

非饱和土壤水流运动及 溶质迁移

■ 王康 编著



科学出版社

www.sciencep.com

非饱和土壤水流运动及溶质迁移

王 康 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书总结了土壤水和溶质运动的基本理论及学科发展的最新进展,是作者主持和主要参加的国家自然科学基金等多项基础性研究项目成果的系统总结和提升。全书共8章,第1章阐述了研究土壤水和溶质迁移理论的意义;第2、3章论述了土壤物理、水动力性质及土壤水运动基本理论;第4、5章分别对蒸发、入渗条件下的土壤水分运动进行了描述;第6章剖析了土壤-植物-大气连续体理论;第7章论述了土壤溶质迁移及生长动力学模拟;第8章采用数值方法求解土壤水运动和溶质迁移方程。

本书可供水利水电工程、农业水土工程、土壤水环境等相关专业的工程技术人员和有关师生参考,也可作为土壤水动力学课程研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

非饱和土壤水流运动及溶质迁移/王康编著. —北京:科学出版社,2010.5
ISBN 978-7-03-027260-7

I. ①非… II. ①王… III. ①土壤水-研究②土壤溶液-移动-研究
IV. ①S152.7②S153.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第070836号

责任编辑:周 炜 王志欣 王国华 / 责任校对:林青梅
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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

*

2010年5月第一版 开本:B5(720×1000)
2010年5月第一次印刷 印张:17
印数:1—2 000 字数:330 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土壤是一种复杂的多孔介质,土壤水联系大气水和地下水,是水循环中的一个重要环节。降水、灌溉水入渗后形成土壤水,才能够被植物所吸收和利用。非饱和土壤是地表各种污染物进入地下水系统的必经通道。为了保持农业和环境的可持续发展,在保证一定农业产量的同时,维持与改善耕地、森林、草原系统中土壤和水等自然资源的质量,我们必须加深理解和认识土壤中各种物理、化学、生物特性及过程。土壤的物理、化学及生物过程是直接和土壤水的运动相关联的,例如,土壤水的运动是土壤营养物或(和)污染物运移及热运动的主要驱动力,土壤空气、土壤中微生物的活动、植物根系的发展也主要由土壤水的分布决定。水资源评价与预报也需要掌握水在土壤和地下水系统中的运动及分布方面的知识。

最初对非饱和土壤区域的研究主要集中在供水、农田作物根系土壤的最优化水分管理等方面。近些年,越来越多的人开始关注农业、工业及市政工程对地下环境质量的不良影响,相应地开展了更多的针对非饱和区物理、化学、生物过程的研究,开始关注各种化学物质对环境的破坏,例如,农田中使用的化肥和杀虫剂将不可避免地迁移到作物根系区域以下,污染地下水,而市政污水排放口和工业废水排放口排放的化学物质及核处理设施的辐射泄漏都使地下水安全受到严重威胁。

土壤中水流的运动受土壤介质性质、水流性质及流动和介质相互作用的综合影响。土壤中水流并不是独立的过程,在蒸发条件下,土壤中水由液态转化为气态,扩散到大气中,植物吸收土壤中的水分,也通过蒸腾作用进入大气,大气降水通过入渗作用进入土壤,形成土壤水,地下水能够补给土壤水,而土壤中的重力水补给地下水的同时,也可能将土壤中的污染物携带进入地下水系统。溶质溶解于土壤水中随水流运动,相比水流运动,其运动迁移特性更为复杂,相应地产生一系列环境问题。

本书对土壤水运动、土壤水循环、水土系统中溶质迁移理论和方法进行系统的总结与提升,是国家自然科学基金项目“土壤溶质非均匀迁移层析成像示踪及尺度特性研究”(50979076)、国家重点基础研究发展计划(973项目)“华北平原地下水演变机制与调控”第二课题“浅层含水层结构变化与地下水补给变化机理”(2010CB428802-4)及国家自然科学基金重点项目“灌溉排水条件下农田氮磷转化、运移规律与控制措施”(50609040)的研究成果。本书的出版得到武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室资助。

本书的编写得到了武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室杨金忠教

授,武汉大学水利水电学院沈荣开教授、张瑜芳教授,中山大学张仁铎教授,中国水利水电科学研究院水资源研究所周祖昊高级工程师的支持和帮助,他们提出了很多宝贵意见,对提高本书质量起到了极大的作用。武汉大学水利水电学院朱磊博士、周清硕士,中山大学盛丰博士参与了本书部分内容的编写,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足,恳请读者给予批评和指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 土壤水运动理论研究发展概况	1
1.2 土壤水运动理论研究对象及意义	4
1.2.1 土壤水运动与水资源	5
1.2.2 节水灌溉与非饱和土壤水运动	7
1.2.3 农田排水中的土壤水流动问题	8
1.2.4 土壤水运动与环境问题	9
1.2.5 土壤水非均匀流动	22
参考文献	24
第 2 章 土壤物理及水动力性质	29
2.1 土壤物理性质.....	29
2.1.1 土壤分类.....	29
2.1.2 土壤粒径分布	30
2.1.3 土壤物理常数	40
2.2 土壤孔隙水动力性质.....	42
2.2.1 Newton 黏性定律.....	42
2.2.2 Young-Laplace 方程	43
2.2.3 Hagen-Poiseuille 方程	45
2.3 土壤结构分形描述.....	46
2.3.1 分形定义.....	46
2.3.2 分形维数.....	47
2.3.3 分形几何与土壤结构	49
2.3.4 多重分形.....	50
2.3.5 土壤孔隙的分形特征	52
2.3.6 土壤的质量分形维数	53
2.3.7 土壤的孔隙分形维数	55
2.4 土壤水势.....	55
参考文献	57
第 3 章 土壤水运动基本理论	60

3.1	土壤水运动基本方程	60
3.1.1	土壤水运动基本方程推导	60
3.1.2	土壤水运动基本方程定解条件	63
3.2	土壤水动力参数	67
3.2.1	土壤水分特征曲线	67
3.2.2	非饱和水力传导度	85
3.2.3	扩散率和容水度	95
3.2.4	各向异性张量的处理	96
3.3	土壤水、热、汽耦合运动方程	97
3.3.1	非等温条件下的土壤水运动方程	97
3.3.2	非等温热流运动方程	98
3.3.3	土壤水、热、汽运动参数	100
3.4	考虑非均匀流动的连续性方程本构关系	103
3.4.1	活动性流场模型	103
3.4.2	活动性流场模型本构关系和流体分形特性关系	104
	参考文献	106
第4章	蒸发条件下的土壤水分运动	110
4.1	蒸发条件下土壤水分运动物理过程	110
4.1.1	形成干土前的表土蒸发	110
4.1.2	形成干土后的表土蒸发	112
4.2	潜水蒸发	114
4.2.1	潜水蒸发的主要影响因素	114
4.2.2	无作物生长条件下的潜水蒸发	116
4.2.3	作物生长条件下的潜水蒸发	122
	参考文献	129
第5章	入渗条件下的土壤水分运动	130
5.1	入渗条件下的土壤水分运动物理过程	130
5.1.1	土壤水的入渗过程	130
5.1.2	入渗边界概化	131
5.2	入渗条件下的土壤水分运动模拟	132
5.2.1	Green-Ampt 模型	132
5.2.2	土壤水入渗经验公式	135
5.2.3	非均匀入渗模拟	137
5.3	用解析法求解入渗条件下的土壤水分运动	139
5.4	结构性流动通道对于入渗的影响	142

参考文献	144
第 6 章 土壤-植物-大气连续体理论	146
6.1 土壤-植物-大气连续体基本概念	146
6.2 土壤-植物-大气连续体系统能量平衡理论与方法	147
6.2.1 系统概化	147
6.2.2 植物蒸腾量与土壤蒸发量计算	148
6.2.3 SPAC 系统参数	150
6.3 土壤-植物-大气连续体系统应用研究	155
6.3.1 麦秸覆盖条件下的 SPAC 系统	155
6.3.2 塑膜覆盖条件下的 SPAC 系统模型	157
6.4 植物根系吸水模拟	162
6.4.1 根系吸水模型	162
6.4.2 作物根系发育过程及其在生长季节内变化过程	165
6.4.3 根系吸水函数	165
6.4.4 数值计算中的根系吸水项处理	168
6.4.5 二维根系生长模型	170
6.5 植物生长及物质吸收模拟	172
6.5.1 冬小麦生长过程的动态	172
6.5.2 吸氮子模型	175
6.5.3 吸氮量在作物体内的分配模拟	175
6.5.4 植物生长模拟	176
6.6 水分生产率与灌溉指标关系	177
6.6.1 水分生产率	178
6.6.2 灌溉水利用效率	180
6.6.3 农田总供水效率	181
参考文献	181
第 7 章 土壤溶质迁移及生长动力学模拟	184
7.1 水动力弥散	184
7.1.1 水动力弥散机理	185
7.1.2 水动力弥散系数	187
7.2 水动力弥散方程	187
7.2.1 对流弥散方程推导	187
7.2.2 定解条件	189
7.2.3 溶质迁移方程参数	191
7.3 植物吸氮模型	191

7.3.1	对流扩散吸收模型	191
7.3.2	函数型吸收模型	192
7.4	土壤水分、氮素与植物生长动态模拟	198
7.4.1	胁迫条件下作物生长动力学原理	198
7.4.2	土壤水与植物生长关系动力学模拟	200
7.4.3	水分、氮素胁迫条件下作物生长动力学模拟	203
7.4.4	多因子影响植物产量模拟	205
7.5	不同土壤水分状况下的氮素环境影响效应	208
7.5.1	土壤氮素氮平衡计算	208
7.5.2	节水条件下土壤氮素损失及利用效率分析	211
7.5.3	土壤氮素损失与环境评价模型	214
	参考文献	217
第 8 章	土壤水运动和溶质迁移方程数值解	220
8.1	有限差分的基本概念	220
8.1.1	导数的有限差分近似	220
8.1.2	差分网格划分	221
8.2	有限差分法格式	223
8.2.1	显式差分格式	223
8.2.2	隐式差分格式	224
8.2.3	中心差分格式	225
8.3	有限元法求解土壤水运动及溶质迁移方程	227
8.3.1	Ritz 有限元法求解土壤水运动方程	227
8.3.2	Galerkin 有限元法求解土壤水运动和溶质迁移方程	229
8.4	饱和-非饱和条件下土壤水分运动数值模拟	241
8.4.1	渗灌条件下土壤水分运动的数学模拟	241
8.4.2	降雨入渗补给条件下土壤水分运动的数学模拟	246
	参考文献	250
附录 1	入渗问题的数值模型	251
附录 2	误差函数	260
附录 3	Einstein 求和约定	262

第 1 章 绪 论

1.1 土壤水运动理论研究发展概况

20 世纪 50 年代以前,土壤水运动问题广泛采用毛管理论进行研究,即把非饱和和土壤(包气带)中的水分运动看做是水分在均一或孔径不同的毛管中的运动。该理论在求解简单条件下入渗、蒸发和土壤释水问题时取得了较为满意的成果。由于计算方法简单、概念清楚,目前仍有一定实际意义。例如,用毛管理论推导的表层有薄水层时压力入渗的 Green-Ampt 模型,假定水在土壤入渗过程中,湿润锋面几乎是水平锋面,锋面上各点的吸力水头均相等,而自湿润锋面之后土壤的含水率均一(水力传导度为常数),在以上的假设基础上,根据 Darcy 定律和水量平衡原理,可推得任何时刻入渗锋面到达的位置和入渗总水量。

同样,根据毛管理论,采用 Darcy 定律,亦可推求地下水位保持不变、外界蒸发条件保持相对稳定时的潜水稳定蒸发计算式。Young 用毛管理论推导出垂直土柱重力释水过程中的给水度计算公式与 Bolt 考虑重力给水滞后作用时的给水度计算公式形式完全相同,但推导过程简单得多。毛管理论虽具有简单易懂、概念清楚的优点,但在分析、解决问题时,近似地认为土壤毛管水分到达前缘存在一个毛管负压水头值,而不考虑地下水面与毛管水前缘之间各点水分和压力的差异,因此这一理论一般只能解决一维问题,且主要用于流量和水量的计算,不能分析剖面上各点含水率和水头的变化。正是由于这个原因,20 世纪 50 年代以来,建立在土壤水分势能基础上的非饱和土壤水分运动理论得到了很大发展,为解决复杂的土壤水运动问题提供了有力的工具。

土壤水运动的势能理论将土壤水看做与其他物体一样,具有动能和势能。由于水在土壤中运移速度是十分缓慢的,所以,动能一般可以忽略不计。而势能则成为决定土壤水分运动状态的能量的主要形式。随着土壤水分运动研究的不断深入,温度变化对土壤水运动的影响越来越引起人们重视,在田间自然条件下,日夜温差很大,地表以下不同深度处温度的差异和变化影响土壤水分的转化与运移,用等温模型来模拟土壤水分运动常带来一定误差。由于土壤水运动主要取决于能量状况,一些学者根据能量平衡和热传导理论,提出了用水、热、汽耦合模型研究土壤水转化和运移。由于气温变化引起土壤水的相变,如在冻融条件下,液态水与固态水相互转化,在蒸发条件下使液态水转化为气态等。采用以土壤水压力水头和温

度作为未知函数的方程表示土壤水分与热量守恒过程,实践证明更符合实际。

由于农田土壤水分运动的研究涉及水利、农业、气象、土壤等多种学科,通过单一学科的研究来解决复杂的农田水分运动实际问题有一定困难,20世纪50~60年代,一些学者(Gardner, 1960; Cowan, 1965)认为土壤-植物-大气中水分运动状况是相互制约的,田间水分循环是由土壤、植物、大气构成的一个物理上统一的动态系统为基础的。Philip(1966)认为在这个系统中,各种过程是相互关联的,并为这个系统起名为“SPAC”系统(soil-plant-atmosphere continuum)。在这个系统里,水总是从能量高处向能量低处运动,且“水势”这个概念无论在土中或植物体和大气中,都应是普遍适用的。采用这样一个动态连续系统研究土壤水运动规律,对解决农田土壤水分的生产实际问题更为有效。

SPAC系统理论研究促进了有关边缘学科的发展和相互渗透,具有较大的理论意义和实用价值。目前,有关大气、土壤和植被的界面过程问题、尺度问题、土壤植被条件非均匀问题、连续介质内各部分非线性相互作用机理等问题都仍然有待于深入研究。

土壤的物理、化学及生物过程是直接与土壤水的运动相关联的。例如,土壤水的运动是土壤营养物质(和)污染物运移及热运动的主要驱动力;土壤水分分布状况对于土壤空气状况、微生物的活动、植物根系的发展都起到决定性的作用。水资源评价和预报也需要掌握水在土壤和地下水系统中的运动和分布方面的知识。土壤水动力参数影响与控制水及化学物质在土壤、地下水中的运移速度和分布是研究及描述水和化学物质在土壤和地下水中的运移的关键资料。如果没有足够可靠的土壤水动力参数的资料,无论是用什么方法或模型,对于水及溶质在土壤和地下水中的运动的预测都是值得怀疑的。然而,土壤水动力参数的测量是相当困难的、昂贵的及耗费时间的,并且土壤的空间变异性和参数随测量尺度的变化使得这一研究更具有挑战性。当运用模型去预报区域性的水及溶质在土壤和地下水中的运动时,这一问题就变得更尖锐了,因为大尺度的土壤水动力参数更难于取得,而这种尺度下的预报正是所需要的。土壤的空间变异性和各向异性是土壤的基本特性,不理解土壤的这种特性,就不可能成功地预报土壤中的物理、化学、生物过程。然而,对于具有空间变异性和各向异性的土壤水动力参数的研究还刚刚起步,许多问题还有待解决,特别是土壤水动力参数随测量尺度的变化及这种尺度效应对土壤中流体运动和分布的影响更是知之甚少。通常用一个在小尺度下测量的土壤水动力参数来定量分析大尺度范围内的流体运动,必然会导致错误的结论。因此,研究土壤水动力参数的尺度效应及空间变异性将为定量描述大尺度范围内的流体在非均质土壤中的运动、分布提供关键的信息和知识。因为土壤高度的变异性和各向异性,在这一介质中的化学、物理和生物过程都极其复杂。在一个大的区域里,观察局部详细过程的能力是非常有限的。近年来,相当一部分研究是将地质统计

分析与数值模拟结合起来,即运用随机模拟方法来直接考虑自然界的各向异性(Tompson and Gelhar, 1990)。这些随机方法的目的在于对大的时间和空间尺度中流体在土壤中运移的总体行为进行定量描述的同时,也考虑到小尺度变异性的影响。随机模拟已经用来研究大尺度范围内在饱和土壤中(Graham and McLaughlin, 1991)和非饱和土壤中(Hopmans et al., 1991; Russo and Bouton, 1992)的水流情况。应用随机模拟方法,如蒙特卡罗模拟(Yang et al., 1996a, 1996b, 1997),关键的一步就是在研究的范围内,确定所研究的单元(或体积)的运移参数和土壤性质的统计量,即均值、方差和空间变异结构。研究的范围和研究的单元(尺度)增大了,土壤性质及参数也会随不同的尺度而变化。为了有效地运用随机模拟来定量描述流体在各向异性土壤中的运动情况,必须在以下方面作进一步的研究:确立运动参数的空间变异性与尺度变化的关系,认识随尺度变化的土壤性质及参数对土壤中流体运移过程的影响。

在理论上,通过“仿射自身相似”的方法,分形数学将在不同尺度上的性质系统地联系起来,而且可以从一个尺度的测量值来预测另外尺度的值(Mandelbrot, 1987)。在土壤科学中,分形原理已经用来研究土壤的团粒结构(Perfect et al., 1992; Rasiyah et al., 1995)、土壤颗粒分布(Tyler and Wheatcraft, 1992)、土壤结构分布(Bartoli et al., 1991)、土壤水分参数(Tyler and Wheatcraft, 1990; Rieu and Sposito, 1991)、土壤饱和传导度(Rawls et al., 1993)及土壤水动力扩散系数(Wheatcraft and Tyler, 1988)。然而,分形数学还没有成功地用来解决土壤水动力参数与测量尺度之间的相依关系及这种相依关系对土壤中运移过程的影响等方面的问题,运用分形数学及其他方法来发展尺度提升(upscaling)技术,以便从小尺度的参数测量值来预测大尺度上的参数值,以及从小尺度上水和溶质运移的观测过程来预测大尺度上的水和溶质运移过程等,这些问题的研究也有待进一步的深入。

由于多孔介质高度的空间变异性和各向异性,非饱和带中水流及溶质运移的研究十分具有挑战性。这些挑战性表现在流体运动的尺度效应、各向异性和高度非线性。空间变异性和流体运动的非线性结合导致不均匀的流体运动途径,形成指状流(Flury and Flühler, 1995),其实,即使在均质土壤中,流体运动的非线性(或非稳定性)也会导致指状流的出现(Glass, 1993; Liu et al., 1998),并且指状流还在不同尺度下发生(Liu et al., 1998)。结果表明,根据实验室尺度和均质土壤的假定建立起来的、传统的连续性模型不能很好地预测非饱和的流体运移规律,特别是不能预测非饱和系统中快速的指状流,而快速指状流对环境问题的研究具有特别重要的意义。为了解决以上问题,世界各国的科学工作者把注意力集中到建立多孔介质非饱和带中水流及溶质运移的新一代理论和方法上面来。目前已提出了一些理论或模型,比较典型的有离散模型和混沌模型。完全不同于传统的连续

性模型,这一类模型能够捕捉到非饱和带中快速水流及溶质运移的特征。离散模型包括弥散限制聚合模型(Flury and Flühler, 1995)和侵蚀渗透模型(Glass, 1993)。弥散限制聚合模型已成功地用来描述小尺度的实验结果,但是这种模型的计算工作量非常大,这种模型还没有用来解决大尺度的实际问题,同时用这种模型来描述非饱和水流及溶质的运移,还缺乏完整的理论基础(Meakin and Tolman, 1989; Ewing and Berkowitz, 2001)。侵蚀渗透模型主要用来描述孔隙尺度的流体运动过程,也取得了一定成功,但是这种模型的物理意义不明确,同样还不能用来解决大尺度的实际问题。混沌模型是美国劳伦斯贝克利国家实验室的一位科学家提出来解决非饱和流问题的(Fabishenco, 1999),是一种对小波动很敏感模型系统。模型假定,在非饱和带中,水在小尺度范围内的运动是一种混沌过程,这同孔隙尺度的Haines跳跃现象(Haines, 1930)很吻合。然而,怎样运用混沌理论来预测非饱和带中流体的运动过程,还是一个远没解决的问题。实际应用中,我们对大尺度的问题更感兴趣,同时还需了解小尺度流体运移的混沌过程对大尺度流体运移过程的影响,这同样是一个还没解决的问题。

对于多孔介质的物理性质的分形研究而言,多孔介质中流体运动的分形性质的研究则刚刚起步。在一些非饱和带流体运移的研究中也观测到了流体运动的分形现象。例如,Peresson等(2001)在几个实验中观测到染色剂在土壤中的分形运动途径;Smith和Zhang(2001)在饱和的砂槽实验中,也观测到重油污染物的指状分布具有分形特征;Liu等(2003)报道了具有分形性质的裂隙介质中水分的空间分布。此外,弥散限制聚合模型和侵蚀渗透模型都可产生流体运移的分形样式(Feder, 1988; Stauffer and Aharony, 1991)。显然,建立起能够表征介质中流体运动分形性质的系统的理论或模型对于非均匀流动问题的探索十分必要。

1.2 土壤水运动理论研究对象及意义

土壤是一种由固、液、气三相组成的多孔介质。固相基质由大小、形状和排列不同的土粒组成,土粒的排列与组合决定了土壤孔隙特征、水及空气在土壤孔隙中的存在和传输形式。土壤孔隙全部被水充满,则土壤水分处于饱和状态,此时土壤水称为饱和土壤水。存在地面以下的饱和土壤水称为地下水。而当土壤孔隙未被水充满,土壤中水分处于非饱和状态时,称为非饱和土壤水,一般称为土壤水。

非饱和区域的一些现象,如渗透、土壤水分存储、蒸发、作物根系吸水、地下水补给、冲刷、侵蚀等,在水文学的许多方面都起着至关重要的作用。对非饱和土壤区域的研究最初主要集中在供水、农田作物根系土壤的最优化水分管理等方面。近些年,越来越多的人开始关注农业、工业及市政工程对地下环境质量的不利影响,逐渐开始关注非饱和区域流动问题。实际上,农田中使用的化肥和杀虫剂将不

可避免地迁移到作物根系层以下,污染地下水储备,而市政和工业排放口排放的化学物质及核处理设施的辐射泄漏都使地下环境安全受到严重威胁。

研究多孔介质的非饱和带(vadose zone)中水流及溶质运移是为了保持农业、自然资源(土壤和水等)和环境可持续发展必须进行的重要课题。非饱和土壤是保证农业产量,维持和改善森林、草原系统质量的基础,同时许多污染物经过非饱和土壤运移到达地下水而造成难于治理的污染,如地下水中化肥和农药的污染(US EPA,1993),还发现放射性元素(如锎-99、钷、镅)、重油和高分子化合物(如 TCE)经过土壤运移到 200m 以下的地下水中(DOE, 2001)。因此,非饱和土壤中水流及溶质(肥料或污染物)运移问题是国际土壤水文学界近年来最热门的研究课题之一。2002年,美国土壤科学协会创办了一个名为“非饱和带杂志”(Vadose Zone Journal)的科技刊物,专门出版非饱和和多孔介质和裂隙介质中水流及溶质运移方面的研究成果,发表了许多具有影响力的论文。2001年,美国能源部提出了一份“非饱和带科学和技术的国家路线图”草案。研究非饱和区水流运动的重要意义可见一斑。

1.2.1 土壤水运动与水资源

土壤水是联系地下水与地表水的纽带,在水资源形成、转化和消耗过程中,起着重要的作用。水文学中最为重要的组成内容——产汇流理论,在很大程度上取决于下垫面的土壤水分状况。

自然界的水一直处于不断地循环运动中,降水是水文循环的入流项,而地面径流和腾发量则是水文循环中的出流项。降水的一部分形成地面径流,而另一部分渗入地下,储蓄在非饱和带土壤中或补给地下水。在自然界水循环中降水、蒸发和径流是三个重要环节,而这三部分均与土壤水分状况有着密切关系,自然界中大气水、地表水、土壤水和地下水都处于不断运动和相互转化过程中,由于气象条件、水文地质条件、下垫面条件(如地形、地貌、河流等)不同,“四水”转化关系也不同。特别是随着水资源的开发利用,不同水体相互转化关系也发生了变化。研究地表水、土壤水和地下水相互转化的机理,降雨入渗补给规律,潜水蒸发,农田蒸发及地下水开发利用对水资源计算参数的影响等对于水资源开发与高效利用都具有重要的意义。

流域尺度天然状态下的水量平衡,是以降水为输入,以径流、蒸发为输出的一种自然水平衡形式。对于水文循环和水平衡要素的研究,已开展了大量的工作,例如,水文循环方面的 Horton 产流理论,蓄满产流模型, Sherman 的单位线概念及 20 世纪 80 年代以来提出的区域“三水”、“四水”乃至考虑植物水的“五水”转化理论等。在野外试验观测方面,新中国成立以来,我国在全国许多地方建立了排水试验站和水文水保试验站,如安徽的五道沟试验站,中国科学院禹城、栾城生态试验

站,黄河水利委员会的子洲、绥德、天水、西峰水土保持试验站等。对于水量平衡中具有关键意义的蒸发和入渗,早在 20 世纪 30 年代就开始了入渗率及入渗规律的定量研究,提出了大量用于模拟均值单元土体下渗的经验或半经验公式。在实际流域中,为了解决由下垫面和土壤特性的空间变化而导致的下渗能力的空间变异性,提出了垂向分层、面上分布式模型或集中参数模型的方法等。

对于区域蒸散发研究,研究成果更多:既有微观的反映下垫面特性的单点模型,也有宏观的区域蒸散发模型;既有基于 SPAC 相互作用的动力学模型,也有忽略蒸发动力学过程的系统模型,如 Dalton 蒸发理论、Penman 蒸发公式及各种改进模型。水面蒸发的计算方法较为成熟,归纳起来有器皿法、经验公式法、水量平衡法、能量平衡法、湍流扩散法、综合法等。陆面蒸发计算有平衡法、气候法和综合法等几种方法,计算模型很多。

由于下垫面和土壤特性的空间变异性,水循环具有显著的地域特点,尤其是人工干预下的水系统,不同的区域其水系统的平衡要素构成不同,要素的标定也差异较大,而且由于人工干预程度的变化,区域水平衡在一定意义上还表现出时域性,水平衡机制与平衡要素的空间和时间标定就成了区域水循环研究的重点。灌区耗水量计算,目前主要有三种方法,即灌区引退水法、河段水量平衡法和面积定额法,这三种方法都是针对河流的,考虑供水系统,仅仅从供水系统的水平衡考虑,而对实际的水资源耗用系统——灌区水系统采取了黑箱处理,没有考虑灌区水系统的平衡和各要素的变化,没有将供水系统和耗水系统相结合,从整个区域水平衡的角度来研究灌区引水的消耗过程,即使局部无资料地区采用面积定额法,也主要是考虑农作物灌溉耗水定额,而对区域内的其他耗水要素(如非耕地的土壤蒸发、天然及人工林草植被的蒸散发、其他生态耗水等)较少考虑。

灌溉系统中 60% 的水量损失都发生在输水过程中,渠系的渗漏消耗除了造成灌溉水的有效利用率降低之外,还会引起地下水位的上升,最终导致环境的破坏(次生盐碱化、沼泽化等),研究灌溉系统长期运行后灌区地下水动态变化趋势是灌区制定科学水管理措施的一项重要工作。当前我国许多大型灌区进行节水改造,其中一项主要措施是进行渠道的防渗处理,一般而言,渠道防渗可使灌溉水的有效利用率提高 20 个百分点,但渠系输水损失的减少将改变原来的平衡状态,形成新的平衡点,在新的平衡条件下,地下水埋深在什么程度,同样涉及灌区未来的环境状况,并且灌溉渠道采取防渗措施前后水文循环规律的变化对灌区水平衡要素的影响也是不可忽视的。

灌区区域水平衡机制是极其复杂的动态过程,例如,区域地下水资源与地下水开采和补给量、灌区农作物需水量、灌溉水量、蒸发和渗漏量、降水量及其他用水量都是随时间和空间变化的,具有很大的时间和空间变异性,并且这种时间和空间变异性随灌区面积的增大而增大,在传统的灌区水平衡及耗水量的计算中,常常对许

多变量与参数只能在整个灌区和在一个很长的时段内取一个经验值(或平均值)来进行计算,这就难于取得合理的计算结果,因而成为制约掌握灌区灌溉耗水规律、合理和有效地利用灌区水资源的瓶颈因素。土壤水作为联系大气水和地下水的中间环节,其在水资源合理开发利用中的意义不言而喻。

1.2.2 节水灌溉与非饱和土壤水运动

水从水源地到形成作物产量,中间经历了以下三个环节:①从水源地取水,经过各级输配水系统,到达田间;②通过各种灌水方法,将达到田间的水转化为能够被植物所直接吸收利用的土壤水;③土壤水被植物所吸收和利用,形成产量。各个环节中,每一个环节都有节水的潜力,并且与土壤水动力学有着密切的关系。

在第一个环节中,水在渠道中输送时,将发生损失,渠道的水量损失包括渠道水面蒸发损失、渠床渗漏损失、闸门漏水和渠道退水等。水面蒸发损失一般不超过渗漏损失水量的5%,在渠道流量计算中常忽略不计。闸门漏水和渠道退水取决于工程质量和用水管理水平,可以通过加强灌区管理工作予以限制。而渗漏损失水量则与渠床土壤性质、地下水埋藏深度和出流条件等因素密切相关。在灌溉工程规划设计工作中,常用经验公式或经验系数估算输水损失水量

$$\sigma = \frac{A}{100Q_n^m} \quad (1.2.1)$$

式中, σ 为每公里渠道输水损失系数; A 为渠床土壤透水系数; m 为渠床土壤透水指数; Q_n 为渠道净流量, m^3/s 。可以看出,土壤水力性质在估计渠道输水损失中起重要的作用。

在第二个环节中,灌溉水进入田间并湿润根区土壤。土壤的介质性质(土壤质地、结构性质)都在很大程度上影响灌水质量。了解土壤介质性质、介质和水流运动之间的相互作用对于入渗规律的影响,从机理上探讨灌水效率对于灌水方式的选择、节水灌溉制度的制定及提高水分生产效率具有指导意义。以波涌灌溉为例,波涌灌溉间歇地向灌水沟放水,放水几分钟或几十分钟,然后停水几分钟或几十分钟,重复多次,直到灌水沟的首尾都得到均匀的灌溉为止。图1.2.1比较了波涌灌溉和连续灌水情况下的入渗模式,可以看出,在给定的水量条件下,波涌灌溉水流的进程距离比连续放水多2~3倍。波涌灌溉条件下地面水流特征、土壤表层致密层的形成和发展,以及对于入渗特性的影响等都与土壤水动力学有密切的关系,而相关研究对于波涌节水灌溉技术的发展都是必需的。

施肥一般随着灌水同时进行,化肥在水流的驱动下发生迁移,然而,在水动力弥散及土壤吸附等物理和化学因素的作用下,入渗后化肥在土壤中运动迁移状况较水流运动更为复杂。显然,进一步考虑灌水条件下溶质运移、分布状况对于灌水效率的评价将更为全面。

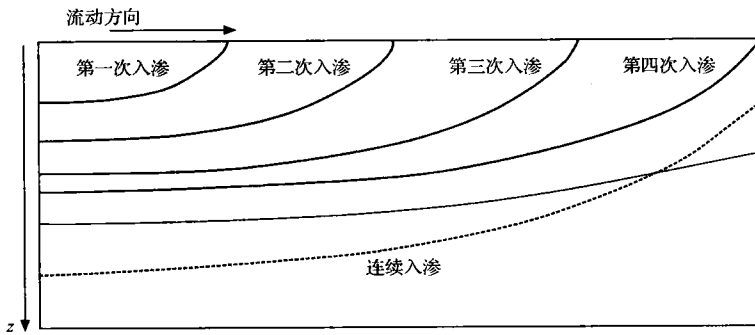


图 1.2.1 波涌灌入渗模式和连续入渗模式的比较

第三个环节中,在有作物覆盖的农田中,植物的蒸腾是田间水分循环的重要组成部分。由于水势梯度的存在,土壤中水分通过根系吸收进入植物体,除部分消耗于植物生长和代谢作用外,大部分又由植物体通过叶面向大气扩散。因此,在研究有作物生长条件下农田水分运动时,不仅需要分析农田水分状况和水分在土壤中的运动,还需要考虑土壤水分向根系的运动、植物体中液态水分的运动及自植物叶面和土层向大气的水汽扩散运动等。田间水分运动是在水势梯度的作用下产生的,各环节之间是相互影响和相互制约的,为了完整地解决农田水分运动问题,必须将土壤-植物-大气看做一个连续体统一考虑。水分经由土壤到达植物根系,被根系吸收,通过细胞传输,进入植物茎,由植物木质部分到达叶片,再由叶片气孔扩散到静空气层,最后参与大气的湍流变换,形成一个统一的、动态的、互相反馈的连续系统(SPAC 系统)。在这个系统中,作物根系、冠层与土壤、大气的关系受各种物理、化学和生物化学机制的控制。粮食生产的场所是 SPAC 系统,其中的物质交换,包括水量交换、能量交换、气体交换和养分吸收及干物质累积是粮食生产的基本过程,因此了解 SPAC 系统中物质传输动态规律就显得十分重要。

1.2.3 农田排水中的土壤水流动问题

农田排水是调控农田水分状况的主要措施之一。农田排水不良的情况下会使农田水分过多,或土壤中盐随水分运移至表层,引起土壤盐碱化等不良后果。20 世纪 60 年代初,引黄灌区由于片面强调“以蓄为主”,打乱了原有排水系统,大量引水灌溉,又由于管理不善等原因,产生了大面积土壤次生盐碱化问题,严重影响了农业生产发展。为了研究防治土壤次生盐碱化问题,北京水利水电科学研究院、中国农业科学院农田灌溉研究所、中国科学院土壤研究所、武汉水利电力大学等单位进行了大量室内、外土壤水分运动试验,探索在不同地下水埋深条件下,土壤水