

植物根系吸收土壤水分的一个简化模式^{*}

I: 模 式

邵 明 安

(中国科学院西北水土保持研究所
水利部)

摘 要

本文根据植物根系吸收土壤水分的物理过程,提出了一个既能反映根系吸水机理,表达式又相当简单的数学模型。该模型除能预报根系吸水的一些水分动态和水势动态外,还能预报有效根密度的时空变化。

关键词: 植物根系吸水 数学模型

A SIMPLIFIED MODEL OF SOIL MOISTURE EXTRACTION BY PLANT ROOTS, 1, MODEL

Shao Mingan

Abstract

In this paper, a simplified model of soil moisture extraction by plant roots, which can be used to account for the mechanism of soil water uptake by roots to some extent and the form of the extraction term model is considerably simple, was developed, based on the physical process of soil water uptake by plant roots. The model can predict not only the soil water dynamic profiles and the soil water potential profiles, but the changes of the effective root density with depth and time.

key words water uptake by roots mathematical model

1 研究背景

模拟土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中的水分运动,植物根系吸收土壤水分是必须首先解决的基本问题。定量描述植物根系吸收土壤水分的数学模型有宏观和微观两种。由于微观模型受限制较多^[1],目前大多使用宏观模型。

我们知道,宏观模型是在Darcy-Richards方程右边加上一个吸收项而得到的。因此,提出和改进模型的实质在于用不同的根系吸水项来刻画根系吸水,关于宏观模型的改进与发展,作者在另文中已有评述^[2]。

现有根系吸水宏观数学模型,按其吸收项所包含参数的多少及其获取的难易程度,似可归结为复杂模型和简单模型两大类。复杂模型所需参数包括蒸腾速率、根系有效分

^{*}本研究在中国科学院南京土壤所土壤圈物质循环开放实验室内完成。

布、土-根水流阻力、根木质部分势以及土壤含水量和土壤水势等资料。这类模型确从植物根系吸收土壤水分的实际过程刻画了其吸水机理,且有相当高的预报准确性^[3]。但这类模型过于复杂,尤其是田间应用不方便,因为这类根系吸水函数所包含的参数的取得相当费时和费力。该类模式中所包含的有效根密度其物理基础是单位土体中的毛根长度,由于不能直接测定毛根密度,只能用根系体积密度加上一个衰减系数来描述,而衰减系数又需要由毛根密度与体积根密度的实际资料来确定,人们多用文献中非常少的作物某一生长阶段毛根的实测资料来求取衰减系数,由于根系生长发育的动态性和条件的不同,这样获得根有效密度参数其可靠性似难令人满意。另外,复杂模型中所包含的根水势目前也很难直接测定,往往是通过测定植物茎、叶的水势而由已知的水流阻力间接计算出,由于根系轴向水流阻力的复杂性以及植物体内的水容特性^[4,5],很难准确地获得根水势,当然,也可用分层根法间接测定根水势^[6],但此法不能应用到田间。复杂模型中所包含的其他参数,如水流阻力、植物根系吸水为零的土壤湿度等,都不很容易获得。因此,尽管这类模型机理性很强,但在田间应用上遇到了相当大的困难。简单模型虽然包含参数很少,如Molz-Remson模型^[7],只需蒸腾速率和根系深度两个参数,这类模型虽然简单,但与实际情况差别太大,以至Molz本人从1970年开始,不断改进他们自己的吸水模型,使其预报准确度不断提高,同时,模型也就不断复杂化了。Molz1981年提出的吸水模式,其表达式已相当复杂^[8],但仍难较完满地描述植物吸收土壤水的机理^[2]。显然,改进植物根系吸水的宏观模型,使其既能在较大程度上反映根系吸水机理又方便于田间应用事在必行。本文中,作者以模型既反映机理、表达式又不能太复杂为出发点。

2 简化模型

2.1 数学模型的建立

在不计温度、溶质、滞后效应的情况下,土-根系统中水分运动方程在直角坐标系下为

$$-\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\theta) \nabla \theta) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中 θ 为土壤容积含水量, t 为时间, ∇ 为Laplace矢量微分算符, $K(\theta)$ 、 $D(\theta)$ 为土壤的非饱和导水率和水分扩散系数, x, y, z 为直角坐标, S 为根系吸水项,代表单位时间内根系从单位土体内吸收的水量。

对于土-根系统中的一维垂直流,(1)式可写为:

$$-\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(z, t) \quad (2)$$

原则上,根系吸收项 S 是土壤性质、植物因素和大气条件的复杂函数,但终究可表达成时、空的函数,即 $S = S(z, t)$ 。 $S(z, t)$ 理论上可表示如下,

$$S(z, t) = F(S, P, A) \quad (3)$$

(3)式右端即为土壤(S)、植物(P)、大气(A)的函数。如果假定(3)式右端可以分离变量,则

$$S = F_1(S) F_2(P) F_3(A) \quad (4)$$

在以往工作的基础上, 考虑根系吸水的主要因素, 把(4)式具体化为,

$$S = F(\theta) \cdot ER(z, t) \cdot T(t) \quad (5)$$

式中 $F(\theta)$ 为土壤水分限制因子, $ER(z, t)$ 是随时、空而变的有效根密度, $T(t)$ 为植物的蒸腾速率。

(5)式就是本文提出的根系吸水的简化模式。显然, 该模式包括了影响根系吸水的三大主要因素, 且表达式相当简便, 应用起来很方便。

2.2 模型参数的获取

简化模型中只包括三个参数, 是表达式或获取方法分述如下。

2.2.1 土壤水分限制因子

土壤水分限制因子既是土壤因素对根系吸水影响的定量表达, 又是植物根系吸水过程中土—根接触作用的数学描述。该因子的一级近似为饱和度^[6], 作者采用二级近似(也可发展为更高级近似), 其表达式如下,

$$\begin{aligned} F(\theta) &= 0 & 0 \leq \theta \leq \theta_d \\ F(\theta) &= \frac{\theta^2 - \theta_d \theta}{\theta_i (\theta_i - \theta_d)} & \theta_d < \theta < \theta_i \\ F(\theta) &= 1 & \theta \geq \theta_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中 θ_d 为植物受旱死亡的土壤湿度, 也就是植物根系吸水为零时的土壤湿度, θ_d 比土壤的凋萎湿度要低, 对于武功重壤土二者的值分别为0.08和0.12。这说明, 根系吸水的下限在凋萎湿度以下。 θ_i 为田间持水量。为方便起见, 一般取凋萎湿度代替 θ_d , 因直接测定 θ_d 较费力, 同时也不便于模型的田间应用。

2.2.2 有效根密度

有效根密度的实质是单位土体中同等参与吸水的根系长度, 基础为毛根密度。因此, 直接测定太困难, 极大地限制了模型中的田间应用。本文中采用了一种间接而简单的推算法, 兹述如下,

首先在 t_0 时刻和 t_1 时刻测定土壤含水量剖面, 由下式,

$$S(z, t) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} - \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

进行数值差分可得出 $[t_0, t_1]$ 间根系吸水速率平均值的剖面分布 $\bar{S}(z)$ 。

对 $T(t)$ 和 $F(\theta)$ 在 $[t_0, t_1]$ 期间求平均值得到 \bar{T} 和 $\bar{F}(\bar{\theta})$ 。由(5)式, 在 $[t_0, t_1]$ 期间, $ER(z, t)$ 的平均值随剖面的分布为,

$$\overline{ER}(z) = \frac{\bar{S}(z)}{\bar{T} \bar{F}(\bar{\theta})} \quad (8)$$

因此, 只需两次土壤含水量测定资料和蒸腾数据, 就可确定 $[t_0, t_1]$ 时段内有效根密度时间平均值随剖面的分布。

在数值模拟过程中, 有效根密度的取值采用一步预测法。即用 $[t_0, t_1]$ 时段内的有效根密度预报 $[t_1, t_2]$ 时段内的土壤水分动态, 然后用 t_2 时刻的土壤水分剖面和 t_1 时刻的土壤水分剖面求得 $[t_1, t_2]$ 时段内的有效根密度, 依此类推, 可使模拟顺利进行, 也可在模拟的末时段输入有效根密度的时、空变化过程。

2.2.3 植物蒸腾速率

确定植物蒸腾速率的方法可归结为微气象学法和直接测定法两类。微气象学法又可分理论方法和经验公式法两种^[9]，由于微气象学法求出的是蒸散，蒸腾须在蒸散中减去棵间蒸发。也可由蒸腾在蒸散中所占比例来确定蒸腾，这个比值与植物的叶面积指数密切相关。叶面积指数愈大，冠层荫蔽状况愈好，冠层叶片截留的净辐射愈多，用于蒸腾的能量增加，因而，这个比值就增大，反之减小。另外，这个比值还有日变化，主要原因是净辐射能的日变化和气孔开启度的日变化。确定植物蒸腾速率的另一类方法就是直接测定叶片的蒸腾强度(如稳态气孔计测定)，由代表叶的蒸腾强度乘以叶面积指数而得。总之，植物蒸腾是难于确定的一个参数，为了能使模型方便地应用于田间，其确定方法应以微气象学法为主，尽管这种方法会产生一定偏差。

3 讨 论

本文在以往工作的基础上，考虑影响植物根系吸水的主要因素，提出的根系吸水宏观简化模型，无论是在参数获取，还是模型的田间应用，都很方便，且在相当大程度上能反映根系的吸水机理。本模型的实验检验，作者将在另文中进行。当然，这一简化模型的验证和证实，还需大量的实验资料。

参 考 文 献

- [1] 邵明安. 植物根系吸收土壤水分的数学模型(综述), 《土壤学进展》, 1986, 第14卷3期, 6~15页。
- [2] 邵明安等. SPAC中的水分运动, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 1~12页。
- [3] 邵明安等. 植物根系吸收土壤水分的数学模型, 《土壤学报》, 1987, 第24卷4期, 295~305页。
- [4] 邵明安等. 植物根系轴向水流阻力研究, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 52~56页。
- [5] Shao Mingan, Simmonds, L. P., Chen, Z. X. 1991. Hydraulic resistances and capacitances in soil-plant system. *Pedosphere*. 3. (in press) .
- [6] Herkelrath, W. N. , Miller, E. E. , Gardner, W. R. 1977. Water uptake by plants. 2. The root contact model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 1039~1043
- [7] Molz, F. J. , Remson, I. 1970. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.* 6, 1 346~1 356.
- [8] Molz, F. J. 1981. Models of water transport in the soil-plant system, A review *Water Resour. Res.* 17, 1 245~1 260.
- [9] 雷志栋等. 《土壤水动力学》, 清华大学出版社, 1988, pp. 187~205页。