

# SPAC 中的水分运动\*

邵明安

陈志雄

(中国科学院  
水 利 部 西北水土保持研究所)

(中国科学院南京土壤研究所)

## 摘 要

本文对土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中水分运动的诸多方面, 如非饱和土壤水分的导水参数, 植物根系吸收土壤水分, 植物根系中的水分运动, SPAC中的水流阻力及水容, 土壤水分有效性动力学, 滞后效应以及SPAC中水流的电模拟等, 进行了介绍、评述和论述。

**关键词:** 土壤—植物—大气连续体 土壤水分 水分运动

## WATER MOVEMENT IN SPAC

Shao Mingan Chen Zhixiong

### Abstract

In this paper, some aspects of water movement in the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC), Such as unsaturated hydraulic conductivity and water diffusivity, water uptake by plant roots, water movement in plant roots, hydraulic resistances and capacitances in SPAC, the dynamics of soil water availability to plants, hysteresis effect and the electric analogy of water flow in SPAC, and so on, were reviewed and discussed.

**key words:** Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC) soil moisture water movemement.

## 0 引 言

当代研究田间土壤水分循环和平衡、土壤—植物水分关系以及五水(地下水、土壤水、地表水、植物水和大气水)转化是以土壤—植物—大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称SPAC) 为基础的<sup>[1, 2]</sup>。在SPAC中, 由于统一了能量关系, 为分析和研究系统中的水分运输、能量转化的动态过程提供了方便。

1966年, 由 Philip 提出的较完整的SPAC概念<sup>[3]</sup>, 认为尽管系统中各部分的介质不同、界面不一, 但在物理上可以看作一个连续的统一体系, 水分在该系统中运动的各种过程就象链环一样, 互相衔接, 其水流通量取决于势梯度和水流阻力。这一概念的提出极大地推动了土壤—植物—大气系统中水分关系等方面的研究工作。

水分从土壤经植物到大气的运输过程是一个生物—物理的、统一的和连续的动态过

\* 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

程。在这个过程中,水流逆着势梯度运行。其水流途径是:土壤水分流向植物根系表面,由根表面穿过表皮、皮层、内皮层而进入木质部,由根木质部经茎木质部输送到叶木质部,在叶部胞间汽化,水汽穿过气孔腔和其他孔洞,进入与叶面接触的静空气层,穿过这层进入湍流边界,最后转移到外面大气中去。

美国、英国、加拿大、澳大利亚、荷兰、波兰、比利时、法国、德国、以色列、印度等十多个国家,尤其是美国在这方面的研究更为广泛和深入。由于这一问题的复杂性,除土壤物理、植物水分生理、农业气象把它作为重要课题联合攻关外,同时它还涉及到其他相关学科,如作物栽培、生态地理、环境生态、生物地理、农田水利、灌溉排水、水文地质、水文气象等。晚近,由于数学、物理学、计算机科学等基础学科向这一领域的不断渗透,从而使其研究更加深化。

关于SPAC中的水分运行的研究,国内起步于80年代,在短短的10年里,尽管我们的工作与欧美等发达国家科学家的工作相比,在整体水平上仍有较大差别,但我们做了一些重要的基础工作,在某些方面取得的成果,其水平是可以与发达国家权威性科研机构水平相比的。本文试图就SPAC中水分运动的各个过程,结合国内外已经取得的科研成果,以我们自己的研究结果为基础,对SPAC中水分运动动力学的基本方面做力所能及的论述,期望它将有助于引起国内更多的有关同行对SPAC中水分运动问题的关心,共同把这一重要的科学领域推向一个新的发展阶段。

## 1 非饱和土壤的运动参数

非饱和土壤的基本水分运动参数指导水率( $K$ )、水分扩散率( $D$ )和比水容( $C$ )。由于 $K = C \cdot D$ ,因此,三个参数中只有两个是独立的。

按推求和测定非饱和土壤导水参数时水流的状态,其推求测定方法可分为稳态和瞬态两大类,每一大类中又包括室内法和田间法。

稳态室内法包括水头控制法<sup>[4]</sup>、通量—水头控制法(入渗)<sup>[4,5]</sup>、水头—通量控制法(蒸发)<sup>[5]</sup>、长柱入渗法<sup>[6-8]</sup>、基质通量势法以及稳定蒸发法等<sup>[9,10]</sup>;田间法则有供水入渗计法<sup>[11-14]</sup>、分离土柱法<sup>[15,16]</sup>、三维入渗法<sup>[17]</sup>、圆盘积水入渗/滴灌法等<sup>[18-20]</sup>。

瞬态室内法包括瞬时剖面法<sup>[21-23]</sup>、压力板出流法<sup>[24]</sup>、一步出流法<sup>[25-28]</sup>、玻尔兹曼变换法(包括定时和定位两种)<sup>[29-31]</sup>、热空气法<sup>[32-34]</sup>以及通量控制吸力法等<sup>[35,36]</sup>;其田间法有瞬时剖面法<sup>[37]</sup>、单位梯度法(包括通常法和简单法)<sup>[38-40]</sup>以及喷洒入渗计法等<sup>[12-14]</sup>。

对上述各种推求和测定方法,采用统一的标准进行综合评价发现,一种方法要同时具备理论基础坚实、测定准确度高、测定范围广和设备简单等特点是很困难的<sup>[41]</sup>。为此,我们提出的根据土壤水分的再分布过程确定非饱和土壤导水参数的方法<sup>[42]</sup>,具有上述特点<sup>[43]</sup>。若将垂直入渗再分布与水平扩散再分布结合起来,其优越性就更为突出了<sup>[41]</sup>。

测定土壤基质势的方法通常有张力计法、离心机法、压力膜法、吸力板法、石膏块法、热电偶湿度计法、渗透张力计法以及过滤纸法等。其中除张力计、石膏块可方便应用于田间外(石膏块受土壤盐分影响较大),其余方法仅适宜室内测定。我们曾对最常

用的三种测定方法,即张力计法、离心机和压力膜法,从土壤水分动态模拟的角度,对其测定准确性进行了评价<sup>[44]</sup>。

## 2 植物根系吸收土壤水分

SPAC中一个重要的子系统就是土-根系统。土-根系统中的水分动力学包括两个方面,即根系吸水和根内水分运动。

定量描述根系吸水需要数学模拟。根系吸水的数学模型有两种<sup>[45]</sup>:微观模型和宏观模型。微观模型又称单根径向流模型。研究流向和进入典型单根的径向流,假定此单根视为无限长的、半径均匀的和具有均匀吸水特性的圆柱体,作为整体的根系用一系列这样的单根来描述。由于微观模型受限制较多<sup>[45]</sup>,目前大多使用宏观模型。

宏观模型又叫根系统模型,把整个植物根系看作是每一深度的土壤中分布均匀而整个根区其密度随深度变化的吸水器,整个根系统以随时、空而变的速率 $S$ 从不同深度的土壤中吸收水分。其模型是在Darcy-Richards方程右边加上一个吸收项而得到。因此,提出和改进模型的实质在于用不同的吸收项(吸水函数)来刻画根系吸水。自Gardner<sup>[46]</sup>提出第一个吸水函数以来,很多研究者围绕这一问题做了大量工作<sup>[47-51]</sup>。特别是Molz 1981年提出的吸水函数具有较广泛的代表性和较重要的参考价值<sup>[53]</sup>。在上述模型基础上,我们发现,尽管这些模式各有所长,但仍存在不少限制。多数模式共同的弱点是:根系吸水速率的上下限没有明确规定;没有对影响根系吸水的因素予以较全面的定量考虑,Molz等人提出用有效根密度描述根系吸水,虽能较好地预报土-根系统中的水分动态,但没能揭示有效根密度的物理基础<sup>[53]</sup>。我们在植物根系吸水物理过程定量分析的基础上,提出的根系吸水宏观数学模型,比较完满地解决了上述问题<sup>[53]</sup>。但这一模型的表达式比较复杂,为此,我们又提出了既能在较大程度上反映吸水机理又方便应用的简化模型<sup>[54]</sup>。既反映机理、表达式又不能太复杂似应作为这一领域深化的方向。

## 3 根系中的水分运动<sup>[55]</sup>

植物根系中的水分运动是SPAC中水分运行的另一个重要环节。根系中的水分运动包括两个方面,其一是水分由根表面向根木质部的径向流动;其二是水分沿根部导管的轴向流动。

根系的水分动力学性质,如吸水性、透水性、传导性以及水流阻力、水容等等,在植物品种之间、同一植物不同根系之间、同一根系不同部位之间以及不同环境条件,均存在差别。例如,生长室内根系吸水实验的测定结果表明:在0.25~0.63MPa的水势差范围内,鹰嘴豆根系的吸水速率都比春小麦根系的大一个量级左右;这种吸水性的差异随水势差的增大而增大。此外,这两种植物根系的非线性流特性也存在差异,鹰嘴豆根系的最小驱动水势差约为0.2MPa,春小麦则为0.1MPa,春小麦根系的非线性流主要发生在当水势差较小时(小于0.4MPa),而鹰嘴豆的非线性流特征则在小于0.6MPa的势差段,且整体的非线性流特征与春小麦不同。若用抛物线近似的话,前者的抛物线其开口向上,后者的则向右。根系的其他水分动力学性质随上述众多因素的变化情况详

见文献<sup>[55]</sup>。

根系除对通过它的水流呈现相当大的阻力外,还兼有水容特性。根系的水流阻力和水容均随植物的生长发育而变<sup>[56]</sup>,冬小麦根木质部水流阻力随时间的变化表明:木质部导管中可能存在活的内含物和沿轴向有多孔隔板。木质部中的水流所遇到的阻力通常比径向流的小很多。然而还没有充分的证据表明是否在水分胁迫情况下木质部导管中(特别是大导管)气泡的形成会大大地增加其阻力。

## 4 SPAC中的水流阻力和水容

人们通常认为SPAC中水分运行的速率由势梯度和水流阻力确定。然而,当SPAC中的水流为瞬态时,水容则对系统中的水分运行有明显影响<sup>[57]</sup>。水容是SPAC中,特别是土壤植物系统中储水和放水能力的量度。土壤—植物系统中水容的研究结果表明:系统中的平均水容为 $5.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ ;在系统中水容的各个分量中,土壤水容最大,且随土壤水势的变幅大;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壤水势的变幅小;植物茎叶的水容比根系的水容大;植物体中的水容几乎与整个土壤—植物系统中的水容相等<sup>[58]</sup>。研究还表明:刻画土壤—植物系统中水流阻力和水容的特征参数,时间常数,受初始植物水势和初始土壤有效水势等因素的影响<sup>[58]</sup>。

SPAC中的水流阻力可分为土壤阻力、土根接触阻力、根系吸收阻力、根系传导阻力、茎叶传导阻力、气孔扩散阻力和边界层扩散阻力等。SPAC中水流阻力各分量的大小、变化规律及其相对重要性的详细研究结果可见文献<sup>[60]</sup>。其主要结果可概括为:SPAC中主要的水流阻力发生在水分进入植物根系和离开植物叶片这两个对称的连接“链条”上;根系吸收阻力和气孔扩散阻力是决定液态水流和水汽扩散速率的重要因素,二者的最大值由植物本身的性质决定;土—根接触阻力当土壤含水量较低时,与根系吸收阻力为同一量级,最大值能达到土—根总阻力的70%以上;土壤阻力和植物内部的传导阻力相对较小。

由于很难直接测定土壤中的根水势,因而多采用毛细管流的泊肃叶公式计算根系的轴向阻力。由于根木质部的导管常常不能满足毛细管流的条件,人们则常假定根木质部水流阻力数倍于泊肃公式计算值<sup>[61, 62]</sup>。然而这种假定的依据是不够充分的。我们用鹰嘴豆根系进行测定值(降水头装置)和计算值的比较研究结果表明<sup>[63]</sup>:木质部水流阻力的测定值总大于计算值;二者的比值随根木质部导管调和平均直径的减少而增加;所有不同直径根系的木质部水流阻力测定平均值为计算平均值的3.8倍。

## 5 土壤水分有效性动力学

以往的土壤水分有效性研究大多采用静态描述,然而用静态的概念来描述处于SPAC中的动态水流已失去物理意义。近年来,随着人们对SPAC中水分相互关系的深入认识,水分有效性的研究已涉及到植物根系的吸水速率<sup>[64]</sup>,进而逐步形成土壤水分有效性动力学<sup>[65-68]</sup>。

黄土区土壤水分有效性的动力学研究表明:该区土壤水分有效性的基本特征是<sup>[65, 66]</sup>:一是在田间持水量附近其有效性下降较快;二是在40%~80%田间持水量的土壤

水分范围内其有效性下降非常缓慢。这一规律能用来解释黄土区的生产现象,并对该区的生产实践有指导作用。土壤水分有效性的动力学研究在理论上使过去一直存在的所谓土壤水分等效性和非等效性得到了相互补充,同时也使它们各自的弱点得到了充分显示。所以,土壤水分有效性动力学似应作为土壤物理学发展的一个标志。

## 6 滞后效应对SPAC中水流的影响

SPAC中的非饱和流,尤其是土壤—植物系统中的非饱和流,包括不少干湿交迭过程。任何旨在模拟干湿交替过程中的非饱和水流都必须考虑系统中水力学特性的滞后效应,尤其是土壤水分特征曲线的滞后效应尤为显著。然而,当人们定量模拟SPAC及其子系统的水分运行时很少考虑滞后效应,其原因是:滞后理论的复杂性,建立滞后模型需要大量的实测资料且往往较难测定;滞后非饱和流数值模拟计算的复杂性,尤其是干湿交替边界条件的数值模拟处理等等。

滞后模型可划分为理论和经验模型两大类。尽管经验模型在非饱和流的数值模拟中曾有很多应用,但因大多数经验模式仅适应于某些试验数据而缺乏一般性,因此目前大多采用理论模型<sup>[6,9]</sup>。理论模型可分为独立微域模型(Independent domain model)和非独立微域模型(Dependent domain model)<sup>[7,9,7,11]</sup>,前者认为充水孔隙间是独立的,后者则认为充水孔隙之间是相互依赖的。

迄今为止,导水率的滞后理论还不成熟。导水率的滞后程度与表述它的变量有关,一般说来,用基质势表达的导水率,其滞后程度比用含水量表达时要大得多<sup>[7,21]</sup>。

关于滞后的大多数研究大多集中在入渗或排水过程中对含水量分布的影响。一般结论是,滞后限制了湿润锋的前进;滞后现象还可能增加地下水的出流速率,从而增加表面径流<sup>[7,3]</sup>。尽管植物体内的水流也同样存在滞后效应<sup>[7,4]</sup>,就作者所知,目前尚无人对此以及整个SPAC中水流的滞后效应作定量研究。我们认为,这一研究将具有重大的理论和实践意义。

## 7 SPAC中水流的电模拟

由于SPAC中的水流与一定网络中的电流有相似性,故可用电路网络模式来模拟SPAC及其子系统的水流。

SPAC中水流的电路模式可归结为线性和非线性两种,分别对应于稳态流和瞬态流。线性模型以欧姆定律为基础,其模拟电路的表现形式为纯电阻电路。自van den Honert首次应用线性模型以来,它使用得非常普遍。然而,线性模型常常是不适用的,其理由有二:一是对水流阻力随水流速率、或时间、或两者而变的实验结果无法解释;二是系统中水流的实际过程多是瞬态的而不是稳态的,因而导致理论上的缺陷。我们并不因此就废除它,它毕竟提供了一个有用的简捷思路,且仍有研究发现水流速率和水势差之间存在线性关系<sup>[7,5,7,6]</sup>。

基于对系统中水流过程深刻认识而建立的非线性模式是非常有用的,其电路的表现形式为阻—容网络。在对土壤—植物系统中水流深刻认识的基础上,结合现有模型,我们建立了一个最通用的非线性模式<sup>[5,6,5,8]</sup>,并用此模式预报了植物水势的变化,其结果

令人满意<sup>[77]</sup>。

植物组织内的水流电模拟需采用分布参数电路模式<sup>[52]</sup>，这就涉及到植物组织内水流阻力和水容的测定和计算。植物组织内的阻力和水容可分为共质体分量和质外体分量。测定和分析都表明：上述分量均随测定电源的频率的增加而急剧下降<sup>[78]</sup>，例如，黄瓜果实组织的共质体阻力当频率为3KHz时为20千 $\Omega$ ，而当频率为200KHz时，其阻力下降到1.2千 $\Omega$ ，其水容分别为2.4nF和0.8nF。

## 8 展 望

尽管SPAC中水分运动的研究才20余年，但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起步较晚，但在SPAC理论和应用的某些方面也取得了较大进展。由于SPAC中水流运行理论及其田间应用的极其重要性，该研究将是我国土壤物理学及其相关学科的一个重要的前沿领域。

### 参 考 文 献

- [1] Gardner, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* 89, 63~73.
- [2] Cowan, I. R. 1965. Transport of water in soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2, 221~229.
- [3] Philip, J. R. 1966. Plant water relations, Some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17, 245~268.
- [4] Klute, A., Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity, Laboratory methods. In: Klute, A. (ed), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph no. 9 (2nd edition)*, 687~673. Am. Soc. Agron. Madison, Wis., USA.
- [5] Gardner, W. R., Miklich, E. J. 1962. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. *Soil Sci.* 93, 271~274.
- [6] Childs, E. C., Collis-George, N. 1950. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. Aust.* 201, 392~405.
- [7] Youngs, E. G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Soil Sci.* 97, 307~311.
- [8] Kleijn, W. B., Oster, J. D. and Cook, N. 1979 A rainfall simulator with nonrepetitious movement of drop outlets. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 1 248~1 251.
- [9] Ten Berge, H. F. M., Metselaar, K. and Stroosnijder, L. 1987. Measurement of matric flux potential, A simple procedure for the hydraulic characterisation of soils. *Neth. J. Agric. Sci.* 35, 371~384.
- [10] Knight, J. H., Philip, J. R. 1974. Exact solutions of non-linear diffusion. *J. Eng. Math.* 8, 219~227.
- [11] Green, R. E., Ahuja, L. R., Chong, S. K. 1986. Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils, Field methods. In: Klute A. (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods.*

Agronomy Monograph no. 9(2nd edition), 799~823.

- [12] Amerman, C. R., Hillel, D. and Petersen, A. E. 1970. A variable-intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 830~832.
- [13] Rawitz, E., Margolin, M., Hillel, D. 1972. An improved variable intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 533~535.
- [14] Petersen, A. E., Bubenzer, G. D. 1986. Intake rate, Sprinkler infiltrometer. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph no. 9 (2nd edition), 845~870. Am. Soc. Agron., Maolison, Wis., VSA.
- [15] Bouma, J., Hillel, D., Hole, F. D. and Amerman, C. R. 1971. Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through artificial crusts. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 362~364.
- [16] Bouma, J., Denning, J. L. 1972. Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through gypsum crusts. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 846~847.
- [17] Raats, P. A. C., Gardner, W. R. 1971. comparison of empirical relationships between pressure head and hydraulic conductivity and some observations on radially symmetric flow. *Water Resour. Res.* 7, 921~928.
- [18] Wooding, R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4, 1 259~1 273.
- [19] Scotter, D. R., Clothier, B. F., Harper, E. R. 1982. Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. *Aust. J. Soil Res.* 20, 295~304.
- [20] Shani, U., Hanks, R. J., Bresler, E., Oliveira, C. A. S. 1987. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential water content relations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 298~302.
- [21] Watson, K. K. 1966. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resour. Res.* 2, 709~715.
- [22] Rose, C. W., Stern, W. R., Drummond, J. E. 1965. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. *Aust. J. Soil Res.* 3, 1~9.
- [23] Dirksen, C. 1985. Relationship between root uptake-weighted mean soil water salinity and total leaf water potentials of alfalfa. *Irrigation Sci.* 6, 39~50.
- [24] Gardner, W. R. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20, 317~320.
- [25] Doering, E. J. 1965. Soil-water diffusivity by the one-step method. *Soil Sci.* 99, 322~326.
- [26] Gupta, S. C., Farrell, D. A., Larson, W. E. 1974. Determining effective Soil water diffusivities from one-step outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 710~716.
- [27] Passioura, J. B. 1976. Determining Soil water diffusivities from one-step outflow experiments. *Aust. J. Soil Res.* 15, 1~8.

- [28] Chung, C. L., Anderson, S. H., Ganzer, C. J., Hague, Z. 1988. Automated one-step outflow method for measurement of unsaturated hydraulic conductivity. *Agronomy Abstracts*, 181.
- [29] Bruce, R. R., Klute, A. 1966. The measurement of soil-moisture diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20, 458~462.
- [30] Wisler, F. D., Klute, A., Peters, D. B. 1968. Soil water diffusivity from horizontal infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 6~11.
- [31] Kirkham, D., Peters, W. L. 1972. *Advanced Soil Physics*, Wiley, pp. 534.
- [32] Arya, L. M., Farrel, D. A., Blake, G. R. 1975. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots. I. Determination of hydraulic properties of the soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39, 424~430.
- [33] Van Grinsven, J. J. M., Dirksen, C., Bouten, W. 1985. Evaluation of the hot air method for measuring soil water diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1 093~1 099.
- [34] van Den Berg, J. A., Louters, T. 1986. An algorithm for computing the relationship between diffusivity and soil moisture content from the hot air method. *J. Hydrol.* 83, 149~159.
- [35] Dirksen, C. 1979. Flux-controlled sorptivity measurements to determine soil hydraulic property functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 827~834.
- [36] Dirksen, C. 1975. Determination of soil water diffusivity by sorptivity measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39, 22~27.
- [37] Klute, A. 1972. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Sci.* 113, 264~276.
- [38] Jones, A. J., Wagenet, R. J. 1984. In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods. *Water Resour. Res.* 20, 1 620~1 626.
- [39] Libardi, P. L., Reichardt, K., Nielsen, D. R., Biggar, J. W. 1980. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 3~7.
- [40] Gardner, W. R. 1970. Field measurement of soil water diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 832~833.
- [41] 邵明安等, 非饱和土壤导水参数的推求, I, 理论, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 13~25页。
- [42] 邵明安, 根据土壤水分再分布过程确定土壤的导水参数, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1985, 第2集, 47~53页。
- [43] 邵明安, 四种方法推求土壤导水参数的差别及其准确性, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1985, 第2集, 54~62页。
- [44] 邵明安, 不同方法测定土壤基质势的差别及准确性的初步研究, 《土壤通报》, 1985, 第16卷5期, 223~226页。
- [45] 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3期, 6~15页。
- [46] Gardner, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants, *Soil*



Sci. 89, 63~73.

- [47] Molz, F. J., Remson, I. 1970. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.* 6, 1 346~1 356.
- [48] Nimah, M.N., Hanks, R.J. 1973. Model for estimating soil water, plant and atmosphere interrelations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 522~527.
- [49] Hillel, D., Talpaz, H., van Keulen, H. 1976. A macroscopic scale model of water uptake by a nonuniform root system and salt movement in the soil profile. *Soil Sci.* 121, 242~255.
- [50] Feddes, R. A., Bresler, E., Neuman, S. P. 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system. *water Resour. Res.* 10, 1 199~1 206.
- [51] Herkelrath, W. N., Miller, E. E., Gardner, W. R. 1977. Water uptake by plants, 2. The root contact model. *Soil Sci. Am. J.* 41, 1 039~1 043.
- [52] Molz, F. J. 1981. Models of water transport in the soil-plant system, A review. *water Resour. Res.* 17, 1 245~1 260.
- [53] 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。
- [54] 邵明安等. 植物根系吸收土壤水分的一个简化模型, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 33~37页。
- [55] 邵明安. 试论根系中水分运动的动力学, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 38~51页。
- [56] Shao, M. A., Simmonds, L. P., Chen, Z.X. 1991. The hydraulic resistances and capacitances in soil-plant system. *Pedosphere*, 3, (in press).
- [57] Bariac, T., Rambal, S., Jusserand, C., Berger, A. 1989. Evaluating water fluxes of field grown alfalfa from diurnal observation of natural isotope concentration, energy budget and ecophysiological parameters. *Agric. For. Meteorol.* 48, 263~283.
- [58] 邵明安等. 土壤—植物系统中的水容研究, 《水利学报》, 1991年(印刷中)。
- [59] 邵明安. 论土壤植物系统中水流电模拟时间常数的变性, 《科学通报》, 1991, 第36卷, (印刷中)。
- [60] 邵明安等. 土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性, 《水利学报》, 1986年第9期, 8~14页。
- [61] Wind, G. P. 1955. Flow of water through plant roots. *Neth. J. Agric. Sci.* 3, 259~264.
- [62] Passioura, J. B. 1972. The effect of root geometry on the yield of wheat growing on stored water. *Aust. J. Agric. Res.* 23, 745~752.
- [63] 邵明安. 根木质部水流阻力Poiseuille公式计算值与实测值的差别, 《水利学报》, 待刊。
- [64] Hillel, D. 1980. *Applications of Soil Physics*. Academic Press, New York, 217~222.
- [65] 邵明安等. 黄土区土壤水分有效性的动力学研究, 《科学通报》, 1987, 第32卷18期, 1 421~1 423页。
- [ ] 邵明安等. 黄土区土壤水分有效性研究, 《水利学报》, 1987年8期, 38~44页。

- [67] Shao, M. A., Yang, W. Z., Li, Y. S. 1987. The mathematical model of soil water uptake by plant roots. ISDF Proc. 216~224.
- [68] Shao, M. A., Yang, W. Z., Li, Y. S. 1987. The dynamic model of soil water availability to plants in the loessial region. ISDF Proc. 437~438.
- [69] Mualem, Y. 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. Soil Sci. 137, 283~291.
- [70] Poullovassilis, A. 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. Soil Sci. 93, 405~412.
- [71] Topp, G. C. 1971. Soil-water hysteresis, The domain model theory extended to pore interaction conditions. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35, 219~225.
- [72] Mualem, Y. 1976. Hysteresis models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. water Resour. Res. 12, 1 248~1 254.
- [73] Mualem, Y. 1974. A Conceptual model of hysteresis. Water Resour. Res. 10, 514~520.
- [74] Wallace, J. S., Biscoe, P. V. 1983. Water relations of winter wheat. 4. Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant system. Agric. Sci. J. Camb. 100, 591~600.
- [75] Neumann, H. H., Thortell, G. W., Stevensen, K. R. 1974. In situ measurements of leaf water potential and resistance to water flow. Can. Plant Sci. J. 54, 175~184.
- [76] Passioura, J. B., Munns, R. 1984. Hydraulic resistance of plants. 2. Effects of rooting medium, and time of day, in Barley and lupin. Aust. J. plant physiol. 11, 341~350.
- [77] 邵明安. 预报植物叶水势的阻-容网络法, 《中国科学院西北水土保持研究所集刊》, 1991, 第13集, 75~82页。
- [78] Zhang, M. I. N., Stout, D. G., Willison, J. H. M. 1990. Electrical impedance analysis in plant tissues, symplasmic resistance and membrane capacitance in the Hayden model. J. Exp. Bot. 41, 371~380.