

文章编号: 1001-6791 (1999) 03-0311-08

土壤水研究进展与评述^{*}

雷志栋, 胡和平, 杨诗秀

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 土壤水是联系地表水与地下水的纽带, 在水资源的形成、转化及消耗过程中有重要作用, 与农业、水文、环境等领域都有密切联系。所以土壤水研究越来越引起人们的重视, 有了长足的进步。目前, 土壤水研究走向多学科交叉, 如水热盐的耦合运移, 冻结土壤中水分的运移, 土壤-植物-大气连续体中的水热运移等。土壤水运动机理研究也更加深入, 如优先流、土壤水参数的测定及确定、土壤水参数的空间变异性等。土壤水研究的数值模拟方法也有一些突破, 如有限解析法、特征有限元法、交替方向有限元法等。土壤水研究的应用也更加广泛, 如用于水资源评价、土壤水分与作物的关系、水环境评价等。

关键词: 土壤水分; 土壤热; 土壤盐分; 土壤-植物-大气连续体; 研究评述

中图分类号: P 641.2 **文献标识码:** A

土壤水 (Soil Water) 指的是由地面向下至地下水水面 (潜水面) 以上土壤层中的水分, 亦称土壤中非饱和带水分。在 Jacob Bear 所著的《Dynamics of Fluids in Porous Media》即《多孔介质流体动力学》一书中, 将非饱和带 (有译称为充气带、包气带) 又区分为三个亚带即土壤水带、中间带 (或称渗水带) 和毛细管带。我国学术界习惯地将土壤水研究包括了整个非饱和带。

从学科领域, 土壤水可视为土壤学的一个分支, 但它又与多个学科与多个应用领域有着密不可分的关系。土壤水是联系地表水与地下水的纽带, 在水资源的形成、转化与消耗过程中, 它是不可缺少的成分。国际地圈生物圈计划 (IGBP) 强调界面过程研究, 力图把全球物理气候总循环模型 (GCMs) 与全球水循环模型耦合, 土壤水亦是其中组成部分; 灌溉或降雨均需转化成土壤水才能被作物 (含生态环境中各种植被) 所吸收, 因此土壤是国民经济基础——农业中各种种植业赖以生存的基础; 水文学中最重要的组成内容——产汇流理论, 亦取决于下垫面的土壤水状况; 作为当今国内、国际热门话题的环境保护问题, 涉及到化肥、农药、重金属等对土壤与地下水污染, 无一不与土壤水状况发生关系; 此外土壤水还与自然地理、植物生理等学科研究有一定联系。由于土壤水的特殊地位, 随着科学技术发展, 土壤水的研究在近 20 年来发展迅速。

虽然土壤水研究在理论上和应用上均有重要作用, 但由于问题的复杂性, 在相当长的时期内, 只能处于定性的描述或用各种经验的方法处理生产实践中不断遇到的土壤水问题。自从

收稿日期: 1999-03-20; **修订日期:** 1999-05-10

作者简介: 雷志栋 (1938-), 湖南澧县人, 清华大学教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分运动与四水 (大气水、地表水、土壤水、地下水) 转化关系等研究。主要著作有《土壤水动力学》, 发表学术论文 60 余篇。

1907 年白金汉 (Buckingham) 提出毛管势理论, 1931 年理查兹 (Richards) 导出非饱和流方程, 数学物理方法被逐步引入了土壤水的研究, 使该领域的研究有了长足的进步, 逐步由静止走向动态、定性描述走向定量、经验走向机理。从国际潮流上用能态观点研究土壤水逐步地取代以形态学观点与方法 (以苏联 A. A. 罗戴为代表) 研究的趋势。《土壤水》^[1] 一书 (Soil Water 由 D. R. Nielsen 等编著), 较系统地介绍了用水势观点研究土壤水。《土壤和水》^[2] 《土壤物理学的应用》^[3], 《土壤水动力学的计算模拟》^[4] 等在 70~80 年代陆续发表, 90 年代有《土壤水文学》^[5] 专著问世, 将土壤水研究逐步发展成较独立的学科分支。

我国 50 年代以来, 土壤水探讨主要围绕着农业发展 (对作物或产量探讨) 和土壤普查等, 研究工作较少。但以苏联罗戴为代表的形态学观点于此时系统地介绍到我国, 对我国土壤水分研究有重要影响, 客观地起到积极作用。70 年代末期, 随着我国改革开放, 各种学术流派得以百花齐放, 最具有代表性的是在第一次全国土壤物理学术讲座会 (1977 年 12 月杭州), 土壤水分的能量观点首次被介绍到国内^[7], 使人耳目一新。80 年代开始, 我国科技工作者在吸收国际学术界各种有益的学术观点基础上, 相继开展了土壤水的理论与试验研究, 学术空气十分活跃, 国际、国内交流也日益增多。这 20 年是我国关于土壤水研究发展最快的时期, 除了一批译著的出现, 扎根于国内的有关土壤水 (或以土壤水分运动为其重要内容的) 专著或著作陆续问世, 例如雷志栋、杨诗秀等所撰写的《土壤水动力学》^[8] (1988 年); 张蔚榛等人所著的《地下水与土壤水动力学》^[9] (1996 年); 康绍忠、刘晓明、熊远章等所著《土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用》^[10] (1994 年); 李韵珠、李保国编著的《土壤溶质运移》^[11] (1998 年); 杨邦杰等所著《土壤水热运动模型及其应用》^[12] (1997 年); 荆恩春等著《土壤水分通量法实验研究》^[13] (1994 年) 都反映了我国学者近 10 多年来研究成果的丰硕。全国性土壤物理学术讨论会至今已开了 6 次, 各次会议上涉及土壤水分研究的论文约占土壤物理学论文的 40%~60%, 土壤水分始终是土壤物理学学科中最为活跃的一个领域。

概括我国土壤水研究近 20 年的发展 (1978~1999 年), 我们已从向国际上先进科学学习的过程中脱颖而出, 显示出一定的实力, 成为参与国际上共同推动该学科前进的一支力量, 研究的特点亦从单学科走向学科交叉; 从均质走向非均质, 从点的研究走向面 (或区域) 的研究, 从理论研究推进到应用研究; 以下着重以土壤水运动研究与土壤水研究的应用两方面说明其进展。

1 土壤水运动机理的研究进展

能够定量地研究土壤水分运动状况正是能态学观点优于形态学观点之处。1931 年里查兹 (A. Richards) 导出非饱和流基本方程

$$\partial \theta / \partial t = \nabla [K(\theta) \nabla \Psi] \quad (1)$$

式中 θ 为土壤含水率; Ψ 为土水势; K 为非饱和导水率。 ∇ 为哈密顿算子。基本方程的一维、二维、三维以及在柱坐标、球坐标的表达式均可导出^[8]。基本方程尚可随着应用的需要, 改写成以基质势 Ψ_m , 含水率 θ , 位置坐标 (x 或 z) 或参变量 (u 或 v) 为因变量的表达式。

当水分与溶质运移相结合时, 可以导出溶质运移基本方程的表达式, 如

$$\alpha(\theta + c) / \partial t = \partial / \partial z [D sh(v\theta) \partial c / \partial z] - \alpha(qc) / \partial z + S_c \quad (2)$$

即是其中的一种, 国内外学者根据对物理模型的基本假定尚有多种表达式。土壤中热流基本方程可描述为

$$C_v(\partial T/\partial t) = \nabla [K_h \nabla T] \quad (3)$$

式中 T 为温度; C_v 、 K_h , 分别为热容量与导热率。当水分运动的研究扩展为水热运移的研究时, 出现了土壤水热耦合迁移的各种基本方程的表达式, 它既可研究常温条件下水热问题, 也可以研究负温条件下即冻结条件下水热耦合迁移问题, 亦即把水的相变问题考虑在内 (需增加相变方程)。

如前述及, 土壤水研究从单一学科走向多学科的交叉也体现在 SPAC (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) 系统的研究。SPAC 理论从 80 年代初介绍到国内, 把土壤-植物-大气看作一连续体, 用统一的能量指标——水势将不同介质之间相互关系看作整体中内部关系, 使土壤水和作物及生态环境协调研究成为可能, 为农田水循环等研究开辟了一个广阔的天地。我国学者在 SPAC 研究方面也作了大量工作, 例如, 刘昌明等关于 SPAC 系统的蒸散发计算^[16], 康绍忠等关于 SPAC 水分传输的计算机模拟^[17]等。随着物理模型的概括导出了本质上一致、形式上有所差别各种方程^[24, 25], 近年更把 SPAC 模拟扩展到地下水, 提出了 GSPAC 的模拟。

除了理查兹方程, 更精确地描述则是用多孔介质中多相流运动的基本方程, 最常见的有两相流运动方程

$$\begin{aligned} (k/\Phi\mu_n) \nabla [k_w (\nabla \rho_w - \rho_w g \nabla z)] &= \partial w / \partial t \\ (k/\Phi\mu_n) \nabla [k_m (\nabla \rho_m - \rho_m g \nabla z)] &= \partial n / \partial t \end{aligned} \quad (4)$$

可用于研究油在土壤中的污染等。

土壤水的保持与再分配, 作为土壤水运动的特例均可得以研究, 不再单独讨论。

基本方程的求解得益于计算技术和模拟技术的发展。由于描述土壤水运动机理的基本方程的复杂性 (非线性、高阶偏微分方程), 解析求解是十分困难的, 即使是最简单的定解条件, 还需要在各种简化条件下运用较复杂的数学推导求解, 为土壤水定量研究带来很大的困难。但随着计算机的普及以及计算技术的发展, 各种相当复杂的实际问题均可通过数学模拟方法定量求解。求解非饱和土壤水流的数值方法主要为有限差分法 (FDM) 和有限单元法 (FEM)。国内已由此发展了很多计算技术, 例如: 任理把有限解析法 (FAM) 引入求解非饱和流问题^[21]; 朱学愚、谢春红发展了非饱和流动问题的 SUPG 有限元数值法^[30]; 由于溶质运移中对流项在数值计算中容易产生数值弥散问题, 左强、冯绍元等采用了特征-有限元法 (CFE 法), 二阶迎风隐式差分法 (QUD 法), 改进交替方向有限元法等, 较有效地处理了数值弥散或振荡。

用数值模拟方法求解的精度主要取决于土壤水物理参数。对于水分运动的关键参数为比水容量 (即水分特征曲线斜率的倒数, 可用 $d\theta/d\Psi_m$ 表示, θ 为体积含水率, Ψ_m 为土壤水基质势), 非饱和导水率 $K(\theta)$ (或 $K(\Psi_m)$), 非饱和扩散率 $D(\theta)$ 。若进行溶质运移计算需要重要的水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta, v)$, 若进行水热模拟计算, 同样需相应的参数。因此, 在国内外土壤水的研究中, 首先涉及参数的研究。近 20 年来对其测定方法做过许多探讨, 但至今未有十分成熟而又统一的方法, 这不能不对土壤水的研究与进展产生不利的影响。

1989 年 11 月在美国加州召开了一次关于土壤水力性质评估的国际会议, 会后由 M. Th. Van Genuchten 教授等主编了论文集^[6]。该次会议主要讨论了用间接方法估计非饱和土壤水力特性。Van Genuchten 教授等人提出的估算方法颇流行, 他用下列表达式表示水分特征曲线:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (ah)^n]^{1-1/n} \quad (5)$$

式中 θ_r 、 θ_s 、 θ 分别为含水率、饱和含水率、残余含水率; h 为土壤基质势; a 和 n 为非线性回归系数。然后用 Mualem 的统计模型可导出非饱和导水率的计算公式如下:

$$K(h) = K_s \{1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{1/(n-1)}\}^2 / [1 + (ah)^n]^{(n-1)/2n} \quad (6)$$

简称VG模型。Van Genuchten曲线 $\theta(\Psi)$ 亦用幂函数形式表达

$$\theta = \theta_s \quad \Psi < 0$$

$$\theta = P_1 P_2 / (P_2 + |\Psi|^{P_3}) + P_4 \quad \Psi > 0 \quad (7)$$

式中 θ_s 为饱和含水率; P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为拟合参数; P_4 相当于残留含水率; P_1 、 P_2 之和为 θ_s 。国内已有学者将常见土壤的 $\theta(\Psi)$ 及 $K(\Psi)$ 概化为各种土壤水分参数的概化值^[27]供使用。

近年来我国学者已不再停留在室内试验阶段,对现场测定参数亦作了一定的研究^[18,19],有了一定的进展。

土壤水运动机理研究由均质走向非均质体现在对优先流^[32]的研究。优先流是近年来研究土壤水运动所提出的术语,因为水分和污染物在非饱和土壤中的迁移是目前土壤水和地下水研究的重要课题,多年来一直用一维数学模型估算,尚未能预示其污染的威胁,但若考虑土壤中优先途径存在,则研究成果需重新估计。

优先流目前通常分为三类,即大孔隙流、指流、漏斗流。大孔隙流由土壤的非均质性引起,田间土壤中大孔隙结构通常由土壤裂缝、根系通道和虫洞等组成。指流多是细颗粒土位于粗颗粒土之上的两层土壤中容易产生,但在均质土壤中湿润锋不稳定性亦会引起,即指水分和污染物沿柱状流动的途径(其形同手指而得称)。漏斗流也是由土壤的非均质性引起的,通常指细土壤剖面中有一个或几个粗土斜夹层,当非饱和流到达斜层时,水流沿斜层的表面倾斜流动至下端,则以漏斗流的形式向下流动。

目前,对优先流已有一些理论研究和实验成果,包括运用“水分视觉技术”,即在二维土样背面装均匀光源,前面一架摄像机将穿过土样光线录在录像带上,借助于计算机图象处理方法分析录象带上图象即可得含水量。也可用X射线测定二维指流。亦有运用地面渗透雷达测绘层状土及土壤夹层状况用计算机软件处理和分析,在理论上亦推导出一些模型,但总的说来优先流的机理仍在探索阶段。

作为土壤水机理研究的深入,70年代开始受到国际学术界普遍重视的土壤特性空间变异性的研究,80年代初在国内受到了关注,并开展了研究,这说明国内学者重视将土壤水理论应用于实践,已在思考应用中的实际问题。由于描述土壤水分运动方程及参数虽可表达土壤性质各向异性,但多是表达为“点”状况。由“点”到“面”,由“面”到区域是不同尺度的问题。所谓空间变异性指的是空间分布上的非均一性(在已按某种条件划分为“均匀”基础上仍存在的)。土壤的物理参数(各种粒径组成、干容重、水分特征曲线、非饱和导水率等),土壤中各种状态变量(含水率,基质势等)也都存在着变异性。从实用角度,人们主要关心的是状态变量的宏观特征与其随时间的变化规律。在寻求解决办法时,主要用两种途径:一是处理确定性数学模型的参数,由此研究参数的空间变异规律性;另一途径是把确定性模型和随机模型结合起来,即近期新发展的“标定”(Scaling)理论与方法。

处理空间变异性问题除可用经典统计分析外,近年来国际上将地学统计学方法引入本领域,亦得到国内研究者们响应,即研究各种土壤特性的空间结构,包括在河北、山东、山西、内蒙、新疆等地田间实测含水率,基质势以及各种土壤物理特性的自相关性,空间分布的半方差,并将成果用于最优内插。标定理论与方法引入后,国内的同行有将其用于水文模型,例如研究入渗量的空间分布,入渗公式的标定等。

与本问题相联系的是把不确定模型与随机模拟引入土壤水研究领域,国内一些青年研究者

在这方面作了有益的探索。例如, 非均质土壤中二维非饱和土壤水分运动的随机分析^[28]; 田间根系层储水量动态变化概念性随机模型的建立并成功地求解, 已能够对田间根系层储水量给出随机动态的模拟结果^[36]。

2 土壤水研究的应用进展

(1) 能量观点的引入首先反映在土壤水分测试技术上的进步。虽然作为经典的方法即取土烘干法仍是可取的, 但近 20 年来, 国内开展了较大量的测定土壤水分的方法和仪器的研制。首先是中国科学院南京土壤研究所研制的张力计有小批量生产, 随后很多单位能自制张力计供使用, 并有各种改进, 多用于研究灌溉节水或控制环境等方面。随着中子水分仪技术传入我国, 江苏农业科学研究所原子能研究所研究的铍源中子水分仪已在国内形成商品。随后核工业部所属的北京核子仪器公司出品的 CNC503DR 智能中子水分仪, 均有计算机存贮、显示、打印等功能。但总体说来, 质量水平仍稍逊于国际产品。国内还在努力地研制各种传感器, 用电阻式、电容式或相应原理做成传感器, 并配以单板机等将讯号自动采集, 但目前仍没有十分成功且商品化的产品。近几年, 用时域反射仪 (Time Domain Reflectometry 简称 TDR) 逐渐进入中国市场, 该仪器在 80 年代还不成熟, 但经改进后, 进入 90 年代在国际上已很普遍, 探头亦多样化, 由直插式发展为横插式, 便于长期田间水分监测, 且可自动监测。目前国内尚没有生产 TDR 产品, 较之中子水分仪, TDR 使用更为方便, 精度亦高, 是一种很有前途的测定土壤水分仪器, 但仪器价格昂贵, 较难推广应用, 目前国外已有其简化产品例如单点式, 但价钱仍高。

除了测试仪器外, 国内还发展了多个室内大型物理模拟设施 (例如大型土柱、试验槽) 和现场试验设施。地矿部水文地质工程地质研究所在室内建设了大型物理模拟实验装置, 在零通量面、土壤水势测量技术方面作了很多研究。水利、土壤、农业、地矿等部门修建的地中渗透仪 (Lysimeter) 用于研究潜水蒸发降雨入渗补给等规律, 其本质是研究非饱和带水分运动。

(2) 土壤水用于水资源评价。地下水资源评价中地下水均衡仍是最基本方法, 其要点是确定水均衡参数, 包括降雨入渗补给系数 $\alpha = P_r / P$ (P_r 为降雨补给地下水量; P 为降雨量); 潜水蒸发系数 $C = E_g / E_0$ (E_g 为潜水蒸发量; E_0 为水面蒸发量); 给水度 $\mu = W / H$ (地下水单位下降从土壤中排出的水量), 这些水均衡参数的确定本质上均是非饱和土壤水运动的结果。

在水资源评价中另一重要应用是研究四水 (地表水、地下水、土壤水与大气水) 转化规律。当对土壤水认识很少时, 流域水文模型或水分转化均用黑箱子模型, 即仅研究输入项与输出项关系, 随着土壤水研究的进展, 各种模拟性模型与水动力模型得以发展。新型的流域水文模型, 特别是分布式水文模型中, 土壤水分运动模拟已成为其重要部分。

(3) 土壤水与作物关系问题的研究。由于我国国民经济是以农业为基础, 我国又是水资源十分紧缺的国家, 农业中节水问题被提到很高的地位, 围绕着农田土壤水分的转化问题与农田水分的有效利用开展了大量的研究。最常见的是各种农田水均衡模式以及 SPAC 水分迁移的研究, 土壤水都是其核心内容之一。土壤水研究更为直接地为农业生产服务则是研究如何充分发挥土壤水分的潜力, 即作物产量与土壤水分关系, 作物水分生产函数研究即是其成果^[46]。如何加强农田水分的管理, 使其发挥出充分效益亦是重要的内容, 由此国内研究了各种墒情监测与预报的模型^[20, 37]。研究土壤空间变异性并用于田间土壤墒情监测的合理取样数目, 田间墒情布点方法等也是直接为农业生产服务的。冻融条件下土壤水热耦合运移被用于研究北京等地区实

行的冬灌的作用, 以及季节性冻土地区的盐碱化控制^[23, 35]。

(4) 土壤环境中的溶质运移问题 包括生态环境在内的环境问题日益引起国际国内高度重视。化肥、农药、除草剂等都属于与溶质有关的物质, 这些物质在土壤中运移状况不仅与土壤水的流动有关, 而且与溶质的性质及随水移动过程中所发生的物理、化学和生物化学过程有密切关系, 它可包括根的吸收、土壤表面的挥发、降解(农药的水解及微生物的降解)、硝化与反硝化、溶解与沉淀等等。主要研究进展是近三四十年, 70年代开始, 研究工作由实验室走向田间, 这促进了优先流研究的发展, 目前国内已有土壤溶质运移的专著^[11]。计算机模拟技术发展使运用土壤溶质运移原理对各种生产实际问题作出模拟和预测成为可能, 但很多成果还有待于生产应用中检验与改善。

3 研究工作的展望

随着人口(粮食)、资源(水、土)与环境(污染、生态)成为世界上三大热点问题, 与其有密切联系的土壤水研究亦必然会随着需要而得到发展, 这种研究应服从于可持续发展的战略。

展望 21 世纪, 随着科学技术的进步, 期望有更多新的手段促进本领域的研究。例如, 测试技术仍需有新的飞跃才有望在生产领域中使研究成果得以普遍应用; 遥感技术的发展虽在土壤水研究中有所尝试^[22], 但仍属于起步阶段; SPAC 系统的研究虽已做了较多工作, 但按国际上已在酝酿的国际地圈-生物圈计划(IGBP), 国际水文计划(IHP), 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)均把各种尺度下通过大气-植被-土壤系统的水分输送过程和能量交换问题作为其重要内容, 因为该内容具有明显的综合性和学科交叉的特点, 是土壤物理学、农田生态学等前沿研究领域。另外, 土壤水的研究在下列方面必将向深入发展: 优先流在内的土壤非均质性研究将会有新的进展。将土壤水的研究和土力学结合起来, 在构造新的土的本构关系方面对一些学者也是富有吸引力的;

出于对宏观与全局研究的需要, 将进一步探讨点、面及区域的土壤水问题的特点及相应的尺度效应或转换, 其中包含了前述新技术与方法的应用; 未来土壤水问题的研究仍将继续在机理、应用、特别是理论与实践的结合上不断深入。

土壤水动力学是很多学科的基础, 在未来发展中有望与地学、水文学、环境学、灌溉排水学、植物生理学、土力学等学科的联合、交叉发展中开拓出新的领域。

综上所述, 21 世纪的土壤水研究应朝着综合性、前沿性、开放性、应用性继续努力!

参考文献:

- [1] Nielsen, D R Jackson, et al Soil Water[M]. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1972. 220P.
- [2] Hillel D. Soil and Water Physical Principles and Processes[M]. Academic Press, New York, 1971(华孟、叶和才译 北京: 农业出版社, 1981. 268P).
- [3] Hillel D. Application of Soil Physics[M]. Academic Press, New York, 1980. 312P.
- [4] Hillel D. Computer Simulation of Soil Water Dynamics[M]. Academic Press, New York, 1977. 252P.
- [5] Kutilek M, D R Nielsen. Soil Hydrology. Geo-ecology Textbook[M], Catena Verlag Germany. 1994, 370P.

- [6] Van Genuchten, F J Leig, L J lund Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soil Proceedings of the International Workshop on Indirection Method for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soil[M]. California, USA, 1992 468P.
- [7] 庄季屏 四十年来的中国土壤水分研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 241~ 247.
- [8] 雷志栋, 杨诗秀, 等. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988 276P.
- [9] 张蔚榛等. 地下水与土壤水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996 287P.
- [10] 康绍忠, 刘晓明, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994
- [11] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998 312P.
- [12] 杨邦杰, 隋红建. 土壤水热运动模型及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 224P.
- [13] 荆恩春等. 土壤水分通量法实验研究[M]. 北京: 地震出版社, 1994 183P.
- [14] 李韵珠等. 土壤水和养分的有效利用[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994 204P.
- [15] 张瑜芳, 张蔚榛, 等. 排水农田中氮素转化运移和流失[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 184P.
- [16] 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 255~ 263
- [17] 康绍忠, 刘晓明, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟[J]. 水利学报, 1992, 3: 1~ 12
- [18] 杨金忠, 叶自桐, 等. 野外非饱和土壤中溶质运移试验研究[J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 245~ 252
- [19] 杨金忠, 叶自桐. 野外非饱和土壤水流运动速度的空间变异性及其对溶质运移的影响[J]. 水科学进展, 1994, 5(1): 9~ 17.
- [20] 杨诗秀, 雷志栋, 等. 农田尺度土壤水分监测[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 14~ 19.
- [21] 任理. 有限解析法在求解非饱和土壤水流问题中的应用[J]. 水利学报, 1990, 10: 55~ 61.
- [22] 陆家驹, 张和平. 应用遥感技术连续监测地表土壤含水量[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 281~ 287.
- [23] 胡和平, 杨诗秀, 等. 土壤冻结时水热迁移规律的数值模拟[J]. 水利学报, 1992, 7: 1~ 8
- [24] 冯广龙, 罗远培. 以土壤水分作为参变量的根冠系统模拟调控模型[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 224~ 230
- [25] 吴擎龙, 雷志栋, 等. 求解 SPAC 系统水热输移的耦合迭代计算方法[J]. 水利学报, 1996, 2: 1~ 10
- [26] 康绍忠. 土壤水分动态的随机模拟研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 17~ 24
- [27] 吴擎龙, 雷志栋, 等. 压力入渗仪测定导水率的理论及其应用[J]. 水利学报, 1996, 2: 56~ 62
- [28] 黄冠华, 沈荣开. 非均质土壤中二维非饱和土壤水分运动的随机分析. 水科学进展, 1997, 8(2): 117~ 122
- [29] 邵明安. 植物根系吸引土壤水分的数学模型[J]. 土壤学报, 1987, 24(4): 295~ 305
- [30] 朱学愚, 谢春红等. 非饱和流动问题的 SU PG 有限元素数值法[J]. 水利学报, 1994, 6: 37~ 42
- [31] 康绍忠, 刘晓明. 作物覆盖条件下田间水热运移的模拟研究[J]. 水利学报, 1993, 3: 11~ 17.
- [32] 刘亚平, 陈川. 土壤非饱和带中的优先流[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 85~ 89
- [33] 毛晓敏, 杨诗秀, 等. 叶尔羌灌区冬小麦生育期 SPAC 水热传输的模拟研究[J]. 水利学报, 1998, 7: 35~ 40
- [34] 王超. 氮类污染在土壤中迁移转化规律试验研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(2): 176~ 182

- [35] 尚松浩, 雷志栋等. 冬灌对越冬期土壤水分状况影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 1997, 3: 65~ 70
- [36] 罗毅, 雷志栋等. 根系层储水量对随机腾发响应特性的初步分析[J]. 水利学报, 1998, 5: 44~ 48
- [37] 卢玉邦. 土壤水分预测模型研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(1): 51~ 56
- [38] 杨诗秀, 雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 447 ~ 456
- [39] 左 强. 改进交替方向有限单元法求解对流弥散方程[J]. 水利学报, 1993, 3: 1~ 10
- [40] 郭群善, 雷志栋, 杨诗秀. 作物生长条件下田间土壤水分平衡计算研究[J]. 水利学报, 1997(增刊): 40~ 46
- [41] 史海滨, 陈亚新. 饱和-非饱和流溶质传输的数学模型与数值方法评价[J]. 水利学报, 1993, 8: 49~ 55
- [42] 雷志栋, 杨诗秀等. 地下水位埋深类型与土壤水分动态特征[J]. 水利学报, 1992, 2: 1~ 6
- [43] 邵明安, L P Simmonds. 土壤-植物系统中的水容研究[J]. 水利学报, 1992, 6: 1~ 8
- [44] 黄冠华, 叶自桐等. 一维非饱和溶质随机运移模型的谱分析[J]. 水利学报, 1995, 11: 1~ 7.
- [45] 王仰仁, 雷志栋等. 冬小麦水分敏感指数累积函数研究[J]. 水利学报, 1997, 5: 28~ 35

A Review of Soil Water Research

LEI Zhidong, HU He-ping, YANG Shir-xiu

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Soil water is the connection of surface water and groundwater. It is of great significance in the formation, transformation and consumption of the water resources and has close relationship with agriculture, hydrology and environment etc., so that the soil water research has been drawn more and more attention and made great progress. The main achievements of the soil water research are as follows: (1) Soil water research is of interdisciplinary characteristic, such as coupled water, heat and salt transfer, water transfer in freezing soil, water and heat transfer in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC). (2) The mechanisms of soil water movement were studied deeply, such as soil water potential flow, measurement and determination of soil water parameters, spatial distribution of soil water parameters. (3) Advanced numerical simulations were introduced in soil water research, such as finite analysis method, characteristic finite element method, and alternating direction finite element method. (4) Results of soil water research have been applied widely, such as the assessment of water resources, the study of the relationship between crop and soil water and the assessment of water environment.

Key words: soil water; soil heat; soil salt; soil-plant-atmosphere continuum (SPAC); research review