

# 黄土中渗流水的运动特征研究

杨柳悦<sup>1</sup>, 严宝文<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**现代黄土所具有的结构非均质性是地质历史时期渗流水不断入渗作用的结果。以均质黄土试样为例,以孔隙比结构性参数  $m_p$  为指标,采用渗流槽实验装置研究黄土中水的下渗,对比分析了单点供水和多点供水情况下,非饱和均质黄土中渗流水的渗透运动特征以及垂向渗流与黄土结构参数之间的关系。研究表明,纵向渗流速度以 1~4 的倍比大于横向渗流速度,纵向渗流速度与横向渗流速度的比值越大,对黄土结构的影响越大,纵向渗流速度对现代黄土结构的成因贡献较大,但横向渗流速度的作用也不可忽视。

**关键词:**渗透扩散; 结构参数; 地下水; 黄土

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0006-04

## Study on Movement Characteristic of Seepage Water in the Loess

YANG Liu-yue<sup>1</sup>, YAN Bao-wen<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The structural heterogeneity of current loess is the result of continuous infiltration of seepage water during the eras of geological history. We took homogeneous loess as the case, void ratio structure parameter  $m_p$  as indicators and seepage canal as devices to study percolation in loess. Study on movement characteristic of seepage water in unsaturated homogeneous loess and the relationship between vertical seepage and structural parameters  $m_p$  under single and multiple point water supply was carried out. According to the results, the longitudinal flow velocity is 1~4 times more than horizontal flow velocity; the larger the ratio of longitudinal and horizontal velocity is, the greater the influence on the structure of loess is; the longitudinal flow velocity makes a great contribution to current loess structure, however, the effect of the horizontal flow velocity cannot be ignored.

**Key words:** penetration and diffusion; structure parameters; groundwater; loess

在我国地表水资源相对贫乏的干旱、半干旱黄土地区,地下水资源具有不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。在地下水资源的形成过程中,入渗水会对地下岩土体的结构稳定性造成潜在危害,而这种危害在土层深厚而渗透性能良好的黄土地区的作用不容忽视<sup>[4-6]</sup>。结合黄土本身的成分和结构特点,渗流水对原始均质黄土具有强烈的结构破坏和结构再造作用,可以说,现代黄土所具有的结构非均质性很大程度上是地质历史时期渗流水不断入渗作用的结果<sup>[7-9]</sup>。在与地下水系统接触时,也会在接触面附近产生明显的化学溶蚀和机械

冲蚀作用。此外,黄土高原地区大多黄土体地质灾害如滑坡、黄土洞穴、地裂缝等与降雨和地表水的下渗和潜蚀有着密切关系<sup>[10]</sup>。因此,研究黄土中渗流水渗透运动特征就具有十分的必要性。

水分在土体中的运动是目前土壤水和地下水研究中的重要课题之一。入渗水通过黄土非饱和带垂直向下及水平扩散运动会引起黄土微结构乃至宏观结构的破坏与再造。近年来的研究发现,在均质黄土层中,渗流水的垂向渗透性能和水平扩散性能差异明显,随入渗时间的增加,湿润锋形态将发生扭曲,其结

果是局部水分呈柱状流动,即出现指流<sup>[11-15]</sup>。但以往的研究较少涉及渗流水在运动过程中对黄土结构的塑造与破坏再造,以及垂向渗流与土体结构参数之间的关系,而进一步利用这一成果为地下水资源利用、地下水潜蚀作用机理研究也并不多见,为此,本研究以均质黄土试样为例,采用渗流槽试验装置研究渗流水的运动特性与土体结构性参数  $m_p$  间的关系,探讨黄土的渗流运动特征以及相应的黄土微结构塑造和再造过程,为黄土地下水运动参数的确定、地下水渗流潜蚀作用机理探究提供理论基础。

## 1 试验设计

取地下埋深 2~3 m 处的黄土,基本晾干(含水率 $\leq 10\%$ )后过 5 mm 筛,之后装填土样。装样过程中,在渗流槽底部首先装填 20 cm 的沙子,之后装填筛分过的土样。土样直接装填,利用颗粒重力自由筛分,模拟原始黄土的堆积过程。土样装填 150 cm 之后,在供水口对应处附近覆盖 3 cm 左右的沙子,防止供水时在供水口对应处引起冲刷。

采取定流量单点和多点供水的供水方式,供水开始后,按照不同的时间间隔观测、记录绘制渗流前端浸润锋的形态。上述操作过程中,还需向下部水槽中加水,模拟地下水的向上浸润过程,同样观测、记录绘制前端浸润曲线的形态。在上下湿润锋交会后,观察垂向渗流与地下水接触瞬间的接触面形态,实验结束,停止计时。

实验开始前,取土样进行含水率、干密度、孔隙率等的测定。结束后,取 20, 40, 60, 80, 100, 120 cm 处的土样进行含水率的测定,其中 40, 80, 120 cm 处的土样仍进行干密度、孔隙率的测定。

## 2 研究方法

### 2.1 室内试验、观测

本研究的主要方法是室内模拟试验,主要装置是两个直径 1 m, 高度 2 m 的小型渗流槽,其主要结构如图 1 所示。

进行室内模型试验时,两个渗流槽分别采取单点和多点充分供水的供水方式,通过观测网格按照不同的时间间隔观测、记录绘制渗流前端浸润锋的形态,量算渗流的垂向和水平运动速度。同时,渗流槽底部 20 cm 装填砂砾石层并有外围水槽供模拟地下水含水层,以便观察垂向渗流与地下水接触瞬间的接触面形态及地下水系统对渗流的迎纳模式。试验中和结束后,分别以洛阳铲采取土样测定其含水量和孔隙率以计算黄土土体结构参数。

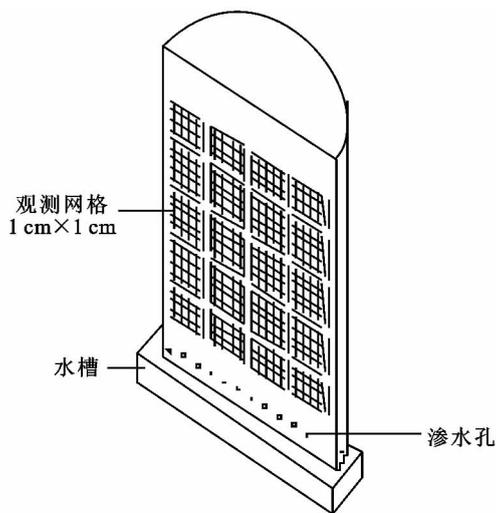


图1 实验装置图

### 2.2 黄土结构参数

试验过程中,需不断采取渗流区内的黄土试样,对其含水率、结构性参数和黄土微结构形态进行检测。本研究选用陈存礼等<sup>[16]</sup>以压缩试验为基础,用同一压力下原状黄土与扰动饱和土的孔隙比  $e_y, e_{rs}$  之比来表示的结构性参数,其表达式为:

$$m_p = \frac{e_y}{e_{rs}} \quad (1)$$

式中:  $e_y$ ——压缩性试验中原状黄土的孔隙比;  
 $e_{rs}$ ——同一压力下渗流扰动后的饱和黄土孔隙比。

## 3 结果与分析

试验共进行了三组,第一、二组都包括单点和多点清水充分供水实验,第三组为一次单点供水实验,试验结果从以下 3 个方面进行分析。

### 3.1 纵向渗透速度与横向渗透速度

因多点供水条件下,浸润曲线较早接触边壁,可测得的横向速度点较少,不足以进行数据分析,因此这一项分析以单点供水测得的数据进行分析。三次单点清水供水条件下的纵向渗透速度与横向渗透速度关系见图 2。

由图 2 可知,对于模拟原始状态的堆积黄土而言,渗流水的横向渗透速度与纵向渗透速度具有明显的直线关系,而渗流纵向速度大于横向速度,由此可推理,在这样的长期作用下,土层的纵向通道将成为下渗水的优先通道而越来越发达,而横向通道则发育较缓慢,这一结论在一定程度上解释了现今黄土纵向垂直节理发育,而水平方向裂隙走向各异,难以形成主导渗流方向的事实。但值得注意的一点是,虽然渗

流水纵向速度比横向速度大,但尚未达到现在普遍认为的纵向渗透速度比横向速度大十几倍的程度,只是

在 1~4 倍之间变动,说明渗流水的横向扩散在现代黄土的结构生成中也起着不可忽视的作用。

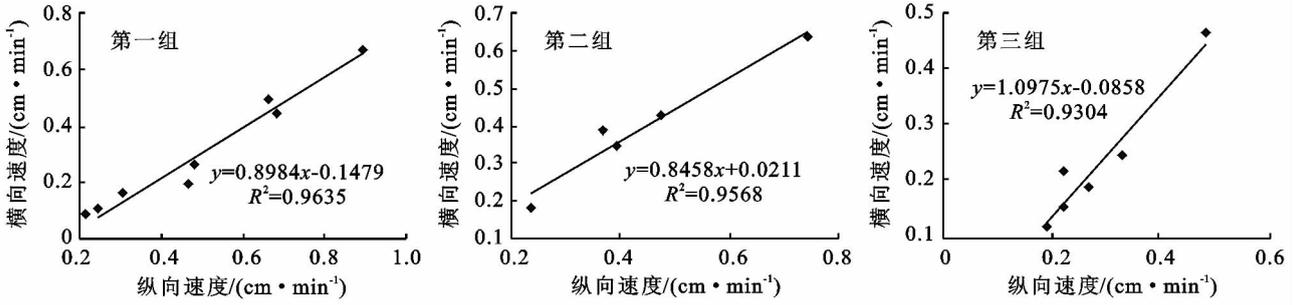


图 2 不同组单点供水的纵向速度与横向速度

### 3.2 黄土结构参数与纵横向渗透速度比的关系

对比三组 3 个单点供水情况下,湿润锋通过 40 cm 处后的黄土结构参数  $m_p$  值,分别是 1.22, 1.11, 1.12, 计算渗流水经过 40 cm 位置前的纵横速度比,得到图 3。由图 3 可以发现,当  $m_p$  值较大时,纵向、横向渗透速度比值直线的斜率较大,也即是说纵向、横向渗透速度比比值越大,  $m_p$  值越大,相对于原状土

样,土体的原有结构破坏越明显。纵向渗透速度是现今黄土纵向节理发育的主要原因,纵向渗透速度大于横向渗透速度越突出,黄土原始结构破坏、新结构重塑作用越显著。

### 3.3 纵向渗透速度与黄土结构参数的关系

由公式(1)计算得到黄土结构参数( $m_p$ ),如表 1 所示。

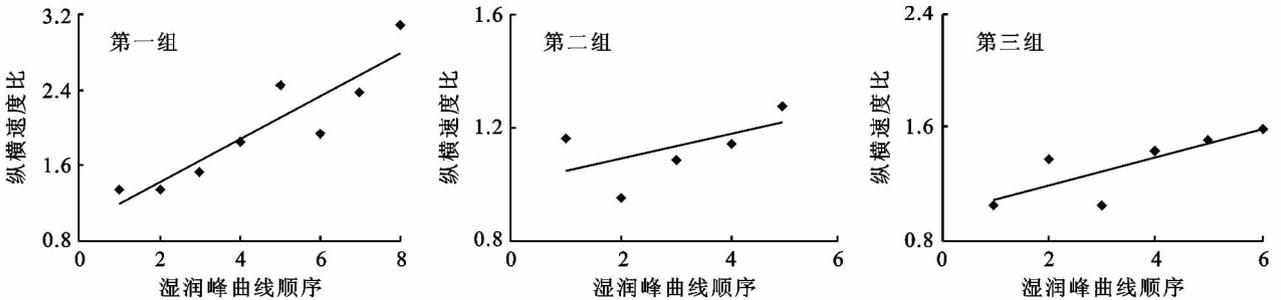


图 3 不同组单点供水下的纵向、横向渗透速度比

表 1 黄土纵向渗透速度与结构参数

埋深 距离/cm	第一组			第二组			第三组		
	供水方式	$m_p$	纵向速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	供水方式	$m_p$	纵向速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	供水方式	$m_p$	纵向速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
40		1.22	0.39		1.11	0.25		1.12	0.16
80	单点	1.58	0.20	单点	1.51	0.09	单点	1.23	0.15
120		1.70	0.16		1.70	0.09		1.37	0.10
40		1.14	0.27		1.28	0.27			
80	多点	1.62	0.18	多点	1.63	0.16			
120		1.73	0.12		1.72	0.12			

由表 1 可以看到,随着埋深距离的加深,纵向渗透速度呈减小趋势,而结构参数  $m_p$  呈增大趋势。纵向渗透速度减小的主要原因有两个,一个是随着渗流水的不断向下运动,因水流通过距离加长,接触土体颗粒越来越多,受颗粒吸附作用加强,导致进一步向下运动速度减慢;另一个原因是随着水流向下运动,横向扩散面积加大,下行通道中的水流减少,渗流水的下行运动受到影响。

为进一步探究纵向渗透速度与结构参数的关系,

做纵向渗透速度与  $m_p$  的关系图(图 4)。

结构参数  $m_p$  反映的是相对于原状土样,经过渗流扰动后饱和土样孔隙比的变化或者黄土原结构的破坏变化程度,随着渗流水的下渗,伴随着黄土的增湿塌陷,下层土体孔隙被压缩,导致孔隙比变小,表现出来的就是,  $m_p$  的数值的从上到下越来越大,也就是随着渗流水的运动,对黄土结构的破坏、塑造作用愈加强烈。但从图 4 中看到,大的渗流速度下反而对应小的结构参数  $m_p$ ,似乎与理论上认为的流速越

大,对土体结构破坏、塑造作用越强相矛盾,但实质上:渗流水的下渗很大程度上是以走渗流通道的形式实现的,那么大的渗流速度势必会对通道附近的土体

产生强烈的侵蚀、破坏、重塑作用,但取出的土试样中只有很小的一部分是属于渗流通道附近的,不足以影响结构参数  $m_p$  整体较小的事实。

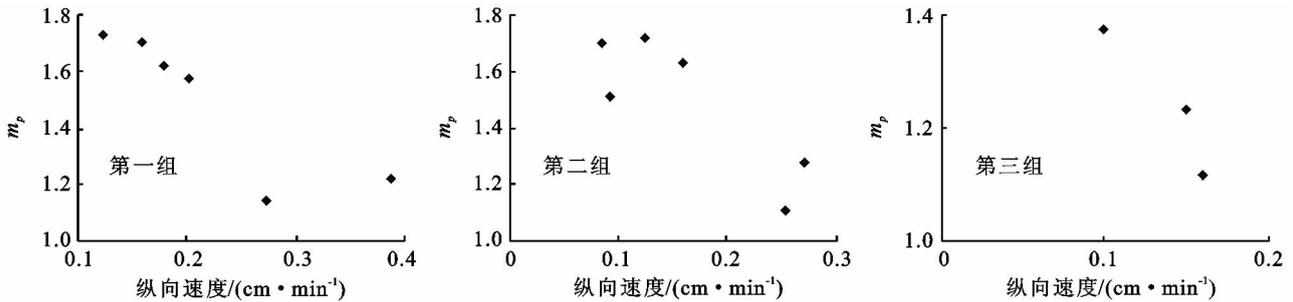


图4 不同组的纵向速度与结构参数

## 4 结论

本研究以渗流槽替代土柱作为主要研究工具,采用室内试验方法测定土壤含水率并绘制渗流前端湿润锋曲线,进而计算土体结构参数  $m_p$  和渗流的总横向速度。得到结论如下:

(1) 原始黄土中,渗流水在渗透过程中,纵向渗透运动速度大于横向速度1~4倍,诠释了现代黄土纵向垂直节理发育,水平方向裂隙走向各异的事实。同时,渗流水对原始的风成均质黄土有强烈的结构再造和结构破坏作用,现代黄土所具有的结构非均质性很大程度上是地质历史时期渗流水不断作用的结果。

(2) 纵向、横向渗流渗透速度比值与黄土结构参数有明显的关系,该比值大,对应的黄土结构参数大,则对黄土结构的破坏、重塑作用强。

(3) 随渗流水的向下扩散,由于渗流通道的加长和横向扩散面积的加大,渗透速度逐渐减小,而结构参数  $m_p$  则越来越大,原因是渗流水的下移,伴随着黄土的增湿塌陷,下层土体孔隙被压缩,导致孔隙比变小  $m_p$ ,也就是随着渗流水的运动,对黄土结构的破坏、塑造作用愈加强烈。

同时,垂向渗流与地下水接触瞬间的接触面形态、地下水系统对渗流水垂向渗流的迎纳模式也是本试验的研究内容,限于篇幅,本文不做进一步的深入分析,但就目前的观测结果而言,当垂向渗流湿润锋与地下水浸润曲线较接近时,存在着明显的相互吸引和尖点接触现象,将另撰文展开进一步的分析论述。

### 参考文献:

[1] 盛海洋,孟秋立,朱殿华,等.我国地下水开发利用中的水环境问题及其对策[J].水土保持研究,2006,13(1):51-53.  
[2] 叶剑锋,刘小勇.基于GIS技术的地下水管理系统研究

[J].水土保持研究,2011,18(3):247-251.

[3] 许义和,魏晓妹,蔡明科,等.基于地统计学的宝鸡市区地下水位空间变异特征研究[J].水土保持研究,2011,18(1):210-214.  
[4] 刘建平.陕西省子长地区黄土的潜蚀试验研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2008.  
[5] 陈永宗,景可,蔡强国,等.黄土高原现代侵蚀及治理[M].北京:科学出版社,1988.  
[6] 李喜安,彭建兵,郑书彦,等.湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀模式研究[J].水土保持研究,2005,12(6):25-27.  
[7] 陈梦熊,马凤山.中国地下水资源与环境[M]北京:地震出版社,2002:4-5.  
[8] 李佩成地下水动力学[M]北京:农业出版社,1993:219-238.  
[9] 李喜安,陈文军,邓亚虹,等.渗流潜蚀作用临界发生条件的推导[J].水土保持研究,2010,17(5):216-221.  
[10] 李喜安,彭建兵,陈志新,等.黄土地层地表径流下潜模式与地质灾害[J].工程地质学报,2007,15(4):495-499.  
[11] Ching W S, Yu T. Peak shape and dispersion behavior of solutes in counter-current chromatography with a single phase[J]. Journal of Chromatography, 2009, 1216(40):6789-6795.  
[12] 吴叔赢,张建丰,高瑞,等.上层土壤厚度对模拟指流水分运动的影响[J].农业工程学报,2011,27(10):169-173.  
[13] Raats P A C. Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1973, 37(5):681-685.  
[14] Huang Zhida. Wetting front instability analysis of infiltration in layered porous media[J]. Math Research, 1998,6(2):122-131.  
[15] Wang Zhi, Jury W A. Unstable flow during redistribution[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(2):549-559.  
[16] 陈存礼,高鹏,胡再强.黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1352-1360.