

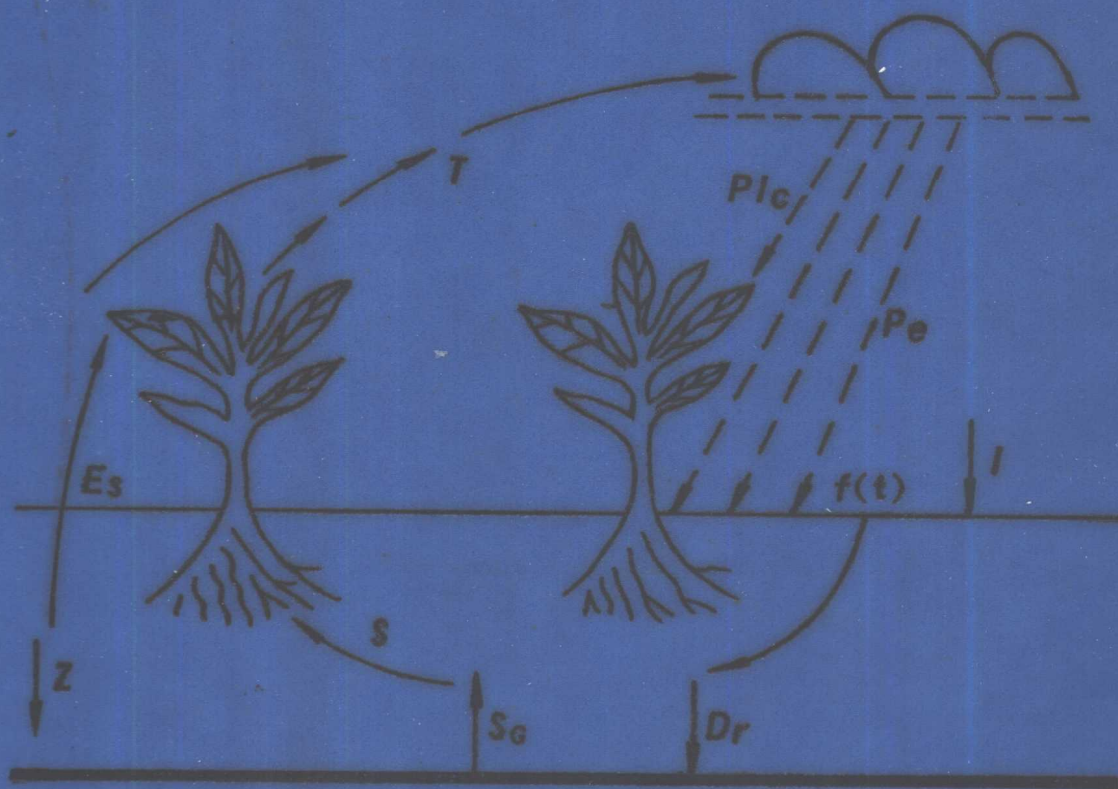


土壤—植物—大气 连续体 水分传输理论及其应用

康绍忠 刘晓明 熊运章 著

国家自然科学基金资助项目

水利部科技专著出版基金资助项目



水利电力出版社

土壤—植物—大气连续体 水分传输理论及其应用

康绍忠 刘晓明 熊运章

国家自然科学基金资助项目

水利部科技专著出版基金资助项目

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书较全面地叙述了土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 水分传输问题,反映了作者在 SPAC 一系列问题上的研究成果和国内外研究的水平。

全书共分七章。其内容包括 SPAC 水分传输问题的研究进展、试验研究方法、能量输送与转换、力能关系的分析,植物根系吸水及水分在植物体内的传输,作物蒸发蒸腾量的计算方法,SPAC 水分传输及水热耦合运移的计算机仿真,以及 SPAC 中的水分转化效率与提高途径、缺水对作物的影响及作物缺水诊断方法、作物产量与需水量的关系、田间土壤水分预报等水分管理理论与应用问题。

本书可供从事农田水利、水文水资源、土壤物理、植物生理、农田生态、农业气象等工作的科技人员阅读,亦可供有关专业院校的师生参考。

水利部科技专著出版基金资助项目

土壤—植物—大气连续体水分传输

理论及其应用

康绍忠 刘晓明 熊运章 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号)

各地新华书店经售

北京市地质矿产局印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 334 千字

1994 年 7 月第一版 1994 年 7 月北京第一次印刷

印数 001—700 册

ISBN 7-120-01718-7/TV·710

定价 22.25 元

出版说明

书籍是人类进步的阶梯。科技图书集聚着科学研究和发明创造的成果，凝结着人们生产活动、科学实验的实践经验和聪明才智。当今，在振兴中华的“四化”建设中，要把科学技术转化为现实的生产力，科技图书的出版是一个重要的环节。它担负着传播科技信息，扩大科技交流，推广科技成果，普及科技知识，培养科技人才，积累科学文化，提高全民族科技意识和劳动者素质的重任，是科技事业的一个重要组成部分。

改革开放以来，我国的科技出版事业取得了飞速的发展。但在还很不完善的社会主义市场经济中，科技图书出版的合理经营机制尚未形成，“出书难、买书难、卖书难”一直困扰着许多科技人员和出版工作者。特别是一些专业性很强的科学专著，发行范围有限，出版更为困难，影响了科学技术的发展。广大知识分子在不断呼吁，出版界也竭力探索解决这一问题的途径。1985年以来，中央领导同志和中宣部曾多次指示，要求国家和各主管部门筹款，为专家学者撰写学术专著建立出版基金。其后，从中央到地方各类出版基金陆续建立，有力地推动了学术专著的出版。

水利在我国具有悠久的历史，对治国安邦起着重要的作用。新中国建立40多年来，水利建设事业取得了举世瞩目的成就，已成为我国国民经济的基础设施和基础产业，是发展工农业生产的命脉。为了支持水利科技专著的出版，以适应我国水利科研、设计、建设、管理、教学的需要，水利部于1991年9月5日向全国发布了《水利部科技专著出版基金试行条例》，拨出专款用于资助科技专著的出版，并相应地建立了出版基金评审委员会和办公室。

本出版基金主要用于资助有明显社会效益而印数较少的水利优秀科技著作的出版，包括：学术水平高、内容有创见、在学科上居领先地位的水利基础学科理论专著；反映水利重大科研成果或填补我国水利科技某个空白领域的学术专著；在水利工程技术和经济管理方面有重大科学和实用价值的专著；对我国水利科技发展有重要参考价值的国外水利科技著作的中译本。申请者在已有详细编写提纲和部分样稿时，即可向本基金办公室提出申请。

本出版基金申请项目的评审，坚持“专家评议，公平竞争，择优支持”的原则，其做法是：对所有申请项目，先由基金办送请三名同行专家评议，然后再提交评审委员会讨论、评选。对被通过的申请项目，即转入水利电力出版社的计划，由基金资助出版。

我们希望本出版基金的实施对推动水利科技的进步和人才培养，对促进水利建设事业的发展，会起到积极的作用。为此，我们热切地希望水利界的学者、专家，能潜心将自己的创见和经验撰写成专著，踊跃向本出版基金提出申请出版，为繁荣我国的水利科技事业添砖加瓦，奉献自己的才智和力量。

水利部科技专著出版基金委员会

1992年8月

前言

土壤—植物—大气连续体 (Soil—Plant—Atmosphere Continuum, 简称 SPAC) 中物质迁移与能量转化的研究具有明显的综合性和学科交叉性的特点, 是近代水科学、实验地理学、土壤物理学、农田生态学与农业气象学的前沿研究领域。其应用前景十分广阔。除了应用于农田灌溉学科领域外, 国际上许多其他的领域也对此十分关注, 如国际水文计划 (IHP)、国际地圈—生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划 (WCRP)、联合国环境计划 (UNEP)、全球水量与能量平衡计划 (GEWEX) 等均对此问题给予了足够的重视, 把各种尺度条件下通过大气—植被—土壤系统的水分输送过程以及能量交换问题作为陆地—大气相互作用、地球气候和水圈相互作用模拟等研究的重要内容。1991 年 8 月在奥地利首都维也纳召开的第 20 届国际大地测量及地球物理学联合会 (IUGG) 大会上, 大气、土壤、植被的水文学相互关系专题会议是最活跃的领域之一, 即将在 1993 年 7 月在日本横滨召开的国际气象学与大气物理学协会 (IAMAP) 第六次学术会议和国际水文科学协会 (IAHS) 第四次学术会议联合会议也把通过大气、植被和土壤系统的水分传输和能量交换列为会议的主要议题。

由于太阳辐射能和其它因素的作用, 地表的各种物质进行着不间断的循环。水是物质循环与能量转化过程中最活跃的因素, 许多物质的运动需要以水为媒介才能进行, 同时在植物光合作用和生长发育过程中, 水是不可缺少的物质。因此, 水分在 SPAC 中传输问题是地表物质迁移与能量转化研究中的主要内容。现代水循环的概念, 是把它视为一个动态有序的系统^[1]。该系统的复杂性主要表现在多层次性方面, 而且系统外部的环境条件多变, 包括各种自然因素与人类各种活动的影响。但是, 从整体上观察, 系统内部的结构与层次是可以分解和可以划分的, 而且都是开放系统, 互相之间存在着频繁的物质 (水) 与能量 (热) 交换, 构成了水量转化。SPAC 中的水分传输过程是地表水循环动态有序系统中的一个子系统。

降水、入渗、水在土壤中运动, 植物根系吸收土壤水分, 蒸发蒸腾以及土壤水分向地下水的运动、潜水蒸发均连续不断地进行着, 构成了田间水循环过程。同时, 这些因素又处于动态平衡状态, 构成田间水量平衡。蒸发蒸腾是农田水分平衡的一个分量, 也是田间水分循环中必不可少的一个过程, 它是 SPAC 水分迁移和能量转换中最重要的环节, 蒸发蒸腾过程对连续体内能量的收支与转化以及农田能量平衡分量有着重要的影响。

现代农田水分循环研究是以连续的、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^[2,3], 研究田间水分的微循环过程和规律以及与农田能量平衡和转化间的关系, 揭示田间水循环过程的各个方面, 探讨以土壤水和作物关系为中心的农田水分调控机理, 并试图为干旱半干旱地区的节水型农业研究提供理论和实践应用的依据。

作者在近 10 年的研究中,一直把农田水分循环过程与能量转化以及水在 SPAC 中的传输问题的研究作为主攻方向。其宗旨是要加强农田水利学与有关边缘学科的相互渗透,从整体上和相互作用上来考虑植物吸收水分和散失水分的过程,力求把该过程的研究建立在严格的生理学和物理学基础之上;引入系统动态仿真技术,使 SPAC 水分的定量描述得到实现,使这一领域由单纯的实验性质变为一门有较严谨的理论和定量方法的科学。在此基础上,根据 SPAC 中水分运移规律及水热转换关系,对田间水分的管理和调控等问题进行了研究,以指导干旱半干旱地区的节水灌溉实践,为农田灌溉学科提供一条定量解决作物与其水分环境关系问题的现实途径。多年来,作者在西北农业大学灌溉试验站进行了定位观测与试验研究,同时在西北干旱半干旱地区有关灌溉试验站进行了协作试验研究。作者主持完成的国家自然科学基金资助项目“SPAC 水分运移理论及其应用的研究”以及完成的其它一些研究,如“干旱缺水地区非充分灌溉理论的研究”、“作物需水量理论及应用的研究”,与正在主持开展的国家自然科学基金资助项目“以节水高产为目标的田间土壤水分最优调控机理研究”和水利水电科学基金项目“农田水分微循环规律及其节水调控原理的研究”等都是以上述目标为出发点的。

本书是以作者 10 年来对 SPAC 理论及与此有关的研究成果为基础写成的,为了本书的系统性和完整性,作者在撰写本书时还引用和参考了国内外的有关研究成果。全书共七章。刘晓明参加试验、整理部分资料并撰写本书第一章第三节,其余章节均由康绍忠撰写,全书由康绍忠主编,由熊运章教授审核。

SPAC 水分传输理论及应用问题的研究是一项十分复杂的系统工程。作者的研究仅仅是 SPAC 理论中的某几个方面,其研究成果也是初步的,对 SPAC 本身的结构、状态、发展和变化规律,SPAC 理论的应用途径等一系列重大理论与实践问题的认识还是较肤浅的,许多问题有待进一步探索。书中可能存在缺点或错误,恳请读者批评指正。

作者在有关 SPAC 理论的学习与研究过程中,始终得到了许多老前辈的指教、领导的支持以及同志们热情帮助。本书能撰写出版,凝聚着许多同志的心血和劳动。西北农业大学植物生理教研室王振镒副教授、干旱半干旱研究中心张富仓同志等对于试验工作给予了极大的支持和帮助,西北农业大学计算中心高新科副教授帮助修改了仿真程序。武汉水利电力大学茆智教授、中国科学院地理研究所刘昌明教授等对本书的编写提纲提出了宝贵意见。清华大学水利水电工程系雷志栋教授在百忙中承担了本书的主审工作,提出了许多宝贵的意见,对于提高书稿质量起了重要的作用。水利部科技专著出版基金委员会对于本书的出版给予了大力的支持,在此一并表示谢意。

康绍忠

1992 年 12 月于陕西杨陵农科城

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 土壤—植物—大气连续体	1
第二节 SPAC 水分传输问题的研究进展	5
第三节 SPAC 水分传输的试验研究	9
第二章 SPAC 中的能量输送与转换	15
第一节 SPAC 中的辐射输送	15
第二节 植物冠层中动量、物质与热量的交换	30
第三节 农田能量平衡与水量平衡	37
第三章 SPAC 水分传输力能关系的分析	51
第一节 SPAC 中水分势能分布规律及其相互反馈关系	51
第二节 SPAC 中的水流阻力分布规律及其相互反馈关系	62
第三节 SPAC 中的水容分布规律	75
第四节 SPAC 中的水流通量与力能分布的关系	78
第四章 植物根系吸水及水分在植物体内的传输	85
第一节 植物根系吸水机制的分析	85
第二节 植物根系生长与根系密度分布	88
第三节 有根系吸水条件下的田间土壤水分运动基本方程	96
第四节 植物根系吸水模式	101
第五节 植物根系吸水的动态模拟	107
第六节 植物体内的水分传输	115
第五章 作物蒸发蒸腾量的计算	122
第一节 作物总蒸发蒸腾量的计算	122
第二节 作物蒸腾量的计算方法	137
第三节 作物叶面蒸腾与棵间土壤蒸发比例关系的理论分析	147
第六章 SPAC 水分传输动态的计算机仿真	151
第一节 计算机仿真的基本原理	151
第二节 SPAC 水分传输动态的计算机仿真	155
第三节 植物荫蔽条件下 SPAC 水热耦合运移的计算机仿真	175
第七章 田间水分管理的理论与应用	184
第一节 SPAC 中的水分转化效率与提高途径	184
第二节 缺水对作物的影响及作物缺水诊断	187
第三节 作物产量与需水量的关系	203
第四节 田间土壤水分预报与水分管理	208
参考文献	218

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1-1 Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC)	1
1-2 Advances in the Study of Water Transport in SPAC	5
1-3 Experimental Study of Water Transport in SPAC	9
Chapter 2 Energy Transport and Transfer in SPAC	15
2-1 Radiation Transport in SPAC	15
2-2 Momentum, Mass and Heat Transfer in Crop Canopy	30
2-3 Energy Balance and Water Balance in the Field	37
Chapter 3 Distribution of Resistance and Water Potential in SPAC	51
3-1 Distribution of Water Potential in SPAC	51
3-2 Distribution of Hydraulic Resistances in SPAC	62
3-3 Distribution of Water Capacitance in SPAC	75
3-4 Relationships between the Flux and the Distribution of Water Potential and Hydraulic Resistances in SPAC	78
Chapter 4 Water Uptake by Plants and Water Transport Through Plants	85
4-1 Mechanisms of Water Uptake by Plants	85
4-2 Root Growth and Root Density	88
4-3 Basic Equation of Soil Water Movement with Root Extraction	96
4-4 Root Extraction Function	101
4-5 Dynamics Simulation of Water Uptake by Root System	107
4-6 Water Transport Through Plants	115
Chapter 5 Computation of Crop Evapotranspiration	122
5-1 Computation of Crop Evapotranspiration	122
5-2 Computation of Crop Leaf Transpiration	137
5-3 Ratio of Transpiration and Evaporation in Cropland	147
Chapter 6 Dynamic Simulation of Water Transport in SPAC	151
6-1 Basic Principle of Computer Simulation	151
6-2 Dynamic Simulation of Water Transport in SPAC	155
6-3 Dynamic Simulation of Heat and Water Coupling Flow in SPAC under Canopy Shading	175
Chapter 7 Management of Water State in the Farmland	184
7-1 Water Transfer Efficiency in SPAC and Its Improvement	184
7-2 Effects of Water Deficits on Crop and Diagnosis Method of Crop	

Water Deficit	187
7-3 Relationship between Crop Yield and Evapotranspiration	203
7-4 Soil Moisture Forecast and Management	208
References	218

第一章 绪 论

第一节 土壤—植物—大气连续体

一、土壤—植物—大气连续体的概念

水分经由土壤到达植物根表皮、进入根系后、通过植物茎，到达叶片，再由叶气孔扩散到宁静空气层，最后参与大气的湍流交换，形成一个统一的、动态的相互反馈连续系统，即土壤—植物—大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称 SPAC), 如图 1-1 所示。将近一个世纪以来, 随着土壤物理学、植物生理学、农田水利学的发展和农业生产的需要, 人们一直在通过各种途径致力于研究土壤与水、水与植物以及土壤、植物与水之间的相互关系, 并已取得较大的进展。但是, 把土壤—植物—大气当作一个在物理上统一的连续体系进行动态的、量的水分研究, 才 20 多年的历史。Philip (1966) 提出了较完整的关于 SPAC 的概念^[4], 认为尽管介质不同, 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, 而且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, 并计算出水流通量。这在土壤—植物—水关系研究方面是一次重要的突破。

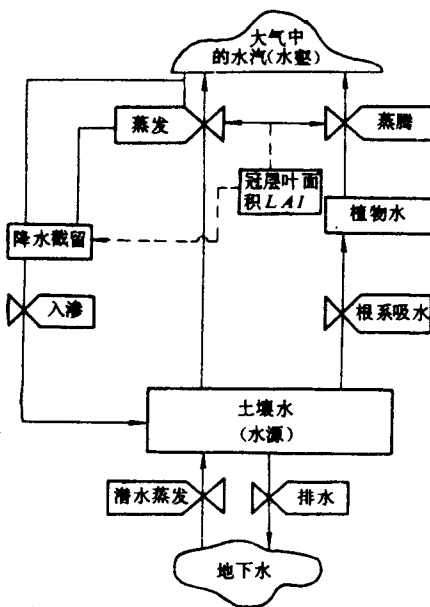


图 1-1 土壤—植物—大气连续体水流路径示意图

在 SPAC 中, 水分运动的驱动力是水势梯度, 即从水势高处向水势低处流动, 其流动速率与水势梯度成正比, 与水流阻力成反比。由于在 SPAC 中各个部位的水流阻力和水势并非是恒定不变的, 因而严格地说 SPAC 中的水流是非稳定流。但在实际中, 忽略植株体内贮水量的微小变化, 认为 SPAC 中的水流是连续的稳定流时, 为分析提供了较大的方便, 其水流通量 q 可以用电学中的欧姆定律来模拟, 即 Van den Honert (1948) 公式^[5]

$$q = \frac{\psi_s - \psi_r}{R_r} = \frac{\psi_r - \psi_L}{R_{rL}} = \frac{\psi_L - \psi_a}{R_{La}} \quad (1-1)$$

式中 ψ_s 、 ψ_r 、 ψ_L 、 ψ_a ——分别是土水势、根水势、叶水势与大气水势;

R_r 、 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孔腔, 通过气孔蒸腾扩散到周围空气中各段路径的水流阻力。

在一维稳定流条件下,可用图 1-2(c)所示的电阻网络来模拟 SPAC 中的水流状况。图 1-2(c)中用包括土壤阻力(R_s)、根阻力(R_r)、茎阻力(R_x)、叶阻力(R_L)和空气阻力(R_a)的串联电路代表图 1-2(b)中复杂的水流路径。

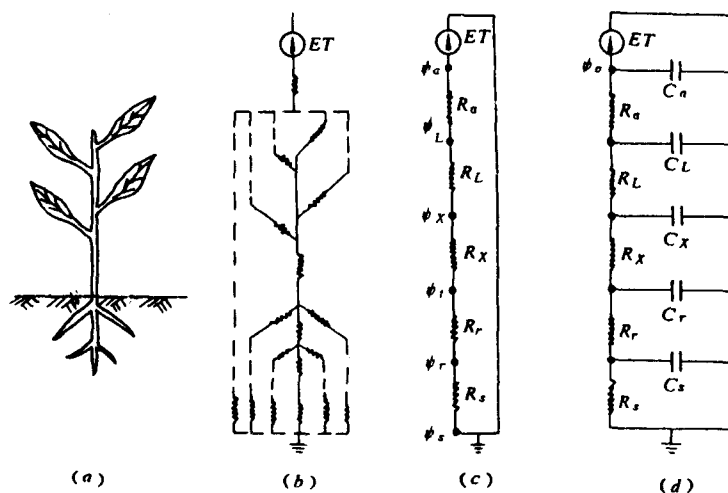


图 1-2 SPAC 水流状况的电模拟网络示意图 (引自 H. G. Jones, 1983)^[6]

蒸腾着的植株根部四周土壤的水势通常在 $0 \sim -1.0$ MPa 的范围内,叶水势通常为 $-0.2 \sim -2.0$ MPa,作物在严重水分胁迫下可达 -3.0 MPa,某些耐旱植物可能低至 -5.0 MPa。若用方程 $\psi_a = RT_k \ln(e/e_s)$ (R 为气体常数, T_k 为绝对温度, e/e_s 为相对湿度)把空气相对湿度换算成相等的水势,则相对湿度在 $98\% \sim 48\%$ 范围内,相当于大气水势约为 $-10 \sim -100$ MPa,在干旱半干旱地区空气相对湿度往往低于 48% ,因此其大气水势还会低于 -100 MPa。由此可知,从土壤到叶片的水势降低约为 1.0 MPa 或更少,但从叶到大气则降低几十甚至达 100 MPa。这表明,在植株的水分吸收和蒸腾这样一个耦合过程中的主要阻力是 R_{La} 。

经过许多人发展的 Van-den Honert 假说具有普遍意义。由于主要的、控制性的阻力在叶—气系统之间,这意味着,通过整个连续体的通量,主要决定于调节蒸腾的那些因素,包括供应水分汽化的能量。然而,值得注意的是事实上土壤水分枯竭会显著地降低蒸腾,上述结论的明显矛盾,是由于吸收途径上的反馈条件改变了蒸腾途径上的阻力。根部通常对水分流动有相当大的阻力,大部分与从表皮经过皮层到中柱的通道有关系,在皮层中由于在内层细胞中的凯氏带的作用,它处于一定程度的生理控制之下。为了使吸收水分的速率与植物蒸腾速率近似相等,在根系传导系统中所需的压力差大约从 0.4 MPa 到 5.0 MPa 不等 (Kramer, 1969)。一般认为,根部阻力是导致蒸腾与根系吸水之间时间滞后现象的原因。这种滞后经常在迅速蒸腾的时期中引起叶片水分不足和气孔开度减小或关闭的现象。

由上可知,虽然 Van-den Honert 的这种处理方法提供了一个模拟 SPAC 中水流的实用模型,但它确实过分简化了^[7]。首先,它假定 SPAC 中的水流是稳定流,但在植物体中是很少存在的,因此,严格地说它是不适用于测定时间短于在植株体内形成稳态流所需要的

时间的情况；其次，它假定在运输途径的各部分（例如在根中）的阻力是恒定的，但试验表明根中阻力有时是随着流速而改变的；第三，水以液态通过土壤和植株运行，但在叶气孔腔内转变成水汽，虽然运移的驱动力始终是化学势差，但液态流直接与水势差成比例，而水汽扩散则与水气压或水汽的浓度差成比例，由水汽压把湿度梯度转换成相当的水势梯度，则大大地夸大了水汽相中势能的下降，估算出的叶—气系统水流阻力的量级与实际有较大的差异。因此，有必要发展和改进 Van-den Honert 的稳定流模式的假定，引入水容的概念^[8]，提出与植物水分状况相符的非稳定流模式。

象电容器一样，水贮存在薄壁组织细胞中用于补充蒸腾丧失的水分。在叶片和茎的薄壁组织细胞中贮存的水量很大。根据作者进行的研究，植物在炎热的晴天有时会失去它的原有含水量的 25%~30%（见表 1-1），但在晚上就能得到正常的补充与恢复。在中等蒸腾的日子里，叶片含水量的日变化一般约为 10%。

表 1-1 叶片水分含量在一日中的变化状况

植物种类	含水量 (以鲜重%表示)		假定干物质无变化时 水分的下降		含水量 (以干重的%表示)	
	最大	最小	克/100 克鲜重	占原有水分的%	最大	最小
玉米	78	69	16.0	20.5	264	199
小麦	86	74	24.5	28.5	389	323
大豆	89	81	29.6	33.2	544	408

正是因为这种水容因素的存在阻止了欧姆定律模拟的严格应用，因为通过较大植株不同部分的水流常常以不同速度运行。例如日出后蒸腾迅速增加时，根系吸水滞后于蒸腾，叶片和茎的含水量就减小。

康绍忠与熊运章、王振镒 (1990)^[9]，康绍忠与刘晓明 (1992)^[10]关于小麦与玉米蒸腾通量和水势降低的关系研究结果表明：蒸腾与水势降低的关系不是均匀一致的，这是由于滞后现象产生的，这表明稳态模型模拟当蒸腾变化时真实的作物水分动态过程是失败的。水流的滞后现象要求在电流环路模型中加入电容器 [图 1-2 (d)]。

系统中任何部分的水容 (C) 被定义为：单位水势变化所引起的细胞组织内含水量 (W) 的变化，即

$$C = \frac{dW}{d\psi} = W_{\max} \frac{d\theta}{d\psi} = W_{\max} C_1 \quad (1-2)$$

式中 $W_{\max}$ ——膨胀组织的含水量；

θ ——相对含水量；

$d\theta/d\psi$ ——比水容 (C_1)。

C_1 是细胞组织的一个内在特性，当比较那些不同形状或尺寸的组织时是十分有用的。当含水量用单位面积（叶、茎横断面或地面）上的水量表示时，C 的单位将是 $\text{m}^3\text{m}^{-2} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ($=\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$)，而当含水量用绝对数值表示时，C 的单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。这种水容的概念对于土壤和空气都是适用的。

图 1-3 列出了几种作物叶片水势与相对含水量的关系。这些曲线都是非线性的，图中

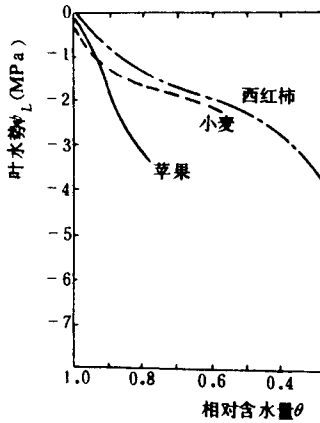


图 1-3 叶水势与相对含水量的关系
(数据引自 Stalyer, 1960; Jones, 1978; Jones 和 Higgs, 1980)^[6]

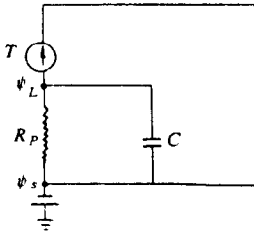


图 1-4 植物中水流过程的一个
简单集总参数模型示意图

C_1 的范围大约从苹果叶的 0.05MPa^{-1} 到小麦和西红柿叶的 0.33MPa^{-1} 。

据此, SPAC 中的水流要用图 1-2 (d) 中所示的考虑系统中水容变化的阻—容网络来模拟, 当然这个模型是相当复杂的。它能用一种简单的集总参数模型来说明这样的阻容网络模式, 即用仅有一个电阻和一个电容器的回路 (图 1-4) 对图 1-2 (d) 所示的复杂阻容网络进行近似。

为了分析方便, 通过植物的水流量 q_p 能被表示为

$$q_p = (\psi_s - \psi_L) / R_p \quad (1-3)$$

式中 R_p ——从植物根表皮到叶片组织的植株体阻力。

叶片含水量变化等于流进叶片和通过叶片蒸腾损失的水量之差,^[11]即

$$\frac{dW_L}{dt} = q_p - T \quad (1-4)$$

把式 (1-3) 代入式 (1-4) 有

$$\frac{dW_L}{dt} + \frac{\psi_L}{R_p} = \frac{\psi_s - TR_p}{R_p} \quad (1-5)$$

化简得

$$\frac{d\psi_L}{dt} + \frac{\psi_L}{R_p C} = \frac{\psi_s - TR_p}{R_p C} \quad (1-6)$$

求解得叶水势在蒸腾开始变化后随时间的变化规律

$$\psi_L = (\psi_s - TR_p) / R_p C + (\psi_i + R_p T - \psi_s / R_p C) e^{-t/R_p C} \quad (1-7)$$

式中 ψ_i ——在叶片蒸腾 T 产生变化前的叶水势值。

SPAC 中的水流过程是十分复杂的, 在实际流动过程中各点的流速是不相等的, 即使在叶片也会因为部位不同而在叶尖、叶中和叶根部有不同的蒸腾速率, 各个部分的含水量也不同而且随时间产生变化。这将需要用更复杂的方程进行描述。

二、SPAC 水分传输问题研究的意义

SPAC 水分传输理论及应用的研究不仅是农田灌溉基本理论问题之一, 而且也是土壤物理、自然地理学的前沿领域。这一领域的研究将进一步促进农田水利与土壤物理、自然地理、植物生理、农业气象、农田生态、农业水文等学科的相互渗透; 有利于更进一步摸清连续体内的水分运移机理和水分运转的定量关系以及连续体内水分运转的调控机制, 促进该系统中水分能量的良性运转; 有助于农业水资源的正确评价与合理利用的研究, 为农田生态向良性运转发展提供条件。

农田灌溉用水占我国水资源总消耗量的 84%, 而作物吸收水量的约 95% 消耗于蒸腾。因此, 作物水分问题是解决水资源供需平衡的十分重要的一环, 已成为农田水利学科中一个日益引起人们关注的问题。国内外不少学者都在探索解决这一问题的途径。把 SPAC 水

分传输理论及其动态模拟技术的研究成果应用于农田节水灌溉实践,将充实这一新的科学领域,并为农田灌溉学科提供一个定量解决作物与其水分环境关系问题的现实途径。

水分是干旱半干旱地区农田生态系统良性运转和农作物产量提高的主要限制因素。在干旱半干旱地区水资源不足,灌溉水量有限,此时不能追求单位面积产量最高,要实行有限水量条件下的非充分灌溉,做到节水增产。因此,在干旱半干旱地区定量研究 SPAC 中的水分传输和调控机制,对于当地的农业生产和农业水资源合理利用具有重要的意义。

SPAC 中水分传输与能量交换的研究是国际水文计划 (IHP)、国际地圈—生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划 (WCRP)、联合国环境计划 (UNEP)、全球水量平衡与能量平衡计划 (GEWEX) 中的重要研究内容,对于研究陆地—大气相互作用,地球气候和水圈的相互作用以及全球水量平衡与能量平衡等均具有重要作用。

综上所述,SPAC 水分传输理论及应用的研究是一个具有重大科学意义和广阔应用前景的研究领域。

第二节 SPAC 水分传输问题的研究进展

一、关于 SPAC 水分运移力能关系的研究

SPAC 水分运移力能关系的研究对于弄清整个连续体中水分能量、阻力的分布以及各个部分能量、阻力的变化规律和相互反馈关系,系统内的水分通量和能量、阻力、水容的分布关系具有重要的作用。

过去植物生理学家曾对植物冠层的叶水势、气孔阻力、蒸腾的变化规律进行了大量的研究,但较多的都侧重于研究植物本身。近年已开始注重从整体上研究。Choudhury (1983) 曾根据 Penman—Monteith (1965) 和 Van den Honert (1948) 的蒸腾计算式,并考虑连续体中土壤阻力、植物体阻力和空气边界层阻力以及气象因素建立了一个植物冠层叶水势的迭代计算式,并经在玉米地中应用,计算结果与实测值较为一致^[12]。康绍忠等 (1990) 曾对 Choudhury (1983) 的叶水势模式进行了改进,并应用于冬小麦叶水势的动态模拟,取得了满意的结果^[9]。Menzel 和 Simpson (1986) 等对莴苣内、外冠的能量分布进行过研究^[13]。Zur 和 Jones (1981) 提出的作物水关系、光合作用与扩张生长模型,对叶水势和土壤基质势以及不同土壤、不同天气条件下相对蒸腾速率同土壤基质势的关系进行了大量的研究^[14]。Reicosky 和 Ritchie (1976) 研究了在根系吸水时的土壤阻力与植物阻力的相对重要性^[15]。邵明安等 (1986) 对 SPAC 的水流阻力的相对重要性进行了讨论^[16]。但所有关于 SPAC 中水流阻力的计算都是以 Van den Honert (1948) 的恒定流模式为基础的。

在 SPAC 水分运移力能关系研究方面有如下几个问题需要进一步研究解决: ① SPAC 各个部分的水势和阻力分布规律,系统中各个链环之间的相互反馈关系以及外界环境条件对连续体内水分能量和水流阻力的影响作用; ② 根据 SPAC 水分运移机理、能量平衡与转化及作物本身的“自我调节”机制建立更为完善的气孔阻力和叶片水势的动态计算模式; ③ SPAC 水分运移与热量交换的关系,通过 SPAC 水热关系的研究,进一步弄清该系统的水热耦合运移机制; ④ 研究不同条件下相对蒸腾速率和土壤基质势的关系,找出不同大气蒸

发条件下相对蒸腾速率开始受土壤基质势影响的临界值,建立土壤水分对植物有效性动态评价模式;⑤ 用非稳定流模式研究系统中水容的分布及变化规律。

二、关于植物根系吸水的研究

关于植物根系吸水研究可归结为微观法和宏观法。微观法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,然后研究单根的吸水状况。由于微观法与大田实际情况差别太大,一般用于根系吸水机制的研究,难于应用单根吸水的微观模型定量分析根层中土壤和根系中的水流运动。宏观法则忽略了水分向个别根的流动,而在土壤水分运动中引入一个根系吸水项。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,实质上是提出修改根系吸水模式,其数学模型较多。

根系吸水模式中的大多数是以 Van-den Honert (1948) 的假定为基础的,这些公式的物理学与生理学意义是正确的,但由于包含有根阻力、根水势、有效根密度这些难于测得的参数,不便于实际应用 (Gardner, 1964; Feddes 等, 1974; Herkelrath, 1977; Rowse 等, 1978)^[17~20]。另一些方法是由蒸腾在根系层垂直方向上所消耗水量的分布来估算根系吸水速率 (Molz 与 Remson, 1970; Selim 与 Iskandar, 1978)^[21~22]。还有一些研究者假定根系吸水速率与土壤含水量或土水势成比例 (Feddes 等, 1978; 康绍忠等, 1992)。在许多情况下假定蒸腾在土壤表面以下随深度呈线性或指数减小 (Molz 与 Remson, 1970; Raats, 1976; 康绍忠等, 1992)^[23,24]。

目前研究作物根系吸水的首要问题,是如何既要从小根系吸水的物理过程提出模型表达式,又要使其更为简便实用。

三、关于作物蒸发蒸腾计算方法的研究

关于作物蒸发蒸腾的计算方法以充分灌溉条件下土壤水分适宜时的潜在蒸发蒸腾量计算问题研究较多。对于缺水条件下作物蒸发蒸腾受限制时的计算问题还研究得很不够。

作物蒸发蒸腾量以由彭曼 (Penman) 公式计算的参照作物蒸发蒸腾量 ET_0 。乘以某种作物的作物系数 K_c 而求得的方法使用较普遍。 ET_0 的计算是建立在农田能量平衡理论和空气动力学基础之上的,有一定的理论基础,但它未考虑能量在水平方向的交换,这在有些地区,如沙漠绿洲、周围是旱地的灌区的边缘,其计算结果会有较大偏差。同时,在农田能量平衡方法中忽略了诸如光合作用耗能、农田内部耗能等,这在白天净辐射 R_n 达几百 W/m^2 的条件下虽然影响不大,但在早、晚则对其农田能量平衡方程有较大影响,因而当计算蒸发蒸腾的日变化过程时在早晨和傍晚有较大的差异。作物系数 K_c 的影响机制还不清楚, K_c 随影响因素而变化的定量关系还有待于更进一步研究。

关于作物蒸腾量的计算以采用彭曼—蒙蒂斯 (Penman—Monteith, 1965) 公式较多。它既包含了净辐射和饱和差,又包含了气孔阻力和空气动力学阻力。由于叶片的消光作用,因而冠层所接收的净辐射与叶片的消光系数有关,而叶片消光系数不仅同一种作物在不同阶段不相同,而且在同一天也有较大的差异,早晚其值较大,中午较小。它主要与冠层叶面积指数和太阳高度角有关。不同研究者所发表的数据有较大差异 (Vchijima, 1961; Impens 与 Iemeur, 1969; Senthil 等, 1977)。消光系数取值对蒸腾量计算结果有很大影响,因此需要进一步探讨叶片消光系数的变化规律。该模式用于冠层整体时其整体气孔阻力的计算以

及边界层阻力的计算亦还有许多问题需要探讨。

缺水条件下作物水分散失的计算是节水型灌溉农业中确定灌溉制度时必不可少的依据。这需要通过缺水条件下作物水分散失量与充分供水条件下作物水分散失量的比值同作物叶水势、土壤基质势、天气状况的关系的研究,建立通过充分供水条件下的作物潜在蒸腾量和包含叶水势、土壤基质势等因子的修正系数的缺水条件下作物实际蒸腾量计算模式。

田间植物叶面蒸腾和棵间土壤蒸发比例关系是 SPAC 水分传输动力学模拟中所需的参数,也是一个十分棘手的难题。T. Sakuratani (1987), 根据能量平衡原理计算冠层叶片和棵间土壤所接收的净辐射,由此比例关系确定比例系数,但仅对于土壤表面较湿润的情况较适用^[25]。因此,叶面蒸腾与棵间蒸发比例关系影响因素复杂,需从理论上进一步探讨其计算方法。

四、关于 SPAC 水分传输动态模拟的研究

Nimah 和 Hanks (1973) 在根区土壤水分运动方程的右端加入根系吸水项,该根系吸水项考虑了土壤溶质的影响和根导管传导水分的内摩擦阻力,但参数不易取得,不便于实际应用^[26]。石田朋靖,中野政诗 (1981) 以 Van den Honert 假定为基础考虑根系吸水项,模拟了 SPAC 水分传输动态,但他们的研究仅限于容积很小的人工土柱^[27]。R. Horton (1989) 对冠层覆盖情况下的水热耦合运移进行了动态模拟,但主要侧重于土壤系统^[28]。Van de Griend 与 Van Boxel (1989) 对 SPAC 水热转换关系进行了研究,但是侧重于土壤表面之上的水热收支、传输和转换关系的模拟^[29]。

国内邵明安等 (1987) 曾对植物根系吸收土壤水分进行了数学模拟,虽然采用较为复杂的根系吸水函数,但是仍侧重于土—根系统,而且包含较为复杂难测的参数,应用起来有困难^[30]。姚建文 (1989) 曾对有冬小麦、玉米根系吸水条件下的土壤水分运动问题进行了模拟,但是这些模拟模型仍然是侧重于根—土系统^[31]。康绍忠 (1991) 对 SPAC 水热动态进行了模拟研究,但以考虑地上部分的水热状况为主^[32]。据此,作者 (1992) 曾从整体上与相互反馈关系上建立了 SPAC 水分传输动态的计算机仿真模型,经几年在大田中的实际应用,取得一定效果,该模型在已知的天气条件 (如气温、风速、辐射、温度、日照等)、土壤含水量的初始剖面 and 一定的边界条件下不仅能预测土壤含水量 (或土壤基质势) 的时空分布,而且还能预测作物蒸腾、棵间蒸发、根系吸水和叶水势的变化规律,为农田灌溉预报提供科学依据。

动态仿真算法及仿真语言的发展为 SPAC 水分运移动力学模拟这样复杂的连续系统仿真提供了有力的工具。如 M. G. Huck 和 D. Hillel (1983) 曾提出了一个考虑光合、呼吸、蒸腾和土壤水动力学特性的根系生长和水分吸收的模型,并利用连续系统仿真语言中的 CSMP 语言计算,取得了较满意的结果^[33]。利用连续系统仿真语言及其相应的算法为求解 SPAC 水分传输动态这样复杂的问题提供了方便,仿真与一般的运算或求解数学模型不同,它是利用模型在计算机上进行试验研究的过程。这是今后发展的方向。

五、关于 SPAC 水分运移理论的应用研究

从 70 年代后期至今的十多年里,一些发达国家对 SPAC 的研究,已远远不只局限于 SPAC 本身的基本理论,而是将这一理论和方法作为基础来解决生产实践中比较综合、复

杂的问题。

S. K. Gupta, K. K. Tanji, D. R. Nielson (1984) 等人结合喷灌和氮肥施用速率通过 SPAC 中水分传输的研究预报根层中氮素淋失, 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, 这是将 SPAC 理论直接应用生产的一个实例。

Sexton 等人 (1974) 提出的 SPAC 模型, 其综合性较强, 其中土壤水分再分布是用物理方法得到的近似值, 作物蒸腾是用半经验公式计算的。这种模型可计算根系吸水速率和蒸腾速率, 或可模拟根系层中的土壤水分运动及水在植物组织中的运转过程, 这些预报结果可用于指导灌溉。

SPAC 理论应用于水文学领域, 大都可以连续模拟集水区 (或流域) 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 WSDAHL 模型 (Horlton 等, 1977), 通过分区来模拟土壤与植被的空间变化, 每区又分为若干均匀土层, 蒸发蒸腾与入渗都是根据作物特性及当时的土壤湿度计算的。

SPAC 理论在农田灌溉中的应用, 在模拟预测田间土壤水分动态变化和作物蒸发蒸腾动态变化进行灌水预报, 以及模拟冠层叶温或叶水势、气孔阻力的动态变化等的研究已有一定进展, 但在田间水分的转化效率、节水灌溉指标体系、作物缺水信息及诊断和以节水高产为目标的农田水分管理与调控方面尚须探索和不断深入。

六、作者近年来的研究工作

根据 SPAC 水分传输问题研究的进展和黄土高原地区节水灌溉的实际需要, 作者在进行 SPAC 水分传输问题研究时选择如下几个方面作为主要的研究任务。

(1) 进行系统的 SPAC 水分传输及能量转化要素的观测试验研究, 获得全面综合的信息; 在试验研究成果的基础上, 分析 SPAC 中能量、阻力分布规律和相互反馈关系, 以及外界环境条件对 SPAC 中的水分能量、水流阻力及水流通量的影响, 重点探讨叶气孔阻力和叶水势与外界环境条件的关系, 建立叶片气孔阻力、叶水势动态变化的综合计算模式; 分析 SPAC 中水容的分布, 以求对 SPAC 中力能关系有更进一步的认识。

(2) 以植物根系伸展、根系分布以及根系吸收土壤水分的实测资料为基础, 分析根系伸展规律和根系分布密度与土壤水分条件的关系及其在作物生育期内的变化规律, 利用动态模拟技术分析根系吸水的物理变化规律, 在此基础上建立既能反映作物根系吸水的物理过程, 又较为简便实用的作物根系吸水模式。

(3) 探讨不同土壤水分能态下作物蒸腾、棵间土壤蒸发和总蒸发蒸腾之间的数量关系及随时间的变化规律; 利用冠层与棵间土壤表面的能量平衡方程, 建立叶面蒸腾与棵间土壤蒸发比例系数的计算模式; 研究缺水条件下作物水分散失量的计算方法。

(4) 在深入研究作物根系吸水和水分散失规律以及 SPAC 水分运移力能关系的基础上建立 SPAC 水分传输动态仿真模型并求解, 用实测资料检验模型的可靠性和敏感性, 用该模式预测土壤水分或基质势、叶水势、作物根系吸水、蒸腾与棵间蒸发的动态变化, 并考虑田间土壤的层状结构, 使之较为符合实际情况。在此基础上对 SPAC 水热耦合运移问题进行动态仿真, 不仅预测其水分动态, 而且要预测叶温、地温和能量平衡中潜热、显热的比例