

渗渠取水压力变化过程分析

刘焕芳^{1,3},程 琨^{1,2},吕宏兴^{1,3}

(1 新疆兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832003;2 石河子大学 水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003;

3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘要] 针对渗渠取水过程中的压力变化以及由此引起的渗渠取水量变化,结合模型试验,运用源汇理论建立了流体力学方程。阐述了点汇是导致渗渠取水过程中压力降落的原因,而压力的减小导致渗渠取水量的降低,取水量的降低又会使得补给水头增大,缓解了因点汇形成的压力降落,这是一个动态过程。试验结果表明,渗渠运行170~250 min后达到压力平衡位置,处于稳定取水状态,且管径越大稳定用时越长,非完整式渗渠较完整式渗渠稳定用时更长。

[关键词] 渗渠;取水压力变化;源汇理论

[中图分类号] TV133

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)08-0211-06

Analysis of pressure variety process during seepage channel intaking water

LIU Huan-fang^{1,3},CHENG Kun^{1,2},LV Hong-xing^{1,3}

(1 Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang BINGTUAN, Shihezi, Xinjiang 832003, China;2 College of Hydraulic and constructional Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;3 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract : In view of the pressure change which resulted in the water quantity change during the seepage channel intaking water, fluid mechanics equation was established by applying source-sink theory according to the model experiment. The reason that pressure drop was caused by point sink was elaborated. The decline of pressure resulted in reduction of water quantity, which caused pressure head of feed-water makeup go up, and thus could alleviate the loss of pressure caused by point sink. This was a dynamic state process. The experimental results showed that after wheeling 170 ~ 250 min the seepage channel would reach the equilibrium position of pressure and it would intake water in a stable way, and the larger the caliber, the longer the stability temporal hour was needed. Besides, the partially-penetrated seepage channel needed much more time compared with the fully penetrating seepage channel.

Key words : seepage channel; pressure variety of intaking water; source-sink theory

取水构筑物的形式需要适应一个地区的水文地质条件,使本来对取水不利的水文地质条件向有利的方面转化。目前,节水工程和人畜供水工程的水源多为地下水,但从水资源利用的发展趋势来看,利

用取水构筑物集取地表河渠水以及岸边地下浅含水将越来越受到重视。

近年来,随着我国工业和市政建设的迅速发展,渗渠取水越来越多地在给水工程中得到应用,成为城

收稿日期] 2006-06-13

[基金项目] 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室开放课题发展基金项目(200506)

[作者简介] 刘焕芳(1965-),男,河南禹县人,教授,在读博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:liuhuanfang@tom.com。

市和工业建设的一项重要工程^[1-3]。其方法是将渗滤取水装置固定在河床或河滩滩下一定深度处,利用其上部天然滤床或在其上部做人工反滤层,用自身水头对天然河水进行渗透处理,集取河流垂直渗透水,实现了净水与排沙同步运行,清混分开,是一种非全流过滤,为解决过滤器堵塞问题开辟了一条崭新的途径,在大面积节水灌溉中具有良好的推广价值。

但在渗渠运行过程中发现,自渗渠闸阀开启到取水稳定,其取水量有一个递减的过程。究其原因,是因为埋在含水层中的滤水管在取水时相当于一平面点汇,而取水过程中的点汇会导致含水层中有效压力水头的降低,使渗渠含水层内部存在局部低压,从而使渗渠取水量相应降低。

冯曦等^[4]根据液体从静止到运动所需的启动压力差拟合了压力降落试井的标准曲线;刘立明等^[5]通过构建数值试井模型,研究了压力降落数值试井

问题。王德山等^[6]研究了斜井多井系统中单井测试压力降落曲线的试井分析方法。但目前对渗渠取水工程取水时的压力降落过程的研究涉及较少。

本研究通过渗渠取水工程室内试验,研究分析了渗渠取水过程中的压力变化以及由此引起的渗渠取水量变化,以期对渗渠工程设计提供技术支持。

1 试验装置与方法

试验在长 11 m、宽 1.0 m、高 1.5 m 的水槽中进行(图 1,图 2),水槽边壁为细石混凝土抹面,在中部自底层有 0.9 m 高不透水隔墙,将水槽分为前后两段,前段底层有 40 cm 厚不透水层。在水槽前后两段都埋有渗滤取水管,其上铺设了 3 层共 75 cm 厚人工反滤层,自下向上分别为 300 mm 厚、直径 20~40 mm 的卵石;200 mm 厚、直径 10~20 mm 的砾石;250 mm 厚、直径 1~5 mm 的粗砂。

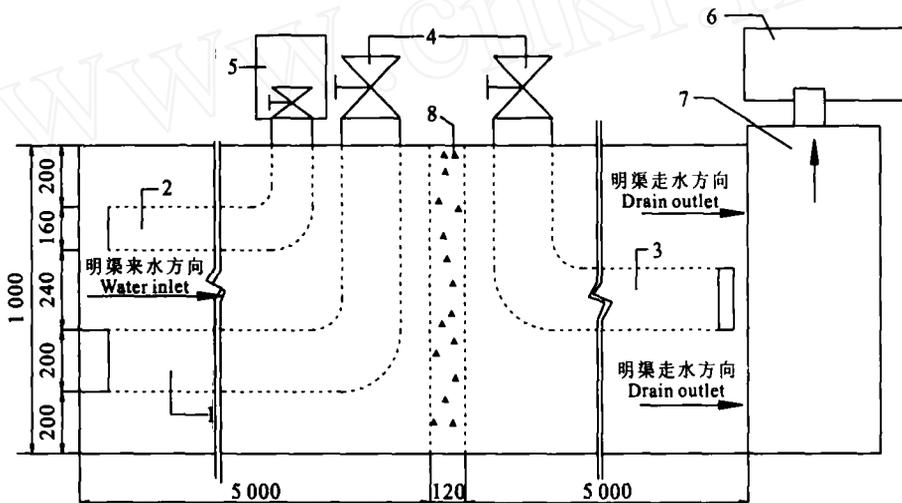


图 1 试验装置平面示意图(单位:mm)

1,2. 完整式渗渠滤管;3. 非完整式渗渠滤管;4. 闸阀;5,6. 三角堰;7. 蓄水池;8. 隔墙

Fig. 1 Schematic drawing of lay-out of the test facility (unit:mm)

1,2. Filter tube of fully penetrating seepage channel;3. Filter tube of partially-penetrated seepage channel;

4. Sluice valve;5,6. Triangular-notch weir;7. Impounded basin;8. Partition

试验采用离心式水泵向渗渠模型供水,用矩形量水堰量测来水流量,用三角形量水堰量测渗渠取水量。当测压管液面与明渠自由水面等高时,说明渗透稳定,此时分别单独开启渗渠滤水管闸阀,每隔一定时间用量水堰量测其取水量,直到渗渠取水量不再发生变化,即取水达到稳定时,关闭该渗渠闸门,打开另一渗渠滤管阀门进行下组试验。

2 渗渠取水量变化过程分析

在试验中发现,从渗渠滤管阀门开启到取水稳

定的过程中,渗渠取水量不断减小。令渗渠开启后的取水量为 Q ,经过一段时间的观测,待渗渠运行稳定后令其水量为 Q_0 。其取水变化率 Q/Q_0 随时间的变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出,直径为 0.16 m 的完整式渗渠滤管的曲线变化率为 1.00~1.08,其稳定历时最短;直径为 0.20 m 的完整式渗渠滤管的曲线变化率为 1.00~1.22,稳定历时居中;直径为 0.20 m 的非完整式渗渠滤管的曲线变化率为 1.00~1.46,其稳定历时最长。各条曲线都有共同的变化趋势,即渗

渠滤水管阀门开启之初的取水量为最大取水量,之后水量逐步递减,运行一段时间(170~250 min)后

趋于稳定,该稳定值才是渗渠的最终取水量。

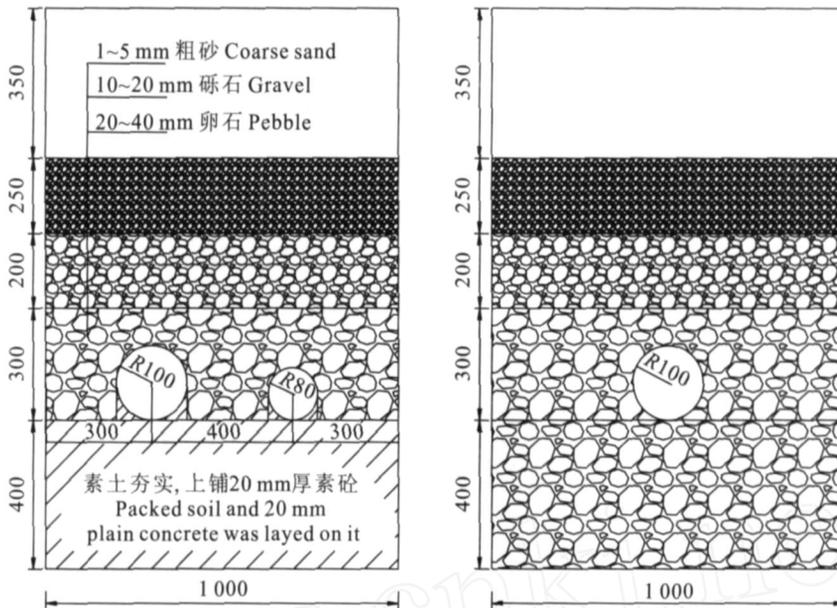


图 2 渗渠横断面示意图(单位: mm)

Fig. 2 Cross-sectional drawing of seepage channel (unit: mm)

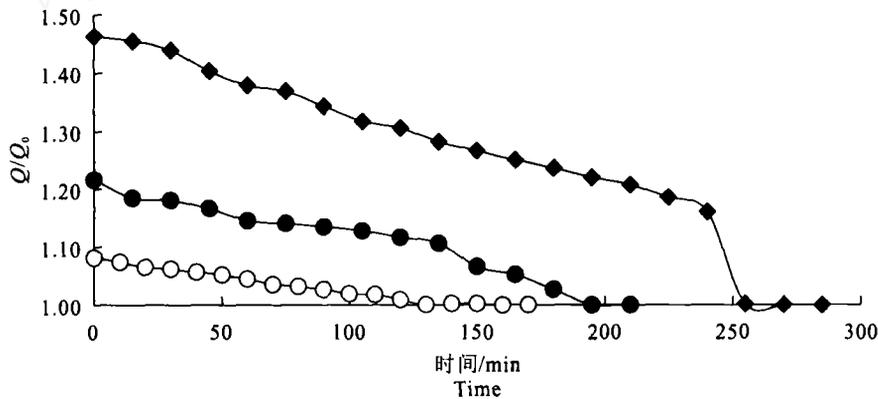


图 3 不同滤管渗渠取水量-时间的变化曲线

Fig. 3 Varying curve of water quantity-temporal hour of seepage channel with different filter tube
- - - 0.16 m 完整式渗渠滤管; - - - 0.2 m 完整式渗渠滤管; ··· 0.2 m 非完整式渗渠滤管

3 渗渠取水压力变化过程分析

由于所有来水都存在于自然界的含水层,因此其依据自身的天然水力坡度所形成的流向和径流量由补给区向排泄区运动^[6],故渗渠取水时滤水管取出的水由两部分组成:一部分为来自含水层的静储量,这是渗渠最初取水时的主要水源来源;另一部分为来自含水层的径流量。随着取水时间的增加,渗渠所截取的含水层径流量逐渐增多,含水层的静储

量也处于恢复阶段,直至渗渠截取的含水层径流量等于取水量后,新的动态平衡形成,渗渠的取水量便处于稳定状态。

在渗流力学中,上述现象可以用平面点汇来解释^[7-9],即在渗渠运行时间 $t = 0$ 的瞬间,从饱和的多孔介质内任一点 $M(x, y)$ 取出微量流体,其体积为 V ,则其质量为:

$$m = \rho V \tag{1}$$

式中: m 为液体质量(kg); ρ 为液体密度(kg/m³)。

对于弱可压缩流体,其密度与压力呈线性关系^[7],有

$$= i[1 + c_f(p - p_i)]。 \quad (2)$$

式中: i 是参考压力 p_i 条件下的密度(kg/m^3); p 为渗渠运行时的压力(MPa); p_i 为大气压力(MPa);

$c_f = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{d} \frac{d}{dp}$, 称为压缩系数(MPa^{-1}), 其中 V 是一定质量流体的体积(m^3), $(p - p_i)$ 为压力差。

在渗渠实际工程中,相对于渗渠滤水管直径(宽度)而言,河床含水层厚度和宽度要大得多,故可将渗渠含水层在空间上的坐标看作无穷大量,那么关于压力 $p(x, y, t)$ 的扩散方程,可写成关于密度 (x, y, t) 的相同形式的方程,即:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{1}{d} \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{全平面, } t > 0; \quad (3) \\ \lim_{x \rightarrow \infty} \lim_{y \rightarrow \infty} (x, y, t) = i; \quad (4) \\ (x, y, t) |_{t=0} = \begin{cases} i & \text{在 } M \text{ 以外,} \\ & \text{在 } M \text{ 处} \end{cases} \quad (5) \end{aligned} \right.$$

式中: d 为压力扩散系数, $d = \frac{K}{\mu c_f}$, 其中 K 为渗透系数(m/d), μ 为液体动力粘滞系数, c_f 为综合压缩系数,一般可认为 $c_f = c_f$; t 为时间(d)。

对式(3)进行傅立叶变换^[10],有:

$$F(x_1, x_2, t) =$$

$$\int_{-x_1}^{+x_1} \int_{-x_2}^{+x_2} (x, y, t) \cdot e^{-i_1 x} \cdot e^{-i_2 y} dx dy。 \quad (6)$$

式中: F 为傅立叶级数; x_1 和 x_2 为频率; i 为虚数。则有

$$(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \cdot$$

$$\int_{-x_1}^{+x_1} \int_{-x_2}^{+x_2} F(x_1, x_2, t) \cdot e^{i_1 x} \cdot e^{i_2 y} dx dy。 \quad (7)$$

对(7)式进行积分,得:

$$(i_1)^2 F(x_1, x_2, t) + (i_2)^2 F(x_1, x_2, t) = \frac{1}{d} \frac{dF(x_1, x_2, t)}{dt}。 \quad (8)$$

分离变量,得:

$$- \cdot (i_1^2 + i_2^2) dt = \frac{dF(x_1, x_2, t)}{F(x_1, x_2, t)}。 \quad (9)$$

对(9)式两边进行积分,得:

$$- \cdot (i_1^2 + i_2^2) (t - t_0) = \ln |F| - \ln |F_0|。 \quad (10)$$

即 $\frac{F}{F_0} = e^{- (i_1^2 + i_2^2)(t - t_0)}$, 故有:

$$F = F_0 \cdot e^{- (i_1^2 + i_2^2)(t - t_0)}。 \quad (11)$$

将式(11)代入式(7),有:

$$(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-x_1}^{+x_1} \int_{-x_2}^{+x_2} F_0 \cdot e^{- (i_1^2 + i_2^2)(t - t_0)} \cdot$$

$$e^{i_1 x} \cdot e^{i_2 y} dx dy = \frac{F_0 \cdot e^{- (t - t_0)}}{(2\pi)^2} \cdot$$

$$\int_{-x_1}^{+x_1} e^{-i_1^2} \cdot e^{i_1 x} dx \int_{-x_2}^{+x_2} e^{-i_2^2} \cdot e^{i_2 y} dy。 \quad (12)$$

联立方程(12), (4), (5), 有:

$$(x, y, t) = i - \frac{A}{t - t_0} \exp\left[- \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{4(t - t_0)}\right]。 \quad (13)$$

式中: A 为系数。

令场点 $M(x, y)$ 与汇点 $M(x_0, y_0)$ 之间的距离为 r , 则有:

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2。 \quad (14)$$

根据质量守恒原理,在 $t > t_0$ 的任意时刻,介质中的流体质量减少量为:

$$m = \int_0^t \int_0^r (i - i_0) r dr dt。 \quad (15)$$

将式(13)代入式(15),可得:

$$m = \frac{2 - A}{t - t_0} \int_0^r e^{-\frac{r^2}{4(t - t_0)}} \frac{1}{2} dr^2。 \quad (16)$$

作变量变换,令

$$u = \frac{r^2}{4(t - t_0)}, \quad \frac{1}{2} dr^2 = 2(t - t_0) du。 \quad (17)$$

代入式(16),得:

$$m = 4 - A \int_0^u e^{-u} du = 4 - A。 \quad (18)$$

则

$$A = \frac{m}{4}。 \quad (19)$$

将式(19)代入式(13),有:

$$(x, y, t) = i - \frac{m}{4(t - t_0)} \cdot \exp\left[- \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{4(t - t_0)}\right]。 \quad (20)$$

对(2)式进行变形,得:

$$- \cdot i = i c_f (p - p_i)。 \quad (21)$$

将式(20)代入式(21)有:

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{V}{4 c_f (t - t_0)} \cdot \exp\left[- \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{4(t - t_0)}\right]。 \quad (22)$$

在实际工程中,渗渠取水总是持续时间的渗流,可将其看作一个持续的点汇。令点汇 $M(x, y)$ 从 $t = t_1$ 持续到 t_2 不断取水,对单位厚度含水层而言,体积流量 $q(t)$ 为:

$$V = \frac{dV}{dt} = q(t) dt。 \quad (23)$$

将(23)式代入(21)式,可得持续点汇的压力解为:

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{1}{4 c_f (t -)} \cdot \int_0^2 \frac{q(\cdot)}{t -} \exp\left[-\frac{(x - \cdot)^2 + (y - \cdot)^2}{4 (t -)}\right] d \cdot \quad (24)$$

在式(24)中,若令 $\cdot_1 = 0, \cdot_2 = t$, 则式(24)可写成:

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{q(\cdot)}{4 c_f (t -)} \int_0^2 \frac{1}{t -} \cdot e^{-\frac{\cdot^2}{4 (t -)}} d \cdot \quad (25)$$

作变量代换, 令

$$u = \frac{\cdot^2}{4 (t -)}, d = \frac{\cdot^2}{4 u^2} du \cdot \quad (26)$$

将式(26)代入式(25), 有:

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{q(\cdot)}{4 c_f} \int_{\frac{\cdot^2}{4 t}}^{\cdot^2} \frac{1}{u} e^{-u} du \quad (27)$$

令含水层厚度为 M , 则渗渠产水量为 $Q = M \cdot q(\cdot)$ 。

又因为

$$c_f = \frac{K}{\mu} \cdot \quad (28)$$

式中: μ 为水的动粘滞系数。

将渗渠产水量 $M \cdot q(\cdot)$ 和(28)式代入(27)式, 有:

$$p(x, y, t) = p_i + \frac{QU}{4 KM} Ei\left(-\frac{\cdot^2}{4 t}\right) \cdot \quad (29)$$

式中: $Ei(z)$ 为累积分函数^[10]。

由于, $\frac{QU}{4 KM} > 0, Ei\left(-\frac{\cdot^2}{4 t}\right) < 0$,

所以:

$$\frac{QU}{4 KM} Ei\left(-\frac{\cdot^2}{4 t}\right) < 0 \cdot$$

因此, 随时间 t 的增加, $p(x, y, t)$ 在不断降低。

对渗渠取水工程, 现有的取水量计算多采用国外的计算公式。对于河床取水渗渠, 常用的是阿拉维娜·努美诺夫公式^[11], 即:

$$Q = L K q_r \cdot \quad (30)$$

$$q_r = \frac{H - h_w}{A} \cdot \quad (31)$$

式中: Q 为渗渠产水量 (m^3/d); \cdot 为淤塞系数, 一般不浑浊河水取 0.8, 中等浑浊时取 0.6, 浑浊时取 0.3; L 为渗渠长度 (m); K 为反滤层渗透系数 (m/d); H 为渗渠底部至河水自由水面水头值 (m); h_w 为渗渠滤管内水面水头值 (m); A 为系数, 对完整式渗渠, 有:

$$A = 0.73 \cdot \lg \cot\left(\frac{\cdot}{8} \cdot \frac{d}{M}\right) \cdot$$

对非完整式渗渠, 有:

$$A = 0.73 \cdot \lg \tan\left(\frac{\cdot}{8} \cdot \frac{4h - d}{M}\right) \cdot \cot\left(\frac{\cdot}{8} \cdot \frac{d}{M}\right) \cdot$$

式中: d 为渗渠直径 (宽度) (m); M 为含水层厚度 (m)。

对渗渠取水来说, 河床渗透流速很小, 其流速水头可忽略不计, 故其总水头 H 可用测压管水头来等效代替, 即:

$$H = H_0 + \frac{p}{\rho g} \cdot \quad (32)$$

式中: H_0 为滤管上部液面高度, p 为压力, ρ 为液体容重。

而渗渠滤水管中液流水头 (不计行进流速) 为:

$$h_w = h_0 + \frac{p_i}{\rho g} \cdot \quad (33)$$

式中: h_w 为渗渠滤水管内液流水头; h_0 为滤管内部液面高度。

将(32)和(33)式代入(31)式, 得:

$$q_r = \frac{(H_0 - h_0) + \frac{p - p_i}{\rho g}}{A} \cdot \quad (34)$$

令 $H = H_0 - h_0$, 则有:

$$q_r = \frac{H + \frac{p - p_i}{\rho g}}{A} \cdot \quad (35)$$

从式(31)和(35)可见, 渗渠建成以后, 由于其含水层厚度 M 以及渗渠直径 (宽度) d 恒定, 那么 A 值是恒定的, 渗渠单宽流量 q_r 的大小与其上部有效水头 $H - h_w$ 成正比关系。又由(29)式可知, 随着渗渠运行时间的增加, 滤水管的取水过程会使其上部含水层 (反滤层) 中的压力不断减小, 使滤水管上部有效水头不断降低, 从而使 $q(\cdot)$ 处于不断减小的状态。对于有河流补给的渗渠来说, $q(\cdot)$ 的减小会使含水层及其上部明渠的水位 H_0 略有壅高, 同时渗渠滤水管中水位 h_0 会略有降低, 从而使含水层中的有效补给水头 H 增大, 这又缓解了因点汇而形成的压力衰减。这是一个动态循环过程, 当其达到平衡位置时, 就是渗渠取水的稳定时刻。

4 结 语

对于渗渠取水过程中的压力变化, 本文结合试验, 阐述了渗渠从开启到取水稳定, 其取水量逐渐减小的原因, 即由于埋设在含水层中的滤水管取水时相当于 1 个点汇, 导致滤层内部压力减小, 压力的减小导致渗渠取水量的降低, 取水量的降低又会使得有效补给水头 $H = H_0 - h_0$ 增大, 缓解了因点汇形成的压力降落, 这是一个动态过程。本试验结果表

明,历时 170~250 min 渗渠滤水管可以达到取水稳定,且稳定所需时间长短与渗渠滤水管取水形式和管径有关。同种管径下稳定所需时间,非完整式渗渠滤管(250 min)大于完整式渗渠滤管(195 min);同种取水形式下,大管径渗渠滤管(195 min)稳定所需时间大于小管径渗渠滤管(170 min)。当各自达到平衡位置时,渗渠取水便处于稳定状态。

[参考文献]

- [1] 吴正淮. 渗渠取水[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [2] 王允麒,谭浩,孙海英. 关于渗渠取水设计的几个问题[J]. 给水排水,1997,23(10):11-14.
- [3] 南忠,王佐. 浅谈供水工程渗渠的设计问题[J]. 大同高专学报,1998,12(4):108-110.
- [4] 冯曦,钟孚勋. 低速非达西渗流试井模型的一种新的求解方法[J]. 油气井测试,1997,6(3):16-21.
- [5] 刘立明,陈钦雷,王光辉. 油水两相渗流压降数值试井模型的建立[J]. 石油大学学报,2001,25(2):42-45.
- [6] 王德山,聂立新,李兆敏. 斜井多井系统中一口井压力降落曲线试井分析[J]. 石油天然气学报,2006,28(1):95-97.
- [7] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999:17-152.
- [8] 刘焕芳,吕宏兴. 高等流体力学[M]. 北京:中国教育文化出版社,2005:252-254.
- [9] 兰太权,赵安仁,刘秋朝. 单位涌水量与渗透系数关系[J]. 地下水,2004,26(1):6-10.
- [10] 科恩 GA,科恩 TM. 数学手册[M]. 周民强,译. 北京:工人出版社,1987:100-105.

(上接第 210 页)

(4) 本研究只是插入式渗灌的初步探索。今后还应在以下方面开展更加深入广泛的研究: 插管的合理长度、插入深度、直径、出水孔形式、消能措施等; 长历时灌水试验; 抗堵塞试验; 插入式渗灌技术对不同土壤的适用性; 插管的受力结构形式和插管材料; 插入式渗灌技术的系统设计、安装等。

[参考文献]

- [1] 姚立民,李明思,申孝军. 果树局部灌溉新技术[M]// 中国农业工程学会. 中国农业工程学会学术年会论文集第二分册. 广州:华南农业大学出版社,2005:307-309.
- [2] 方部玲,金永奎. 杆式滴头的研究与试验应用[J]. 灌溉排水学报,2004,2(1):59-61.
- [3] Masoud M, Richard C W, Stephen R W. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system[J]. J Irrig and Drain Engrg,1999,11:315-322.
- [4] Masoud M, Richard C W, Stephen R W. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigation with surface drip and sand tube irrigation[J]. American Society of Agricultural engineers,2000,43(1):79-86.
- [5] 曲桂敏,束怀瑞,王炳硕,等. 苹果树盘内埋罐节水渗灌的效
- 应[J]. 山东农业大学学报,2000,31(2):120-124.
- [6] 王桂华,曲桂敏. 苹果树盘内埋罐渗灌对果树生长的效应[J]. 山西果树,2003,9(5):38-39.
- [7] 曹守卫,朱孔亮,班彦福. 山丘区果园地下陶管渗灌技术应用[J]. 水利水电科技进展,1999,6(3):60-61.
- [8] 孙宏义,荔克让,赵爱国,等. 陶罐在沙地渗灌中的渗水特征研究[J]. 节水灌溉,2000,4(2):26-29.
- [9] 李援农,张捐社,尚碧玉. 低压微孔地埋管灌溉技术要素试验研究[J]. 西北农业大学学报,1999,27(5):39-43.
- [10] 杨宝中,李秀灵,曹猷界. 多孔渗灌管的防堵措施研究[J]. 灌溉排水,2000,5(2):69-71.
- [11] 仵峰,范永申,李辉,等. 地下滴灌水器堵塞研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):80-83.
- [12] 张昊,许迪,程先军,等. 几种地下滴灌(渗灌)灌水器性能的室内外试验研究[J]. 灌溉排水,1999,18(4):10-14.
- [13] 岳兵. 渗灌技术存在问题与建议[J]. 灌溉排水,1997,16(2):40-44.
- [14] 仵峰,李王成,范永申,等. 地下滴灌灌水器出口正压试验研究[J]. 灌溉排水学报,2003,4(2):48-51.
- [15] 胡笑涛,康绍忠,王晓燕,等. 地下滴灌灌水器的筛选试验研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):483-485.
- [16] 仵峰,李王成,李金山,等. 地下滴灌灌水器水力性能试验研究[J]. 农业工程学报,2003,3(2):85-88.