

非饱和土壤介质 水分入渗问题

的试验研究

樊贵盛 李雪转 李红星 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

非饱和土壤介质 水分入渗问题

的试验研究

樊贵盛 李雪转 李红星 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者和他的科研团队 20 年来针对不同灌水技术而展开的专门性的研究成果, 主要对非饱和土壤介质的一维垂直入渗、间歇入渗、非充分供水入渗、冻融条件下的入渗、有压入渗和地下点源入渗等问题的研究成果进行了具体而系统的介绍, 对各种条件下的土壤水分入渗过程、驱动势、入渗模型、主导影响因素以及入渗模型参数的预测进行了研究和讨论, 旨在提供具有较高量化水平的土壤入渗参数。

本书可供从事农业节水灌溉、地表产流问题研究、水资源评价、水土环境控制、水土保持等科研人员和工程技术人员使用, 也可供高等院校相关专业的师生参考、阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究 / 樊贵盛, 李雪转, 李红星著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-5084-9403-6

I. ①非… II. ①樊… ②李… ③李… III. ①地面灌溉—研究 IV. ①S275.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第005615号

书 名	非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究
作 者	樊贵盛 李雪转 李红星 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京彩虹伟业印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 22 印张 528 千字 4 插页
版 次	2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	85.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介



樊贵威，男，1955年生，山西省孝义市人，工学硕士，农学博士，教授，博士生导师，享受国务院特殊津贴专家。现在太原理工大学水利科学与工程学院任教，长期从事节水灌溉理论与技术和水土环境控制方面的教学和科学研究工作。主持国家级、省级和省厅科研项目20余项，获山西省科学技术进步一、二、三等奖四项。出版专著6部，发表科技论文90余篇。培养硕士、博士研究生数十名。



李雪转，女，1968年生，山西省临猗县人，工学博士，副教授。现在山西水利职业技术学院水利系任教，主要从事灌溉排水工程技术的教学工作，研究方向为节水灌溉技术。参与国家级、省级和省厅科研项目6项，出版专著1部，参编教材1部，发表科技论文16篇，其中EI收录3篇。



李红星，男，1974年生，工学博士，高级工程师。现在山西省晋中市水利勘测设计院工作，长期从事水利工程的规划、设计和研究工作，研究方向为节水理论与灌溉技术。参与国家级、省级和省厅科研项目4项，发表科技论文10余篇，其中EI收录2篇。

非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究



室内土壤质地颗粒分析试验



不同土壤结构状态构造



室内土壤盐分、养分测定



大田表层土壤理化参数测定取样



土壤剖面取样土坑



土壤剖面理化参数测定取样



大田深层土壤理化参数测定取样



大田土壤剖面理化参数测定取样记录

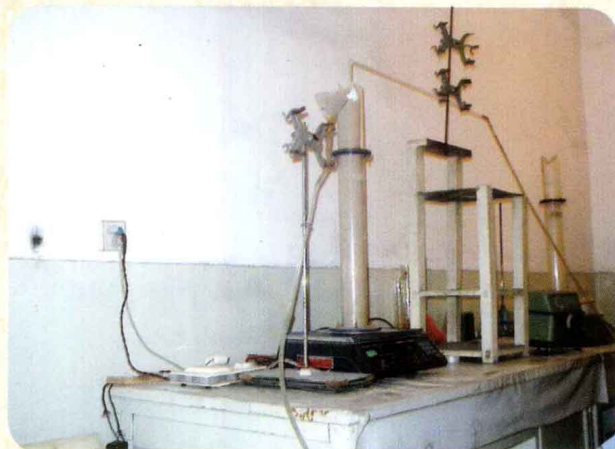
非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究



大田土壤入渗试验



浑水入渗试验



室内土壤入渗试验



冻融土壤入渗试验



国家“863”项目规模入渗试验



大同盆地规模土壤入渗试验



首都水资源可持续利用项目浑水入渗试验



山丘区规模入渗试验

非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究



室内有压入渗试验



大田有压入渗试验



渠道一维有压入渗试验



湖库底有压入渗试验

序

foreword

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源。我国水资源人均占有量很低，仅为世界平均水平的 1/4，是水资源供需矛盾非常尖锐的国家。在全国总用水量中，农业灌溉用水量占 2/3 左右，是用水大户。但是由于灌溉方式和技术落后，农业灌溉水的利用率只有 0.45，仅为发达国家的一半左右；单方水的粮食生产能力只有 1.0kg 左右，远低于世界发达国家（2.0kg）的水平，显然农业用水效率不高，浪费严重。因此，要从根本上解决我国水资源短缺问题，必须加快农业节水建设，提高水资源利用效率和效益，走节水型农业的发展道路，这也是贯彻 2011 年中央一号文件精神，保障我国经济社会全面、协调、可持续发展的必然选择。

党中央、国务院十分重视农业节水灌溉工作。早在 20 世纪五六十年代，就开始对节水灌溉技术进行试验、研究与推广；党的十四届四中全会明确要求：“大力普及节水灌溉技术，推广旱涝保收，稳产高产农田。”党的十五届三中全会明确了节水灌溉的重要性，明确地提出：“把发展节水农业和推广节水灌溉作为一项革命性的措施来抓。”2000 年，党的十五届五中全会指出：“水资源可持续利用是我国社会经济发展的战略问题。核心是提高用水效率，把节水放在突出位置。”经过多年的实践和探索，我国在节水灌溉技术的研究、节水灌溉设备的开发和生产、节水灌溉工程的示范推广、节水灌溉技术服务体系的建立等方面取得了明显的进展，初步形成了具有中国特色、适合国情的节水灌溉模式和技术推广服务体系。

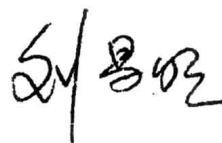
近年来，我国节水灌溉发展很快，取得了一定的成绩。但是与先进国家达到的水平相比还有很大差距，主要还存在以下几个问题：一是节水灌溉方面的政策、法规和规章制度建设相对滞后，农业灌溉用水管理体制不适应市场机制的要求；二是节水灌溉技术水平比较低；三是农业灌溉水价偏低；四是节水灌溉资金投入不足。目前，我国节水灌溉技术的研究仍然非常薄弱。节水技术应用推广不足，节水灌溉面积还不到有效灌溉面积的一半，渠道防渗和管道输水灌溉等方式仍占主导地位，节水效率高的喷灌和微灌等灌溉方

式所占的面积非常低，与发达国家相比还有很大差距。

2011年中央一号文件明确要求：“大力发展节水灌溉，推广渠道防渗、管道输水、喷灌滴灌等技术。”到2020年，我国节水灌溉工程面积达到7.6亿亩，其中高效节水灌溉面积3.5亿亩，占有效灌溉面积（约9.5亿亩）的37%。农田灌溉水有效利用系数提高到0.53以上。要形成600亿 m^3 以上的年节水能力，节水灌溉面积占全国有效灌溉面积的80%以上，确保新增高效节水灌溉面积0.5亿亩，争取新增1.0亿亩。我国发展节水灌溉任重而道远。

未来10年将是我国农业节水灌溉快速发展的关键时期，其中，如何确定各种灌溉方式的灌水技术参数是提高灌溉水利用率的关键所在。本书有关各种灌溉条件下的土壤水分入渗特性与入渗参数预报等研究成果，为如何合理确定灌水技术参数、高效利用水资源等问题提供了科学依据。太原理工大学节水灌溉理论与技术研究团队撰写的《非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究》一书的出版，对于改进地面灌水技术、合理确定灌水技术参数、提高灌溉水利用率等均具有重要的实际指导意义，对农业节水灌溉的发展及推广具有重要的促进作用。

中国科学院院士



2012年1月1日

前言

foreword

土壤水分入渗是指水分通过地表或入渗界面进入土壤的过程，土壤入渗参数是表征土壤水分入渗过程的模型参数。由于土壤入渗参数决定着地面水、灌溉水转换为土壤水的速度和分布，进而影响着灌溉过程的灌水质量和灌溉效果（灌水均匀度、储水效果和灌水效率），所以它是各种灌水技术条件下确定合理灌水技术参数的依据。由此，专门而深入地对非饱和土壤介质水分入渗过程和参数进行研究，对于全面提升我国灌溉水的利用效率和缓解水资源供需矛盾具有重要意义。此外，水文学中研究地表产流问题，农田水利学中研究降雨后土壤水分的分布问题和有效性问题，水资源评价中研究入渗对浅层地下水的补给问题，农业及环境学研究化肥、农药及污染物随水分迁移的问题等，都涉及到非饱和带土壤水分入渗问题。由此，研究各种条件下的土壤水分入渗特性，具有重要的理论意义和实际意义。

太原理工大学节水灌溉理论与技术科研团队以提高农田灌水质量和灌溉水有效利用率为目标，以国家自然科学基金项目“波涌灌灌溉理论及技术要素的试验研究”、“冻融条件下土壤水分入渗与保持的试验研究”、“区域尺度上土壤入渗参数多元非线性传输函数研究”、“863”国家高技术研究发展计划项目第三子专题“精细地面灌溉集成技术”、国家科学技术部重大科技产业化工程项目“井渠结合灌溉类型区农业高效用水模式与产业化示范”、“‘21世纪初期首都水资源可持续利用’大同市农业节水项目”、山西省水利厅农村科研费资助项目“冻融条件下地面灌溉效果及灌水技术参数研究”、山西省自然科学基金项目“利用土壤参数传输函数确定入渗参数方法研究”、山西省科技攻关计划项目“节约淡水型盐碱荒地开发利用技术研究”、太原理工大学青年基金项目“土壤间歇入渗规律的试验研究”等诸多项目为支撑，基于数以千组计的野外和室内入渗试验，利用土壤水动力学、数理统计和计算机人工神经网络等理论，系统地就非饱和土壤介质的一维连续垂直入渗（畦灌）、间歇入渗（波涌灌溉）、非充分供水入渗（自然降雨、喷灌、微喷灌）、冻融土壤水分入渗（冬春储水灌溉）、地下点源入渗（渗灌、地下滴灌）和非饱和土壤有

压入渗（渠道输水）等入渗问题进行了长期的专门性研究。本书所展示的研究成果除了对各种灌水技术条件下的土壤水分入渗特性、机理、驱动势、入渗模型等入渗基本理论的研究外，尤其强调成果的实用性，并有所创新地实现了利用土壤常规理化常数对土壤入渗模型参数的预测，为土壤入渗模型参数的获取提供了便于基层水管理人员应用的一种新方法。

本书第1章、第2章、第3章、第5章由樊贵盛执笔；第4章由李雪转执笔；第6章由李红星执笔；第7章由樊贵盛、李红星执笔；全书由樊贵盛统稿。

在本书所依托项目的实施过程中，得到了山西省水利厅、晋中市及各县（市）水利局、大同市及各县（区）水利局、临汾市及各县（市）水利局、运城市及各县（区）水利局等领导及有关同志大力支持，博士研究生冯锦萍、郭文聪、解文艳、曹崇文等，硕士研究生杨素宜、王志强、冯小明、赵守珍、王雪、余海明、郭会敏等为野外和室内试验工作付出了辛勤的劳动。在此，谨向他们表示衷心的感谢，并对本书所引用文献的作者表示感谢。

本书向社会和读者奉献了作者20余年有关非饱和土壤介质水分入渗问题的劳作成果，期望能对我国的节水灌溉起到积极作用。由于作者自身的专业知识、学术水平和实践经验有限，书中难免有不妥和错误之处，真诚希望有关专家、学者和读者提出宝贵意见和建议，共同推进节水灌溉事业的发展。

作者

2012年1月
于太原理工大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 土壤水分入渗的研究意义	1
1.1.1 土壤水分入渗研究的理论意义	1
1.1.2 土壤水分入渗理论研究的应用价值	1
1.2 土壤水分入渗的研究进展	3
1.2.1 土壤水分入渗理论的发展过程	3
1.2.2 入渗过程经验模型的研究进展	5
1.2.3 土壤入渗经验模型参数获取方法的研究进展	8
1.2.4 入渗特性测试仪器设备的研究进展	10
1.2.5 土壤水分入渗研究的发展趋势	10
1.3 土壤水分入渗类型的分类	12
1.4 研究内容和方法	12
1.4.1 研究内容	12
1.4.2 研究方法	14
参考文献	16
第 2 章 土壤水分一维垂直入渗特性	17
2.1 试验土壤条件与试验方法	17
2.1.1 试验区土壤条件	17
2.1.2 试验仪器设备	18
2.1.3 试验方法	20
2.2 土壤一维垂直入渗的一般过程	21
2.2.1 入渗过程	21
2.2.2 入渗机理分析	23
2.2.3 土壤水分入渗模型	23
2.3 一维垂直入渗过程的主要影响因素	25
2.3.1 土壤含水率的影响	25
2.3.2 土壤结构的影响	29
2.3.3 土壤质地的影响	31
2.3.4 土壤有机质的影响	35
2.3.5 土壤含盐量的影响	39

2.3.6	土壤剖面的影响	40
2.3.7	灌溉水中含泥沙量的影响	51
2.3.8	灌溉水温的影响	54
2.4	农业生产周期内土壤入渗的变化特性	54
2.4.1	农业生产周期内地表土壤含水率的变化特性	55
2.4.2	农业生产周期内地表土壤结构的变化特性	56
2.4.3	土壤入渗能力及入渗模型参数的变化特性	57
2.5	土壤水分入渗能力及入渗模型参数的预报方法	63
2.5.1	预报模型的输入参数	63
2.5.2	预报模型的输出参数	64
2.5.3	线性预报模型	64
2.5.4	非线性预报模型	66
2.5.5	BP 预报模型	66
2.5.6	预报模型的比较与适用性分析	68
2.5.7	模型验证	80
2.5.8	预测实例	81
2.6	小结	85
	参考文献	87
第 3 章	土壤水分间歇入渗特性	88
3.1	试验土壤条件与试验方法	88
3.1.1	试验土壤条件	88
3.1.2	试验仪器设备	89
3.1.3	试验方案	91
3.1.4	间歇入渗试验方法	92
3.1.5	试验及资料处理中的几个问题	92
3.2	土壤间歇入渗特性及减渗机理分析	97
3.2.1	土壤间歇入渗的减渗特性	97
3.2.2	间歇入渗土壤水分再分布特点	100
3.2.3	间歇入渗减渗机理浅探	101
3.3	土壤间歇入渗减渗效果的主要影响因素	103
3.3.1	土壤初始含水率对间歇入渗减渗效果的影响	104
3.3.2	土壤结构对间歇入渗减渗效果的影响	104
3.3.3	灌水参数对间歇入渗减渗效果的影响	108
3.3.4	土壤质地对间歇入渗减渗效果的影响	111
3.4	间歇入渗实用入渗模型的探讨	113
3.4.1	现有间歇入渗模型的分析 and 讨论	113
3.4.2	实用模型结构	117

3.4.3	模型参数确定及其精度	119
3.5	小结	120
	参考文献	121
第4章	非充分供水条件下的土壤入渗特性	123
4.1	试验土壤条件及试验方法	123
4.1.1	试验土壤条件	123
4.1.2	试验仪器和设备	125
4.1.3	试验方案与方法	128
4.2	非充分供水条件下土壤水分入渗的基本特性	130
4.2.1	非充分供水条件下的土壤水分入渗特性	130
4.2.2	非充分供水土壤水分入渗的动力学机理分析	136
4.3	非充分供水土壤水分入渗模型及模型参数	138
4.3.1	非充分供水入渗率模型	138
4.3.2	非充分供水入渗量模型	142
4.3.3	非充分供水入渗湿润锋模型	142
4.3.4	非充分供水入渗湿润锋速模型	143
4.3.5	非充分供水入渗模型参数	143
4.4	影响非充分供水土壤水分入渗特性的主导因素	144
4.4.1	土壤结构的影响分析	144
4.4.2	土壤质地的影响分析	153
4.4.3	土壤含水率的影响分析	161
4.4.4	供水强度的影响分析	170
4.5	非充分供水入渗参数与充分供水入渗参数间的关系	179
4.5.1	充分供水入渗模型参数及影响因素	180
4.5.2	非充分与充分供水入渗模型参数间的关系	185
4.5.3	非充分与充分供水入渗湿润锋模型参数间的关系	191
4.6	小结	193
	参考文献	196
第5章	冻融土壤水分入渗特性	198
5.1	试验土壤条件与试验方法	198
5.1.1	气候条件	198
5.1.2	试验区土壤条件	203
5.1.3	试验仪器、设备与设施	206
5.1.4	试验方案和试验方法	207
5.2	冻融土壤水分入渗的基本特性	210
5.2.1	季节性冻融土壤的冻融过程和特点	210
5.2.2	冻融土壤水分入渗的基本特性	213

5.2.3 冻融土壤的减渗机理	233
5.3 冻融土壤水分入渗特性的主要影响因素	236
5.3.1 土壤质地对冻融土壤入渗特性的影响	237
5.3.2 土壤结构对冻融土壤入渗特性的影响	239
5.3.3 土壤含水率对冻融土壤入渗特性的影响	242
5.3.4 地下水埋深对冻融土壤入渗特性的影响	247
5.3.5 土壤温度对冻融土壤入渗特性的影响	252
5.3.6 入渗水水温对冻融土壤入渗能力的影响	260
5.4 小结	264
参考文献	266
第6章 非饱和土壤有压入渗特性	268
6.1 试验土壤条件与试验方法	268
6.1.1 试验区气候条件	268
6.1.2 试验土壤条件	268
6.1.3 试验设备研制	269
6.1.4 试验方案和方法	271
6.2 非饱和土壤有压入渗特性	272
6.2.1 累积入渗量和入渗率随时间的变化特性	272
6.2.2 非饱和土壤有压入渗过程分阶段土壤水分运动方程	273
6.2.3 有压入渗三阶段经验模型	274
6.2.4 非饱和土壤有压入渗过程主导势分析	278
6.2.5 非饱和土壤有压和无压入渗稳定入渗率间的关系	279
6.3 非饱和土壤有压入渗特性的主要影响因素	283
6.3.1 土壤质地对土壤有压入渗特性的影响	283
6.3.2 土壤干容重对土壤有压入渗特性的影响	287
6.3.3 土壤含水率对土壤有压入渗特性的影响	290
6.3.4 供水水头对土壤有压入渗特性的影响	293
6.4 小结	297
参考文献	299
第7章 地下点源入渗特性	300
7.1 试验土壤条件与试验方法	300
7.1.1 试验区气候条件	300
7.1.2 试验区土壤条件	301
7.1.3 试验仪器与设备	302
7.1.4 试验方法	304
7.1.5 试验方案	306
7.2 渗灌管道及灌水器水流特性	308