

# 降雨条件下砒砂岩区淤积层垂直入渗特征试验研究

白 乐, 苏晓慧, 李恩宽, 殷会娟

黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州  
Email: 76916968@qq.com

收稿日期: 2020年7月17日; 录用日期: 2020年12月24日; 发布日期: 2020年12月31日

## 摘 要

为研究降雨条件下淤积层的降雨入渗规律及评价淤积水量, 基于内蒙古达拉特旗哈他土沟砒砂岩区淤积层为研究对象, 开发一套模拟降雨条件下一维土柱的入渗装置, 对淤积土柱做了4组不同降雨强度下的一维垂直入渗试验, 得到不同降雨强度下垂直土柱的入渗率时程曲线、浸润峰深度时程曲线及监测点体积含水率的变化规律。结果表明: 1) 降雨强度对垂直土柱的入渗影响较大, 当降雨强度小于土柱最小入渗能力时, 入渗率等于降雨强度; 当降雨强度大于土柱最小入渗能力时, 入渗率时程曲线呈无压入渗、有压入渗和饱和入渗三阶段变化。2) 不同降雨强度下, 土柱出现积水点和饱和点的历时不同, 降雨强度越大出现积水点和饱和点的时间越短, 有压入渗阶段越长。3) 在同一降雨强度下, 监测点距土柱上表面越远, 其体积含水率时程曲线越密集; 而同一监测点, 降雨强度越大, 其体积含水率时程曲线越稀疏。

## 关键词

降雨强度, 垂向入渗, 含水率, 入渗率, 时程变化

## Experimental Study on the Vertical Infiltration Characteristics of the Silting Layer in the Siltstone Area under the Condition of Rainfall

Le Bai, Xiaohui Su, Enkuan Li, Huijuan Yin

Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou Henan  
Email: 76916968@qq.com

Received: Jul. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

In order to study the rainfall infiltration law of siltation layer under rainfall condition and evaluate the siltation water quantity, a set of one-dimensional soil column infiltration device was developed based on the siltation layer in Hathagou soft rock area of Dalat Banner, Inner Mongolia. Four sets of tests were carried out to the unsaturated disturbed loess column under the different rainfall intensities. The time curves of the infiltration rate, the depth of the wetting front and the volumetric water content at the monitoring points were obtained. The rainfall intensity has great impact on the vertical infiltration in soil column. The infiltration rate equals the rainfall intensity when the rainfall intensity is less than the minimum infiltration capacity of soil column. When the rainfall intensity is greater than the minimum infiltration capacity, the curve of infiltration rate can be divided into three stages, the non-compressive infiltration, the compressive infiltration and the saturated infiltration. The moment of occurrence of the dropsy point and the saturation point are different under different rainfall intensities; the greater the rainfall intensity, the earlier the dropsy point and saturation point appear, and the longer the stage of compressive infiltration. Under the same rainfall intensity, the farther the monitoring point is from the upper surface of the soil column, the denser the time history curve of the volume moisture content is. For the same monitoring supervisor, the larger the rainfall intensity, the sparser the time history curve of volume moisture content.

## Keywords

Rainfall Intensity, Vertical Infiltration, Infiltration Rate, Time Change

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

砒砂岩区是黄河粗沙的重要的来源之一，也成为黄土高原水土保持治理难度最大的区域之一，被国内外专家称为“世界水土流失之最”。建造在黄土高原砒砂岩区的淤地坝，是拦蓄降水、减少进入黄河的泥沙的重要水土保持措施之一，起到调节径流、滞洪拦沙[1]、增加土壤入渗的作用。降水通过类似于海绵体的淤地坝淤积层，全部或部分地表向下流动，并且在淤积层中运动和储存[2]从而形成土壤水库，在防洪保安全的前提下，充分高效利用淤地坝淤积层拦蓄雨洪资源的潜力，提高水资源利用率，对缓解半干旱生态脆弱区水资源供需矛盾具有十分重要的作用，因此，开展降雨条件下砒砂岩区淤地坝淤积层入渗规律研究具有重要的现实意义。

G. A. Ampt [3]最早提出了入渗理论，并由此假定建立了 Green-Ampt 入渗模型。J. R. Philip [4]认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数关系。王全九等[5]对比分析了 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型，并通过维垂直入渗试验描述了 2 个模型中参数之间的关系。毛丽丽等[6] [7]根据水量/物质平衡原理和水平土柱中土壤剖面含水率分布所遵循的活塞假定，计算土壤入渗性能，并通过室内水平土柱试验计算得到了土壤的入渗性能曲线。J. Almedej 和 I. I. Esen [8]对 Green-Ampt 入渗模型进行了修改与完善，并将修改后的 Green-Ampt 入渗模型应用于案例分析，最后与 Mein-Larson 模型进行了比较。戴经梁等[9] [10]通过室内入渗试验，对黄土的积水入渗和水平入渗进行了研究，分别得到了不同压实度下黄土的积水入渗规律和水平黄土的渗水特性。陈洪凯等[11]对重庆境内的侏罗系强风化泥岩进行了 6 种降雨强度下的入渗试验研究，提出了可表征该类泥岩入渗过程的降雨入渗公式。朱伟等[12]通过室内降雨入渗土柱试验，探讨了反映降雨

入渗量的有限元计算方法,并通过数值模拟揭示了室内试验未能明确的降雨入渗规律。王春颖等[13]通过室内层状夹砂土柱一维薄层积水入渗试验和相应情况下均质土柱的对照试验,研究了夹砂层对入渗强度、湿润锋行进和沿程土壤含水率变化的影响。苗强强等[14][15]对非饱和和含黏砂土分别做了毛细上升试验和一维入渗试验,分别得到了含黏砂土含水率和吸力随时间的变化规律及渗透曲线的变化规律。上述研究对非饱和和土体入渗规律的分析具有重要的现实意义。但是,目前大多数研究均是针对水平土柱的稳定入渗过程,没有考虑重力作用的影响,而对于非饱和和淤积土在降雨条件下的垂直入渗规律的研究较少。本次自主设计加工了一套一维垂直土柱入渗模型试验装置,基于该试验装置研究了降雨条件一维淤积土柱的入渗规律。

## 2. 土壤水分传感器的标定与数据采集

### 2.1. EC-5 土壤水分传感器原理

试验所用水分传感器为 EC-5 土壤水分传感器, EC-5 是由传感器壳体以及探针组成,通过测量介质的介电常数来确定体积含水量(VWC)。其测量范围:矿物土 $\pm 3\%$  VWC,大多数矿物土,高达  $8 \text{ dS/m} \pm 1\% \sim 2\%$  VWC,土壤特定校准:岩棉  $\pm 3\%$  VWC,  $0.5 \sim 8 \text{ dS/m}$ ;灌封土:  $\pm 3\%$  VWC,  $3 \sim 14 \text{ dS/m}$ ;  $0.1\%$  VWC(矿物土),  $0.25\%$  VWC(岩棉);测量时间  $10 \text{ ms}$ ;工作温度  $-40^\circ\text{C}$  至  $+50^\circ\text{C}$ 。

EC-5 土壤水分传感器是通过使用电容/频域技术测量介质的介电常数来确定体积含水量(VWC),其内部是由方波信号发生电路、RC 充放电电路以及时间电压转换电路等三部分组成,它们之中的传感器部件电容 C 是用耐腐蚀的 PCB 为模板、待测土壤为电解质、土壤介电常数随着水分的变化表现为电容量的一种变化。当测试电极几何因数、电阻 R、电压输出 V 是定值的时候,土壤介电常数可以由充电时间来决定,然后通过时间电压转化电路得到输出电压。所以说输出电压的变化就是所反映的土壤水分的变化。具有结构小巧、简单,防水能力强,耐腐蚀性强,测量精度高,性能可靠,受土壤含盐量影响较小等优势。同时 EC-5 土壤水分传感器的温度补偿功能比其他传感器所无法比拟的。因此,该传感器在土壤含水率的测量中得到广泛应用。

### 2.2. EC-5 土壤水分传感器的标定

根据 EC-5 土壤水分传感器的原理可知,对同一土体,传感器的输出信号值与被测土壤的体积含水率之间具有对应的映射关系;因此,试验前对所用的 5 支传感器分别编号为 S1, S2, S3, S4 和 S5,然后将试验所用淤积土加水分别配制体积含水率为  $5.6\%$ ,  $11.3\%$ ,  $15.1\%$ ,  $34.9\%$  和  $44.9\%$  的试样 5 个,最后对不同编号的土壤水分传感器进行标定,5 支传感器的输出信号值与体积含水率如图 1 所示。

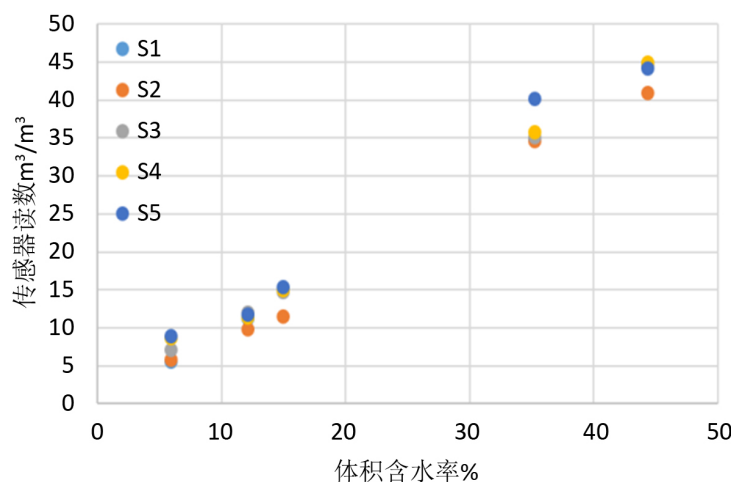


Figure 1. Calibration results of moisture sensor  
图 1. 水分传感器标定结果

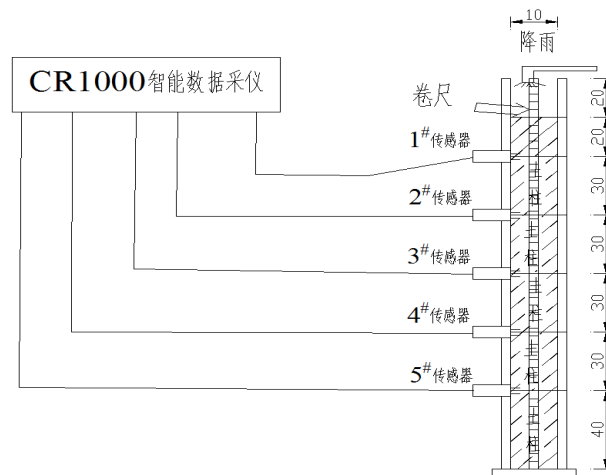


Figure 2. Rainfall infiltration test equipment  
图 2. 降雨入渗试验设备图

由图 2 可知, S1, S3, S4, S5 传感器的输出信号值与体积含水率具有较好的线性关系, S3 传感器因标定过程中的失误, 在体积含水率为 34.9% 时的读数具有较大出入值, 线性拟合时舍去该含水率下数据输出值。

### 2.3. CR1000 数据采集器

CR1000 数据采集器是美国 Campbell 公司设计和制造的一款智能数据采集仪, 扫描速率能够达到 100 Hz, 拥有模拟输入、脉冲计数、电压激发转换、数字等多个端口。可以在恶劣环境、电池供电环境下进行精确测量, 并以表格形式存储的数据带有时间标记和记录标号, 有可实时查看数据, 画图并分析数据软件。当 CR1000 数据采集器从主电源断电后, 电池支持 SRAM 内存和时钟, 可以确保数据、程序和准确时间等信息不会丢失。CR1000 所具有的高精度性、高适应性、高可靠性以及价格合理等特点, 使其广泛应用于气象观测、农业研究、土壤水分研究、通量观测等领域。

## 3. 试验装置与试验方案

### 3.1. 试验装置

模拟降雨条件下淤积体垂直入渗的试验装置包括垂直土柱制作系统、数据采集系统及模拟降雨系统, 如图 2 所示。

垂向淤积土柱的制作采用外径 300 mm, 内径 280 mm, 管长 2000 mm 的有机玻璃管, 控制某一干密度分层进行击实; 在试验前将有机玻璃管按每隔 50 mm 进行均分, 每层土体根据试验控制干密度进行称量和夯实, 考虑到会出现积水情况, 制备好后土柱的高度为 1800 mm; 土柱制作完毕后在有机玻璃管外用胶带黏接刻度清晰的卷尺, 用于读取浸润峰和积水的深度。试验的数据采集系统为 EC-5 土壤水分传感器和 CR1000 智能数据采集仪。EC-5 土壤水分传感器其探针部分全部插入土柱, 连接线路, 接入 CR1000 智能数据采集仪, 然后数据采集仪与电脑连接进行数据采集。人工降雨系统根据试验前设置的降雨强度, 按试验前设定的时间间隔计算出向土柱上表面所加水的质量, 并采用精度为 0.01 g 的电子天平进行称量后均匀缓慢加至土柱上表面。

### 3.2. 供试土样

试验所用淤积层淤积土经过 0.1 cm 的筛子过筛后, 加水配制成初始质量含水率为 7.2% 的土样(初始

体积含水率的理论计算值为 11.5%)，然后击实为干密度为  $1.350 \text{ g/cm}^3$  的一维垂直土柱。通过室内常水头渗流试验，测得重塑淤积土在干密度为  $1.350 \text{ g/cm}^3$  下的饱和渗透系数均值为  $4.03 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  (约为  $0.24 \text{ mm/min}$ )。

### 3.3. 试验方案

为模拟不同降雨强度下一维淤积土垂向入渗过程，分别设置了降雨强度为 10、25、35 和 45 mm/h 的 4 组模拟试验。当设置降雨强度为 10 mm/h 时，因为该时段降雨强度小于饱和渗透系数，每隔 10 min 向土柱上表面加一次水，理论计算可得每次的加水质量为 85.48 g，累积降雨历时和降雨量分别为 20 h 和 300 mm。当设置降雨强度为 25、35、45 mm/h 时，每隔 5 min 向土柱上表面加一次水，不同雨强下加水质量分别为 64.11、85.48、128.22 g，降雨历时分别为 20、15、10 h，累积降雨量分别为 400、525 和 450 mm。EC-5 土壤水分传感器插入土柱内，连接好 CR1000 智能数据采集仪，并设置每隔 10 min 采集一次数据。并将制备好的土柱，在玻璃管黏接刻度清晰的卷尺，并在试验过程中每次加水前读取浸润峰和积水的深度。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 入渗率对降雨的响应特征

不同降雨条件下一维土柱垂直入渗时的入渗率时程曲线。由图可知，不同降雨强度对土柱的入渗率具有如下特征：

1) 由入渗率时程曲线可知，试验黄土的最小入渗能力约为  $0.2 \text{ mm/min}$ ，与土体的饱和渗透系数较为接近；因此，土体的最小入渗能力在数值上可定为饱和渗透系数。

2) 当降雨强度为 10 mm/h 时，其强度值小于垂直土柱的最小入渗能力，降雨均沿土柱的上表面渗入土柱内，土柱上表面在整个降雨历程中均没有出现积水；因此，该降雨强度下垂直土柱的入渗率为一常数，即入渗率等于降雨强度。

3) 当降雨强度(25, 35, 45 mm/h)大于垂直土柱的最小入渗能力时，土柱的入渗率时程曲线呈 3 阶段分布的变化规律。第一阶段：降雨入渗初期，垂直土柱上表面的土体为非饱和状态，土体的含水率较低，其基质吸力较大，基于 Green-Ampt 模型可定性的断定降雨初期的垂直入渗能力较大。因此，在降雨入渗的第一阶段，垂直土柱的入渗率为一常数，等于降雨强度，直到土柱表面出现积水。第二阶段：降雨入渗中期，土柱的上表面出现积水，表面土体进入暂态饱和状态，土体的含水率增加，基质吸力减小，垂直土柱的入渗能力随着降雨历时的增加逐渐减小，直至垂直土柱的表面由暂态饱和状态进入完全饱和状态；因此，在降雨渗入的第二阶段，土柱的入渗率随着降雨历时的增加逐渐衰减至稳定值。第三阶段：降雨入渗后期，土柱表面的土体进入饱和状态后，土柱的入渗能力趋于稳定，即土柱入渗进入饱和入渗阶段；因此，该阶段入渗率趋向于饱和渗透系数。

4) 由图 3 可知，不同降雨强度条件下，其出现积水点和饱和点的时间点不同，降雨强度越小，土柱表面出现积水点和饱和点的时间越晚。如降雨强度为 25 mm/h 时，降雨历时达到 300 min 左右才出现积水点，约 500 min 达到饱和点；而当降雨强度为 45 mm/h 时，降雨 100 min 左右就出现积水点，200 min 左右便达到饱和点。同时，降雨强度越小，积水点至饱和点的时间间隔越小；当降雨强度为 25 mm/h 时，积水点与饱和点的间隔有 200 min 左右，而当降雨强度为 45 mm/h 时，二者之间的时间间隔相差最大。

5) 根据上述分析，可将降雨强度大于土壤最小入渗能力的入渗过程分为无压入渗阶段、有压入渗阶段及饱和入渗阶段，其分界点分别为积水点和饱和点。不同降雨强度下垂直土柱的累积入渗量随降雨历时的时程曲线如图 4 所示。由图 4 可知：

① 当降雨强度为 10 mm/h 时，降雨强度小于土壤的最小入渗能力，所有降雨沿着土柱表面渗入土柱内部，累积入渗量曲线为一条经过坐标原点的一条直线，直线的斜率即为降雨强度。

② 当降雨强度为 25, 35 或 45 mm/h 时，降雨强度大于淤积土最小入渗能力，而累积入渗量变化呈三个阶段变化趋势，每阶段的分界点与入渗率变化曲线相似，即以积水点和饱和点为分界，第一阶段和第三阶段均为直线，其斜率分别为降雨强度和饱和渗透系数。

③ 从试验结果可知，在降雨历时 150 min 左右，降雨强度为 35 和 45 mm/h 下，累积入渗量较为接近，二者差异较大，最后进入饱和入渗阶段后累积入渗量差值趋于稳定值。

④ 对比降雨强度为 25 和 35 mm/h 时的累积入渗量曲线可知，当降雨历时小于 210 min，在降雨强度为 35 mm/h 时，累积入渗量在无压入渗阶段增长较快，然后进入有压入渗阶段有所减缓；当降雨强度为 25 mm/h 时，一直处于无压入渗阶段，二者在 210 min 左右时累积入渗量相差较小，但 35 mm/h 的累积入渗量约大 25 mm/h。降雨强度为 25 mm/h 的有压入渗阶段较短，对累积入渗量曲线影响较小；因此，该 2 种雨强下的累积入渗量在降雨历时大于 210 min 后差异较小。

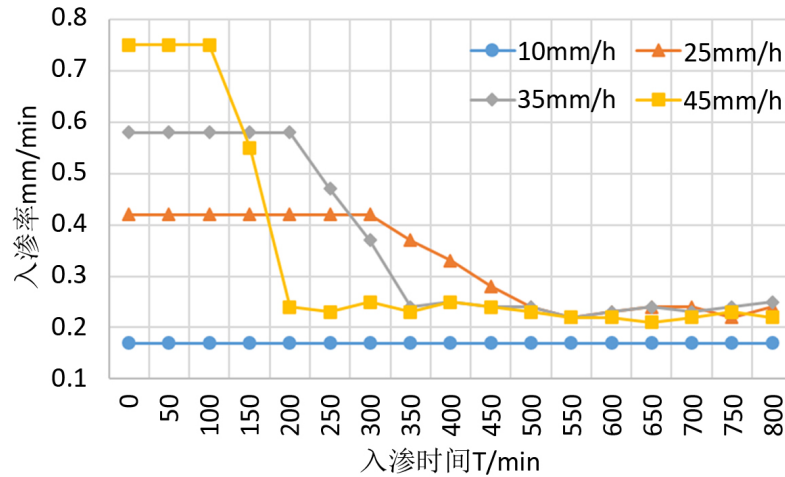


Figure 3. Time-history change curve of infiltration rate under different rainfall intensity

图 3. 不同雨强下入渗率时程变化曲线

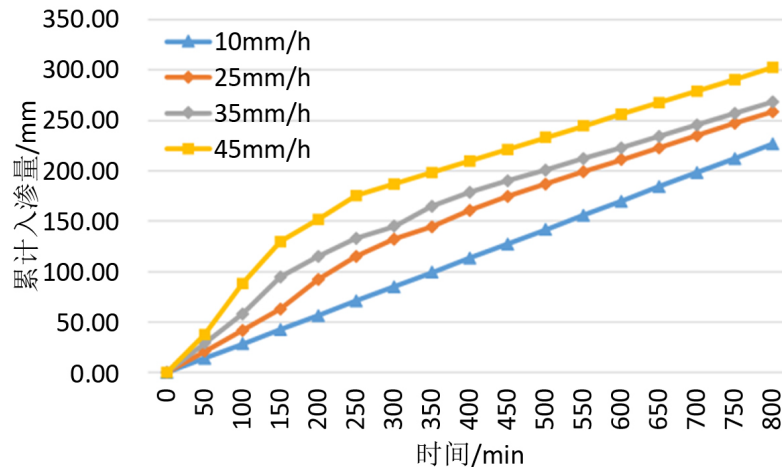


Figure 4. Variation curve of cumulative infiltration time range under different rain intensities

图 4. 不同雨强下累计入渗时程变化曲线

## 4.2. 降雨特征对浸润峰的影响

图 5 为不同降雨强度下, 土柱浸润峰深度的时程曲线。由图 5 可知, 不同降雨强度下土柱的浸润峰深度随降雨历时的增加具有如下的变化规律:

1) 土柱浸润峰深度的时程曲线可划分为三个阶段, 但不同降雨强度下各阶段的分界点不一。第一阶段, 降雨初期, 土柱的基质吸力较大, 雨水迅速传至土柱内; 因此, 该阶段土柱的浸润峰深度增长最快。第二阶段, 降雨一段时间后, 土柱上表面的土壤含水率增加, 达到暂态饱和状态后, 土柱的入渗能力慢慢衰减, 浸润峰深度的增长也逐渐减小。第三阶段, 当土柱上表面的土体达到饱和状态后, 土柱按饱和入渗的规律均匀的向土柱内部入渗。

2) 从土柱的浸润峰深度时程曲线可知, 降雨强度越大对土柱的浸润峰深度影响越大, 当降雨强度为 10 mm/h 时, 土柱最大入渗深度时程曲线的三阶段分布不明显; 当降雨强度为 45 mm/h 时, 浸润峰深度时程曲线的三阶段分布规律特别明显; 同一时间节点, 降雨强度越大, 浸润峰的深度也越大。由某一时间段的浸润峰深度变化量  $\Delta h$  比上时间段  $\Delta t$  ( $\Delta h/\Delta t$ ), 即得到不同降雨强度下土柱的平均传导率  $c$ , 如图 6 所示, 由图 6 可知, 降雨初期, 土柱的入渗能力最大, 雨水在土柱内的传导最快, 平均传导率最大; 随着土柱上

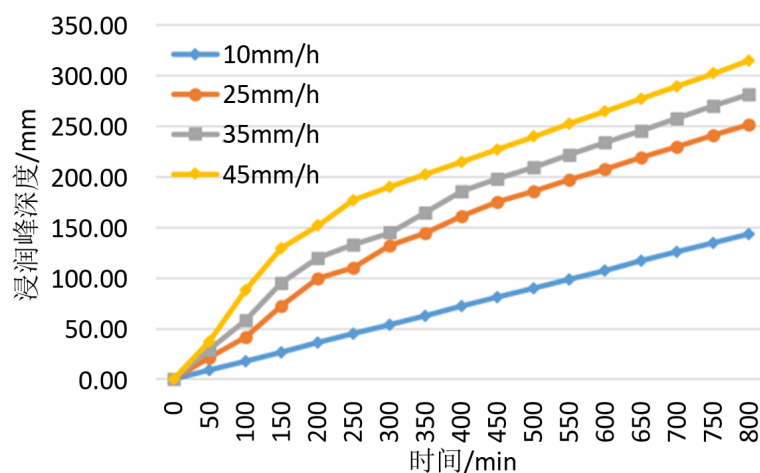


Figure 5. Time variation curve of infiltration peak with different rain intensity

图 5. 不同雨强浸润峰时程变化曲线

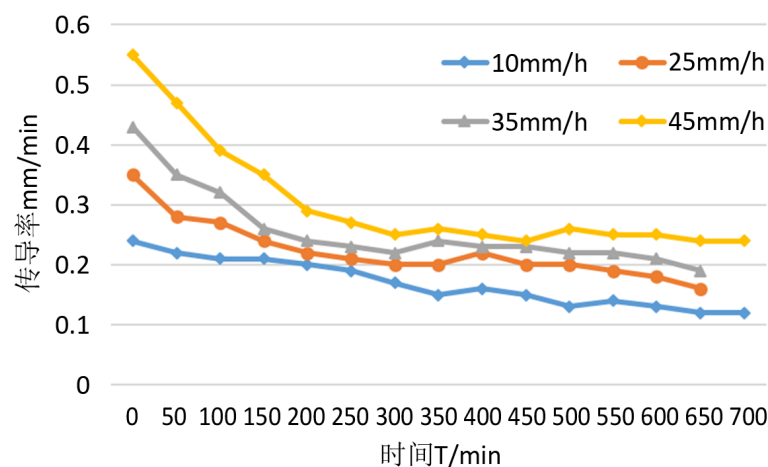


Figure 6. Time variation curves of conductivity of different rain intensities

图 6. 不同雨强传导率时程变化曲线

表面含水率的增加, 基质吸力减小, 土柱的平均传导率随降雨历时的增加迅速减小; 最后, 当土柱上表面土壤进入饱和状态后, 土柱为饱和入渗, 其平均传导率趋于某一稳定值。因此, 降雨强度对土柱入渗的影响, 主要集中在降雨中前期。

### 4.3. 典型点含水率变化

4 种降雨强度  $q$  下, 土壤水分传感器监测的体积含水率时程曲线。当降雨强度较小时, 浸润峰没有传至 5#传感器; 因此, 降雨结束后仍对 EC-5 土壤水分传感器的输出信号值进行采集。不同降雨强度下监测点的体积含水率时程曲线具有如下特点:

1) 从不同降雨强度下传感器所测土壤体积含水率可知, 监测点的最大体积含水率为 45%, 部分监测点的体积含水率只有 35%左右。

2) 当降雨强度为 15 mm/h 时, 雨强较小, 土壤的基质吸力减少得相对缓慢, 雨水有充足的时间向土柱下层入渗, 所有监测点的体积含水率都只在 30%左右, 小于其他雨强下监测点的体积含水率。从 5 个监测点体积含水率开始增长的时间节点及分布规律可知, 相邻 2 个监测点体积含水率开始增长的时间差相差较小, 5 个监测点最终含水率分布也基本在 39%左右。从 5 个监测点体积含水率增加阶段的坐标点可知, S1 监测点的坐标点最稀疏, 监测点体积含水率从开始增长至达到最大值所需时间最短; 而 S5 监测点的坐标点最密集, 监测点体积含水率达到最大值所需时间最长; 因此, 离上表面越近达到最大含水率所需时间越短。

3) 当降雨强度为 20 和 30 mm/h 时, 监测点的体积含水率时程曲线具有相同的变化规律。S1 监测点的体积含水率最先开始增长, 但并非是最先达到最大值; 由时程曲线可知, 该点的体积含水率先迅速增加至 40%左右, 出现暂态饱和状态, 然后又缓慢增加至 45%左右, 降雨结束土柱上表面没有积水后又开始下降。从相邻监测点体积含水率开始增长的时间节点可知, S1 与 S2 监测点的时间间隔最短, S4 与 S5 监测点的时间间隔最长。由 5 个监测点的体积含水率曲线可知, S3, S4 及 S5 监测点的最终体积含水率较为接近, 但小于 S 和 S2 监测点的体积含水率。

4) 在降雨强度为 45 mm/h 时, S1 和 S2 监测点的体积含水率从初始体积含水率迅速增至最大值, 无缓慢增加阶段, 其最大体积含水率小于降雨强度为 20 和 35 mm/h 下的最大体积含水率; 且 5 个监测点的最大体积含水率较为接近, 相差 2%左右; 因此, 在该雨强下土柱表面出现暂态饱和区的时间较长。

5) 在同一降雨强度下, 从监测点体积含水率增长阶段的坐标点分布可知, S1 监测点的坐标点分布最为稀疏, S5 监测点最密集; 因此, 距土柱上表面越近, 监测点的坐标点越稀疏。同理, 对同一监测点, 在不同降雨强度下体积含水率增长阶段的坐标点分布可知, 10 mm/h 最密集, 45 mm/h 最稀疏; 因此, 降雨强度越大, 监测点的坐标点分布越稀疏。

## 5. 结论

降雨垂直入渗补给过程是淤地坝淤积层水循环的重要过程, 也是降雨径流挖潜的重要组成部分。通过自行设计加工的试验装置对初始体积含水率为 11.50%的淤积土柱进行了 4 组不同雨强下的垂向入渗特性试验, 主要得到以下结论:

1) 降雨垂向入渗结果表明, 当降雨强度小于淤积层的最小入渗能力时, 淤积层垂直入渗率时程曲线为一平行于横轴的直线; 当降雨强度大于最小入渗能力时, 垂向入渗率时程曲线呈无压入渗、有压入渗和饱和入渗三个阶段变化。

2) 不同降雨强度下积水点和饱和点出现的时间点不同, 降雨强度越大时, 积水点和饱和点出现的时间越短, 而有压入渗经历的阶段越长。



3) 不同降雨条件下浸润峰深度时程变化呈现三个阶段变化趋势;且表现出平均传导率在降雨初期最大,随着降雨历时的增加逐渐衰减,最后趋于稳定值。

4) 从土壤水分传感器测试的含水率分布可知,淤积土层表面的体积含水率不会迅速达到饱和状态,而是经历一个由非饱和态到暂态饱和态,最后达到饱和态的变化过程。

## 基金项目

国家重点研发计划(2017YFC0403604),黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2019-05)。

## 参考文献

- [1] 王保清, 卫三平, 张淑珍. 从吕梁“9·19”特大暴雨洪水看淤地坝的防洪减灾作用[J]. 中国水土保持, 2011(7): 22-24.
- [2] Ma, W.M., Zhang, X.C., Zhen, Q., *et al.* (2016) Effect of Soil Texture on Water Infiltration in Semiarid Reclaimed Land. *Water Quality Research Journal of Canada*, **51**, 33-41. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2015.025>
- [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] Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911) Studies on Soil Physics Part I: The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal of Agricultural Science*, **4**, 1-24.
- [5] Philip, J.R. (1957) The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. *Soil Science*, **84**, 257-234. <https://doi.org/10.1097/00010694-195709000-00010>
- [6] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.
- [7] 毛丽丽, 张心平, 雷廷武, 等. 用水平土柱与 Green-Ampt 模型方法测量土壤入渗性能的原理与误差[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 6-10.
- [8] Almedeij, J. and Esen, I.I. (2014) Modified Green-Ampt Infiltration Model for Steady Rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering*, **19**, 1-6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000944](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000944)
- [9] 戴经梁, 伍石生, 盛安连. 压实黄土路基积水入渗规律研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3): 155-158.
- [10] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等非饱和原状和重塑 Q3 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1020-1027.
- [11] 陈洪凯, 唐红梅, 唐云辉, 等. 强降雨作用下强风化泥岩降雨入渗特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2755-2760.
- [12] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1873-1879.
- [13] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61-67.
- [14] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(Z): 327-333.
- [15] Abraham, C.F.C., Zhu, W. and Chen, X.D. (2009) Rainfall Infiltration Pattern in an Unsaturated Silty Sand. *Journal of Hydrologic Engineering*, **14**, 882-886. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:8\(882\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:8(882))