

土壤水分动态 模拟模型及其应用

尚松浩 毛晓敏 雷志栋 杨诗秀◎著



科学出版社
www.sciencep.com

土壤水分动态 模拟模型及其应用

尚松浩 毛晓敏 雷志栋 杨诗秀 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了作者十余年来在土壤水分动态模拟模型及其应用方面的研究成果,主要模型包括指数消退模型、人工神经网络模型、水量平衡模型、冻融期土壤水热耦合传输模型、土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水分运移模型、SPAC 水热耦合传输模型,主要应用领域包括土壤水分动态变化过程模拟分析、农田水分消耗与转化规律分析、农田水分合理调控与优化灌溉制度等。

本书可作为水文学、土壤学、气象学、农业水土工程等学科研究生的教学参考书,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水分动态模拟模型及其应用/尚松浩等著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-024608-0

I. 土… II. 尚… III. 土壤含水量-研究 IV. S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 079312 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 5 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—2 000 字数: 233 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新蕾))

前 言

土壤水是联系地表水和地下水的纽带,是农作物、林草等植物耗水的主要来源,同时与土壤中的盐分、污染物运移密切相关。因此土壤水分与水文循环、植物耗水及生长、土壤及地下水环境等有密切的关系,土壤水动态变化规律是水文学、土壤学、农田水利学、生态学等学科共同关注的领域。

本书作者近年来一直从事土壤水动力学等领域的研究工作。尚松浩、毛晓敏在清华大学攻读博士学位期间,在雷志栋教授、杨诗秀教授指导下分别从事冻土水热耦合迁移和土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热迁移研究工作,取得了一定研究进展,相关研究成果构成了本书第6章和第8章的基础。此后,我们继续从事土壤水动态模拟方面的研究工作,对土壤水动态模拟模型进行了系统的研究,根据不同的应用条件和目的建立了一系列土壤水动态模拟模型,包括指数消退模型和BP网络模型两个经验模型,水量平衡模型以及裸地、冻土、植物生长条件下的土壤水动力学模型和水热耦合传输模型。不同的模型在反映土壤水分运动机理、模拟需要的基本资料、模拟结果及其可能的应用等方面有所差别。利用这些模型,可以对一定条件下的土壤水分动态变化过程进行模拟和预报,分析不同情况下的农田水分转化与消耗规律,并可用于农田灌溉预报或作物非充分灌溉制度优化。

本书系统总结了作者10余年来在土壤水动态模拟模型及其应用方面所取得的研究成果。书中除第1章(概述)和第9章(结论与展望)外,其余7章每章包括1个模型(分别为指数消退模型、BP网络模型、水量平衡模型、裸地土壤水动力学模型、冻土水热耦合迁移模型、SPAC水分运移模型、SPAC水热合传输模型)。由于研究工作是在10余年间多人合作完成的,不同模型中所采用的物理量符号不完全一致,在本书撰写过程中做了统一处理。为便于阅读,在目录前附有主要符号表。

作者在10余年来的土壤水研究工作中得到了国家自然科学基金项目的支持,承担的相关项目包括:①农田水分的时空不确定性及其预报和调控模型(No. 50579027, 2006~2008);②水-肥-作物关系的人工神经网络模型研究(No. 50179017, 2002~2004);③农田节水灌溉的增产及环境影响效应的应用基础研究(No. 59839320, 1999~2002);④西北内陆干旱区水资源转化规律研究(No. 59579010, 1996~1998);⑤节水农业综合技术的应用基础研究

(No. 49391604, 1993~1997)。这些项目为开展现场试验观测和研究工作提供了基础,在此向国家自然科学基金委员会表示衷心感谢!

在研究过程中,我们在北京永乐店试验站、新疆叶尔羌河地下水均衡场、山西潇河灌溉试验站、内蒙古临河巴音试验场等地开展相关的试验观测工作,试验工作得到了各试验站领导、技术人员的大力支持,为研究工作提供了丰富翔实的观测数据。研究生李熙春、霍军军、胡庆芳等参加了农田 SPAC 水分传输模型(第 7 章)和水量平衡模型(第 4 章)的部分试验与研究。研究工作中还得到清华大学水文水资源研究所各位老师及研究生的支持和帮助。在此向他们表示衷心感谢!

衷心感谢科学出版社为本书出版所付出的努力,以及清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室对本书出版的部分资助。

书中不妥之处,敬请读者批评指正(联系地址:100084 北京清华大学水利水电工程系;Email:shangsh@tsinghua.edu.cn)。

作 者

2009 年 2 月于北京

主要符号列表

a : 衰减系数	发量
a, A : 经验系数	$ET_{m,i}$: 第 i 阶段最大腾发量
A : 稳定入渗率	g : 重力加速度; 根系分布函数
A_w : 有效含水率	g_i : 土壤颗粒形状系数
b, B : 经验系数	G : 土壤热通量
c, C : 曲线形状系数	h : 空间离散步长; 植被高度
C, C_w : 土壤比水容量	H : 海拔高程; 地下水埋深
C_e : 冻土等效体积热容量	H_0 : 地下水初始埋深
C_l : 冻土的相变热容量	H_m : 地下水最大埋深
C_p : 定压比热容	H_s : 土壤与空气间的显热交换
C_v : 土壤体积热容量	H_v : 作物叶面与周围空气的显热交换
d : 零平面位移; 经验参数	i : 土壤入渗率; 空间节点编号
D, D_w : 土壤水分扩散率	I : 累积入渗量
D_a : 空气中水汽扩散系数	k : 土壤水分消退指数
e_0 : 地表水汽压	k_m : 最大土壤水分消退指数
e_a : 空气水汽压	$k(\psi)$: 土壤水分胁迫系数
e_b : 冠层空气水汽压	K, K_w : 非饱和土壤导水率
e_s : 饱和水汽压	K_c : 作物系数
e_v : 叶面气孔下腔及叶肉细胞间隙的水汽压	$K_{c,end}$: 成熟期作物系数
E_a : 土壤实际蒸发量	$K_{c,ini}$: 生长初期作物系数
E_g : 潜水蒸发量	$K_{c,mid}$: 生长中期作物系数
E_{gB} : 裸地潜水蒸发	$K_{c,winter}$: 越冬期作物系数
E_{gC} : 作物生长条件下的潜水蒸发	K_{cm} : 生育期最大作物系数
E_p : 土壤最大蒸发量	K_d : 冠层顶动量涡动扩散率
ET : 腾发量(蒸散发量)	K_h : 热传导率
ET_0 : 参考作物腾发量	K_s : 土壤饱和导水率; 土壤供水系数
ET_i : 第 i 阶段腾发量	l : 孔隙连接度参数
ET_m : 不受水分胁迫时的农田最大腾	L : 水的蒸发潜热; 土层厚度
	L_e : 水的蒸发潜热

- L_f : 冰的融化潜热
 L_s : 冰的汽化潜热
 LAI : 作物叶面积指数
 LE_s : 土壤蒸发潜热
 LE_v : 作物蒸腾潜热
 m : 灌水定额; 作物根系层上半部吸水量与总吸水量之比; 经验系数
 M : 灌溉定额; 水汽摩尔质量
 MO : Monin-Obukhov 长度
 n : 日照时数; 土壤孔隙率; 指数
 N : 天文日照时数
 p : 经验常数
 P : 降水量; 大气压; 冻结期潜水蒸发折算系数
 q : 根系层底部水流通量
 q_h : 热通量
 q_w : 水分通量
 Q : 根系层底部水分交换量
 r_a : 空气动力学阻力
 r_{a0} : 中性层结下的空气动力学阻力
 r_{ba} : 冠层向大气水热传输的空气动力学阻力
 r_s : 土壤蒸发阻力
 r_{sb} : 土壤表面向冠层传输的空气动力学阻力
 r_v : 冠层总气孔阻力
 r_{v0} : 充分供水条件下的冠层总气孔阻力
 r_{vb} : 水热由叶面向冠层传输的冠层边界层阻力
 R : 普适气体常数
 R_v : 作物冠层截留净辐射
 R_a : 晴空太阳总辐射
 R_n : 净辐射
 R_{nl} : 净长波辐射
 R_s : 总辐射
 R_g : 地面接收的净辐射
 R_w : 水汽气体常数
 RH : 相对湿度
 s : 作物根系吸水速率分布函数
 s_0 : 充分供水条件下作物根系吸水速率分布函数
 S : 作物根系吸水速率; 土壤吸渗率
 S_i : 大气稳定度修正系数
 S_N : 太阳时正午
 ST : 负积温
 Su : 作物生育期内土壤水利用量
 SW_f : 冻结期土壤稳定 1m 贮水量
 SW_u : 非冻结期土壤稳定 1m 贮水量
 t : 时间
 t' : 相对时间
 t_m : 动态变化曲线上最大值对应的时间
 T : 温度
 T_0 : 地表温度
 T_a : 平均气温; 实际蒸腾量
 T_b : 冠层空气温度
 T_{kn} : 最低绝对气温
 T_{kx} : 最高绝对气温
 T_{max} : 最高气温
 T_{min} : 最低气温
 T_p : 植物最大蒸腾量
 T_v : 叶面温度
 u_* : 摩擦速度
 u_{top} : 冠层顶风速
 U_2 : 2m 高处的风速
 U_e : 冻土等效对流速度
 v_{jk} : BP 网络中隐含层单元 j 到输出层单元 k 的权重
 V_f : 土壤冻结速度

w : 叶片宽	θ_i : 冻土体积含冰量
w_{ij} : BP 网络中输入层单元 i 到隐含层单元 j 的权重	θ_j : BP 网络中隐含层单元 j 的激活阈值
W : 土层贮水量; 土层平均含水率	θ_m : 冻土层最大未冻水含量
W_c : 根系层底部水分交换的临界贮水量	θ_p : 土层消融时的峰值含水量
W_f : 根系层田间持水量	θ_r : 土壤残余含水率
W_j : 根系层土壤水分胁迫的临界含水量	θ_s : 土壤饱和含水率
W_p : 根系层凋萎含水量	θ_u : 冻土未冻水含量
x, y : 水平方向空间坐标	θ_v : 土层冻结前的最低含水量
X : 土壤各相的体积含量	κ : Karman 常数
y : 作物相对产量	λ : 热导率
Y : 作物产量	λ_e : 冻土等效热导率
Y_m : 充分供水条件下的最大作物产量	λ_i : 第 i 阶段的作物水分敏感指数
z : 参考高度	μ_k : BP 网络中输出层单元 k 的激活阈值
z_0 : 粗糙高度	$\xi(t)$: 两序列在时刻 t 的关联函数
z, Z : 垂直方向空间坐标	$\xi(z, t)$: 根系密度分布函数;
Z : 作物水分敏感指数累积函数	$\xi'(z, t)$: 相对根系密度分布函数
Z_f : 土壤冻结深度	π : 土壤溶质势
Z_r : 根系层深度; 大气参考高度	ρ : 空气密度
α : 下垫面反射率; 水分胁迫响应函数	ρ_i : 冰密度
β : Bowen 比	ρ_w : 水密度
γ : 湿度计常数; 斜率关联度	τ : 时间离散步长
Δ : 饱和水汽压-温度曲线的斜率	φ : 纬度
ΔH : 土壤冻结过程中地下水最大降深	ψ : 基质势
Δt_n : 离散时间步长	ψ_1 : 作物根系缺氧点基质势
Δz_i : 离散空间步长	ψ_2 : 高含水率下作物根系层水分胁迫临界点基质势
$\Delta \theta_{iv}$: 土层冻结期稳定含水量与冻前最小含水量之差	ψ_3 : 低含水率下作物根系层水分胁迫临界点基质势
θ : 土壤体积含水率	ψ_4 : 凋萎点基质势
θ_a : 土壤体积含气率	ψ_{50} : 腾发量减少 50% 时的土壤基质势
θ_i : 土层冻结后的稳定含水量	

目 录

前言

主要符号列表

第 1 章 概述	1
1.1 土壤水研究的背景与意义	1
1.2 土壤水分动态模拟模型的类型	3
1.3 现场试验基本情况与本书主要模型简介	7
第 2 章 土壤水分指数消退模型及其应用	12
2.1 土壤水分的指数消退模型	12
2.2 指数消退模型在冬小麦田间土壤水分动态预报中的应用	13
2.3 小结	16
第 3 章 土壤水分模拟的 BP 网络模型及其应用	17
3.1 BP 网络与 BP 算法	17
3.2 BP 网络模型在土壤水分动态模拟预报中的应用	21
3.3 小结	23
第 4 章 农田土壤水量平衡模型及其应用	24
4.1 农田土壤水量平衡模型	24
4.2 北京与晋中冬小麦田间水量平衡模拟分析	30
4.3 农田水量平衡模型在作物非充分灌溉制度优化中的应用	38
4.4 小结	46
第 5 章 裸地土壤水动力学模型及其应用	48
5.1 裸地土壤水动力学模型	48
5.2 土壤水动力学模型的数值计算方法	51
5.3 降水入渗过程的数值模拟	56
5.4 蒸发条件下土壤水热传输的数值模拟	58
5.5 小结	64
第 6 章 冻土水热耦合迁移模型及其应用	65
6.1 冻土水热迁移模型及其数值计算方法	65
6.2 冻土水热特性参数	71

6.3	地下水位恒定情况下冻土水热迁移模拟分析·····	75
6.4	地下水位变化情况下冻土水热迁移模拟分析·····	85
6.5	蒸发条件下冻土水热迁移模拟分析·····	89
6.6	小结·····	98
第7章	农田 SPAC 水分运移模型及其应用 ·····	101
7.1	作物生长条件下农田 SPAC 水分运移模型·····	101
7.2	模型检验及模拟分析·····	106
7.3	北京冬小麦-夏玉米灌溉制度与土壤水动态模拟分析·····	113
7.4	小结·····	120
第8章	农田 SPAC 水热传输模型及其应用 ·····	122
8.1	水分胁迫条件下 SPAC 水热传输模型的建立·····	122
8.2	SPAC 水热传输模型的求解·····	131
8.3	北京冬小麦田间水热传输模拟分析·····	138
8.4	新疆叶尔羌河绿洲冬小麦动态耗水规律模拟分析·····	149
8.5	新疆叶尔羌河绿洲地下水浅埋区农田水热传输模拟分析·····	156
8.6	小结·····	166
第9章	结论与展望 ·····	169
9.1	土壤水动态模拟模型·····	169
9.2	土壤水动态模拟模型的应用·····	173
9.3	土壤水动态模拟模型的发展方向·····	177
参考文献	·····	179

第 1 章 概 述

1.1 土壤水研究的背景与意义

土壤是一种重要的自然资源,与人类的生活、生产关系密切。作为一种多孔介质,土壤由形状不规则、排列错综复杂的碎散固相颗粒构成骨架,而颗粒之间的孔隙则充满了不断运动的水和空气。土壤水(soil water)一般指地表与地下水面之间土壤非饱和带(unsaturated zone)中所含的水分,是土壤三相组成中最活跃的因素。

土壤水是联系地表水和地下水的纽带,也是农作物、林草等植物耗水的主要来源,同时土壤水分状况及运动对土壤中的盐分、污染物运移有很大影响。因此土壤水与水文循环、植物耗水及生长、土壤及地下水环境等有密切的关系,土壤水研究也越来越受到重视(雷志栋等,2002),水文学、土壤学、农田水利学、生态学、环境科学等学科都从不同的角度对土壤水分进行研究,取得了很大的进展。

1.1.1 土壤水与水文循环

地球上的大气水、地表水、土壤水、地下水等不同形态的水分处于不断的循环和转化之中,称为四水转化(图 1.1)。其中土壤水分将大气降水、地表水和地下水联系起来,在水文循环中处于中间位置,地表入渗、蒸发、入渗补给地下水、潜水蒸发等主要水文过程均与土壤水密切相关。

在降水产流过程中,降水首先入渗进入土壤,超过地表入渗能力的降水则产生地表径流;入渗水分在土壤非饱和带中运动,使土壤含水量增加,在一定条件下会有一部分土壤水向下补给地下水,也会有一部分土壤水形成壤中流;地下水在一定条件下会产生地下径流。地表径流、壤中流、地下径流经过汇流形成河道径流(地表水),而地表水也会以渗漏方式补给土壤水、地下水。

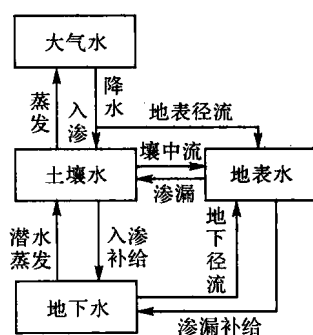


图 1.1 四水转化示意图

蒸发(包括土壤蒸发和植物蒸腾)是陆地水分消耗的主要形式,蒸发作用使得土壤水分减少,进而引起土壤水分的垂向运动,在地下水位比较浅的情况下会使地下水向上补给土壤水(一般称为“潜水蒸发”)。

由于土壤水在水文循环中的重要作用,在水循环机理研究及水文模型开发中一般都比较重视土壤水对有关水文过程的影响,并采用一定的模型来描述土壤水分的动态变化。例如概念性水文模型一般将非饱和区的土壤水分作为一个整体或分为若干层次,利用土壤水量平衡方法来分析其动态变化(赵人俊,1984);而近年来具有物理基础的分布式水文模型一般采用土壤水动力学模型来描述土壤水分的动态变化(Abbott 等,1986a,b)。

另一方面,降水入渗、入渗补给、蒸发、潜水蒸发等界面水文过程是土壤水分运动的边界条件,对土壤水分的垂向分布及动态变化有很大影响。在研究土壤水分动态变化时,也需要充分考虑以上过程及其对土壤水分的影响。水文学和土壤学的交叉与融合产生了水文土壤学(hydropedology)(Lin,2003)等交叉学科,对其深入研究有助于深化对水文循环规律和土壤水分动态变化规律的认识,促进相关学科的发展。

1.1.2 土壤水与植物耗水及生长

植物生长过程中需要消耗大量的水分(以蒸发蒸腾消耗为主),其主要来源是植物根系所吸收的土壤水。植物根系层土壤水分的含量、空间分布及动态变化对植物生长有很大影响,在适宜的土壤水分条件下植物能正常生长,而土壤含水量过高或过低均会使植物生长受到抑制甚至凋萎。

在农业生产中,可以通过灌溉、排水等农田水利措施来调控农田水分状况,以提高农作物产量、提高水资源利用效率。相关的主要研究领域包括作物需水规律与灌溉制度、以土壤水为中心的农田水分转化与消耗(农田四水转化)规律、SPAC(土壤-植物-大气连续体)水分运移、作物生长及产量对土壤水分胁迫的响应(水分生产函数)、有限水资源条件下灌溉水量的合理分配等,这些研究均离不开对农田土壤水分状况和动态变化规律的深入理解和把握。土壤水动态模型在这些研究中及应用中起到关键的作用(Ranatunga 等,2008)。

近年来,随着生态保护意识的逐渐提高,天然植被的生态用水越来越受到重视,但有关研究还比较薄弱。天然植被耗水与农作物有很多类似之处,应用农田耗水研究的有关理论和方法来深入研究天然植被的耗水规律,得到不同地区典型植被类型需水与耗水的定量规律,可以为天然植被的保护及考虑生态用水的水资源合理配置提供理论依据。

1.1.3 土壤水与土壤、地下水环境

农业生产中化肥、农药的大量施用不仅会造成农业生产成本的增加,还会使化肥、农药残留在土壤中。工业及生活废水的不合理排放以及部分地区不合理的污水(中水)灌溉,也会使土壤中污染物增加。据统计,进入环境的污染物中约有90%进入土壤(任理等,2008),造成土壤污染、质量降低,进而对农业生产带来不利影响,甚至会影响到农产品质量与食品安全,给人类的的生活和健康带来不利影响。

伴随着水文循环过程,土壤中积累的污染物会进一步造成地表水体和地下水体的污染,其中地下水污染与土壤水分、污染物在土壤中的运动关系密切。土壤中污染物的迁移包括对流、分子扩散、机械弥散等形式,其中对流主要取决于土壤水分运动特性,而分子扩散、机械弥散以及污染物的各种生物地球化学过程也与土壤水分状况及运动相关(李韵珠等,1998;雷志栋等,1988),因此土壤水运动规律是进一步研究土壤中污染物迁移规律的基础。通过对土壤水、溶质运移规律的研究,有助于对地下水污染来源、过程的深入分析,为地下水污染的控制提供理论基础。

1.2 土壤水分动态模拟模型的类型

由于土壤水分研究在水文学、土壤学、农田水利学、生态学、环境科学等学科中的重要作用,众多学者对土壤水分变化规律进行深入研究,建立了各种各样的土壤水分动态模拟模型(Ranatunga等,2008;尚松浩,2004),以模拟土壤水分在不同自然及人为条件下的动态变化及分布规律,进而对农田及天然植被耗水过程、污染物迁移过程进行模拟分析。在对模型输入因子进行预测的基础上,可以对未来一定时期内土壤水分动态变化进行预报。因此土壤水分动态模拟模型有时也称为土壤水分动态预报模型。

对于各种土壤水分动态模拟模型,可以从不同的角度对其进行分类。从研究尺度来看,土壤水分动态模拟模型的尺度可以是土体、农田、灌区(李保国等,2000);从模型对土壤水分运动机理的考虑程度来看,土壤水分动态模拟模型包括系统模型(经验模型)、概念模型(水量平衡模型)和机理模型(水动力学模型);从模型是否考虑土壤水分动态变化的不确定性来看,土壤水分动态模拟模型包括确定性模型和随机性模型。

1.2.1 土壤水分动态模拟模型的尺度

土壤水分的动态变化具有一定的尺度效应,一般可分为土体尺度、农田尺度、区域尺度,其空间尺度范围分别为 $1\sim 10\text{m}^2$ 、 $10^2\sim 10^6\text{m}^2$ 、 $>10^6\text{m}^2$ (李保国等,2000)。

目前关于土壤水分动态模拟的研究多是针对土体尺度进行的,一般不考虑气象、土壤、作物等因素的空间变异性,可以采用不同的方法和模型对其土壤水分动态变化进行研究。在农田尺度下,气象因素变化不大,如果土壤、作物等的空间分布比较均匀,则可以用土体尺度的方法和模型来进行研究;否则需要考虑土壤、作物等的空间变化。而对于区域尺度,则需要考虑以上因素的空间变化,所采用的方法主要是水量平衡分析。

1.2.2 土壤水分动态模拟的系统模型、概念模型和机理模型

由于土壤特性及外界影响因素(气象、作物、地下水等)的复杂性,土壤水分变化是一个比较复杂的动态过程。根据对土壤水分运动机理的考虑程度,土壤水分动态模拟模型包括系统模型(经验模型)、概念模型(水量平衡模型)和机理模型(水动力学模型)。

1. 系统模型

系统模型一般不着重考虑土壤水分动态变化的机理,而是根据土壤水分变化与其主要影响因素的关系或土壤水分序列自身的动态变化规律,建立各种各样的经验性模拟模型。这类模型主要包括:

(1) 统计回归模型:通过对土壤水分与降水等影响因素的关系进行分析,建立反映其相互关系的回归模型进行水分动态模拟与预报(康绍忠等,1994)。

(2) 时间序列分析模型:利用时间序列分析方法研究土壤水分序列的动态变化特性,将土壤水分的变化分解为趋势项、周期项和随机项,各项叠加即可对土壤水分动态变化进行模拟(康绍忠等,1994)。

(3) 指数消退模型:通过对土壤水分消退规律的分析可以建立土壤水分动态模拟的指数消退模型(马孝义等,2002;尚松浩等,2000)。

(4) 人工神经网络(ANN)模型:利用 ANN 结构来反映气象、作物等因素对土壤水分变化的影响,可以建立土壤水分动态模拟的 ANN 模型(尚松浩等,2002)。

2. 概念模型

水量平衡模型是一种概念性模型,根据一定时段内土壤水分的输入和输出模拟作物根系层土壤水分的动态变化。其中根系层可以是单层、两层或多层,单层模型中考虑的深度为最大根系层深度(郭群善等,1997)或随时间动态变化的根系层深度(Panigrahi 等,2003),两层模型中一般分为随根系深度而变化的上层、根系以下的下层(Chopart 等,1990),多层模型中根据实际需要土壤划分为多个层次(龚元石,1995)。水量平衡模型多以常微分方程或差分方程的形式来描述。

田间水量平衡要素主要包括降水(P)、径流(R)、灌溉(I)、腾发(ET)、根系层底部水分交换量(Q ,以渗漏为正)等,农田水量平衡的基本方程为

$$\Delta W = W_2 - W_1 = P + I - ET - Q - R$$

式中, W_1 、 W_2 分别为时段始、末的根系层贮水量; ΔW 为其变化量。在以上水量平衡要素中,阶段降水量可根据气象观测得到,灌水量是人工控制且可测量的;其他各项则需要根据一定的方法进行估算。在半干旱、半湿润地区径流量 R 一般比较小,且主要出现在汛期,可以根据一定的产流机制(如蓄满产流或超渗产流)来估算。因此农田水量平衡模型的关键是腾发量 ET 、根系层底部水分交换量 Q 的计算模式。FAO在1998年出版的*Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*(Allen等,1998)一书中对 ET 的计算方法进行了详细论述。 Q 可以采用不同的方法进行估计,如简化法(近似认为 $Q=0$)、零通量面法、定位通量法、经验方法等,在水量平衡模型中采用经验方法比较方便(杨诗秀等,1995)。

3. 水动力学模型

水量平衡模型考虑了农田水分收支对土壤水分的影响,但对土壤水分运动考虑不够深入。在Darcy定律和连续方程基础上建立土壤水运动的基本方程——Richards方程,同时考虑土壤蒸发、作物蒸腾与根系吸水等界面过程,可建立农田土壤水动力学模型,即SPAC(土壤-植物-大气连续体)水分运移模型(康绍忠等,1994;雷志栋等,1988)。与土壤水量平衡模型相比,偏微分方程形式的土壤水动力学模型可以更细致地描述土壤水的运动与转化。Richards方程和初始、边界条件构成一定解问题,建立模型的关键是确定土壤蒸发(上边界条件)与根系吸水速率(源汇项),求解该定解问题即可得到不同条件下的土壤水分时、空变化情况。由于Richards方程是非线性的,只有在简单的初始、边界条件下经过一定的简化才能求得解析解或半解析解,实际应用中一般

采用数值方法来进行求解(雷志栋等,1988),其中基本的数值方法是有限差分法和有限元法。目前已有一些比较成熟的软件可以进行不同条件下的土壤水分动态模拟,如美国农业部盐土实验室开发的 HYDRUS 模型(Šimůnek 等,2008)可以模拟饱和-非饱和土壤水、热、盐的运移。

在永久冻土区和季节性冻土区,需要考虑水-冰相变对土壤水、热状况的影响,建立冻土水热耦合传输模型以模拟分析土壤冻融过程中水、热动态变化规律(尚松浩,1997)。

农田蒸发、蒸腾与能量平衡密切相关,进一步考虑 SPAC 水分运移与热量传输的关系,可以建立 SPAC 水热耦合传输模型(毛晓敏等,1998b;吴擎龙等,1996)。这类模型根据下垫面能量平衡、微气象学原理建立土壤、冠层与大气间的潜热、显热交换模式,将土壤水、热传输与蒸发、蒸腾作为一个整体来考虑,能够描述农田水热迁移、蒸发、蒸腾的动态变化及其规律,但模拟中需要更多的土壤、作物、气象等参数。

1.2.3 土壤水分动态模拟的确定性模型和随机性模型

影响农田土壤水分动态变化的因素(气象、土壤等)在时间、空间上均有一定的随机特性。如果不考虑上述因素的随机性,则模型属于确定性模型,目前常用的水量平衡模型和水动力学模型多为确定性模型,适用于下垫面(土壤、作物等)均匀、气象要素确定的情况。

如果考虑有关影响因素的随机性,可以建立土壤水分随机模拟模型。由于系统模型一般是利用数理统计、随机过程理论建立的,因此可以归为随机模型。在确定性水量平衡模型与土壤水动力学模型的基础上,考虑有关模型输入(降水、腾发等)与参数(土壤特性等)的时域随机性与空间变异性,也可得到相应的随机性模型。

对于时域随机性,首先用适当的随机过程模型来描述降水、腾发等的随机变化特性,如用 Markov 过程、混合指数分布分别描述降水发生与降水量(Wilks,1999),用自回归模型来描述标准化的参考作物腾发量过程(黄冠华等,1997a)。然后建立描述土壤水量平衡或水分运动的随机微分(差分)方程模型(罗毅等,2000)或状态空间模型(黄冠华等,1997a),可以求解得到土壤水分动态的概率分布。

对于空间变异性有两种处理方法,一种方法是分布式模型方法(Bouraoui 等,1997),将研究区域分成若干子区,在每一子区内的输入或参数为一确定量(可以实测或按照地统计学方法进行空间插值得到),利用一维水量平衡模型或水动力学模型进行土壤水分动态的模拟和预测,最后将各子区结果进行综

合,得到研究区土壤水分的时空变化。另一种方法利用概率分布函数描述有关模型输入及参数的空间变异特性,并利用参数的若干随机生成样本进行土壤水分动态模拟,对模拟结果进行统计分析可得到土壤水分的统计特性(Bierkens, 2001; 黄冠华等, 1997b)。

随机水量平衡模型与随机水动力学模型在处理时空随机性方面比确定性模型具有明显的优势,需要首先建立主要影响因子时空变化的随机模拟模型,进而进行土壤水分动态的模拟与预测。但随机性模型比确定性模型复杂,研究还不够深入,在土壤水分动态模拟和预报中的应用还不广泛。

1.3 现场试验基本情况与本书主要模型简介

1.3.1 现场试验基本情况

在十余年的研究过程中,作者在中国北方不同的气候区开展了现场试验工作,为理论研究提供了重要的基础数据。现场试验工作主要在北京永乐店试验站、新疆叶尔羌河地下水均衡场、山西潇河灌溉试验站、内蒙古临河巴音试验场进行。

1. 北京永乐店试验站

1994~2001年,作者与北京市水利科学研究所合作在永乐店试验站进行了冬小麦农田水、热、养分试验观测。该试验站位于北京市东南郊的通州区永乐店镇,地理坐标为116.8°E、39.7°N。该站地处半湿润区,年均降水量570mm,其中夏季约占80%。冻结期从12月初到次年3月上旬,持续约100天。当地地下水位较深,主要农作物为冬小麦、夏玉米。

试验小区分为6行(编号A~F)、5列(编号1~5)共30个小区(图1.2),每个小区面积为10m×5m,中间用混凝土板隔离。试验地土壤为砂壤土,干容重1.4 g/cm³,田间持水量为36%(体积含水率)。

在该站主要开展不同灌溉、施肥水平下的土壤水分动态等的观测。主要观测项目包括气象(包括降水、气温、湿度、日照、风速等)、土壤水分(利用中子仪测定)、土壤温度(利用地温计及热敏电阻测定)、土壤养分、作物生育状况及产量等。

2. 新疆叶尔羌河地下水均衡场

1995~1999年,作者与新疆叶尔羌河流域管理局水盐监测中心合作在叶