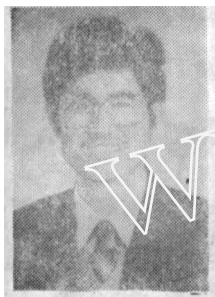


# 土壤-植物-大气连续体水分传输动力学及其应用<sup>1)</sup>

康绍忠

(西北农业大学水利与建筑工程系,陕西,杨陵 712100)



康绍忠,1962年11月生于湖南桃源,1982年7月毕业于武汉水利电力学院农田水利工程专业。1985年7月获西北农业大学农田灌溉专业硕士学位、1990年12月获西北农业大学农业水土工程专业博士学位。后在西北农业大学水利系工作至今。1991年6月晋升为副教授。先后主持和作为主要参加人完成科研成果6项,其中获省科技进步二等奖一项,公开发表有关农田蒸发和土壤-植物-大气连续体理论方面的学术论文30余篇,主编撰写专著2本(80余万字),参加编写专著3本。1989年12月获中国水利学会“优秀中青年水利科学工作者”、1990年5月获陕西省科协“首届优秀青年科技工作者”等称号。现主持“土壤-植物-大气连续体水分运移理论及其应用”和“以节水高产为目标的土壤水分最优调控机理研究”两项国家自然科学基金课题。

**提要** 本文根据作者的研究成果介绍土壤-植物-大气连续体(SPAC)中的势场与水势分布、水流阻力与水容的组成和量级,SPAC中的水流通量计算,SPAC中水分传输动力学模拟模型及SPAC水分传输动力学在农田节水灌溉和田间水量转化与水量平衡研究中的应用等问题。

**关键词** 土壤-植物-大气连续体,水分传输动力学,水势,水流阻力,水容,蒸腾,根系吸水,灌溉

## 1. 引言

现代田间水量转化与水量平衡问题的研究,是以连续的、系统的、动态的观点和定量的方法为基础的,即把土壤-植物-大气作为一个物理上的连续体<sup>[1,2]</sup>(soil-plant-atmosphere continuum,以下简称SPAC)。在SPAC中统一了能量关系,为研究系统中的水分传输和能量转化的动态过程提供了方便。

1966年,由Philip提出了较完整的关于SPAC的概念,<sup>[3]</sup>认为尽管系统中各部分的介质不同,界面不一,但在物理上都是一个统一的连续体,水在该系统中的各种流过程就象链环一样,互相衔接,其水流通量取决于势梯度和水流阻力。这对过去土壤、植物水关系研究工作中长期存在的孤立、静止的观点来说是一次重要的突破。

在SPAC中,水分逆着水势梯度传输,其水流路径是:由土壤到达植物根系表面,由根表面穿过表皮、皮层、内皮层进入根木质部,由根木质部进入植物茎,经茎木质部到达叶片,在叶气孔腔内汽化由叶气孔或角质层扩散到宁静空气层,最后参与大气的湍流交换。模拟该系统中水流过程的模式有稳态和非稳态模型两种,这相当于电学中的纯电阻电路和阻-容网络。

1) 国家自然科学基金资助项目。

水流运动的稳态模型,忽略植物体内贮水量的微小变化,认为 SPAC 中的水流是连续的稳定流,并采用类似电学中欧姆定律的理论。这一模拟自从 Van den Honert 首次应用以来,<sup>[6]</sup>使用相当普遍,即以水势差模拟电势差,以水流速率模拟电流强度,并定义水势差与水流速率之比为不变的水流阻力,其表达式为:

$$q = \Delta\psi / R \quad (1)$$

式中,  $\Delta\psi$  为 SPAC 中某两部分间的水势差,  $q$  为 SPAC 中的水流速率,  $R$  为系统中某两部分间的水流阻力。

然而,稳态模型在使用中常常有其局限性。<sup>[5,6]</sup>第一,它假定 SPAC 中的水流是稳态,这在植物体中是很少存在的,因此不能严格适用于测定时间短于在植株体内建立起一个稳态水流所需要的时间的状况;第二,它假定在传输路径的各部分的水流阻力是恒定不变的,因而无法解释水流阻力有时随水流速率而变的事实;第三,水在 SPAC 中以液态通过土壤和植株传输,但在叶气孔腔内转变成水汽,虽然水分传输的驱动力始终是化学势差,液态水分流动直接和水势差  $\Delta\psi$  成比例,而水汽的扩散则和水汽压或水汽浓度差成比例,水势通过含有对数项的方程式和水汽压相联系,由水汽压把湿度梯度转换成相当的水势梯度,大大地夸大了水汽相中势能的下降,从而也扩大了水汽扩散路径中阻力的量级。

在植物叶片和茎的薄壁组织中的贮水量达 80% 以上,在炎热的晴天有时会失出原有贮水量的 25—30%,但在夜间又得到补充,因此,叶水势除受到土水势、水流速率以及系统中的水流阻力影响外,还受系统中水容的支配。<sup>[7]</sup>水容是 SPAC 中储水和释水能力的一种量度。由于这种水容因素的存在阻止了 Van den Honert 稳态流模式的严格应用。水流运动的非稳态模型正是考虑了系统中水容的影响,使其能解释稳态模型不能解释的问题,因而更为适用。实质上,稳态模型是非稳态模型的一种特殊形式。

水在 SPAC 中的传输是植物本身不同的器官和它所在的环境相互作用、反馈影响的结果,牵涉到许多复杂的物理过程与生理生化过程,因此给对它的表述和计算带来了许多困难。连续系统动态仿真技术的引入,使 SPAC 水分传输及水热转换的定量描述得到实现,给 SPAC 水分传输动态模拟提供了方便。

关于 SPAC 水分传输问题的研究,美国、澳大利亚、苏联、荷兰、英国、加拿大、日本、法国、德国、以色列等十多个国家起步较早,其研究较广泛深入。我国在这方面的研究起步于 80 年代初期,在短短的 10 年中,做了大量的工作,在某些方面取得的成果,其水平与发达国家是可以相比的。本文将作者近 10 年的研究成果为基础,结合国内外在该领域的进展,对 SPAC 水分传输动力学及其应用中的几个问题进行阐述,其目的在于期望引起国内更多的同行对 SPAC 水分传输动力学这一新的科学领域的关心。

## 2. SPAC 中的水势分布及相互反馈关系

自然界中的物体都具有能量,而且,普遍的趋势是自发地由能量高的状态向能量低的状态运动或转化,最终达到能量平衡状态。经典物理学认为,任一物体所具有的能量由动能和势能组成。由于 SPAC 中水分传输速度相对较慢,其动能可略而不计。因此,系统中水分所具有的势能在决定水分的能态和运动上就变得极为重要,完全可以应用统一的能量指标——“水势”来定量研究整个系统中各个环节能量水平的变化。

水势的概念是以 Gibbs 自由能为基础的。土水势和植物细胞水势都由基质势(在土壤中是由土壤颗粒对水分的吸附力、毛管力作用产生的;在植物中则表示细胞内和胞壁中束缚水分的胶

体和表面以及毛细管作用的影响)、溶质势、压力势、重力势和温度势所构成。大气水势能由水势的定义用相对湿度和绝对温度计算,即:

$$\psi_a = 4.6248 \times 10^5 T_a \cdot \ln(RH) \quad (2)$$

式中,大气水势的单位是 Pa。

土水势采用张力计或其它方法测定,也能由土壤水分特征曲线根据土壤含水量计算;植物不同部分的水势能由小液流法或压力室测定。作者在 1988 年—1991 年冬小麦、玉米和大豆生育期内系统地观测了 SPAC 中的水势分布。<sup>[9]</sup>结果表明 SPAC 中的水势分布具有明显的日变化,这种日变化受土壤水分能态和天气条件的综合影响。系统中的水势降低能由午夜之后至清晨 6 时前后的负值(大气水分凝结)变到中午的 50—100MPa(强烈蒸腾)。土壤与植物叶片之间的水势差在生长前期达 0.6—1.0MPa,到中后期可达 2.0MPa 以上。

由于系统中产生了相变,因此,由式(1)根据系统中的水势差和水流速率估算其水流阻力的量级是不实际的,这只是为了实用上的方便,在其理论上仍存在局限性。<sup>[9,10]</sup>

SPAC 中各部分水势相互反馈影响。植物水势是土水势和大气水势综合作用的结果。叶水势是作物体内水分状况的一种量度指标,在农田灌溉预报中常用叶水势作为一种灌水指标。因此,研究系统中叶水势的变化规律及其动态模拟方法具有重要的意义。根据作者等人的研究叶水势受许多因素的复杂影响,<sup>[11]</sup>用一种简单的经验模式不能准确反映其动态变化规律。因此,作者首先曾采用了稳态模型对叶水势进行动态模拟。<sup>[9]</sup>

据 Van den Honert 假定,则从土壤到叶的水流速率为:

$$q = (\psi_s - \psi_L) / (R_s + R_p) \quad (3)$$

式中,  $R_s$  与  $R_p$  分别是土壤阻力和植株体阻力,  $\psi_s$  与  $\psi_L$  分别是土水势与叶水势。其水流速率  $q$  等于叶片蒸腾速率  $T$ , 而蒸腾速率  $T$  能由以能量平衡法为基础的彭曼-蒙特斯 (Penman-Monteith) 模式计算,<sup>[12]</sup>即:

$$T = \left[ \frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_{nl} + \frac{\rho C_p}{\gamma} (e_s - e_a) / r_a \right] / \lambda \left[ \frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + (1 + r_{sT} / r_a) \right] \quad (4)$$

式中:  $P_0$  与  $P$  分别为海平面标准大气压和计算地点的气压,  $\Delta$  是饱和水汽压-温度曲线上的斜率,  $\gamma$  是湿度计常数,  $R_{nl}$  是冠层所接受的净辐射,  $\rho$  是空气密度,  $C_p$  是空气定压比热,  $e_s$  与  $e_a$  分别是饱和水汽压与实际水汽压,  $r_a$  是空气动力学阻力,  $\lambda$  是汽化潜热,  $r_{sT}$  是冠层整体气孔阻力。

式(4)中的气孔阻力  $r_{sT}$  与式(3)中的叶水势  $\psi_L$  是有关的,大量研究结果表明,气孔阻力和叶水势之间具有线性关系 (Jarvis, 1980; Ludlow, 1980; H. G. Jones, 1983; Fisher 等, 1981), 作者的研究成果也证明是如此。<sup>[13]</sup>因此有:

$$r_{sT} = a + b\psi_L \quad (5)$$

式中:  $r_{sT}$  的单位是 s/cm,  $\psi_L$  的单位是 MPa。据作者的分析结果, 冬小麦  $a = -0.4967$ ,  $b = -3.463$ ; 玉米  $a = -0.1500$ ,  $b = -5.750$ 。

由式(3)、式(4)与式(5)联立求解叶水势,得:

$$\psi_L = [-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}] / 2A \quad (6)$$

其中,

$$A = E' \quad (7)$$

$$B = \gamma - E'\psi_s \quad (8)$$

$$C = (R_s + R_p) \left[ \frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_{nl} + \frac{\rho C_p}{\gamma} (e_s - e_a) / r_a \right] / \lambda - \gamma \psi_s \quad (9)$$

$$E' = b/r_s \quad (10)$$

$$r' = \frac{P_s \Delta}{P \gamma} + (1 + a/r_s) \quad (11)$$

由以上过程可知,叶水势  $\phi_i$  随土壤基质势的变化不是线性的,在相同的土水势时,叶水势则由天气状况所制约。在已知各输入变量的条件下,则能模拟叶水势的动态变化。作者用该模型模拟了冬小麦和玉米生长期内叶水势的日变化,并与田间实测结果进行了对比,结果表明模拟值与实测值的变化趋势一致,且两者相差较小。只是中午至下午4时之间两者有一定的差距,这可能是因为根系吸水小于蒸腾而由植株体释放水分所引起的。因此,稳态模型在此时有一定的局限。

若考虑植物组织的充水和释水作用,则由土壤进入植株的水流速率等于蒸腾速率与植物水容(C)的变化,<sup>[10]</sup>所以:

$$(\phi_s - \phi_i)/(R_s + R_p) = T + C d\phi_i/dt \quad (12)$$

设初始时刻  $t = 0$  时的叶水势为  $\phi_{i0}$ ,经  $\Delta t$  后变为  $\phi_i(t)$ ,近似地取  $d\phi_i = \Delta\phi_i = \phi_i(t) - \phi_{i0}$ ,对式(12)从  $t = 0$  到  $t = \Delta t$  积分,得:

$$\phi_i(t) - \phi_{i0} + \int_0^t \frac{\phi_s - \phi_i(t)}{C(R_s + R_p)} dt = \int_0^t \frac{T(t)}{C} dt \quad (13)$$

若  $\Delta t = 1h$ ,则在  $\Delta t$  时段内可近似将  $\phi_i(t)$ 、 $T(t)$  看成是线性函数,<sup>[11]</sup>于是有:

$$\begin{aligned} \phi_i(t) - \phi_{i0} & \left[ \frac{2C/(R_s + R_p)}{2C(R_s + R_p) + \Delta t \phi_i(t)} \right] + \frac{2\phi_i}{2C(R_s + R_p) + \phi_i(t)\Delta t} \\ & - \frac{\Delta t(R_s + R_p)[T(t) - T_0]}{2C(R_s + R_p) + \Delta t \phi_i(t)} \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $T_0$  是  $t = 0$  时的蒸腾速率,  $T(t)$  是  $\Delta t$  时段后的蒸腾速率。由于式(14)是隐式方程,因此  $\phi_i(t)$  要用迭代法求解。

### 3. SPAC 中的水流阻力与水容分布规律

SPAC 中的水流阻力包括土壤阻力、土根接触阻力、根系吸收阻力、茎内和枝条的木质部阻力、叶肉阻力和叶片气孔阻力以及空气边界层阻力。SPAC 中主要的水流阻力发生在水分进入植物根系和离开植株叶片这两个部分。植物根系吸收阻力和叶气孔阻力是决定 SPAC 中液态水流与气态水扩散的控制因素。由于在 SPAC 中水分产生了相变,因此,不便于把土壤-植物系统的水流阻力与植物叶片-大气系统的水分扩散阻力相比较。

据研究,土壤基质势越低,土壤阻力越高,当土壤饱和或接近饱和时,其水流阻力相对于植株体来说可忽略不计。在田间条件下,土壤阻力  $R_s$  最大可达  $200\text{Pa}(\text{W}/\text{m}^2)^{-1}$ 。在冬小麦抽穗灌浆阶段的植株体阻力  $R_p$  最大达  $1.5 \times 10^4\text{Pa}(\text{W}/\text{m}^2)^{-1}$ ,在玉米抽雄灌浆阶段的植株体阻力  $R_p$  最大达  $1.6 \times 10^4\text{Pa}(\text{W}/\text{m}^2)^{-1}$ 。作物生育后期的  $R_p$  比前期大 2—4 倍。在作物相同阶段,缺水处理和充分供水处理的  $R_p$  相差不太明显,且缺水处理的水流阻力略低于充分供水的,这可能是由于充分供水处理的根系主要分布于表层,而缺水处理的根系要向更深层土壤伸展所引起的。但这种差异要比  $R_s$  的变化小得多。 $R_p$  具有明显的日变化,11:00—15:00 时较小,夜晚的  $R_p$  要比中午的大 2 倍以上。Neuman 等<sup>[12]</sup>根据不同蒸腾速率下,在茎秆的不同高度测定的叶水势估算水分运行阻力,计算出玉米茎的阻力为植株总阻力的 15—25%,但在向日葵中仅占 8%;叶片阻力分别占 15—30% 和 20%;根的阻力在玉米中占总阻力的 50—70%,在向日葵中占 70%。

空气边界层阻力与冠层上方风速和冠层状况有关,在风速为  $1\text{m}/\text{s}$  时,其值为  $100\text{s}/\text{m}$  的量

级;当风速很小时,其值超过  $400\text{s/m}^{0.4}$ 。叶气孔阻力依赖于环境和植物内部状态,外部主要的影响因子是光、温度、湿度和水的供应;内部因子包括在胞间系统中  $\text{CO}_2$  的分压、在细胞中水和离子的含量以及植物激素。据作者研究在影响气孔阻力的气象环境因素中,光的作用是最重要的,气孔阻力变化在  $50\text{--}1000\text{s/m}$  的范围内,土水势愈低,气孔阻力愈大,且具有明显的日变化。<sup>[11]</sup>

气孔阻力  $r_{sT}$  与边界层阻力  $r_s$  的相对重要性在不同条件下不同。在  $1\text{m/s}$  的风速时叶气孔阻力  $r_{sT}$  与空气边界层阻力  $r_s$  的比值在  $3\text{--}5$  左右,在土水势较低时,比值还会增大;而在风速很小时,  $r_{sT}$  与  $r_s$  近似相等。根据冠层能量平衡方程和感热、潜热传输方程可得  $r_{sT}/r_s$ :

$$r_{sT}/r_s = \frac{\gamma \cdot r_s \cdot R_{nl} / \rho C_P - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_s - e_a)}{\gamma[(T_c - T_a) - r_s R_{nl} / (\rho C_P)]} \quad (15)$$

式中,  $T_c$  与  $T_a$  分别是冠层温度和气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

水容( $C$ )是储水量随水势的变化率,这种概念能应用于 SPAC 中各个部分,即:

$$C = \frac{dW}{d\psi} = W_{\max} \frac{d\theta}{d\psi} = W_{\max} C_1 \quad (16)$$

水容的单位是  $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ ,比水容  $C_1$  的单位是  $\text{MPa}^{-1}$ ,储水量  $W_{\max}$  的单位是  $\text{m}^3$ 。

土壤水容  $C_s$ 、根系水容  $C_r$ 、茎水容  $C_x$ 、叶水容  $C_l$  和大气水容  $C_a$  在整个 SPAC 水流阻-容网络中是并联的,<sup>[11]</sup>因此,并联水容  $C_s, C_r, C_x, C_l, C_a$  组合的等值水容  $C$  是各部分水容的总和,即:

$$C = C_s + C_r + C_x + C_l + C_a \quad (17)$$

同理,植物组织的总水容  $C_p$  为:

$$C_p = C_r + C_x + C_l \quad (18)$$

土壤比水容随土壤含水量变化较大,据作者在西北农业大学灌溉试验站进行的试验研究结果表明,土壤含水量从  $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^3$  增大到  $0.45\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,土壤比水容则从  $0.0791\text{MPa}^{-1}$  变为  $26.241\text{MPa}^{-1}$ 。植物的比水容对于不同作物以及同一作物不同的器官虽有差异,但基本上是同一量级,在正常生长条件下,相对含水量在  $0.70\text{--}0.85$  时,其比水容在  $0.25\text{--}0.40$  左右。虽然植物的比水容随其含水量的变化而变化,但变化的幅度要比土壤比水容小得多。大气比水容与相对湿度成线性关系,与气温成反比。在气温为  $20^{\circ}\text{C}$  时,大气相对湿度从  $20\%$  升高到  $90\%$  其比水容从  $0.0216\text{MPa}^{-1}$  变到  $0.0972\text{MPa}^{-1}$ 。

植物体的总水容  $C_p$  常采用抑制蒸腾、使植物体内充水的办法进行测定。据邵明安等(1991)的资料表明在土壤-植物系统中的平均水容为  $5.2 \times 10^{-7}\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ ,在此系统中水容的各个分量中,土壤水容最大,且随土水势的变幅大;植物水容远比土壤水容小,且随叶水势的变幅远比土壤水容随土水势的变幅小,植物茎叶的水容比根系的水容大。<sup>[20]</sup>

#### 4. SPAC 中的水流通量

将达西 (Darcy, 1856) 定律推广应用到非饱和土壤,则非饱和水流通量为:

$$q = -K(\phi_m) \nabla \phi \quad (19)$$

因基质势  $\phi_m$  是含水量的函数,  $\nabla \phi$  是土水势梯度,由于导水率  $K$  和含水量  $\theta$  的关系受滞后作用的影响较小,故将  $K$  能表达为  $\theta$  的函数,此外,非饱和土壤水的土水势主要包括基质势和重力势,若规定垂直座标取向为正,则达西定律又可写为:

$$q = -K(\theta)[\nabla \phi_m + \nabla z] \quad (20)$$

在非饱和水流中,需要处理  $\phi_m$  与  $\theta$  之间的滞后作用问题。为求得一般的水流通量公式,并说明瞬变以及非稳定流动过程,需要引用连续性方程。由连续方程和达西定律得到非饱和土壤水

运动的基本方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla [K(\phi_m) \nabla (\phi_m + z)] \quad (21)$$

对于一维垂向流则为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\phi_m) \frac{\partial \phi_m}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\phi_m)}{\partial z} \quad (22)$$

在用宏观法研究植物根系吸水时,根区土壤水分运动的基本方程则需在式(21)的右端加上三维的吸收项(源汇项)或在式(22)的右端加上一维的吸收项。如在一维垂向流时:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\phi_m) \frac{\partial \phi_m}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\phi_m)}{\partial z} - S_s(z, t) \quad (23)$$

若不考虑滞后作用,则式(23)能表达为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S_s(z, t) \quad (24)$$

式中,  $D(\theta)$  是土壤水扩散率,  $K(\theta)$  或  $K(\phi_m)$  是土壤导水率。在一定的定解条件下求解式(23)或式(24)能得到  $\phi_m$  或  $\theta$  的时空分布,相应地能求得土壤水流通量。

植物体内的水分运动通量  $q$  (cm/s) 与势差  $\Delta \phi$  为线性关系,考虑到水由一个细胞渗透到另一细胞时,必须透过两个细胞膜,故有:

$$q = -\frac{k}{2} \cdot \Delta \phi \quad (25)$$

其中  $k$  为细胞膜的渗透系数 (cm/(s · Pa))。若考虑细胞-细胞壁路径的水分传输,且假定细胞膜为完全半透膜,压力势  $\phi_p = 0$  时,每个细胞的体积  $V_0$  和初始溶质势  $\phi_0$  相等,各细胞的弹性模量  $E$  和渗透系数  $k$  均相同, Molz 等人 (1974) 经分析得出描述此种细胞渗流模型的基本方程:<sup>[21]</sup>

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - D_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{(\phi - \tau)}{RC_1} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} - D_2 \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} - \frac{(\phi - \tau)}{RC_2} \quad (27)$$

式中:  $\phi = \phi_p + \phi_s$  为细胞中的水势,  $\tau$  为细胞壁中的压力势,亦即其水势,  $R$  为细胞壁和细胞间渗透的阻力 (Pa · s/cm<sup>3</sup>),  $C_1$  与  $C_2$  分别为细胞-细胞路径中和细胞壁路径中每个细胞的水容 (cm<sup>3</sup>/Pa),  $D_1$  与  $D_2$  分别为细胞-细胞路径和细胞壁路径中的扩散系数。

水分自多孔的叶面蒸腾,由于叶面积上的小孔(气孔)形成壳形的蒸气流股,要比通过与该叶面面积同大小的孔洞的通量大得多。根据 Fick 第一扩散定律,通过叶片气孔跨越叶片层流边界层的水分扩散通量为:

$$q_s = -D \frac{dc}{dx} \quad (28)$$

式中,  $D$  是水分扩散率,  $dc/dx$  为水汽浓度梯度。

就叶面蒸腾而论,水蒸气必须通过叶片本身的阻力  $r_{ii}$  加空气边界层的阻力  $r_a$  两个串联的阻力而扩散,因此,式(28)也能用如下差商形式表达:

$$q_s = \frac{C_i - C_a}{r_{ii} + r_a} \quad (29)$$

式中,  $C_i$  与  $C_a$  分别是叶片内部与大气的水汽浓度。若从能量平衡原理出发, 则蒸腾通量  $q$ , 也能用式(4)计算。

在 SPAC 中水分传输的驱动力是水势梯度, 根据 Van den Honert 的稳定流模式, SPAC 中的水流量与水势差成正比。因此, 蒸腾通量与叶-气系统水势差成正比。据我们的研究结果分析表明, 在一定的范围内植物的蒸腾通量随叶-气系统水势差增加而增加, 但在冬小麦生育期内叶-气系统水势差达 80MPa, 在玉米生育期达 90—100MPa 之后, 蒸腾通量不再随叶-气系统水势差增加而增加, 甚至有部分结果还出现下降趋势。这是因为当叶-气系统水势差  $\Delta\psi_{i,a}$  超过一定值时, 蒸腾通量大于根系吸水通量, 一方面气孔调节作用对蒸腾通量产生影响, 另一方面植物水容对植物体内水分运动产生作用。因此, Van den Honert 的稳定流模式仅在一定的  $\Delta\psi_{i,a}$  范围内成立。我们的试验结果还表明并不是只要有  $\Delta\psi_{i,a}$  存在, 就一定有蒸腾通量产生, 只有当  $\Delta\psi_{i,a}$  达到 5MPa 以后才有蒸腾通量。

作者曾对 SPAC 中的根系吸水通量和蒸腾通量的计算进行了大量的研究, 提出过冬小麦、玉米根系吸水模式与蒸腾通量的计算方法。<sup>[22,23]</sup>

## 5. SPAC 水分传输动态的模拟

关于 SPAC 水分传输动态模拟有许多研究,<sup>[24-26]</sup>但过去的研究侧重于研究土-根系统的水分传输和蒸发蒸腾过程, 对土壤水分动态变化和蒸发蒸腾的相互反馈关系研究不够。作者曾从整体上和相互反馈关系上提出了一个描述 SPAC 水分传输过程的动力学模式。<sup>[27]</sup>该模式包括描述从土壤水(源)到大气水(壑)中根区土壤水分传输、根系吸水和蒸发蒸腾 3 个子模型。

根区土壤水分传输动态模拟模型就是式(23)或式(24), 其定解条件写为:

$$\theta(z, t)|_{z=0} = \theta_0(z) \quad (30)$$

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta)|_{z=0} = -E_r(t) + R(t) \quad (31)$$

$$\theta(z, t)|_{z=d} = \theta_0(d) \quad (32)$$

式中,  $\theta$  是土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $t$  是时间(h);  $z$  是深度坐标, 以土壤表面为参考面, 向下为正(cm);  $E_r(t)$  是棵间土壤蒸发速率 ( $\text{cm}/\text{h}$ );  $R(t)$  是入渗速率 ( $\text{cm}/\text{h}$ );  $d$  是土壤中含水量基本不变的深度。

式(24)与式(30)、式(31)及式(32)反映了根区土壤水分分布在作物根系吸水、土壤蒸发或入渗等因素影响下的动力学过程。

作者曾根据根系吸水条件下的土壤含水量和棵间蒸发实测资料, 利用根系吸水条件下的土壤水运动基本方程对根系吸水进行了动态模拟, 分析了根系吸水速率与土壤含水量、根系密度分布及作物蒸腾的关系, 从实际应用出发, 建立了作物根系吸水模型, 对于冬小麦其具体形式为:<sup>[22]</sup>

$$S_r(z, t) = T_p(t) \cdot \frac{1.80e^{-1.80z/z_r}}{(1 - e^{-1.80z_r})z_r} \cdot \left( \frac{\theta(z, t) - \theta_{WP}}{\theta_F - \theta_{WP}} \right)^{0.6967} \quad (33)$$

式中,  $T_p(t)$  是作物潜在蒸腾量;  $z_r$  是根系伸展深度, 随时间而变化;  $\theta_F$  是田间持水量;  $\theta_{WP}$  是凋萎含水量。

潜在蒸腾能采用式(4)确定。实际蒸腾则为:

$$T(t) = \int_0^{z_r} S_r(z, t) dz \quad (34)$$

若考虑系统中水容  $C$  的影响, 则可在式(34)的右端加上  $C_p$  与从植物根系到叶片间水势差  $\Delta\psi_{i,a}$

的乘积。

在输入各有关参数后,即可对根区土壤水分动态、根系吸水和蒸发蒸腾进行动态模拟。由于式(24)是非线性、非齐次的偏微分方程,一般用数值方法求解。作者曾采用仿真算法,即只在深度方向离散得到:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{D_{i+1/2}}{(\Delta z)^2} (\theta_{i+1} - \theta_i) - \frac{D_{i-1/2}}{(\Delta z)^2} (\theta_i - \theta_{i-1}) - \frac{1}{\Delta z} (K_{i+1/2} - K_{i-1/2}) - S_r(i, t) \quad (35)$$

对于在时间方向连续、在深度方向离散的方程采用四阶变步长龙格-库塔法积分,即可得土壤水分的动态分布和相应的根系吸水和蒸发蒸腾的动态变化过程。在计算时采用连续系统仿真语言 SLCSIV (*Simulation Language of Continuous System*, 第四版本) 设计 SPAC 水分传输动态计算机仿真程序,具有结构简便、运算速度快、输出形式灵活、直接进行积分运算、能进行不同参数条件下的 SPAC 水分传输动态仿真。作者曾用该法对 1990 年和 1991 年冬小麦生育期内 SPAC 水分传输动态进行了仿真,在 1990 年仿真得到的土壤容积含水量最大偏差为 2.08% (相当于重量含水量的 1.43%), 平均偏差为 1.338% (相当于重量含水量的 0.923%), 蒸发蒸腾量的相对误差为 -10.83%; 1991 年仿真得到的土壤容积含水量最大偏差为 2.48% (相当于重量含水量的 1.72%), 仿真值与实测值的平均偏差为 1.90% (相当于重量含水量的 1.32%)。

## 6. SPAC 水分传输动力学的应用

从 70 年代后期至今的十多年里,一些发达国家对 SPAC 水分传输动力学的研究,已远远不只局限于 SPAC 本身的基本理论,而是将 SPAC 水分传输动力学理论和方法作为基础来解决生产实践中比较复杂和综合的问题。

S. K. Gupta, K. K. Tanji 和 D. R. Nielson 等人结合喷灌和氮肥施用速率预报根层氮素淋失的研究对 SPAC 理论的应用进行了探讨,因为在预报氮素淋失中,必须首先知道通过土壤剖面中的水流,然后才能进一步联系到氮素的吸收、转化和运移。

SPAC 水分传输动力学理论应用于农业水文学领域,大都可以连续模拟集水区内部各部位水分运动的数量和速率,比较具有代表性的如美国农业部水文实验室的 USDAHL 模型<sup>[24]</sup>,通过分区来模拟土壤与植被的空间变化,每区又分为若干均质土层,蒸散和入渗都是根据作物特性及当时的土壤湿度计算的。

SPAC 水分传输动力学理论在农田灌溉学科中的应用主要是解决如下一些问题: 1) 应用 SPAC 水分传输动态模拟方法预测田间土壤水分和作物蒸发蒸腾的动态变化,为农作物灌溉制度的确定和灌水预报服务; 2) 通过研究以土壤水和作物关系为中心的 SPAC 水分运行模型及灌溉水(降水)-土壤水-作物水之间的转化效率、SPAC 中的水量转化与光合作用之间的耦合问题,探讨各环节的节水调控原理; 3) 从 SPAC 水分传输动力学理论出发探讨土壤水分对植物有效性动态评价理论及作物缺水受旱的诊断方法<sup>[25]</sup>,为农田灌溉学科提供一个以严格的生理学和物理学为基础的解决作物与它的水分环境关系问题的定量途径; 4) 以减少作物水分散失、提高光合产物向经济产量转化效率为目标的 SPAC 水分最优调控问题。

## 7. 展 望

尽管 SPAC 水分传输动力学问题的研究才 20 多年的历史,但由于它促进了有关边缘学科



相互渗透, 具有较大的理论意义和实用价值, 因此在宏观和微观研究两个方面都取得了相当大的进展。

我国虽然在这方面的研究从 80 年代初才开始, 但在 SPAC 水分传输理论及其应用的某些方面也取得了较大的进展。SPAC 水分传输动力学及其应用的研究是一个具有重大科学意义和广阔应用前景的新领域。

随着该领域研究的进一步深入, 有关大气、土壤和植被的界面过程问题, 试验研究的尺度问题, 土壤、植被条件的非均匀性问题, 连续体内各部分介质的非线性相互作用问题等将会成为本领域的前沿课题。

### 参 考 文 献

- [1] Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, 1960 (89): 63—73
- [2] Cowan I R. Transport of water in soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.*, 1965(2): 221—229
- [3] Philip J R. Plant water relations: Some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1966(17): 245—268
- [4] Van den Honert T H. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 1948(3): 146—153
- [5] Cowan I R and Milthorpe F L. Plant factors influencing the water status of plant tissues. In "Water Deficits and Plant Growth" (T. T. Kozlowski, ed.). New York: Academic Press, 1968(1): 137—193
- [6] Kaufmann M R and Hall A E. Plant water balance—its relationship to atmospheric and edaphic conditions. *Agric. Meteorol.* 1974(14): 85—98
- [7] Waring R H and Running S W. Sapwood water storage: its contribution to transportation and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant Cell Environ.* 1978(1): 131—140
- [8] 康绍忠, 熊运章, 王振镒. 土壤-植物-大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究. *水利学报*, 1991(7): 9
- [9] Boyer J S. Water transport in plants: mechanism of apparent changes in resistance during absorption. *Planta*, 1974(117): 187—207
- [10] Fiscus E L. The interaction between osmotic and pressure induced water flow in plant roots. *Plant Physiology*, 1975(55): 917—922
- [11] 康绍忠, 刘晓明, 王振镒. 冬小麦叶片水势、气孔阻力、蒸腾速率与环境因素之间的关系, 灌溉排水, 1991(3): 1—6
- [12] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 用彭曼-蒙特斯模式估算作物水分散失量的研究. *西北农业大学学报*, 1991(1): 13—20
- [13] Jarvis P G. Stomatal response to water stress in Conifers. In "Adaptation of plants to water and high temperature stress" (Turner, N. C. and Kramer, P. J., eds.). New York: Wiley, 1980: 105—122
- [14] Ludlow M M. Adaptive significance of stomatal responses to water stress. In Turner and Kramer, 1980: 123—138
- [15] 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论的研究. 西北农业大学 1990 届博士研究生学位论文, 1990: 30
- [16] Wallace J S and Biscoe P V. Water relations of Winter wheat. 4. Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant system. *J. Agric. Sci., Cambridge*: 1983 (100): 591—600.
- [17] 刘冀, 王天铎. 叶片水分状况及水量平衡的动态模拟. *植物生理学报*, 1988, 14: 136—144
- [18] Newman E I. Root and soil water relations. In "The Plant Root and its Environment" (E. W. Carson, ed.), Univ. Press of Virginia, Charlottesville, 1974: 363—440
- [19] Jones H G. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, 1983: 76—81
- [20] 邵明安, 陈志雄. SPAC 中的水分运动. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊, 1991(13): 6
- [21] Molz F J, Ikenberry E. Water transport through Plant cells and cell walls: Theoretical development. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1974(38): 699—704
- [22] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 作物根系吸水模式的研究. *西北农业大学学报*, 1992(2)
- [23] 康绍忠, 刘晓明. 冬小麦蒸腾量计算方法研究. *水科学进展*, 1992(1)
- [24] D. 希勒尔, 土壤水动力学的计算机模拟(罗焕炎等译). 农业出版社, 1979: 34—35
- [25] Nimah M N and Hanks R J. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1973(37): 522—527
- [26] 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水热动态模拟研究. *生态学报*, 1991(11): 256—261
- [27] 康绍忠, 刘晓明, 高新科等. 土壤-植物-大气连续体水分传输动态的计算机仿真研究. *水利学报*, 1992(1).
- [28] Elsokkary T H. *Plant and Soil*, 1980(54): 383—393
- [29] 康绍忠, 熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究. *水利学报*, 1991(1): 34—39