



水 科 学 前 沿 丛 书

土壤入渗测量方法

雷廷武 毛丽丽 张 婧 刘 汗 赵世伟 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金

水科学前沿丛书

土壤入渗测量方法

雷廷武 毛丽丽 张 婧 刘 汗 赵世伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍不同测量方法的基础上,详细评价优先流对传统环式入渗仪测量精度的影响,进而提出产流积水、产流排水、点源和线源等测量入渗的新方法;阐述各方法的测量原理、过程、计算方法、精度计算方法等;介绍点源和线源自动测量系统、操作使用方法、数据计算与存储;介绍新的测量方法的应用示例:研究降雨强度和初始含水量对土壤入渗的影响,耕层-犁底层入渗连续测量,不同土地利用、季节交替、坡向、坡位和土壤容重对入渗的影响,水质对盐碱土入渗的影响,矿区排土场入渗特征效应等。

本书可供农田灌溉、土壤物理、水土保持、流域产汇流和水环境保护等领域的科技人员使用,也可作为上述专业高年级本科生、研究生和相关教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土壤入渗测量方法/雷廷武等著. —北京:科学出版社, 2017.3
ISBN 978-7-03-052008-1

I. ①土… II. ①雷… III. ①土壤含水量-下渗-测量方法 IV. ①P33
②S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 044494 号

责任编辑:万 峰 朱海燕 / 责任校对:张小霞
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 270 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		茆智	孟伟	王超	王浩
		王光谦	薛禹群	张建云	张勇传
主	编	刘昌明			
常务副主编		徐宗学			
编	委	蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化，实现人与自然和谐相处的压力与日俱增，水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响，与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国，水科学研究一直是基础 Research 计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力，我国在水科学研究方面取得了重大进展，并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展，迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此，科学出版社与北京师范大学共同发起，联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队，策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题，对相关研究成果加以凝练与集成，力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说，工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果，对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平，经得起同行和时间检验，组织了国内多位知名专家组成丛书编委会，他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物，对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信，通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作，会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世，为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用，为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。

刘昌明

2012年9月

前 言

土壤入渗是水分进入土壤的过程,是陆地水循环的重要部分。土壤入渗是联系大气降水、地表水、土壤水与地下水的纽带,它决定了降水在地表、土壤和地下的分配,从而影响地球表面的生物生存过程及其生存环境质量。土壤入渗不仅影响陆地水文过程、生态水文及水土流失,同时也影响化肥、农药等污染物随水分的迁移过程,从而导致面源污染和水环境的恶化。土壤入渗过程是控制自然界水循环的关键环节。此外,土壤水分入渗能力的大小还影响灌溉系统的设计和运行管理、作物水分利用及农田灌溉管理等。因此,研究土壤入渗性能,准确测定土壤入渗率,对调控地表径流、防止土壤侵蚀及减少面源污染等具有重要的理论与实际意义。准确测量土壤入渗性能是定量研究入渗的基础。

本书综合分析并设计相应的试验方法定量评价传统环式入渗仪测量效果,并通过实验验证优先流是影响传统环式入渗仪测量结果精度的主要原因之一。针对传统土壤入渗性能测量方法难以准确获取土壤入渗率的难点,作者结合多年研究成果,提出一套完整的土壤入渗性能测量方法。根据水量平衡原理,利用土壤入渗性能随时间变化过程与地表水流推进过程之间关系,给出降雨与无降雨条件下土壤入渗性能测量装置、测量过程、计算方法;介绍试验测量装置和自动测量系统,及其在室内和野外试验中的应用和取得的一些测量结果。

本书系统阐述土壤入渗性能测量方法的最新研究成果,可为今后相关研究提供基础和借鉴,推进土壤入渗性能相关研究深入开展。全书包括 11 章。第 1 章讨论土壤入渗测量方法目前进展和存在问题;第 2 章和第 3 章,分别综合分析环式入渗仪测量效果,从理论和试验上分析环式入渗仪测量误差产生的原因。第 4 章和第 5 章分别系统阐述产流积水和产流排水方法的测量原理和试验验证方法,并应用该测量方法研究降雨强度和初始含水量对土壤入渗性能影响、不同植被及耕作对土壤入渗性能的影响(杨永辉)。第 6 章至第 8 章分别介绍点源和线源测量系统,近似解析模型和平均计算模型,并采用试验对模型进行验证。第 9 章给出耕层和犁底层土壤入渗连续测量方法的计算原理和装置(孙蓓)。第 10 章全面介绍点源和线源自动测量系统的构成、操作使用方法、数据计算与存储。第 11 章系统介绍点源和线源自动测量的野外应用(武高林,杨政,刘芳芳,胡雅琪)。

本书是合作者们多年的研究成果。研究工作得到中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室、国家自然科学基金重点项目“黄土区多尺度小流域土壤水蚀动态过程模拟研究”(项目编号:40635027)、“高海拔寒区融水土壤侵蚀机理与过程模拟研究”(项目编号:41230746),中国科学院“引进国外杰出人才”项目“水蚀参数量化研究”(项目编号:982602)和自然科学基金青年基金“降雨入渗

测定方法与过程影响因素研究”(51409250)等资助。感谢冯忍、高晓锋、陈萍、苑丽丽在图书校稿过程中给予的帮助。

为提高通读性,本书在编著过程中,模型公式推导尽可能做到详尽,以供读者参考应用。本书可供水土保持、土壤侵蚀、农业灌溉、农作物栽培、水土环境等高等院校相关专业师生和水利、农业、林业等部门的研究人员参考。

有关测量系统的研究和应用正处于不断发展完善之中,加之作者水平有限,书中有不足之处,恳请读者批评指正,也请各位专家、学者提出宝贵意见,以丰富及完善土壤入渗性能新的测量方法。

作 者

2016 年 11 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 土壤入渗性能研究的重要性	1
1.2 土壤入渗理论研究进展	2
1.2.1 土壤水入渗定义	2
1.2.2 入渗过程的三个阶段	2
1.2.3 土壤入渗率影响因素	3
1.2.4 入渗率随时间逐步降低的原因	6
1.2.5 土壤入渗的模型表达	7
1.3 土壤入渗测量方法研究进展	11
1.3.1 双环入渗仪法	11
1.3.2 人工模拟降雨法	12
1.3.3 圆盘入渗仪法	13
1.3.4 产流-入流-积水测量方法	14
1.3.5 降雨径流-入流-产流测量方法	14
1.3.6 线源入流测量方法	15
1.4 土壤入渗测量新方法研究意义	16
第2章 环式入渗仪测量效果研究	18
2.1 环式入渗仪测量效果分析	18
2.2 优先流对初始入渗过程影响的试验验证	20
2.2.1 试验装置与方法	21
2.2.2 试验材料与方法	22
2.2.3 试验结果分析	24
2.3 数值计算对初始入渗影响的理论分析	28
2.4 数值计算对初始入渗影响的试验验证	30
2.4.1 试验材料与方法	30
2.4.2 试验结果与讨论	31
2.4.3 结论	36
第3章 优先流对测量结果影响试验方法	38
3.1 可视化试验装置与测量方法	38
3.1.1 试验方法	39
3.1.2 数据采集	39

3.2 土壤剖面湿润土体几何分析	39
3.2.1 入渗水分在环内土壤中的运动过程	39
3.2.2 土壤入渗率计算	41
第4章 产流积水测量方法	43
4.1 测量原理与计算模型	43
4.1.1 产流积水法试验原理	43
4.1.2 产流积水法试验模型	44
4.2 试验材料与方法	45
4.2.1 试验材料	45
4.2.2 试验方案	46
4.3 试验结果与模型误差分析	47
4.3.1 试验结果	47
4.3.2 模型误差分析	49
4.4 入渗率与累积入渗量动态变化过程	52
4.4.1 不同坡位入渗率变化过程	52
4.4.2 不同坡位累积入渗量变化过程	52
第5章 产流排水测量方法	55
5.1 测量原理与计算模型	55
5.1.1 产流排水法测量原理	56
5.1.2 产流排水法试验模型	57
5.2 试验材料与方法	58
5.2.1 产渗流入渗仪设计及参数测定	58
5.2.2 试验材料	61
5.2.3 试验方案	62
5.3 试验结果与模型误差分析	62
5.3.1 试验结果	62
5.3.2 误差分析	64
5.4 入渗性能的模型表达与比较	65
5.4.1 产流积水方法	65
5.4.2 产流排水方法	66
5.5 降雨强度和初始含水率对土壤入渗性能的影响	67
5.5.1 降雨强度对土壤入渗性能的影响	69
5.5.2 初始含水量对土壤入渗性能的影响	72
5.6 不同植被土壤入渗性能比较	76
5.6.1 研究地区与研究方法	77
5.6.2 结果与分析	79
5.7 耕作对土壤入渗性能的影响	82

5.7.1 研究区域概况	83
5.7.2 入渗产流模型及试验方法	83
5.7.3 结果与分析	84
5.8 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征对入渗的影响	87
5.8.1 材料和方法	87
5.8.2 结果与分析	89
第6章 点源和线源入流测量方法	94
6.1 模型原理与数值方法	94
6.2 试验材料与方法	97
6.3 试验结果与误差分析	98
6.3.1 入渗性能数值计算结果	98
6.3.2 入渗性能测量结果的模型表达	99
6.3.3 误差分析	102
第7章 点源和线源入流测量方法的近似解析模型	104
7.1 理论背景	105
7.2 近似解析模型推导	106
7.2.1 解析模型 I	106
7.2.2 解析模型 II	107
7.2.3 累积入渗量计算模型	109
7.3 模型验证	110
第8章 平均近似计算模型	113
8.1 近似模型方法	113
8.2 试验数据验证	114
8.3 计算结果合理性分析与结论	117
第9章 耕层-犁底层土壤入渗连续测量方法	119
9.1 设备与材料	119
9.2 测量原理	120
9.2.1 耕作层地表入渗阶段	120
9.2.2 耕层入渗过渡阶段	122
9.2.3 犁底层土壤入渗阶段	122
9.3 测量步骤	123
9.4 结果与讨论	123
9.4.1 耕层土壤测量结果讨论	123
9.4.2 耕层与犁底层连续测量结果	126
9.5 误差分析	127
第10章 点源和线源自动测量系统	129
10.1 自动测量系统构成	129

10.1.1 系统组成原理	129
10.1.2 系统部件清单	129
10.2 操作使用方法	130
10.2.1 软件安装	130
10.2.2 相机驱动程序安装	130
10.2.3 试验操作步骤	131
10.3 数据计算与存储	134
10.4 自动测量系统检验流量对入渗的影响	136
10.4.1 材料与方法	137
10.4.2 试验结果与分析	138
10.4.3 误差分析	142
第 11 章 线源入流测量方法的应用	144
11.1 不同土地利用和季节交替对入渗性能影响	144
11.1.1 研究区域概况	144
11.1.2 测量方法	145
11.1.3 不同土地利用土壤入渗性能比较	147
11.1.4 季节交替不同土地利用土壤入渗性能比较	149
11.2 不同坡向及坡位土壤入渗性能研究	151
11.2.1 不同坡向土壤入渗性能研究	151
11.2.2 不同坡位土壤入渗性能比较	155
11.2.3 结论	158
11.3 水质对盐碱土入渗性能的影响	159
11.3.1 试验材料和方法	159
11.3.2 不同灌溉水质对土壤入渗率的影响	160
11.3.3 不同灌溉水质对土壤湿润锋的影响	161
11.3.4 不同灌溉水质对土壤累积入渗量的影响	162
11.4 流量和容重对入渗的影响	163
11.4.1 试验材料与方法	163
11.4.2 供水流量对入渗率的影响	164
11.4.3 土壤容重对入渗率的影响	165
11.4.4 土壤容重对累积入渗量的影响	165
11.5 矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应	166
11.5.1 材料与方法	166
11.5.2 结果与分析	168
11.5.3 讨论	171
参考文献	174

第1章 绪 论

1.1 土壤入渗性能研究的重要性

水是生命源泉，一切生命活动都起源于水，它是人类赖以生存和发展的不可缺少的最重要的物质资源之一。人的生命一刻也离不开水，水是人生命需要的最重要的物质。水资源短缺及水环境恶化是人类面临的重要环境问题，而自然界的水循环是导致这些问题产生的重要因素之一。土壤入渗是联系地表水与地下水的纽带，它决定了降雨在地表、土壤和地下的分配，从而影响地球表面的生物生存过程及其生存环境质量。

地球上的水，在太阳辐射及地心引力的作用下，不断地运动变化，周而复始，形成一个循环。如果将海洋蒸发作为起点，从广大洋面蒸发的水汽升入高空，其中一部分水汽在适当条件下凝结，形成降雨，又落到海洋里；另一部分被气流带到陆地，在一定条件下凝结成降水。降落在陆面的雨雪，一部分重新蒸发回到高空；另一部分经植物截留、地面拦蓄、土壤入渗之后形成地面径流及地下径流，最后又汇入海洋，形成一个闭合的动态系统，称为水循环（高前兆等，2002）。水循环是地球上最重要的物质循环之一，它对地球环境的形成、演化及人类生存都有极其重要的作用。水循环范围很广，向上可达地面以上平均约 11 km 的对流层顶、向下达到垂直地面以下约 1 km 的深处。水循环通过降水、蒸发、入渗、径流等形式进行着水分交换，将地球各圈层联系起来。正是水循环使得陆地淡水资源成为动态可更新能源。随着人类活动对自然界影响的扩大，以及人类对水文循环理解的深入，逐渐认识到水体之间相互转换的每一个环节都可能受到干预而影响整个循环的继续。为此，开展了“三水”（大气水、地表水、地下水）、“四水”（大气水、地表水、地下水、土壤水）和“五水”（大气水、地表水、地下水、土壤水、植物水）等不同水体的水量转换的水文循环理论研究，为开发利用水资源提供了依据（张春玲等，2006）。

土壤入渗（或称渗吸、入渗）描述的是水分进入土壤的过程，是水分循环的重要部分。在降水过程中以及人工灌溉时，水一般都经历了渗透过程。水在土壤中的运动，是在分子力、毛管力与重力的综合作用下寻求平衡的过程。喷灌时一般为非积水入渗，畦灌时为积水入渗，地下灌溉时为负压入渗。降雨时根据其强度的大小产生不同的入渗过程。入渗过程中，各种势能的大小不同，根据占优势的势能梯度，水在土壤中运动的方向也不同。入渗时，如果土壤表面是全部湿润的，水流就只有垂直向下一个方向；如果只有部分土壤表面湿润，如沟灌，水流运动方向既有向下的，也有侧向的。在非常干燥的土壤中，在一个时期中，水分的侧向运动可以很大，和向下的运动差不多（姚贤良和程云生，1986）。

水循环过程不仅影响陆地水文过程、生态水文以及水土流失，同时也影响化肥、农药等污染物随水分的迁移过程，从而导致面源污染和水环境的恶化（蒋定生，1997）。

土壤水分入渗过程是控制自然界水循环的关键环节。此外，土壤水分入渗能力的大小还影响灌溉水的利用效率、作物水分利用以及农田灌溉管理等（辛格，2000）。因此，研究土壤入渗性能、准确测定土壤入渗率，对调控地表径流、防止土壤侵蚀及减少面源污染等具有重要的理论与实际意义（赵西宁和吴发启，2004）。

1.2 土壤入渗理论研究进展

1.2.1 土壤水入渗定义

土壤水入渗是指水进入土壤的过程，通常是通过全部或部分地表向下的流动过程（Bouwer, 1986; Hillel, 1998）。土壤入渗率是一个计算变量，等于单位时间单位面积入渗的水量，表示特定条件下土壤水入渗速率大小。土壤入渗性能是一定质地结构的土壤所具有的特性，为充分供水条件下单位时间单位面积土壤水最大入渗速率。

土壤对水的渗吸能力常用入渗率 i 或者累积入渗量 I 来定量描述（Scott, 2000）。

入渗率 i ：土壤通过地表接受水分的通量，即单位时间通过单位面积入渗的水量。单位为 mm/min, cm/d。

累积入渗量 I ：在一定时段内通过单位面积的总水量。单位为 mm, cm。

入渗率 i 与累积入渗量 I 的关系可以由式（1.1）表示：

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (1.1)$$

在入渗过程中，土壤入渗性能受供水强度的影响。当供水强度（即供水速率）小于土壤入渗性能时（如低强度下的喷灌、滴灌和小雨等），土壤入渗由供水速率控制。当供水速率超过土壤入渗性能时，地表出现积水，土壤入渗由土壤的渗吸能力控制。大量试验和理论分析说明，土壤入渗性能随时间而变化。入渗过程中，最初的入渗率 i_0 相对很大，随着时间的延长，入渗率 i 逐渐降低，当入渗进行到某一时段后，入渗率 i 稳定在一个比较固定的水平上，即达到稳定入渗率 i_f 。稳定入渗率 i_f 与土壤饱和导水率 K_s 相等或相近（视入渗时的压力水头而定）。稳定入渗率 i_f 的大小取决于土壤的孔隙状况、质地、结构和土壤有无裂隙、土表有无结皮等。土壤达到稳定入渗率的时间一般不超过 2~3 小时（秦耀东，2003）。

1.2.2 入渗过程的三个阶段

1. 渗润阶段

当土壤干燥时，水分主要是在分子力作用下渗入土壤表层，被土壤颗粒吸附而成为薄膜水。初期干燥土粒吸附力极大，因而入渗率很大。当土壤含水量大于最大分子持水量时，分子力不再起作用，此阶段结束。

2. 渗漏阶段

入渗水分主要在毛管力与重力作用下在土壤孔隙中间做不稳定运移，并逐步充填土粒孔隙，直到孔隙饱和，此时毛管力消失，这一阶段入渗率因下层毛管力迅速消失而减少很快。前述两个阶段在某些情况下统称为渗漏阶段。两阶段中有一个共同特点就是水

是在非饱和土中运动（詹道江和叶守译，2000）。

3. 渗透阶段

当土壤孔隙被水充满达到饱和时，水分只在重力作用下呈稳定流动，或称为稳定入渗阶段。

渗漏是非饱和水流的不稳定运动，而渗透则属饱和水流的稳定运动。两个阶段并无明显的分界，特别是土层较厚时，各阶段可能同时交错进行（王燕生，1992）。

在充分供水的条件下，在土层的最上部有一薄层饱和水层，此时的土壤含水量处于饱和状态。其下土壤含水量迅速减少，称为过渡带。过渡带之下为水分传递带，土壤含水量变化较小，约为饱和含水量的 60%~80%。此带内水分的传递主要靠重力作用。其下为湿润带，其含水量迅速减少。湿润带末端称为湿润锋面，土壤含水量急速变化。湿润锋面是上部湿土与下部含水量较小的土层之间的界面。在干旱、半干旱地区，当土壤透水性较差时，一次降雨后，湿润锋面在地表下 20~30 cm；连降大雨时，锋面可达 80 cm 左右。湿润地区，入渗锋面到达的范围可能稍大一些。但饱和部分一般均在地表下 0.2 m 以内（廖松等，1991）。

渗透现象在实践中很重要，因为渗透强度决定了雨水或灌溉水进入土壤的速度，以及暴雨期间土表产生径流的数量和发生土壤侵蚀的危险程度。如入渗强度很小，植物根层的水分收支将受到影响。要管理好田间土壤的水分状况，掌握有关水分入渗过程及其与土壤性质等的关系的知识是很重要的（雷志栋等，1988）。

1.2.3 土壤入渗率影响因素

我国黄土高原干旱地区，雨量稀少，植被覆盖率小，蒸发量是降水量的几倍甚至十几倍，包气带缺水量很大，很难在一次降雨过程中得到满足，反而常出现超过地面下渗率的局部性高强度，短历时暴雨，故一般以超渗产流为主。对于我国南方大部分地区，在降雨量较充沛的湿润、半湿润地区，地下潜水位较高，土壤前期含水量大，由于一次降雨量大，历时长，降水满足植物截留、入渗、填洼损失后，损失不再随降雨延续而显著增加，土壤基本饱和，从而广泛产生地表径流。此时的地表径流不仅包括地面径流，也包括壤中流和其他形式的浅层地下水产流。而且蓄满产流方式往往不能在山区流域上普遍实现，在平原区则容易发生。在土层较薄的坡脚，由于饱和和坡面流的存在，也具有蓄满产流意义。因此，土壤物理性质对于土壤水入渗具有显著影响。

1. 土壤物理性质对土壤水入渗影响

土壤物理性质包括土壤质地、容重、团聚体分布等物理属性。由于土壤是受自然因素（母质、气候、生物、地形与时间）和人为因素共同作用而形成的，不同地区土壤具有许多不同的土壤特性。

土壤质地是土壤固相物质各粒级土粒的配合比例，它通过对土粒的表面能、土壤孔隙尺度和分布的影响，对土壤水分运动的驱动力和水力传导度产生影响，进而影响到土壤水分入渗能力。一般来说，质地越粗，透水性越强（费良军，1999），在相同入渗时间内，粗沙土、粉土和粉质黏土入渗量依次减少。土壤质地越重，黏粒质量分数越高，颗粒越细微，固体相比表面积越巨大，表面能高、吸附能力越强，粒间孔隙越小，吸水、

保水性能越强。一般来说,由于重质土壤孔隙比轻质土壤细小,相同土壤结构、含水量和水势梯度条件下,其水力传导度小于轻质土壤。因此,重质土壤的土壤水分入渗能力小于轻质土壤(解文艳和樊贵盛,2004)。研究表明在相同坡度及降雨条件下得出紫色土的稳定入渗率是黄壤的1.22倍,主要是由于紫色土的土壤容重小、孔隙度大造成的。土壤类型影响土壤渗透性能在很大程度上取决于土壤的物理性质,由于不同质地的土壤,其黏粒含量和大小孔隙的数量和比例有很大差别,从而导致湿润锋的运移速度不同,土壤入渗性能之间差异显著(傅涛,2002)。Helaia(1993)对三种不同的土壤(黏土、黏壤土、壤土)进行了50个田间入渗试验,分析了土壤质地与稳定入渗率的关系弱于结构因子与稳定入渗率的关系,特别是有效孔隙率与稳定入渗率的相关性非常显著,达到了极显著水平。

土壤容重是土壤的一个基本物理性质,是土壤在单位体积内排列松紧的程度,它反映了土壤坚实度和孔隙度的大小。对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响(郑纪勇等,2004)。自然条件下土壤容重受成土母质、成土过程、气候及生物作用的影响,是一个高度变异的土壤物理性质。通常由于受放牧及农业机械等压实影响,土壤颗粒受挤压重新排列而使土壤孔隙减少,土壤容重和紧实度增大。土壤容重影响到土壤的孔隙度与孔隙大小的分配,以及土壤的穿透阻力,进而影响到土壤的水肥气热条件与作物根系的生长。通常情况下,土壤紧实度增加,土壤容重越大,土壤孔隙度降低,不利于土壤水渗透。我国学者蒋定生和黄国俊通过对黄土高原入渗试验的结果分析,建立了第1分钟末土壤入渗速率与土壤表层容重的定量负相关关系(蒋定生和黄国俊,1986)。土壤容重越大,渗透能力越弱。吴发启等(2003a)对坡耕地土壤入渗影响因素分析表明,土壤容重越小,土壤入渗速率越大,产流历时越晚。有研究表明,结构疏松的土壤要比紧密的土壤渗透能力大得多,疏松的土壤被压实后,其入渗速率可以减少到压实前的2%(刘贤赵和康绍忠,1999)。

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,由土壤胶结成粒状或小团块状,大体呈球形。这种结构在表土中出现,具有良好的物理性能,是肥沃土壤的结构形态,其具有水稳性、力稳性和多孔性。其直径一般为10~0.25 mm,小于0.25 mm的团粒称为微团聚体。土壤团聚体性质则决定了土壤物理结构的好坏。团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持原有形态的能力,包括水稳定性、化学稳定性、酸碱稳定性和生物稳定性。其中,水分是导致团聚体破碎的主要因素,因此,土壤团聚体稳定性的研究,绝大多数是指水稳性团聚体。蒋定生等(1984)研究指出,土壤稳定入渗速率随着大于0.25 mm水稳性团聚体含量的增加而增加(蒋定生和黄国俊,1986),大于0.25 mm水稳性团聚体含量是决定土壤稳定入渗率的主导因素。王国梁和刘国彬(2002)研究表明,土壤团聚体的形成,使土壤表面更加疏松,更有利于水分入渗,从而使水稳性团聚体与土壤稳定入渗速率表现为一定的相关关系,但相关系数并不是很高,这是因为在土壤质地均一的前提下,土壤稳定入渗率除受土壤结构影响外,还受土体中是否有裂隙等因素影响。因此,土壤团聚体粒径分布及水稳性团聚体含量对于土壤水入渗有显著影响。大于0.25 mm团聚体含量越高,土壤孔隙结构越好,水流渗透通道越丰富,有利于土壤水渗透。土壤水稳性团聚体含量越高,土壤水入渗过程中,土壤颗粒遇水不易分散,团聚体结构保持良好,水流通道不易受土壤颗粒分散堵塞,有利于提高土壤初始入渗性能。

及稳定入渗性能。

表层土壤结构对土壤容重, 通气性和吸收地表径流, 以及水分入渗等都有直接的影响。在土壤水入渗过程中, 表层土壤结构对土壤入渗性能的影响大于深层土壤, 表层土壤在土壤水入渗过程中容易发生结皮。结皮是受雨滴打击影响, 在土壤的最表层形成一种具有低孔隙度、高容重和低导水率的覆盖层 (Morin, 1981)。Eigle 和 Moore (1983) 和 Moore (1981) 的研究都表明, 土壤结皮对裸地入渗的影响大大超过其他因素的影响, 其减少入渗量可达 70%~80%, 渗透系数则减少到原来的 4.84% (Philip, 1998; Ruan et al., 2001; Kutilek, 2003)。Mcintyre (1958) 通过对小面积上形成的结皮与其下部耕作层土壤的渗透率的测定, 得出耕作层土壤的渗透率是淋入层的 200 倍, 是结皮层的 2000 倍的结论。近年来的研究表明, 结皮层渗透系数远小于原来土壤剖面的渗透系数, 大大减少土壤入渗量, 使得结皮层以下很长一段时间都处于非饱和状态, 但在不同程度上增强了土壤表层的抗冲能力, 即使土壤类型相同, 结皮程度的不同也会导致渗透系数的较大差别。吴发启和范文波 (2005) 研究土壤结皮对降雨入渗和产流产沙影响的结果表明, 非结皮土壤的平均入渗率是结皮土壤的 1.25 倍。贾志军和王小平 (2002) 研究认为, 表土结皮对黄土地区坡耕地 50 cm 土层内的土壤含水量有明显影响, 打破结皮可使土壤入渗率提高, 并有效地抑制和减少水分蒸发, 提高土壤保水能力。

2. 土壤水入渗的空间变异性

土壤空间变异性是普遍存在的, 其变异主要包括系统变异和随机变异两种。土壤特性的系统变异是由母质、气候、水文、地形、生物、时间、人类活动等引起的, 而随机变异是由取样、分析等的误差所引起的。土壤系统变异是人们所关注的主要研究内容, 随机变异更依赖于研究技术手段的创新, 是不可避免的相对存在。

土壤发生、形成、迁移、沉积、风化、分解等物理化学过程都存在很大差异, 造成土壤物理性质的空间变异。植被类型是影响土壤水分入渗的一个重要因素, 不同植被类型的土壤入渗能力有很大差异。但植被对土壤入渗不是直接作用的。一方面植被通过自身的发育状况间接地影响土壤孔隙状况、容重、团聚体含量等物理性质, 改善土壤结构, 从而引起土壤对水分入渗能力的变化; 另一方面植被可以调节到达土壤层的降水的数量和时间, 降低瞬时间内达到土壤层的降雨量, 延长可降雨到达土壤层发生入渗作用的时间, 使得土壤层能够更充分地对达到该层的降水进行入渗。森林植被以其独特的方式对土壤入渗性能产生直接和间接的影响 (郭忠升等, 1996)。一般而言, 天然林地土壤疏松、物理结构好、孔隙度高, 具有比其他土地利用类型高的入渗速率。潘紫文等 (2002) 研究表明, 天然林地平均入渗率是荒地的 3~4 倍。林地土壤的入渗速率受群落演替阶段、林分类型等因素的影响 (余新晓等, 2003)。

在黄土高原干旱半干旱地区, 土壤入渗性能受土地利用类型影响, 而土壤入渗性能通过土壤水入渗过程影响土壤水分分布。因此, 不同土地利用类型引起土壤水分空间变异, 土壤水分状况对土壤水入渗具有显著影响。目前, 关于初始含水率对入渗的影响研究, 大多是假定在含水率分布均匀的前提下研究其对入渗速率的影响。有研究表明, Bodman 和 Colman (1944) 认为在土壤入渗初期, 随着含水率的增加, 入渗速率降低; 其原因是土壤初始含水率越低, 基质势梯度量值越大, 需要较多水分进入较大充气孔隙

以接近饱和。随着时间的延续,含水率对入渗的影响变小,最终可以忽略不计。刘贤赵和康绍忠(1997)通过对黄土高原沟壑区小流域土壤入渗分布规律的研究,发现土壤初始含水率和积水深度对土坡入渗的都会产生很大的影响,对于同一地形相同植被的土壤来说,初始含水率对入渗的影响起控制作用,不同初始含水率的土壤入渗稳渗值也不相同。还有研究表明,土壤初始含水率与达到稳渗的时间呈负相关的线性关系,但与稳渗率相关性较小,随着土壤初始含水率的增加,坡面产流历时明显提前,初始含水率与坡面产流历时和土壤稳渗速率分别成幂函数关系(吴发启等,2003a)。

在地形复杂的丘陵地区,地形与土壤空间变异有直接的关系。地形影响水热条件和成土物质的再分配,因而不同地形位置有着不同的土壤特性。不同植被类型空间位置包括坡度、坡向以及坡位等,对土壤水入渗都有一定的影响。蒋定生等(1990)研究表明,随着地面坡度和降雨强度的增加,超渗产流的起始时间提前,渗入土壤中的水量随之减少。坡度对降水入渗的影响表现在两个方面,一是降水在坡面上发生再分配;二是随着地面坡度的变化,降水入渗速率呈现明显变化。有人认为在土壤入渗性能较大的坡面上,入渗速率与坡度呈反比关系(陈浩和蔡强国,1990),在土壤入渗性能较小的条件下,坡度与入渗速率关系不明显(王文龙等,1993)。绝大部分的研究都认为坡度变化会引起坡面降雨集水面积变化,导致土壤水入渗再分配过程的差异。有关土壤入渗与坡向、坡位之间的关系研究表明(康绍忠等,1996;黄明斌等,1999;袁建平等,2001b),不同坡向土壤入渗性能存在较大差异,阳坡初渗率大于阴坡,这与其初始含水量低有关;同一坡向不同位置的土壤入渗性能不同,主要是因为各坡向的初始含水率、土壤稳定性及土壤容重从上到下各不相同,从而影响到水分入渗。康绍忠等(1996)认为,在相同植被条件下,坡脚的初始入渗率比坡顶小,但坡脚入渗率随时间而减少比坡顶慢,且稳定入渗率比坡顶大。

1.2.4 入渗率随时间逐步降低的原因

1) 吸力梯度的原因

考察土壤表面和湿润锋前沿所建立的 Darcy 方程, $i = -K_s (\Delta H / \Delta Z)$, 其中 ΔH 由土壤表面的静水压力水头、湿润锋前沿处的吸力水头和重力水头决定。如果压力水头保持不变,则在同一土壤质地情况下,入渗驱动力 $(\Delta H / \Delta Z)$ 的大小取决于湿润锋前沿处的基质吸力和重力势。入渗一开始,土表入渗处与湿润锋前沿的吸力梯度 $(\Delta S / \Delta Z)$ 相对较大,因而土壤水通量就较大,入渗率 i 较高。随着入渗时间的延续,入渗范围扩大,由于 Z 的加大,相对而言,土表入渗处与湿润锋前沿的水力势梯度 $(\Delta S / \Delta Z)$ 变小,到一定时间,甚至可以忽略不计。这时入渗率 i 由压力水头和重力水头的梯度控制,入渗率 i 趋于稳定。

2) 孔隙通道的变化

在入渗过程中,土壤孔隙发生变化,有些通道会被封闭,因而造成入渗率 i 随着时间的延续而降低。

3) 封闭气泡的作用

开始入渗时土壤中的气体可以排出一部分,随时间的延长,有些气体来不及排出,