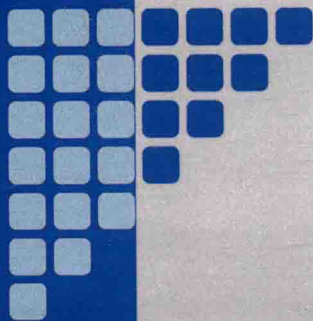


西北旱区生态水利学术著作丛书

土壤气体传输与更新

王全九 樊 军 王卫华 王翔翔 等 著



生态水利



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

土壤气体传输与更新

王全九 樊 军 王卫华 王翔翔 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

土壤水、热、气不仅是作物生长必要的基本要素,而且直接影响水肥高效利用和土地质量。本书较为系统地介绍了土壤水、热、气传输基本特征和数学模型,土壤水、热、气传输动力参数主要影响因素及其影响程度,土壤水分特征曲线和导水率、土壤热特性和导气率确定方法,土壤水力参数、热特性和导气率空间变异性,以及土壤呼吸和温室气体排放特征等方面研究成果。全书共5章,包括土壤水、热、气传输基本特征,土壤水、热、气传输动力参数影响因素,土壤水、热、气传输动力参数确定方法,土壤水、热、气传输动力参数空间分布特征和土壤温室气体排放等内容。

本书可作为农业水利工程、水文与水资源、土地整治与修复、农业生态环境等领域的教学、科研和管理人员的参考书,也可以作为相关专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

土壤气体传输与更新 / 王全九等著. —北京: 科学出版社, 2017.9
(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-054511-4

I. ①土… II. ①王… III. ①土壤空气-传输-研究②土壤空气-更新-研究 IV. ①S152.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 230847 号

责任编辑: 祝 洁 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年9月第一次印刷 印张: 12 3/8

字数: 243 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴铨 柴军瑞 黄 强

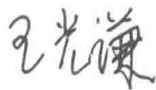
总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖泊为主的淡水生态系统。这个占据着少于 1% 地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的 0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此促使生态水利工程的观念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，“西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）”是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决了若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是重点实验室对其研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士



2016 年 9 月

总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”国家战略桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016 年 9 月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20 世纪 80 年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及旱区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士

2016 年 9 月

前 言

土壤是由固相、液相和气相三相组成的多孔介质。固相部分即土壤颗粒，由矿物颗粒和有机质组成，形成土体的骨架。土壤颗粒间存在着大小不同、形状各异的孔隙，液体和气体存在于孔隙中。水及其溶解物为土壤的液相，氧气及其他一些气体为土壤的气相。气体与水分作为作物生长必需的营养元素，共同存在于土壤孔隙中。土壤水分存在的状态、位置和数量直接影响气体存在的状态和数量。水分是植物生长过程中必不可少的元素，是土壤养分传输的载体，也是一切生化反应的介质，因此土壤水分运动不仅涉及水分有效性，而且对土壤中各种物质的传输与转化起到控制性作用，直接影响土壤气体类型和传输特征。

根据经典热力学基本原理，气体压力和浓度与温度密切相关。土壤热特性不仅影响土壤温度，而且直接影响各种物质迁移转化的数量与程度，植物生长及其对水肥吸收程度，同时也影响土壤水、气传输特征及其分布，进而影响土壤中各种物理、化学过程的发生及其程度。土壤热传递不同于水分和气体传输，热能可以借助土壤孔隙中的气体或水分进行传递，也可以直接通过固体颗粒进行传递，因此热传递相对于水、气传输更为复杂。通常用热容量、热扩散率和导热率等参数描述热传递动力学特征。土壤水、热、气的含量以及它们存在的状态和传输特征不仅相互影响，而且决定着土地生产能力、土壤与环境间物质和能量交换的能力，成为土壤、水利、农业和生态环境等学科研究的热点问题。

土壤中的气体不仅提供作物生长需要的氧气，而且直接影响植物对土壤养分的吸收、种子的萌发、根系发育、开花结果等过程。土壤氧气含量直接决定土壤肥力状况以及对植物供给氧气的的能力。土壤中的氧气主要来源于大气，土壤与大气之间气体交换能力决定土壤氧气含量和空气更新速率。同时由于土壤各种物理、化学和生物作用，产生大量的二氧化碳等气体，这些气体通过气体交换进入大气，农田排放的二氧化碳等气体是温室气体组成部分之一，因此研究土壤气体传输特征，不仅涉及土壤氧气更新，也涉及土壤向大气排放温室气体问题，受到世界各国研究者的广泛关注。

随着对土壤与环境间相互作用以及精确调节农田土壤水、热、气状况问题的日益重视，利用数值模型研究土壤水、热、气传输过程及其对作物生长和生态环境的影响程度已逐步变成现实。但模型模拟的准确性很大程度上取决于土壤水、热、气传输动力学参数的准确性，因此发展简单可行的土壤水、热、气动力学参

数的确定方法已经成为世界各国学者研究的重点。国内外大量研究人员相继提出了确定这些参数的不同方法,概括起来可以分成两大类,即直接测定方法和间接推求方法。两种方法各具优势,在生产实际中应用广泛。但由于土壤水、热、气传输过程较复杂,不仅与土壤质地、结构、含水率、容重及土壤有机质含量等土壤基本物理化学特性有关,而且受到气候条件、土地利用方式、生长植物群落的种类、田间耕作与管理方式等因素的强烈影响,有些方法难以准确估计田间土壤水、热、气传输动力学特征参数。同时,现有方法大都利用不同原理与设备分别测定土壤水、热、气传输动力学特征参数,不仅费时费力,而且容易引起样本误差,特别是对大范围土壤水、热、气传输特征的研究,直接测定方法的应用受到极大的挑战。如果明确土壤水、热、气传输动力学特征及其参数间的关系,提出三者动力学参数间相互转化的方法,发展统一方法确定土壤水、热、气动力学参数,不仅可以简化参数确定过程,而且可以充分利用已有研究成果,省时省力,也会推动相关理论的发展。此外,土壤水、热、气传输存在严重空间变异性,三者空间变异特征间存在何种关系,如何准确获取一定范围内土壤水、热、气的平均传输动力学参数,仍缺乏系统研究。因此,只有进一步研究土壤水、热、气传输综合特征与各因素间的关系,阐明土壤水、热、气动力学参数空间变异特征间的关系,发展简单易行的确定土壤水、热、气传输动力学参数方法,才能实现利用动力学模型分析不同尺度下土壤水、热、气传输动力过程,为农业、水利和生态环境行业的实际生产提供有效的方法。

在国家自然科学基金及中国科学院“百人计划”择优项目等课题资助下,多年来课题组成员采取试验研究与理论分析、模型模拟相结合方法,围绕土壤水、热、气传输动力学特征开展大量研究,分析各种因素对土壤水、热、气传输动力学特征的影响,借助土壤物质传输的毛管理论、分形理论、空间变异理论,分析水、热、气传输综合动力学特性,探索建立统一描述土壤水、热、气传输动力学特征及其动力学参数的方法,提出确定土壤水、热、气传输动力学参数简单方法,为利用动力学模型研究土壤水、热、气传输动力学特征提供理论和方法。全书共5章,前言由王全九撰写;第1章由王全九撰写;第2章由王全九、王卫华、王铎、武向博撰写;第3章由王全九、王卫华、辛琛、王琳芳、李婷、王铎、武向博撰写;第4章由王全九、王卫华、王铎、武向博撰写;第5章由樊军、王翔翔撰写。全书由王全九、王卫华和单鱼洋进行整理统稿,并由王全九最后审定。

本书系统总结了课题组有关土壤水、热、气传输动力特征及其动力参数确定方法以及土壤温室气体排放等方面研究成果。在研究过程中得到众多单位、领导、专家和同仁的大力指导、支持和帮助,在此表示最真诚的感谢。衷心感谢黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室、中国科学院水利部水土保持研究所所长武农业生态试验站和神木生态试验站、中国科学院临泽内陆河流域研究站、新疆塔

里木河流域巴音郭楞管理局灌溉试验站、新疆水利水电科学研究院等单位提供宝贵试验场地。感谢试验站各位同仁在试验过程中给予的大力帮助。真诚感谢中国科学院水利部水土保持研究所邵明安研究员和中国农业大学任图生教授给予的大力支持和指导。感谢土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室各位同仁在样品分析与测定和试验过程中给予的大力支持和帮助。衷心感谢参加项目研究的各位研究生和工作人员，正是他们艰辛努力的工作将土壤水、热、气传输特征研究有机结合，明确了土壤水、热、气耦合传输动力特征，并提出了简单易行的传输动力参数确定方法，为土壤水、热、气传输综合模拟和农田水、热、气综合调控提供理论和方法。

由于作者水平有限，对相关问题的研究有待进一步深化和完善，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2017年2月

目 录

序一

序二

序三

前言

第 1 章 土壤水、热、气传输基本特征	1
1.1 土壤水分运动基本特征	1
1.1.1 达西定理	1
1.1.2 土壤水分运动基本方程	2
1.1.3 土壤水力参数	3
1.2 土壤热传递基本特征	5
1.2.1 土壤热传递基本方程	6
1.2.2 土壤热特性	7
1.3 土壤气体传输基本特征	10
1.3.1 气体对流	11
1.3.2 土壤气体扩散	11
1.3.3 气体运动方程	12
1.3.4 土壤气体传输动力参数	13
参考文献	15
第 2 章 土壤水、热、气传输动力参数影响因素	17
2.1 土壤水力参数主要影响因素	17
2.1.1 土壤质地和容重对水分特征曲线的影响	17
2.1.2 土壤结构和生物结皮对土壤水力参数的影响	19
2.2 土壤热特性影响因素	23
2.2.1 土壤质地对热特性的影响	23
2.2.2 土壤容重对热特性的影响	25
2.2.3 土壤盐分含量对热特性的影响	27

2.2.4 土壤结构对土壤热特性的影响	28
2.3 土壤导气率的影响因素	29
2.3.1 土壤含水量和质地对导气率的影响	30
2.3.2 土壤结构对导气率的影响	31
2.3.3 碎石含量和粒径对导气率的影响	32
2.3.4 温度对导气率的影响	34
2.3.5 覆膜滴灌条件下改良剂对导气率的影响	37
2.3.6 生物结皮对导气率的影响	42
2.3.7 根系密度对导气率的影响	44
2.3.8 植被类型对导气率的影响	45
参考文献	45
第3章 土壤水、热、气传输动力参数确定方法	47
3.1 土壤水力参数确定方法	47
3.1.1 利用水平一维吸渗法确定土壤水力参数	47
3.1.2 利用 Mini 盘式吸渗仪测定田间土壤水力参数	52
3.1.3 土壤水分特征曲线间接推求方法	56
3.2 土壤热特性确定方法	65
3.2.1 利用温度剖面确定土壤热扩散率	65
3.2.2 确定土壤热扩散率的边界层方法	68
3.2.3 确定土壤热性质的热脉冲方法	80
3.2.4 利用土壤基本物理特征确定土壤导热率	89
3.3 土壤导气率确定方法	101
3.3.1 导气率与导水率的关系	102
3.3.2 导气率与土壤基本物理特征的关系	104
参考文献	108
第4章 土壤水、热、气传输动力参数空间分布特征	110
4.1 试验方法	110
4.1.1 研究区域概况	110
4.1.2 测试方法	112
4.1.3 测点布设	113
4.2 空间变异型分析方法	115
4.2.1 经典统计学	115
4.2.2 半方差函数	115

4.2.3	自相关系数	117
4.2.4	交互相关系数	117
4.2.5	MoranI 指数	118
4.2.6	时间稳定性分析	118
4.2.7	合理采样数的确定	119
4.2.8	克里格插值法	119
4.3	土壤导气率时间变异特性	120
4.3.1	土壤导气率月际变化特征	120
4.3.2	土壤导气率年际变化特征	122
4.4	田块尺度土壤水、热、气传输动力参数空间变异性	124
4.4.1	土壤理化性质空间变异及分布格局	124
4.4.2	土壤饱和和导水率空间分布特征	127
4.4.3	土壤热特性空间分布特征	130
4.5	灌区尺度土壤水、热、气传输动力参数空间变异性	133
4.5.1	土壤物理基本参数及导气率统计分析	134
4.5.2	土壤物理基本参数与导气率的空间变异及其分布格局	135
4.5.3	克里格插值结果分析	136
4.5.4	土壤导气率分布与主要影响因素之间相关性分析	138
4.5.5	土壤饱和和导水率空间分布特征	140
4.5.6	土壤热特性参数空间分布特征	142
4.6	陕西省区域尺度土壤水、热、气传输动力参数空间分布特征	145
4.6.1	土壤基本物理性质及空间分布格局	146
4.6.2	主控因子分析	149
	参考文献	153
第 5 章	土壤温室气体排放	155
5.1	土壤呼吸特征	155
5.1.1	土壤呼吸测定方法	156
5.1.2	土壤呼吸影响因素	156
5.1.3	土壤呼吸定量分析	164
5.2	覆盖条件下春玉米地温室气体排放特征	166
5.2.1	气体样品采集与测定	167
5.2.2	覆盖措施对 5~20cm 土层温度和水分含量的影响	168
5.2.3	不覆膜条件下土壤剖面温室气体浓度变化特征	169
5.2.4	覆盖措施对土壤温室气体排放量的影响	175
	参考文献	179

第1章 土壤水、热、气传输基本特征

土壤中水、热、气是作物生长必需的基本要素，适宜的水、热、气状况是保证作物正常生长的基础，也是农田管理的主要目标。由于土壤是一个开放体系，其水、热、气含量和状态不断发生变化。这种变化不仅与土壤本身特征有关，而且受到农田管理模式和气候条件等影响。虽然土壤中水、热、气是三种不同性质和功能的物质，其运移通道和物理过程有所不同，但其运移与转化同样服从于热力学第二定律、质量守恒定律和能量守恒定律。

1.1 土壤水分运动基本特征

土壤水分运动服从质量守恒定律和能量守恒定律，并从能量高的位置向能量低的位置运动。目前普遍采用达西定律和质量守恒定律描述土壤水分运动过程。

1.1.1 达西定理

达西根据饱和沙柱渗透试验结果，认为水分通量与水力梯度成正比，提出了著名的达西定理，即

$$q = k_s \frac{\Delta h}{l} \quad (1.1)$$

式中， q 是土壤水分通量 (cm/min)； Δh 是土柱两端势能之差 (cm)； l 是土柱长度 (cm)； k_s 是饱和土壤导水率 (cm/min)。

达西定理表明饱和土壤水分通量是能量梯度和土壤导水能力间函数，这就说明土壤水分运动不仅取决于能量梯度，而且决定于土壤自身导水能力。

由于自然界土壤大都处于非饱和状态，为了研究非饱和土壤水分运动过程，将饱和达西定理引入非饱和土壤水分运动中，非饱和达西定理表示为

$$q = -k(\theta) \nabla \varphi \quad (1.2)$$

式中， $k(\theta)$ 是非饱和土壤导水率 (cm/min)； θ 是土壤体积含水量 (cm³/cm³)； φ 是土壤水势 (cm)。

从式 (1.1) 和式 (1.2) 可以看出，饱和达西定理与非饱和达西定理形式上存在差异，但反映土壤水分运动本质是一致的。这种差异主要是由于饱和土壤与非饱和土壤中水分运动所通过的通道及其具有的不同能量引起的，表现为饱和土壤的孔隙全部被水分充满，而非饱和土壤孔隙部分被水分填充，导水孔隙存在明显

差异；饱和土壤基质势为零，仅具有重力势、压力势和溶质势，而非饱和土壤具有基质势、重力势、压力势和溶质势；饱和土壤导水率为常数，而非饱和土壤导水率并非常数，是含水量（或基质势）的函数。

1.1.2 土壤水分运动基本方程

达西定理可以描述任意时刻土壤水分通量，而无法表示不同时刻水分连续变化过程。质量守恒定律可以反映不同时刻水分变化过程。因此，将达西定理和质量守恒定律联合，可描述土壤水分连续变化过程，土壤水分运动的基本方程可表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(k(\varphi)\nabla\varphi) \quad (1.3)$$

对于水平一维土壤水分运动，土壤水分运动基本方程可表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (1.4)$$

式中， x 是水平坐标（cm）； t 是时间（min）； $k(\varphi)$ 为非饱和土壤导水率（cm/min）。

对于垂直一维土壤水分运动，土壤水分运动的基本方程可表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (1.5)$$

式中， z 为垂直坐标（cm），向上为正。

根据研究对象不同，可将土壤水分运动基本方程转换为不同形式。如果着重考虑土壤基质势变化特征，等式左端可以表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = C(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1.6)$$

式中， $C(\varphi)$ 为比水容量（ cm^{-1} ）。

水平和垂直一维土壤水分运动基本方程分别转化为

$$C(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (1.7)$$

$$C(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\varphi)}{\partial z} \quad (1.8)$$

如果重点研究土壤含水量变化，式（1.7）和式（1.8）可以变为含水量的函数。为此，引入了土壤水分扩散率概念，土壤水分扩散率表示为

$$D(\theta) = \frac{k(\theta)}{C(\theta)} = \frac{k(\theta)}{d\theta/d\varphi} \quad (1.9)$$

式中， $D(\theta)$ 是土壤水分扩散率（ cm^2/min ）。

水平和垂直一维水分运动基本方程表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (1.11)$$

1.1.3 土壤水力参数

由土壤水分运动基本方程可以看出, 表征土壤水分运动特征的动力参数包括土壤水分特征曲线、非饱和导水率和土壤水分扩散率。只有获得这些参数, 才能通过求解土壤水分运动方程, 获得水分运动和含水量分布信息。因此, 利用土壤水分运动基本方程分析土壤水分运动特征, 土壤水力参数是不可缺少的参数。

1. 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是指土壤基质势与土壤含水量间的关系, 反映了土壤水分静态能量特征。由于土壤水基质势一般为负值, 为了应用方便, 将负的基质势称为土壤水吸力。因此, 土壤水分特征曲线也表示了土壤水吸力与含水量之间函数关系。

土壤水分特征曲线受到众多因素的影响, 主要包括土壤质地、容重、结构、温度、有机质含量和湿润方式等。一般而言, 土壤黏粒含量越高, 同一土壤含水量对应的吸力越高。土壤质地不仅影响土壤含水量所对应的土壤水吸力大小, 而且影响土壤水分特征曲线形状。对于砂质土壤而言, 一般在高吸力区曲线比较陡, 而在低吸力区土壤水分特征曲线比较平缓。随着容重增加, 同一吸力相应土壤含水量升高, 土壤饱和含水量减少, 土壤水分特征曲线变陡。随着土壤有机质含量增加, 土壤团粒结构增加, 高含水量段变缓。土壤温度通过改变土壤水分黏滞性和表面张力而影响土壤水分特征曲线。一般随着温度升高, 基质势增加。土壤水分特征曲线与土壤水分变化过程也存在密切关系。在其他条件一致的情况下, 脱湿和吸湿过程中测定的土壤水分特征曲线也存在明显差别。在同样含水量条件下, 脱湿过程的吸力比吸湿过程要大, 将这一现象定义为滞后效应。根据土壤滞后效应将土壤水分特征曲线分为脱湿曲线和吸湿曲线。

土壤水吸力是由土壤颗粒表面张力和毛管作用引起的, 目前仍未获得土壤水吸力与土壤含水量间的理论关系, 常用经验公式进行描述。常用公式有

$$h = a\theta^b \quad (1.12)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h} \right)^N \quad (1.13)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1.14)$$

式(1.12)中, a 、 b 为参数。式(1.13)是 Brooks-Corey^[1]提出的土壤水分特征曲线表达式, 其中 θ_s 是饱和土壤含水量 (cm^3/cm^3), θ_r 是滞留土壤含水量 (cm^3/cm^3), h_a 是进气吸力 (cm), h 为土壤吸力 (cm), N 为形状系数, 其值为 $0 \sim 1$, 并随着质地由粗变细而增加。当土壤处于饱和状态时, 土壤吸力等于进气吸力, 因此该公式描述了脱湿过程的土壤水分特征曲线。同时进气吸力不是实测的进气吸力, 是通过曲线拟合所得到的表观进气吸力。

式(1.14)是 van Genuchten^[2]提出的描述土壤水分特征曲线公式, 式中 α 是与进气吸力相关的参数 (cm^{-1}), n 和 m 是形状系数, $m=1-1/n$ 。当土壤含水量处于饱和状态时, 土壤水吸力为零, 因此该公式描述了土壤吸湿过程的土壤水分特征曲线。一般测定的土壤水分特征曲线, 特别是脱水曲线存在两个拐点, 而 Brooks-Corey 模型仅有一个拐点, 因此在实际应用中, 如果关注土壤水分对作物有效性, 在拟合土壤水分特征曲线时, 应该满足低吸力段; 如果分析微观孔隙对水分运动影响时, 应该满足高吸力段。van Genuchten 模型存在两个拐点, 可以反映大部分土壤水分特征曲线变化特点, 在实际中得到了广泛应用。在式(1.13)和式(1.14)中都包含有滞留土壤含水量, 从严格意义上讲, 滞留土壤含水量是风干土壤含水量, 但实际曲线拟合时, 根据曲线变化特征和研究需要确定。无论如何确定滞留土壤含水量, 一般随着滞留土壤含水量增加, 曲线形状系数变大, 也就是曲线反映了低吸力段土壤吸力与土壤水分含量间关系。Brooks-Corey 模型形式简单, 便于发展为简单描述土壤水分运动的数学公式, 也便于与其他物质运移特征间建立关系, 而 van Genuchten 模型形式复杂, 但能描述大部分土壤水分特征曲线, 两个模型各具特点。为了便于理解两个公式及参数间关系, 将式(1.14)近似简化。忽略式(1.14)右边括号分母中的 1, 可将式(1.14)变为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{(\alpha h)^n} \right]^m \quad (1.15)$$

式中, $\alpha = 1/h_a$, $mn=N$, 因此 van Genuchten 模型与 Brooks-Corey 模式间存在一定的联系。当然这种转化存在一定误差, 参数转化所引起相对误差在 30%左右^[3]。

2. 非饱和土壤导水率

非饱和土壤导水率是指单位势梯度作用下, 单位时间通过土壤单位横截面积的水量。它是土壤含水量(或基质势)的函数, 随着土壤含水量的增加而增加。因此, 非饱和土壤导水率是反映土壤水分动态特征的参数。常用的非饱和土壤导水率表达式有

$$k = k_s \theta^b \quad (1.16)$$

$$k = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^A \quad (1.17)$$