

## 蒸发条件下蓄水坑灌法单坑土壤水分运动数值模拟及分析

汪增涛 (山西省水文水资源勘测局, 山西太原 030001)

**摘要** 通过室内试验与计算机数值模拟相结合的方法建立蒸发条件下土壤水分运动数学模型, 采用交替方向隐式差分法进行求解, 利用试验资料总结土壤蒸发率与表土(0~5 cm)含水率经验关系为对数曲线关系, 并利用拟合关系式作为数学模型的边界条件。经验证, 计算机数值模拟结果与实测结果吻合较好, 表明利用该方法模拟蒸发条件下蓄水单坑土壤水分运动的问题是可行的。

**关键词** 蓄水坑灌法; 数值模拟; 土壤蒸发; 土壤水分运动

**中图分类号** S152.7 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)33-16474-02

### Analysis and Numerical Simulation of Soil Moisture Evaporation under the Conditions of Water Storage Simple Pit Irrigation

WANG Zeng-tao (Hydrology and Water Resource Reconnaissance Bureau of Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030001)

**Abstract** Through combining the lab research with numerical simulation of soil moisture evaporation, the mathematic model of soil moisture movement under the evaporation conditions was established. The alternate implicit scheme method was used to solve the numerical simulation. Based on the test data, the logarithm curve between soil moisture evaporation ratio and external soil moisture(0-5 cm) was set up as the boundary condition of the mathematic model. In general, the computational results from the methods fit the experiment results well.

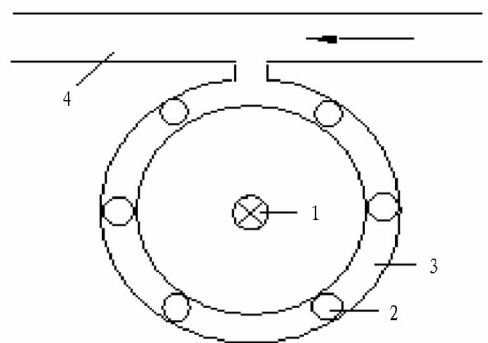
**Key words** Storage pit irrigation; Numerical simulation; Soil evaporation; Soil moisture movement

蓄水坑灌法是针对我国北方地区干旱、水土流失严重双重问题而提出的一种新的果园灌溉方法<sup>[1]</sup>。该方法结合环灌、穴灌与渗池灌等灌溉方法的优点, 对果树的中深根层灌水, 具有局部灌溉的效果, 不但供水快而且可以使果树根群受水均匀, 引导果树根群向下生长从而提高其抗旱能力, 既减少投资又可以节水<sup>[2]</sup>。笔者拟通过数值模拟的方法研究蒸发条件下蓄水单坑土壤水分运动规律, 并结合试验对模型加以验证, 为合理确定蓄水坑灌法的灌水技术要素提供理论依据。

#### 1 蓄水坑灌法技术要素确定<sup>[3]</sup>

蓄水坑灌法是在树冠下绕树干挖若干个小蓄水坑(深度一般为60~80 cm), 灌溉时将水注入坑内, 通过坑壁渗入根区土壤。蓄水坑灌法的田间工程(图1)包括蓄水坑、蓄水坑固壁设施、环状沟、坑口覆盖及田间输水沟等。①蓄水坑。蓄水坑布置在1/2树冠半径处, 其单坑直径应根据灌水定额所需的坑容积来确定, 一般为25~35 cm, 深度视果林根系分布深度而定, 一般为60~80 cm。单株树的蓄水坑数量应根据土壤的水平方向入渗特性及灌水定额而定, 既能保证两坑之间的中层土体完全湿润, 又能保证灌水定额所需的坑容积。②蓄水坑固壁设施。蓄水坑为固定工程, 但在灌溉注水或降雨径流汇入时容易造成冲塌破坏, 因而需要设置固壁设施予以保护。固壁设施的形式为圆筒形, 要求有良好的渗透性。固壁设施的材料可以采用竹条或梢条编制成的圆筒, 也可以采用廉价的再生塑料或细骨料混凝土制成的滤水筒。固壁设施的规格应与蓄水坑的规格配套。③环状沟。环状沟位于树冠下, 它将绕树的各蓄水坑连接起来。灌水时水由田间输水沟流入环状沟, 再由环状沟为各蓄水坑注水。环状沟为一浅沟, 深度20 cm, 宽度25~30 cm。环状沟既可输水, 也可在降雨时蓄滞径流。④坑口覆盖。为了防止蓄水坑内的土壤水分蒸发及冬季地温过低对坑附近根系的影响, 坑口

应采用较长秸秆覆盖。⑤田间输水沟。田间输水沟是连接灌溉骨干系统与树下环状沟的田间固定渠道。田间输水沟一般沿等高线布置, 位于树行的坡上侧, 既有利于为环状沟自流注水, 又有利于拦截降雨径流。输水沟的断面尺寸由灌溉输水流量确定。



注: 1. 果树; 2. 蓄水坑; 3. 环状沟; 4. 田间输水沟。

Note: 1, Fruit trees; 2, Water storage pit; 3, Annular groove; 4, Field irrigation groove.

图1 蓄水坑灌法田间工程示意

Fig.1 The field project of storage pit irrigation method

#### 2 蓄水单坑土壤水分运动数学模型

蒸发条件下蓄水单坑内水分入渗是蓄水坑灌法土壤水分运动研究的重要内容。入渗过程中由于蒸发的影响, 土壤水分向下运动的速度减慢, 并影响水分的再分布情况。因此, 研究蒸发条件下蓄水单坑的土壤水分运动对研究蓄水坑灌法有至关重要的意义。由于灌水, 蓄水坑内存在一定的水深直至停止灌水后坑中水位自行消退。在该过程中坑内水分在土壤中形成渗流, 在蓄水坑壁附近区域内产生饱和土壤水分运动, 在远离蓄水坑的土壤中产生非饱和土壤水分运动。为了研究这一饱和-非饱和土壤水分运动规律, 建立了蒸发条件下具有复杂边界条件的土壤水分运动数学模型。

**2.1 控制方程** 如图2所示,  $BB'$ 为地面,  $AFEGE'F'A'OA$ 为蓄水坑,  $FF'$ 为坑中水面,  $CC'$ 为土壤计算模型的下边界。根据蓄水坑灌条件下土壤水分入渗轴对称特点, 可将其简化为二维平面问题, 并作如下假定: ①土壤均质且各向同性; ②入

**基金项目** 国家自然科学基金项目(50379031); 山西省科技攻关项目(051115)。

**作者简介** 汪增涛(1975-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 助理工程师, 从事土壤水分运动与土壤水分蒸发理论研究。

**收稿日期** 2009-07-13

渗水流为连续介质且不可压缩,在土壤水分运动过程中,土壤骨架不变形;③不计坑内水头对入渗的影响。在柱坐标下其控制方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rD(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}$$

式中,  $\theta$  为体积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率 ( $\text{cm}/\text{min}$ );  $D(\theta)$  为非饱和土壤扩散度 ( $\text{cm}^2/\text{min}$ );  $r$  为柱坐标系中的径向坐标 ( $\text{cm}$ );  $z$  为柱坐标系中的垂向坐标 ( $\text{cm}$ );  $t$  为入渗时间 ( $\text{min}$ )。

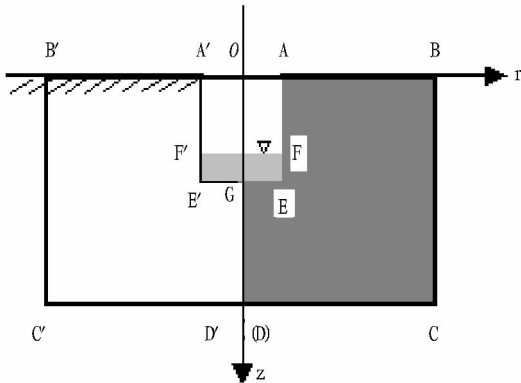


图2 蓄水坑剖面

Fig.2 The section of water storage pit

## 2.2 定解条件

2.2.1 初始条件。  $\theta(r, z) = \theta_0$ , 其中,  $r \geq 0, z \geq 0$ 。

2.2.2 边界条件。

(1) 由于计算域选取较大,且蓄水坑容积有限,所以入渗过程中 ( $t > 0$ ) 下边界 DC 和右侧边界 BC 处含水率确定为初始含水率,按第1类边界条件处理。即沿 BC 和 DC:

$$\theta = \theta_0, t > 0, r > 0$$

式中,  $\theta_0$  为初始体积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

(2) 由于水分运动的对称性,沿 GD 法线方向水流量为0。另外由于坑口覆盖沿坑壁 AF 也可认为水流量为0。AB 为地面,其通量为蒸发速率。因此 GD、AF 和 AB 属于第2类边界条件。对 AF 和 DG 边界:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \text{ 即 } \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, t > 0$$

对 AB 边界:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = E_s, t > 0$$

(3) 对于蓄水坑壁 EF 和坑底 EG 可认为其含水率始终保持一接近饱和含水率的值  $\theta_0$ ,沿 EF 和 EG:

$$\theta = \theta_0, t > 0$$

数学模型中的水分运动参数  $K(\theta)$  和  $D(\theta)$  由试验测定,图2中 FF' 为蓄水坑水位线,当坑内水位下降为0时 FF' 与 EE' 重合,则 EF 和 EG 边界的边界条件与 AF 边界相同。控制方程与初始条件及边界条件组成蓄水坑入渗数学模型的定解问题。

2.3 蒸发量的确定 为了确定蓄水坑灌条件下土壤蒸发规律,主要通过对表层土壤含水率变化与土面蒸发率的关系进行研究,得出表土含水率与表土蒸发和同期水面蒸发率的比值成对数关系<sup>[4]</sup>。表1为实测数据,其中,  $\theta$  为表层5 cm 厚

土壤含水量,  $E_s$  为土壤实际蒸发量,  $E_0$  为同期水面蒸发量。

表1 实测土壤含水量和实测表土蒸发率、水面蒸发率

Table 1 The water content, surface soil evaporation ratio and water evaporation ratio measured in the experiment

$\theta // \text{cm}^3/\text{cm}^3$	$E_s // \text{mm}/\text{d}$	$E_0 // \text{mm}/\text{d}$	$E_s/E_0$
0.076	1.03	2.64	0.390
0.083	0.86	3.04	0.283
0.095	0.97	2.70	0.359
0.101	1.15	2.60	0.442
0.102	1.19	2.54	0.469
0.103	1.07	3.04	0.352
0.105	1.23	2.90	0.424
0.139	0.93	2.44	0.381
0.165	2.14	2.68	0.799
0.180	1.71	2.69	0.636
0.252	2.44	2.68	0.910

由图3可知,当表土含水率增大时,  $E_s/E_0$  上升呈对数曲线关系。随着蒸发的进行,当含水率小于某一数值不再变化时,表土含水率一般为凋萎系数(试验中为0.05),其具体关系式:

$$\begin{cases} E_s = E_0 & \theta \geq 0.34 \\ E_s = [0.4856 \ln(\theta) + 1.5275] E_0 & 0.05 < \theta < 0.34 \\ E_s = 0 & \theta \leq 0.05 \end{cases}$$

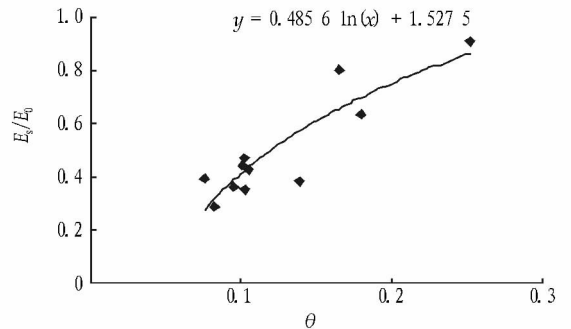


图3 蓄水坑灌条件下试验的  $E_s/E_0 \sim \theta$  关系曲线

Fig.3 The relationship curve between  $E_s/E_0$  and  $\theta$  under the storage pit irrigation conditions

## 3 蒸发条件下蓄水坑灌法土壤水分运动模型的求解及验证

求解土壤水分运动方程采用交替隐式有限差分数值解法。由于显、隐差分格式在坐标轴上的交替使用,使误差的增长量相互抵消并无条件收敛。因此,ADI法有较好的计算稳定性和计算精度。其时间步长在求解过程中自动调整,首先确定初始时间步长  $\Delta t = 0.2 \text{ min}$ ; 由  $n$  时刻的计算结果决定下一时段的时间步长  $\Delta t_{n+1}$ :

$$\Delta t_{n+1} = \begin{cases} \alpha \Delta t_n & \delta > 0.3 \\ \Delta t_n & 0.08 < \delta < 0.3 \\ \beta \Delta t_n & \delta < 0.08 \end{cases}$$

式中,  $\delta = (\theta_n - \theta_{n-1})/\theta_{n-1}$ , 为  $n$  时刻的  $\theta$  值对上一时刻  $\theta$  值的相对变化率;  $\alpha$  为缩小因子,取0.75;  $\beta$  为增大因子,取1.5,当  $\Delta t$  增加到2 min 时,不再增加。用追赶法求解系数矩阵。根据离散方程,用 Visual Basic 6.0 语言编制计算程序,对试验条件下的水分运动进行数值模拟。分别选取了20、60、200 min 时的实测结果和计算结果进行比较。由表2可知,不同时刻的模拟值与实测值吻合较好,表明所用的数学

省耕地面积将稳定在 149.824 万  $\text{hm}^2$  水平线上或在该水平线上下波动。这表明至 2020 年浙江省耕地面积将能同时满足城市化、工业化与粮食安全的用地需求。同时这也说明,第一,随着产业结构的高级化,城市化、工业化对耕地的蚕食并非不断增加,而是将在某一阶段趋于停止;第二,随着科技进步和土地投入的增加,为保证粮食安全所需的耕地面积将不断减少。因此,笔者认为,城市化-工业化的用地需求与粮食安全的用地需求未必冲突,而是可以兼顾的。

该研究是在当前生产力水平的基础上得出的结论。今后随着经济的不断发展、生产力水平的不断提高以及人口的不断增加,预测结果将有所改变。因此,笔者将对此问题进行持续关注和研究。

#### 参考文献

[1] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002,57(2):127-134.  
 [2] 蔡运龙,傅泽强.提高土地生产率是根本[J].中国土地,2002(10):11-13.  
 [3] 蔡运龙.中国农村转型与耕地保护机制[J].地理科学,2001,21(1):1-6.  
 [4] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4):313-319.  
 [5] 蔡运龙.中国经济高速发展中的耕地问题[J].资源科学,2000,22(3):24-28.  
 [6] 汪涌,蔡运龙,蒙古军.中国耕地流转驱动力研究综述[J].资源科学,2007,29(3):177-182.  
 [7] 陈习军,陈建杰.浙江省土地利用与土地覆被遥感综合调查研究[J].浙江地质,2002,18(1):68-75.  
 [8] 李玉平,蔡运龙.浙江省耕地变化与粮食安全的分析及预测[J].长江流域资源与环境,2007,16(4):466-470.  
 [9] 沈叶琴,李凤全,叶玮,等.土地利用变化对浙江生态系统服务价值的影响[J].资源开发与市场,2005,21(5):412-415.  
 [10] 浙江省统计局.浙江统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2007.  
 [11] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2007.

[12] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:47-60.  
 [13] 赵鹏大.定量地理学方法及应用[M].北京:高等教育出版社,2004:30-67.  
 [14] 陈炳涛.土壤地理与生物地理[M].上海:华东师范大学出版社,1991:178-182.  
 [15] 陆卫,王友保.应用逻辑斯蒂映射研究生态平衡[J].安庆师范学院学报:自然科学版,2003,9(1):53-55.  
 [16] 夏淑芳,许红卫,王珂,等.浙江省耕地数量演变及其驱动力研究[J].科技通报,2006,22(3):345-351.  
 [17] 蔡运龙,霍雅勤.中国耕地价值重建方法与案例研究[J].地理学报,2006,61(10):1084-1092.  
 [18] 毛小军,陈腊娇,孙华,等.浙江省耕地资源时空变化的驱动力分析及对策研究[J].浙江师范大学学报:自然科学版,2006,29(2):201-207.  
 [19] 郑宇,刘彦随,王玉华.沿海发达地区土地利用研究新进展与方向[J].长江流域资源与环境,2003,12(6):509-514.  
 [20] 李植斌,吴绍华.浙江省耕地资源的安全保障与评价[J].国土资源科技管理,2005,22(1):8-11.  
 [21] 杨良山,王国法,林代欣.浙江省耕地资源开发利用现状及对策[J].中国农业资源与区划,2003,24(4):29-32.  
 [22] 汪朝辉,王克林,熊艳,等.湖南省耕地动态变化及驱动力研究[J].长江流域资源与环境,2004,13(4):53-59.  
 [23] 李平,李秀彬,刘学军.我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J].地理研究,2001,20(2):129-138.  
 [24] 邵晓梅,杨勤业,张洪业.山东省耕地变化趋势与驱动力研究[J].地理研究,2001,20(3):298-306.  
 [25] 谭永忠,吴次芳,牟永铭.20世纪90年代浙江省耕地非农化过程分析[J].地理科学,2004,24(1):14-19.  
 [26] LI X, GUO N, SONG F R. Relationship between the cultivated land change and the population and economic development in Shandong Province since 1990[J]. Asian Agricultural Research, 2009, 1(1): 14-17, 33.  
 [27] SHI C F. Interest relationships game of farmland protection between center government and local government[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2008(4): 21-22.  
 [28] CHEN X Y, CHEN X Z, ZHANG L. Prediction model of total farmland under the condition of unbalanced economic growth[J]. Asian Agricultural Research, 2009, 1(1): 34-38.

(上接第 16475 页)

表 2 不同时刻各测点的含水率值

Table 2 The soil moisture content at different test points at different time

测点 Test points	20 min			60 min			200 min		
	实测值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Measured value	模拟值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Simulated value	相对误差//% Relative error	实测值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Measured value	模拟值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Simulated value	相对误差//% Relative error	实测值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Measured value	模拟值 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ Simulated value	相对误差//% Relative error
1	0.021 3	0.022 5	5.63	0.151 1	0.153 8	1.79	0.331 5	0.324 1	2.23
2	0.016 9	0.018 3	8.28	0.019 9	0.021 3	7.04	0.089 5	0.091 3	2.01
3	0.024 7	0.026 4	6.88	0.188 5	0.193 9	2.86	0.338 6	0.319 2	5.73
4	0.017 1	0.017 5	2.34	0.016 4	0.017 2	4.88	0.017 3	0.018 0	4.05
5	0.020 8	0.019 3	7.21	0.111 2	0.113 8	2.34	0.317 5	0.329 7	3.84
6	0.017 2	0.017 9	4.07	0.017 4	0.017 1	1.72	0.072 1	0.070 6	2.08

模型和数值计算方法是可靠的。

#### 4 结语

依据土壤水动力学理论建立蒸发条件下蓄水单坑土壤水分运动数学模型并编制计算程序,在各项参数给定的情况下,能够较真实地反映蒸发条件下蓄水单坑土壤水分运动情况。但是笔者仅就蓄水坑条件下土壤水分运动进行了模拟,没有考虑热流的影响,实际上热流对土壤水分运动也产生较大影响<sup>[5]</sup>,为更加真实模拟土壤水分运动,应考虑建立水、热耦合数学模型。

#### 参考文献

[1] 孙西欢.蓄水坑灌法及其水土保持作用[J].水土保持学报,2002,16(1):130-131.  
 [2] 王晓红,乔云峰,孙西欢.果树蓄水坑灌法单坑水分入渗数值模拟及分析[J].节水灌溉,2003(2):1-4,46.  
 [3] 孙西欢,马娟娟,周青云.蓄水坑灌法技术要素初探[J].沈阳农业大学学报,2004(Z1):405-407.  
 [4] 谢森传.农田水分循环中的蒸发蒸腾计算[J].清华大学学报:自然科学版,1998(1):107-110.  
 [5] CASSEL D K, NIELSEN D R, BIGGAR J M. Soil-water movement in response to imposed temperature gradients[J]. Soil Sci Soc Amer Proc, 1969, 33: 493-500.