

# 土壤入渗气液两相流的变化过程\*

李援农<sup>1</sup>, 刘书榜<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2 陕西省丹凤县水利局, 陕西 丹凤 726102)

**[摘要]** 根据室内及田间恒定土壤空气压力、正常积水入渗过程中湿润层土壤含水量的变化, 观察了禁錾土壤空气压力及入渗水流的变化过程。结果表明, 入渗过程中禁錾土壤空气压力变化过程可分为急剧变化、缓慢变化和稳定变化3个阶段, 得出稳定入渗阶段的平均截面含水率分别为0.97和0.50 L/L。

**[关键词]** 积水入渗; 气液两相流; 土壤空气压力; 截面含水率

**[中图分类号]** S152.7+2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2002)06-0177-04

积水条件下水向土壤中的入渗是水流替换土壤中空气的过程, 人们通常用经验公式或半经验公式表示入渗水流的入渗速度, 且通常不考虑土壤中气相对水流的阻碍作用<sup>[1-3]</sup>。入渗水流替换土壤气时将产生空化和反向气流运动, 同时产生一些物理变化, 与入渗水流逆向运动的土壤空气对入渗水流产生阻力作用, 并减小土壤内水流运动速度<sup>[4,5]</sup>。但是人们研究入渗常常忽略反向气流对入渗的影响。为了研究这一影响, 在室内分别进行了积水条件下恒定土壤空气压力及正常入渗条件下入渗过程中气液两相变化过程试验研究, 现将结果报道如下。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学农业水土工程研究所进行, 试验用土为重粉质粘土, 土壤容重为2.715 g/cm<sup>3</sup>, 对应土壤孔隙率为49.7%。

### 1.2 试验装置

试验装置分为恒定土壤空气压力和普通(或称为正常)入渗两种。图1为一维入渗试验装置图。由土柱、马司桶、空气压力测试设备及恒压器4部分组成。土柱置于高度110 cm、内径17.5 cm的有机玻璃管中, 土柱高度为90 cm, 上部15 cm用于保持水层, 下部5 cm为滤层。土柱侧壁垂直平行开有空气压力测试、土壤湿度测定两排孔。马司桶为一内径10 cm, 高度100 cm, 侧壁有刻度尺的有机玻璃桶, 标尺刻度为mm。土壤空气压力采集是通过微压传感器采集后传输至压力采集器, 其压力测试等级

为3 mm。恒压器主要用于恒定土壤空气压力下受禁錾土壤空气压力影响的浑水入渗变化。马司桶、土柱及恒压器通过控制阀连接, 为了防止土壤空气压力采集器受水流积存影响, 孔口内用筛网及细沙反滤。

恒定及普通入渗中禁錾土壤空气压力变化及影响的试验均用马司桶向土柱供水, 土表面积水深度分别为6、9和12 cm, 室内试验温度均为(20±2)℃, 标准大气压。

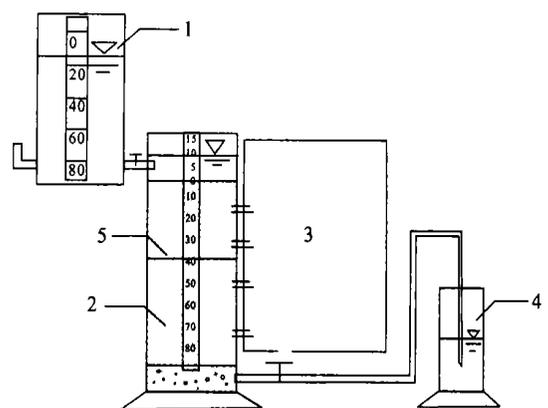


图1 入渗试验装置组成

1. 马司桶; 2. 土柱; 3. 空气压力采集器; 4. 恒压器; 5. 湿润峰

Fig. 1 The composition of infiltration instalments

1. Mariotte bucket; 2. Soil column; 3. Air pressure collector; 4. Constant pressure meter; 5. Peak moisture

## 2 土壤中气液两相流基本参数

描述单相流体流动特性的基本参数通常为流体

\* [收稿日期] 2001-11-02  
[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(40071057)  
[作者简介] 李援农(1962-), 男, 陕西大荔人, 副教授, 主要从事农田节水灌溉技术、节水灌溉机理研究。

的运动速度、质量流量或体积流量等。对于多相流体而言,除这些参数外,各相的质量含量、体积含量和各相运动速度也是重要参数。土壤中的水气两相流动当不考虑气相的压缩变形时,通常用截面比率、体积流量和实际流速等表示。

2.1 截面含气率 (a) 和截面含液率 (1-a)

入渗土壤层面主要由三部分组成,包括固体土壤介质、入渗水流和流动的土壤空气等。但是,研究土壤入渗时通常忽略固体土壤介质的变形,因此,入渗过程实际上是研究土壤中气相和水的改变量,这可以通过截面含气率 (a) 和截面含液率 (1-a) 反映其改变。即

$$a = \frac{A_a}{A}, \quad (1)$$

$$(1-a) = \frac{A_l}{A}, \quad (2)$$

式中, a 为土壤截面含气率; (1-a) 为土壤截面含液率; A 为土壤截面上空气和水所占总面积; A<sub>a</sub> 为土壤截面上空气所占面积; A<sub>l</sub> 为土壤截面上水所占面积。

2.2 体积总流量 (Q)、气相体积流量 (Q<sub>a</sub>)、液相或水的体积流量 (Q<sub>l</sub>)

$$Q = Q_a + Q_l, \quad (3)$$

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho_a}, \quad (4)$$

$$Q_l = \frac{W_l}{\rho_l}, \quad (5)$$

式中, ρ<sub>a</sub> 为气相密度, g/cm<sup>3</sup>; W<sub>a</sub> 为逸出的土壤空气重量, g; ρ<sub>l</sub> 为液相密度, g/cm<sup>3</sup>; W<sub>l</sub> 为流动的土壤液体重量, g。

2.3 气相和液相实际流速 V<sub>a</sub>, V<sub>l</sub>

气相实际流速 V<sub>a</sub> 和液相实际流速 V<sub>l</sub> 可分别表示为

$$V_a = \frac{Q_a}{A_a} = \frac{W_a}{\rho_a A_a}, \quad (6)$$

表 1 入渗过程中气相、液相变化

Table 1 Changes of air phase and liquid phase in the process of infiltration

恒定土壤空气压力 The stable soil air pressure				正常入渗情况 The normal infiltration			
截面含气率 (a) The proportion of liquid in the section		截面含液率 (1-a) The proportion of air in the section		截面含气率 (a) The proportion of liquid in the section		截面含液率 (1-a) The proportion of air in the section	
初始值 Initial number	稳定值 Stable number	初始值 Initial number	稳定值 Stable number	初始值 Initial number	稳定值 Stable number	初始值 Initial number	稳定值 Stable number
0	326	0	673	0	759	0	343
0	326	0	572	0	673	0	428

3.2 入渗过程中土壤的气液两相流  
积水入渗条件下水向土壤的运动实际上是入渗

$$V_l = \frac{Q_l}{A_l} = \frac{W_l}{\rho_l A_l} \quad (7)$$

3 试验结果

3.1 土壤气相对液相运动的影响

图 2 是地面积水深度 6 cm 时恒定土壤空气压力和正常入渗时的试验观测结果。系列 1 为地面积水深度 6 cm 时正常入渗的累积入渗水量观测结果,系列 2 为系列 1 对应试验的土壤湿润过程;系列 3 为恒定土壤空气压力状态累积入渗水量观测结果,系列 4 为系列 3 对应试验的土壤湿润过程。由图 2 和试验数据处理得出,正常入渗水量小于恒压入渗水量,入渗过程中水量差别如表 1 所示。由表 1 中数据可以看出,整个入渗过程中正常入渗与恒压入渗相比较,累积入渗水量变化速度呈逐渐下降趋势,最初 40 min,由于入渗水流不断从土壤表面排空气,入渗速度变化较大,40 min 后入渗速度变化呈现出减小趋势。禁锢土壤空气压力的减渗作用呈现出增加趋势,120 min 时的减渗量约为 16%。湿润深度呈现出相同规律。

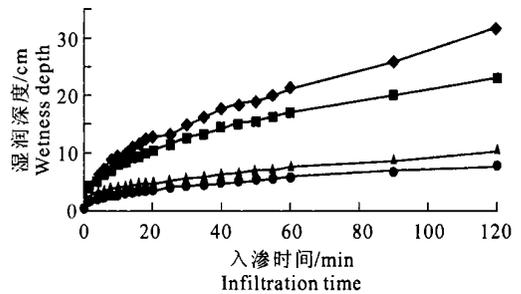


图 2 对比试验研究结果

—◆—, 系列 1; —■—, 系列 2; —▲—, 系列 3; —●—, 系列 4

Fig. 2 The result of the contrast tested

—◆—, Series 1; —■—, Series 2; —▲—, Series 3; —●—, Series 4

水流替换土壤中空气的过程,空气流动方向与入渗水流运动方向相反;并且土壤空气的流动阻碍土壤

中的水流运动。当不考虑入渗水流对土壤中空气的压缩时, 二者的体积流速大小相等。即

$$|V_a| = |V_l| \quad (8)$$

入渗过程中的两相流变化。试验土壤的孔隙含量。试验土壤为重粉质粘土, 土壤容重为  $2.715 \text{ g/cm}^3$ , 试验土壤干容重为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ , 对应土壤孔隙率为  $49.7\%$ 。

土壤气相对液相运动的影响。入渗过程中土壤气相(空气)对入渗水流产生影响, 图3中系列2为恒定土壤空气压力  $6 \text{ kPa}$  时的入渗试验结果,

系列1和系列2的试验土壤初始含水量分别为  $120$  和  $80 \text{ g/kg}$ , 对应土壤水体积含量为  $0.162$  和  $0.108 \text{ L/L}$ , 土壤干容重均为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ , 对应空气体积含量为  $0.335$  和  $0.389 \text{ L/L}$ ; 系列3土壤初始含水量为  $120 \text{ g/kg}$  (即空气体积含量为  $0.335 \text{ L/L}$ ) 时的实际入渗情况, 即土壤空气压力在水向土壤中运动时存在变化的入渗试验结果。

稳定阶段土壤截面气、液相体积变化。试验结果如表1。

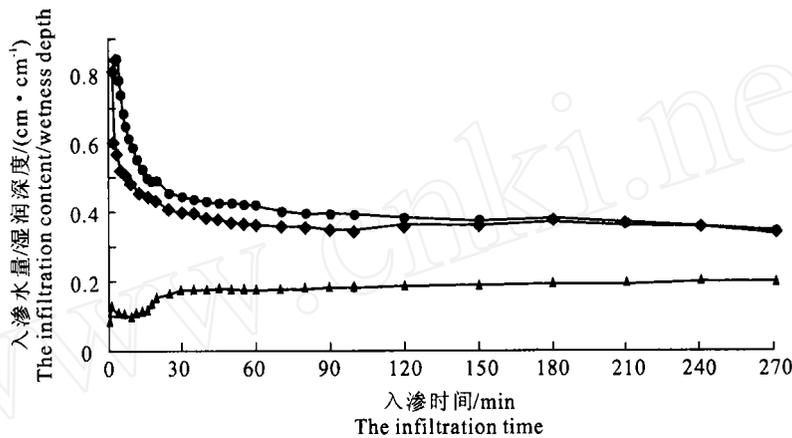


图3 土壤湿润层内水分含量的变化

—◆—, 系列1; —●—, 系列2; —▲—, 系列3

Fig. 3 The changes of water content in moisture layer

—◆—, Series 1; —●—, Series 2; —▲—, Series 3

由图3可以看出, 恒定土壤空气压力不存在反向气流运动时的土壤入渗, 最初  $20 \text{ min}$  土壤湿润过程表现为入渗速度变化迅速下降;  $20 \sim 115 \text{ min}$ , 土壤入渗速度逐渐变化到稳定过渡阶段;  $115 \text{ min}$  以后, 逐渐进入稳定变化。  $115 \text{ min}$  内湿润层土壤中平均含水量增加了  $0.321 \text{ L/L}$ , 入渗速度缓慢减小。但是在实际入渗过程中, 存在有与水流运动反向运动的土壤空气, 表现出最初  $40 \text{ min}$  内, 湿润层土壤水分入渗速度变化较大;  $40 \sim 115 \text{ min}$  时, 湿润层土壤含水状况缓慢增加; 之后逐渐进入稳定变化, 土壤水分含量增加了  $0.246 \text{ L/L}$ , 并缓慢增加。由此可见, 恒定土壤空气压力的湿润层土壤含水量高于存在反向气流运动时的入渗情况。

## 4 讨论

根据气相与液相组成的不同, 气液两相流可分为两种。一种是由同一种物质组成的气液两相流, 称为单组分两相流, 例如, 由水蒸汽和水组成的气液

两相流。另一种是由不同物质组成的气液两相流, 称为双组分气液两相流, 例如, 由空气和水组成不相混溶的气液两相流, 在不发生相变的流动过程中, 单组分气液两相流和双组分气液两相流适合相同的物理规律。因此, 两者常统称为气液两相流。入渗过程中土壤内的水气两相流动属于不同组分的气液两相流, 且入渗过程中忽略气液两相流的热交换过程。

积水入渗条件下恒定土壤空气压力对下渗水流产生一定的顶托作用, 即气相对液相的向下运动存在着阻碍作用。与正常入渗情况, 即存在有反向气流的入渗情况相比较, 恒定土壤空气压力对水向土壤中入渗的影响要小得多。

在入渗初始阶段, 恒定土壤空气压力条件下, 湿润层内土壤含水量呈迅速下降趋势, 对正常而言, 土壤空气压力则呈现起伏变化, 即土壤表面有气流排出时含水量迅速增加, 无气流排出时则逐渐衰减; 在入渗过度阶段, 恒定土壤空气压力条件下湿润层内土壤含水量呈逐渐下降趋势, 而正常入渗呈现出起

伏变化,即土壤表面有气流排出时含水量逐渐增加,土壤空气压力与实际入渗试验结果表明,稳定入渗无气流排出时则逐渐上升;在入渗稳定阶段,恒定阶段的平均截面含水率分别为 0.97 和 0.50 L/L。

### [参考文献]

- [1] 希勒尔 D. 土壤和水-物理原理和过程 [M]. 华孟,叶和才,译.北京:农业出版社,1981. 7.
- [2] 李援农.均质土壤积水入渗的变化规律及其影响 [J].水土侵蚀与水土保持学报,1997, 6: 51- 54.
- [3] 孙西欢.涌流沟灌入渗实验研究 [D].西安:陕西机械学院,1993.
- [4] 李援农.恒定土壤空气压力对入渗的影响 [J].西北农业大学学报,1995, 3: 138- 142.
- [5] 李援农.土壤入渗过程中空气压力变化规律的研究 [J].西北农业大学学报,1995, 6: 72- 75.

## Changes of two soil phases in the process of infiltration

L I Y u a n - n o n g<sup>1</sup>, L I U S h u - b a n g<sup>2</sup>

(1 College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2 Water Conservancy Office of Danfeng County, Danfeng, Shaanxi 726102, China)

**Abstract:** According to the variation of the water volume in the wet layer which exists in the stable soil air pressure infiltration and the normal infiltration indoors and outdoors, we have observed the process of the soil air entrapment pressure and the infiltration water flow. Studies have showed that the soil air pressure content of the wetted soil can be divided into three stages: rapid, slow and stable stages. And we have concluded that the section water content in the stable infiltration is 0.97 or 0.50 L/L.

**Key words:** water-accumulated infiltration; liquid and air phases; soil air pressure; section water content