

## 农林业地下滴灌土壤水分运动数值模拟研究进展

席本野, 贾黎明\*, 祝 燕

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:**对地下滴灌土壤水分运动数学模型的建立、数学模型的求解、土壤水力特性参数的测定和土壤水分运动数值模拟软件的开发等进行了详细论述。此外,结合林地土壤条件、植被类型的特点和以往土壤水分运动研究中存在的问题,指出了今后林业地下滴灌土壤水分运动数值模拟研究的发展方向。建议在掌握土壤水分运动规律的基础上,结合树木的生长节律、生理生态特性和耗水规律,建立科学合理的灌溉制度,从而实现林地生产力的大幅度提高和林业水资源的可持续利用。

**关键词:**地下滴灌; 土壤水分运动; 数值模拟; 林地

**中图分类号:**S714

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-7461(2009)04-0050-07

### Development of Numerical Simulation on Soil-water Movement under Agriculture and Forestry Subsurface Drip Irrigation

XI Ben-ye, JIA Li-ming\*, ZHU Yan

(The Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, establishment of mathematical models for simulating soil-water movement in subsurface drip irrigation, solving methods to the mathematical models, determination methods to soil hydraulic property parameters and software development for simulating soil-water movement were reviewed. In addition, according to the soil condition in forestland, the characteristics of vegetation type and the existing problems in soil-water movement researches, the development directions of numerical simulation on soil-water movement under forestry subsurface drip irrigation were pointed out. It was suggested that the scientific and rational irrigation regime should be established on the basis of soil-moisture movement laws, the character of tree growth, the eco-physiological characteristics and water use laws of trees, consequently plantation productivity increases and sustainable utilization of forestry water resources was realized.

**Key words:** subsurface drip irrigation; soil-water movement; numerical simulation; forestland

水资源不足和水分利用效率低已成为我国北方干旱半干旱地区农林业可持续发展的首要制约因素,发展高效的农林业节水灌溉势在必行。地下滴灌作为“最经济的灌水法”<sup>[1]</sup>,目前已应用于农业生产<sup>[2]</sup>、经济林栽培<sup>[3]</sup>以及人工林培育<sup>[4-5]</sup>。地下滴灌与其它灌溉方式相比具有节水节肥、优质高产、减少杂草生长、能够产生良好的环境效应等方面的优势,对中国这样一个人工林面积世界第一但生产力较低的林业大国,如果能将地下滴灌技术广泛科学合理

地应用于人工林培育,势必会对提高我国速生丰产林的生产力、缓解木材进口压力产生重大意义。

然而,地下滴灌优势的充分发挥需建立在滴灌系统技术参数(如:灌水频率、滴头流量、滴头间距、根区湿润比例等)最优化的基础之上,而这些参数的确定都与土壤水分运动规律有联系。因此,掌握地下滴灌土壤水分的运动规律成为加速滴灌在农林业上推广应用的必要条件。目前,地下滴灌土壤水分运动的研究主要集中在农业和水利部门。在林业

收稿日期:2008-12-27 修回日期:2009-03-08

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD32B02-02)

作者简介:席本野,男,在读硕士,主要研究方向为林地地下滴灌土壤水分运动。Email: xibenye521@yahoo.com.cn

\* 通讯作者:贾黎明,男,博士,副教授,主要研究方向为森林培育、城市林业。Email: jlm@bjfu.edu.cn

上,自上世纪70年代末以来陆续有人对自然降雨下森林土壤的水分运动做过定量研究<sup>[6]</sup>,但针对地下滴灌这种新型节水灌溉方式下土壤水分运动的研究却鲜有报道,仅有王治军等<sup>[7]</sup>曾对滴灌下侧柏林地根区土壤水分运动规律做过一些分析。

目前,国内外学者<sup>[8-9]</sup>对地下滴灌土壤水分运动规律的研究大多采用室内外试验研究的方法,并形成了一些有价值的理论。然而地下滴灌土壤水分运动的影响因素较多,仅靠试验研究和建立经验公式难以从机理上说明地下滴灌条件下土壤水分的运动规律,另外试验研究耗费人力物力且常受到试验条件的限制。因此,数值模拟以其无需建立复杂的专用设备即可在计算机上编程实现水分运动模拟的特点,成为研究地下滴灌土壤水分运动规律的一种很好选择。地下滴灌土壤水分运动数值模拟主要涉及数学模型的建立、模型的求解、土壤水力参数的确定以及数值模拟软件的开发等,因此本文也主要从这几个方面进行论述:

## 1 地下滴灌土壤水分运动数学模型的建立

如果假设土壤为均质、各向同性的刚性多孔介质,不考虑气相及温度对水分运动的影响,则地下滴灌条件下的土壤水分运动同样遵循达西定律和质量守恒定律,其基本方程是 Richards 方程,形式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K(\theta) \partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K(\theta) \partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{K(\theta) \partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

柱坐标下基本方程的形式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{K(\theta) \partial h}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \frac{K(\theta) \partial h}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{K(\theta) \partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

式中: $h$ 为土壤负压水头; $\theta$ 为土壤含水率; $x, y, z$ 为笛卡尔坐标系中的三个坐标变量, $z$ 取向上为正; $r$ 为柱坐标系中的径向坐标; $t$ 为时间; $K(\theta)$ 为土壤非饱和导水率。

地下滴灌条件下的土壤水分运动属于典型的三维饱和-非饱和流动,但根据滴头、毛管间距的不同和实际需要可将其转化为笛卡尔坐标系下的平面二维或柱坐标系下的轴对称二维饱和-非饱和流动问题。然后选择适合的基本方程,针对具体的初始、边界条件和土壤水力特性参数建立土壤水分运动的数学模型。

### 1.1 不考虑根系吸水项的数学模型

目前,很多国内外学者在研究地下滴灌土壤水

分运动规律时都是在室内进行模拟研究和验证,因此大多未考虑植物根系吸水对土壤水分运动的影响。李恩羊<sup>[10]</sup>以 Richards 方程为控制方程,分别在直角坐标系和极坐标系下建立了地下渗灌条件下二维非饱和土壤水分运动的数学模型,对渗水管周围含水量接近或达到最大饱和度的高含水带的边界条件采用了可动边界条件,并通过室内试验验证了模型的可行性;张思聪等<sup>[11]</sup>对地下渗灌条件下水平的非饱和土壤水运动做了模拟,在柱坐标系中建立了轴对称的水平无限平面二维水流的数学模型,但对渗水管周围高含水带边界的处理比较简单,仅以渗水管的半径  $r_0$  作为其固定边界;罗毅等<sup>[12]</sup>模拟了地下单滴头灌溉情况下的土壤水分运动,其控制方程采用柱坐标下的轴对称二维水分运动方程,在给定的初始边界条件中定义了一个  $R_s(t)$  (饱和区半径)是饱和区和非饱和区的界限,为可动边界,是时间  $t$  的函数,但其模型未通过试验验证;李光永等<sup>[13]</sup>建立了柱坐标下地理点源滴灌的轴对称二维土壤水分运动模型,根据达西定律和质量守恒定律推导出滴头周围初始饱和区半径,该模型通过了田间试验的验证;程先军等<sup>[14]</sup>以非饱和土壤水运动理论为基础建立了地下滴灌条件下描述地理点源土壤水分运动的柱状流模型,认为当滴头出流量较大而土壤粘重时滴头周围可能存在一个压力大于零的区域,而李光永处理滴头附近饱和区边界时所采用的方法不能反应出这种情况,在此基础上程先军提出了新的滴头边界简化条件(滴头周围存在一个半径等于毛管半径的饱和球状体,球体的外边界作为滴头边界,该边界上的流量等于滴头流量),并经敏感性分析后认为这种简化具有可行性;马孝义等<sup>[15]</sup>建立了重力式地下滴灌条件下土壤水分运动二维平面流数学模型,将滴头出流简化为点源出流后提出了滴头边界的定解条件,并通过室内试验验证了其模型的可行性;Ben-Asher 和 Phene<sup>[16]</sup>提出了一种分析地下滴灌系统二维水流运动的数值模型,并利用该模型探讨了滴头最优埋深和毛管最佳间距等问题。

### 1.2 考虑根系吸水项的数学模型

根系是植物吸收水分的主要器官,在有植物根系生长的土层中,根系吸水对土壤水分动态产生重大影响,因此为使模拟更接近田间实际,考虑植物根系吸水是必要的。考虑根系吸水的土壤水分运动模型就是在 Richards 方程后面加入一个根系吸水项。一般来说它可采用微观模型和宏观模型描述,但由于微观模型是研究单根吸水状况且假设条件是理想

化的,因此将其应用于植物宏观根系吸水是不合理的。而宏观吸水模型是把整个根系当作一个扩散吸水器去研究根系吸水,比较符合田间实际。目前,大田作物根系吸水研究较多,出现了很多适用广泛的经典模型,如 Feddes 模型<sup>[17]</sup>、Molz 模型<sup>[18]</sup>和罗毅模型<sup>[19]</sup>等。而在林业上,根系吸水的研究开展较晚,且大多是针对经济林树种,如葡萄<sup>[20]</sup>、苹果<sup>[21]</sup>、巴旦杏<sup>[22]</sup>等。由于林木植株高大,根系分布较广,冠层和根系的非均匀性比较明显;林木棵间土壤蒸发与大田作物有很大的不同;林地土壤的异质性远高于农田土壤;林分培育模式和灌溉方式的不同会出现水分和养分的不均匀分布以及土壤板结,因此林木根系吸水的研究方法应不同于大田作物,在构建根系吸水模型时应注意二者的区别,这也是将已有的适用于农作物的成熟根系吸水模型应用于林木根系吸水时的一个难点。

相对于不考虑根系吸水的数值模拟,考虑根系吸水的数值模拟研究较少:仵峰、彭贵方<sup>[23]</sup>建立了线水源地下滴灌条件下考虑根系吸水项的饱和一非饱和土壤水二维流动的数学模型,并经室内试验验证了模型的正确性,结果却并不理想且文中对根系吸水项的处理未提及;Warrick<sup>[24]</sup>建立了不同地下灌溉方式稳态条件下包含作物根系吸水项的三维线性土壤水流数学模型;Oron<sup>[25]</sup>将作物吸水作为源汇项引入非饱和区水流方程,并假定作物吸水强度是压力水头和深度的函数,建立了二维地下线源滴灌土壤水分运动方程,其模型通过了田间试验的验证;Coelho 和 Or<sup>[26]</sup>针对四种不同的滴头配置建立了包含玉米根系吸水项的二维土壤水流方程,并根据田间和盆栽试验数据,认为用双变量高斯分布密度函数作为滴灌条件下玉米根系吸水的二维参数模型比较合理;周青云<sup>[20]</sup>建立了包含二维静态、动态根系吸水项的葡萄园根系分区交替滴灌条件下的土壤水分动态模型,经葡萄全生育期的土壤水分动态数据检验模型具有较高的精度。

### 1.3 半经验模型

由于在很多田间条件下,不需详细了解土壤湿润体内含水率或基质势分布的信息而仅需了解土壤湿润体的宽度和深度等信息即可达到试验目的,因此可以通过建立简单的、不需要复杂数学计算的半经验模型来模拟地下滴灌土壤湿润模式。Schwartzman 和 Zur<sup>[27]</sup>提出了一种可以确定地表线水源灌溉下土壤湿润区几何形状的半经验方法。他们假定土壤湿润体的几何形状取决于土壤类型、单位长度毛管的滴头流量和总灌水量,然后建立了地表滴灌

系统下预测湿润峰位置的模型,模型仅是一个与灌水量和土壤饱和导水率相关的方程。Singh<sup>[28]</sup>在 Schwartzman 模型的基础上运用半经验和量纲分析的方法建立了预测地下线水源滴灌下土壤湿润模式的数学模型(3)(4),经与田间试验数据对比发现模型预测效果非常好。

$$W = A_1 V n_1 \left( \frac{K}{qZ} \right)^{(n_1 - 1/2)} \quad (3)$$

$$D = A_2 V n_2 \left( \frac{K}{qZ} \right)^{(n_2 - 1/2)} \quad (4)$$

式中:W 为湿润体宽度;D 为湿润体深度; $A_1$ 、 $A_2$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  为经验常量;K 为饱和导水率;Z 为毛管埋深;V 为单位毛管长度总灌水量;q 为单位毛管长度流量。

## 2 地下滴灌土壤水分运动模型求解方法

定量求解土壤水分运动模型的数学物理方法有解析法和数值法。解析法就是用数学上的积分法或积分变换在特定的初始和边界条件下直接求解土壤水分运动偏微分方程。由它导出的计算公式的物理概念明确,利于分析各因素对水分运动的影响。此外,解析法步骤简单,计算量小,但只适用于简单定解条件下的水分运动问题。由于土壤水分运动控制方程的非线性,土壤的异质性和初始边界条件的复杂性,用解析法求解土壤水分运动比较困难,不合适的简化和套用现有的解析解只会使得所得结果与实际不符,因此只能用数值模拟的方法取代。目前,土壤水分运动模拟常用的数值方法有:有限差分法(Finite Difference Method)、有限元法(Finite Element Method)和直线法(Method of Lines)。

有限差分法是目前求解土壤水分运动方程时运用最为广泛的方法,它是以差商代替微商,将土壤水分运动的偏微分方程组变为差分方程,组成可以直接求解的代数方程组。Brandt 等(1971)给出了第一个也是引用频率最高的三维滴灌水分入渗有限差分模型;Elmaloglou<sup>[29]</sup>用交替隐式差分法(ADI 法)求解了包含根系吸水项的二维平面流水分运动模型;李恩羊<sup>[10]</sup>、仵峰<sup>[23]</sup>运用 ADI 法结合预报—校正法(P—C 法)求解了地下滴灌定解条件下的土壤水分运动方程;张振华<sup>[30]</sup>将 ADI 法和牛顿迭代法相结合用于求解土壤水分运动方程。

有限元法是用简单的差值函数来代替每个单元的未知函数分布,然后集合起来形成可以直接求解的代数方程组。由于建立代数方程组的出发点不同,有限单元法又有各种变化:里兹法、伽辽金有限元法(Galerkin)和均衡有限元法。程先军<sup>[14]</sup>选用以

土壤负压水头为变量的柱坐标下土壤水分运动方程,利用 Galerkin 法有限单元法对数学模型进行了数值求解;雷志栋、杨诗秀<sup>[31]</sup>用里兹法有限元对非饱和土壤水一维流动问题进行了数值计算。由于有限差分法和有限元法在很多情况下易出现数值弥散或振荡现象等,因此许多学者对这两种方法进行了改进,提出了两种较为理想的数值计算方法:有限体积分法和有限元质量集中法。

直线法(Method of Line)是一种基于有限差分法而计算量又大大小于有限差分法的半解析半数值方法。它在求解偏微分方程时将方程在空间上半离散而时间分量仍然保持连续形式,从而使难处理的偏微分方程转化为便于解析求解的常微分方程。此外,如果将这种方法和标度方法(scaling technique)相结合就有可能将成层土壤水流计算问题转化为均质土壤水流问题<sup>[32]</sup>。Matthews 等<sup>[33]</sup>,田富强等<sup>[34]</sup>已将这种方法应用在求解土壤水分运动基本方程上,但它目前仍处于发展阶段。

### 3 土壤水分运动参数的确定方法

用数学物理方法对土壤水分运动做定量分析时,确定土壤水力特性参数是一个必要的前提,其测定的准确性直接影响到土壤水分运动模拟的可靠性。土壤水力参数包括:水分特征曲线  $\theta(h)$ 、非饱和导水率  $k(h)$ 、水分扩散率  $D(\theta)$  和容水度  $C(h)$ 。目前确定这些参数的方法大致可分为两大类:直接法和间接法。

#### 3.1 直接法

直接法是采用室内外试验方法进行测定,直接获得土壤水分状态变量(如土壤负压水头、含水率等)的分布资料,再用经验模型,如 BC 模型(Brooks 和 Corey, 1964)、GR 模型(Gardner, 1958)和 VG 模型(Van Genuchten, 1978)等拟合估算土壤水力参数。

容水度一般通过水分特征曲线的测定结果根据公式  $C(\theta) = d\theta/dh$  计算得出。土壤水分特征曲线是土壤含水率与基质势的关系曲线,直接测定的常用方法有:张力计法、砂芯漏斗法、压力膜仪法、离心机法和平衡水气压法。张力计法和砂芯漏斗法适用于测定低吸力范围(0~0.8bar)的脱湿和吸湿曲线,其中砂芯漏斗法仅可用于测定室内扰动土样和原状土样的水分特征曲线,而张力计法既可用于室内也可在田间测原状土样的水分特征曲线;压力膜仪法可测定的吸力范围较广(0.1~15bar),测定土样可以是原状土也可以是扰动土,目前应用比较广泛;离

心机法操作简单,可测定的吸力范围为 0.2~20bar,其不足之处是在测定的过程中由于离心力的作用会改变土壤容重,从而在一定程度上影响了土壤的持水特性;平衡水汽压法虽对所需设备的要求较高,但其测定的土水势范围较宽(0.1~70 bar),能够测定其它方法不能涉及的高吸力段水分特征曲线,因此该法常作为其它方法的补充,但不作为一个独立的方法去应用。非饱和导水率测定的直接方法有,室内:瞬时剖面法、垂直下渗通量法、垂直土柱稳定蒸发法;田间:壳方法<sup>[35]</sup>、Wind 蒸发法<sup>[36]</sup>、单步出流试验法<sup>[37]</sup>、滴渗法<sup>[38]</sup>、稳定土壤含水率剖面法等。其中,瞬时剖面法应用较为普遍,因为它不需要造成稳定流,对扰动土和原状土均适用,可测定吸湿和脱湿过程,且试验、计算都不复杂;垂直下渗通量法试验操作及测定工作容易,计算简便,但只能对吸湿过程进行测定;垂直土柱稳定蒸发法概念清楚,试验及计算简单,但达到稳定蒸发所需时间较长。水分扩散率直接测定常用的方法是半无限长水平土柱吸渗法和出流法。前者试验装置简单,是利用一个半无限长水平土柱的吸渗试验结合解析法求解。后者是通过求解瞬变、渐变压出流定解问题,得出出流公式进而导出扩散率。

直接法测定土壤水力参数在概念上相对清晰,易于理解。但实际测定繁琐、耗时、昂贵,且实验结果常存在明显的不确定性,此外土壤在水平和垂向的空间变异性也限制了直接测定方法在实际工作中的应用<sup>[39]</sup>。

#### 3.2 间接法

间接法是假定参数进行试算而确定参数或利用粒径分布、容重等易测的土壤基本性质来间接推测土壤水力参数的一类方法。根据基本原理和构建方法的不同,大致可分四类:土壤传递函数法(PTFs 法)、分形几何法、土壤形态学法和数值反演方法。

土壤传递函数法是将已有的基本数据(如粒径分布、化学和矿物学性质等易测的数据)转换为需要数据的预测函数。目前,将输入和输出数据关联起来构建土壤转换函数的方法主要有:回归分析法、人工神经网络法、数据处理的分组法、分类与回归树法。国内外众多学者<sup>[40-41]</sup>研究发现通过这些方法建立的土壤传递函数在预测土壤水力参数时效果非常好,但 PTFs 法表示的只是变量之间的某种相关关系而不是因果关系。美国盐土实验室开发的以人工神经网络技术为核心的 Rosetta 软件就是利用 PTFs 法分析和预测非饱和土壤的水力性质<sup>[42]</sup>,该软件界面友好、操作简单,在无条件准确测定土壤水

力特性参数的情况下可以应用。分形几何法<sup>[43-44]</sup>是运用 Mandelbrot 提出的分形理论来研究土壤水力参数的一种方法,此法的最大优点是确定土壤水力性质中的参数具有明确的物理意义。土壤形态学法<sup>[43]</sup>是通过土壤剖面高分辨率图像的分析处理,确定土壤孔隙的大小分布和连通情况,并将其参数化,在此基础上建立网络模型以预测土壤水力特性参数。虽然用这种方法估计的土壤水力性质最接近真实情况,但实际操作中,数码相机拍摄图像的精度易受多种因素的影响,从而会影响到土壤水力参数的估计,另外试验所用仪器昂贵也限制了此法的推广。数值反演法是将土壤水力参数用含未知参数的解析模型替代,并赋予未知参数一初始估计值,然后将其带入 Richards 方程在一定的初始、边界值条件下通过数值求解来确定水力参数,这种方法的主要问题是可能出现不唯一的解。

#### 4 地下滴灌土壤水分运动数值模拟软件开发

能够精确模拟土壤水分运动且界面友好、操作简单、仅需输入模型所需参数即可自动输出水流动画的数值模拟软件的开发,将为农林业地下滴灌土壤水分运动规律的定量研究提供一种更加方便、快捷、灵活的手段。

目前,国外已经开发出许多能够用于模拟地下滴灌土壤水分运动的软件,其中应用比较广泛的有:MODEFLOW,FEFLOW,WetUp<sup>[45]</sup>,HYDRUS-2D<sup>[46]</sup>,VS2D/T<sup>[47]</sup>,SWMS2D<sup>[42]</sup>,WAVE 模型等。其中,作为一个大型土壤水分运动研究的应用软件,HYDRUS-2D 是由国际地下水模拟中心 1999 年开发的可用于模拟变饱和和孔隙介质中二维水流、热量和溶质运移的模拟模型,据以往国内外学者研究<sup>[48-49]</sup>表明它可以很好的模拟地下滴灌条件下土壤水流及溶质的二维运动。目前该软件在国内外农业和水利部门应用最为广泛,但它在我国林业上还未得到应用。

我国从 20 世纪 80 年代才开始有人对地下滴灌条件下的土壤水运动进行了大量的试验研究,在土壤水分运动模拟软件开发方面虽取得一些成果,但与国外仍有不小差距:李恩羊<sup>[9]</sup>、张思聪<sup>[10]</sup>、仵峰等<sup>[28]</sup>、李光永<sup>[13]</sup>、李道西<sup>[9]</sup>、马孝义等<sup>[15]</sup>在进行地下滴灌土壤水分运动数值模拟时虽然都自行设计了适合其研究的程序,但当土壤水分动力参数方程改变时,程序必须修改并重新编译,不具通用性,给使用上带来不便,离商业化的距离较远。周青云<sup>[50]</sup>建

立了用于模拟葡萄园根系分区交替滴灌条件下的土壤水分动态模型(APRI 模型),模型考虑了根系分区交替滴灌条件下湿润区与干燥区棵间土壤蒸发和根系吸水的不同,经试验模拟表明,APRI 模型的模拟精度高于 HYDRUS-2D。周云城<sup>[51]</sup>采用面向对象的开发方法和迭代增量式的开发过程分析、设计并采用面向对象的编程语言 VisualC++ .Net 实现了地下滴灌条件下土壤水分运动数值模拟软件系统 WMTrace。软件经过严格测试,运行可靠、操作方便。

#### 5 林地地下滴灌土壤水分运动研究应注意的问题

(1)土壤水分运动参数需精确确定。土壤水分运动参数测定的准确性直接影响模拟结果的精度,故只有利用精确的土壤水分运动参数进行的水分运动模拟才具有现实意义。但由于成土原因,土壤性质存在很强的时空变异性,因此如何简便且精确地测定土壤水分运动参数,进一步掌握其变化规律是亟待解决的问题。另外,为使实测的土壤水分运动参数具有代表性,应确定合理的田间土壤取样数目和取样位置。

(2)林地土壤水分运动数值模拟应充分考虑空气、温度和湿度等因子的影响。由于土壤空气对水分运动产生阻力;温度的改变不仅会影响土壤水的密度、粘性等物理性质,而且还会使土壤容重发生变化以至土壤水力特性参数发生改变;土壤水分状况与土壤的结构性、塑性、压缩性、粘着性等物理性质密切相关,因此要想更精确的模拟地下滴灌条件下林地的土壤水分运动,将这些因子考虑在内是必要的。

(3)应充分考虑林木根系吸水 and 棵间土壤蒸发对林地土壤水分运动的影响。林木根系吸水和土壤蒸发是影响林地土壤水分消耗的两个重要因子,因此准确确定根系吸水量和棵间蒸发量是精确模拟土壤水分动态的一个必要条件。由于与农作物相比,林木根系分布表现出很强的时空异质性,因此应考虑建立动态的二维或三维林木根系吸水模型来预测根系吸水量。

(4)考虑建立土壤水分运动的随机模型<sup>[52]</sup>。目前描述地下滴灌土壤水分运动的模型,大多是从动力学角度获得的只适用于单质点的确定性模型,而林地土壤时空变异性的客观存在使得各种理论不能简单的由点到面进行推广,故不能很好地定量分析灌溉时林地土壤水分运动的时空变化规律。因此,

应考虑将随机模型引入确定性模型中,并结合地理信息系统和空间随机场理论进行如何将单点入渗模型扩展到较大区域上的动态研究,以解释大景观尺度上的问题。

(5)建立考虑变雨强参数的地下滴灌土壤水分运动模型<sup>[53]</sup>。目前,不管是林地水分入渗模型还是水分运动方程,多数研究仅适用于雨强不变的单场次降雨,而在实际降雨过程中,雨强往往是一个随时间变化的函数。因此,在确定地下滴灌土壤水流模拟区域的上边界时,应建立既适用于雨强不变也适用于变雨强的边界条件。

(6)应考虑重力作用和土壤各向异性对土壤水分运动的影响。目前,土壤水分运动模型都是在不考虑重力作用和土壤均质的假设条件下建立的,今后应考虑修正土壤水分运动模型以包含重力作用和土壤各向异性条件。

(7)应考虑土壤水分滞后作用对林地土壤水分运动的影响。

## 6 结语

经国内外众多学者的共同努力,在农业上通过土壤水分运动数值模拟来帮助制定科学合理的灌溉制度,实现精准灌溉已经得到了很大的发展,并逐渐走向成熟。然而在林业上,虽然近几十年来林地土壤水分运动的数值模拟研究已取得了一些进展,如:马履一等<sup>[54]</sup>以定量连续的能量观点研究太行山土壤水分动态,实现了林地水量平衡中各项组成因子的动态观测和动态计算;贺康宁<sup>[55]</sup>在点入渗的基础上模拟了降雨条件下林地土壤剖面水分变化、林地土壤入渗、径流和水分再分布过程。但将研究所得的林地土壤水分运动规律具体应用于实际林业灌溉的研究却鲜有报道。因此,建议今后将地下滴灌应用于林业生产时,多借鉴农业上成熟的研究方法和科研成果,加强林地地下滴灌土壤水分运动的数值模拟研究,并结合树木的生长节律、生理生态特性和耗水规律等制定科学合理的灌溉制度,从而提高水分利用效率,实现林木的速生、丰产和水资源可持续利用。

## 参考文献:

- [1] 张爱莉. 最经济的灌水法——地下滴灌[J]. 灌溉排水, 1995, 14(1), 50-52.
- [2] 王振华, 吕德生, 温新明, 等. 地下滴灌对棉花生理性状及产量影响的研究[J]. 节水灌溉, 2006, (4), 11-13.
- [3] Vijayakumar K R, Dey S K, Chandrasekhar T R, et al. Irrigation requirement of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in the

subhumid tropics[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 35 (3), 245-259.

- [4] 贾黎明, 邢长山, 李景锐等. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林生产力及效益分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6), 43-49.
- [5] 韦艳葵, 贾黎明, 邢长山. 滴灌在林业上应用的研究与进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(4), 38-43.
- [6] 马履一. 国内外土壤水分研究现状和进展[J]. 世界林业研究, 1997, (5), 26-32.
- [7] 王治军, 雒天峰. 滴灌条件下侧柏林地根区土壤水分运动规律研究[J]. 干旱地区农业, 2008, 26(4), 13-16.
- [8] Ca'dwell D S, Spurgeon W E, Manges H L. Frequency of irrigation for subsurface drip irrigated corn [J]. *Trans of the ASAE*, 1994, 37(6), 1099-1103.
- [9] 李道西, 罗金耀, 彭世彰. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, (4), 26-28.
- [10] 李恩羊. 渗灌条件下土壤水分运动的数学模拟[J]. 水利学报, 1982, (4), 1-10.
- [11] 张思聪, 惠士博, 雷志栋等. 水平非饱和土壤水二维运动的准解析解[J]. 水利学报, 1986, 17(3), 54-60.
- [12] 罗毅, 徐建新, 李宝萍. 地表下滴灌土壤水分运动数值模拟[J]. 华北水利水电学院学报, 1995, 16(2), 1-9.
- [13] 李光永. 地理点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J]. 水利学报, 1996, (11), 47-56.
- [14] 程先军, 许迪. 地下滴灌土壤运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6), 1-4.
- [15] 马孝义, 谢建波, 康银红. 重力式地下滴灌土壤水分运动规律的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6), 5-10.
- [16] Ben-Asher J, Phene C J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model [M]// *Subsurface Drip Irrigation Theory, Practices and Application*. St Joseph, Mich: Irrigation & Drainage Press, 1993, 185-202.
- [17] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of field water use and crop yield [M]// *Pudoc Wageningen*, 1978, 189.
- [18] Molz F J. Models of water transport in the soil-plant system: A review [J]. *Water Resource Research*, 1981, 17, 1245-1260.
- [19] 罗毅, 于强, 欧阳竹, 唐登银等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报, 2000, 4, 73-80.
- [20] 周青云, 康绍忠. 葡萄园根系分区交替滴灌条件下土壤水分动态模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(10), 1245-1252.
- [21] Daozhi Gong, Shaozhong Kang, Lu Zhang, et al. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83, 119-129.
- [22] Vrugt J A, Hopmans J W, Simunek J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65, 1027 - 1037.
- [23] 仵峰, 彭贵方, 吕谋超, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动模型[J]. 灌溉排水, 1996, 15(3), 24-29.
- [24] Warrick A. W., A. Amoozegar-Fard, D. O. Lomen. Linearized moisture flow from line sources with water extraction

- [J]. Transactions of the ASA, 1979, 22(3), 549-553.
- [25] Oron G. Simulation of water flow in the soil under sub-surface trickle irrigation with water uptake by roots [J]. Agricultural Water Management, 1981, 3, 179-193.
- [26] Or, D. Drip irrigation in heterogeneous soils, steady state field experiments for stochastic model for evaluation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60, 1339-1349.
- [27] Schwartzman M., Zur B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume [J]. Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 112 (3), 242 - 253.
- [28] D. K. Singh, T. B. S. Rajput, D. K. Singh, H. S. Sikarwar, R. N. Sahoo, T. Ahmad. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source [J]. Agriculture Water Management, 2006, 83, 130-134.
- [29] ST. Elmaloglou, N. Malamou. Estimation of Width and Depth of the Wetted Soil Volume Under a Surface Emitter, Considering Root Water-uptake and Evaporation [J]. Water Resource Management, 2007, 21, 1325-1340.
- [30] 张振华, 蔡焕杰, 杨炯亚等. 滴灌入渗土壤水分分布的数值研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(3), 91-94.
- [31] 雷志栋, 杨诗秀. 非饱和土壤水一维流动的数值模拟 [J]. 土壤学报, 1982, 19(2), 141-152.
- [32] S. R. Raine, W. S. Meyer, D. W. Rassam, et al. Soil-water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones [J]. Irrigation Science, 2007, 26, 91-100.
- [33] Matthews C J, Braddock R D, Sander G C. Modeling flow through a one-dimensional multi layered soil profile using the Method of Lines [J]. Environmental Model Assess, 2004, 9, 103-113.
- [34] 田富强, 胡和平. 基于常微分方法求解器的 Richards 方程数值模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, 47(6), 785-788.
- [35] Bouma J, Belmans C, Dekker LW, et al. Assessing the suitability of soils with macropores for subsurface liquid waste disposal [J]. Journal of Environment Quality, 1983, 12, 305-311.
- [36] Wind G P. Capillary conductivity data estimated by a simple method [M]// Rijtema P E, Wassink H. (ed.) Water in the unsaturated zone. IASH Gentbrugge/UNESCO Paris, 1968, 1, 181-191.
- [37] Kool J B, Parker J C, van Genuchten M Th. Determining soil hydraulic properties for one-step outflow experiments by parameter estimation. I. Theory and numerical studies [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49, 1348-1354.
- [38] Dirken C. Unsaturated hydraulic conductivity [M]// Smith K A and Mullins C E. Soil Analysis, Physical Methods. New York, Marcel Dekker, 1991. 209-269.
- [39] Van Genuchten M Th, Leij F J. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils [M]// In: van Genuchten M Th. et al. (ed.) Proc. Int. Worksh. on Indirect Methods of Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside, California, 1992, 1-14.
- [40] 来剑斌, 王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(1), 137-140.
- [41] McKenzie N J, Jacquier D W. Improving the field estimation of saturated hydraulic conductivity in soil survey [J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35, 803 - 825.
- [42] Šimůnek J., v. Genuchten et al. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes [J]. Vadose Zone Journal, 2007, 7, 587-600.
- [43] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation soil porosity and soil water properties I Theory [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55, 1231-1238.
- [44] 王展, 周云成, 虞娜等. 以分形理论估计棕壤水分特征曲线的可行性研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(5), 570-574.
- [45] Cook, F. J., P. J. Thorburn, et al. WetUp, a software tool to display approximate wetting patterns from drippers [J]. Irrigation Science, 2003, 22(3), 129-134.
- [46] Simunek J., Sejna M., Van Genuchten M. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWV-TPS-53 [M]// International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado. 1999.
- [47] Lappala E G. R W. Healy, E. P. Weeks. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media [J]. Water Resources Investigations, 2001.
- [48] 李久生, 张建君, 饶敏杰. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证 [J]. 水利学报, 2005, 36(8), 1-10.
- [49] Patel N., Rajput T. B. S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion [J]. Agriculture Water Management, 2008, 1-15.
- [50] Qingyun Zhou, Shaozhong Kang, Lu Zhang, et al. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation [J]. Plant and Soil, 2007, 291, 211-223.
- [51] 周云成. 地下滴灌土壤水分运动过程的数值解析与模拟 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
- [52] 李红, 罗金耀. 地下滴灌条件下土壤水分研究概况 [J]. 节水灌溉, 2005, (3), 26-28.
- [53] 王力, 邵明安, 王全九. 林地土壤水分运动研究综述 [J]. 林业科学, 2005, 41(2), 147-153.
- [54] 马雁一. 山坡林地开放渗透系中土壤水分物理-生态的立地研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 1995.
- [55] 贺康宁. 林地土壤水分运动的数学模型 [J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(1), 77-86.