

# 膜孔灌理论及实用技术初步研究

徐首先 魏玉强 聂新山 吴珊玲

(新疆水利水电研究所·乌鲁木齐·830049)

**摘 要** 通过对膜孔灌可行性研究,阐明了膜孔灌节水增产的机理。在探讨膜孔入渗规律的基础上,提出了膜孔灌可变灌水强度新概念及数学表达式。并根据膜孔灌水现象,把膜孔灌过程划分为四个阶段,进而分析了各阶段的水流状态。在不定流动方程的基础上,提出了用差分法求解膜孔灌方程的建议。为方便应用,作者又提出了膜孔灌简易方程及解题步骤。

**关键词** 膜孔灌 入渗规律 灌水强度

## Theory of Film Hole Irrigation and Practical Technology Research

*Xu Shouxian Wei Yuqiang Nie Xinshan Wu Shanling*

*(Xinjiang Water Conservancy and Water Electricity Research Institute. Urumqi. 830049)*

**Abstract** Through feasible research on film hole irrigation, this paper expounds production-increased and water-conserved principle of film hole irrigation. Based on the law of studying film-hole permeating, the authors put forward the new concept of changeable irrigation intensity and the mathematic expressive formula for film hole irrigation. Depending on the phenomena of film hole irrigation, the authors divide irrigation procedure into four stages, and fully analyse water's state of each stage. On the basis of unconstant flowing formula, the authors pose the suggestion of solving film hole irrigation formula with the method of finite difference. In order to apply more convenient, the authors pose simple formula and solving question step for film hole irrigation.

**Key words** film hole irrigation infiltration law irrigation intensity

## 1 前 言

田间灌溉对各种灌水方法和灌水技术的基本要求是:增产、节水、节能、省地、省工,投资少,见效快,易推广。因此,提高灌水效率,提高田间灌水均匀度及延伸沟畦长度,便成为研究地面灌的灌水方法和灌水技术的中心内容。古老的沟畦灌,为了节水,采取了缩短沟畦长度以提高田间灌水均匀度的措施。但是,由此带来的弊端是:增加了田间临时工程量,降低了土地利用,同时也给田间农事活动增添了许多麻烦。由于沟畦灌具有投资少、易推广的优点,所以近20年来世界各国又重新重视占全球灌溉面积95%以上的地面灌的研究。在不降低灌水均匀度的前提下,力图

提高灌水长度。随着科学技术的发展,地面灌水技术也有重大突破,例如我国山东在70年代发明了长畦短灌法,即“小白龙”灌水方法,就是利用塑料软管输水,将长畦分段灌水的方法。再如美国在1978年发明了“波涌灌”。就是利用间歇给沟畦供水的方法形成表土致密层的减渗作用,在不降低灌水均匀度的原则下,可将沟畦长度提高3~4倍。1987年我国新疆在地膜栽培的基础上,利用地膜防渗输水,通过膜孔给作物灌水的方法——膜上灌。因其具有节水、增产、省地、省工,投资少,见效快,易推广等优点,所以在短短四年中就推广了13.33万 $\text{hm}^2$ 。足以证明它的生命力。

膜孔灌是在膜上灌的基础上。根据膜上灌推广中存在的问题加以改进提出来的,并得到了国家自然科学基金委员会的资助,以下简单介绍初步研究成果。

## 2 膜孔灌的节水增产机理

所谓膜孔灌,就是利用塑料薄膜(地膜)输水,通过膜孔(含放苗孔和专用灌水孔)给作物灌水的方法。

利用地膜输水防止了沿程地面的普遍渗漏,为大幅度延伸沟畦长度创造了条件,通过可以调整膜孔大小和密度的膜孔灌水,可以达到均匀灌水之目的。据联合国粮农组织的材料介绍,由于田间灌水不均匀,沟畦灌时,深层渗漏损失占进入田间水量的20%~40%(粮农组织灌溉及排水丛书38)。所以实现田间均匀灌水,乃是田间节水的主要途径。

利用地膜输水,防止了水流对土壤的直接冲刷和侵蚀,因而可以避免田间土、肥流失,特别是大坡降地区,沟畦灌时,上冲下淤现象非常严重。这种现象的长期恶性循环,破坏了农业赖以生存的生态环境。所以膜孔灌是建设高产稳产农田的最有效灌水方法之一。

通过膜孔灌水,实现了局部灌溉,在棉花每公顷保留18万株的情况下,放苗孔总面积约为180 $\text{m}^2/\text{hm}^2$ 。加上专用灌水孔面积,其施水总面积约占应灌面积的2.5%左右。就是说尚有97%以上的面积是靠膜孔旁渗实现灌溉的。因此,小水浸润的特点非常突出。在一膜两行种植的情况下(畦宽1.0m),1m膜畦的灌水强度为2.5~5.4 $\text{L}/(\text{h}\cdot\text{m})$ 。和滴灌带的灌水强度3.7 $\text{L}/(\text{h}\cdot\text{m})$ 相近。由于灌水强度微弱,对土壤结构破坏很小。据四次灌水后实测。土壤干容重为1.49 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,比第一次灌水前的1.41 $\text{g}/\text{cm}^3$ 增加不到6%。而地面灌可达1.6 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,比灌前增加14%。由于土壤疏松不板结,通气性良好,有利于好气性细菌繁殖活动,促进土壤中动植物遗体的分解,形成简单的易被作物吸收的矿质化合物和有机化合物。所以膜孔灌对创造土壤肥力起着重要作用。这是它能够高产稳产的另一个重要原因。

因为膜孔灌的灌水强度微弱,要达到规定的灌水定额,需要很长的灌水持续时间,因此必须延长灌水长度以满足灌水持续时间的要求,而不能采取短畦格田淹灌争取灌水持续时间的方法,因为这样就违背了膜孔灌的基本原理,就不能发挥膜上灌的节水增产优势。

利用放苗孔灌水,等于把水配到每棵作物上,因而提高了作物均衡受水的程度,奠定了苗齐苗壮增产的基础。利用放苗孔灌水,正对作物主根,在灌水沿主根下渗的同时,也沿侧根旁渗,在灌水定额适当的情况下,灌水湿润的土壤空间,正好包围了作物的整个根系。随着作物的生长发育,根系增大,可相应的增加灌水定额。所以灌水转变成土壤水后,可高效的转化成生物水,提高水的生产效率。因此膜孔灌可根据生产需要,调整灌水定额。试验表明,膜孔灌的灌水定额可从75~600 $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。这就为合理用水,节约用水创造了条件。在这个意义上,我们说膜孔灌是可控的灌水技术。

试验证明,通过膜孔灌水,田间土壤含水量的增加量,主要集中于膜下,与膜侧沟灌相比,在

相同灌水定额下,膜孔灌比膜侧沟灌提高4.5倍。由于膜下土壤含水量大幅度增加,提高了膜下土壤的热容量,有利于农田吸热和储热,同时也减少了膜侧土壤水分蒸发所带来的地热消耗,因此地温较高。据实测,23d日平均地温,膜孔灌比膜侧沟灌高0.2~0.3℃。因而增加了作物生产所需的热能供应量,为优质高产创造了条件。

由于膜孔灌水集中于膜下,因为地膜保护,阻断了田间土壤水另一个主要的无效消耗途径——棵间蒸发。膜下土壤水在高温下,汽化→凝聚→再回归田间转变成土壤水。如此反复循环,延长了灌水周期,减少了灌水次数,提高了水资源利用率。这也是膜孔灌能够节水的另一个重要原因。

总之,膜孔灌不仅灌水定额小,灌水次数少,灌水畦长,并有增温、保墒、防止土肥流失、保持土壤肥力等优点,所以在地膜栽培的基础上实施膜孔灌,具有省工、省地、投资少、见效快、易推广的好处。是一项节水增产的灌水新技术。

### 3 膜孔入渗规律

#### 3.1 膜孔入渗规律

膜孔灌是通过膜孔入渗实现灌溉的,因此探明膜孔入渗规律是搞好膜孔灌的先决条件。膜孔入渗不同于经常讲的垂直入渗,前者是个三维入渗问题,后者是一个一维入渗问题。膜孔灌的膜孔入渗,在有作物根系及其呼吸作用的参与下,形成一个多维入渗问题,目前研究较少,没有现成资料可以借鉴,所以开展膜孔入渗的研究是膜孔灌所必须的。

非饱和土壤的膜孔入渗率,即膜孔的渗吸速度,不仅和土壤种类有关,还和它的紧密度有关,即和它的干容重有关。农田土壤的干容重,受灌水次数的影响。在0~30cm耕作层内的土壤为扰动土,在灌第一水至第三水之间土壤干容重变化较大,一般增加6%~14%,四水以后基本稳定,接近自然状态下的干容重。

对于同一种非饱和土壤的膜孔入渗率来说,它是土水势梯度的函数,对于处在大气圈内的耕地土壤水来说,其压力分势为零,溶质势和温度势很小,可忽略不计,所以土水势是由基质势和重力势组成,如以水头 $h$ 代表基质势和重力势,根据达西定律,可写出三维入渗的入渗率( $I$ )的表达式:

$$I = -k \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: $k$ ——非饱和土壤的导水率,它不同于饱和土壤的导水率等于常数。非饱和土壤的导水率,受土壤初始含水量的影响,同时又是入渗历时的函数。在这个意义上,和非饱和土壤垂直入渗是相同的,所以聂新山利用考斯加可夫的经验公式 $I = at^{-2}$ ,通过膜孔入渗试验资料,求出了相应的 $a \cdot \alpha$ 值,对于轻沙壤土,膜孔面积为10cm<sup>2</sup>时, $a = 0.7279$ , $\alpha = -0.2677$ ,故轻沙壤土的膜孔入渗率公式为:

$$I = 0.7279t^{-0.2677} (\text{cm}^3/\text{min} \cdot \text{cm}^2) \quad (2)$$

式中: $t$ ——入渗历时(min)。

#### 3.2 膜孔灌的灌水强度

膜孔灌通过膜孔给作物灌水,把沟畦灌的连续入渗变成了离散的点入渗。在此情况下,我们把膜孔灌的灌水强度定义如下:

在单位时间内,单位畦田面积通过膜孔渗入到田间的水量,叫做膜孔灌的灌水强度。用数学

公式表述为:

$$P_i = AI_i(n_o F_o + n_i F_i) \quad (3)$$

式中:  $P_i$ ——第  $i$  畦段的灌水强度;  $i = 1 \cdots N$ ,  $N$ ——全畦划分的段数;  $I$ ——膜孔入渗率;  $n_o$ ——单位畦田面积上的放苗孔数。根据作物保苗数确定, 沿畦长平均分布。  $n_i$  为第  $i$  畦段单位面积上的专用灌水孔数, 根据畦段灌水历时差确定, 沿流程变化分布。  $F_o$  和  $F_i$  分别为放苗孔和专用灌水孔面积。当二者大小相等时, 即  $F_o = F_i = F$  时, 公式(3)有如下形式:

$$P_i = AI_i F(n_o + n_i) \quad (4)$$

如将  $I$  表达为  $I = at^{-a}$ , 并将其代入公式(4), 可得到如下公式:

$$P_i = Aat_i^{-a} F(n_o + n_i) \quad (5)$$

式中:  $A$ ——大田膜孔灌修正系数, 受畦面平整度土壤细碎度和地膜松紧度的影响。根据有限的初步试验, 取值在 1.46~3.46 之间。

从公式(5)可以看出, 灌水强度不仅和单位面积上的膜孔数有关, 同时还是各畦段灌水历时的函数。为了简化计算, 取计划灌水历时内的平均渗吸速度  $\bar{U}$  代替入渗率  $I$ 。

由于在膜孔灌的灌水强度中, 引入了可以人为决策的专用灌水孔数  $n_i$ , 当畦段划分合理时, 使膜孔灌均匀灌水变为可能。这是膜孔灌与地面灌的主要区别。

## 4 膜孔灌水流现象及状态分析

### 4.1 膜孔灌水流边界条件

膜孔灌的水流是在膜畦内塑膜上流动的。水流表面处在大气压下, 靠重力流动。两侧被土畦埂约束, 并受作物行阻力作用, 糙率较大。下界面是塑料薄膜, 糙率很小, 但存在膜孔入渗对水流的影响。从膜畦纵断面看, 上游进口流量恒定, 沿程逐步被膜孔渗吸, 其渗吸量随时间变化, 所以畦内流量沿程逐渐减少, 至畦尾流量等于零。

### 4.2 膜孔灌水流现象及状态分析

观察膜孔灌水流现象, 其灌水过程大致可分为四个阶段:

4.2.1 流峰推进阶段 由于畦侧糙率大, 畦中糙率小, 所以当膜畦进水后, 中间水流先于侧边水流前进, 我们称之为流峰。因为流峰流量很小, 水面很窄, 所以两边放苗孔不进水。此阶段称为流峰推进阶段。该阶段大约为 1~10min, 视铺膜状况而定。当地膜拉的很紧起棱时, 流峰推进的距离和时间就长些。因为该阶段膜孔不进水, 所以对灌水结果不产生影响。

4.2.2 膜孔入渗不稳定阶段 随着上游来水量不断增加, 水面淹没整个畦底, 膜孔开始进水, 起初水流被膜孔很快吸干, 同时孔下及周围膜下土壤被湿润、饱和, 小土块崩解, 地膜紧贴在地面上。随着入渗历时的延长, 膜孔入渗率也随之降低, 再加上上游来水的不断增加, 后继水流淹没膜孔, 以滚动波形式向前推进。从膜孔开始进水, 到该断面水深基本稳定, 大约需要 1.0h 左右。在这个阶段, 膜孔入渗率的变化是从大到小。最后接近饱和入渗率。膜上水流的变化是从小到大, 最后趋于稳定。因为在这个阶段入渗率和膜上流量都是时间的函数, 所以我们称之为入渗不稳定阶段。膜上水流状态属于非恒定、非均匀流状态。

4.2.3 膜孔入渗相对稳定阶段 在这个阶段, 上游入渗率基本稳定, 所以断面水力要素不随时间变化, 但在纵断面上, 流量是沿程减小的, 就是说流线互不平行, 因其水深相对很小, 所以流线略呈收敛状态, 因此, 该阶段膜上水流属于恒定、非均匀流。

4.2.4 膜畦断流落干阶段 当流峰到达畦尾时, 畦首进水口立即断流落干, 膜畦开始退水

过程,随着畦中水流向下游流动和沿程膜孔的不断入渗,沿程流量也逐渐减少,因而落干点也从上游向下游移动,当落干点到达畦尾时,断流落干阶段结束。在该阶段入渗率是沿程增加的,并随时间减小,所以膜上流量和断面水力要素随时间变化,所以该阶段的水流状态为非恒定,非均匀流。

### 4.3 膜孔灌进退水过程线及特点

图1所示为膜畦底宽  $b = 0.5$ ,  $m = 1.0$ ,  $i = 2.6\%$ , 入膜畦流量  $Q = 0.67\text{L/s}$ , 每米畦长上打孔 16.7 个, 每孔面积  $10\text{cm}^2$ , 膜下土壤为沙壤土的情况下实测的膜孔灌进退水过程线, 从图上可以看出, 在水流峰头到达畦尾即 250m 时, 畦首立即断流落干, 此时总推进时间为  $T_1$ 。当落干点到达畦尾时, 从进水算起的落干时间为  $T_2$ 。所以  $T_1$  直线与上水过程曲线(A), 在推进距离为  $l = x$  处两线间的距离, 就是  $x$  点在上水过程中的灌水历时。同样,  $T_1$  直线与退水过程曲线(B), 在  $x$  点两线间的距离, 为  $x$  点在退水过程中的灌水历时,  $x$  点的总灌水持续时间等于上水过程灌水历时与退水过程灌水历时之和, 也就是退水过程与上水过程的时间差。

应该指出的是:图1的上水推进时间为流峰到达时间, 并非膜孔开始进水时间, 因两者相差不大(几分钟), 所以上水灌水历时误差很小。实测退水过程的落干时间, 也非膜孔停止进水时间, 而是膜上水流速度为  $0.2 \sim 0.5\text{m/min}$  的时间, 因为灌水强度小, 落干过程缓慢, 所以实测落干时间远远小于真正落干时间。根据灌水均匀度测验资料推算, 上水过程曲线与退水过程曲线大致平行, 也就是说, 膜畦首尾灌水历时基本相等。这是膜孔灌的一个重要特点。它向我们提示。在畦长 500~800m 时, 不需要打很多专用灌水孔。

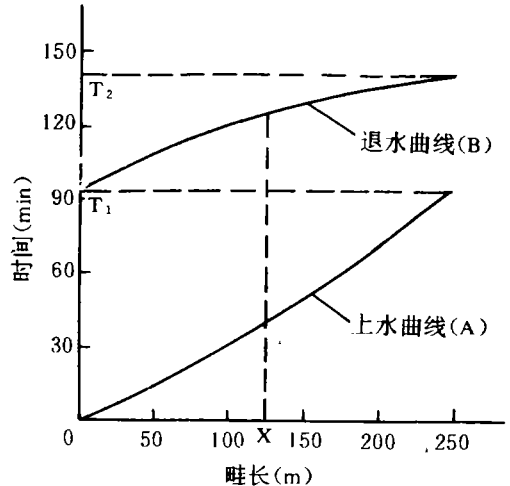


图1 膜孔灌进退水曲线

## 5 膜孔灌简易方程及解题步骤

### 5.1 不定渐变流动的偏微分方程

从全畦来看膜孔灌的四个阶段, 其各断面的水力要素都是时间和距离的函数, 故膜孔灌水流为不定流动。不定流动的基本规律和其它的流动规律一样, 仍然是水流的连续性和水流运动的基本力学关系。这些基本规律可以用偏微分方程描述:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial Q}{\partial S} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\text{运动方程: } \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h_f}{\partial s} = 0$$

上式方程属于非线性的双曲线型的微分方程, 它们的积分在数学上还有很大困难, 目前还没有得出它们的普遍解, 所以实用价值不大, 因而有人提出了用有限差近似求解不定流问题。

### 5.2 用有限差法求解膜孔灌问题

所谓有限差法, 就是用有限差量代替无限微量, 近似的解出各时段的瞬时流态, 所以也叫瞬态法。瞬态法的基本原量是将某一瞬间  $t$  视为常数, 这样就使二元函数  $R = R(t \cdot s)$  转化为一元

函数  $R = R(s)$ 。也就是说沿畦各断面水力要素在某一瞬时  $t$  只是流程  $S$  的函数。如把灌水的全过程分成许多时段  $\Delta t_i$ , 那么就有相应个瞬时  $t_i = t + \Delta t_i$ 。不同的瞬时  $t_i$ , 就有相应的瞬时流态。为用差分法求解偏微分方程(6)。首先须把偏微分方程组改为有限差形式:

$$\text{连续方程:} \quad \bar{Q}^* = (Q_+^* + S_{+}^*) - \frac{W^*}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\text{运动方程:} \quad \bar{Q}^* = \frac{\bar{k}}{\sqrt{\Delta S}} \sqrt{2(Z_+^* - Z^*)}$$

式中:用星号“\*”表示时间的先后:“\*”在字母右下角表示开始时间,在右上角表示末了时间。用“+”和“-”表示断面位置:“+”表示上游断面,“-”表示下游断面。断面位置是相对的,如第一流段的下游断面即是第二流的上游断面。

$$\bar{Q}^* = \frac{Q_+^* + Q_-^*}{2}$$

式中:  $\bar{Q}^*$  —— 末瞬时平均流量;  $Q_+^*$  —— 上游末瞬时流量;  $Q_-^*$  —— 下游末瞬时流量;  $\Delta t$  —— 时段;  $\Delta S$  —— 流段长度;

$$Z^* = \frac{Z_+^* + Z_-^*}{2}$$

$Z_+^*$  —— 上游末瞬时水位;  $Z_-^*$  —— 下游末瞬时水位;  $Z^*$  —— 末瞬时平均水位;

$$S_{+}^* = \frac{Q_{+}^* - Q_{-}^*}{2} + \frac{W^*}{\Delta t}$$

$W^*$  —— 流段中末瞬时膜畦容水体积;  $\bar{k}^*$  —— 末瞬时平均流量率 ( $k = wc \sqrt{R}$ )。

根据膜孔灌的起始条件和边界条件,建议根据畦段划分,把  $\Delta s$  定为常数,然后按照方程组(7)求解到达各流段末的历时。在此情况下,畦首断面的水力要素,可按照恒定均匀流计算。第二段的起始流量  $Q_2 = Q_1 - P_1 \Delta S_1$ 。式中  $Q_1$  为入畦流量,  $P_1$  为第一畦段相应于上水历时的灌水强度,  $\Delta S_1$  为第一畦段长度。其它各段依次类推。用差分法虽然可以求膜孔灌问题,但其计算工作是极其繁杂的,需要耗费较多劳动,也不便于应用。因此,我等从方便应用出发,提出了膜孔简易方程及其解法。

### 5.3 膜孔灌简易方程组及解题步骤

膜孔灌所关心的主要问题是长畦均匀灌水问题。影响均匀灌水的因素很多,主要包括入膜(畦)流量( $Q$ )、灌水强度( $P_1$ )、膜畦长度( $l$ )、灌水历时( $t$ )、灌水定额( $m$ )、膜畦纵坡( $i$ )和膜畦糙率( $n$ )等,所谓膜孔灌技术,就是在均匀灌水的前提下,按照膜孔灌技术要素之间的相互关系,实施灌水的技术,因此,膜孔灌方程组应包括上述诸多因素,试根据水力学和农田水利学的有关原理,列出如下方程组:

膜孔入渗方程:

$$I = at^{-a}$$

灌水限制方程:

$$t_i = \frac{m'}{p'} \quad m' = \frac{m}{667}$$

灌水强度方程:

$$P_i = Aat_i^{-a} F(n_o + n_i)$$

均匀灌水方程:

$$P_{1t_1} = P_{it_i} = P_N t_N \quad (8)$$

水量平衡方程:

$$Qt_1 = m \frac{l \times B}{667}$$

$$Qt_1 = \sum_{i=1}^N p_{it_i} l_i$$

上水方程:  $l = Bt^b$

退水方程:  $l = ct^c$

式中字母表示的含义同前。

膜畦设计步骤如下:

①计算第一畦段灌水强度:一般情况下,第一段不设专用灌水孔,即  $n_1 = 0$ , 所以灌水强度公式变为:

$$P_1 = Aat^{-a}Fn_0$$

②根据灌水限制方程,确定畦首进水历时

$$t_1 = \frac{m'}{P'}$$

③根据畦首进水历时,按上水方程和退水方程确定膜畦长度。当畦长受地形条件限制时,可根据畦长反求畦首进水历时,然后再调正第一段灌水强度。

④根据确定的畦长  $l$ , 将全畦分成  $N$  段, 按进退水方程, 求出各畦段的灌水历时  $t_i$

⑤根据各畦段的灌水历时  $t_i$  和均匀灌水方程, 求出各畦段的灌水强度  $P_i$  及专用灌水孔数:

$$P_i = \frac{P_1 t_1}{t_i}$$

⑥根据各畦段灌水强度  $P_i$ , 求出各畦段每米膜畦的专用灌水孔数。

⑦根据水量平衡方程, 求出入膜流量  $Q$ 。

上述计算工作, 要通过试算完成, 因为灌水强度很小, 试验工作量不大。

#### 参考文献

- 1 徐首先, 张焕德等. 一种新的灌水技术——膜上灌. 农田水利与小水电, 1988, (5)
- 2 徐首先. 膜孔灌技术. 新疆水利, 1994(6)
- 3 聂新山. 膜孔渗吸速度初探. 新疆水利, 1995(1)
- 4 栗宗嵩. 土壤水动力学理论及其在灌水技术上的应用. 水利学报, 1985(5)
- 5 清华大学水利系. 水利学, 下册, 人民教育出版社, 1962年3月