

# 沟道间歇积水入渗过程浅析

孙 西 欢

(太原工业大学水利系·太原·030024)

王 文 焰

(西安理工大学水资源研究所·西安·710048)

**摘 要** 根据田间入渗试验结果,分析了间歇积水入渗过程的特点及间歇积水参数对入渗过程的影响,探讨了间歇积水入渗机理。这对涌流灌溉原理的研究具有重要的参考价值。

**关键词** 沟道 入渗 间歇入渗 入渗过程 涌流灌溉

## The Process of Intermittent Storage Infiltration on Furrow

Sun Xihuan

(Department of Water Conservancy Taiyuan University of Technology, Taiyuan. 030024)

Wang Wenyan

(Institute of Water Resources Xian University of Technology, Xian. 710048)

**Abstract** On the basis of the field infiltration experiment results on furrow, the characteristics of intermittent storage infiltration process and the effect of intermittent storage parameter on infiltration process were analysed, and the mechanism of intermittent storage infiltration was discussed in this paper. This was of importance for the further research of surge flow irrigation principle.

**Key words** furrow infiltration intermittent infiltration infiltration process surge flow irrigation

## 1 前 言

涌流灌溉是一项地面灌水新技术,它具有省水、省时、深层渗漏小及田间水利用率高等优点,被誉为80年代地面灌水技术上的一次“革命”<sup>[1]</sup>,涌流灌溉的诸多优点与田间土壤入渗特性的变化有着密切的联系。在涌流灌水条件下,田间土壤入渗是一种间歇性的积水入渗,其入渗过程与连续积水入渗过程相比有着明显的不同,而且这一入渗过程受控于间歇积水参数(如积水时间 $t_{on}$ ,停水时间 $t_{off}$ ,周期时间 $t_c = t_{on} + t_{off}$ ,循环率 $r = t_{on}/t_c$ 及周期数 $n$ 等)。本文根据在陕西省宝鸡峡灌溉试验站进行的沟灌间歇积水入渗试验,对间歇积水入渗的过程机理进行了探讨,并分析

了间歇积水参数对入渗过程的影响。

## 2 试验简介

沟灌入渗属于二维入渗,故入渗试验采用了沟段法测定沟灌入渗量,即以一定长度的沟道为测试段,两端加设保护段。试验中保持保护段与测试段水位相同,以使测试段形成二维入渗。根据测试段的入渗量,可计算单位沟长的入渗量。入渗量的测定采用了新研制的沟灌静水入渗仪,该仪器以沟段法为基础,设有自动供水和水位控制系统,具有量测精度高、操作方便、劳动量小和适用性强等优点<sup>[2]</sup>。试区位于渭河流域的黄土台塬区,地面较平坦,地下水埋深达70多m。土壤类型为塬土,土属红油土,中壤质土。土壤剖面上松下紧,经实测0~20cm土壤干容重为 $1.28\text{g/cm}^3$ ,20~100cm土壤干容重为 $1.40\text{g/cm}^3$ 。

## 3 间歇积水入渗过程的特点及分析

### 3.1 间歇积水入渗过程的特点

图1给出了单位沟长的连续积水和间歇积水入渗过程及其相应的入渗率过程。由图可知间歇入渗过程有如下特点:

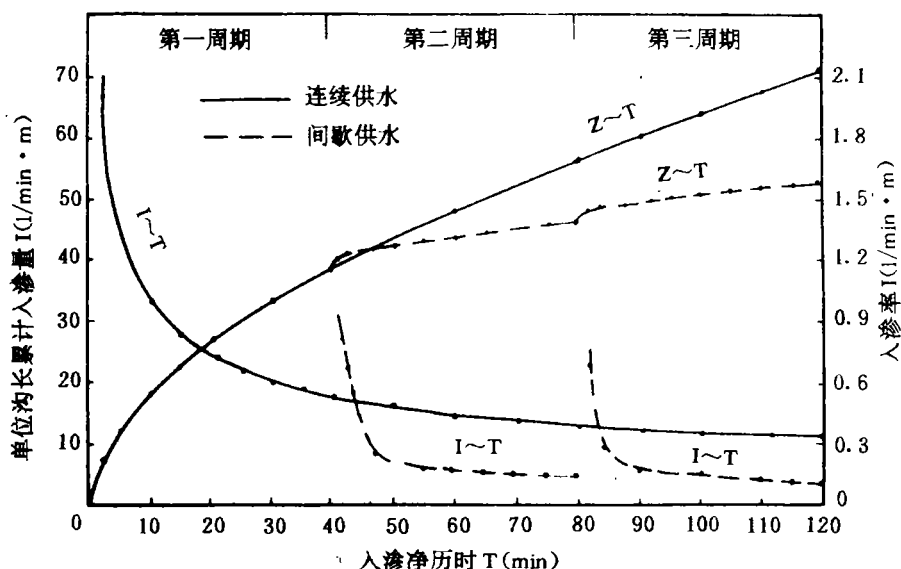


图1 连续积水及间歇积水的入渗过程(间歇入渗  $T_m = 40\text{min}$ ,  $r = 1/2$ )

(1)连续积水的入渗过程是一条连续曲线,而间歇积水条件下,各周期期间的入渗过程呈不连续状态,第一周期的入渗过程与连续积水入渗过程相同,第一周期后各周期的入渗过程均呈抛物状,其在周期初时段均存在一个凸变段,随后平稳。入渗率过程的变化也具有类似的特点,只是第一周期后各周期初时段存在一凹陡变段,随后平稳。

(2)第一周期后相同受水时段内间歇积水的入渗量小于连续积水的入渗量;入渗率过程在其平稳段间歇积水入渗率小于连续积水入渗率,而在周期的最初时段间歇积水入渗率大于连续积水入渗率,但间歇积水的周期平均入渗率(周期累计入渗量  $\Delta Z_i$  与积水时间  $t_m$  之比)却小于相同受水时段内连续积水的平均入渗率(见表1),第二、第三周期的平均入渗率分别减小了54.5%和

55.0%。

表1 周期入渗量和周期平均入渗率比较表

周期序号 i	周期入渗量(l/m)		周期平均入渗率(l/m·min)		$I_i - \bar{I}_i$
	间歇 $\Delta Z_i$	连续 $\Delta Z_i$	间歇 $I_i$	连续 $I_i$	$\bar{I}_i$
2	8.3268	18.2871	0.2082	0.4572	0.545
3	6.5332	14.5135	0.1633	0.3628	0.550

注： $r = 1/2, t_m = 40\text{min}$

3.2 间歇积水入渗过程的分析

由非饱和达西定律可知：

$$q_y = -k_y(\theta)\partial\psi/\partial y$$
$$q_z = -k_z(\theta)\partial\psi/\partial z$$

式中： $q_y、q_z$  分别为  $y、z$  方向( $z$  方向垂直向下)的入渗水分通量； $k_y(\theta)、k_z(\theta)$  分别为  $y、z$  方向的导水率； $\psi$  为总水势。

上式表明，土壤水分入渗通量的大小取决于导水率和势梯度。间歇积水条件下入渗过程所具有的特点，主要是由于停水期的作用使得土壤表层物理性状发生了变化。

在第一周期的积水入渗期间，由于初始含水率较小，因而初时段各方向的势梯度较大，所以入渗率较大，累计入渗量增加较快。随着入渗历时的逐渐加长，土壤表层含水率接近饱和含水率(形成饱和区)，土壤湿润区也逐渐扩大，土壤表层势梯度逐渐变小，而导水率有增大到饱和导水率的趋势。但在入渗过程中，入渗界面处的团聚体遇水后强烈消散和分散，使得一些细颗粒随入渗水流洗入土壤表层而造成土壤孔隙的阻塞，使土壤表层形成了一个较为紧实的“洗入层”<sup>[3]</sup>，这又成为导水率减小的一个因素。所以随着入渗历时的加长，入渗率趋于减小，累计入渗量增加幅度减缓。在停水期间(地表没有积水)，土壤开始内排水，土壤表层含水率降低而产生了负压。Samani 等人(1985)曾对壤质土进行了土壤负压与饱和导水率、干容重关系的室内试验研究<sup>[4]</sup>，

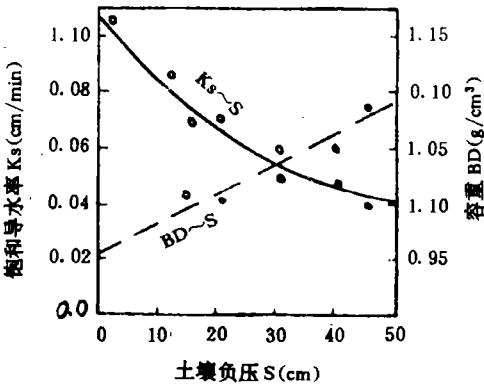


图2 饱和导水率、容重与土壤负压的关系  
(引自文献[4])

结果表明：随着负压的增高，土壤的饱和导水率趋于减小，而干容重趋于增大(见图2)。这说明负压的产生使得土壤致密化，致密的程度与负压值的大小成正比。因此，负压的产生使得“洗入层”更加密实，使土壤表层形成了一个致密层。致密层的存在可以用板结层的大田观察来佐证。1992年春灌后形成的板结层，厚4cm，表面光而密实，其下1cm内剖面有肉眼可见的细小孔隙，用手拨可发现许多平行的层面，其下部孔隙由小到大。这说明在入渗过程中细小颗粒洗入土壤表层，在上部孔隙中沉积最多，下部孔隙中沉积较少，而且入渗水流对土壤最表层颗粒有着重新排列作用，这一洗入层在地表无积水的情况下，由于土壤水分再分布(包括太阳辐射而引起的蒸发)而产生负压，形成了致密的结壳。

停水期后，虽然土壤表层致密，饱和导水率减小，但由于第一周期停水期间的土壤水分再分布，使得土壤表层含水率降低，因此，在第二周期积水入渗的初时段，势梯度较大，因而入渗率较大。随着入渗历时的延长，土壤表层逐渐饱和，导水率趋于饱和导水率，而且势梯度逐渐变小，因

而入渗率减小,入渗率和入渗量过程变得平缓。由此可知,第二周期初时段入渗量过程的凸陡变段和入渗率过程的凹陡变段,主要是由于土壤表层较大的势梯度所致。土壤表层达到饱和并向向下扩展时,土壤表层的饱和导水率成为影响入渗的主导因素,而表层致密层的饱和导水率小于连续积水条件下的饱和导水率,因而间歇积水条件下的入渗率小于连续积水条件下的入渗率。

由图1可知,第三周期入渗量和入渗率过程与第二周期类似,但第三周期的平均入渗率略小于第二周期的平均入渗率,说明第二周期入渗中仍有细小颗粒洗入作用,而且停水期间土壤负压对土壤表层的致密化有进一步影响,但并不象第一周期那样显著。

综上所述,在间歇积水条件下,入渗过程中细小颗粒的洗入和停水期内土壤表层负压的产生,导致了入渗界面下致密层的形成,因而周期入渗量和平均周期入渗率较相同受水时段内的连续积水入渗量和平均入渗率小,说明间歇积水入渗较连续积水入渗率小,说明间歇积水入渗较连续积水入渗具有减渗性。

#### 4 间歇积水参数对入渗过程的影响

为了分析不同间歇积水参数下的入渗过程,我们用无量纲的相对入渗量和入渗率来表示周期的累计入渗量和平均入渗率。

$$RZ_i = \frac{Z_i}{Z_1}$$

$$RI_i = \frac{\bar{I}_i}{\bar{I}_1} = \frac{\frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_1}}{\frac{t_{on}}{t_{on}}} = RZ_i - RZ_{i-1}$$

式中:  $RZ_i$ 、 $RI_i$  分别为第  $i$  周期的相对累计入渗量和相对平均入渗率;  $Z_i$ 、 $\bar{I}_i$  分别为第  $i$  周期的累计入渗量和平均入渗率;  $Z_1$ 、 $\bar{I}_1$  分别为第一周期的累计入渗量和平均入渗率;  $t_{on}$  为周期积水入渗时间。

图3给出了不同间歇积水参数下的相对累计入渗过程和相对周期平均入渗率,从图中可以看出:

(1) 相对累计入渗量过程受控于间歇积水参数,对于相同的积水时间  $t_{on}$ ,某周期的相对累计入渗量随着循环率  $r$  的减小而减小;对于相同的循环率  $r$ ,某周期的相对累计入渗量随着积水时间  $t_{on}$  的增大而减小。

(2) 相对周期平均入渗率同样受控于间歇积水参数,其变化规律与相对累计入渗量相同;对于确定的积水时间和循环率,相对周期平均入渗率随着周期数的增大而趋于减小,而且第二周期比第一周期减小的幅度大,而第三周期比第二周期减小的较小。

间歇积水参数之间有如下关系:

$$t_{off} = t_{on} \left( \frac{1}{r} - 1 \right)$$

由上式可知,在循环率一定的条件下,积水时间增大或者在积水时间一定的条件下,循环率减小,实际上都反映了停水时间的增大。停水时间越长,则停水期内土壤水分再分布越充分,表层土壤的负压值趋于增高,致密化作用加强,因此,随着停水时间的增大,累计入渗量和周期平均入渗率趋于减小,其相对值也必然减小,另外,在循环率一定的条件下,随着积水时间的增大,第一周期内入渗界面细小颗粒随水流“洗入”土壤表层的量和深度将会有所增加,在停水期的作用下,土壤

表层更加致密化。这种致密化效应,使得后续周期的入渗率减小。在积水时间和循环率一定的条件下,相对周期平均入渗率周期的变化,说明了第一周期入渗过程中细小颗粒的洗入和停水期内致密层的形成,对后续周期平均入渗率的减小起主导作用,后续周期内致密层有发展,但非常缓慢,因而呈现出第一周期平均入渗率大于第二周期,而第二周期则略大于第三周期。

## 5 结 语

根据田间试验结果,本文对间歇积水入渗过程的特点及间歇积水参数对入渗过程的影响进行了分析,结果表明:由于停水期的存在,使得土壤物理性状发生了变化,因而间歇积水入渗过程不同于连续积水入渗过程;间歇积水较连续积水的入渗量减小,则主要是由于停水期内土壤负压的产生和积水期内细小颗粒的洗入,使得土壤表层形成了致密层;间歇积水入渗过程受控于间歇积水参数。上述结果对进一步认识和探讨间歇积水入渗机理和涌流灌溉原理的研究有着重要的参考价值。

## 参考文献

- 1 Field comparison of continuous, surge and cutback irrigation. Presented at 1984 Summer Meeting of ASCE. 1984. Paper No. 84~2093
- 2 沟灌静水入渗仪的研制. 西北水资源与水工程. 1993. 4(1):83~88
- 3 L. D. 贝弗尔, W. H. 加德纳, W. R. 加德纳著. 周传槐译, 叶和才, 华孟, 张君常, 袁剑航等校, 徐松龄总校. 土壤物理学. 农业出版社, 1983
- 4 Infiltration under surge flow irrigation. TRANSACTION of the ASAE. 1987, 30(1):1539~1542

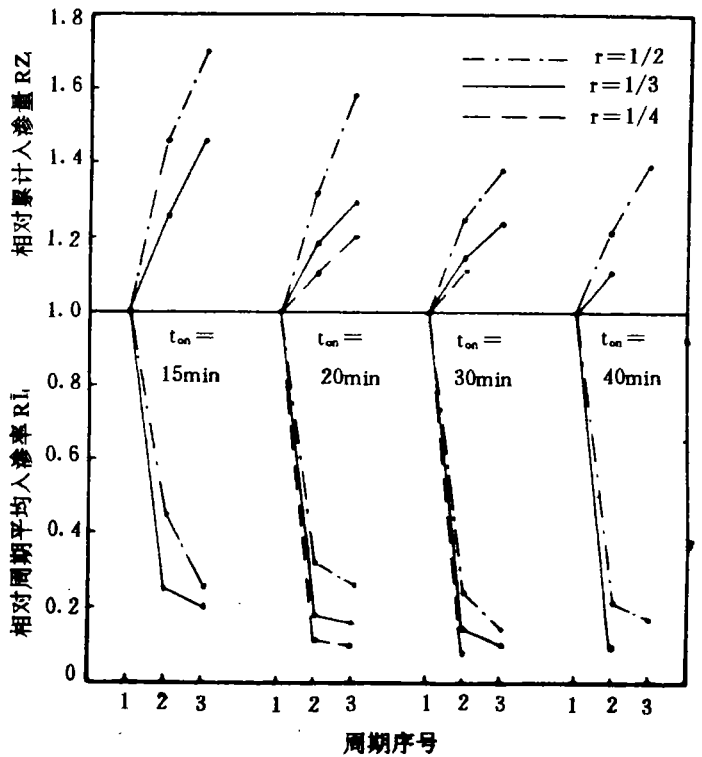


图3 相对累计入渗量及相对周期平均入渗率