

土壤—植物—大气(SPA C)系统和农林 复合系统水分运动研究综述

朱首军 丁艳芳 薛泰谦

(西北农林科技大学 陕西杨陵 712100) (延安市林业站)

摘 要: 在查阅大量文献资料的基础上,就 SPA C 系统和农林复合生态系统中水分运动的研究状况及发展趋势作了较为详细的文献综述。

关键词: SPA C 系统 农林复合生态系统 水分

中图分类号: S152 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2000)01- 0049- 05

Moisture Movement Literature on Summarizing SPA C System and Agri-forestry

ZHU Shou-jun DING Yan-fang

(Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry Yangling Shaanxi 712100)

XUETai-qian

(Forestry Station of Yan'an City)

Abstract On the basis of consulting a lot of literature data, we summarize status quo and development uptrend of moisture movement on SPA C system, and agri-forestry.

Key words SPA C system agri-forestry moisture

从 1856 年法国工程师 Darcy 通过实验得出达西饱和土壤水流运动方程,到当前广泛开展的土壤—植物—大气连续体(简称 SPA C)研究,前后 100 多年的实践,关于 SPA C 水分运移规律的研究,前人做了大量的工作,取得了巨大的成就。

1 土壤—植物—大气连续体(SPA C)

中水流运动研究综述

自 1966 年 Philip 提出土壤—植物—大气连续体以来,当代研究田间土壤水分循环和平衡、土壤—植物水分关系以及地下水—土壤水—地表水—大气水转化都是以 SPA C 为基础的。在 SPA C 中,由于统一了能量关系,为分析和研究水分运移、能量转化的动态过程提供了方便。

1856 年法国工程师 Darcy 通过实验得到了达西饱和土壤水流运动方程,开创了土壤水分运动定量研究的新局面。

1936 年 Richards 在前人研究的基础上,得出了 Darcy-Richards 非饱和土壤水分运动方程,该模型的提出标志着土壤水分运动模型研究进入了一个新阶段。

1957 年,Philip 结合前人的理论和实验成果,考虑了非饱和带中气态水的运动,首次提出了非恒温条件下的土壤液态和气态水流运动方程,成为土壤水流模型发展的又一个里程碑。

由于未考虑土壤的滞后效应及土壤的空间变异性,Philip 方程只适合单一的土壤水分变化过程。1958 年,de Vries 对 Philip 方程进行了扩充,引进了吸附水中的热平流和湿润热概念,在此基础上,Milly (1982) 得出了考虑滞后效应的非均质土壤水热耦合运动模型。

80 年代以来,我国在这方面也做了大量工作,取得了一些进展。魏朝富(1989)等进行了紫色土的水势温度效应及水分热力学函数的研究;张一平、高

* 收稿日期: 2000- 01- 01

国家“九五”重点科技攻关计划项目,编号为 96- 004- 05- 07。

俊风、闵安成(1989, 1990, 1995)等通过对 SPAC 水分热力学的研究, 提出了水势温度效应概念, 确定了 SPAC 水分热力学函数的测定方法和计算公式, 在此基础上, 讨论了田间自然条件下温度对土壤水热的影响, 将室内土壤水分热力学研究引向田间土壤; 王全九等(1994)从能量观点出发, 将土壤水热力学与土壤动力学有机结合起来, 在充分考虑了温度场及一些力场对土壤水分运移特性影响的基础上, 推出了土壤水分运动方程, 使土壤水分运动方程具有更广泛的适用性; 杨邦杰(1996)研究了斥水土壤中的水热运动规律, 建立了斥水土壤水热运动的数值模型。王同科(1997)等将水热方程离散为一个块三对角代数方程组, 给出了 SPAC 中水热耦合运移方程的有限元算法, 使得水热参数同时被求出^[2~10]。

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, 在根系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。微观法与野外实际情况往往差异较大, 一般多用于根系吸水机制的研究, 很难应用于根系吸水的模型定量分析。宏观法则忽略了水分向个别根的运动, 在土壤水分运动基本方程的基础上加以修正, 即在 Darcy-Richards 非饱和土壤水分运动方程右边加上一个吸收项, 提出和改进模型的实质就在于用不同的吸水函数来描述根系吸水过程。Gardner (1960) 和 Cowan (1965) 等人最早用数学物理法开创了根系吸水的定量研究^[11, 12]; 自 Gardner (1960) 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的工作, Feddes (1978)、Hoogland 等 (1981) 提出了根系吸水的线性关系式, Prasad (1986) 对 Hoogland 的模型进行了改造, 建立了从表层到最大根深处根系吸水呈线性递减的模型^[13~15]; 田哲旭等 (1996) 将线性根系吸水模型应用于土壤—作物系统中, 探讨了纤细根系吸水模型在土壤—作物系统中的有效性^[16]; 特别是 Molz (1981) 提出的吸水函数具有广泛的代表性和重要的参考价值^[17]。邵明安 (1987) 在植物根系吸水物理过程定量分析的基础上, 提出了一个能反映根系吸水机理的宏观数学模型^[18]; 康绍忠等 (1992) 依据冬小麦根系伸展深度、重量根密度以及土壤含水量分布的实测资料, 对冬小麦根系吸水分布进行了动态模拟, 建立了冬小麦根系吸水模式^[19]; 刘晓明等 (1992) 根据实测资料提出了玉米根系吸收模型^[20]。

SPAC 中水分传输阻力包括土壤—根系水分传输阻力和植物—大气系统水分传输阻力。Thom (1975) 应用扩散理论, 提出了动量、热量、水汽和二

氧化碳传输阻力之间的关系式, 又经过大量田间试验, 提出了大田风速廓线函数^[21]。Bailey 和 Davies (1981) 通过对该函数积分得出了动量传输的边界层阻力^[22]。Choudhury 和 Monteith (1986) 考虑了表面温度的影响, 并计算了边界层阻力^[23]。Penning de Vries (1972), Jarvis (1976), Thorpe et al (1980) 等人根据气孔阻力的模型^[24~26]。刘萱和王天铎 (1988) 提出了计算气孔导度的经验公式^[27]。卢振民 (1992) 给出了气孔阻力与净辐射、空气饱和水汽压差、气温等气象因素间的经验公式^[28]。邵明安 (1986)、康绍忠 (1993) 等人根据田间实测资料, 分析了土壤—植物—大气连续体中水流阻力及相对重要性, 讨论了控制连续体水流运动的气孔阻力的变化规律及其与环境因素之间的关系^[29, 31]。康绍忠等 (1993) 根据玉米生育期的田间试验资料分析了土壤—植物—大气连续体中水热和水流阻力的分布, 建立了连续体中玉米叶片水热的动态模拟公式^[30]。

土—根系统的阻力分布一直是 SPAC 系统中研究的热点, 但迄今尚无统一的认识。土—根系统是一个受多种环境因素影响的复杂系统, 目前的研究都是基于某种特定的环境条件下进行的。

1953 年 Penman 首次提出了计算单个叶片气孔蒸腾的模式, 1959 年 Couvey 把气孔阻力的概念推广到整个植被表面; Monteith (1965) 在 Penman 和 Couvey 等人的工作基础上得出了计算整个冠层的 Penman-Monteith 公式^[32]。该公式全面考虑了影响植物蒸腾的大气因素和作物生理因素, 为蒸腾和蒸散研究开辟了一条新途径。

蒸发散问题的研究一直是 SPAC 中重要的一环, 近年来, 我国学者对其进行了大量的研究, 取得了许多研究成果。康绍忠 (1986) 在分析了蒸发力、土壤有效含水量和作物叶面积指数对农田蒸散量影响的基础上, 以水量平衡为基础建立了计算和预报农田实际蒸散量的数学模型, 提出了计算蒸发力的半经验公式^[33]; 李宝庆等 (1987) 提出了用实测土壤水势值推求土壤蒸发量的方法, 并用实测资料进行了验证^[34]; 卢振民 (1988)、康绍忠 (1991) 等依据 Penman-Monteith 方法从理论上分析并导出了田间作物蒸腾量的估算模式, 并对参数估算作了详细分析的讨论^[35, 36]; 杨邦杰 (1989) 研究了土壤蒸发过程的数值模拟及其应用^[37]; 康绍忠等 (1991) 对干旱缺水条件下麦田蒸散量计算方法进行了研究^[38]; 蔡焕杰等 (1991) 提出了计算农田蒸散量的冠层温度法^[39]; 刘昌明等 (1992) 提出了土壤—植物—大气连续体中的蒸发散模型^[40]; 康绍忠等 (1995) 依据在冬

小麦和玉米冠层表层及冠层内部下方土壤表明的净辐射观测资料, 建立了蒸腾蒸发分摊模型^[41]。孙景生等 (1995) 根据 SPAC 原理, 通过田间水热耦合运移的数值模拟, 提出了作物蒸腾和棵间蒸发估算模型^[42]。

关于蒸发散的理论及计算方法可分为水量平衡法、紊流扩散法、模式综合法和经验方法等, 各种理论和方法都有其适用条件和局限性。70 年代提出了土壤水分通量的概念, 随着土壤水分运动通量理论与方法的发展, 在国内外土壤蒸发等方面已有初步应用。

Van den Honert (1948)、Philip (1957)、Monteith (1965)、Cowan (1965) 等人的工作为 SPAC 综合模型研究的发展奠定了基础^[43, 44, 12, 32]。

在前人研究的基础上, 又提出了一些较大的模型。Lambert 和 Penning de Vries (1973) 提出了 TRO IKA 模型^[45]; Nimah 和 Hanks (1973) 提出了考虑非稳定、非线性宏观源汇项等的模型^[46]; Feddes (1974) 对 Nimah 和 Hanks 模型进行了改进, 提出了蒸散用结合方程、土壤蒸发根据辐射计算、根系吸水用根密度随深度的指数分布函数的系统方法^[47]; Hansen (1975) 考虑了光合作用、呼吸和作物生长, 提出了 SPAC 水流模型^[48]; Federer (1979) 考虑了土壤水势和根系分布而建立的估算根系水分运输阻力的理论模型^[49]。

谭孝源 (1983) 首次在国内提出了 SPAC 水分传输的电模拟程式以及流经 SPAC 水分通量的数学模型^[50]。SPAC 理论的引入, 引起了国内学术界的广泛讨论, 并开始深入研究。

邵明安等 (1986) 以植物根系吸水的人工模拟试验所得的资料为依据, 运用水力的电模拟原理, 定量分析了 SPAC 中水流阻力各分量的大小、变化规律及其相对重要性^[29]。

康绍忠等人 (1992) 根据 10 余年的野外观测和实验室分析, 编著的《土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用》一书, 从能量传输与转换、力能关系分析、植物根系吸水作物、作物蒸腾蒸发、SPAC 系统计算机仿真等方面叙述了 SPAC 系统水分传输问题, 提出了根区土壤水分动态模拟、作物根系吸水蒸发蒸腾模拟 3 个子系统的 SPAC 水分传输模拟模型, 设计了 SPAC 水分传输模拟的计算机软件^[52], 具有重要的参考价值^[51]。

卢振民等 (1992) 根据详细的田间实验研究, 对 SPAC 水流运动进行了细致的研究分析, 建立了比较完整的 SPAC 水流运动模型。该模型针对 SPAC

水流运动的主要环节, 既考虑了气孔阻力的调节作用以及土壤温度对水流运动的影响, 又可用一般的气候资料和土壤水分运动参数预测土壤水分动态和作物体内的水分运动状况^[52]。

2 农林复合生态系统土壤水分综述

我国早期的林地土壤水分研究只有少量的零星工作。进入 70 年代, 林地土壤水分的研究有所改观。这些研究属于土壤水分形态研究范畴, 但作为土壤水分研究的一个方面, 以及在林业土壤水分研究从形态学观点向能量观点转变的过程中, 对林业生产起了极为重要的作用。

进入 80 年代, 土壤水势的概念开始进入林业土壤水分研究领域。郭连生 (1985) 在研究木本植物水势时, 引入了土壤-植物-大气连续模式的概念; 庄季屏 (1986) 首次全面、系统地介绍了 SPAC 理论及其发展^[68]; 李吉跃 (1988) 将苗木水势和土壤水势结合起来分析苗木的抗旱性; 周围逸等 (1990) 应用土壤水分运动基本方程分析了林地土壤的降雨入渗规律; 马履一等 (1993) 根据不同立地条件的土壤水分特征结合常规测定的水分常数, 全面分析了大兴安岭地区土壤水分对造林成活和苗木生长的作用。

尽管这些研究只是一种相关分析, 并未涉及土壤水分流动问题, 土壤水势也仅采用室内压力仪法测定, 但它标志着土壤水分的能量概念已开始在林业土壤研究中得到应用。

进入 90 年代, 土壤水分的能量概念在林业土壤水分研究中得到进一步的应用。刘启慎等 (1991) 采用烘干法和田间张力计法分别测定土壤含水量和土壤水势值, 并用模型拟合土壤水分特征曲线, 用以分析试验区土壤水分有效范围; 贺康宁 (1992) 采用 Basic 垂向一维流程序, 模拟林地土壤剖面水分变化、林地土壤入渗、径流和水分再分布过程, 较早地在林业土壤水分研究方面引入了土壤水分运动的数学模型; 周择福等 (1994) 通过实测的土壤水分特征曲线, 分析了不同植被的土壤持水性, 并应用多元统计分析建立了影响土壤持水性的土壤因子回归方程; 陈丽华等 (1995) 采用双环定水头和室内定水头法分别测定林地土壤的入渗过程和土壤饱和导水性, 在此基础上分析了林地土壤入渗的空间分布规律; 贺康宁 (1995) 应用土壤物理学的方法、理论和参数, 对水土保持林地土壤水分物理性质进行了实地观测, 分析了林地土壤饱和-非饱和导水性及入渗后的土壤水分再分布过程; 周择福等 (1997) 应用达

西定理和能量守恒原理推导了林地土壤水分入渗的数学模型, 水平土柱法实测了模型中的基本运动参数, 应用有限差分法在计算机上模拟了不同林地的土壤水分入渗过程并通过实测资料进行了检验^[62, 63]。

目前, 关于土壤水分运移的研究, 绝大多数是针对纯农田或纯林地的, 农林复合生态系统土壤水分运动的研究还很少, 且大都局限于探讨土壤含水量对林木生长、作物生长以及产量的影响等。如黄雨霖(1985)通过定位试验观测了农桐间作复合系统中土壤水肥动态及其变异性; 康立新等(1989)应用主成份分析法、模糊聚类法和灰色动态模型分析了农桐间作复合系统中泡桐对小麦生长和土壤水盐含量的影响; 邵治君(1990)根据观测资料分析了农田防护林系统土壤水分的变化及其与农田防护林生长的关系; 吴运英等(1991)通过对比试验, 研究了桐麦间作地水分利用状况及其与小麦产量的关系; 任勇等(1993)研究了道路-农田防护林-小麦复合系统水分关系, 指出林木进入农田系统, 不仅提高整体上的土壤水分含量, 而且充分利用了土壤水分, 林木和作物在生长季节上的差异性及深层土壤水分较大的调节和补充作用在很大程度上缓和了水分降低区的水分供需矛盾; 朱清科等(1995)通过实测黄土塬区农-林-路复合生态系统界面的土壤水分, 应用灰色关联分析法研究了系统界面土壤水分分布特征以及系统各组分与土壤水分之间的关系^[65, 66]。

而这些研究属于土壤水分形态研究范畴, 所采用的数学手段, 依然是统计学的范畴, 即调查、观测

林地土壤含水量和环境因子、气象因子、测树因子等, 然后将土壤含水量与各因子比较, 做统计分析, 获得统计的数学模型, 这种模型仅适用与非常有限的范围, 很难推广。

近年来, 土壤水动力学理论、SPAC理论开始应用于农林复合生态系统研究中, 沈言俐人(1996)应用土壤水动力学原理, 建立了林带-农田蒸散条件下的土壤水动力学模型, 通过参数的测定和选用, 模拟了土壤水分的动态变化, 并通过实测资料对模型进行了验证; 张劲松等(1996)运用土壤-植物-大气水分传输理论, 建立了农林复合模式的土壤分层水量平衡模型, 其中包括土壤蒸发与植被蒸腾、林木与小麦根系吸水、土壤层次间的水分交换及植被冠层截留量等水分要素模型, 用TURBO PASCAL编程进行数值计算, 并利用实测资料进行验证; 孟平等(1996)在张劲松等人研究的基础上, 应用土壤分层水量平衡模型, 对林带与冬小麦根系吸水、林带和农田的蒸散耗水、林带影响农田土壤水分范围与程度进行了研究; 孟平(1996)运用水量平衡原理, 并结合土壤动力学方法, 研究了农林复合中不同间作模式下的水分效应。这些成果为深入研究农林复合生态系统奠定基础。

纯农田或纯林地的土壤空间可近似地看作是各向均质的, 因而水流的运动可近似地按一维垂向流动进行研究。而农林复合生态系统中的状况要复杂的多, 由于两种以上的植物根系的交错分布, 使得土壤水分运动为二维或三维运动。关于这方面的研究还处在试验阶段, 没有完整、系统的理论。

参考文献

- 1 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 2 魏朝富. 紫色土水势的温度效应及水热力学函数的研究[J]. 西南农业大学学报, 1989(6)
- 3 高俊风. SPAC水分热力学函数及幼苗各叶位水分状况[J]. 西北农业大学学报, 1989(1)
- 4 高俊风. 不同水分状况下土壤-植物-大气连续系统水分热力学函数[J]. 华北农学报, 1990, 5(增刊)
- 5 张一平. 温度对土壤水势影响的研究[J]. 土壤学报, 1990, (4)
- 6 张一平. 土壤水分势力学函数的研究[J]. 西北农业大学学报, 1990, (3)
- 7 王全九, 王文焰, 白锦麟. 土壤水分运移热力学特性的研究[J]. 水土保持学报, 1994, (1)
- 8 闵安成, 张一平, 朱铭莪等. 田间土壤的水势温度效应[J]. 土壤学报, 1995, (2)
- 9 杨邦杰. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, (4)
- 10 王同科, 孙景生. SPAC系统中水热耦合运移方程的有限元迭代算法[J]. 水利学报, 1997, (3)
- 11 Gardner, W. R. , Dynamic Aspects of Water Availability to Plants. Soil Sci. 1960, 89: 63~ 73
- 12 Cowan, I R. , Transport of Water in Soil-plant-atmosphere System. J. Appl. Ecol. 1965, 2: 221~ 229
- 13 Feddes R. A. , Kowalik P. J. , Zaradny H. , Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc Wageningen, 1978, 189
- 14 Hoogland J. C. , Feddes R. A. , Belmans C. , Root Water Uptake Model Depending on Soil Water Pressure Head and Maximum Extraction Rate. Acta Horti, 1981, 18: 123~ 131
- 15 Prasad R. , A Linear Root Water Uptake Model. J. Hydrol., 1986, 99: 297~ 306
- 16 Molz, F. J. , Models of Water Transport in the Soil-plant-system: A Review, Water Res. Res. 1981, 18: 1245~ 1265

- 17 邵明安 植物根系吸收土壤水分的数学模型[J]. 土壤学报, 1987, (4)
- 18 邵明安, 杨文治, 李玉山 植物根系吸收土壤水分的数学模型[J]. 土壤学报, 1987, (4)
- 19 康绍忠, 刘晓明, 熊运章 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. 西北农业大学学报, 1992, (2)
- 20 刘晓明, 康绍忠, 韦忠 玉米根系吸水规律的分析[J]. 西北水资源与水工程, 1992, (1)
- 21 Thom, A. S., Momentum, Mass and Heat Exchange in Plant Communities In: Vegetation and the Atmosphere, Vol I Principle, London: Monteith, J. L. ed., Academic Press 1975, 57~ 109
- 22 Bailey, W. G. and Davies, J. A., The Effect of Uncertainty on Aerodynamic Resistance on Evaporation Model Boundary Layer Meteorol 1981, 20: 187~ 199
- 23 Choudhury, B. J. and Monteith, J. L., Implications of Stomatal Response to Saturation Deficit for the Heat Balance of Vegetation Agric For Meteorol 1986, 36: 215~ 225
- 24 Penning and de Vries, F. W. T., A Model for Simulating Transpiration of Leaves with Special Attention to Stomatal Function J. Appl Ecol 1972, 9: 57~ 78
- 25 Jarvis, P. G., The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field Phil Trans R. Soc Lond B. 1976, 273: 593~ 610
- 26 Thorpe, M. R., Warritt, B. and Landsberg, J. J., Response of Apple Leaf Stomata: A Model for Single Leaves and A Whole Tree Plant Cell Environ. 1980, 3: 23~ 27
- 27 刘萱, 王天铎 田间小麦叶片气孔对环境因子响应的模拟及叶片水分平衡的计算[J]. 植物生理学报, 1988, (14)
- 28 卢振民 土壤—作物—大气系统(SPAC)水流模拟与实验研究[M]. II 系统中水流运动阻力的确定, 见: 谢贤群等著 作物与水分关系研究, 北京: 中国科学技术出版社, 1992, 304~ 322

参考文献 29~ 68 略

(上接第 11 页)

仗的单项课题组; 公平合理的成果分享制度。

6 行动策略的反思

6.1 三大目标

有利于当地财政状况好转运输; 有利于当地农民群众的脱贫致富; 有利于科技人员的自强自立。为了实现上述目标, 在目前情况下, 普及两大理论, 实现两大转变是势在必行。

6.2 TOP (科学家、行政管理人员、人民群众的英文简写) 理论

在区域性开发治理这样长期而复杂的大系统运营中, 任何重大项目、重大措施的落实, 必须充分兼顾上述三者的特点和利益, 缺一不可, 其主要思路是, 科学家、行政管理部门、农民群众三者紧密配合, 各负其责, 各得其所, 各享其利, 真正体现科学家出成果, 行政领导出政绩, 农民群众得实惠的理想模式。

6.3 农业系统理论

在当前区域性治理开发过程中, 往往是从上到下的指令性计划决策, 忽视了对两个关键指标的考核和评价, 新技术措施同旧措施效益比较及该项技术成果通过什么方法, 具备什么条件方可推广到农

民手中, 落实到具体地块。采取该理论的基本点是改变计划经济的老作法, 代之以面向实际, 从最基层向上推进的工作方法。只有这样, 才能真正形成综合实力, 把农村经济的发展推上一个新台阶。

6.4 实现的两大根本转变

实现“要我治”向“我要治”的转变。把黄土高原的开发治理与农民的切身利益、眼前利益紧密结合, 趋利避害, 因势利导。农民的需求、农民的欲望才是真正的动力源; 实现把科学技术“送下乡”向农民群众主动“请到家”的转变。这就对科技人员提出了更高更实际的要求, 既要有真招又要全心全意为农民群众服务。

6.5 关注和推进的两个新的趋向

一是水土保持和沙漠治理的产业化研究与探索; 二是企业家阶层的大量介入和全社会的广泛参与, 其有利于商品、商品生产、商品经济体系的建立与完善, 有利于孕育新产业, 实现产业化。

6.6 需协调的几大关系

国家整体利益与区域性局部利益的关系, 直接经济效益与间接经济效益的关系, 当前利益与长期利益的关系。事关重大, 必须谨慎理顺, 制定相应的政策与策略。