

## 植物根系吸水模型的发展动态<sup>①</sup>

杨培岭<sup>②</sup> 郝仲勇

(中国农业大学水利与土木工程学院)

**摘要** 综述了自1960年Gardner第1个单根吸水模型建立以来的植物根系吸水模型,对模型加以分类,并对其优缺点和适用性进行了阐述,可供现代节水灌溉的理论和应用研究参考。

**关键词** 植物根系;吸水模型;土壤-植物-大气系统

**分类号** S 507

## Developments of Plant Root Uptake Models

Yang Peiling Hao Zhongyong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU)

**Abstract** Most kinds of plant root uptake models from the first one presented by Gardner in 1960 to the latters are reviewed and classified. The characters and applicabilities are discussed for references to the research on the theory and practice of modern water saving irrigation.

**Key words** plant root; uptake model; soil-plant-atmosphere system

当代研究田间土壤水分循环是以土壤-植物-大气连续系统(简称SPAC系统)为基础的,其中一个重要的子系统就是土壤-根系统。土-根系统中水分的运行方式主要是植物根系吸收土壤水分,所以,探讨和研究土-根系统以至整个SPAC中水分传输的机理必须首先解决植物根系如何吸收土壤水分的问题。笔者收集了从1960年至今的根系吸水模型,并予以整理、分析,供研究根系吸水的科研工作者参考。

研究根系吸水有2种方法,即微观法和宏观法。微观法研究单个根的吸水状况,假定植物根系分布是均匀的,在根层中的土壤水吸力也是均匀分布的,它主要用于分析根系吸水的机制,但是,单根的吸水率涉及到比较复杂的测定;因此很难用单根吸水的微观模型去定量研究根层中土壤和根系中的水流运动。宏观法综合考虑根系总体对土壤水分的吸收,忽略水分向个别根的流动。随着研究工作的不断深入,不少学者发展和改进了宏观模型。

### 1 微观模型

微观模型首先由Gardner<sup>[1]</sup>提出,通过简化将根视为一个半径为 $r_r$ 的无限长圆柱体,根的直径、吸水特性及土壤的初始条件和导水性能等沿根长不变,故土壤水的流动可当作平面问题处理。在忽略重力作用的条件下,可进一步近似为径向的土壤水流动,相应的定解问题为

收稿日期:1998-06-04

①北京市“九五”科技攻关项目

②杨培岭,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)146信箱,100083

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \\ \theta = \theta_0 \text{ 或 } \Psi = \Psi_0 & t=0, r \geq 0 \\ q = -2\pi r k(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial r} = 2\pi r D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} & r=r_r, t>0 \\ \theta = \theta_0 \text{ 或 } \Psi = \Psi_0 & r=\infty, t>0 \end{cases}$$

式中:  $r$  为土壤中某一点到根中心的径向距离;  $r_r$  为根半径;  $\theta, \Psi$  为土壤含水率和水势;  $\theta_0, \Psi_0$  为土壤含水率和水势的初始值;  $k(\Psi), D(\theta)$  为土壤的导水率和扩散率;  $q$  为单位根长的吸水速率, 即单位时间内每单位根长的吸水量。

此后不少学者又对单根吸水模型进行了研究和改进。Molz<sup>[2]</sup>将根系吸水条件下土壤中水分向根表面流动和水分在根组织内的流动联系起来, 从而考虑了根的水力特性, 提出了单根吸水时土-根系统水流运动模型。在根区水分向根的径向流动基本方程为

$$C \frac{\partial \Psi_m}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial \Psi_m}{\partial r} + \frac{\partial k}{\partial r} \left( \frac{\partial \Psi_m}{\partial r} \right)^2 \quad r_r < r < r_s, t > 0$$

式中:  $\Psi_m$  为土壤基质势;  $C$  为比水容量;  $r_s$  为相邻 2 条根间距的中点到根轴线的距离。

在根内, 植物组织区径向流的基本方程为

$$\frac{\partial \Psi_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial r^2} + \frac{D_i}{r} \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} \quad r_e < r < r_r, t > 0$$

式中:  $\Psi_i$  为作物根组织水势;  $D_i$  为根组织水分扩散系数;  $r_e$  为根内皮层半径。

## 2 宏观模型

宏观模型把整个根系看作是扩散吸水器, 各土层中的根系是均匀分布的, 而在整个根区根系的密度分布不同, 整个根系以不同速率从土壤中吸收水分。根系吸水速率依赖于土壤含水率和植物特性等因素, 还与微气象条件有关。宏观模型的表达式是在田间土壤水分运动基本方程的右边加上一个根系吸水项  $S$  而得到的, 其数学方程为

$$\partial \theta / \partial t = \nabla [k(\theta) \Delta \Psi] - S$$

式中:  $\nabla$  为矢量微分算子;  $\Psi$  为总土水势;  $S$  为根系吸水项, 即单位时间内根系从单位体积土壤中吸收的水量;  $k(\theta)$  为土壤导水率;  $\theta$  为土壤容积含水率。

求解宏观模型的关键就是要确定根系吸水模式  $S$ , 所谓发展和改进宏观模型, 实质上就是修改根系吸水模式  $S$ , 以使根系吸水模拟更趋于符合实际。

国内外专家对根系吸水模式作了很多研究, 使根系吸水模式不断得到发展和改进。虽然根系吸水模式有多种多样, 但根据建模考虑的主导因子或建模方式不同, 归纳起来可以划分为如下 3 类。

### 2.1 以水分子物理参数和根系密度为主导因子构建的吸水模型

#### 1) Gardner 模型<sup>[3]</sup>

$$S(z, t) = B(\Psi_r - \Psi_m - z)k(\theta)L(z, t)$$

式中:  $B$  为常数;  $\Psi_r$  为植物根水势;  $z$  为距地表的深度;  $L(z, t)$  为单位体积土壤中的根长度。

此模型中涉及到根密度、根水势等一些难测定的参数, 因而应用较为困难。

#### 2) Whisler 模型<sup>[4]</sup>

$$S = L(z)k(\theta)(h_p - h_s)$$

式中:  $L(z)$  为根密度函数;  $h_p$  为植物根水势;  $h_s$  为土水势。

此模型与 Gardner 模型在形式上是一致的, 都涉及到土水势、根水势、导水率和根长密度, 但实用性相对增强。

### 3) Nimah-Hanks 模型<sup>[5]</sup>

Nimah 和 Hanks 考虑了溶质的影响和植物根导管传导水分的内摩擦力, 提出了一个比较复杂的根系吸水模型

$$S(z, t) = \frac{[H_r + R_R z - h_m(z, t) - h_0(z, t)] L_{DF}(z) k(\theta)}{\Delta x \Delta z}$$

式中:  $H_r$  为土壤表面根内的有效水头;  $R_R$  为根阻力项, 等于  $1 + C_v$ ,  $C_v$  为流速因数, 在植物根系流中假定  $C_v = 0.05$ ;  $h_m(z, t)$  为土壤基模水头;  $h_0(z, t)$  为考虑含盐量的渗透水头;  $L_{DF}(z)$  为有效根密度函数, 即为在  $\Delta z$  的深度间隔内其有效根与总有效根的比率;  $\Delta z$  为深度增量;  $\Delta x$  为根表面到土壤中测量  $h_m(z, t)$  和  $h_0(z, t)$  点的距离(可假定为  $1.0 \text{ cm}$ )。

经过 Hanks 等人在不同条件下的验证, 用该模型模拟的田间土壤动态水分与实测值非常一致, 且有效根密度函数  $L_{DF}(z)$  更客观地反映了根系吸水的分配特性; 但该模型没有考虑根系吸水与蒸腾之间的固有关系, 而且没有考虑根透性及其随溶质、土壤含水率的变化和对根吸水的影响。

### 4) Feddes 模型<sup>[4]</sup>

Feddes 等在 Gardner 和 Whisler 等人研究的基础上建立了如下模型:

$$S = -k(\theta)[h_r(z) - h_m(z)]/b(z)$$

式中:  $h_r(z)$  为土-根接触面的压力水头;  $h_m(z)$  为土壤基质水头;  $b(z)$  为描述水流特性的经验函数。

此模型在形式上确有简化, 意义也较明确, 但  $h_r(z)$  不易精确测定,  $b(z)$  的经验成分较大。

Feddes 等人研究发现, 在不同的土壤含水率条件下, 根系的吸水是不同的, 根系吸水速率具有上下限, 于是稍后又建立了在不同含水率条件下具有根系吸水的分段表达式形式的吸水模型:

$$\begin{aligned} S &= 0, & 0 \leq \theta \leq \theta_w \\ S &= S_{\max} [(\theta - \theta_w) / (\theta_L - \theta_w)], & \theta_w < \theta \leq \theta_L \\ S &= S_{\max}, & \theta_L < \theta \leq \theta_H \\ S &= 0, & \theta_H < \theta \leq \theta_s \end{aligned}$$

式中:  $\theta_w$  为凋萎含水率;  $\theta_L$  为  $S = S_{\max}$  时的最低含水率;  $\theta_H$  为  $S = S_{\max}$  时的最高含水率;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $S_{\max}$  为根系最大吸水速率。

### 5) Hillel 模型<sup>[4]</sup>

Hillel 等在充分研究根系吸水机理的条件下, 在 Gardner 等人研究的基础上, 考虑到土壤及根对水流的阻力, 建立了如下的半理论半经验模型:

$$S = (H_s - H_p)(R_s - R_r)^{-1}$$

式中:  $H_s$  为作为深度函数的土壤的总水头;  $H_p$  为植物体内的水头;  $R_s$  为土壤内的水流阻力, 等于  $1/BKL$  (其中:  $B$  为经验常数;  $K$  为土壤导水率;  $L$  为有效根长密度);  $R_r$  为根的水力阻

力,等于吸收阻力与传导阻力之和。

此模型与 Van den Honert 的稳态 SPAC 通量方程一致,意义明确,但阻力难于求出,模型忽略了水容和同化作用的影响。

#### 6) Herklrath 模型<sup>[6]</sup>

Herklrath 等提出的吸水模型是在 Van den Honert 假定<sup>①</sup>的基础上考虑了土与根的联系作用,即用饱和度( $\theta/\theta_s$ )作为接触作用的一级校正因素,所提出的根系吸水模型为

$$S(z,t) = \frac{\theta(z,t)}{\theta_s} K_r L(z,t) [\Psi_s(z,t) - \Psi_r(z,t)]$$

式中: $\theta(z,t)$ 为深度  $z$  时刻  $t$  的土壤容积含水率; $K_r$  为单位根长的根透性因数; $L(z,t)$  为单位体积土壤中的根长度; $\Psi_s(z,t)$  为土水势; $\Psi_r$  为根内水势。

Herklrath 等对冬小麦分层根系进行了实验研究。结果表明:这一模型能用来预报土壤水分动态;但吸水模型本身未能与大气条件联系起来,像根的透性和根水势这些参数测定麻烦,而且随土壤含水率、盐分等因素变化, $K_r$  也发生变化,应用不便。

#### 7) Rowes 模型<sup>[4]</sup>

$$S = \frac{\Delta Z L (h_s - h_p)}{R_s + R_p}$$

式中: $\Delta Z$  为土层厚度; $L$  为单位土体积中的根长度; $h_s$  为土壤水势; $h_p$  为植物水势,假定整个根木质部为一常数; $R_s$  为单位根长吸水的土壤阻力; $R_p$  为单位根长吸水的植物阻力。

## 2.2 以作物蒸腾量在深度上按比例分配和根系密度分布的半理论半经验模型

### 1) Feddes 模型<sup>[7]</sup>

Feddes 等的研究表明,根系吸水与蒸腾速率及深度有密切关系,于是建立了仅与蒸腾速率及深度有关的经验模型

$$S = T/z_r$$

式中: $T$  为单位土壤面积的蒸腾速率; $z_r$  为植物根系层深度。

此模型是一常速率吸水模型,认为吸水速率在深度上是不变的,它不能在根系的上、下边界同时满足条件。

### 2) Prasad 模型<sup>[7]</sup>

Prasad 在 Feddes 等研究的基础上建立了如下的线性模型:

$$S = \frac{-2T}{z_r^2} z + \frac{2T}{z_r}$$

Prasad 用 Erie 等的试验数据进行了验证,结果表明,此模型与 Feddes 模型好得多,但仍未能解决上、下边界的问题。

<sup>①</sup>在 SPAC 系统中,水分运动的基本规律是从水势高处向水势低处流动,驱动力是系统中的水势梯度,其流动速率与水势梯度成正比,与水流阻力成反比。水分通量表达式为

$$q = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{R_{sr}} = \frac{\Psi_r - \Psi_L}{R_{rL}} = \frac{\Psi_L - \Psi_a}{R_{La}}$$

式中: $\Psi_s, \Psi_r, \Psi_L, \Psi_a$  分别为土水势、根水势、叶水势和大气水势; $R_{sr}, R_{rL}, R_{La}$  分别是通过土壤到达根表皮、越过根部通过木质部上升到叶气腔、通过气孔蒸腾扩散到周围空气中各段路径的水流阻力。

3)Chandra, Shekhar and Amaresh 模型<sup>[7]</sup>

Chandra, Shekhar and Amaresh 改进了前人模型的不足之处,建立了如下的非线性模型:

$$S = \frac{T}{z_r} (\beta + 1) \left( 1 - \frac{z}{z_r} \right)^\beta \quad 0 \leq z \leq z_r$$

式中  $\beta$  为模型参数。

此模型是以上 2 个模型的发展,当  $\beta=0$  时即为 Feddes 模型,当  $\beta=1$  时即为 Prasad 模型。另外,此模型有很好的边界条件:当  $z=0$  时,  $S=S_{\max}$ ; 当  $z=z_r$  时,  $S=0$ 。

4)Molz-Remson 模型<sup>[8]</sup>

Molz 和 Remson 提出了有效根密度的概念。他们认为,植物根系的吸水速率与蒸腾速率  $T(t)$ 、有效根密度  $L_e(z,t)$  和土壤水分扩散率  $D(\theta)$  之积成正比,即

$$S(z,t) = \frac{T(t)L_e(z,t)D(\theta)}{\int_0^{z_r} L_e(z,t)D(\theta)dz}$$

由于式中的  $L_e(z,t)$  是通过计算而求得的,因此这种根系吸水模式应具较高的预报能力;但他们的研究表明,这种吸水模型只宜作短期的土壤水分动态预报。有效根密度  $L_e(z,t)$  与实际根密度  $L(z,t)$  只有当土壤含水率较低时才有较好的相关性,这就限制了模型的实际应用。

5)Raats 模型<sup>[4]</sup>

$$S = T\delta^{-1}\exp(-z/\delta)$$

式中  $\delta$  为使  $S$  在整个根区的积分等于  $T$  的参数。

6)Selim and Iskandar 模型<sup>[4]</sup>

$$S = \frac{TL(z)K_s(\Psi)}{\int_0^{z_r} L(z)K_s(\Psi)dz}$$

式中:  $L(z)$  为单位土体积的根长度;  $K_s(\Psi)$  为非饱和土壤导水率;  $\Psi$  为土壤水势。

7)Molz 模型<sup>[4]</sup>

Molz 通过对各种根系吸水模型的研究并充分考虑根系吸水的因素,提出了一个比较复杂且比较全面的根系吸水模型

$$S(z,t) = \frac{T(t)\theta(z,t)L(z,t)[\Psi_m(z,t) - \Psi_x(t)]}{\int_0^{z_r} \theta(z,t)L(z,t)[\Psi_m(z,t) - \Psi_x(t)]dz}$$

式中:  $\Psi_m(z,t)$  为土壤基质势;  $\Psi_x(z,t)$  为根木质部水势。

Molz 的根系吸水模型考虑了根系吸水速率与根系密度分布、土壤含水率、蒸腾速率等因素的关系,较为全面,但仍未考虑土-根系统水流阻力对根系吸水速率的影响。

8)邵明安模型<sup>[9]</sup>

邵明安在 Molz 模型的基础上提出了如下模型:

$$S(z,t) = \frac{T(t)\lambda(\theta)L^{1/n}(z,t)[\Psi_s(z,t) - \Psi_x(z,t)]/R_{sr}}{\int_0^{z_r} \{\lambda(\theta)L^{1/n}(z,t)[\Psi_s(z,t) - \Psi_x(z,t)]/R_{sr}\}dz}$$

式中:  $R_{sr}$  为根系吸水过程中所遇到的阻力之和;  $n$  为土壤质地因子;  $\lambda(\theta)$  为土壤水分限制因子。

邵明安模型较全面地考虑了土壤的水分状况、能态、导水能力和质地等,植物的根系密度、根区深度和大气(通过蒸腾的影响来反映)等因素中的主因子,且在根密度  $L(z,t)$  处加上  $1/n$  次方,表明把吸水速率同毛根数量联系起来,修正了以往模型中吸水速率与根系密度成正比的假定;因为与吸水速率密切相关的是吸水根系,而非所有根系都参加吸收活动。但是,土壤质地因子  $n$  对于某一种土壤并不是不变的,同时  $\lambda(\theta)$  的确定也存在困难,这就限制了该模型的实际应用。

### 2.3 通过根系吸水动态模拟的方法建立的根系吸水经验模型

考虑根系吸水项的 1 维非饱和土壤水分运动方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(z,t)$$

于是根系吸水项可通过田间实测土壤含水率分布用下式进行动态模拟:

$$S(z,t) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

用有限差分法求解方程便可根据实测资料求得根系的吸水项  $S(z,t)$ ,再在此基础上建立根系吸水模型。

#### 1) 姚建文冬小麦根系吸水经验模型<sup>[10]</sup>

$$S(z,t) = E_r(t) A(t_p) \exp[-61.9136(z_r - 0.5194)]$$

式中:  $E_r(t)$  为蒸发蒸腾量;  $t_r$  为相对时间,  $t_r = t/t_{\text{tot}}$  ( $t$  为出苗后的时间;  $t_{\text{tot}}$  为作物生育期总时间);  $z_r$  为相对深度,  $z_r = z/z_r(t)$  ( $z$  为实际深度;  $z_r(t)$  为根系层深度);  $A$  为经验系数。

此模型的最大缺陷之一就是没有考虑土壤剖面上水分分布不同对根系吸水的影响。

#### 2) 康绍忠冬小麦根系吸水经验模型<sup>[11]</sup>

$$S(z,t) = 2.1565 T_p(t) \frac{\exp(-1.80z/z_r)}{z_r} \left( \frac{\theta_z - \theta_{wp}}{\theta_F - \theta_{wp}} \right)^{0.6967}$$

式中:  $T_p(t)$  为作物潜在蒸腾量;  $\theta_z$  为土壤含水率;  $\theta_F$  为田间持水率;  $\theta_{wp}$  为凋萎含水率。

此模型是在较为充分地分析了冬小麦根系吸水的物理过程与影响因素的关系的基础上提出的,根据初步检验,模型具有较高的精度,能反映冬小麦根系吸水的实际情况,而且模型中不包含根系密度、阻力等难测参数,在实用上也比现有的模型优越;但是该模型是在黄土高原的气候条件下,在一定时段内实测资料的基础上分析得到的,由于受特定条件的影响,不可避免地带有一定的局限性。

#### 3) 邵爱军模型<sup>[12]</sup>

$$S = E_r A \{ \exp[-B(\ln z_r - C)^2] \} / z_r$$

式中:  $E_r$  为腾发量,  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $z_r$  为相对深度,  $z_r = z/L_r(t)$  (其中  $L_r(t)$  为根系吸水层深度);  $A$  为经验系数,  $\text{mm}^{-1}$ ;  $B, C$  为经验因数。  $A$  反映作物根系吸水随生长期的变化,  $B$  反映根系吸水在剖面上的分布形状,  $C$  为作物吸水量最大值所在的位置。

## 3 小 结

在严格条件下微观模型能够定量描述根区微域内土壤水分的运动规律,因此,对用来分析根吸水的机制、根水势与土水势的关系及蒸腾时土壤和根水势变化的特点具有一定作用;但

是,田间根系生长及吸水性能随土层深度呈均匀分布的情况是极少见的,甚至是没有的,单根微观模型不适用于根系统,因此,不能将这种理想化的模型用于田间整个根区土壤水分动态变化的模拟中。解决实际问题的途径宜将模型建立在宏观水平上。

第1类以水势差或含水率、根系分布密度、土壤导水率或扩散率为基础的半理论半经验宏观模型,多是以 Van den Honert 的假定为基础的,此类模型在物理学和生理学上都是正确的,但是其研究重点在于土-根系统,模型的主要参数也只有根系和土壤参数,并未涉及到 SPAC 系统中大气因素的影响,且模型中的一些参数如根长密度、水流阻力、根透性等都较难测定,因此模型较难实际应用。

第2类以作物蒸腾量在深度上按比例分配为基础的半理论半经验宏观模型,较全面地考虑了土壤、植物和大气因素对根系吸水的影响,同时对根系密度作了进一步研究,Molz 等提出了有效根密度的概念,邵明安也在根系密度处加上  $1/n$  次方,把根系吸水速率同毛根数量联系起来;但是有效根系密度的物理基础尚不清楚,仍需进一步研究。

第3类采用根系吸水动态模拟的方法建立的根系吸水经验宏观模型,是在总结前人模型中参数多、不易应用的不足之处的基础上,通过数值模拟反推得出的模型。这类模型主要涉及蒸腾速率、根系层深度等参数,形式简单,应用方便,但是模型是在特定的试验条件下获得的,局限性较大,不能盲目使用。

今后关于根系吸水的研究,应当从根系吸水的机理出发,全面考虑土壤-植物-大气连续系统中对根系吸水的影响因素,建立既实用又简便的根系吸水模型。

### 参 考 文 献

- 1 Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci*,1960,89:63~73
- 2 Molz F J. Water transport in the soil-root system; Transient analysis. *Water resour Res*,1976,12:805~807
- 3 Gardner W R. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron J*, 1964,16:41~45
- 4 Molz F J. Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water Resour Res*,1981,17:1254~1260
- 5 Nimah M N, Hanks R J. Model for estimating soil water, plant and atmosphere interrelations: Field test of model. *Soil Sci Soc Am Proc*,1973,37:522~527
- 6 Herkelrath W N, Miller E E, Gardner W R. Water Uptake by Plant: 1. Divided root experiment. *Soil Sci Soc Am J*, 1977,41:1033~1038
- 7 Chandra S P O, Amaresh K R. Nonlinear root-water uptake model. *J Irrig and Drain Engi*,1996,122(4):198~202
- 8 Molz F J, Remson I. Extracting term models of soil moisture use of transpiring plants. *Water Resou Res*,1970,6:1346~1356
- 9 邵明安,杨文治,李玉山. 植物根系吸收土壤水分的数学模型. *土壤学报*,1987,24(4):295~304
- 10 姚建文. 作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型. *水利学报*,1989(9):32~38
- 11 康绍忠,刘晓明,熊运章. 冬小麦根系吸水模式研究. *西北农业大学学报*,1992,20(2):5~12
- 12 邵爱军,李会昌. 野外条件下作物根系吸水模型的建立. *水利学报*,1997(2):68~72