

土壤水动力学模型在 SPAC 系统中应用研究进展

吴 珊^{1,2}, 莫 非², 周 宏^{1,2}, Asfa Batool², 赵 鸿³,
邓浩亮^{1,2}, 陈应龙⁴, 熊友才², 张恒嘉¹

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州大学生命科学学院干旱农业生态研究所/草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省气候变化与减灾重点(开放)实验室, 甘肃 兰州 730020;

4. 西澳大学地球与环境学院/农业研究所, 澳大利亚 珀斯 6009)

摘 要: 从土壤水动力学典型的裸地蒸发模型、蒸发蒸腾量模型、土壤水分入渗模型出发, 综述了 SPAC 系统下国内外现行的植物根系吸水模型、溶质运移模型、农业生态系统模型等研究进展, 归纳和讨论了目前土壤水动力学模型在 SPAC 系统建模中存在的问题与不足。并对该领域的研究方向和应用前景进行了展望: 建立准确的数值模型来解决实际问题是蒸发蒸腾量模型未来研究的趋势; 入渗模型从点至区域的动态扩展, 并结合土壤侵蚀、污染物运移等因素的农业倾向性研究为潜在的重要分支方向; 根系吸水模型应更多被用于监测土壤水分动态、设计合理的灌溉制度及干旱预警等体系; 利用计算机、遥感等技术手段建立农业生态系统物能循环的机理性模型将为模型的实用性和精度提供有力支撑。

关键词: 土壤水动力学; SPAC 系统; 模型

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0100-10

Research progress of soil-water dynamics model applied in SPAC system

WU Shan^{1,2}, MO Fei², ZHOU Hong^{1,2}, BATOOL Asfa², ZHAO Hong³, DENG Hao-liang^{1,2},
CHEN Ying-long⁴, XIONG You-cai², ZHANG Heng-jia¹

(1. College of Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Institute of Arid Agro-ecology, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 4. School of Earth and Environmental / UWA Institute of Agriculture, The University of Western Australia, Perth 6009, Australia.)

Abstract: This paper starts from the typical models of soil water dynamics as bare land evaporation model, evapotranspiration model, soil water infiltration model, and summarizes the research progress of plant root water uptake model, solute transport model and agricultural ecosystem model in the SPAC system. The article also analyzes and discusses the problems and shortcomings existed in current establishing model in the SPAC system by the soil water hydrodynamics model, and carries out the expectation for the developing direction and application prospect in this field. The research tendency of evapotranspiration model in future is to establish accurate numerical model to solve the practical problems. The dynamic expansion of the infiltration model from point to region, combined with the soil erosion, pollutant migration is the potential research direction. The root water absorption model should be more and more used to monitor the soil water dynamics design reasonable irrigation schedule and the droughts forecast system. It will provide strong support for the practicability and accuracy of the model by using the computer, remote sensing technology and so on to establish the mechanism model concerning matter and energy circulation in the agricultural ecological system.

Keywords: soil water hydrodynamics; soil-plant-atmosphere continuum system (SPAC); model

收稿日期: 2013-05-11

基金项目: 国家重大基础研究计划 973 项目(2009CB825101); 国家公益性行业(气象)科研专项子课题(GYHY201106029-2); 科技部国际科技合作项目(2010DFA32790); 国家自然科学基金项目(31070372)和教育部直属高校海外名师项目(Ms2011LZDX059)

作者简介: 吴 珊(1987—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业水土工程。E-mail: gsauwushan@163.com。

通信作者: 张恒嘉(1974—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事农业水土工程方面的研究工作。E-mail: xiongye@lzu.edu.cn, zhang-buchong@hotmail.com。

农业一直是我国的用水大户^[1]。然而随着我国城市化和工业化进程的加速,大量农业用水通过不同途径转为非农用水,且农业用水有效利用率低,农业用水问题已迫在眉睫^[2-3]。针对我国水资源短缺和用水浪费等问题,提倡节约用水,特别是农业用水问题一直受到政府、社会与研究机构的重视。

土壤—植物—大气连续体 (Soil - Plant - Atmosphere Continuum, 简称 SPAC) 是农田水循环 (Farmland Water Cycle, 简称 FWC) 中一个重要的部分,后者是整个节水农业的大背景和基础,也是节水潜力最大的领域^[4]。其中土壤水是联系 FWC 与 SPAC 的纽带,任何形式的水(降水、地表水和地下水)只有转化成土壤水才能被植物吸收,土壤水可谓是“四水”转化的中心环节^[5]。此外,土壤水还与农田的旱涝、肥料的淋溶和利用、土壤盐渍化和地下水污染等密切相关^[4-5]。因此,SPAC 系统中土壤水动力学问题的研究,是开展节水农业的关键。

最初对土壤水动力学的研究主要集中在裸地蒸发、入渗、径流和根吸收等单个过程,后扩展到与之密切相关的土壤溶质运移过程、农业生态系统研究等方面。应运而生了许多如 Fox 蒸发模型^[6]、Penman - Monteith 蒸散发模型^[7]、Horton 入渗模型^[8]和 Philip 入渗模型^[9]等典型土壤水动力学模型。近些年,随着研究的不断深入,使其在 SPAC 系统中也得到了广泛应用。其中根系吸水作为 SPAC 系统中土壤水分动态模型的一个汇函数,是 SPAC 系统中土壤水分运移的基础,一系列国际合作计划 (IGBP、WCRP、GCTE、IHDP 和 LUCC 等) 都把植物根系吸水作为其核心的研究领域之一^[10]。随着根系研究方法的不断进步和人们对根系认识的不断深入,根系吸水模型的研究在经过 70 年的不懈努力后得到一系列成果^[11],代表模型有 Molz 模型^[12]、Nimah - Hanks 模型^[13]、Feddes 模型^[14]和 Hillel 模型等^[15]。这些模型对于定量分析 SPAC 系统的水分传输,指导农业节水等有着不可忽视的作用。众所周知,土壤占据陆地生态系统中无机界和生物界的核心位置,不仅在本系统内进行着物质能量的循环,而且在整个水域、大气和生物圈之间也不断进行物质交换,一旦发生污染,必将累及其它生态系统,最终危及人类健康。因此,SPAC 系统中土壤污染物运移转化等问题已引起国内外高度重视,而溶质运移模型的研究作为解决 SPAC 系统中污染物迁移转化问题的有效途径,显得尤为重要。其中 CDE 模型^[16]、TRD 模型^[17]、TFM 模型^[18]等已成功为环境评价与治理提供了可靠的依据。与此同时,众学者开发出了如

DNDC 模型^[19]、HYDRUS 模型^[20]和 EPIC 模型^[21]等农业生态系统模型,使土壤水动力学模型的研究在 SPAC 系统得到更广泛的应用。这些模型在加强对农作物的水肥预测、分析、优化、模拟,指导灌区及地区灌溉管理等方面有决策性作用。

综上所述,土壤水动力学模型在 SPAC 系统中的研究与应用,可使我国农业生产在保证产品质量与产量的基础上,节水控肥,降低成本,是开展节水农业、农业环境保护与治理等研究的基础,是实现可持续发展的有效途径^[22]。

1 土壤水动力学模型的研究进展

土壤水动力学模型领域已从土壤水循环中的裸地蒸发、植物蒸腾、入渗、径流、排水、根系吸水,延伸到污染物迁移模型及得到广泛应用的农业生态模型。本节将对裸地蒸发、蒸散发、土壤水分入渗这三个主要的农田土壤水运动过程加以阐述。

1.1 裸地蒸发模型

陆地水分蒸发总量约占总降水量的 70%^[23],土壤蒸发是水分循环的重要环节,对水资源评价与管理、生态与环境等具有重要的意义。土壤湿度是反映蒸发面水分供应条件的指标,而蒸发力则可说明一定气象条件下可能供应蒸发的热能潜力。因此,对一定下垫面来说,土壤实际蒸发应是土壤湿度与蒸发力的综合函数^[24]。И.С. 柯索维奇^[25]指出按土壤水分的物理性质可将土壤蒸发过程分为三个阶段:第一个阶段,即在一定热能条件下,当土壤湿度从饱和持水量变化到第一临界湿度时,土壤蒸发率从最大可能值逐渐减小;第二个阶段,即土壤湿度从第一临界值变化到第二临界值时,蒸发率急剧减小;第三个阶段,土壤干涸至第二临界湿度以下,蒸发逐渐停止^[15]。从这个观点出发,提出了许多计算土壤蒸发的模型。

目前,土壤蒸发模型研究主要适于裸土,研究方法主要分为经验法和机理法^[26]。经验法最为常用,目前最常用的裸地蒸发模型都是在 Ritchie 方法基础之上开发的,该方法是基于经验能量的模型^[27-28],Wallace 在其基础上进一步改进,根据裸地蒸发的特点将裸地蒸发划分为两个阶段^[29],更能准确地估算裸地蒸发速率。Fox 等^[30]则以假定的理想干土柱为参考,以能量平衡方程为基础,推导出了裸地蒸发量的计算式;Idso 等^[31]引入每日净日辐射、每日净热放射量和土壤反照率等参数,提出了另一种基于经验能量的蒸发模型;Denisov^[32]考虑到土壤是多孔介质,以多孔介质内的气体交换理论为基础,

建立了土壤蒸发模型;国外现广泛使用的是 Gardner^[33]利用非饱和土壤水分稳定运动参数来分析无作物时的潜水蒸发问题的模型;Yanfu 等^[34]将 Gardner 和 Hille^[35]提出的计算有限土体单元蒸发量的公式加以完善,并将其用于有植被覆盖时的蒸发计算。国内主要应用傅抱璞^[24]开发的模型和零通量面 (Zero Flux Plane)法计算裸地蒸发。随着计算机技术的飞速发展,提出了一种基于神经网络算法来预测裸地蒸发^[1]的方法,但该法需要大量有效原始数据,在实际操作中受到限制。自 20 世纪 70 年代初,国内外开始利用遥感技术来估算区域蒸发量,并得到很好的结果^[36]。

1.2 蒸散发模型

与裸地蒸发密切相关的是植物蒸散发问题。植物蒸散发模型的研究是通过考虑植物最佳生长轨迹所要求的蒸腾量来给定水分,调控植物生长微环境,既做到节约用水又可最大限度地挖掘植物的生长潜力,是农业节水的关键领域^[37]。目前植物蒸散发一般可通过直接测定法、间接测量法、估算法获得。通常根据冠层源面的处理方法,将植物蒸散发模型分为三类:单源模型、双源模型和多源模型。

单源模型将植被冠层看作“大叶”。典型的单源模型有 Penman – Monteith 模型(简称 PM 模型)^[7]。

PM 模型具有可靠的物理学和生理学基础,即能够较好地估算密集冠层的蒸散发量,但由于其忽略了植被冠层与土壤之间的水热特性差异^[24],不适于估算稀疏植被冠层的蒸散发量^[38]。

就稀疏植被冠层而言,将田间蒸散发分为土壤蒸发和作物蒸腾两部分。1985 年,Shuttleworth 和 Wallace^[39]通过假设植被冠层的水汽和热量通量是连续的,同时引入土壤阻力和冠层阻力参数,提出了适于计算稀疏植被蒸散发量的典型双源 Shuttleworth – Wallace 模型(简称 S – W 模型)^[40]。

1997 年,在 S – W 模型的理论基础上发展了具有代表性的 Clumping 多源模型(Brenner and Incoll)(简称 C 模型)^[41]。C 模型对植被冠层进行分层考虑,通常适合于在垂直方向上具有分层结构的多植被群体和叶面积比较大 ($LAI \geq 4$) 的多层封闭型冠层^[42]。

1.3 土壤入渗模型

土壤入渗是指水进入土壤的过程,是一个复杂的水文过程。土壤入渗是地面灌溉参考的重要依据,如果估算不准会产生大量的深层渗漏或径流损失,进而导致一系列的生态环境问题^[43]。土壤水分入渗方面的数学模型有许多种,包括理论模型、经验模型。表 1 给出了几种典型的入渗模型。

表 1 典型入渗模型
Table 1 Typical infiltration model

模型 Model	公式 Formula	参数介绍 Introduction of parameter
Kosjiakov 二参模型 Kosjiakov: two parameters model	$i(t) = at^{-n}$ ^[44]	$i(t)$: 入渗率 Infiltration rate/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) t : 入渗时间 Infiltration time/min
Kosjiakov 三参模型 Kosjiakov: three parameters model	$i(t) = at^{-n} + i_c$ ^[45]	i_c : 稳定入渗率 Stable infiltration rate/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) i_0 : 初始入渗率 Initial infiltration rate/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
Horton 模型 Horton model	$i(t) = (i_0 - i_c)e^{-kt} + i_c$ ^[46-47]	S : 吸水率 Water absorption rate K_s : 饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
Philip 模型 Philip model	$i(t) = 0.5St^{-0.5} + i_c$ ^[45,48-50]	h_0 : 土壤表面积水深度 Soil surface ponding depth/cm h_f : 湿润锋面吸力 Wetting front suction/cm
Green-Ampt 模型 Green-Ampt model	$i(t) = K_s[(h_0 + h_f + z_f)/z_f]$ ^[46,51-52]	z_f : 概化湿润锋深度 Generalized wetting front depth/cm k : 渗透系数 Hydraulic conductivity
通用经验公式 General empirical formula	$i(t) = a + bt^{-n}$ ^[53-54]	t_a : 临界时间常数 Critical time constant/t t_p : 产流历史 Runoff yield history/t
Smith-Parlange 模型 Smith-Parlange model	$i(t) \begin{cases} i & (t \leq t_p) \\ i_0 + B(t - t_a)^{-n} & (t > t_p) \end{cases}$ ^[55]	B, n : 经验常数 Empirical constant a, b : 经验参数 Empirical parameters

Kosjiakov 模型和 Horton 模型是从大量试验数据的基础上总结出来的经验模型,没有明确的物理基础^[44,46]。但后来有研究证明 Horton 模型有一定的物理依据,虽然它在描述流域入渗规律时有一定的局限性,但对于单点入渗情况是很有效的^[47-48]。Philip 和 Green – Ampt 模型是半理论半经验模型,具有较明确的物理意义,方便建立模型参数与土壤物

理特性间的关系^[49]。Philip 模型是在非饱和和半无限土壤垂直入渗条件下 Richard 方程级数形式的近似解析解。利用水文信息确定 Philip 入渗模型参数主要有直线图解法、最小二乘法两种方法。直线图解法虽可简便地求解出所需参数,但存在取点与作图的人为误差,且不易识别、控制;而最小二乘法通用性较强,相对精度高且易控制^[46,50-51]。Green –

Ampt 模型假定积水和均匀土层的入渗条件,由 Darcy 定律推导得到,是研究垂直入渗过程最为广泛的模型之一,且 Green – Ampt 入渗模型不仅可用于均质土壤入渗过程的模拟研究,就研究层状土、浑水入渗问题也很有效。与此同时为扩大模型的适用条件和范围,不同学者对其进行了特定的改进,取得了不少成果^[46,52–53]。Smith – Parlange 模型是 Philip 模型的改进式,是对不同质地的土壤进行大量降雨入渗模拟后提出的稳定降雨入渗模型,对实际的降雨过程有很好的模拟,但由于其参数较多,应用也相对复杂^[48,55]。

2 土壤水动力学模型在 SPAC 系统中的应用

2.1 根系吸水模型

土壤—根系水分运移规律研究是以 SPAC 系统为基础的,同时土壤—根系子系统也是 SPAC 系统中十分重要的组成部分。土壤—根系水分运移规律研究的深入对于土壤植物系统乃至整个 SPAC 系统中的水分传输机制、能量转化规律、土壤水分对植物的有效性等问题的研究都具有极其重要的意义。从 20 世纪 40 年代末开始,一批学者开始了植物根系吸水模型的研究,至今不到 70 年的时间,已取得了

一系列的成果。根系吸水模型大致分为经验模型、半经验半理论模型和理论模型三类,见表 2。

经验模型是以 Van den Honert^[69]的假定为基础,建立在单根径向流基础之上,有正确的生理学和物理学意义,能够描述根区微域内土壤水分和溶质运移规律的模型。但这类模型参数获取复杂,不便于实际应用^[70]。根据参数获取和考虑因素的不同,又将半经验半理论模型分为两类。其中一类模型是以土壤水分物理参数和有效根长密度为主导因子建立的。该类模型在考虑土壤、水分状况、气象等因素的同时,还充分考虑了水分在作物体内的传输过程、根系阻力等因素,但由于涉及诸多难以确定的参数,实际应用较为困难^[71]。第二类是根据根系吸水强度在根系剖面上按比例分配的特性建立的模型。该类模型能较全面地考虑土壤、作物和大气等因素对根系吸水的影响,对有效根长密度有进一步研究,但大多没有考虑根系微区的水势梯度,且根系密度的水平分布与土壤水分环境的关系研究还不完善,因此限制了该类模型的应用^[72]。理论模型是基于电路原理建立的模型,具有较清晰的机理性和物理过程。它比经验模型、半经验模型能更很好地描述根系吸收水分的过程和机理,且形式简单,但由于设备条件限制,目前这类模型实际应用还较少^[69]。

表 2 典型根系吸水模型
Table 2 Typical root water uptake model

经验模型 Empirical model	理论模型 Theoretical model	半理论半经验模型 Theory and experience model	
		第一类模型 The first type of model	第二类模型 The second type of model
Gardner 模型 ^[56] , Mozl 模型 ^[12] , V. Novak 模型 ^[57] ,姚建文冬小麦、玉米根系吸水模型 ^[58] ,罗远培冬小麦、玉米根系吸水模型 ^[59] ,等。 Gardner model, Mozl model, V. Novak model, YAO Jian-wen's winter wheat and corn root water uptake model, LUO Yuan-pei's winter wheat and corn root water uptake model, et al.	Hillel 模型 ^[15] , Rose 模型 ^[60] ,郭庆荣模型 ^[61] ,等。 Hillel model, Rose model, GUO Qing-rong model, et al.	Gardner 模型 ^[56] , Whisler 模型 ^[62] , Nimah – Hanks 模型 ^[13] , Feddes 模型 ^[14] , Herklrath 模型 ^[63] , Rowses 模型 ^[64] ,等。 Gardner model, Whisler model, Nimah – Hanks model, Feddes model, Herklrath model, Rowses model, et al.	Prasad 模型 ^[60] , Chandra, Shekhar and Amaresh 模型 ^[65] , Molz – Remson 模型 ^[12] , Raats 模型 ^[66] , Selim and Lskandar 模型 ^[12] , Molz 模型 ^[14] ,邵明安模型 ^[67] ,改进 Feddes 模型 ^[68] ,等。 Prasad model, Chandra, Shekhar and Amaresh's model, Molz – Remson model, Raats model, Selim and Lskandar's model, Molz model, SHAO Ming-an model, Modified Feddes model, et al.

以上模型共同缺点是除了根长密度,还缺乏对根系更为细致描述,没有对影响根系吸水的因素予以较全面的定量考虑。从 90 年代至今,众多学者对根系吸水模型中所涉及的参数获取和测定方法加以完善,借助现代先进的试验和设备逐步完善已有的模型,同时建立二维、三维模型^[73–77],并从动态角度来描述根系分布及根系对土壤水分的吸收。这些研究对进一步改进和完善根系吸水模型具有重要意义。

综上所述,植物根系吸水模型的研究,可以为提高植物的水肥利用效率提供有力的理论依据。该领域的研究成果对于考虑 SPAC 系统中植物根系作用下的土壤水动力学与污染物的迁移的研究提供了很好的研究思路。

2.2 溶质运移模型研究

随着工业废水的排放,农业生产中化学物质的大量施用,土壤或地下水污染问题已引起人们的高度重视,而问题的实质就是可溶性污染物在土壤或

含水层中的运移结果。越来越多的专家学者将目光聚焦于此,通过建立各种数学模型来预测和控制土壤溶质的运移过程,为环境评价、治理提供可靠的理论、实验依据。

溶质在土壤中的运移是对流、分子(离子)扩散和机械弥散等三个物理过程及溶质在运移过程中所发生的理化过程和其它过程综合作用的复杂过程。1952 年,Amundsen 和 Lpaidus 首次将一个类似于对流—弥散方程的模型应用到溶质运移问题上,在此

次尝试中两人并未对模型的推导过程及物理意义做出任何解释^[78]。1960 年,Nilsen 和 Biggar 从理论上推导建立了对流—弥散方程(Convection – dispersion equation, CDE),首次系统地论述了对流—弥散方程的科学性和合理性,为溶质运移研究奠定了基础^[79]。根据 Addiscott^[80]等的分类,将土壤溶质运移的模型大致可分为确定性模型、随机模型、简化模型三大类,见表 3。

表 3 典型溶质运移模型
Table 3 Typical solute transport model

确定性模型 Deterministic model		随机性模型 Stochastic model	简化模型 Simplified model
确定性函数模型 Deterministic function model	确定性机理模型 Deterministic mechanism model		
“活塞流”模型 ^[81] ,半解析模型 ^[82] ,层状模型 ^[83] ,等。 The piston flow model, the semi-analytical model, the layered model, et al.	CDE 模型 ^[16] ,FADE 模型 ^[84] ,TRM 模型 ^[17] ,TFDM 模型 ^[85] ,等。 The CDE model, the FADE model, the TRM model, the TFDM model, et al.	机理性随机模型 ^[86] ,TFM 模型 ^[18] ,等。 The mechanism stochastic model, the TFM model, et al.	田间持水量模型 ^[79] ,CDE 简化模型 ^[87] ,等。 The field capacity model, the simplified CDE model, et al.

根据建立原理不同,又可将确定性模型分为确定性函数模型和确定性机理模型。确定性函数模型又称作均衡模型,以物质平衡原理为基础,根据系统中溶质的输入和输出来定量反映系统在一定时段内溶质储量的变化情况^[79]。现有的均衡模型,如活塞流、半解析模型、层状模型等,尽管它们对溶质运移过程描述和考虑可能有所不同,但其基本估算模式类似^[81-83]。此类模型在实际应用时往往忽略一些影响不大的因素,在预测土壤盐渍化趋势,计算土壤养分收支,了解养分去向,指导施肥,评价施肥效果等方面得到广泛应用^[87]。确定性机理模型是由可以获得数值解或解析解的 CDE 方程推导而来。CDE 模型可较好地揭示溶质在均质多孔介质中的运移机理及时间、空间对溶质运移的影响,但该模型对土壤孔隙中流速分布特征概化的过于简单而难以描述溶质运移中经常出现的提前穿透和拖尾等不规则现象^[16]。研究表明,根据 Lévy 理论推导的分数微分对流—弥散方程(Fractional advection – dispersion equation, FADE)较 CDE 能更有效地描述穿透曲线的拖尾现象,但其在研究溶质运移的问题上依然存在一定程度的弥散尺度效应等缺陷^[16,84]。Coats 和 Smith 提出了稳态条件下可动和不可动“两域”的溶质运移的两区模型(Two – region model, TRM)^[17],此模型除了考虑土壤中不动水体的存在以及不动水体在溶质运移过程中所起的作用,还考虑了溶质运移过程中的物理和化学非平衡性问题,比传统的 CDE 模型更贴近实际情况^[88]。但随着土壤中优先流和

溶质穿透曲线中双峰的出现,TRM 模型暴露出其局限性。当化学和物理非平衡性显著影响溶质运移规律时,TRM 模型就不再能为溶质穿透曲线做出合理解释。为此,1981 年,Skopp 提出了两流区模型(Two – flow Domain Model, TFDM),该模型可以对脉冲流穿透曲线中的双峰(或驼峰)做出比较合理的解释^[17,85]。

随机模型是针对确定性模型中的不足,根据土壤水力特性参数的空间变异性,建立的模拟大田溶质运移规律最为有效的模型。其应用形式有两种,分别是与确定性模型相结合的机理性随机模型和根据土壤性质来估算其随机输出的完全随机模型^[79]。机理性随机模型是在确定性模型中引入“随机参数”,通过数学统计分析中的随机过程函数和谱分析等途径,对模型中的“随机参数”进行调整,将其转化为与传统模型中参数相当的“有效参数”来模拟土壤溶质运移过程^[79,86]。完全随机运移模型主要指由美国加州大学 Jury 教授 1982 年^[18]提出的传输函数模型(Transfer function model, TFM),也称“黑箱模型”^[89]。TFM 模型对土壤溶质运移的机理没有任何限制,通过研究溶质运移时间的概率密度函数,来推求溶质平均浓度与土壤深度、时间的关系,并以此来模拟溶质在复杂土壤系统中的运移^[18]。TFM 模型所需参数少,易求解,是对一维溶质运移模型的高度概括,用来模拟大田溶质运移的规律十分有效。但它仅考虑入渗过程,对于再分布、蒸发条件下溶质运移的描述欠考虑,且不便对溶质运移进行深入的机

理性分析^[87]。

简化模型主要有“活塞流”模型、田间持水量模型和 CDE 简化模型。该类模型的特点在于抓住土壤溶质运移的主要过程,对运移过程进行了假设和简化,力求简化计算便于应用^[79,87]。随着研究的不断深入,土壤溶质的运移规律的研究已从室内和田间“点”尺度,扩展到微域尺度,区域尺度^[90]。在传统模型基础上还出现了一些结合其他学科或研究方向的模型,如结合地理信息系统(GIS)的土壤溶质运移模型,土壤溶质运移的色谱塔板理论模型等,使溶质运移模型得到进一步完善,功用性更强^[91]。

2.3 农业生态系统模型的研究

农业生态系统是一个自然—社会—经济的复杂系统,仅“土壤—作物”子系统就包括一系列复杂的生物、理化等过程,且具有系统边界清楚、结构简单、开放性强、受人为干扰作用大等特点^[92-93]。通常农业生态系统模型都包含气象模块、氮的迁移转化模块、作物生长模块这三大模块^[94]。目前在国际上比较有影响力的农业生态系统模型有 DNDC 模型、CENTURY 模型、HYDRUS 模型、LEACHM 模型、NC-SOIL 模型、ROTHC 模型、DAISY 模型、EPIC 模型、DSSAT 模型、ORYZA 模型和 APSIM 模型等^[94,95]。

目前较为成熟的生物化学模型有 DNDC 模型和 CENTURY 模型。DNDC 模型通过对土壤气候、作物生长、有机质分解、硝化与反硝化、发酵等过程的描述,模拟了与土壤碳氮循环有关的一系列生物地球化学过程,使测算农业生态系统温室气体的排放和预测全球气候变化情况变成了可能^[19]。DNDC 模型是适用于点位和区域尺度的任何气候带的农业生态系统,是亚太地区首推的生物地球化学模型^[94,96],近年来在我国也得到了很好的应用。CENTURY 模型已从最初研究草原系统的模型发展成了一个可研究农作物系统、森林系统、森林草原系统的综合模型^[95,97]。该模型以模拟不同土壤—植被系统中氮、碳、磷、硫的长期动态变化为目标,实现对土壤养分循环的模拟,且不受尺度问题限制,是个很全面的生态系统模型。HYDRUS 模型是用以模拟饱和—非饱和和介质中水、热和溶质运移的点位模型。对土壤水分的分布和运动具有较强的计算能力,具有通用性强,适用性广等优点,但其没有作物生长模块,对作物生长需氮量仅进行了简单处理^[20,95]。LEACHM 模型是用于研究土壤中水分和化学物质运动的模型^[98]。同样 NC-SOIL 模型、ROTHC 模型作为描述有机碳氮循环的典型模型,也已成为研究复杂的生物地球化学过程的主要手段^[19]。目前广泛应用的作

物生长模拟模型,如 DAISY 模型、EPIC 模型、DSSAT 模型、ORYZA 模型、APSIM 模型等虽已包括了气象、土壤、水分、氮肥施用等重要因素,但却也只能考虑部分环境因素,很难将杂草、病虫害等限制因素完全整合^[99]。DAISY 模型主要用于模拟土壤—作物系统中氮的动态变化和水分运动过程。该模型的作物生长模块对光合作用、CO₂ 的吸收、分配,根系的生长进行了更详细的描述,但在氮素动态模块中却没有考虑氮挥发^[19,100],适于温带农业生态系统的点位模拟。EPIC 作物生长模型综合考虑如大气、作物、土壤、管理等多种因素,常被用于评估气候变化等对农业的影响,是一个更具系统性、应用性的综合模型,已在不同尺度上的诸多领域有广泛的应用^[21,94]。DSSAT 模型将 CERES 模型、CROPGRO 模型等 17 个作物模型进行耦合,可以模拟 26 种作物,具有极强的实用性,并得到了广泛的验证^[95,101]。APSIM 模型是一个综合的农业生态系统管理模型,侧重于对土壤过程变化的研究,其中的诸多模块既可单独运行也可组合运行,延展性较好,应用广泛^[94,102]。

农业生态系统模型的研究与应用不仅可提高资源利用率,获得良好的经济效益,改善环境质量,还能创造物质多样的、能量多层次的生态结构。

3 问题与展望

各类模型为确保其在模拟和评价过程中的准确性,必须准确获得其中各种相应的环境参数。而自然界中多种因素的相互作用造成了参数复杂的空间变异性,使这些参数空间分布的测定、估计和预测往往具有明显的不确定性,这是造成模型波动的主要原因。因此,利用合理的方法获得准确的参数,是得到良好模拟结果的基础。

就蒸散发的研究而言,其可用的模型和测量方法很多,但在不同的环境下各种方法表现出的适用性却有一定差异,如何选择或者整合利用模型是首要关键问题。其次,如何实现蒸散发的估算在时间尺度上由大到小的拓展和在空间尺度上由小到大的扩展也是重要环节。而对不同尺度模型模拟结果的相互验证和分析是今后该领域研究中的难点,也是重点。此外,如何利用瞬时蒸散发来估算累计蒸散发也是亟待研究的难题。未来的研究应在不断完善传统蒸散模型、提高其精度的同时,大胆探索和尝试新技术,以弥补现有方法的不足。对于需要将植物蒸腾与土壤蒸发进行分割考虑的研究来说,关键在于如何对蒸散发进行合理的分割。但众所周知,蒸

散发过程是一个多因子相互联系、相互制约的复杂机制,而影响植物蒸腾和土壤蒸发的因素各异或有交叉,使得蒸散发的分割仍是个难题,故需加强此领域的研究力度。目前,通过数值模拟来求解蒸散量是最有效的途径,因此通过建立好的数学模型来解决实际问题已是大趋势,对准确预测农田水分、制定合理灌溉方案、节约用水、提高产量等具有十分重要的意义。

目前,土壤入渗的研究多侧重于机理方面的讨论,形式复杂且参数难以确定。尽管学者们也提出了许多经验性公式,但这些公式在定量分析土壤水分入渗空间变异性问题上略显不足。对于土壤水分入渗影响因素的研究也存在一些问题,如研究多集中在土壤物理性质宏观表征指标对入渗特性的影响,而土壤化学特性对水分入渗影响的研究较少;水质、水温对入渗的影响缺乏机理性的研究;在降雨过程中入渗特性是如何改变的还没有统一的观点;此外,受实验条件的限制,使得实验数据缺乏准确性。而常用的水分入渗测定方法,如注水法、人工模拟降雨以及水文资料推算法等,除不能全面地考虑影响水分入渗的全部因素外,往往以人们的主观思维作为判断的标准,不能准确描述土壤入渗的真实过程,所得的结果差异也较大。今后的研究中,应在进一步完善土壤水分运动理论的基础上,凭借先进的遥感技术等,将单点入渗模型扩展到区域性的动态研究,使水分入渗的研究不受空间变异性的局限,并将水分入参与地下水污染、土壤侵蚀等紧密结合,使土壤水分入渗模型在研究农业污染、农业节水中发挥更重要的作用。

植物根系吸水作为 SPAC 系统的子系统,受到国内外研究者的高度重视并取得了丰硕的成果。但现有根系吸水模型仍存在如大部分模型所包含的根系分布、根系阻力或穿透性等参数影响了模型的实际应用;很多模型对根系生长的动态变化,环境因子对根的生长、分布的影响等众多因素考虑不充分等问题。为了改进现有模型的不足和推动其更好地发展,应注重以下几个方面的研究:第一,准确建立根系生长的几何结构模型,加强对植物根系本身生长及其形态特征的二维、三维结构,以及植物根系生理学特征空间变异的动力学机理的研究^[72];第二,深入细化根系吸水机理的研究,改进完善已有根系吸水模型;第三,加强对水分滞后效应、溶质分布运移、温度梯度、土壤各向异性等因素对根系吸水特性影响的研究^[103];第四,借助计算机的强大功能实现模型的可视化;第五,将根系吸水模型同气孔导度模

型、作物蒸腾作用模型、作物生长模型相结合用以研究水分在整个 SPAC 系统中的运移情况^[11];第六,将根系吸水模型广泛应用到生产实践中,为及时监测土壤水分,做好干旱预报,制定合理的灌溉制度提供依据。

溶质运移模型的建立对水土保持和解决土壤盐渍化等问题起到重要作用,然而该方面的研究存现一些局限性。例如:现有的模型缺乏可重复性,出现大量重复劳动^[78];溶质运移模型中单元性模型较多而整体性模型较少;研究性的模型较多而应用性的模型较少;针对均质土壤的模型较多而针对非均质土壤的较少;对保守性溶质的研究成果相对较多而对非保守性溶质的研究较少;对砂土研究较多而对复杂的粘、壤土研究较少;小尺度室内试验无法完全应用到农田大尺度等。为此在今后的研究中应大力开展田间试验,将其与田间灌溉、农作措施等结合起来,做到确定性方法与随机性方法相结合,使模型研究从确定性模型向随机模型发展^[83]。不断完善模型功能,开展不同尺度均质、非均质土壤中溶质运移模型的研究,加强精密仪器研制,并建立健全模型参数数据库,为模型建立创造有利条件。考虑结合土壤自净能力和生物行为等,为溶质运移开辟新方向。

农田生态系统模型的迅速发展是土壤水动力学模型在 SPAC 系统中的成功应用。但由于该系统本身的复杂性和不确定性导致农田生态系统模型的评估、预测和指导能力还很有限,有待于不断深入研究^[94]。首先,应不断加深对农田生态系统各生物物理化学过程的认识,着力研究系统中水分和养分循环过程,建立机理性模型;其次,加强对系统中各耦合要素的分析研究,从系统的角度对物质循环和生产力等进行综合解释;另外,将农田生态系统模型与试验相结合,利用计算机、遥感等技术,提高模型实用性和精度,实现快速高效的模拟效果。

参考文献:

- [1] 杨德军.基于 SPAC 系统的土壤水动力学模型研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [2] Ahmadi S H, Andersen M N, Poulsen R T, et al. A quantitative approach to developing more mechanistic gas exchange models for field grown potato: A new insight into chemical and hydraulic signalling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1541-1551.
- [3] Manzoni S, Vico G, Katul G, et al. Optimizing stomatal conductance for maximum carbon gain under water stress: a meta-analysis across plant functional types and climates[J]. *Functional Ecology*, 2011, 25(3): 456-467.
- [4] Manzoni S, Vico G, Porporato A, et al. Biological constraints on water transport in soil-plant-atmosphere system[J]. *Advances in Water*

- Resource, 2013, 51: 292-304.
- [5] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- [6] Fox M J. A technique to determine evaporation from dry stream beds[J]. Journal of Applied Meteorology, 1968, 8: 697-702.
- [7] Gao Q, Zhao P, Zeng X, et al. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25(11): 1373-1381.
- [8] Bauer S W. A modified Horton equation for infiltration during intermittent rainfall[J]. Hydrological Sciences Journal, 1974, 19(2): 219-225.
- [9] 刘春成, 李 毅, 任 鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62-67.
- [10] 孟 雷, 左 强. 污水灌溉对冬小麦有效根长密度和根系吸水速率分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 25-29.
- [11] 阳园燕, 郭安红, 安顺清, 等. 土壤 - 植物 - 大气连续体 (SPAC) 系统中作物根系吸水模型研究进展[J]. 气象科技, 2005, 32(3): 316-321.
- [12] Molz F. Water transport in the soil-root system: Transient analysis[J]. Water Resources Research, 1976, 12(4): 805-808.
- [13] Nimah M N, Hanks R J. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(4): 522-527.
- [14] Feddes R A, Bresler E, Neuman S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems[J]. Water Resources Research, 1974, 10(6): 1199-1206.
- [15] Hillel D, Talpaz H, Keulen H. A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and of water and salt movement in the soil profile[J]. Soil Science, 1976, 121(4): 242.
- [16] 高光耀, 冯绍元, 黄冠华. 饱和非均质土壤中溶质大尺度运移的两区模型模拟[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 338-404.
- [17] Boufadel M C, Xia Y, Li H. Modeling solute transport and transient seepage in a laboratory beach under tidal influence[J]. Environmental Modelling and Software, 2011, 26(7): 899-912.
- [18] Dai Z, Samper J, Wolfsberg A, et al. Identification of relative conductivity models for water flow and solute transport in unsaturated bentonite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, 33: S177-S185.
- [19] 邱建军, 秦小光. 农业生态系统碳氮循环模拟模型研究[J]. 世界农业, 2002, 9: 39-41.
- [20] Peng Y, Zhou J, Burrows R. Modelling solute transport in shallow water with the lattice Boltzmann method[J]. Computers and Fluids, 2011, 50(1): 181-188.
- [21] Izaurrealde R C, Williams J R, McGill W B, et al. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data[J]. Ecological Modelling, 2006, 192(3): 362-384.
- [22] 杨正礼, 李茂松, 章力建. 我国农业立体污染特征与防治设想[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 72-76.
- [23] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [24] 傅抱璞. 土壤蒸发的计算[J]. 气象学报, 1981, 39(2): 226-235.
- [25] 高建华, 胡振华. 土壤水分基础理论及其应用研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(3): 29-35.
- [26] 黄康乐. 求解非饱和纵向弥散系数的一种简便方法[J]. 水利学报, 1987, 2(4): 51-54.
- [27] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1204-1213.
- [28] Ritchie J T, Burnett E. Dry land evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(1): 56-62.
- [29] Wallace J S, Jackson N A, Ong C K. Modeling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya[J]. Agricultural and Forest Methodology, 1999, 94(3): 189-202.
- [30] Jackson R, Idso S B, Reginato R J. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data[J]. Water Resources Research, 1976, 12(1): 23-26.
- [31] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [32] Denisov Y M, Sergeev A I, Bezborodov G A, et al. Moisture evaporation from bare soils[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(3): 175-182.
- [33] Gardner W, Fireman M. Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(5): 244-249.
- [34] Yanful E K, Morteza Mousavi S, Yang M. Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(4): 783-801.
- [35] Aydin M, Yang S L, Kurt N, et al. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(1): 91-105.
- [36] 隋洪智, 田国良. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 220-224.
- [37] 王晓丽, 邓璐娟. 基于 Matlab 语言的温室作物蒸腾模型[J]. 控制工程, 2005, 11(1): 99-100.
- [38] Farahani H J, Bausch W C. Performance of evapotranspiration models for maize—bare soil to closed canopy[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(4): 1049-1059.
- [39] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination Quarterly theory[J]. Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- [40] Stannard D I. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1379-1392.
- [41] Brenner A, Incoll L. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 84(3): 187-205.
- [42] Domingo F, Villagarcía L, Brenner A J, et al. Evapotranspiration model for semi-arid shrub-lands tested against data from SE Spain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 95(2): 67-84.
- [43] 杜卫华. 降雨后土壤入渗规律分析方法初探[J]. 新疆气象, 1996, 19(5): 23-26.
- [44] 李雪转, 樊贵盛. 非充分供水土壤水分入渗模型的试验研究

[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(4): 37-40.

[45] Badorreck A, Gerke H H, Hüttl R F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 1-8.

[46] 毛丽丽, 雷延武. 用修正的 Green-Ampt 模型确定土壤入渗性能的速算方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 53-57.

[47] Corradini C, Morbidelli R, Flaminio A, et al. A parameterized model for local infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3): 221-232.

[48] 王维汉, 陈晓东, 缴锡云, 等. 土壤入渗参数的估算方法及其变异性研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 272-275.

[49] 王 涛, 包为民. 同位素信息确定 Philip 入渗模型稳定入渗率[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 479-483.

[50] Philip J R. An infiltration equation with physical significance[J]. Soil Science, 1954, 77(2): 153-157.

[51] 李 毅, 王九全, 邵明安, 等. Green-Ampt 入渗模型及其应用[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(2): 225-230.

[52] 王全九, 来剑斌, 李 毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.

[53] 魏忠义, 王治国, 段喜明. 河沟流域水分入渗的数学模型[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 32-35.

[54] 王经民, 吴钦孝, 韩 冰, 等. 陕北黄土区土壤入渗模型比较探讨[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 287-289.

[55] Wang Q J, Horton R, Fan J. An analytical solution for one-dimensional water infiltration and redistribution in unsaturated soil[J]. Pedosphere, 2009, 19(1): 104-110.

[56] Gardner W R. Relation of root distribution to water uptake and availability[J]. Agronomy Journal, 1964, 56(1): 41-45.

[57] Novak V. Estimation of soil-water extraction patterns by roots[J]. Agricultural Water Management, 1987, 12(4): 271-278.

[58] 姚建文. 作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型[J]. 水利学报, 1989, 9: 32-38.

[59] 罗远培, 李韵珠. 根土系统与作物水氮资源利用效率[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 35-45.

[60] Prasad R. A linear root water uptake model[J]. Journal of Hydrology, 1988, 99(3): 297-306.

[61] 郭庆荣, 李玉山. 黄土高原南部土壤水分有效性研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(3): 236-243.

[62] 荆 昊. 节水灌溉水稻根系分布特征及吸水模型研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.

[63] Herkelrath W N, Miller E E, Gardner W R. Water uptake by plants: II. The root contact model[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(6): 1039-1043.

[64] Rowse H R, Taylor H M, Mason W K. Microcomputer simulation model of soil water extraction by soybeans[J]. Soil Science, 1983, 136(4): 218-225.

[65] Ojha C S P, Rai A K. Nonlinear root-water uptake model[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(4): 198-202.

[66] Raats P A C. Analytical solutions of a simplified flow equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1976, 19: 4.

[67] 邵明安, 李玉山, 杨文治. 植物根系吸收土壤水分的数学模拟[J]. 土壤学报, 1987, 24(4): 295-304.

[68] 罗 毅, 于 强, 欧阳竹, 等. 利用精确的田间试验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报, 2000, (4): 73-80.

[69] Van den Honert T H. Water transport in plants as a catenary process[J]. Discussions of the Faraday Society, 1948, 3: 146-153.

[70] 李彩霞. 沟灌条件下 SPAC 系统水热传输模拟[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.

[71] 赵成义. 作物根系吸水特性研究进展[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 39-42.

[72] 吉喜斌, 康尔泗, 陈仁升, 等. 植物根系吸水模型研究进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(5): 1079-1086.

[73] 杨国梁, 郭新宇, 张光年, 等. 计算机视觉技术在植物根系形态研究中的应用[J]. 农业网络信息, 2005, 11: 124-128.

[74] Picon-Cochard C, Pilon R, Tarroux E, et al. Effect of species, root branching order and season on the root traits of 13 perennial grass species[J]. Plant and Soil, 2012, 353(1-2): 47-57.

[75] 钟 南, 罗锡文, 严小龙, 等. 植物根系生长的三维可视化模拟[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5): 516-518.

[76] 冯 斌, 杨培岭. 植物根系的分形及计算机模拟[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 96-99.

[77] 徐会杰. 植物根系通用三维模型的建模与仿真[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 62-66.

[78] 刘 霄, 熊耀湘. 土壤溶质运移研究现状[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(6): 355-358.

[79] 曹红霞. 不同灌溉制度条件下土壤溶质迁移规律及其数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.

[80] Addiseott T M, Wagenet R J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modeling approaches[J]. Journal of Soil Science, 1985, 36(3): 411-424.

[81] 李广辉, 魏世强. 土壤溶质运移特性研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 576-580.

[82] Dyson J S, White R E. A simple predictive approach to solute transport in layered soils[J]. Journal of Soil Science, 1989, 40(3): 525-542.

[83] Coppola A, Comegna A, Dragonetti G, et al. Solute transport scales in an unsaturated stony soil[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(6): 747-759.

[84] De Smedt F. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hypothetical zone[J]. Journal of Hydrology, 2007, 339(1): 29-38.

[85] Golfier F, Quintard M, Wood B D. Comparison of theory and experiment for solute transport in weakly heterogeneous bimodal porous media[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(7): 899-914.

[86] Persaud N, Giraldez J V, Chang A C. Monte-Carlo simulation of noninteracting solute transport in a spatially heterogeneous soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(3): 562-568.

[87] 赵霞则. 典型溶质在土壤中运移规律的实验研究及数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[88] San Jose Martinez F, Pachepsky Y, Rawls W. Modelling solute transport in soil columns using advective-dispersive equations with fractional spatial derivatives[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 41(1): 4-8.

[89] Shi L S, Yang J Z. Qualification of uncertainty for simulating solute

transport in the heterogeneous media with sparse grid collocation method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009,21(6):779-789.

[90] 许小薇,吴晓东,曹晓磊.多孔介质中溶质运移的尺度问题[J].科技资讯,2011,16:41-43.

[91] 高川博,姜 斌,黄国强,等.土壤污染物溶质运移模型研究进展[J].环境保护科学,2006,32(5):44-46.

[92] 刘玉振.农业生态系统能值分析与模式构建[D].开封:河南大学,2007.

[93] 王建林,胡 单.农业生态系统能量最优增长单部门模型的建立与影响参数分析[J].系统工程理论方法应用,2003,12(4):354-358.

[94] 王迎春.华北平原典型农田生态系统氮磷平衡动态模拟研究[D].北京:中国农业科学院,2009.

[95] 高如泰.黄淮海平原农田土壤水氮行为模拟与管理分析[D].北京:北京农业大学,2005.

[96] 马玉芳.基于 DNDC 模型的不同耕作措施下农田土壤碳循环模拟研究[D].兰州:甘肃农业大学,2011.

[97] 高鲁鹏,梁文举,姜 勇,等.利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I.自然状态下土壤有机碳的积累[J].应用生态学报,2004,15(5):772-776.

[98] 高海鹰,黄丽江,张 奇,等.不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1346-1352.

[99] 米湘成,马克平,邹应斌.人工神经网络模型及其在农业和生态学研究中的应用[J].植物生态学报,2005,29(5):863-870.

[100] Abrahamsen R, Hansen S. Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model[J]. Environmental Modelling and Software, 2000,15(3):313-330.

[101] 孙 芳,林而达,李剑萍,等.基于 DSSAT 模型的宁夏马铃薯生产的适应对策[J].中国农业气象,2008,29(2):127-129.

[102] 沈 颖. APSIM 模型的发展与应用[J].应用生态学报,2002,13(8):1027-1032.

[103] 朱李英,孙西欢,马娟娟.植物根系吸水模型的研究进展[J].科技情报开发与经济,2006,16(5):150-152.

(上接第 77 页)

2) 各灌水处理的红枣树全生育期耗水规律呈现单峰曲线变化,峰值出现在 8 月 10 日前后,各处理的日均耗水量在 4.0~5.74 mm 之间变化,各处理红枣树花期至成熟落叶期的作物系数在 0.399~1.036 之间变化,累积耗水量在 287.0~413.5 mm 之间变化。

3) 采用滴头流量 2 L·h⁻¹灌溉的红枣树,红枣单产和 WUE 均随灌水定额的增大而增大,但增加幅度呈现减小趋势,该研究结论与前人提出的报酬递减规律一致,采用相同的灌水定额时,增加滴头流量能够提高红枣产量和 WUE,但在 $a = 0.05$ 水平下,未达到显著水平。

在大田试验过程中,试验地块的枣园出现了严重的红蜘蛛危害,没有得到较好地控制,致使红枣产量较往年低。由于研究时间较短,不同滴头流量及灌水定额条件下的红枣树耗水规律还需要进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 祁业凤.中国枣核心期刊研究文献计量分析[J].农业图书情报学刊,2007,(10):160-162.

[2] 曲泽洲,王永惠.中国果树志枣卷[M].北京:中国林业出版社,1993.

[3] 洪 明,赵经华,靳开颜,等.环塔里木盆地红枣灌溉现状调查研究[J].节水灌溉,2013(2):34-38.

[4] 史彦江,宋锋惠.红枣在新疆的发展前景及对策[J].新疆农业科学,2005,42(6):418-422.

[5] 漆联全.新疆红枣产业的现状、要求及其发展趋势[J].新疆农业科学,2010,47(S2):8-12.

[6] 蒋 岑,刘国宏,谢香文.干旱区成龄红枣微灌技术研究[J].新疆农业科学,2009,42(2):332-337.

[7] 刘国宏,谢香文,蒋 岑.干旱区不同水分指标下限对成龄红枣生长和产量的影响[J].新疆农业科学,2011,48(1):94-98.

[8] 胡安焱,魏光辉,董新光.干旱区幼龄红枣滴灌耗水规律研究[J].人民黄河,2011,4(2):38-42.

[9] 田盼盼,董新光,刘 峰.干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):86-89.

[10] 张计峰,朱 敏,梁 智.滴灌对枣园土壤水分运移和红枣叶片的影响[J].新疆农业科学,2010,47(11):2283-2287.

[11] 姚鹏亮,董新光,郭开政.滴灌条件下干旱区枣树根区的土壤水分动态模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):149-156.

[12] 梁 智,张计峰.两种枣树矿质营养元素累积特性研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):688-692.

[13] 张计峰,梁 智,邹耀湘,等.施肥对红枣叶片 SPAD 和比叶重的影响研究[J].新疆农业科学,2011,48(9):1606-1610.

[14] 柴仲平,王雪梅,孙 霞,等.不同氮磷钾配比滴灌对灰枣产量与品质的影响[J].果树学报,2011,28(2):229-233.

[15] 中华人民共和国水利部.L13-1990.灌溉试验规范[S].北京:水利水电出版社,1990:1-16.

[16] W·伯姆.根系研究方法[M].北京:科学出版社,1985.

[17] 田盼盼.干旱区滴灌枣树根系分布特性及吸水模型研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.

[18] 陈渠昌,吴忠渤,余国英.滴灌条件下沙地土壤水分分布与运移规律[J].灌溉排水学报,1999,18(1):28-31.

[19] 赵颖娜.陕北黄土丘陵枣林地滴灌湿润体研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.

[20] 鲁周民.红枣优质栽培与贮藏加工技术问答[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2010.

[21] 朱德兰,李昭军,王 健.滴灌条件下土壤水分分布特性研究[J].水土保持研究,2003,19(3):81-84.