

# 间歇入渗减渗机理浅析

樊贵盛

党志良

(太原工业大学·山西省太原市·030024) (陕西机械学院·西安市·710043)

## 提 要

该文从理论上分析了间歇入渗减渗的内在机理,以大田实测资料验证了致密层形成与发展的客观性,对间歇入渗条件下水力传导度减小的机理进行了分析,可为进行间歇灌溉灌水技术的研究者和用水管理者提供有益的参考。

关键词: 间歇灌 间歇入渗 减渗

## Approach on Infiltration Reducement Mechanism of Infiltration under Surge Irrigation

Fan Guisheng

(Department of Water Conservancy under Taiyuan Technical University, Taiyuan, Shanxi 030024)

Dang Zhiliang

(Shaanxi Mechanical College, Xian 710043)

## Abstract

The infiltration reduction mechanism of infiltration under surge irrigation were analysed theoretically. The natural laws for the form and development of compact layer have been tested and verified using field experimental data in a large range. The mechanism of reducing water conductivity of infiltration under surge irrigation has been analysed in order to supply beneficial reference for these researchers who work on the surge irrigative techniques and for these administrative personnel who work on water utilization.

**Key words** surge irrigation infiltration under surge irrigation reducing infiltration

间歇灌(surge irrigation),又称波涌灌,是一种新的地面灌水技术,于70年代末问世于美国。与传统的地面灌水技术相比,间歇灌具有节水、灌水均匀、灌溉水利用系数高、可实现小流量灌水等优点。与现代灌水新技术(喷灌、滴灌、管灌等)相比,其具有基建投资小、运行费用低、节能、要求管理水平低、易于群众所掌握和应用的突出优点。因而间歇灌被认为是当前地面灌溉研究中的一个重大突破。随着我国生产水平和国民经济的发展,为缓解日益尖锐的水资源供需矛盾,间歇灌溉技术必将为人们所重视,必将成为节水灌溉的主要措施之一。

如上所述,节水和提高灌水质量是间歇灌最突出的优点。其所以节水和具有较大的灌水效率,是由其特殊的灌水过程所决定。在实施某次灌水过程中,间歇灌不象传统的地面畦、沟灌那样,将灌水定额所要求的水量连续不断的一次性的输入灌水畦或沟。间歇灌将灌水定额所要求的水量分次

输入灌水畦或沟。因此, 灌水畦、沟在整个灌水过程中周期性的受水和停水, 地表土壤经历周期性的吸水和脱水。换言之, 灌水畦、沟经历放水湿润和停水落干的交替过程, 在灌水畦、沟停水落干过程中, 地表土壤的物理性状发生变化, 为下周期受水时的水流推进和入渗创造了新的边界条件。地表土壤的物理性状变化主要有以下两个方面: 一是地表土层变的相对密实(所谓致密层形成), 使土壤的入渗能力降低; 二是地表糙率减小, 引起下次供水时水流推进速度的加快。当然, 水流推进速度的加快, 除与糙率的减小直接有关外, 还与土壤入渗能力的降低有关。土壤入渗能力的降低, 使各过水断面流量大于连续灌溉条件下的流量, 与此流量相对应的畦、沟水深也将增加, 也会使水流推进速度加快。土壤入渗能力的降低和糙率的减小的综合作用结果是间歇灌的节水效果和灌水质量的提高。由以上分析可知, 间歇灌溉条件下土壤入渗能力的降低是间歇灌节水和具有较高灌水质量的主要原因。据笔者 1991 年冬季和 1992 年春季、夏季在陕西关中宝鸡峡灌区灌溉试验站所进行的 160 组大田连续和间歇单点入渗试验结果, 在该区中壤质地土壤条件下, 与连续入渗相比, 间歇入渗累积入渗量减少—5.5%~45.6。其入渗量减小量的大小与土壤质地、土壤结构(主要指板结程度)、灌水次数以及构成间歇入渗过程的灌水参数(灌水周期数  $n$ 、周期灌水时间  $T_{on}$ 、周期停水时间  $T_{off}$ 、循环率  $r$ ) 等因素有关。同一质地条件下, 土壤结构和循环率是其主要影响因素。随着灌水前地表板结程度的增加(用地表 4cm 深度平均容重作为衡量标准), 间歇入渗入渗量减小幅度减小。循环率不宜过大, 也不宜过小。循环率的选择合适与否, 决定着间歇入渗是否有减渗效果。试验结果充分证明了间歇入渗与连续入渗相比具有较小的入渗量和入渗率这一事实。本文的目的就在于根据已有试验资料, 分析间歇入渗减渗机理。

### 一、间歇入渗减渗机理理论分析

描述土壤一维垂直连续入渗的数学物理方程为:

$$q = -K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad \varphi = \varphi_m + \varphi_g \quad (1)$$

式中:  $q$ ——土壤水分通量;  $K$ ——水力传导度;  $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ ——土壤水势梯度;  $\varphi$ ——土壤水势;  $\varphi_m$ ——土壤水基质势;  $\varphi_g$ ——土壤水重力势。

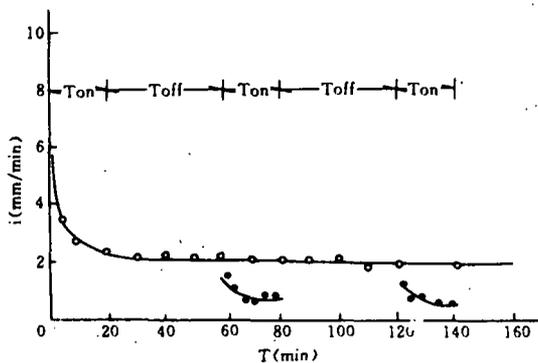


图 1 连续与间歇入渗速度比较图

图 1 给出了一组连续入渗与间歇入渗(灌水参数为  $T_{on} = 20\text{min}$ 、 $n = 3$ 、 $T_{off} = 40\text{min}$ 、 $r = 1/3$ )入渗率对比曲线。从图 1 可以看出:(1) 间歇入渗率明显小于连续入渗同时刻入渗率;(2) 间歇入渗率也表现出从每周期灌水开始入渗率由大变小, 最后趋于稳定的总变化趋势, 与连续入渗过程变化趋势相似。因此, 间歇入渗过程也可用(1)式描述。基于间歇入渗率明显小于连续入渗同时刻入渗率这一事实, 我们对方程(1)作一分析, 以揭示间歇入渗减渗的内在机理。

由于在间歇入渗条件下, 方程(1)的左端较连续入渗条件下同时刻的通量小, 故方程(1)的右端必然也较连续入渗条件下的值为小。要使方程(1)右端的乘积减小, 或者其中任何一项减小, 或者二者同时减小。图 2 给出一组大田实测间歇入渗水分再分布过程线。

由图 2 可以看出, 停水期间地表土壤脱水, 水分向深层运移, 随着停水时间的增加, 土壤脱水深度逐渐增加, 表层土壤的脱水程度也在增加。停水 40min 后的脱水深度比停水 20min 时为大(分别为 21cm 和 19cm), 停水 40min 时的地表土壤含水量较 20min 时的含水量小。连续入渗条件下当入渗时间达到某时刻后地表某深度范围内土壤饱和或接近饱和, 基质势项接近零值, 即  $\varphi_m \approx 0$ 。若取地表处  $\Delta z$  深度计算土壤水势梯度,  $\frac{\Delta \varphi}{\Delta z} = \frac{\Delta \varphi_m + \Delta \varphi_s}{\Delta z} = \frac{0 - \Delta z}{\Delta z} = -1$ 。间歇入渗条件下, 由于地表及其以下一定范围内土壤含水量下降, 故地表以下一定深度范围内土壤基质势  $\varphi_m < 0$ 。同样取地表处  $\Delta z$  深度计算土壤水势梯度有  $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\Delta \varphi_m + \Delta \varphi_s}{\Delta z} = \frac{\varphi_{ms} - \Delta z}{\Delta z} < -1$ 。因此, 间歇入渗时, 地表处的  $-\frac{\partial \varphi}{\partial z}$  项大于连续入渗时的  $-\frac{\partial \varphi}{\partial z}$  项。所以间歇入渗条件下入渗率的减小只能是由于  $K$  值的减小引起, 而且仅当由于  $K$  值的减小所引起的入渗率的减小量足以抵偿由于  $-\frac{\partial \varphi}{\partial z}$  项的增加所引起的入渗率的增加量时, 间歇入渗率小于连续入渗同时刻的入渗率这一事实才能成立。

在给定土壤质地和土壤结构的条件下, 水力传导度仅是含水量  $\theta$  的函数, 即  $K = K(\theta)$ 。

连续入渗条件下可以假定  $K$  仅是含水量的函数。而间歇入渗条件下, 由于停水阶段的存在, 停水期间土壤水分重新分布, 地表土壤物理性状发生变化, 水力传导度不再仅是含水量  $\theta$  的函数, 它同时也是土壤结构的函数, 即  $K = K(\theta, d)$  ( $d$  为反映土壤结构状况的物理量)。尽管停水之后地表及其以下一定深度范围内土壤水分下降, 但由于停水时间一般较短, 含水量下降值不会很大, 所以无论是连续入渗还是间歇入渗地表处含水量对  $K$  值的影响不会很大, 其值都等于或接近饱和和水力传导度。因此,  $K$  值的减

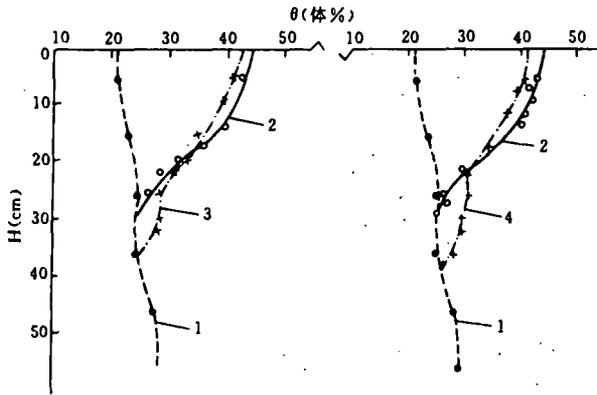


图 2 间歇入渗水分再分布曲线(1992 04 25)

1. 初始含水量分布曲线;
2. 第一周期供水结束时水分分布曲线;
3. 第一周期停水 20min 时水分分布曲线;
4. 第一周期停水 40min 时水分分布曲线;

小只能是由于土壤结构的变化引起。

同一土壤质地条件下, 土壤越密实, 大孔隙越少, 同一含水率下  $K$  值随土容重的增加而减小。由此可知  $K$  值的减小只能由于地表土壤容重的增大引起。即所谓间歇入渗过程中, 停水阶段的存在导致了地表土壤致密层的形成和发展。

## 二、致密层客观存在性的验证及形成机理分析

(一)致密层客观存在性验证 间歇入渗过程中, 地表土壤致密层的形成与发展意味着地表土壤容重随灌水过程的延续而增大。为验证致密层的客观存在性, 测定了地表在灌水过程中的相对下沉量和各周期的地表 2cm 平均容重。

由表 1 可以看出, 所列 5 组间歇入渗试验在停水期间地表都有不同程度的下沉量, 地表的下沉

意味着停水终了时刻地表土壤的容重大于停水时的容量, 灌水前地表土壤耕作条件的不同, 板结程度不同, 间歇入渗灌水参数不同, 其下沉幅度不同。此外, 比较第一周期和第二周期的下沉量可以看出, 第一周期的下沉量较第二周期的量值大, 这是由于第一周期停水阶段后, 地表土壤已相对密实, 而第二周期停水期间土壤结构的变化是在已相对密实的土壤上进行, 使已密实的土壤再密实更不容易。尽管由于测试手段的限制和大田空间变异性的影响, 不能直接通过地表下沉量定量地描述间歇入渗过程中地表土壤结构的变化程度, 但起码可以定性地证明间歇入渗过程中, 由于停水阶段的存在, 地表土壤变密实。

表 1 间歇入渗过程中地表相对下沉量

试验编号	灌水参数				停水期间地面下沉量(mm)	
	T <sub>on</sub>	n	T <sub>on</sub>	r	第一周期	第二周期
H-3-20-40-A <sub>1</sub> <sup>*</sup>	20	3	40	1/3	5.2	2.0
H-3-20-20-A <sub>1</sub> <sup>*</sup>	20	3	20	1/2	3.0	1.0
H-3-20-20-A <sub>2</sub> <sup>†</sup>	20	3	20	1/2	2.3	0.0
F-3-10-40	10	3	40	1/5	6.0	2.0
F-3-20-40	20	3	40	1/3	4.5	2.0

表 2 间歇入渗过程中地表土壤容重测定结果

组别	试验编号	灌前土壤干容重	各周期停水末干容重		灌水后 24h 干容重
			第一周期	第二周期	
A	H-3-20-20-A <sub>1</sub> <sup>*</sup>	1.143	1.222	1.222	1.295
B	H-3-20-40-A <sub>1</sub> <sup>*</sup>	1.143	1.238	1.206	1.285

注: 干容重为地表 2cm 平均容重(g/cm<sup>3</sup>)。

的形成发展是由于地表土层在停水阶段的重新固结所致。供水入渗期间地表土壤在入渗水的作用下, 崩解溶化, 团粒失去稳定性。停水期间, 地表土壤脱水, 土壤水势降低, 土壤水吸力增加, 水吸力的作用使已崩解的土粒重新固结成更为密实的土层。

### 三、水力传导度减小的其它原因分析

致密层的形成与发展是造成间歇入渗过程中水力传导度减小的主要原因, 但以下几方面都或许对水力传导度的减小有影响。

1. 土壤粘粒的水化作用。一些类型的土壤粘粒遇水后膨胀是人所共知的事实。分布于砂粒和粉粒之间的粘粒, 在间歇入渗供水期间膨胀, 由于粘粒水化作用的滞后性, 在间歇入渗停水阶段粘粒的膨胀在继续。粘粒的膨胀使土壤孔隙减小, 导致水力传导度减小。粘粒水化作用减小水力传导度的程度与土壤结构、灌溉供水水质和土壤粘粒类型有关。

2. 灌溉水中悬移泥沙的沉积和迁移。灌溉水中携带的细粒泥沙, 在间歇入渗过程中沉积在地表, 停水期间形成结构紧密的微薄层, 其大孔隙极少, 形成相对弱透土层。此外, 灌溉水中的细粒泥沙迁移进入地表土层中, 也会使地表土壤的水力传导度降低。

3. 禁锢气体的存在。在间歇入渗停水期间, 气体进入地表以下一定深度范围内, 下周期供水入渗时, 气体来不及排出, 占据土壤大孔隙, 使地表土层的水力传导度降低。 (下转第 61 页)

由表 2 可以看出: (1) 随着停水次数的增加地表土壤容重呈增加趋势。(B 组第二周期的测量值有所反常是由于测量误差所致); (2) 第一周期停水末期容重值较灌水前的容重值有较大的增值, 而第二周期的容重值与第一周期相比没有再增加, 灌水 24h 后的容重值又有较大幅度的增长。因此, 用间歇入渗过程中地表

实测容重的变化也证明了间歇入渗条件下, 2 密层的存在和发展。

(二) 致密层形成机理浅析 致密层是指地表 1cm 厚或者更薄的密实土层, 它在间歇入渗过程中的

保农民利益不受侵犯。

2. 积极兴办农村工业,引导农民向第二、第三产业转移,农民农忙时务农,农闲时进厂做工,增加农民的非农业收入比例。保持农村经济稳步发展。其次土地经营相对集中,扩大经营规模,提高劳动生产率。

3. 加强农业投资强度,对于农业基础设施建设,国家投入应为主体。逐步推行基金制度,增强农业生产的稳定经营程度。

4. 建立有中国特色的农村经济协会。由农民在自愿基础上组成,政府应给予优惠政策和必要的资金扶持。通过先服务,再发展,最后形成经济实体,引导农民进入市场,在计划、生产、加工、销售及代购生产、生活资料方面为农民服务。政府对农业的一些调控措施通过农经会来实施。

5. 对现行农业体制进行改革。所有涉农部门通过对农业的服务来确定收益的比例,多服务多收益,少服务难生存。在法律上应明确规定利益分配比例,保护农业发展。

6. 强化农村教育和农业科研工作,保持农业发展后劲。花大力气培养21世纪的新型农民,文盲务农的历史应该结束。新型农民应该是高素质、懂经营、懂流通的科技型经营人才。加强农业科研的投入,充实农业技术储备,只有这样,中国农业才能加速实现农业现代化。(参考文献8篇略)

(上接第33页)

#### 四、结 语

通过上述分析可得出如下结论:间歇入渗条件下,土壤入渗能力的降低是间歇灌水技术节水和灌水质量提高的主要原因之一,间歇入渗能力的降低主要由于入渗上边界水力传导度的减小所致;水力传导度的减小主要由于入渗上边界结构的变化(致密层的形成和发展)所致,但也与土壤粘粒的水化作用,禁锢气体的存在以及灌溉水中悬移细粒的沉积和迁移有关。

致密层的形成与发展以及水力传导度的减小原因的研究是个很复杂的问题,加之受目前研究手段的限制,本文仅对间歇入渗减渗机理作了粗浅的分析,进一步的研究尚待继续。

感谢王文焰教授的精心指导。

#### 参 考 文 献

- [1]王文焰. 一种新的地面灌水技术——波涌灌.《陕西水利》,1989年,第3期
- [2]雷志栋等. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社,1989年
- [3]姚贤良等. 土壤物理学. 北京:农业出版社,1989年
- [4]Zohrad A. Samani, wynn R. Walkeer Lyman willardson, Infiltration under sarge Irrigation, 1985年
- [5]WYNN R. Walker and Gaglord V. Skogeboe, Surface Irrigation, 1987年
- [6]USDA Soil Conservation, Surge Flow Irrigation Field Guide, 1986年