

# 土壤入渗特性的季节性变化对 灌溉效果的影响研究

樊贵盛 迟久鉴 王旭照

(太原工业大学·太原·030024)

**摘 要** 依据耕作土壤年内不同季节的土壤入渗试验和大田灌水试验,采用试验研究与计算机模拟相结合的方法,分析讨论了耕作土壤入渗特性随季节的变化特性及土壤入渗特性变化对农田灌溉的灌水效率、储水效率、灌水质量的影响,并提出了现行灌溉系统下切实可行的提高灌水效率、储水效率、灌水质量的措施。本研究成果将为节水灌溉技术参数的确定提供依据,并可为农田灌溉用水管理提供指导。

**关键词** 土壤入渗 灌溉效果 入渗特性的变异性 灌水效率 储水效率

## Research of Influence of Seasonal Change of Soil Infiltration Characteristic on Irrigation Effects

Fan Guisheng Chi Jiu Jian Wang Xuzhao

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan. 030024)

**Abstract** Based on field infiltration and irrigation experiments of farming soil during different irrigation seasons, through the method of experimental research combined with computer mathematical simulation the variability of soil infiltration characteristic with irrigation seasons and the influence of seasonal change of soil infiltration characteristic on irrigation efficiency, stockpile efficiency of irrigation water and irrigation quality are analysed and discussed, and some practicable measures by which irrigation efficiency, stockpile efficiency of irrigation water and irrigation quality are improved are put forward. The results can be used for determining saving irrigation technique parameter and for guiding irrigation management.

**Key words** soil infiltration irrigation effect variability of soil infiltration characteristic irrigation efficiency stockpile efficiency of irrigation water

## 1 引 言

农业灌溉是引入田间的灌溉水通过入渗进入根层土壤的过程。由此可见,土壤入渗是灌溉水

转换为可供作物吸收利用的土壤水的转换途径之一。土壤的入渗特性直接决定着灌溉水转换为土壤水的转换速度、给定入渗时间内转换水量的多少及水分入渗深度等。在畦、沟灌水技术条件下,进而影响到农业灌溉的灌水质量和灌溉效果(灌水均匀度、储水效果和灌水效率)。因此,土壤入渗参数是各种地面灌水技术中确定灌水技术参数(畦田规格、入畦流量、灌水时间或封堵成数)必不可少的重要依据。土壤的入渗特性除受其本身所固有的诸多理化特性(土壤质地、土壤结构、土壤含水量、土壤含盐量及土壤孔隙状况)影响外,还受灌溉水质(水温、泥沙含量、含盐量)、入渗过程(连续入渗过程、间歇入渗过程)等外界条件的影响。此外土壤本身的理化属性在气象、农业技术措施、灌溉等因素的作用下发生变化。换言之,土壤的理化特性存在着随时间的变异性。这就决定了土壤入渗特性的时间变异性。农业灌溉实施在其入渗特性随季节变化的土壤条件下,其灌溉效果也必然发生变化。土壤入渗特性的时间变异性、土壤入渗能力条件下的灌溉效果等问题很有必要进行研究。以提高农业灌溉灌水质量和灌溉水有效利用程度,达到节约用水、科学用水的目的。本文根据笔者1991~1992年在陕西关中宝鸡峡灌区灌溉试验站所进行的大田土壤入渗试验和畦灌灌水试验,采用试验与畦灌地面水流运动计算机模拟相结合的方法,就中壤质地土壤入渗特性随灌水季节的变异性、土壤入渗特性变化对灌溉效果的影响进行分析与讨论,并提出变土壤入渗能力条件下提高灌溉效果的措施。

## 2 试验条件及畦灌水流运动模拟模型

### 2.1 土壤条件

试验地点位于陕西渭河二道塬地区,区域土壤为关中典型土壤之一——楼土,亚类油土,土属红油土、土壤质地中壤。耕层土壤厚度15~20cm,有机质含量1.05%,物理性粘粒含量51.3%~47.5%。由于长期等深耕作,犁底层较为明显。表土层、犁底层、心土层、底土层四个剖面层次中,犁底层较为密实。土壤剖面分层容重见表1。

表1 试区土壤剖面容重表

层次 (cm)	0~20	20~30	30~40	40~60	60~80	80~100
容 重 (g/cm <sup>3</sup> )	变化	1.528	1.490	1.470	1.380	1.360

### 2.2 试验仪器

土壤入渗试验仪器采用陕西机械学院水资源研究所研制的双套环单点入渗仪,入渗仪内环直径30.8cm,外环直径60cm,该设备可实现向内环的自动供水和自动稳定水头,提高了入渗水量的测量精度和灵敏度。根据141组试验数据分析,其精度满足要求。

### 2.3 灌水畦田灌水条件

灌溉试验地块种植冬小麦,小麦收割后复播玉米。灌水畦畦长170m,畦宽2.8m,纵坡1/200。灌溉水源为井水,最大供水流量8L/s。

### 2.4 畦灌水流运动数学模拟模型

本研究采用大田灌水试验与计算机模拟相结合的方法,即:首先利用实测大田灌水试验资料确定畦灌水流运动数学模型中的有关参数,而后利用所确定的数学模型及其模型参数模拟各种入渗条件下的畦田水流运动。畦田水流运动模拟模型有运动波模型、零惯量模型、水量平衡模型、全水流动力学模型。其中全水流动力学模型模拟精度高,但其计算程序庞大复杂,成本昂贵。零惯

量模型在模拟精度方面较全水流动力学模型低,但是其模拟程序相对简单,成本低便于应用。用于模拟连续灌溉时,其模拟误差可控制在5%以内<sup>[2]</sup>,虽然运动波模型和水量平衡简单、成本更低,但其精度也较低。综合考虑各种模型优缺点,本研究选择零惯量水流模拟模型进行畦灌水流运动的数值模拟,详见参考文献[2]。

3 土壤入渗特性的季节性变化

农业生产以年为周期。在每个农业生产周期内,耕作土壤经历翻耕休闲、备耕、播种、作物生长等阶段。在各生产阶段或同一生产阶段的不同时期,耕作土壤所受内外因素作用不同导致了其理化性质的差异。试验表明:在农业生产周期内,耕作土壤入渗特性随季节的变化相当明显。

表2 年内不同生产阶段土壤入渗能力表

生产投资	入渗参数		入渗量 (cm,min)					
	$\alpha$	$k$	5	10	20	30	45	60
休闲	0.2714	5.0000	7.738	9.340	11.272	12.584	14.047	15.188
备耕	0.6767	0.6307	1.376	2.995	4.788	6.300	8.288	10.070
二水	0.2147	1.7067	2.411	2.798	3.247	3.542	3.865	4.110
三水	0.1843	2.0933	2.703	3.200	3.636	3.918	4.222	4.452
复播	0.3413	1.2200	2.113	2.677	3.392	3.895	4.474	4.934
白茬	0.1582	2.1051	2.715	3.030	3.381	3.605	3.844	4.023

基于陕西咸阳地区农业生产种植习惯,笔者在1991~1992年进行了犁翻休闲地(犁翻后未进行任何农事作业)、备耕地(播种前)、小麦二水地(冬灌前)、小麦三水地(返青期)、复播玉米地(小麦收割后复播玉米,拔节期)以及白茬地(玉米收割后)的土壤入渗试验。用两参数考斯加科夫描述土壤入渗过程,其曲线拟合参数及给定时刻入渗量见表2,相应的土壤水分入渗曲线见图1。

由表2及图1可见:

(1)给定土壤质地条件下,年内不同生产季节土壤入渗能力差异甚大。从入渗总量上看,试区土壤、气象、农业技术措施、灌溉条件下,60min入渗总量的差异最大达11.165cm,最大值是最小值的3.8倍,从入渗参数看, $K$ 值变化在0.6307~5.0之间, $\alpha$ 值变化在0.1582~0.6767之间。

(2)在农业生产周期内,土壤入渗能力随着生产阶段发展而呈减小趋势。从土壤犁耕后休闲,经历播种前的备耕、播种、作物生长阶段,到作物收割,土壤入渗能力越来越小。所进行的六组入渗试验中,犁耕休闲地的土壤入渗能力为最大,备耕地次之,作物收割后的白茬地为最小。作物播种以后,从第二水开始随着灌溉次数的增加,土壤入渗能力的变化甚微。犁耕地处于犁耕后未进行任何农事作业状态,耕层土壤相对疏松,地表凹凸不平,耕层土壤大空洞存在,容重很小(容重一般为1.1g/cm<sup>3</sup>左右),耕层土壤储水能力很大,因此其入渗能力极大,备耕地是在休闲地的基础上进行耙耱、施肥、平整、打埂等一系列的农事活动后待种的土地。其耕层土壤相对疏松,但与休闲地相比耕层土壤大空洞消除、孔隙率适中、结构良好

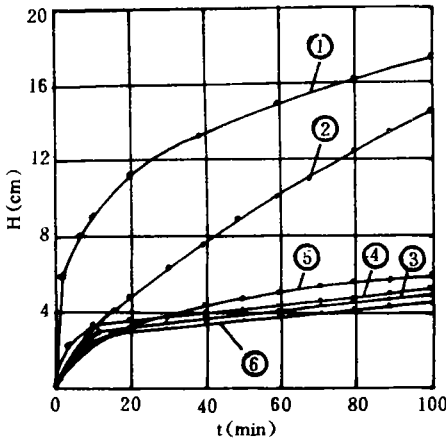


图1 各生产阶段累积入渗参数  
① 休闲地      ② 备耕地  
③ 二水地      ④ 三水地  
⑤ 复播地      ⑥ 白茬地

(容重一般在 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以下),其入渗能力比休闲地减小了33%。作物播种以后,随着农业机具及人力下田作业次数的增加,特别是降雨、灌溉过程的作用,耕层土壤变化越来越密实,其中灌溉过程作用最为明显。在灌溉过程中地表土壤结构被破坏,灌溉过程结束后,随着表土水分的重新分布和后期的消散,在地表土壤水吸力和土壤固有属性的作用下,地表土壤密实度增加,甚至引起土壤表层板结。而土壤水力传导度随土壤的密实度增加而减小,因此作物播种后随着生产阶段的发展,灌水次数的增加,土壤入渗能力减小。灌溉一水后,土壤入渗能力比播前土壤入渗能力减小60%,而后的各次灌水前,土壤入渗能力变化甚微。其原因在于耕作土壤实施一次灌水后,若不实施耕翻农事作业,地表土壤密实度已达相当水平,后继各次灌水过程中再度使土壤结构破坏是困难的,灌水结束后使土壤再度密实已相当困难。所进行的6组入渗试验结果中有两种情况违背随灌水次数增加,土壤入渗能力下降的总趋势。其一是第三次灌水前土壤入渗能力略大于第二次的入渗能力。其原因在于第三次灌水实施于越冬小麦的春季第一次灌水,土壤越冬过程中,经历冻结、解冻,加之在漫长的冬、春土壤微生物活动作用,耕层土壤结构有一定变化,此外,据实地观察,春季地表土壤开裂程度较冬灌前严重。其二是复播玉米后的第一次灌水前的土壤入渗能力大于小麦生长期第三次灌水前的土壤入渗能力。这是由于玉米复播时,对麦田进行部分浅犁耕,地表土壤结构受到一定破坏,表层土壤储水能力增大所致。

(3)各生产阶段土壤水分入渗过程有所不同。图1所示6组土壤入渗曲线中,曲线②和曲线③与其余曲线的变化趋势有所不同。曲线②和曲线⑤从入渗开始到入渗开始后90min入渗曲线较光滑,入渗量呈渐增趋势,而其余四条曲线表现出在入渗初期(前10min)入渗量剧增,而后入渗量增加速度相当缓慢,曲线②和曲线⑤之所以表现出渐增趋势,是因为备耕地和复播地土壤具有相对好的地表土壤结构,且耕层土壤具有相对大的储水能力,疏松土具有相对大的水力传导度,势梯度的减小具有相对平缓的过程。此外,犁底层对其初始入渗过程的影响甚微。曲线①与曲线③、④、⑥尽管线型相同,但其成因有所不同,曲线①入渗开始时入渗量剧增的原因在耕层土壤大孔洞存在,地表土特别疏松,入渗开始后几分钟耕层土壤接近饱和,而后犁底层成为入渗上界面,故后期入渗量增加相当缓慢。曲线③、④、⑥入渗初期入渗量剧增原因在于该区土壤灌溉后地表板结产生纵横向宽 $1\sim 2\text{cm}$ ,深 $1\sim 2\text{cm}$ 的裂缝,入渗开始时,入渗水首先充满裂隙,而后在已相对密实的表层土壤条件下入渗,土壤的水力传导度很小,以致于入渗量增加缓慢。

## 4 土壤入渗特性的季节性变化对灌水效果的影响

### 4.1 灌水效果评价指标

灌溉效果是指灌溉过程结束后,灌溉水的有效利用程度,灌水质量的优劣。灌溉实践中常用灌水效率 $E_e$ 、储水效率 $E_s$ 和灌水均匀度 $E_u$ 来评价灌水效果。

灌水效率是指某次灌水中,储存在计划湿润层内的水量 $W_i$ 与灌溉水量 $W_f$ 的比值。即:

$$E_e = \frac{W_i}{W_f} \times 100\%$$

反映了灌溉水的田间有效利用程度。

储水效率是指某次灌水中储存在计划湿润层的水量 $W_i$ 与需要灌入计划湿润层内的总水量 $W_n$ 的比值。即:

$$E_s = \frac{W_i}{W_n} \times 100\%$$

反映了某次灌水时计划灌水量的满足程度。

灌水均匀度是指灌水后沿畦长方向入渗水量分布的均匀程度。即：

$$E_z = (1 - \frac{\Delta Z}{Z}) \times 100\%$$

式中：Z —— 灌水后土壤中的平均灌水深度；ΔZ —— 灌水后沿畦各点的灌水深度与平均灌水深度的平均数值离差。

4.2 土壤入渗特性变化对灌溉效果的影响

为充分揭示不同土壤入渗特性条件下的灌溉效果差异,在利用大田实际灌水资料验证数学模型参数的基础上,分别模拟计算定时间、定流量、变流程和定流程、变时间、变流量两种灌水情况下,不同土壤入渗条件下的灌水过程和灌水效果评价指标。所谓定时间、定流量、变流程是指灌溉时,给定入畦流量和放水时间,计算各种入渗参数灌水条件下的推进长度。所谓定流程、变流量、变时间灌水是指灌水时,畦长一定,根据土壤入渗参数及最大允许单宽流量和最小允许单宽流量确定灌水时间和相应的灌水流量。两种灌水情况下,灌溉效果评价指标见表3和表4。

表3 定时间、定流量灌溉效果表

生产阶段	入渗参数		推进	灌水	储水	灌水均
	α	k	长度 (m)	效率 (%)	效率 (%)	匀 度 (%)
休闲	0.2714	5.0000	34.3	60.2	100.0	87.01
备耕	0.6767	0.6307	53.5	88.0	100.0	90.60
二水	0.2147	1.7067	105.2	100.0	54.8	94.20
三水	0.1843	2.0933	99.3	100.0	58.0	94.80
复播	0.3413	1.2200	98.3	100.0	58.6	89.70
白茬	0.1582	2.1051	104.9	100.0	54.9	94.01

注:单宽流量1.6L/m;灌水时间45min.

表4 定畦长、变时间、变流量灌水条件灌溉效果表

生产阶段	入渗参数		推进	灌水	储水	灌水均	单宽	灌水
	α	k	长度 (m)	效率 (%)	效率 (%)	匀 度 (%)	流量 (L/m)	时间 (min)
休闲	0.2714	5.0000	171	51.7	100	92.86	7.3	59
备耕	0.6767	0.6307	171	91.9	100	80.88	4.9	45
二水	0.2147	1.7067	171	100	65.9	94.07	1.8	78
三水	0.1843	2.0933	172	100	72.9	95.03	1.8	87
复播	0.3413	1.2200	171	100	76.5	94.37	1.8	91
白茬	0.1582	2.1051	170	100	68.3	93.42	1.8	81

由表3及表4可见,土壤入渗特性的变化对灌溉效果的影响表现为:

(1)灌溉总推进长度差异甚大.给定放水时间、入畦单宽流量时(表3),不同土壤入渗能力,其灌溉总推进长度的差异相当大.最小推进长度(休闲地)仅是最大推进长度(白茬地)的30.7%,随着土壤入渗能力的降低其灌溉总推进长度增加。

(2)随着土壤入渗能力的降低田间灌溉水有效利用程度提高.灌水效率反映了田间灌溉水有效利用程度.上述两种灌水条件下,在农业生产周期内其灌水效率变化在51.7%~100%之间.其中休闲地的灌水效率为最低,仅有50%~60%;备耕地的灌水效率为90%左右,达到灌溉排水规范中规定的田间灌溉水有效利用指标;二水及其以后的各次灌水其灌水效率高达100%。

(3)随着土壤入渗能力的降低储水效率呈减小趋势。定时间、定流量、变流程情况下,休闲地、备耕地的储水效率达100%;其余各次灌水的储水效率仅为54.8%~58.9%。定流程、变时间、变流量情况下,休闲地备耕地的储水效率仍然在100%;其余各次灌水的储水效率虽较定时间、定流量、变流程情况下有所提高,但仍然在80%以下。

(4)土壤入渗特性的变化对灌水均匀度的影响较小。计算结果表明两种灌水情况下土壤入渗能力的变化对灌水均匀度的影响规律都不明显,但土壤的入渗过程对灌水均匀度的影响较为明显。入渗过程较为均匀的土壤灌水均匀度较小(备耕地、复播地),而入渗初期入渗量剧增的入渗过程具有较大的灌水均匀度。

## 5 土壤入渗特性随季节变化条件下提高灌溉效果的几项措施

### 5.1 尽量避免无耙耱休闲地条件下的灌溉

犁翻后无耙耱休闲地地表凹凸不平,耕作层土壤大孔洞存在,土壤入渗速度快,加之地表糙率值大,灌溉水流推进速度慢,灌溉水集中于畦田首部入渗,灌溉水有效利用程度极低。为提高灌溉水有效利用程度,应尽量避免犁翻后无耙耱土地的灌溉。如果根据储水灌溉或播前灌溉要求不得不进行休闲地的灌溉时,应对休闲地进行耙耱、平整等农事作业后再进行灌溉。

### 5.2 调整入畦流量和放水时间

大田灌水试验和计算表明:入畦流量的大小对畦田水流推进速度和水分沿灌水畦长方向的水分分布有很大的影响。根据各灌水季节土壤入渗特性,灌水时应采用不同的入畦流量和相应的畦口放水时间。对于休闲地或备耕地以及播种后的头水地,应采用较大的入畦流量,但是采用值不得大于满足畦田土壤不受冲刷的最大流量。对于二水及其以后的各次灌水可采用较小的入畦流量。但其最小值不得小于灌水水流满足横向扩散所要求的最小流量。

### 5.3 采用小定额多次数灌溉制度

由表3及表4可知,该区二水以后的各次灌水其储水效率值仅有54.8%~76.5%。而灌水中所采用的入畦流量值已接近满足水流横向扩散的最小流量值,灌水时间已达90min。因此,通过调整流量和灌水时间已难以提高其储水效率。这种土壤条件下,应采用小定额、多次数的灌溉制度。二水以后的各次灌水其灌水定额可考虑突破 $450\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的最小限值。

### 5.4 应以备耕地或播种后头水地的土壤入渗参数确定畦长

由于土壤入渗参数随生产阶段或季节发生变化,不同土壤入渗参数下的合理畦田规格不同,灌水实践中畦田规格随季节变化常常是不可行的,农业生产周期内畦长一般不变。从提高灌溉水有效利用程度的要求出发,应根据备耕地或播种后头水灌溉时的入渗参数确定畦田规格。避免休闲无耙耱地进行灌溉后,备耕或播种后的头水地土壤入渗能力最大,以此确定的畦长较短,而后的各次灌水其灌溉水的有效利用程度都较大,只是储水效率低。这样做确保了灌溉水田有效利用程度的提高。

## 6 结 语

大田土壤入渗试验、灌水试验以及畦灌水流运动模拟计算表明:

(1)给定土壤质地条件下,在农业生产周期内,土壤入渗特性随季节或农业生产阶段变化相当明显。随着生产阶段发展或灌水次数的增加,土壤入渗能力降低,播种后第一次灌水对土壤入渗能力降低幅度较大,而后的各次灌水土壤入渗能力变化甚微。

(2)土壤入渗能力的变化导致农业灌溉水效果的明显变化。随着土壤入渗能力的降低田间灌溉水有效利用程度呈增加趋势,而储水效率呈减小趋势;土壤入渗特性的变化对灌水均匀度的影响较小,但土壤入渗过程对灌水均匀度有较大影响。

(3)具有良好灌水效果的灌溉应同时获得较高的灌水效率、储水效率和灌水均匀度。但本研究表明:由于一定条件下灌水效率与储水效率的互斥性,在土壤入渗特性随季节变化的条件下同时获得较高的灌水效率、储水效率较为困难。本文仅从宏观的角度揭示了土壤入渗特性对灌水效果的影响,并提出了几项提高灌水效果的措施,但农业生产周期内变土壤入渗特性条件下灌水效果的提高措施这一问题还有待进一步深入研究。

#### 参考文献

- 1 姚贤良等.土壤物理学.农业出版社,北京:1986
- 2 波涌灌地面水流运动的零惯量模型及数值模拟.水利学报,1994,(4)66~73
- 3 Wynn R Walker and Gaglord V Skogerboe. Surface Irrigation Theory and Practice. Americe Printice-hall. INC: 1987

---

(上接第34页)

#### 参考文献

- 1 王积强.中国北方地区若干蒸发试验研究.科学出版社,1992
- 2 雷志栋等.土壤水动力学.清华大学出版社,1988
- 3 罗家雄.新疆垦区盐碱地改良.水利电力出版社,1985
- 4 谢承陶.盐渍土改良原理与作物抗性,中国农业科技出版社,1992
- 5 石元春等.盐渍土的水盐运动,北京:农业大学出版社,1986
- 6 王金平.蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟.水利学报,1989(5)
- 7 张瑜芳.均质和非均质土壤的稳定蒸发.全国地下水情报网首届科技情报交流会议论文选编,地下水增刊,1989
- 8 王文焰.土壤水研究在农业发展中的应用.西安水资源研究所,1992