

水平畦灌设计理论的研究进展

郭相平

林性粹

(河海大学 南京 210098) (西北农业大学 咸阳 712100)

摘要 综述目前国内外水平畦灌设计理论研究的最新进展,重点介绍水平畦灌设计理论的三种模型,即 Clemmens 模型、十成改口模型和阶式水平畦灌模型的设计原理、特点及使用范围,并对其进行评价和对比。

关键词 农田水利 灌溉设计 Clemmens 模型 十成改口模型 阶式水平畦灌模型

水平畦灌的概念最早由 Swanson 在 1957 年提出。60 年代,随着高效率、高精度激光平地机械的出现,水平畦灌的应用得到了很大的发展。在早期,由于缺少精确模拟水平畦田水流运动的有效方法,设计理论发展缓慢。1974 年,美国水土保持局提出一套水平畦灌设计图表,但其中包含了许多人为的假设,与实际情况出入很大,显得比较粗糙。

1977 年,Strelkoff 和 Katopodes 等人将水动力学模型进行简化,得到了零惯性量模型^[1],即

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + s_f - s_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 h 为畦田内地面水深; q 为地面水流单宽流量; I 为累积入渗水深; x 为沿水流运动方向的距离; t 为时间; s_f 为地面水流运动阻力坡降; s_0 为畦田坡降,水平畦田中 $s_0 = 0$ 。

和水动力学模型相比,零惯性量模型计算简便,上机运行时间短,而且计算精度也较高,完全能够满足畦灌设计的要求。

零惯性量模型的出现,极大地促进了水平畦灌设计理论的发展,被认为是水平畦灌理论发展的新起点。以该模型为基础,先后出现了 Clemmens 模型、Watentburge 和 Clyma 等人的十成改口模型、林性粹和郭相平等人

的阶式水平畦灌模型。这些模型根据各自的出发点得出灌水要素的最佳组合,分别适用于不同的土壤条件和管理水平。

1 Clemmens 模型

该模型是由 Clemmens 和 Dedrick 于 1981 年提出的^[2]。其设计原理是:对于给定的畦长 L 、放水时间 t_{co} 、单宽流量 q 、田面糙率 n 和土壤入渗参数 K, σ ,利用零惯性量模型模拟畦田水流的推进、消退和入渗过程,就可以得到畦田内各点的入渗水深分布,以此来评价灌水质量 DU ,即 $DU = f(L, q, t_{co}, n, K, \sigma)$ 。将 DU 值相同的点连成等值线图,使用时根据设计的 DU 值和土壤特性参数就可以反查出畦长和单宽流量的组合。

模型中使用了灌水均匀度 DU (Distributy Uniform) 的概念来评价灌水质量,定义成:

$$DU = z_a / z_g \quad (2)$$

式中 z_a 为水平畦田尾端入渗水深; z_g 为畦田内各点的平均入渗水深;其它符号意义同前。

由于水平畦田坡度为零,水流在消退过程中几乎只有垂直消退过程而不存在水平消退,所以畦尾入渗水深最小。在充分灌溉条件下,畦尾入渗水量应满足作物需水要求,即

$$z_a = z_d \quad (3)$$

式中 z_d 为设计灌水深度。

和传统评价灌水质量的三个指标 E_s , E_r 和 E_d 相比, 较当 $z_s = z_d$ 时, 有 $E_s = 100\%$, $E_r = E_d = DU$, 因此用 DU 来评价水平畦灌的灌水质量是合理的。

Clemmens 模型描述如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + s_f = 0 \\ DU = z_d/z_g \end{cases} \quad (4)$$

如果把 $L, q, t_{co}, K, \sigma, n$ 都作为独立变量来求解各种条件下的 DU 值, 计算量巨大而且资料不易整理。故 Clemmens 等采用了无量纲化的方法进行求解。通过选择适当的参考变量, 得到 $DU = f(q^*, L^*, \sigma^*)$, 再根据零惯性量模型绘出不同的 σ 条件下, DU 随 q^*, L^* 不同组合的等值线图, 查算十分方便。

一般情况下, 随着单宽流量的增大, 畦长和 DU 值都有增加的趋势, 因此水平畦灌多采用较大的单宽流量。但是当单宽流量增加到一定值后, 不仅无法提高 DU 值和畦长, 而且可能引起土壤冲刷。Clemmens 和 Dedrick 于 1982 年又提出了流量限制的概念, 给出了单宽流量的上限, 使 Clemmens 模型趋于完善。

Clemmens 模型模仿明确, 理论较为完善, 而且得出的成果应用方便。利用该模型设计的灌溉方案, 畦田长度和单宽流量都比较大, 因而劳动生产率较高。因此该模型特别适用于土壤入渗速度低、机械化程度和管理水平都比较高的发达地区。实践证明, 如果能采用先进的平地技术并严格按照设计参数(主要是单宽流量和灌水时间)实施灌溉, DU 可以达到 80% 以上。

2 十成改口模型

在目前使用的水平畦灌中, 普遍存在超量灌溉的现象。即使是经过良好设计的方案, 在实际应用过程中也往往难以达到设计的灌水质量。Wattenburger 等人认为, 这与农民在灌溉时控制水量的能力有很大关系。在

以往的设计理论中, 农民总是被假设能够按照设计要求精确控制入田单宽流量和灌水时间。实际上, 由于受田间量水设施和管理水平的限制, 这一假设条件在大多数情况下不能满足。

为解决这一问题, Wattenburger 等人于 1989 年提出了“十成改口”(completion-of-advance irrigation)的概念^[3,4], 使灌溉操作大为简化, 适用于缺少或没有量水设施及管理水平不太高的灌区使用。其模型描述如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + s_f = 0 \\ E = z_{\min}/z_g \\ T_{co} = T_A \end{cases} \quad (5)$$

式中 T_A 为水流推进时间, 即水流从放水口到水平畦田尾端所需的时间; $z_{\min}$ 为畦田内各点中的最小入渗水深, 通常发生在畦尾, 充分灌溉设计中 $z_{\min} = z_d$; 其它符号意义同前。

该模型所用的灌水评价指标灌水均匀度 $E = z_{\min}/z_g$ 与 DU 含义相同, 只在模型中增加了一项约束条件 T_{co}/T_A 。所以, 十成改口模型可以认为是 Clemmens 模型的一种特殊情况。

十成改口模型仍采用无量纲化的方法求解, 选择了下列无量纲变量:

$$\begin{cases} K^* = \frac{K t_{co}^{(\sigma-3/16)}}{q^{9/16} (n/C_u)^{3/8}} \\ L^* = \frac{L (n/C_u)^{3/8}}{q^{7/16} t_{co}^{13/16}} \\ z_g^* = \frac{z_g}{K t_{co}^\sigma} \end{cases} \quad (6)$$

式中 σ 为土壤入渗指数; K 为土壤入渗系数; C_u 为单位系数; L 为 t_{co} 时间内水流的推进距离; 其它符号意义同前。

由于十成改口模型中畦田长度就是水流推进长度, 所以当 q, t_{co}, n, K, σ 一定时, 利用零惯性量模型可以计算出推进长度, 再由式(6)计算出 K^*, L^* 和 z_g^* , 再计算 E 值。 E

与 K^* , K^* 和 L^* 之间存在一一对应的关系。模拟不同的灌水参数组合, 就可以绘出 $E \sim K^*$ 和 $K^* \sim L^*$ 的关系曲线。使用时根据设计 E 值和土壤特点, 通过关系曲线和适当变换, 就得到合适的设计方案。

和 Clemmens 模型相比, 该模型具有以下特点:

a. 放弃了一般地面灌溉设计模型中常用的假设——农民能够精确地控制单宽流量和灌水时间, 认为灌溉是在缺少或没有水流控制设施和能力的条件下实施的, 比较符合实际情况。

b. 采用十成改口的灌水方法, 当水流推进到畦尾时才停止进水。这样在灌水时, 单宽流量和灌水时间不再是灌水控制要素, 农民仅依靠观察水流的推进情况就可以实施灌水, 简化了操作, 而且符合农民的灌水习惯, 易于推广和接受。更重要的是该模型使单宽流量和灌水时间相互补偿。当入田单宽流量较大时, 水流推进速度加快, 灌水时间(即推进时间)减少。否则当单宽流量较小时, 灌水时间相应延长。单宽流量和灌水时间相互制约, 使进入畦田内的总水量不致过于偏离设计灌水量, 从而降低了灌水质量对单宽流量的依赖程度。

c. 采用目标单宽流量代替设计单宽流量。所谓目标单宽流量是指畦田长度和田间条件一定时, 能达到最佳灌水效果应采用的单宽流量。由于缺少水流控制能力, 实际单宽流量与目标单宽流量有一定的差距。实际灌水质量的好坏, 取决于该差距的大小。一般以实际单宽流量等于或大于目标单宽流量为宜。

另外, Wattenburger 等还评价了土壤参数值的误差对模型精度的影响, 并提出了补偿的方法。

实验证明, 当实际单宽流量比目标单宽流量大 1 倍或减少 50%, 灌水均匀度只降低 10% 左右。因此, 该模型比较适于缺少量水设施及管理水平不高的灌区使用。

3 阶式水平畦灌模型

水平畦田内的水流由于不受坡度影响, 其消退过程几乎只存在垂直消退过程。水流推进需要一定的时间, 因此水平畦灌总是畦首入渗水量最大, 并沿畦长方向递减。在畦田长度较大或土壤透水性较强时, 畦田首部超渗水量较多, 灌水质量下降, 造成了水量浪费。为此, 林性粹、郭相平等于 1995 年提出了阶式水平畦灌模型^[5]。

现以分两段为例说明模型的设计原理。

将水平畦田沿长度方向分成两段 L_1 和 L_2 , 后段 L_2 的畦面比前段 L_1 的降低了适当的高度 Δz , 从而使水流形成分段消退。忽略停止灌水后水深重新分布的时间, 由于 Δz 的存在, 使得在 L_1 段上水流消退完毕时, L_2 段上仍有 Δz 的地面积水存在并继续入渗, 借以减少畦田首尾由于水流推进而引起的人渗时间差异。显然, 高差 Δz 的存在, 使后段上水流消退时间推迟, 入渗水量增加, 从而使整个畦田内的人渗水量趋于均匀, 提高了灌水质量。

阶式水平畦灌模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + s_f = 0 \\ h_1(L_1 + L_2) + L_2\Delta z - \\ L(\frac{z_d}{DU} - z_1) = 0 \\ L_2\Delta z - L_2(\frac{z_d}{DU} - z_2) = 0 \\ T_2 > T_d \end{cases} \quad (7)$$

式中 L 为畦长, $L = L_1 + L_2$; h_1 为停止灌水时 L_1 段上的平均地面水深; z_1 为停止灌水时 L 段上的平均入渗水深; z_2 为 L_1 消退结束时 L_2 段上的平均入渗水深; T_2 为水流在 L_2 段上的推进时间; T_d 为入渗设计水深 z_d 所需的时间, $T_d = (z_d/K)^{1/\alpha}$; 其它符号意义同前。

(下转第 9 页)

- theory of unsaturated soils. Proc of 7th int Conf on expansive soils, Dallas, 3 ~ 5 August, 1992; 153 ~ 162
- 6 沈珠江. 土体变形特征的损伤力学模拟. 5 届全国土力学数值分析与解析方法讨论会议论文集, 重庆, 1994; 1 ~ 8
- 7 沈珠江. 广义吸力和非饱和土统一变形理论. 岩土工程学报, 1996(2)
- 8 Toll D G. A framework for unsaturated soil behaviour,

Geotechnique, 1990, 40(1); 31 ~ 44

- 9 Brackley. Swell pressure and free swell in a compacted clay. Proc 3rd int Conf Expansive Soils, Jerusalem; Academic Press, 1975; 169 ~ 176
- 10 Wheeler S J, Sivadumar V. An elastic - plastic critical state framework for unsaturated soils. Geotechnique, 1995, 45(1); 35 ~ 53

(收稿日期: 1995 - 10 - 04)

(上接第 3 页)

该模型目前尚无图表或曲线可查, 郭相平等提供了一套设计程序, 设计者只需将土壤特性长 L 及各分段的长度 L_i 和高差 Δz_i 。 q 可以根据实际情况选定或根据前述两种模型求得。

阶式水平畦灌模型将水平畦灌水流推进特点和有坡畦灌的水流消退特点相结合, 灌水时可以采用较大的单宽流量和畦长, 在透水性较强的土壤条件下优越性比较明显。该模型在具有一定地形坡度的灌区使用, 还可以利用原有坡度减少土地平整的土方量。当畦长不变时, 采用该模型可以提高灌水均匀度。

如果在设计时令 $T_{\infty} = T_1$, 则该模型设计出的方案具有十成改口模型特点。

经大田验证, 在同样的土壤条件下, 阶式水平畦灌比一般水平畦灌 DU 值增加 5% 左右。

上述三种设计模型, 都是在零惯性量模型的基础上建立起来的, 由于建立模型时考虑的管理水平和土壤条件不同, 使模型各具特色。

Clemmens 得出的设计方案是理论最优组合; 十成改口模型着重考虑了农民的实际灌水能力, 在不过分恶化灌水质量的前提下使灌水方法简单易行, 是目前广泛采用的灌水技术; 阶式水平畦灌模型的主要目的是扩大水平畦灌的使用范围和提高灌水质量。随着机械化程度和农民灌溉管理水平的提高, Clemmens 模型和阶式水平畦灌模型将会得到广泛应用。

参考文献

- 1 Theodor, Strelkoff, Nikolaos. Border irrigation hydraulics

with zero-inertia model for border irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1977, 103(3); 325 ~ 342

- 2 Clemmens A J, Strelkoff, Dedrick A R. Development of solution for level-basin design. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1981, 107(3); 265 ~ 279
- 3 Wattenburger P L, Wayne Clyma. Level-basin design and management in the absence of water control part I: Evaluation of completion-of-advance irrigation. Transaction of The ASCE, 1989, 32; 838 ~ 843
- 4 Wattenburger P L, Wayne Clyma. Level-basin design and management in the absence of water control part II: Evaluation of completion-of-advance irrigation. Transaction of The ASCE, 1989, 32; 844 ~ 850
- 5 林性粹, 郭相平. 阶式水平畦灌数学模型及其应用. 西北农业大学学报, 1995(3); 1 ~ 4

(收稿日期: 1995 - 10 - 11)

简 讯

▲据《Water Power & Dam Construction》1996 年 2 月刊报导, 美国一家电力公司—Mission Energy 公司以 10.24 亿美元购买了英国最大的 Dinorwig 抽水蓄能电站和装机容量为 360MW 的 Ffestinog 水电站。Mission Energy 公司发言人声称, 该公司还将进一步扩大其在英国市场的占有率, 很可能通过向英国购置 4000 MW 电站来实现。

▲新西兰在其南部正在兴建一座多功能水利枢纽工程, 其坝高 50 m、坝顶长 370 m、装机容量为 7.4 MW, 可灌溉 1.6 万 hm^2 农田。该工程计划以 1997 年底竣工, 耗资 2000 万美元。

▲匈牙利电力机构从今年元月起每年向奥地利提供 1200 GW·h 的电力, 以偿还奥地利提供给匈牙利兴建 Nagymoros 坝的贷款。

(熊莉芸供稿)