

# 农田土壤水的 动态模型及应用

李保国 冀元石 左 强 等 / 著



# 农田土壤水的动态模型及应用

李保国 龚元石 左 强 等著

科 学 出 版 社

2 0 0 0

2.726/23

## 内 容 简 介

本书系依据作者承担的国家自然科学基金重大项目“华北平原节水农业应用基础研究”课题一“以土壤水为中心的农田水循环规律及节水调控机理研究”所取得的成果,按农田土壤水的动态模型及其应用为主线撰著而成。主要包括:农田土壤水监测与空间变异分析;农田土壤水动态的均衡模型及应用;区域农田土壤水随机动态均衡模型及应用;农田土壤水运移的动力学模型及应用;农田蒸散、根系吸水模型及应用;农田土壤水分限制下的作物生长模拟模型;土壤水、汽、热耦合运移模型及应用;土壤水分和养分联合运移模型及应用;土壤-作物系统水分运行的整合建模与实现等。

本书所涉及的内容反映了农田土壤水分研究的最新进展,这包括:土壤水分测定的时域反射仪(TDR)方法;大面积农田土壤水分监测的遥感方法;农田土壤水分变异的分形描述;GIS与农田水均衡模型的耦合;随机理论在农田土壤质地和水分研究中的应用;以及农田土壤水分和养分、作物、及相关环境因子的耦合建模等。

本书可供土壤学、水利学、农林科学、生物科学、地学、生态环境科学等有关专业的科研和教学人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

农田土壤水的动态模型及应用/李保国、龚元石、左强等著. -北京:科学出版社,2000.9

ISBN 7-03-008380-6

I. 农… II. ①李… ②龚… ③左… III. 农田-土壤水-动态模型  
IV. S152.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第05384号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
2000年9月第一次印刷 印张:14  
印数:1—1 800 字数:313 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 序

一方面,我国水资源十分紧缺,时空分配又高度不均;另一方面,利用效率很低,浪费严重,这种现实已成为我国国民经济建设和农业发展中的一个严重制约因素。我国每年 5400 多亿立方米的用水量中,农业占 70% 以上,是用水大户,是节水的重点。农业节水一直受到政府的重视和得到社会的共识,最近,中共中央国务院关于技术创新和发展高技术,实现产业化的决定中提出:“特别要在优良品种培育和节水农业两大领域集中力量尽快实现新的突破,为我国农业现代化提供强有力的科技支撑。”

近一二十年来,节水农业方面的应用性研究较多,技术也有不少进步。但是,一些理论性的和基础性的问题研究不够,影响了节水农业和技术的进一步发展,这正是国家自然科学基金委员会将“华北平原节水农业的应用基础研究”列为“八五”重大研究项目的背景和原因。

七八十年代,在黄淮海平原旱涝盐碱综合治理的研究中,我们曾提出了半湿润季风气候和泛滥平原地质学条件下,水分在时空上的高度不均性和水盐运动的理论和观点,阐述了这个地区农田水循环的复杂性和巨大节水潜力;提出和建立了黄淮海平原及其中的华北平原水均衡模型和方程;阐述了土壤水库和地下水库的概念及其巨大的水调蓄能力及潜力。在水均衡的研究中提出了,黄淮海平原属降水-蒸散水均衡类型,77.1% (731 亿立方米)来自降水和 82.7% 的水分以入渗-储存-蒸散的形式在土壤中完成其转化过程。根据此项水均衡计算,仅将农田蒸散的有效利用系数提高 0.15 一项,即可使约 80 亿立方米的水得到利用,接近于“南水北调”到达本区的水量,可见其潜力和实际意义之巨大。

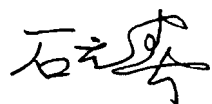
在“华北平原节水农业应用基础研究”中,设立了“以土壤水为中心的农田水运行规律及节水调控机理研究”的课题,以进一步阐明以土壤水为中心的农田土壤-作物系统中水分运行的主要过程,其目标在于对农田土壤水转化过程进行定量化和整合性的研究,并探讨其调控机理。

经 5 年的研究,取得了可喜的进展,主要有以下的一些内容。冲积平原区土壤质地剖面随机预测模型的建立和验证,以及考虑土壤质地剖面的农田土壤水分随机均衡模型的建立和应用;建立了土壤水汽热耦合运移模型及其应用;土壤-作物系统的水氮联合运移机理和利用模型;建立了土壤水分运动和作物生长的动力学耦合模型,并开发成相应的软件系统 SWAF1.0。在研究中注意应用了一些新的科学方法和技术,如土壤水分空间变异的分形特征、TDR 监测土壤水分动态、农田土壤水分的遥感监测、GIS 与农田土壤水均衡模型的联合运用等。本书是这些成果的系统总结。

本专著标志着我国节水农业的基础性研究向前推进了可喜的一步,其中一些成果已进入该领域的国际先进行列。相信,这本专著的出版,在指导和促进提高农田水分利用效率量化及调控的研究和节水实践上能起到良好的作用。但是也要看到,农田土壤水运

动的研究,尚处在发展很快和不甚成熟的阶段。在积极推进这项十分有意义的研究的同时,也要注意找到它的不足和新的努力方向。

令我十分高兴的是,这本专著是以李保国教授为首的,参加本课题研究的一批青年科技专家的集体之作,一些资深的教授给予了热情的指导和支持。他们基础好,知识新,动手能力强,有创新精神,是一支可予信赖的新生力量。不仅要出成果,也要出人才,这是国家自然科学基金委员会和我们老一代科技工作者的期望。



1999 年秋,北京

## 前 言

本书主要依据作者承担国家自然科学基金重大项目“华北平原节水农业应用基础研究”课题一“以土壤水为中心的农田水循环规律及节水调控机理研究”所取得的成果撰著而成。本项研究(1993~1997)取得的主要进展为,初步提出了华北平原区以土壤水为中心的农田水循环及节水调控的理论体系和实践模式。在基础性理论方面取得创新性成果为:

1. 在农田水分循环规律研究中,建立了土壤水分运动和作物生长模型耦合模型,从而把农田中与水分运行有关的最主要的两个过程土壤水分运动和作物生长发育和时空的动态进行了有效的匹配,可更加科学定量清晰地回答农田水分运行、节水调控、提高农田水分利用效率中各种理论性问题和实践措施的效果与效益。据此开发了 SWAF1.0 农田土壤水分计算模拟分析系统所开发的 SWAF1.0 农田土壤水分计算模拟系统,运行界面友好,功能强,可供从事节水农业科技人员应用,使更多的科技人员掌握最新农田水分循环的研究技术。

2. 针对华北冲积平原区土壤质地剖面层次复杂多变,极大影响农田土壤水分运动和农田水循环的事实,建立了区域土壤质地剖面的随机预测模型,这方面研究突破了以往对土壤质地剖面的排列仅能定性措施的局限性,进一步据此建立区域土壤水分均衡随机模型,使对区域土壤水分运动与均衡复杂性的认识更加科学化,不但可以得到以往水分运行总体平均变化规律,而且可深入了解其变化的变异程度。

3. 对土壤水分转化几个主要过程的定量化研究取得:

(1) 通过对 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算蒸散在华北地区的应用表明,两种公式计算结果相关性很好,在年内不同季节相对偏差为 10%~25%。在一般情况下两种方法都可用于华北地区农田蒸散计算。所建立的日随机蒸散模型更准确反映了蒸散量动态变化。建立的水、汽、热耦合模型定量给出了在干旱“热”、“冷”蒸发条件下,液态水和汽态水在某层面的通量。

(2) 通过田间实验、物理模拟和模型模拟计算对深层通量和根系吸水进行了多层次、多方位的研究,小麦、玉米根系吸水层应为 2 米深土层,其影响范围在一定条件和时期内可达 3~4 米是客观存在的。这对于节水农业中土壤水分的调控和灌溉制度的制定既有理论指导意义,又有重要的实践作用。在此基础上所建立深层渗漏量和土壤含水量基质势或降雨量的关系对节水灌溉和农业水资源利用和评价具有重要意义。

(3) 对农田水量平衡模型中,作物根系吸水函数及蒸散公式的敏感性分析得出了 FAO-Dejong 或 PM-Selim 组合模型能较好地模拟土壤水分动态变化过程。根据水动力学原理,结合微型蒸发仪(MLS),建立了根系吸水模型,此项工作比以往工作理论依据更加充分,模型模拟的结果反映冬小麦在不同水分处理情况下的根系吸水规律。

4. 在新理论、新方法引入创建方面取得四项成果,丰富和拓宽了节水农业的研究内容。

(1) 系统地研究 TDR 测量土壤水分的技术, 得出了在高精度实时连续监测土壤水分动态时, TDR 应作为首选的测试方法, 应用 TDR 连续观测技术, 在一定条件下可以准确地动态估算作物需水量和作物系数。

(2) 把分形理论用于定量描述土壤水分的空间变异, 计算给出了研究小区内质量含水量、体积含水量和容重的分形维数。丰富了土壤水分空间变异复杂性科学定量化指标的研究。

(3) 引入两域流动模型的理论, 对土壤水分运动进行了描述, 指出在有大孔隙 ( $>0.3\text{mm}$ ) 存在情况下, Darcy 定律的适用范围。进一步通过田间和室内实验得出, 在大孔隙占总孔隙度 1.2% 强的情况下, 大孔隙对饱和导水率的影响占到 63% 以上。

(4) 引入三维可视化理论和技术于作物生长发育模型中, 构建了玉米个体和群体, 这在作物生长发育的描述上是一个质的飞跃。据此我们可以获取众多以往不易取得的作物生长发育形态参数及其三维空间结构, 这对于作物生产定量化研究、节水农业基础和应用研究具有巨大意义。

据已取得的成果, 按农田土壤水的动态模型及其应用为主线进行本书的著写, 为了反映农田土壤水研究的进展和对农田土壤水动态模型有一个完整的认识, 本书增加了我们承担其他国家自然科学基金等研究项目所取得有关农田土壤水方面研究的成果的内容, 即农田土壤水分的遥感监测技术第二章第三节、地理信息系统 (GIS) 和农田水均衡模型的结合第三章第三节、土壤水分和养分联合运移模型 (第九章)。对于土壤水两域模型和作物三维可视化模型的应用我们将在它处论述。

# 目 录

## 序

## 前言

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| <b>第一章 概论</b>                   | 李保国(1)         |
| 第一节 农田土壤水系统和节水农业                | (1)            |
| 第二节 国内外研究进展                     | (2)            |
| 一、概述                            | (2)            |
| 二、农田土壤水转化模型                     | (3)            |
| 三、农田水分特性空间变异特征的定量化              | (4)            |
| 四、农田土壤水分与作物生长关系                 | (5)            |
| <b>第二章 农田土壤水监测与空间变异分析</b>       | 龚元石、陈焕伟、李保国(7) |
| 第一节 时域反射仪测定农田土壤水分技术             | (7)            |
| 一、测定原理及国内外研究进展                  | (7)            |
| 二、农田土壤水分测定三种方法的比较               | (10)           |
| 三、TDR 探针两种埋设方式下土壤水分测定及其比较       | (14)           |
| 四、应用 TDR 测定的土壤水分估算农田蒸散量         | (16)           |
| 五、土壤容重和温度对 TDR 测定土壤水分的影响        | (19)           |
| 第二节 农田尺度土壤水分空间变异的定量分析           | (25)           |
| 一、半方差函数及其分形维数的基本理论              | (25)           |
| 二、试验及其结果的统计分析                   | (26)           |
| 三、应用分形理论与地统计学原理相结合的分形分析         | (27)           |
| 第三节 农田土壤水动态的遥感监测技术及应用           | (29)           |
| 一、概述                            | (29)           |
| 二、基于能量平衡方程的遥感模型的原理与参量           | (30)           |
| 三、区域农田土壤水分遥感动态监测——实例研究          | (33)           |
| <b>第三章 农田土壤水动态的均衡模型及应用</b>      | 龚元石、李保国(40)    |
| 第一节 农田土壤水分层均衡模型                 | (40)           |
| 一、模型原理                          | (41)           |
| 二、模型验证                          | (44)           |
| 第二节 农田土壤水分均衡模型的应用               | (46)           |
| 一、农田土壤水分动态模拟                    | (46)           |
| 二、农田实际蒸散量计算                     | (47)           |
| 三、土壤分层根系吸水量计算                   | (49)           |
| 四、农田土壤水渗漏量的计算                   | (50)           |
| 五、农田灌溉需水量的分析                    | (52)           |
| 第三节 农田土壤水均衡模型与地理信息系统(GIS)的结合与应用 | (57)           |
| 一、区域农田土壤水分分布式均衡模型               | (57)           |



|                                                    |                |
|----------------------------------------------------|----------------|
| 二、模型实施与地理信息系统的结合 .....                             | (59)           |
| 三、应用实例与分析 .....                                    | (61)           |
| <b>第四章 区域农田土壤水随机动态均衡模型及应用</b> .....                | 李保国、李卫东(63)    |
| 第一节 区域农田土壤质地剖面变异的定量分析 .....                        | (63)           |
| 一、研究区概况和实验设计 .....                                 | (63)           |
| 二、区域土壤质地剖面变异的定量分析 .....                            | (64)           |
| 第二节 区域农田土壤质地剖面的随机模拟模型 .....                        | (69)           |
| 一、模拟模型的建立 .....                                    | (69)           |
| 二、模拟方法及其实现 .....                                   | (70)           |
| 三、模拟模型的验证 .....                                    | (75)           |
| 四、区域土壤剖面质地层次的垂向预测 .....                            | (81)           |
| 五、区域化土壤剖面的概念及其确定 .....                             | (81)           |
| 第三节 区域农田土壤水随机动态均衡模型及应用 .....                       | (84)           |
| 一、模型的建立 .....                                      | (84)           |
| 二、模型的应用与结果分析 .....                                 | (86)           |
| <b>第五章 农田土壤水运移的动力学模型及应用</b> .....                  | 左强、郭焱、黄元仿(107) |
| 第一节 水动力学模型的原理及求解 .....                             | (107)          |
| 一、土壤水运移的定解问题 .....                                 | (107)          |
| 二、土壤水分运移方程的求解方法 .....                              | (108)          |
| 第二节 水动力学参数的确定模型 .....                              | (109)          |
| 一、土壤传递函数方法 .....                                   | (109)          |
| 二、PTFs 应用实例 .....                                  | (111)          |
| 第三节 水动力学模型在分析农田土壤水转化中的应用 .....                     | (114)          |
| 一、蒸发条件下 1 米土体土壤水分通量的数值模拟与分析 .....                  | (114)          |
| 二、结合微型蒸发仪研究冬小麦根系吸水特性 .....                         | (120)          |
| <b>第六章 农田蒸散、根系吸水模型及其应用</b> .....                   | 龚元石、李保国(132)   |
| 第一节 参考作物蒸散量的计算方法及其比较 .....                         | (132)          |
| 一、作物蒸散量模型的选取 .....                                 | (133)          |
| 二、两种蒸散模型计算结果分析 .....                               | (135)          |
| 三、参考作物蒸散量 $ET_0$ (FAO)和 $ET_0$ (PM)之间差异的成因分析 ..... | (136)          |
| 第二节 农田水量平衡模型对作物根系吸水函数和蒸散公式的敏感性 .....               | (138)          |
| 一、吸水函数和蒸散模式的选择 .....                               | (138)          |
| 二、不同组合处理情形下根层土壤含水量随时间的变化 .....                     | (139)          |
| 三、不同组合处理情形下 1 米土层土壤贮水量变化 .....                     | (140)          |
| 第三节 蒸散量变化的随机模型 .....                               | (141)          |
| 一、蒸散量日变化的随机模型 .....                                | (142)          |
| 二、随机模型的识别及其参数估计 .....                              | (143)          |
| 三、时间序列的预报 .....                                    | (145)          |
| <b>第七章 农田土壤水分限制下的作物生长模拟模型</b> .....                | 宇振荣(148)       |

|                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| 第一节 作物生长模拟模型的基本原理                 | (148)            |
| 一、概述                              | (148)            |
| 二、作物生长模拟模型的基本原理                   | (150)            |
| 三、作物生长模拟模型的应用                     | (153)            |
| 第二节 各主要作物生长发育过程的模拟                | (153)            |
| 一、作物净干物质生产                        | (153)            |
| 二、作物发育进程                          | (156)            |
| 三、同化物在植物器官中的分配和作物形态发育             | (157)            |
| 第三节 土壤水分限制条件下对作物生长模型的修正和模型验证      | (160)            |
| 一、水分对作物生长影响的模拟                    | (160)            |
| 二、作物生长模拟模型的验证                     | (162)            |
| 三、应用实例 1: 曲周县主要作物土地生产力的初步定量分析     | (165)            |
| 四、应用实例 2: 小麦、夏玉米、春播棉花和夏播棉花的节水灌溉方案 | (167)            |
| <b>第八章 土壤水、汽、热耦合运移模型及应用</b>       | 左强(168)          |
| 第一节 土壤水、汽、热耦合运移模型                 | (168)            |
| 一、水分运移方程                          | (168)            |
| 二、热运移方程                           | (169)            |
| 三、垂直一维土柱中水、汽、热耦合数学模型              | (170)            |
| 第二节 数值方法、运移参数及模型检验                | (170)            |
| 一、数值方法                            | (170)            |
| 二、水汽热运移参数                         | (171)            |
| 三、水分运移方程及热运移方程的检验                 | (172)            |
| 第三节 Hanks 蒸发试验的模拟                 | (174)            |
| 一、试验情况简介                          | (174)            |
| 二、模拟与结果分析                         | (174)            |
| 第四节 野外水、汽、热运移规律的模拟                | (177)            |
| 一、试验区土壤层次及水分运移参数                  | (177)            |
| 二、裸地土壤剖面上水、汽、热昼夜变化规律的数值模拟与分析      | (178)            |
| <b>第九章 土壤水分和养分联合运移模型及应用</b>       | 黄元仿、李韵珠、王凤仙(181) |
| 第一节 模型描述                          | (181)            |
| 一、土壤水分运动模型                        | (181)            |
| 二、土壤氮素运移模型                        | (182)            |
| 三、作物生长发育模型                        | (183)            |
| 四、模型所需参数估算                        | (183)            |
| 第二节 模型联合与检验                       | (183)            |
| 一、模型联合                            | (183)            |
| 二、联合模型的检验                         | (184)            |
| 第三节 联合模型的应用                       | (185)            |
| 一、土壤水分利用和损失状况的计算                  | (186)            |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| 二、土壤水、氮条件与土壤水资源利用效率 .....            | (187)        |
| 三、田间土壤水氮管理措施的优化 .....                | (188)        |
| <b>第十章 土壤-作物系统水分运行的整合建模与实现 .....</b> |              |
| ..... 李保国、朱德海、刘峻明                    | (191)        |
| 第一节 土壤-作物系统水分运行的整合建模原理 .....         | (191)        |
| 一、土壤水运动子模型 .....                     | (191)        |
| 二、蒸散和根系吸水子模型 .....                   | (193)        |
| 三、作物生长子模型 .....                      | (193)        |
| 四、土壤水运动和作物生长耦合模型(SWAF1.0) .....      | (194)        |
| 第二节 SWAF 系统简介 .....                  | (195)        |
| 一、系统主控部分 .....                       | (195)        |
| 二、系统模型 .....                         | (197)        |
| <b>参考文献 .....</b>                    | <b>(200)</b> |

# 第一章 概 论

农田土壤水动态及其转化是降水、地表水(包括灌溉水)、土壤水、地下水即“四水”转化过程中的中心环节,对于水土资源的持续利用和农业生产的持续发展有其重大的理论和实践意义。

## 第一节 农田土壤水系统和节水农业

节水农业的最终目的是提高单位水资源的农业产出效率,在农田尺度上就是提高作物对土壤水分的利用效率,即消耗单位土壤水量而获得的经济产量。作物生长发育所需的水分都是通过根系吸收土壤水分来获取的,并极大地影响着土壤水分的动态和转化,而土壤水分的动态还受降水、灌溉、渗漏、地下水补给等因素的影响;反过来,土壤水分的状况与变化也决定了作物对其吸收利用的强度和难易程度,从而影响作物的生长发育乃至最后的经济产量。由于作物的经济产量还受到品种、种植制度、耕作措施、施肥、植保等方面的影响,所以在农田尺度上进行节水农业的研究面对的也是一个复杂系统的研究,本书中论述的仅是以土壤水为中心的农田土壤-作物系统中水分运行的主要过程,目的是对农田土壤水转化过程进行定量化研究,并探讨其调控机理。

农田土壤系统的动态和功能主要在农田水循环(farmland water cycle,简称 FWC)和土壤-植物-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum,简称 SPAC)中体现和实现的。FWC 是农田水的大循环,SPAC 是农田水的小循环,前者是整个节水研究的大背景和基础,也是节水潜力最大的领域。作物对水分的利用,主要是通过作物根系吸收土壤水分来实现的,而降水、地表水、地下水也只有转化成土壤水才能被作物吸收利用。因此,土壤水在“四水”转化过程中是中心环节,是 FWC 和 SPAC 联系的纽带;同时,它还与农田的旱涝、肥料的淋失和利用、土壤盐渍化和地下水污染等密切相关。

不同农田类型的水循环规律及其转化特征具有显著的差异。农田类型可划分成不同地学条件、不同土壤条件和不同种植制度三个层次。根据农业生产实践与所考虑问题的层次,以土壤水为中心的农田水循环规律及节水调控机理研究应在三个空间尺度上进行,即土体尺度、农田尺度、区域尺度。不同空间尺度农田的主要特征见表 1.1。

表 1.1 不同空间尺度及其主要特征

| 空间尺度 | 范围                 | 空间分布                        | 气候因子             | 土地利用因子   | 地学因子     | 地下水影响       |
|------|--------------------|-----------------------------|------------------|----------|----------|-------------|
| 土体尺度 | 1~10m <sup>2</sup> | ( <i>x</i> , <i>y</i> ) 为定值 | 对降水蒸发等因子的处理仅考虑时间 | 灌溉量、种植制度 | 土壤剖面质地层次 | 仅考虑此点地下水位动态 |

续表

| 空间尺度 | 范围                          | 空间分布                   | 气候因子                           | 土地利用因子         | 地学因子         | 地下水影响      |
|------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------|--------------|------------|
| 田间尺度 | $10^2 \sim 10^6 \text{m}^2$ | 大多数情况下 $(x, y)$ 的变化可忽略 | 对降水蒸发等因子的处理仅考虑时间               | 灌溉方式与灌溉量、种植制度  | 土壤剖面构型及其土种类型 | 多个点地下水位动态  |
| 区域尺度 | $>10^6 \text{m}^2$          | 必须考虑 $(x, y)$ 变化       | 大于 $100 \text{km}^2$ 应考虑气候空间变异 | 灌排体系、灌溉制度、种植制度 | 土壤、地貌类型变化    | 分区考虑地下水位动态 |

## 第二节 国内外研究进展

### 一、概 述

农田土壤水分的研究主要应用于指导灌溉方面研究甚多,初期工作应首推 20 世纪三四十年代,美国的 Schofield 和苏联的 Kovda。当今研究中,Woods(1967)提出的农田水文模型是比较系统、完整和受到推崇的。美国加州水资源部(1969)也提出了有关研究成果。之后,Tanji 于 1981 年总结了美国西部六七十年代的工作,概括为 10 个代表性的区域-农田盐渍水文模型。与此同时,英国和丹麦合作研究提出了欧洲水文系统 SHE,包括对径流、土壤水、地下水、积雪融化水和蒸散等方面。概括起来,农田水循环研究采取的主要方法有二,一是建立在水动力学基础上的农田水运动模型;另一种方法是区域和农田的水均衡法。前者是将农田不同存在状态下的水分作为一个统一的系统,采用水动力学方法建立模型,并通过研究其各种变量要素而确定本系统的特征;后者则是在确定的时空条件,研究水分均衡各要素的变动关系(Feddes,1978)。二者各具特点,各有长短,有时结合使用。农田水循环研究的共同特点是具有明显的区域性和实用性。

我国在这方面研究起步较晚,但有自己的工作特点和优势。70 年代初开始的黄淮海平原旱涝盐碱综合治理研究中在这方面进行了大量工作。石元春等在以土壤为中心对降水、灌溉水、土壤水和地下水进行 3 年(1974~1976)系统和定量化观察研究的基础上,应用水均衡及水动力学方法研究了不同地学条件下土壤、农田和流域的水循环(石元春、李韵珠、陈焕伟、王少英,1983),进而提出在农田水循环中,调节要以地下水为枢纽和通过采补和地下水位的调节为杠杆的观点。华孟等(1987,1989)对华北平原旱地土壤水状况和利用进行了较深入的研究。“七五”期间,石元春、李保国等(1990)运用系统分析方法,通过对区域“四水”的系统观测,建立了农田地下水和土壤水运行的分布动态模型,初步实现了对农田地下水动态、土壤水动态及早涝状况的预报,并建立了相应的水盐测报信息系统。陆锦文等,杨诗秀、雷志栋等(1990)对土壤水的运行规律、土壤水的时空调控、农田中节水与减轻盐害的灌水模型、不同农田措施的作物耗水规律等项内容进行了研究。沈振荣等(1992),刘昌明等(1988)在对华北水资源评价、水量转换研究工作中,对土壤水在“四水”转化中的作用进行了系统研究,探讨了土壤水作为一种资源的评价方法(刘昌明,1988),

并提出应加强对大面积农田进行水均衡的应用基础研究(张启瞬、沈振荣,1991)。从土壤水动力学(张蔚榛、张瑜芳,1981,1984;雷志栋、杨诗秀,1988)和 SPAC 系统(康绍忠等,1990,1991)方面的研究入手,也深入定量地探讨了农田水循环规律。

## 二、农田土壤水转化模型

目前农田土壤水转化的模拟模型可分为两大类,即确定性模型和随机模型。而随机模型中的相当部分又是以确定性模型为基础的。无论何种模型,在处理农田因子空间变异性方面,据研究尺度的不同,而采用相适的定量方法。

### 1. 确定性模型

(1) 水动力学模型:依据达西定律和连续原理建立水流基本方程,适合于研究农田垂直向一维水分剖面问题,也可用于研究层状土壤。它是几十年来应用最普遍的模型,国外在这方面的研究和应用很多。读者可参照雷志栋等(1988)、Kutilek 和 Nielsen(1994)出版的专著。但该种模型在应用于农田和区域土壤水转化模拟研究时,则遇到很大困难,即田间土壤物理性质和其他影响因子的空间变异性问题,使得确定性水动力学模型仅能用于特定条件下土壤水转化过程的研究,如土壤性质发生变化,则要花费很大财力和精力去获取新的参数,因而在小尺度区域以上的研究中,该方法的应用几乎不可能。近十年来,在土壤水动力学模型研究的基础上,土壤溶质动移模型(李韵珠、李保国,1998)和土壤水、汽、热耦合模型的研究和应用也取得了重要的进展(见本书第八章)。

(2) 平衡模型:该种模型在应用于单剖面土壤水转化模拟时,原理明确,操作应用简便。Hearn 等(1981)建立了反映植物根层水分状况的土壤水平衡模型。王树森(1992)、卢玉帮(1989)等也采用该种模型,对作物根层水分动态进行了模拟。水平衡模型在应用于区域水均衡研究时,避开了一些土壤水分物理参数(如导水率等),然而某些分量难以准确确定,因而精确度不够高。李宝庆等(1990)曾对华北平原  $5 \text{ km}^2$  试验小区进行了详细的水量平衡研究,但这类模型更适于从宏观上对大区域总水量平衡的研究。石元春(1983)采用这种模型对黄淮海平原的水均衡进行了系统全面的分析,为大区域水分管理决策提供了依据。Zelt(1993)采用这种模型对美国大平原的水分平衡状况进行了研究。采用水平衡模型进行区域土壤水转化的模拟研究中,较优的是用分布式参数的办法。石元春和李保国等(1992)在对黄淮海平原水盐运动监测预报的研究中,即采用该法进行了区域农田水分动态的预报并给出了分布图。总的来说,水平衡的确定性模型在处理空间变异时,通过对各因子进行调查分区采用分布参数的模型,或综合各个因子得出综合因子的分区图。

### 2. 随机模型

这类模型近 20 年来逐渐发展起来,并越来越受到重视和广泛应用。国外在这方面研究得较多,而国内在应用随机方法建模和预报的报道尚少。目前这方面的模型大致可分两种类型,考虑的随机变化有时间上的,也有空间上的,或两者兼之。

(1) 机理性模型:即主要以确定性的机理模型为基础,引入源随机变量。考虑时间上的随机变化,如 Eaglson(1978)将降雨作为泊松过程,由降雨的概率分布推导出依赖于降

雨的水平衡因子的概率分布,以它们的均值来表达年水平衡状况。Azhar(1993)等基于水量平衡方程,把降水和蒸腾视为随机变量,提出了水稻的灌溉制度模型。科尔多瓦等(1979)采用马尔可夫链模型来描述土壤水含量的动态变化过程,将降雨(由泊松过程描述)作为脉冲输入,以8天为一决策时段,研究了灌溉的随机控制问题。考虑空间上随机化的,如Milly(1987)采用多变量正态分布的方式描述土壤空间变异性,研究了土壤空间变异性对年水平衡的影响,考虑的土壤因子为有效孔隙度、孔径分布指数和土壤水分渗透性。1994年他又以伽马分布描述田间持水量,建立了一个考虑部分时空变异因子的综合的年水平衡模型。Dagan等(1983)研究了空间变异情况下的非饱和流情形,将饱和导水率假定为对数正态分布,最终推导出了水分含量、吸力头、导水率在入渗和再分布中的期望值和方差。Unlu等(1990)采用最近邻模型研究了对数饱和导水率( $\ln K_s$ ),孔径分布尺寸( $\alpha$ )和比水容量( $c$ )的空间变异分别对输出变量的影响。Kiefer(1993)采用经典高斯方法建立了一个非均质土壤非饱和流的概念随机模型,模型包括概念性水流模型和随机土壤模型两个子模型,通过摄动分析方法将二者结合起来,其中随机土壤水模型考虑的变异因子为导水率、水力头和毛管压,并采用相似介质的概念来描述空间变异性。这些模型考虑的空间变异因子仅是在微小尺度上变异的土壤物理性状指标,着重研究它们的变化对水分平衡要素的影响(以模型作研究),在田间实际应用上尚有一段距离。李卫东(1995)采用马尔可夫过程理论建立了区域冲积土质地剖面的随机模拟模型,并将其与土壤水转化的水平衡模型相结合,研究了土壤剖面空间变异情况下的区域农田土壤水转化量的均值和概率分布特征。

(2) 时间序列分析模型:这基本上是一种黑箱法,即考虑引起土壤水转化量时间变异的原因(源随机变量),直接对某一转化量(主要为土壤含水量)本身进行动态模拟。目前这种方法还仅仅是对单变量的模拟。

由此可见,已有的模型中,无论是纯确定性的,还是随机的,或者是未考虑或者是尚未较全面地处理空间上的随机变化问题。这既与尚未建立起完善的各种空间变化因子的模拟模型有关,另一方面,也与区域空间变化因子的大量观测数据不易获得有关。因此,采用合适的方法建立各主要空间变化因子的模拟模型已是今后研究的关键问题之一。对于土壤水转化时间变化影响因子方面,目前一些气象学家已逐步建立了较为适宜的日降雨过程的模拟模型。

随机性模型在处理时空变异方面的优点是确定性模型无法比拟的。由于影响农田土壤水转化的环境因子的空间变化具有随机性,因而从理论上系统地考虑空间变化的模型也只能是随机模型,但应以机理性的确定性模型为基础。建立起各主要影响因子时空变化的随机模拟模型,并与农田土壤水转化的机理性模型(水动力学或水平衡模型)相结合,从而建立综合的机理性的区域农田土壤水转化的随机模拟模型是一个长远的任务。

### 三、农田水分特性空间变异特征的量化

影响土壤水转化的因子多而复杂,但就农田来说,土壤物理特性是最主要的一个方面。近20多年来,国内外学者对影响土壤水分转化的土壤物理特性的空间变异性作了大量的研究。诸如,Comegna等(1993)对意大利Naples的火山灰土的水分状况时空变异特

点从一个 50m 的线段上进行了系统分析,Reichard 等(1993)对巴西圣保罗附近的一个热带红色石灰土的水分时空变异特性作了研究,Ragab 等(1993)研究了不同土地利用条件下非饱和带水分转化参数的变异特性,Mulla(1988)在 660m 长的切面上研究了土壤水分含量、基质势和导水率的空间变异特征,Smettem(1987)研究了一个具有质地层次变化(壤/黏)的土壤水分入渗参数的空间变异性,吕军等(1990)对 127m×71m 范围内水稻土物理性质(粉粒、黏粒、团聚体和有机质)的空间变异性作了研究,李鸿杰(1993)等对 50m×50m 地块内土壤水、盐和入渗变异性及其相互作用关系作了空间序列分析。另外,基于相似定律的标定理论用于校正一些土壤水分物理参数因空间变异而产生的偏差方面,近十几年来也得到了较大发展,但由于田间各点并不完全相似,故该法仅是一种统计性的近似方法。从已有文献的研究内容看,主要集中于以下两方面:①土壤水分物理参数,如饱和导水率、扩散率、入渗率、容重等,也包括土壤含水率和入渗量。②土壤基本构成特性,如黏粒、砂粒、团聚体含量及容重等。从空间尺度上看,全是小尺度的,即在小片田块之内。从采用的方法看,主要为地质统计学的有关方法。Nielsen 等 1983 年曾对此作了介绍,主要有空间自相关、空间交叉相关、谱分析、协谱分析、半方差图和克立格法、交叉半方差图和协克立格法、标定方法等。从研究的结果看,主要是找出这些空间变异因子的概率分布类型、相关系数、相关距离、半方差函数及其经验表达式等。目前的应用主要在于确定合理的取样数目和优化插值,进而绘制等值线图。更进一步地应用还较少,与土壤水转化模拟模型的结合还仅仅是初步的。

对于一些在较大尺度上明显变化的土壤水转化影响因子(包括自然的和人为的,如土壤层次和剖面构型、表层质地类型、土壤类型、地形地貌、灌溉和作物类型,以及降雨量分布等)的空间变异特性研究尚少。任鸿遵等(1988)曾对一中尺度区域内降雨分布采用地统计学方法进行了研究。李卫东和李保国(1995)采用马尔柯夫过程理论对华北平原一个 15km<sup>2</sup> 范围内冲积土质地层次的分布规律进行了较系统的研究,发现不同类型质地层次厚度在概率上均有对数正态分布的特点,土壤剖面质地层次的垂向变化为一链依赖过程,可用马尔可夫转称概率矩阵来描述,建立了区域土壤剖面的随机模拟和垂向预测模型,并提出了区域化土壤剖面的概念,从而对区域内复杂的土壤剖面质地层次垂直向变化从理论上找到了定量化方法(详见本书第四章)。

农田土壤水转化的影响因子,包括土壤基本物理特性和更大尺度上变化的自然和人为因子的空间变异特性,严重地影响着农田土壤水转化的模拟的准确度。在中到大尺度上研究这些因子的空间分布规律,寻找适宜的方法予以定量化并与土壤水转化研究相结合,可以更加准确地评估区域水资源转化规律,调控区域农田土壤水状况,这已成为当今土壤物理学和农业水文学研究的一个重要发展方向和学科前沿问题。

#### 四、农田土壤水分与作物生长关系

自 20 世纪 60 年代以来,随着节水农业研究的不断深入,从土壤-作物-大气连续体出发,一是以土壤水分运动和平衡原理为中心,建立了从简单的水均衡模型到复杂的水动力学机理模型,并逐步应用于农田作物灌溉管理;二是以作物生长模拟为中心,研究作物生长发育和耕作栽培措施,主要是土壤水分条件对作物生长的影响。荷兰和美国在这方面的



研究处于领先地位。在荷兰,以 De Wit 教授为首的研究小组,从 1965 年开始对以作物生理为基础的作物生长模型进行了系统研究,先后建立和完善了在不同生产力水平下的作物生长模拟模型。荷兰的作物生长模拟特点是强调作物的共性,与作物的生理生态机理结合较紧,但对水分与作物生长关系的主要环节,根系生长和根系吸水机理的处理尚需进一步完善。

在 20 世纪 70 年代初,由美国农业部农业研究署主持,完成了棉花生长模型和大豆生长模型。与此同时,以 Ritchie 教授为首的专家组完成了 CERES 作物生长模型,并广泛应用于国际农业推广项目中。美国所建立的作物生长模型,除考虑了作物共同的生长机理外,还强调各种作物的特性,建立作物生长过程与环境条件(水、肥、病虫害)的关系,以解决农作物管理中的一些实际问题。近年来,在土壤-作物-大气连续体研究领域内,目前的趋势是以上两个方向的研究正逐渐结合在一起,综合研究农田土壤水分运动和作物生长耦合过程的机理。有关这方面的内容详见本书第七、十章。