

# 长畦分段灌溉法灌水技术的研究

王 智

(西北农业大学水利系)

## 摘 要

本文提出了长畦分段灌溉法的一种设计模型。它是根据水量平衡原理、考虑相邻灌水段水流可以相互迭加、同时采用畦灌水流运动的普遍理论而建立的。根据模型的两种具体边界条件(水平畦和单向推进)提出了进水口间距的确定方法,包括解析法、图解法和电子计算机解法。试验结果表明,这个模型对长畦分段灌溉的设计是有效的且简便实用。可以使长畦分段灌溉准确实现定额灌溉,特别是小于35立方米/亩的低定额灌溉,灌溉水分布均匀度、田间水利用率及灌溉水贮存率均超过80—85%,并随畦长而增加,比畦灌省水40—60%,灌溉效率可以提高一倍。文中还讨论了模型设计参数的确定、长畦分段灌溉法配合作物间作套种的增产作用等问题。

## 前 言

地面灌溉是传统的也是目前最主要的灌水方法。世界现有灌溉面积中约95%采用地面灌水方法,<sup>[1,6]</sup>在中国,地面灌溉面积占总灌溉面积的98%<sup>[1]</sup>。地面灌溉技术具有节省能源、灌溉成本低、设备简单、容易推广运用等优点。但是如果运用不当,将导致水的利用率降低,在水源不足的地区将会限制灌溉面积的发展,而且还可能产生其它危害。

最普遍应用的地面灌水方法是畦灌。试验表明,畦灌用水量一般较大,且用水量、田间深层渗漏量和灌水时间随畦长而增大。例如,山东平度及陕西关中各灌区的试验:当畦长为30—50米时,灌水定额一般为45—80立方米/亩,平均亩灌水时间为0.9—1.5小时;当畦长为50—100米时,灌水定额为50—100立方米/亩,亩灌水时间为1.0—2.0小时;畦长为100—300米时,末级固定渠道以下灌水定额可达80—200立方米/亩,亩灌水时间1.5—4.0小时。随畦长增加的灌水量必然加重畦田的深层渗漏和尾部径流,从而导致灌水不均和田间水利用率的降低,和灌区地下水水位上升等问题<sup>[6]</sup>。灌水时间的增加引起灌水劳动量的增加,轮灌时间拖长管理不便,因此近年来大力提倡“长畦改短畦,宽畦改窄畦”,推广长30—50—80米,宽2—3米的小畦灌溉方法。但是,小畦灌必然增加输水渠和分水控水建筑物。推广应用中也存在很大困难。

近年来在干旱缺水地区出现一种“长畦分段灌溉法”。以下简称分段灌溉,其实质是将一条长畦分为若干个没有横向畦埂的小段。用塑料软管或地面纵向输水沟将灌溉水送入畦内,灌水时可自下而上,也可自上而下(土沟输水),直至灌完全畦,如图1。随着地面软管灌溉在我国北方灌区的迅速发展,这种灌水方法已得到普遍应用,仅山东平度县已推广



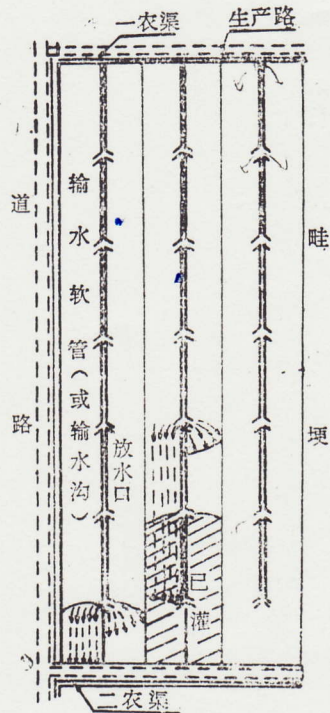


图1 长畦分段灌溉示意图

80万亩以上,约占全县井灌面积的60%。实践证明,长畦分段灌溉法具有省水、节能、灌溉效率高、投资少、效益大等优点。据山东桓台县和平度县资料<sup>[8][9]</sup>,采用塑料软管输水进行分段灌溉时,灌水定额可由畦灌90立方米/亩左右降至60立方米/亩左右,灌水持续时间可缩短三分之一以上;灌溉用工节省一半,亩投资为3.5元,亩灌水可节油5—6公斤;在同样水源和能源条件下,灌溉面积可扩大20—30%,灌溉次数可增加1—2次。据山东蓬莱县资料<sup>[5]</sup>,全县麦田灌溉面积35万亩,若三分之二面积实行长畦分段灌溉(全县160米以上长畦占三分之二),则亩次可节水21立米,小麦全生育期灌水四次,全县共可节水1960万立米,等于修建一座中型水库。所以,这种方法费省效宏,被认为是一种“投资少、节水节能明显,效益大的先进灌水方法”。

但是,长畦分段灌溉法目前在实际运用中尚有不科学之处,其主要问题是如何控制进水口间距以保证实现定额灌溉和较高的灌水质量。对这种灌溉方法目前尚无专门的理论研究。本文将采用畦灌水流运动的普遍理论,探讨长畦分段灌溉法的灌水技术理论,提出进水口间距的确定方法。

### 一、畦灌水流运动分析

地面灌溉水流在水力学上属于非恒定、不均匀、透水性底面上明渠水流的一种情况。

畦灌水流的运动一般可划分为三个主要过程,如图2:(1)推进过程:畦面上由 $t=0$ 时从首端进水,于是畦面上迅速形成一水流锋面,在 $t=T_1$ 时水流锋面推进到畦长 $x=L$ 。以 $T_A$ 表示推进时间, $x$ 表示距离,则可得到推进函数为 $T_A=f_1(x)$ ,相应的曲线称为推进曲线。如果畦尾没有横向畦埂,则水流将继续推进。长畦分段灌溉法水流的运动过程即如此;(2)贮水过程:在畦首断水后,于 $t=T_2$ 时落干,在 $T_1$ 到 $T_2$ 这一时段内,畦长为 $L$ 的畦面上每一点都在水下,故称为贮水过程;(3)消退过程: $T_2$ 时刻后,畦首开始落干,随着水量的不断下渗和向下游流动,落干点也相继向下游移动。以 $T_R$ 表示落干点的消退历时,则得到消退函数(曲线为 $T_R=f_2(x)$ )。沿畦长任一点处 $x$ 的入渗受水历时(如图2)为 $t_0(x)=(T_2+T_R-T_1)=T_2+f_2(x)-f_1(x)=f_3(x)$ 。根据 $t_0(x)=f_3(x)$ 可以作出沿畦长各点的受水时间 $t_0(x)$ 分布曲线,如图2。该曲线为 $f_1(x)$ , $f_2(x)$ 函数的形状,显示了沿畦长方向入渗量的分布和灌水效果。

多年来,针对求解 $f_1(x)$ , $f_2(x)$ 的问题,国内外学者进行了大量的理论研究和试验工作。在理论上已出现了四类描述沟畦灌水流运动的数学模型,包括:1)流体动力学模型(Saint—Venant方程中增加了入渗项);2)零位惯性模型(Zero—Inertia);3)运动波模型(Kinematic—Wave);4)水量平衡模型(Water—Balance)。前三种模型一般比较复杂,尽管电子计算机可以解决计算问题,但由于有关输入参数和边界条件难以确定,得到的结果与水量平衡法和普遍应用的经验函数法相比,并不能保证更高的精确度。此外,多年的研究工作



徘徊在有关的水力学—数学理论推导之中，对于如何将有限的研究成果同灌水技术要素（如畦长、畦宽、单宽流量、灌水定额等）相结合，以便在生产中应用，则研究不够。本文没有研究 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 的进一步求解，重点研究它们的应用模型。

据大量试验研究<sup>[3,4,7,20]</sup>，推进和消退函数为幂函数，形式如下：

$$T_1 = f_1(x) = a_1 x^{b_1} \quad (1)$$

$$T_2 = f_2(x) = a_2 x^{b_2} \quad (2)$$

式中： $x$ 为给定畦长（米）； $T_1$ 、 $T_2$ 分别为推进时间和消退时间（分）； $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 表示函数关系， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 为经验常数。

任意点上的入渗受水历时可表示为：

$$t_0(x) = T_2 + T_1 - T \quad (3)$$

式中： $T_2$ 为畦首部水流落干时刻（约等于关水时间）。

任意点上的入渗水量可由考斯加可夫入渗函数计算（灌溉时间小于24小时，该公式更适用）：

$$H(t_0) = K_0 t_0(x)^{1-\alpha} \quad (4)$$

式中： $t_0(x)$ 为入渗时间（分）； $H(t_0)$ 为入渗水量（用水层深度表示，毫米）； $K_0$ 、 $\alpha$ 为入渗函数经验常数。

根据田面受水后入渗历时 $t_0(x)$ 沿畦长的分布，由（4）式便可得到沿畦长各入渗水量的分布剖面，如图2。设土壤根层计划蓄水深度为 $H$ ，畦长 $L$ 内未超过计划蓄水深度 $H$ 的总蓄水量为 $W_1$ ，超过 $H$ 的渗漏量为 $W_2$ ，畦长 $L$ 以外的逕流（入渗）量为 $W_3$ ， $L$ 内尚缺水量为 $W_0$ ，则可用如下各术语评价灌水效果：1）田间水利用率： $E = W_1 / (W_1 + W_2 + W_3)$ ；2）灌溉水贮存率： $E_s = W_1 / (W_1 + W_0) = W_1 / (HL)$ （单宽流量）；3）灌溉水分布均匀度（用Christiansen公式）： $E = 1 - \frac{\sum \Delta H}{NH}$ （其中， $N$ 为畦田长度划分为单位长度的总段数； $H$ 为畦田平均入渗水深； $\Delta H$ 为每单位长度入渗水深与平均入渗水深之差）。

通常，水量不足之灌溉以较高的田间水利用率伴随较低的灌溉水贮存率为特征；过量灌溉则以较低的田间水利用率和较高（甚至100%）的灌溉水贮存率为特征；按照计划灌水量灌溉时， $E_s = E_s$ （因 $W_1 + W_2 + W_3 = HL$ ）。理想的灌溉将同时具有80%以上的灌溉水分布均匀度、田间水利用率和灌溉水贮存率。

## 二、长畦分段灌溉理论设计模型

图3为长畦被分为五段时各进水口所进入水流的运动过程。 $L$ 表示进水口间距。因为田间没有阻滞水流的横向畦埂，则前一灌水段上的水流会推进到下一灌水段，而导致水量的迭

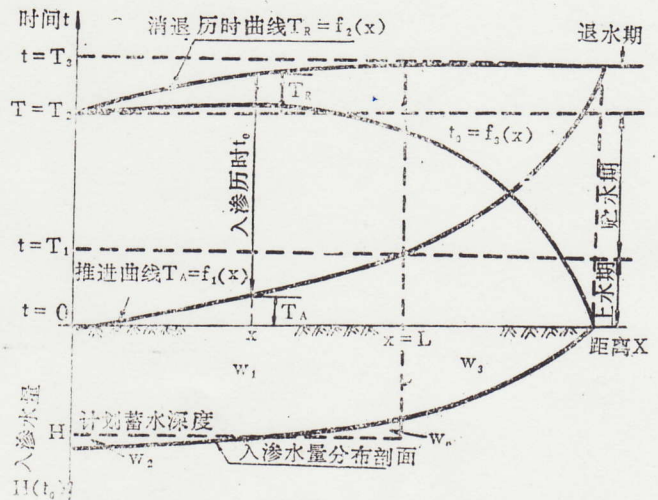


图2 畦灌水运动示意图



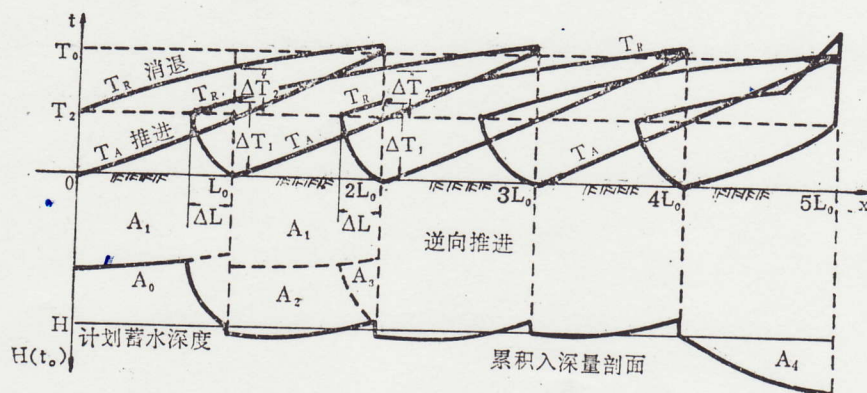


图3 长畦分段灌溉法水流运动过程示意图

加问题。灌水段上将出现两组（四条）推进和消退曲线。这里考虑在满足灌水定额的条件下，调整迭加长度。使迭加后沿畦长方向的入渗时间分布均匀，从而达到灌水量分布均匀的目的。

如图3所示， $A_1$ 为各灌水段灌溉水在本段上自给的入渗量； $A_2$ 为本段径流在下游段产生的入渗量； $A_3$ 为本段逆向流补给上游段的入渗量。由于各中间段（ $L_0 \sim 4L_0$ 上各段）水流相互迭加、相互补偿，各段组合情况下也可产生理想的入渗剖面， $A_2$ 、 $A_3$ 亦可认为是在本段上的入渗量，如 $L_0 \sim 2L_0$ 段入渗剖面所示。

第一段上由于灌水段长度小因而灌水时间少，没有水量迭加，入渗水深达不到计划蓄水深度 $H$ ，该段尚有不足水量 $A_0$ 。而最末级灌水段上由于有横向畦埂拦蓄水流，便产生了深层渗漏量 $A_4$ 。然而， $A_0$ 和 $A_4$ 对于整个畦田上灌水效果的影响较小，且随畦长的增加而减少。中间段占绝大多数，对灌水均匀影响较大。

假定地块均匀，则相同长度的中间段上水流的运动过程相同，如图3所示。

考虑分段灌溉水流迭加情况。若进水口间距为 $L_0$ ，每个进水口放水时间为 $T$ ，放水单宽流量为 $q$ ，设计灌水定额为 $M$ （或计划蓄水深度为 $H$ ），则每个中间段上的水量平衡方程可表示为：

$$qT = A_1 + A_2 + A_3 = HL_0 = ML_0 \quad (5)$$

用(5)式控制流量和灌水时间时，可保证灌水段上要求的计划灌水量。

迭加情况下还应使各点入渗均匀，避免深层渗漏和入渗不足。迭加情况下最容易发生深层渗漏的地方在上下段的连接处，即灌水段的首端或末端。令中间段首端和末端入渗时间（即各组推进曲线和消退曲线之间垂直距离总和）等于土壤入渗到计划蓄水深度 $H$ 所需要的时间 $T_0$ ，如图3，即在 $2L_0 \sim 3L_0$ 段上有：

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 = T_0 \quad (6)$$

上式中： $\Delta T$ 为本段自给的入渗时间； $\Delta T_2$ 为上段径流补给的入渗时间。由图3可知：

$$\Delta T_1 = T_R(\Delta L) + T_2 \quad (7)$$

$$\Delta T_2 = T(L_0 + \Delta L) + T_2 - T(L_0) \quad (8)$$

上式中 $\Delta L$ 为逆向推进的最大长度； $T$ ， $T_R$ 为推进和消退时间，括弧内表示所推进或消退的长度。由入渗函数(4)得：

$$T_0 = \left( \frac{H}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (9)$$

将推进与消退函数 (1)、(2) 与 (7)、(8) 合并代入 (6) 式可得:

$$2T_2 + f_2(\Delta L) + f_2(\Delta L + L_0) - f_1(L_0) = T_0 \quad (10)$$

上式中  $T_2$  为首部水流落干时间 (约等水关水时间) (如图 2, 图 3)。设  $T_2$  时刻水流前锋恰好推进到  $L_0$  长度 (接近十成改水), 即:

$$T_2 = T_A(L_0) = f_1(L_0) \quad (11)$$

将 (9) 和 (11) 式代入 (10) 式得:

$$f_1(L_0) + f_2(\Delta L) + f_2(\Delta L + L_0) = \frac{H}{K_0} \frac{1}{1-\alpha} \quad (12)$$

当灌水定额  $M$  以立米/亩计, 灌水深度  $H$  以毫米计时有:  $H = 1.5M$ , (12) 式可变为:

$$f_1(L_0) + f_2(\Delta L) + f_2(\Delta L + L_0) = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (13)$$

式 (13) 即为长畦分段灌溉的设计模型。

由于含有  $\Delta L$ , 模型的求解很复杂, 但由于灌水时通常在进水口处设有指向下游的导水土埂, 如图 1, 而坡度较大时一般无逆向推进, 所以在求解 (13) 式时可令  $\Delta L = 0$ 。以下将取水平畦和单向推进两种情况对 (13) 式进行求解。

### 三、进水口间距确定方法

#### (一) 解析法

1. 水平畦情况: 即地面是水平的, 地块内各点的地表水流趋向于同时消失, 故图 3 中各条消退曲线接近为一水平线。

水平畦灌水过程中有  $f_2(x) = 0$  即:

$$f_2(\Delta L) = 0 \quad (14)$$

$$f_2(\Delta L + L_0) = 0 \quad (15)$$

将 (14)、(15) 代入 (13) 得:

$$f_1(L_0) = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (16)$$

$f_1(L_0)$  用 (1) 式经验函数表示时有:

$$a_1 L_0^{b_1} = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

或:



$$L_0 = \left[ \frac{1}{a_1} \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right] \frac{1}{b_1} \quad (17)$$

式(17)即为水平畦情况进水口间距计算公式, 式中符号同前。

2. 单向推进情况: 即图3中下游灌水段的水流无逆向交换 ( $A_3 = 0$ ) 的情况。

单向推进时,  $\Delta L = 0$ , 故  $f_2(\Delta L) = 0$ , 则(13)式成为:

$$f_1(L_0) + f_2(L_0) = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (18)$$

或由(1)、(2)得

$$a_1 L_0^{b_1} + a_2 L_0^{b_1} = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (19)$$

式(19)即为单向推进时进水口间距计算公式, 式中符号如前。已知灌水定额M入渗函数经验常数  $K_0, a$ , 推进和消退参数  $a_1, b_1, a_2, b_2$ , 进水口间距  $L_0$  可以试算求解。

(二) 图解法

长畦分段灌溉可借助于普通畦灌资料用图解法进行设计。如图4, 第一象限表示灌溉时间与流程长度之间关系, 可绘入推进曲线和消退曲线; 第三象限表示入渗时间与入渗水量的关系, 可直接绘入入渗曲线; 当入渗函数中  $H(T_0)$  为灌水定额M时, 以纵坐标表示计划灌水定额M (或蓄水深度H) 要求的入渗时间  $T_0$ , 在第二象限内可绘入灌水定额—入渗时间关系曲线 (第二象限横坐标上部表示灌水定额, 下部表示入渗时间); 第四象限表示累积入渗量随流程变化的过程。

令灌水定额和进水口间距为变量 ( $L_0 = x, \Delta L = \Delta x$ ), 长畦分段灌溉设计模型(13)可表示为:

$$f_1(x) + f_2(\Delta x) + f_2(\Delta x + x) = \left[ \frac{1.5M}{K_0} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (20)$$

上式中, 等号左边各项之和可用第一象限内的一条曲线表示, 等号右边即为第二象限内曲线, 令:

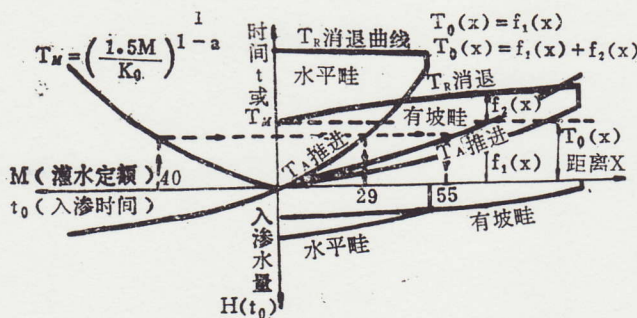


图4 长畦分段灌溉设计图解法示意图

$$T_0(x) = f_1(x) + f_2(\Delta x) + f_2(\Delta x + x) \quad (21)$$

$$T_M = \left( \frac{1.5M}{K_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (22)$$

$T_0(x)$  和  $T_M$  曲线如图4, 据(20)式 (即  $T_0(x) = T_M$ ), 进水口间距的确定法如图中虚线箭头所示:

水平畦时,  $f_2(x + \Delta x) = 0$ ,

$f_2(\Delta x) = 0$ , (21)式成为

$$T_0(x) = f_1(x) \quad (23)$$



显然, 水平畦情况时,  $T_0(x)$  曲线即为推进曲线, 如图 4。

单向推进时,  $\Delta x = 0$ ,  $f_2(\Delta x) = 0$ , 则 (21) 式成为:

$$T_0(x) = f_1(x) + f_2(x) \quad (24)$$

单向推进时, 任意点上的  $T_0(x)$  等于该点推进历时与消退历时之和, 如图 4。

由图 4 中虚线箭头所示, 设灌水定额为  $40 \text{米}^3/\text{亩}$ , 则在水平畦情况下进水口间距为 29 米, 有坡畦 (单向推进) 时, 进水口间距为 55 米。

### 三、电子计算机解法

应用 PC—1500 计算机可将  $x$ 、 $M$  和分别对应的  $T_0(x)$ 、 $T_w$  打印成表格, 并很快绘出图 4, 根据  $T_w = T_0(x)$  原理可由表格和图象中得到要求的进水口间距。

### 四、设计参数的确定

分段灌溉设计模型 (17)、(19) 在运用时需要知道  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  等推进和消退函数经验常数 (或称为模型设计参数), 其值可用参数算法与田间试验法确定。

#### (一) 参数算法

关于  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  的确定已经进行了大量的理论和试验研究<sup>[2-5]</sup>。采用半经验半理论方法得到的推进函数和消退函数由于形式简单、精确度高, 在灌溉理论分析和实际运用中得到了普遍采用。作者通过在西北农学院所做的畦灌试验资料和渭惠渠畦灌试验资料进行了分析, 采用多元逐步线性回归法得到  $b_1$  的计算公式如下:

$$b_1 = 1.77 - 88S_0 - 0.0657q \quad (25)$$

相关系数  $r = 0.884$ , 试验组数 22 组, 其中,  $S_0$  为地面坡度;  $q$  为入畦单宽流量 (升/秒)。

$a_1$  则与  $b_1$  相关性大, 根据种植作物的不同,  $a_1$  可由下列各式确定:

$$\text{小麦: } a_1 = 0.198b_1^{-3.62}; (r = -0.93) (10 \text{组数据}) \quad (26)$$

$$\text{玉米: } a_1 = 0.277b_1^{-6.896}; (r = -0.86) (5 \text{组}) \quad (27)$$

$$\text{无作物: } a_1 = 0.323b_1^{-4.32}; (r = -0.91) (5 \text{组}) \quad (28)$$

$a_1$  的单位为分/米  $b_1$ , 由于消退过程较推进过程更难观测,  $a_2$  与  $b_2$  值难以准确估计;  $b_2$  的变化范围为:

$$\text{小麦、玉米: } b_2 = 2.61q^{-0.52}; (r = -0.726) (15 \text{组}) \quad (29)$$

$$a_2 = 0.13q^{-4.963}; (r = -0.91) (15 \text{组})$$

$$\text{无作物: } b_2 = 0.45 - 1.0; a_2 = 1.8 - 0.12; (q = 3 - 5 \text{升/秒}) (9 \text{组})$$

表 1 引用了陕西洛惠渠<sup>[2]</sup>、美国 Ram 和 Singha<sup>[20]</sup> 苏联考斯可夫<sup>[14]</sup> 等人的计算公式, 可供参考。

#### (二) 田间试验法

田间试验法是指在长畦分段灌溉设计之前, 选择代表性的地块, 进行一组或几组相同情况下的畦灌试验, 称为预备畦灌试验, 由此给出推进与消退过程的具体资料, 即可得到模型的设计参数。这种方法更接近实际, 进水口间距的确定可能更准确。建议预备畦灌试验的灌水长度采用 50—100 米为宜。

采用参数算法时, 进水口间距的设计采用解析法较方便。采用田间试验法时用图解法或电子计算机法更为方便。



表1 推进函数与消退函数的几种计算公式

资料来源 (试验组数)	推进函数 $f_1(x) = a_1 x b_1$	消退函数 $f_2(x) = a_2 x b_2$	备注
陕西: 洛惠渠 [12] (1982) (9组)	$a_1 = c q^{\frac{1}{2}} s_0^{-\frac{1}{4}}$ (秒/米) $b_1 = 1.05 \sim 1.43$ , 其中: q—单宽流量(升/秒) $s_0$ —地面度 c—流速系数 $c = 2.67 \sim 3.72$		(经验公式) 轻壤土、机耕, 棉花泡地 (8组) $q = 2.86 \sim 9.0$ 升/秒小麦冬、春灌(6组) 坡度: $\frac{1}{230} \sim \frac{1}{1000}$
美国: Ram和singha [20] (1982) (16组)	经验回归 $a_1 = 0.67 V_a^{-0.7}$ ( $r = 0.944$ ) $b_1 = 1.35 \sim 1.38$ , 其中: $V_a$ —畦首平均流速 (厘米/秒); I—相关系数	$a_2 = 0.012 \left( \frac{y_c}{y_n} \right)^{-0.77}$ ( $I = 0.873$ ) $b_2 = 0.83 \sim 0.90$ $y_c$ —临界水深 $y_n$ —正常水深	
苏联: 考斯加可夫 [14]	$a_1 = \left( \frac{n K_0}{q} \right) \frac{1}{\alpha}$ $b_1 = \frac{1}{\alpha}$ n—水尾留积系数 q—单宽流量 $K_0$ —入渗函数常数	$f_2(x) = \beta_0 f_1(x)$ $\beta_0 = 0.1 \sim 0.3$	

### 五、分段灌溉设计模型检验

1984年3月于西北农学院灌溉试验站进行了大田长畦分段灌溉试验。表2中列出了各项试验处理和实测结果。表2中第6项为试验所采用的进水口间距,第9、10、11项分别为实测的入渗函数、推进函数和消退函数。根据本文提出的设计模型(19),计算得到的设计进水口间距列于第12项,比较第6项和12项可以看出,试区D的试验进水口间距(20米)与设计进水口间距(19米)最为接近,B、F区次之,A区最次。因此,从理论上可以认为:D区的进水口间距最合理,B、F区较合理,A区不合理。假设地块均匀,增加中间灌水段个数(亦即延拓畦长),可以得到灌水效果各项指标随畦长变化的规律,如图5。

由图5可以看出,设计合理的D区和较合理B、F区,在地块长度(畦长)大于100米时,灌水效果均较A区优(D区田间水利用率大于95%,B、F区大于93%,灌溉水分布均匀度皆大于85%)且随畦长而增加。设计不合理的A区,不但灌水效果较差(田间水利用率小于

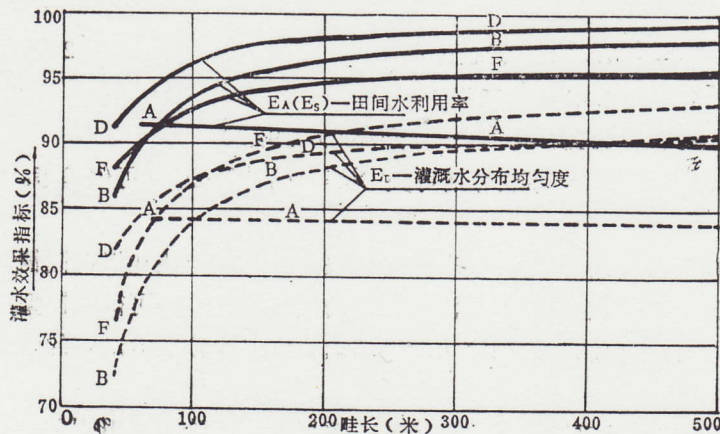


图5 灌水效果指标与畦长关系(长畦分段灌溉法)

92%,灌溉水分布均匀度小于85%),而且各项指标随畦长下降;当地块长度小于100米时,B、D、F各区灌水效果指标较低,这是因为B、D、F区进水口间距较小,首段入渗不足和末段深层渗漏的影响较大,从而导致了田间水利用率和灌溉水分布均匀度下降。由于首末段在长畦中仅占小部分,实际运用中完全可以通过适当措施(例如增加末段长度,减



表2 不同畦宽、进水口间距试验、模型检验对照表

		试 区 编 号						
项 目		A	B	C	D	E	F	
试 验 处 理	1. 畦宽W (米)	10	10	7.5	7.5	5	5	
	2. 地面坡度S。	0.001	0.0033	0.0015	0.0035	*	0.003	
	3. 单宽流量q (升/秒)	3	3	3	3	3	3	
	4. 进水口放水时间T (分)	10	6.6	6.6	6.6		6.6	
	5. 试验地块长度L (米)	60	40	30	40	60	40	
	6. 试验进水口间距 (米)	30	20	(畦灌)	20	30	20	
灌 溉 水 流 特 征 及 经 验 函 数	7. 进水口处横向推进时间 (分)	1.0	1.0	1.3	1.3		0.8	
	8. $T_2$ 时刻流程长度 (米)	30	32	30	19		20	
	9. 入渗函数	$K_0$ (毫米/分)	13.34	13.56	13.15	14.79		15.35
		$\alpha$	0.434	0.434	0.434	0.434		0.434
	10. 推进函数	$a_1$ (分/米 $b_1$ )	0.016	0.131	0.026	0.182		0.206
		$b_1$	1.49	1.22	1.779	1.14		1.158
	11. 消退函数	$a_2$ (分/米 $b_2$ )	1.877	0.28	0.514	1.498		1.32
		$b_2$	0.462	0.999	0.876	0.522		0.498
	12. 设计进水口间距 $L_0$ (米) (计划灌水定额40立米/亩)	22.5	25		19		16	
	模型检验	13. 原试验进水口间距是否合理 (比较12.6)	不合理	较合理		合理		较合理

\*注: 地面未平整 (倒坡) 未得到资料

少首段入畦单宽流量等) 使入渗剖面得到改善, 但设计时必须以中间段为准。首末段影响消除后, 长畦内的灌溉质量指标还可以相应提高。

由以上结果可以看出, 本文提出的设计模型是有效的, 由此确定的进水口间距是合理的。

上述试验还看出, 在单宽流量大于3升/秒时, 表2中所列的畦宽对水流运动过程基本无影响 (参照表2第7项); 由于流程较短,  $T_2$ 时刻水流恰好到达 $L_0$ 长度 (表2第8项), 证明(11)式之假设是正确的。

## 六、设计情况下长畦分段灌溉与畦灌的比较

表3列出了长畦分段灌溉与畦灌对照试验的各项处理。根据表中预备畦灌试验结果, 按模型(19)得到相同条件下长畦分段灌溉的设计进水口间距, 如表3。所有试验都在大田情况下进行。表4列出了分段灌溉与对比畦灌试验的结果。

表4中, 两组分段灌溉J、 $FM_4$ 设计畦长分别为60米和80米, 在给定的地面坡度、单宽流量下均实现了定额灌溉 (灌水定额 $M=30$ 米<sup>3</sup>/亩), 灌水流长达到设计畦长, 灌溉水分布均匀度、田间水利用率以及灌溉水贮存率均大于80—85%。对应于J区和对应于 $FM_4$ 区的对比畦



表3 长畦分段灌溉与畦灌对照试验区设计

灌水方法	地块编号	地面坡度 $S_0$	入渗速率 $K_0$ (厘米/小时)	畦宽 $W$ (米)	单宽流量 $q$ (升/秒)	设计畦长 $L$ (米)	设计进水口间距 $L_0$ (米)	备注
预备畦灌 分段灌溉 畦灌 畦灌 畦灌	I	0.001	10.4	7.5	3	40	14	西北农学院 无作物 平整良好
	J	0.001	9.0	7.5	3	60	15	
	L	0.003	14.2	4	3	60		
	$G_2$	0.003	10.4	4	3	100		
	H	0.003	10.4	3	5			
预备畦灌 分段灌溉 畦灌	$FM_1$	0.01	12.3	3.6	4	85	20	冯家山灌区法 门小麦春灌平 整一般
	$FM_4$	0.01	12.3	2.3	4	89	20	
	$FM_6$	0.01	12.3	3.6	4	200		

表4 长畦分段灌溉与畦灌试验结果及对比(计划灌水定额30立米/亩)

灌水方法	试验区 编号	地面坡度 $S_0$	单宽流量 $q$ (升/秒)	畦长 $L$ (米)	灌水时间 $T$ (分)	灌水定额 $M$ (米 <sup>3</sup> /亩)	流长 $l$ (米)	灌溉水分 分布均匀度 $E_D$ (%)	田间水 利用率 $E_A$ (%)	灌溉水 贮存率 $E_S$ (%)	灌溉效率 [(亩/量浇) (1米 <sup>3</sup> /秒)]	备注
长畦分段灌溉 畦灌 畦灌	J	0.001	3	60	15	30	60	83	94	94	2833	西北农学院 无作物 平整良好
	L	0.003	3	60	15	30	35	18	53	62	1440	
	$G_2$	0.003	3	60	58	100	60	77	30	100	745	
长畦分段灌溉 畦灌 畦灌	$FM_4$	0.01	4	80	16	32	95	83	36	92	2790	冯家山灌区 法门寺小麦 春灌平整一 般
	$FM_1^*$	0.01	4	80	16	32	60	61	72	76	2024	
	$FM_1$	0.01	4	80	25	47.1	85	97	67	100	1831	

\*注数据由 $FM_1$ 区实测推进过程得到,  $T=16$ 分时推进长度为50米, 取改水成数为0.8, 则最大流长为60米

灌试验(L区和 $FM_1^*$ 区), 虽然设计畦长、单宽流量和灌水定额皆相同, 地面坡度相同或更大, 但水流长度(流长)没有达到设计畦长, L区有40%长度、 $FM_1^*$ 区有30%长度漏灌, 灌溉水分布均匀度为18%和61%, 同时, 田间水利用率、灌溉贮存率均达不到80%的要求, 灌溉效率减小 $1/3 \sim 1/2$ 。若增加灌水时间, 使畦灌达到设计畦长后(如表4中 $G_2$ ,  $FM_1$ 两区), 灌溉水分布均匀度改善了, 灌溉水贮存率为100%(说明作物计划湿润层供给了足够的水), 但灌水定额大幅度增加( $G_2$ 区增加了两倍多,  $FM_1$ 区增加了50%), 田间水利用率分别下降至30%和72%。 $G_2$ 区灌溉效率仅为相应分段灌溉(J区)的 $1/4$ 。 $FM_1$ 区灌溉效率为相应 $FM_4$ 区的 $2/3$ 。由此可见, 分段灌溉相对于畦灌的优越性是十分显著的。

在允许范围内增大单宽流量可以改善畦灌的灌水质量, 但要实现小定额灌水, 其灌水长度仍然很小。如表5中H区单宽流量增大至5升/秒, 100米畦长灌溉的灌水定额为40立米/亩, 亩次超灌10立米/亩, 各项灌溉质量指标和灌溉效率均比相同长度、较小单宽流量及较小坡度下的分段灌溉(如表5中J区)低, 其中田间水利用率达不到80%, 灌溉效率约为分段灌溉的55%。

冯家山灌区法门试验地面坡度和单宽流量均较大, 因此畦灌质量较好。取200米长畦灌溉试验(表5中 $FM_6$ )进行分析, 灌水时间的控制采用“八成改水”, 灌水流长只达到170米, 灌溉的分布均匀度和田间水利用率达不到50%, 而相同长度上分段灌溉(表5中 $FM_4$ 为推算结果)各项灌水效果指标均高于90%, 与畦灌相比, 亩次灌溉可省水23.2立米, 灌溉水分布均匀度和田间水利用率以及灌溉效率皆增加一倍左右。



表 5

灌水方法	试区 编号	$S_0$	$q$ (升/秒)	$L$ (米)	$T$ (米)	$M$ (米 <sup>3</sup> /亩)	$L$ (米)	$E_D$ (%)	$E_A$ (%)	$E_s$ (%)	灌溉效率 [(亩/昼夜)/ (1米 <sup>3</sup> /秒)]	备 注
畦 灌	H	0.003	5	100	21	40	100	85	70	93	1600	西农
长畦分段灌溉 (推算)	J	0.001	3	105	$3.75 \times 7 = 26.25$	30	105	90	95	95	2833	西农
畦 灌	FM <sub>6</sub>	0.01	4	200	69	55.2	170	49.1	46.3	85	1333	法门
长畦分段灌溉 (推算)	FM <sub>4</sub>	0.01	4	200	$4 \times 10 = 40$	32	230	93	91	98	2700	法门

## 七、结论与讨论

(一) 本文根据水量平衡原理和畦灌时水流运动的基本规律, 提出了长畦分段灌溉法的一种设计模型。根据该模型的两种边界条件(水平畦、单向推进)提出了进水口间距的设计方法, 包括解析法、图解法和电子计算机解法。试验表明, 该理论模型是正确的和可靠的。

(二) 本文研究的长畦分段灌溉法是一种节水型灌溉方法: (1) 可以实现30立米/亩左右的低定额灌溉, 灌溉水分布均匀度、田间水利用率和灌溉水贮存率均大于80—85%, 且随畦长而增加。与长畦灌相比至少可省水40—50%, 灌溉效率可提高一倍左右或更多; (2) 灌溉设施占地少, 可省去一至二级田间渠道(腰渠和顺渠); (3) 与畦灌相比, 可灵活适应地面坡度、糙度和种植作物的变化。可采用较小单宽流量, 减少土壤侵蚀; (4) 投资少, 节约能源, 管理费用低, 技术操作简单, 因而经济实用, 容易推广运用; (5) 田间无横向畦埂或渠道, 便于机耕和采用其他先进的耕作方法, 更有利于作物增产。长畦分段灌溉法最适合干旱半干旱、水资源缺乏的地方, 经济效益显著。以下利用实测资料估计分段灌溉效益:

冯家山灌区十一支十四斗控制灌溉面积为2630亩。其中麦田面积1699亩占60%。常用200米长畦子, 现以表5中FM<sub>4</sub>及FM<sub>6</sub>比较推算春灌节水效果。原FM<sub>6</sub>区的灌水定额为55.2立米/亩, FM<sub>4</sub>的灌水定额为32立米/亩, 若全面实行长畦分段灌溉, 则春灌亩次可节水23.2立米, 全斗渠省水37120立米, 可扩大灌溉面积1160亩(相当于增加72%)。若斗渠取水流量为200升/秒, 斗渠渠系水利用系数为0.85, 则斗渠内灌溉延续时间可缩短3.69天。因此, 长畦分段灌溉法节水、增产和管理上的效益极为显著, 应大力推广应用。

(三) 其它问题讨论: 进行长畦分段灌溉(土渠输水情况)时在作物群体中需修筑许多条纵向输水沟。然而, 当输水沟宽度适当时, 不但不会减产, 而且可能增产。农学上关于空带种植和作物间作套种的研究表明,<sup>[10]</sup>陕西关中地区当小麦空带宽度一尺, 空带间距4.5尺, 小麦、玉米套种空带间距为3.5尺, 小麦、玉米、大豆三茬套种空带间距1.5尺时, 由于紊流扩散和光合作用增强, 作物平均增产10—15%, 产值每亩增加12.1~31.4元。长畦分段灌溉输水沟可替代原来的畦埂或由空带中穿过。若坡度1/1000, 输水沟宽×深=20×20厘米至30×30厘米, 一般都可通过18—35升/秒流量, 足以满足3—10米畦宽所需的流量。畦块内可布置一定数目的空带沟, 并在小麦灌浆(玉米临近套种)期灌水时, 由于空带中有水通过,



可充分供给小麦光合作用需要的水分,促进高产,而且可缓和小麦和玉米根系内发生对水肥的竞争,保证玉米出苗、全苗,减少土壤水蒸发损失,这种配合措施对解决关中地区“迟种迟收,恶性循环”问题起重要作用。

### 主要参考文献

1. 许志方,“重视地面灌溉,提高灌水技术”,灌溉排水,1982.2
2. 栗宗嵩,“用水量平衡法求解长畦灌水水力计算”,灌溉排水,1983.2
3. 许志方、陈学敏,“畦田灌水技术试验”,农田水利与小水电
4. 北京农业机械化学院《喷滴灌译丛》1981,第十讲:“地面灌溉”。
5. 蓬莱县水利局,“小麦畦灌技术试验”,山东水利科技,1983.1
6. 贺正中,“浅谈小畦灌的节水作用与技术”,灌溉排水,1984.4
7. 侯麟祥,“确定畦沟灌水技术要素的简易图解法,”农田水利与小水电,1984
8. 王家仁,“塑料软管代渠,节水节能节地”,山东水利科技,1984
9. 平度县水利局,“推行管道灌溉,搞好抗旱双保”,山东平度县水利局油印材料,1984.4
10. 杨春峰、成升魁,“关中灌区间作套种的带型研究”,中国、联合国粮农组织召开的国际多熟种植学术讨论会送稿。西北农业大学1985年5月通过鉴定。
11. 李惠芬,“2000年世界灌溉展望”。国外农学—灌溉排水,1983.1
12. 陕西省渭南地区洛惠渠管理局,“洛惠渠灌水技术与灌水技术方案”1982.11
13. 山东省平度县水利局,“关于渠道渗漏及不同畦长灌溉用水量对比试验”1983.11
14. A.H. 考斯加可夫著《土壤改良原理》。中华人民共和国水利部专家工作室。东北农学院苏联教材翻译室译,高等教育出版社,1956.6
15. 张德山,我国北方地区管道输水灌溉调查,灌溉排水,1984.4
16. L.J. 布赫著《地面灌溉》。联合国粮食及农业组织农业发展丛书,95卷。1976
17. Singh and Ram 1984. Solution of the kinematic wave Equations for Border Irrigation.
18. Clemmens. 1982. Evaluating Infiltration for Border Irrigation Models. Agric water Manag. 5: 199—170.
19. Hulsman, R. 1984. Closed Border Irrigation Evaluations. Agric Water Manag 9: 103—148.
20. Ram and Singh 1982 A Design procedure for Closed End Irrigation Borders Agric. Water Manage, 5: 1—4

## Studies of Long-Border-<sup>Segment</sup> Phrasing-Irrigation Technique

Wang Zhi

(Department of Hydraulic Engineering, Northwestern University of Agriculture)

### ABSTRACT

A design model for Long-Border-Phrasing-Irrigation was developed on the basis of water balance principle. According to two specific boundary Conditions of the model, the water inlet intervals Can be obtained by three methods, including analytic, graphic and computer method. Experiments indicated that this model is effective and Simple-practical. It made the LBPI achive quota irrigation, especially low quota (below 35 M<sup>3</sup>/mu). Comparing with Common border irrigation, it can Save water by 40~60%, the irrigation productivity can be doubled water use efficiencies (E<sub>A</sub>, E<sub>S</sub>, E<sub>L</sub>) were more than 80~85%. Other problems were also discussed.