

土壤水动力学模型 及在SPAC系统建模中的应用

◎ 杨德军 张土乔 张科锋 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

土壤水动力学模型及在 SPAC 系统建模中的应用

杨德军 张土乔 张科锋 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土壤水动力学模型及在 SPAC 系统建模中的应用 / 杨德军, 张土乔, 张科锋著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-308-09274-6

I. ①土… II. ①杨… ②张… ③张… III. ①土壤水—水动力学—数学模型—研究②土壤—植物—大气连续体系统—研究
IV. ①S152. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 223143 号

内容简介

本书以第一作者在浙江大学攻读博士期间、英国华威大学联合培养博士研究生期间及中国矿业大学工作期间所做的研究为基础撰写而成, 主要介绍了土壤—植物—大气系统土壤水动力学模型及在建模中的应用。全书共 8 章, 第 1 章主要介绍了本书的研究背景与意义和研究历史与现状; 第 2、3、4 章分别介绍了土壤水动力学基本理论、裸地条件下蒸发模型理论和入渗模型理论及应用研究; 第 5、6 章分别论述了土壤—植物—大气系统土壤水动力学有限元模型和积分型的 Richards 方程求解模型; 第 7、8 章分别论述了土壤—植物—大气系统水肥优化使用决策支持系统和 EU-ROTATE_N 决策支持系统的发展和实例验证。为描述方便, 本书作如下约定: SPAC 系统 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) 指的是土壤—植物—大气系统。

本书可供土壤学、地学、水利工程、土木工程、农学和生态环境等相关领域的科技人员和高校教师、研究生参考。

土壤水动力学模型及在 SPAC 系统建模中的应用

杨德军 张土乔 张科锋 著

责任编辑 杜希武
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 浙江云广印业有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 10.5
字 数 205 千
版 次 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-09274-6
定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

土壤是由固、液、气三相组成的一种复杂的多孔介质。降雨和灌溉水入渗后形成土壤水,才能被植物吸收利用;过量施肥导致土壤中残留的肥料分别通过地表径流和淋溶过程污染地表水和地下水。土壤水联系着大气水和地下水,是农业水循环中的一个重要环节,是土壤水运动、污染物运移、肥料高效利用和作物生长等过程的关键因素。自 Philip 于 1966 年提出了土壤—植物—大气连续体系统(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)概念以来,国内外很多学者基于此系统开展了广泛的研究。

从广义上讲,SPAC 系统土壤水动力学不仅指土壤水循环中包括裸地蒸发、作物蒸腾、入渗、径流、排水和根吸收等过程,还包括与这些过程紧密联系的污染物运移过程。最初对土壤水动力学的研究主要集中在裸地蒸发,降雨入渗和径流等单个过程,近些年来,基于土壤水动力学、污染物运移和作物营养学等研究成果的水肥优化使用决策支持系统的研究逐渐成为热点。比较有影响力的国外模型有 EPIC 模型、DSSAT 模型、APSIM 模型、CERES 系统作物生长模型、STICS 模型和 EU-ROTATE_N 模型等;国内模型有丛振涛和雷志栋等发展的 WheatSPAC 模型和胡克林和李保国等研发的 SPWS 模型。开展 SPAC 系统土壤水动力学和水肥优化使用决策支持系统的研究,对于提高农业水肥利用效率,降低农作物成本,有效地缓解过量化肥进入地表水或地下水导致的环境污染问题,具有重要的研究意义。

土壤科学是一门传统学科,至今已出版了不少这方面的书籍,这些书主要以介绍土壤科学的基本原理和方法为主。随着计算机和计算科学的发展,人们在土壤水动力学的数值模拟领域取得了长足的进步,各种简单的和复杂的,经验的和机理性的模型不断涌现并得到了实际应用,其模拟范围已从简单的裸土扩展至复杂的 SPAC 系统。本书对土壤水动力学数值模拟的研究进展进行系统的总结,并以最新研发的 EU-RORATE_N 模型为例,详细介绍这些数值模拟手段如何在模拟 SPAC 系统中水分和养分动力学和建立基于模型的水肥优化利用决策系统中得到应用。

本书的主要内容来自第一作者的博士论文《基于 SPAC 系统的土壤水动力学模型研究》和近年来的研究成果。本书从介绍土壤水动力学的一些基本概念着手;在参阅了大量国内外文献的基础上,详细地分析和总结了可用于模拟裸地蒸发

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

和入渗的各种计算模型;阐述了用于求解 SPAC 系统土壤水动力过程的有限元模型和步骤;最后,介绍了作者几年来的研究成果,即积分型的 Richards 方程求解模型的研究及应用,和对最新研发的水肥决策系统 EU-ROTATE_N 模型的改进。

本书在研究和写作过程中,参考了大量国内外专家学者的重要著作和文献资料。在基本理论部分,参考了包括清华大学雷志栋院士等人的专著《土壤水动力学》、武汉大学王康的专著《非饱和土壤水流运动及溶质迁移》和 Hillel Daniel: *Environmental Soil Physics* 等;在实例验证部分,使用了 Dr J Neeteson (Centre for Agrobiological Research, Wageningen, The Netherlands)、Prof. Ian G Burns (英国华威大学),及英国华威大学国际园艺研究所提供的实验数据。需要特别说明的是,本书的部分内容以 EU-ROTATE_N 决策支持系统为基础,相关章节的基本理论和实例验证数据取自英国华威大学国际园艺研究所、EU-ROTATE_N 模型项目报告及公开发表的相关文献。在此谨向全部参考文献的著(作)者和相关人员提供的数据及文献支持表示衷心的感谢!本书的出版还得到了国家自然科学基金青年基金(项目批准号:51009134)“基于 SPAC 系统的氮迁移动力学及模拟研究”和中国博士后自然科学基金面上项目(编号 20100471414)“基于作物根系吸收过程的根—水—肥耦合动力学研究”等项目资助,作者在此一并致谢。限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足,敬请同仁批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 我国水资源现状和节水农业	1
1.1.2 我国农业环境污染现状	4
1.2 研究历史与现状	8
1.2.1 土壤水动力学模型研究	8
1.2.2 污染物迁移动力学研究.....	10
1.2.3 植物根系模型研究.....	11
1.2.4 农田水利模型研究.....	12
1.2.5 基于模型的水肥优化管理研究.....	14
1.2.6 基于模型的氮污染风险评估技术研究.....	14
1.2.7 土壤水动力学及污染物运移模拟数值方法研究.....	15
第 2 章 土壤水动力学基本理论	17
2.1 土壤水动力学概述.....	17
2.2 土壤—植物—大气连续体基本概念.....	17
2.3 土壤水动力参数.....	18
2.3.1 土壤水势.....	18
2.3.2 土壤水分特征曲线.....	19
2.3.3 土壤水分运动参数.....	21
2.4 土壤物理常数.....	23
2.5 直角坐标系土壤水分运动基本方程.....	24
2.6 直角坐标系一维土壤水分运动方程的不同形式.....	25
2.7 直角坐标系一维土壤水分运动方程的定解条件.....	25
2.8 蒸发和入渗边界条件的基本理论.....	26
2.9 根系吸水模型.....	28
2.10 土壤质地	29
2.10.1 土壤质地分类	29
2.10.2 土壤质地对土壤生产性能的影响	32

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

第3章 裸地条件下蒸发模型理论	34
3.1 引言	34
3.2 表土蒸发模型理论	34
3.2.1 形成干土层前的表土蒸发过程	35
3.2.2 土壤水非稳定蒸发的解析解	36
3.2.3 形成干土层后的表土蒸发过程	37
3.2.4 现阶段表土蒸发模型	39
3.3 潜水蒸发模型理论	40
3.3.1 一维均质土潜水蒸发时的土壤水稳定运动	40
3.3.2 一维均质土潜水蒸发时,最大潜水蒸发强度的统一计算式	42
3.3.3 一维均质土潜水稳定蒸发的求解	43
3.3.4 一维非均质土潜水蒸发时土壤水稳定运动	44
3.3.5 潜水蒸发的经验公式	45
3.4 本章小结	46
第4章 裸地条件下入渗模型理论及应用研究	47
4.1 引言	47
4.2 裸地条件下入渗模型理论	47
4.2.1 经验性入渗模型	47
4.2.2 机理性入渗模型	49
4.2.3 入渗过程的非均匀流研究	53
4.3 入渗模型数值试验研究	53
4.3.1 分层土体入渗响应数值试验研究	53
4.3.2 积水条件下入渗响应数值试验研究	58
4.4 本章小结	63
第5章 土壤—植物—大气系统土壤水动力学有限元模型	64
5.1 引言	64
5.2 基于 SWMS_2D 模型的有限元基本理论	64
5.2.1 二维土壤水分运动方程	64
5.2.2 初始条件和边界条件	65
5.2.3 有限元数值解法	65
5.2.4 SWMS_2D 模型程序组成	67
5.3 基于动态根系生长的土壤水动力学有限元模型	70
5.4 实例验证	71
5.4.1 实例说明	71

5.4.2 模型验证	73
5.5 本章小结	77
第6章 裸地条件下土壤水动力学 IRE 模型	78
6.1 引言	78
6.2 裸地条件下的 IRE 方法基本原理	78
6.3 裸地条件下改进的 IRE 土壤水动力学模型	82
6.4 实例验证	82
6.4.1 实例一	82
6.4.2 实例二	86
6.4.3 结论	89
6.5 FEM 与 IRE 的土体蒸发响应模拟研究	89
6.5.1 实例介绍	89
6.5.2 分项结果	90
6.5.3 综合结果	96
6.5.4 结论	98
6.6 本章小结	99
第7章 土壤—植物—大气系统水肥优化使用决策支持系统	100
7.1 引言	100
7.2 EU-ROTATE_N 决策支持系统	101
7.2.1 模型和架构	101
7.2.2 水模块基本理论	105
7.3 N_ABLE 动力学模型	111
7.3.1 作物需求量计算模块	111
7.3.2 根生长与分布模块	112
7.3.3 作物氮吸收模块	113
7.3.4 N_ABLE 模型计算流程图	114
7.4 Daisy 模型	115
7.5 NPK 综合动力学模型	117
7.5.1 磷动力学模型	118
7.5.2 钾动力学模型	118
7.6 本章小结	119
第8章 EU-ROTATE_N 决策支持系统的发展和实例验证	120
8.1 引言	120
8.2 EU-ROTATE_N 决策支持系统水模块的改进	120

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

8.2.1	实际入渗量或蒸发量计算	121
8.2.2	实际蒸腾量计算	121
8.2.3	IRE 方法	122
8.3	实例验证	122
8.3.1	实例说明	122
8.3.2	模型验证	124
8.4	SMCR_N 模型	129
8.5	实例验证	130
8.5.1	实验介绍	130
8.5.2	输入数据	130
8.5.3	结果及讨论	133
8.6	本章小结	139
参考文献		140

图目录

图 1.1	农业活动中氮污染过程示意图	5
图 2.1	欧洲范围内粗砂(a)和细砂(b)的代表性土壤水分特征曲线	22
图 2.2	欧洲范围内粗砂(a)和细砂(b)的导水率—含水率和扩散系数— 含水率关系曲线	23
图 2.3	降雨或灌溉时入渗率随时间关系曲线	27
图 2.4	降雨或灌溉时含水率的分布和分区的示意图	27
图 2.5	根系吸水率土壤负压响应函数示意图	29
图 2.6	美国制土壤质地分类	31
图 3.1	砂壤土土柱蒸发试验中蒸发系数与干土层厚度关系曲线	38
图 3.2	砂壤土土柱蒸发试验中干土层厚度随时间变化过程	38
图 3.3	地下水埋深一定时,不同蒸发强度下的土壤负压分布	43
图 3.4	地下水埋深一定时,入渗和蒸发条件下,土壤剖面上含水率分布	44
图 4.1	Green Ampt 入渗模型示意图	50
图 4.2	改进的 Green Ampt 模型示意图	51
图 4.3	数值实验土体的初始含水率	54
图 4.4	累积入渗量随时间变化图	55
图 4.5	径流量随时间变化图	55
图 4.6	湿润锋位置随时间变化图	56
图 4.7	实际入渗速率随时间变化图	56
图 4.8	设计工况下 H 随时间变化曲线图	59
图 4.9	壤砂土入渗响应模拟结果	60
图 4.10	砂壤土入渗响应模拟结果	60
图 4.11	壤土入渗响应模拟结果	61
图 4.12	粘土入渗响应模拟结果	61
图 5.1	荷兰 Bouwing 试验农场 1984 年天气数据图	72
图 5.2	Bouwing 实验农场的 0~40cm 和 40~100cm 的土壤含水率与 $\lg h $ 的实验点及模拟曲线	72
图 5.3	实例中 10 个时段有限元方法模拟结果与实验数据在含水率 分布上的数据对比	75



土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

图 5.4 实例中三个不同阶段标准化的根长密度实验点与模拟结果的对比图	75
图 5.5 实例中模拟的实际蒸发量与蒸腾量随时间变化曲线图	76
图 6.1 裸地条件下改进的 IRE 土壤水动力学模型示意图	80
图 6.2 实例 1 中不同计算方法壤砂土和粘壤土的实际入渗速率	84
图 6.3 实例 1 中不同计算方法壤砂土和粘壤土的实际累积入渗量	85
图 6.4 实例 1 中不同计算方法壤砂土和粘壤土不同深度处含水率对比图 ...	86
图 6.5 实例 2 不同计算方法得到的蒸发速率对比图(a)粗砂 (b)细砂	88
图 6.6 设计算例下不同计算方法模拟上层土一粗土含水率分布图	91
图 6.7 设计算例下不同计算方法模拟上层土一粗土每日蒸发量和累积 蒸发量	91
图 6.8 设计算例下不同计算方法模拟上层土一中等土含水率分布图	92
图 6.9 设计算例下不同计算方法模拟上层土一中等土每日蒸发量和累 积蒸发量	93
图 6.10 设计算例下不同计算方法模拟上层土一中等细土含水率分布图	93
图 6.11 设计算例下不同计算方法模拟上层土一中等细土每日蒸发量和 累积蒸发量	94
图 6.12 设计算例下不同计算方法模拟上层土一细土含水率分布图	94
图 6.13 设计算例下不同计算方法模拟上层土一细土每日蒸发量和累积 蒸发量	95
图 6.14 设计算例下不同计算方法模拟上层土一极细土含水率分布图	95
图 6.15 设计算例下不同计算方法模拟上层土一极细土每日蒸发量和累积 蒸发量	96
图 6.16 FEM 方法模拟 100 天后 5 种土体的累积蒸发量	96
图 6.17 FEM 方法模拟 100 天后 5 种土体总含水量变化量	97
图 6.18 FEM 方法模拟 100 天后 5 种土体总含水量变化率	97
图 6.19 FEM 方法模拟的 5 种土体总水量随时间变化图	98
图 6.20 IRE 方法模拟的 5 种土体总水量随时间变化图	98
图 7.1 EU-ROTATE_N 模型流程图(主要模块)	102
图 7.2 EU-ROTATE_N 模型水模块流程图	106
图 7.3 NRCS 径流量计算模型流程图	109
图 7.4 N_ABLE 模型计算流程图	114
图 7.5 Daisy 模型组成示意图	116
图 7.6 Daisy 模型中碳流(二氧化碳)示意图	116
图 7.7 NPK 综合动力学模型流程图	117

图 8.1	荷兰 PAGV 试验农场 1984 年天气数据图	123
图 8.2	PAGV 试验农场的 0~25cm, 25~40cm 和 40~100cm 土壤含水率与 $\lg h $ 的实验点及模拟曲线	124
图 8.3	实例中六个不同深度处模拟结果与实验数据在含水率上的数据对比	126
图 8.4	实例中土壤含水率实测值与模拟值对比图	126
图 8.5	实例中三个不同阶段标准化的根长密度实验点与模拟结果的对比图	127
图 8.6	实例中作物干重模拟值与实测值对比图	128
图 8.7	实例中含氮量模拟结果	128
图 8.8	华威大学国际园艺研究所 1970 年天气数据图	131
图 8.9	华威大学国际园艺研究所 1971 年天气数据图	131
图 8.10	华威大学国际园艺研究所 1972 年天气数据图	132
图 8.11	华威大学国际园艺研究所 1973 年天气数据图	132
图 8.12	华威大学国际园艺研究所 1974 年天气数据图	132
图 8.13	华威大学国际园艺研究所 1975 年天气数据图	133
图 8.14	蚕豆—1972 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha) 实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	133
图 8.15	胡萝卜—1970 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha) 实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	134
图 8.16	韭—1971 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	134
图 8.17	洋葱—1973 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	134
图 8.18	豌豆—1971 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	135
图 8.19	土豆—1972 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1); 作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	135
图 8.20	萝卜—1971 在不同的氮肥条件(kg/ha)下: 作物干重(t/ha)实测	

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

	值与模拟值对比图(1);作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	135
图 8.21	糖用甜菜-1974 在不同的氮肥条件(kg/ha)下:作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1);作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	136
图 8.22	夏季白菜-1970 在不同的氮肥条件(kg/ha)下:作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1);作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	136
图 8.23	芜菁-1972 在不同的氮肥条件(kg/ha)下:作物干重(t/ha)实测值与模拟值对比图(1);作物(除须根)含氮率(%)实测值与模拟值对比图(2)	136
图 8.24	作物(除须根)含氮率(%)模拟值与实测值对比图	136
图 8.25	作物干重模拟值与实测值对比图	138
图 8.26	不同作物上部(除须根外)含氮率(%)的关系图	138

表目录

表 1.1	2007 年中国各水资源一级区水资源量(亿立方米)·····	2
表 1.2	2007 年中国各水资源一级区用水量(亿立方米)·····	2
表 1.3	2008 年中国各水资源一级区水资源量(亿立方米)·····	3
表 1.4	2008 年中国各水资源一级区用水量(亿立方米)·····	3
表 1.5	2008 年中国七大水系水质类别及主要污染指标·····	6
表 1.6	2009 年中国七大水系水质类别及主要污染指标·····	6
表 1.7	2010 年中国七大水系水质类别及主要污染指标·····	6
表 1.8	2010 年重点湖库水质类别·····	7
表 1.9	2010 年重点大型淡水湖泊水质状况·····	7
表 1.10	2010 年城市内湖水水质评价结果·····	7
表 1.11	2010 年大型水库水质评价结果·····	7
表 2.1	常用的土壤水分特征曲线方程·····	20
表 2.2	各种土壤的滞后影响统计表·····	21
表 2.3	国际制土壤质地分类·····	30
表 2.4	卡庆斯基制土壤质地分类(简明方案)·····	31
表 2.5	中国土壤质地分类标准·····	32
表 2.6	不同质地的土壤平均有效水容量·····	33
表 4.1	数值实验 5 组土体的水力特征参数·····	54
表 4.2	数值实验 5 组土体的入渗速率·····	57
表 4.3	土体的水力特征参数和初始含水率·····	58
表 4.4	设计工况的参数值·····	58
表 4.5	Parlange 模型参数计算值·····	59
表 4.6	模拟结束时土体在设计工况下湿润锋位置·····	62
表 5.1	SWMS_2D 模型程序组成·····	67
表 5.2	源文件 INPUT2.FOR 不同子程序所对应读入的输入文件和输入块 ·····	68
表 5.3	源文件 OUTPUT2.FOR 中不同子程序所对应的输出文件·····	69
表 5.4	四种作物的 $L_{\text{mid}}(z_r)$ 的拟合参数·····	71
表 5.5	Bouwing 实验农场基本数据·····	71

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

表 5.6	Bouwing 实验农场的土壤水力参数值	73
表 6.1	不同土层区间的平均土壤水模拟值与有限元结果的相对百分比误差	81
表 6.2	模拟结束时刻模拟土体水量平衡表	81
表 6.3	实例 1 的土壤参数	83
表 6.4	Yanful 和 Choo 使用土壤水分特性曲线获得粗砂的相关参数	87
表 6.5	Yanful 和 Choo 使用土壤水分特性曲线获得细砂的相关参数	87
表 6.6	实例 2 中土体性质及参数	87
表 6.7	实例 2 两种计算模型得到的平均蒸发速率及累积蒸发量	89
表 6.8	算例中 5 种土的初始含水率	90
表 6.9	欧洲典型土的物理定义	90
表 6.10	欧洲地区常见 5 种典型土的水力参数	90
表 6.11	100cm 的研究土体上层土—粗土总含水量(cm)随时间变化表	91
表 6.12	100cm 的研究土体上层土—中等土总含水量(cm)随时间变化表	92
表 6.13	100cm 的研究土体上层土—中等细土总含水量(cm)随时间变化表	93
表 6.14	100cm 的研究土体上层土—细土总含水量(cm)随时间变化表	94
表 6.15	100cm 的研究土体上层土—极细土总含水量(cm)随时间变化表	95
表 7.1	不同水文土壤类别的饱和导水率的范围值	110
表 7.2	不同条件下二类径流量曲线值 CN_2	110
表 8.1	PAGV 实验农场基本数据	122
表 8.2	实例中不同时期 0~100cm 土层中含氮率实测值	123
表 8.3	实例中水位变化表	123
表 8.4	PAGV 实验农场的土壤水力参数值	124
表 8.5	1970—1975 年实验详细信息	130

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 我国水资源现状和节水农业

统计资料表明,地球上约有 14 亿 km^3 的水,其中 96.5% 为海水,其他分布在陆地、大气和生物体中的约为 2.53%,多储存于冰川、雪盖和 750m 深度以上的地下,而可取用的河水、湖水及浅层地下水等仅占 0.2% 左右,这其中还包括相当大一部分的苦咸水^[1,2]。

我国水资源总量为 2.8 万亿 m^3 ,居世界第六位,但人均水资源量仅为 2220 m^3 ,为世界人均的 1/4,被联合国列为 13 个贫水国之一^[1]。我国水资源现状主要表现为以下四个方面^[1]:第一,水资源十分紧缺,人均水资源量较低,且区域分布不均匀,特别是北方地区,耕地面积占全国的 59.2%,人口占全国的 44.3%,而水资源仅占全国的 14.7%;第二,水源污染严重,生态环境用水问题突出;第三,水资源利用效率很低,浪费严重;第四,降水和河川径流年际、年内变化大,水旱灾害频繁。

表 1.1 和表 1.2 分别给出了 2007 年我国各水资源一级区水资源量和用水量分布,表 1.3 和表 1.4 分别给出了 2008 年我国各水资源一级区水资源量和用水量分布。从表 1.1~表 1.4 可以看出,我国水资源总量从 2007 年的 25255.2 亿立方米上升到 2008 年的 27434.3 亿立方米,总用水量从 2007 年的 5818.7 亿立方米上升到 2008 年的 5909.9 亿立方米。其中,农业用水量从 2007 年的 3598.5 亿立方米上升到 2008 年的 3663.4 亿立方米,农业用水占总用水量的 60% 以上。

随着我国工业化和城市化进展的加速,大量农业用水通过不同途径转为非农业用途,农业用水比例呈逐年下降的趋势,但农业缺水形势依然严峻^[3]。我国农业用水短缺主要存在以下三个问题^[4]:第一,农业用水总量紧缺,供给增长有限;第二,农业用水浪费严重;第三,灌溉工程配套不全,老化失修严重。

我国农业用水浪费严重,首先表现在灌溉用水有效利用率低,仅为 30%~40%,而发达国家的灌溉用水有效利用率为 70%~80%^[3];其次,农业用水的效率

土壤水动力学模型及在SPAC系统建模中的应用

不高,目前,我国农作物水分生产率为 $0.87\text{kg}/\text{m}^3$,而发达国家农作物水分生产率为 $2\text{kg}/\text{m}^3$ ^[3];第三,自然降水利用率低,我国主要依靠降水的旱作地区 70% 分布在年降水 250~600mm 的北方地区,农田对自然降水的利用率只有 56%,而这中间 26% 的水分消耗于无效的田间蒸发^[4,5]。

表 1.1 2007 年中国各水资源一级区水资源量^[6] 单位:亿立方米

水资源一级区	降水总量	地表水资源量	地下水 资源量	地下与地表水 资源不重复量	水资源 总量
全国	57763.0	24242.5	7617.2	1012.7	25255.2
南方四区	38511.4	20200.1	5174.0	132.5	20332.5
北方六区	19251.6	4042.4	2443.2	880.2	4922.7
松花江	3604.7	751.6	389.4	176.1	927.7
辽河	1506.9	313.8	147.4	68.2	381.9
海河	1547.6	101.7	211.9	146.1	247.8
黄河	3848.6	542.1	384.0	113.3	655.3
淮河	3227.7	1086.2	484.2	279.6	1365.9
长江	18030.0	8699.3	2268.1	108.4	8807.8
其中:太湖	426.9	155.4	43.8	21.2	176.6
东南诸河	3257.9	1788.1	465.7	11.7	1799.8
珠江	8058.9	3973.5	1001.2	12.3	3985.9
西南诸河	9164.5	5739.1	1439.0	0.0	5739.1
西北诸河	5516.1	1247.0	826.2	96.9	1343.9

表 1.2 2007 年中国各水资源一级区用水量^[6] 单位:亿立方米

水资源一级区	生活用水	工业用水	农业用水	生态用水	总用水量
全国	710.4	1404.1	3598.5	105.7	5818.7
南方四区	457.4	1065.5	1689.8	53.5	3266.2
北方六区	253.0	338.6	1908.7	52.2	2552.5
松花江	31.4	78.7	288.2	2.4	400.7
辽河	31.2	29.7	140.4	3.1	204.3
海河	56.3	52.0	269.3	7.5	385.1
黄河	39.9	61.5	274.5	5.2	381.1
淮河	78.4	99.6	370.0	6.4	554.4
长江	245.8	728.6	932.7	32.4	1939.6
其中:太湖	44.0	233.0	93.2	20.5	390.7
东南诸河	47.1	118.4	163.9	8.7	338.0
珠江	154.6	210.8	502.4	12.1	879.9
西南诸河	9.9	7.7	90.8	0.3	108.7
西北诸河	15.8	17.1	566.4	27.6	626.9