄村, 下游取样点位于胶州市的李哥庄村。分别命名为粗砂、中砂和细砂。砂样的颗粒级配(质量百分数)和水理性质分别参见表 1 和表 2。

2.2. 试验装置

试验用土柱底部直径为 15 cm，柱高 100 cm，材质为有机玻璃，土柱底部密布小孔，可以防止砂土流失，土柱下部加有由有机玻璃做的存水室，土柱中的水可以从小孔流到下面，存水室侧壁设有出水口；土柱侧壁上每隔 10 cm 埋设 1 个张力计，用以测定张力变化情况，共设有 8 根张力计。土柱的供水装置为马氏瓶，材质为有机玻璃，直径 25 cm，高 90 cm。马氏瓶顶部中间插有一根有机玻璃管，为马氏瓶提供定水头。试验装置见图 1。

2.3. 试验方法

试验时间为 2015 年 06 月~08 月，试验过程中实验室温度变化范围为 21.7℃~30.8℃，湿度为 25%~82%。试验前，要首先去掉砂样中的杂质，然后加入一定量水并加以搅拌，使含水量均匀。加水时注意加水量，水量太多则张力计水银柱无法显示读数。装砂样前，在土柱底部铺设一层纱网以防止砂粒下漏，堵塞底部小孔。然后将砂样装入试验装置中。每装一定的高度时，要均匀夯实，夯实砂样时要注意力度，太大则有可能压坏埋在砂里的陶土头，太小则不能保证密实度。保证砂样与土柱的边壁接触良好，水流不会从边壁渗漏。为了保证两层

Table 1. Grain-size distribution of sand samples

表 1. 砂样的颗粒级配(%)

| 砂样 | <9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | <0.075 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 粗砂 | 100 | 99.5 | 93.9 | 75.7 | 40.1 | 11.5 | 4.6 | 1.3 |
| 中砂 | 100 | 97.4 | 88.8 | 73.2 | 47.2 | 8.3 | 1.5 | 0.4 |
| 细砂 | 100 | 98.1 | 90.3 | 77.2 | 53 | 10.3 | 2.2 | 0.3 |

Table 2. Hydraulic properties of sand samples

表 2. 砂样的水理性质

| 砂样 | 饱和含水率(%) | 残余含水率(%) | 最大干容重(g/mL) |
|----|----------|----------|-------------|
| 粗砂 | 23.45 | 0.94 | 1.42 |
| 中砂 | 23.13 | 1.46 | 1.57 |
| 细砂 | 22.44 | 1.95 | 1.58 |

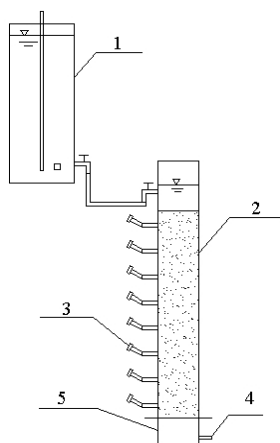


Figure 1. Device of vertical column, 1-Markov bottle, 2-Soil column, 3-Tensiometer, 4-Outlet, 5-Water storage chamber

图 1. 垂向土柱装置，1-马氏瓶，2-土柱，3-张力计，4-出水口，5-存水室

砂样间的均匀性，在下一层砂样装填之前，要把砂土表面划毛。用一定量的砂样来测定初始含水率。砂样装完后，用薄膜将土柱口封住，防止砂样水分蒸发，影响实验结果。在马氏瓶侧壁加上直尺，记下初始读数，通过水量下降可以求得入渗量。

待到张力计水银柱读数上升到最大值时，实验开始。试验前，记下张力计水银柱初始读数和马氏瓶中液面高度。先在土柱砂样上方铺设塑料膜以防止水分下渗，在塑料膜上加水至与马氏瓶中有有机玻璃管底部相同的高度，此时记为 0 时，打开马氏瓶开关并迅速抽出塑料膜开始入渗试验。实验过程中要保证马氏瓶气密性良好。然后每隔单位时间记录下马氏瓶侧壁直尺读数和张力计读数，得到实验过程中入渗量变化和土柱内水分变化情况。

3. 试验结果与分析

对三组砂样分别做两组垂向入渗实验，控制不同初始含水率，其中，细砂的两组初始含水率分别为 1.02% 和 5.11%，中砂初始含水率分别为 1.38% 和 3.51%，粗砂初始含水率分别为 1.83% 和 5.92%。

(1) 垂向水分分布

试验得到垂向入渗中张力计水银柱读数随时间的变化过程，根据试验结果，以垂向土柱的深度为纵轴，土柱表面为纵轴 0 点，向下方向为正；根据不同砂样的水分特征曲线和张力计读数得到不同深度在一定时间的体积含水率，以体积含水率为横轴，绘制不同砂样垂向入渗时，在不同入渗时间和不同深度砂样的体积含水率。本文分别绘制了细砂、中砂和粗砂在较小含水率时入渗 4 min 时垂向不同深度的水分分布，分别绘制了细砂、中砂和粗砂在较大含水率时入渗 4 min 和入渗 8 min 时垂向不同深度的水分分布。如图 2 所示。

由图 2 可知，同种砂样在不同初始含水率时，入渗速度不同，不同砂样在初始含水率相近时，入渗速度也不同。对于同种砂样，初始含水率不同，垂向入渗速度相差比较大，初始含水率越小，入渗速度越快，初始含水率越大，入渗速度越慢。细砂样在初始含水率等于 1.02% 时，土柱内距离进水口最近的砂样只用 4.5 min 即可渗完，而当细砂初始含水率为 5.11% 时，同样位置的砂样则需要 6 min。同样对于中砂，在初始含水率等于 1.38% 的时候，土柱只用 5 min 即可入渗完成，而当初始含水率为 3.51% 时，同样位置的砂样则需要 7 min。对于粗砂，当初始含水率为 1.83% 时，入渗在 5 min 即可完成，而当初始含水率为 5.92% 时，同样深度的砂样则需要 6 min。由土壤入渗理论解释如下。

垂向入渗前期入渗速度的快慢，也即湿润峰运移的速度可通过入渗水流湿润区的土水势梯度的概念进行解释。非饱和土壤水的运动是由土水势差引起的，水势梯度越大，运动越快，反之亦然。土壤初始含水率越高，水分入渗锋面的土水势越高，则水分入渗锋面与表层之间的平均势梯度越小，土壤的入渗速度也就越小。因此，同一砂样初始含水率小的入渗速度较快。粗砂、细砂入渗速度不同主要是因为砂质结构不同，细砂相比于粗砂，干容重大，结构更密实，大空隙数量少，小空隙多，比表面积大，相同含水率下，细砂的土水势高(基质势大)，水分入渗锋面与表层之间的平均势梯度低，因此细砂的入渗速度就慢些。

(2) 入渗率变化曲线

马氏瓶中液面高度随时间逐渐降低，根据液面降低的高度可以求得入渗量，入渗量除以单位时间内土柱的断面面积即为随时间变化的垂向入渗率。根据试验结果，得到入渗率随时间的变化过程。以入渗率的大小为纵轴，入渗时间为横轴，绘制不同砂样在不同含水率时入渗率变化曲线，结果见图 3。

由图 3 可知，对于不同的砂样，入渗率的变化趋势大致相同，入渗开始时，由于含水率较小，入渗速度快，入渗率大，随着试验的进行，入渗速度逐渐降低，入渗率逐渐减小，最后趋于一个稳定值。对于同一种砂样，当初始含水率不同的时候，砂样入渗率的稳定值也不相同，若初始含水率较小，则入渗率的稳定值较大，且从入渗开始到入渗率减小到稳定值的时间较长。当初始含水率分别为 1.02% 和 5.11% 时，细砂的稳定入渗率约为 $0.027 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 和 $0.021 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ ；当初始含水率分别为 1.38% 和 3.51% 时，中砂的稳定入渗率约为 $0.028 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$

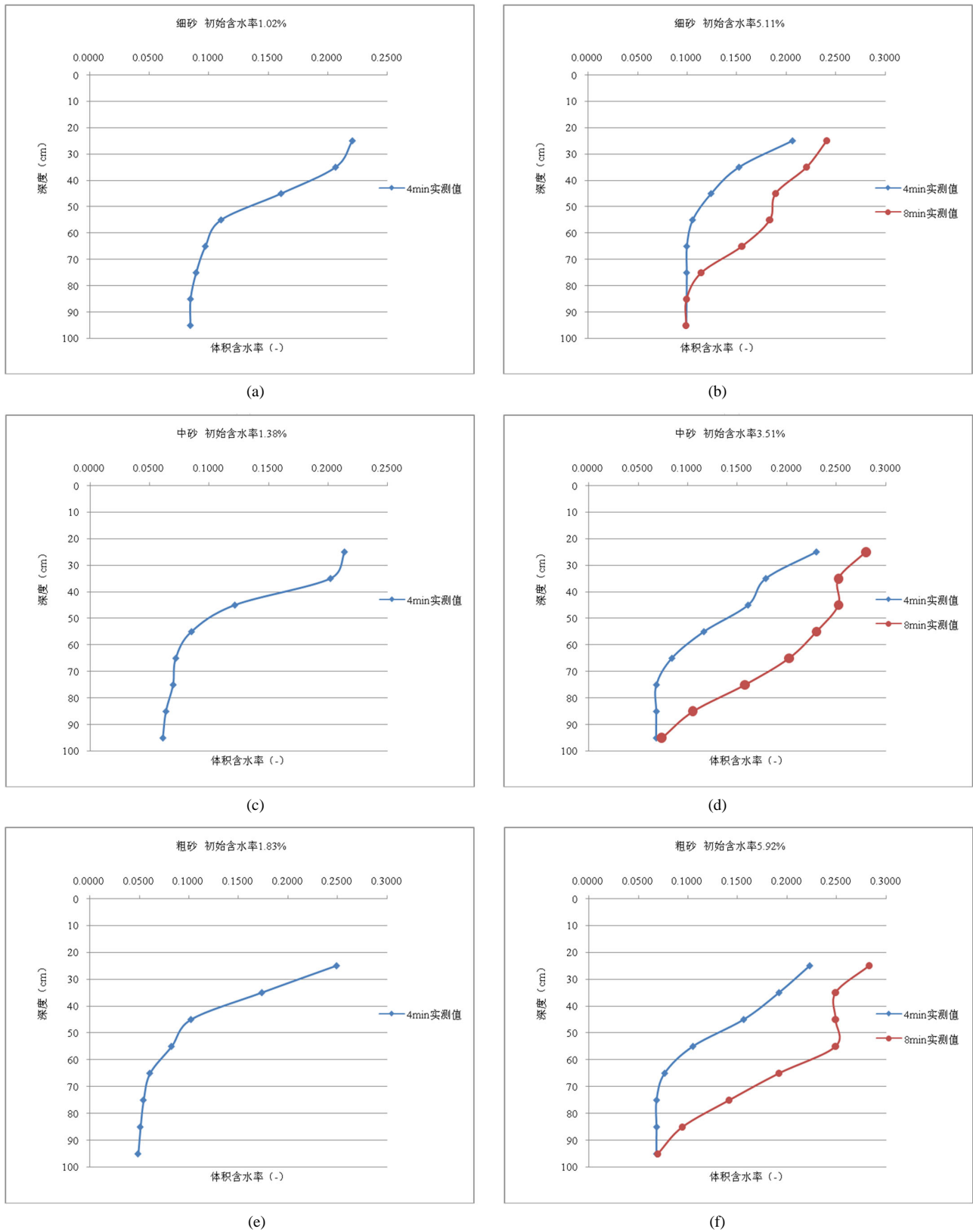


Figure 2. Curves for vertical moisture distribution of sand
图 2. 砂样垂向水分分布曲线

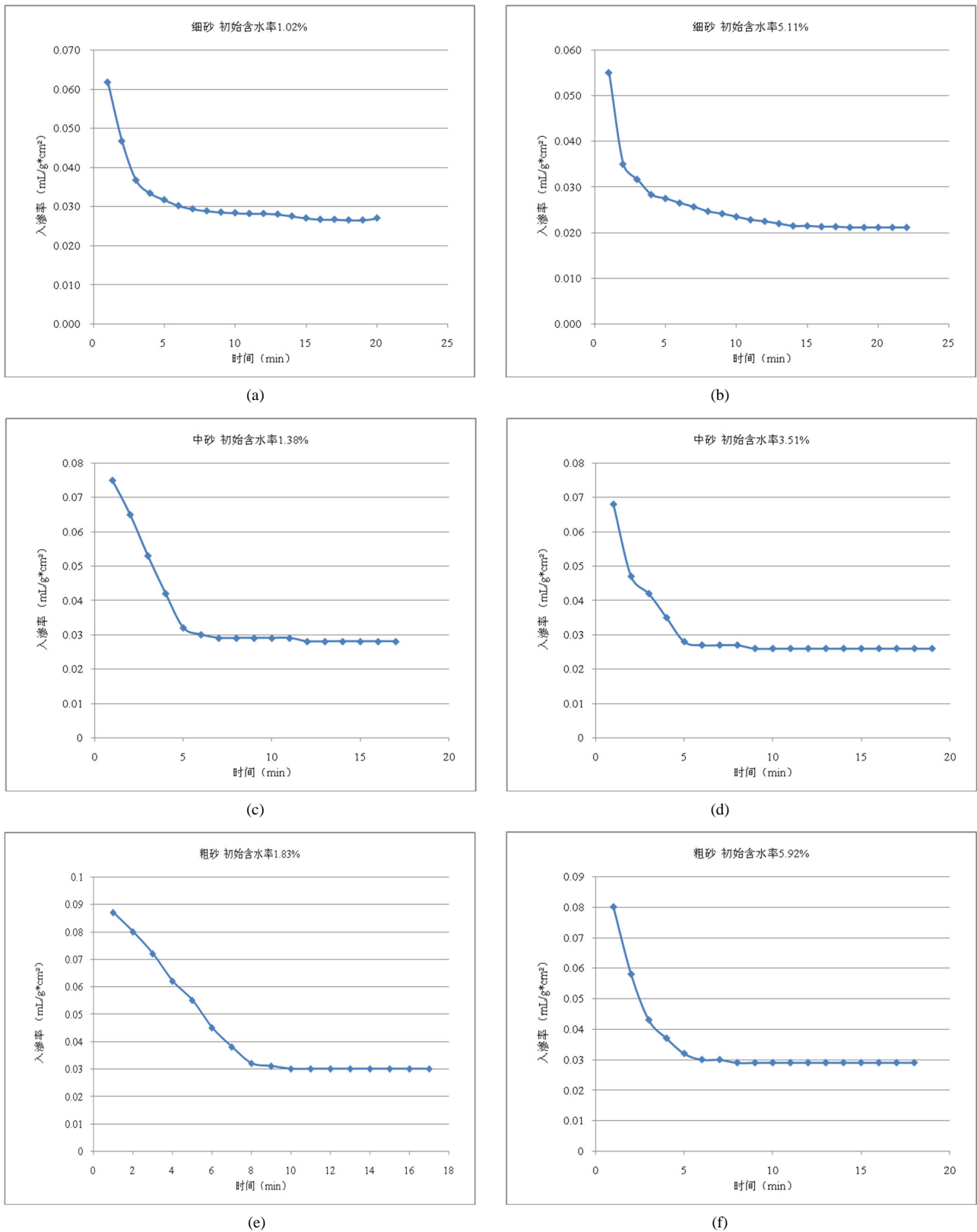


Figure 3. Curves for vertical-infiltration rate of sand varying with time

图 3. 砂样垂向入渗率随时间变化曲线

和 $0.026 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$; 当初始含水率分别为 1.83% 和 5.92% 时, 粗砂的稳定入渗率约为 $0.030 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 和 $0.029 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 。对于不同的砂样, 当初始含水率相近时, 粗砂的稳定入渗率值比细砂要大, 这是由于粗砂颗粒间的空隙大, 相对于细砂更容易入渗。

4. 结论

垂向土柱非饱和入渗试验结果表明:

- (1) 不同的砂样, 干容重越大, 入渗率越小。细砂的最大干容重最大, 入渗率最小, 粗砂的最大干容重最小, 入渗率最大;
- (2) 同种砂样的不同初始含水率, 入渗率也不相同。当初始含水率小时, 入渗率大, 当初始含水率大时, 入渗率小;
- (3) 垂向入渗初始阶段, 由于含水率小, 所以入渗率大。随着时间的进行, 入渗率逐渐减小, 当砂样逐渐饱和, 入渗率逐渐趋于稳定值。
- (4) 当初始含水率分别为 1.02% 和 5.11% 时, 细砂的稳定入渗率约为 $0.027 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 和 $0.021 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$; 当初始含水率分别为 1.38% 和 3.51% 时, 中砂的稳定入渗率约为 $0.028 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 和 $0.026 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$; 当初始含水率分别为 1.83% 和 5.92% 时, 粗砂的稳定入渗率约为 $0.030 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 和 $0.029 \text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 。粗砂的稳定入渗率大于细砂。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51309137, 51379097)。

参考文献 (References)

- [1] DAHAN, O., TATARSKY, B., ENZEL, Y., et al. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert. *Ground Water*, 2008, 46(3): 450-461. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00414.x>
- [2] SHENTISIS, I. and ROSENTHAL, E. Recharge of aquifers by flood events in an arid region. *Hydrological Processes*, 2003, 17(4): 695-712. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1160>
- [3] 王少丽, R. Thielen, 李祥福, 丁昆仑. 渠道渗漏量的试验及分析方法[J]. *灌溉排水*, 1998(2): 39-42.
WANG Shaoli, TIELEN, R., LI Xiangfu and DING Kunlun. On tests and analysis method of canal seepage. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1998(2): 39-42.
- [4] 孙淑珍. 平原河道渗漏实验模型研究[J]. *河北工程技术高等专科学校学报*, 2003, 6(2): 21-25.
SUN Shuzhen. Study on experiment model of plain river way seepage. *Journal of Hebei Engineering and Technical College*, 2003, 6(2): 21-25.
- [5] 聂卫波, 马孝义, 王术礼. 一维土壤入渗特性数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3): 53-57.
NIE Weibo, MA Xiaoyi and WANG Shuli. Numerical simulation of one-dimensional soil infiltration characteristic. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 53-57.
- [6] 马东豪, 张佳宝, 黄平. 确定 Brooks-Corey 土壤水力特性模型参数的垂直入渗方法[J]. *水科学进展*, 2009, 22(2): 235-241.
MA Donghao, ZHANG Jiabao and HUANG Ping. Determination of Brooks-Corey soil hydraulic parameters through vertical infiltration experiments. *Advances in Water Science*, 2009, 22(2): 235-241.
- [7] 范严伟, 赵文举, 王昱. 初始含水率对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(5): 60-64.
FAN Yanwei, ZHAO Wenju and WANG Yu. Influence of initial water content on parameters of Philip model of vertical one-dimensional infiltration. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(5): 60-64.