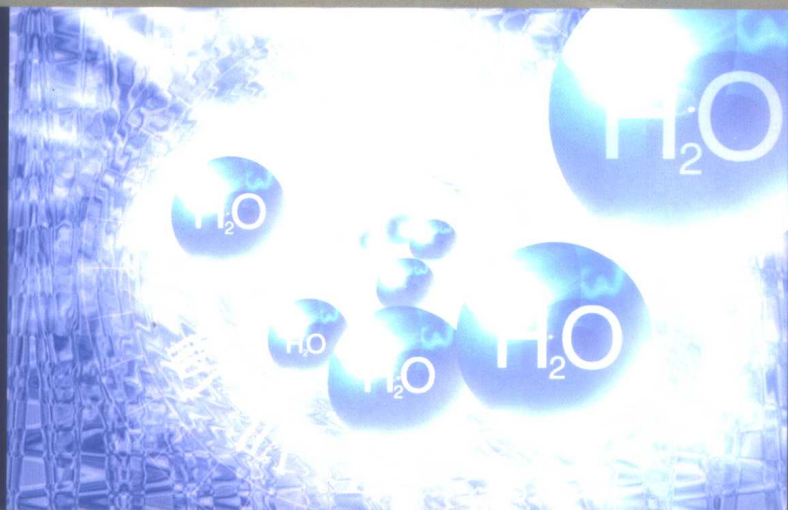


水分在季节性非饱和 冻融土壤中的运动



郑秀清 樊贵盛 邢述彦 著

地质出版社

水分在季节性非饱和冻融 土壤中的运动

郑秀清 樊贵盛 邢述彦 著

(太原理工大学水利系)

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是作者多年从事非饱和冻融土壤水分入渗和迁移研究成果的总结。本书以大量的室内外试验资料为基础,系统分析了土壤的季节性冻结和融化规律、冻融土壤水分入渗的基本特性、阻渗机理及主要影响因素,建立了冻土入渗参数预报模型;结合山西省汾河灌区冬、春灌溉的实际,研究了雪层及冻融土壤介质中水、热、盐的耦合迁移特点及运动规律,建立具有物理基础的冻融土壤系统水、热、盐耦合迁移数值模拟模型,为季节性冻土分布区土壤墒情的预测预报提供了一种快速、简便、经济、可行的方法;应用冬灌地面水流运动的数值模拟模型,探讨了冬灌地面水流特性及灌溉效果,提出提高冬灌灌水效果的技术措施。

本书可供从事农业、水利、环境、水文地质、寒区工程建设等学科的科技工作者、工程技术人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动/郑秀清等著.-北京:地质出版社,2002.9
ISBN 7-116-03657-1

I. 水… II. 郑… III. 冻融循环-土壤水-研究 IV. P642.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 055408 号

责任编辑:赵俊磊 江晓庆

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:20

字 数:484千字

印 数:1—1000册

版 次:2002年9月北京第一版·第一次印刷

定 价:45.00元

ISBN 7-116-03657-1/S·29

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

太原理工大学水利系郑秀清副教授、樊贵盛教授与邢述彦副教授合作撰写的《水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动》专著，是他们多年从事非饱和冻融土壤水分运动研究成果的系统归纳和总结。我国的季节性冻土主要分布在华北及西北广大的干旱、半干旱气候区，其面积占全国国土面积的一半以上，此书的问世，必将对干旱、半干旱气候区地表、地下水资源的综合评价，土壤水、热资源的有效利用，农田冬春灌溉灌水技术参数的合理确定，环境保护及土壤盐渍化防治等问题的合理解决产生深远的影响。

地球上的大气降水、地表水、土壤水、地下水等不同类型的水分处于不断的循环和转化之中，非饱和土壤水是联系大气降水、地表水和地下水的纽带。季节性冻融条件下土壤水分的入渗、迁移、蒸发与转化是自然界水循环的重要组成部分，在农业、水资源、环境及人类工程活动中占有极其重要的地位。因此，倡导与加强冻融土壤系统中的水分运动问题的理论和应用研究对国民经济的可持续发展具有重要的理论和实际意义。

冻结土壤中，水分以气、液、固三相共存。固态水不仅占据土壤孔隙空间、影响土壤中的水分和盐分运移，而且影响热量传输及土壤的温度状况。因此，冻融土壤介质中的水、热、盐迁移具有很强的耦合性。近年来，国内外同类研究的主要重点放在冻胀、盐胀等问题的实验研究方面，而从资源和环境的角度出发，为农业可持续发展服务的研究成果相对薄弱。

此书的作者均为太原理工大学的中青年教学、科研骨干，他们具有科学的思维方法，严谨的工作作风，扎实的科研基本功和刻苦钻研、开拓创新的精神。多年来，他们进行了大量的理论和实验研究，取得了翔实可靠的关于季节性冻融条件下土壤水分入渗、迁移、土壤温度及盐分动态变化的第一手资料。本书对冻融土壤水分入渗的基本特性、阻渗机理、主要影响因素，以及季节性冻融期雪层和土壤在冻融过程中水分、温度变化特点及其相互关系作了全面系统的分析，在此基础上，建立了用常规土壤物理参数确定冻融土壤入渗特性的经验预报模型；探讨了雪层及冻融土壤介质中水、热、盐的耦合迁移特点及运动规律，推导出雪层中的水、热迁移方程，冻土中的水热盐耦合迁移方程及反映负温下土壤未冻水含水率变化的联系方程和全面描述自然条件下考虑地气间水热交换的一维雪、冻融土壤系统水、热、盐耦合迁移数值模拟模型；以山西省汾河灌区为背景，用上述模型研究了土壤的季节性冻融过程及冻结规律、冻融过程中土壤含水率的变化规律、不同潜水位条件下土壤水分迁移规律、潜水蒸发规律以及不同初始含水率条件下土壤的储水保墒规律、冻融期土壤初始含水率、冬灌对土壤墒情的影响，为季节性冻土分布区农业灌水技术参数确定、土壤墒情的预测预报提供了一种快速、简便、经济、可行的方法，提出对冬、春节水灌溉、水资源合理调配颇有实际意义和应用价值的看法；建立了冬灌地面水流运动的数值模拟模型，讨论了冬灌地面水流特性、灌溉效果和提高冬灌灌水效果的技术措施。综上所述，本书在冻土的入渗特性、减渗机理、聚墒特点、融土的持水特性及土壤墒情的预报

技术等问题的研究方面取得了重要的突破。

现代科学技术向着高度分化、高度综合两个方向发展，学科之间的交叉、渗透，往往成为新的学科增长点。冻融土壤中的水分运动涉及到水文地质、土壤、农业、水利、水文、气象及冻土学等多学科理论和相关知识，是多学科间交叉和渗透研究的产物。作为师长，我对他们所取得的成果感到由衷的高兴，并深信在有关学术界的共同努力下，该学科的理论、方法、内容将日臻完善，对干旱、半干旱地区国民经济的持续、稳定发展将起到愈来愈大的推动作用。

中国地质大学水资源与环境学院教授、博士生导师

李岩岩

2002年6月

前 言

土壤和水是自然环境和农业生产的两项基本资源，也是人类赖以生存的两大支柱。土壤和水作为一个系统，与外部环境不断进行着物质和能量的交换，同时水分、溶质和热量在土水系统内进行着复杂的运动。季节性冻土是一种含冰晶的特殊土水体系，由于相变的影响，冻土中的水分运动与热流和盐分的迁移具有更强的耦合性。据研究，地球上中纬度大部分地区经受季节性冻融作用。在我国，这些地区大多属于干旱、半干旱的水资源短缺地区。

冻融土壤系统的水分运动作为自然界水循环的一个重要环节，在农业、水资源、环境及人类工程中占有极其重要的地位。它的研究对于综合评价地表、地下水资源，有效利用土壤水、热资源，确定农田冬、春灌溉灌水技术参数，合理解决土壤盐渍化防治等实际问题都具有重要意义。

本书是国家自然科学基金项目“水分在非饱和冻融土壤中入渗和保持的研究”、山西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”以及太原理工大学青年基金项目“季节性冻融过程中土壤水热耦合迁移的数值模拟及其应用研究”的综合研究成果，也是作者多年从事非饱和带水分运动研究工作的一份总结。期望本书能对冻融土壤系统水分入渗和迁移规律的研究起到促进作用。

本书绪论由郑秀清、樊贵盛执笔；第四章的第五、六节及第六章的第一、二、三、五、六节由郑秀清执笔；第二章、第五章、第七章及第四章的第二、三、四、七节由樊贵盛执笔；第一章、第三章及第四章的第一、八节由邢述彦执笔；第六章的第四节及附录由郑秀清、邢述彦执笔。全书由郑秀清统稿。

笔者衷心地感谢国家自然科学基金委员会、山西省汾河水利管理局及太原理工大学水利系中心实验室在完成各课题研究中给予的资助、提供的实验条件，太原理工大学各有关部门对我们的大力支持，山西省汾河水利管理局邢黎明、牛豪振、尉宝龙、郭培成、赵春林、李国元、郝增胜等同志的通力合作，郭彩华、孙向武、王效琴等同志为野外试验工作付出的辛勤劳动。并对本书所引用的公开出版与未公开出版文献的作者表示感谢。

面对季节性冻融土壤介质中的水分运动这一复杂而意义深远的跨学科课题，我们深感知识与能力的不足，奉献于读者面前的这本书，仅仅是一个粗浅的认识，书中一定存在不少谬误之处，恳请赐教指正。



郑秀清 1958年1月生，副教授，工学博士。现在太原理工大学水利系任教，研究方向为水资源与水环境科学。主持国家自然科学基金项目一项，发表科技文章20余篇。



樊贵盛 1955年7月生，山西孝义市人，教授，工学硕士，农学博士。现在太原理工大学水利系任教，研究方向为节水灌溉和土壤水环境科学。主持和合作科学研究项目十余项，参加国际合作项目一项，主持和参加国家重大科技产业化和国家自然科学基金项目三项。获省科学技术进步奖两项，合作出版著作两部，发表科技文章30篇。

目 录

序

前 言

绪 论

- 一、冻融土壤系统水分运动规律的研究意义····· 1
- 二、冻土中水分运动的研究进展····· 3
- 三、冻融条件下土壤水分运动规律的主要研究内容····· 10

第一章 冻融土壤的基本特性····· 12

第一节 冻融土壤的一般特性····· 12

- 一、冻融土壤的基本组成····· 12
- 二、土壤的颗粒表面特征····· 13
- 三、冻融土壤的物理性质····· 17

第二节 冻融土壤的热特性····· 19

- 一、土壤的吸热性····· 19
- 二、土壤的散热性····· 20
- 三、土壤容积热容量和比热····· 20
- 四、土壤的导热性、导热系数及热扩散系数····· 22
- 五、相变热····· 26

第三节 冻土中的未冻水及其影响因素····· 27

- 一、土壤的粒度成分和矿物成分的影响····· 27
- 二、含盐量的影响····· 28
- 三、初始含水率和干容重的影响····· 29
- 四、荷载的影响····· 29
- 五、温度的影响····· 30

第四节 冻土的水力特性····· 31

- 一、导水系数(水力传导度)····· 31
- 二、比水容量(微分水容量)····· 32
- 三、扩散系数····· 33

第五节 冻融土壤中水分的能态····· 33

- 一、土壤水的形态分类····· 33
- 二、土壤水的能态理论····· 35
- 三、土壤水的能量状态——土水势····· 35

第二章 田间试验····· 40

第一节 试验条件····· 40

- 一、气候条件····· 40
- 二、试验区土壤条件····· 44
- 三、试验仪器、设备与设施····· 48

第二节 试验方案和试验方法	51
一、土壤冻结、融化试验	51
二、冻融土壤入渗试验	51
三、冬灌灌水试验	53
第三章 土壤的季节性冻结和融化	55
第一节 土壤的冻融机理	55
一、土壤水冻结的时间过程	55
二、土壤的冻结温度	56
三、土壤水冻结的空间顺序	57
四、土壤中水成冰类型	60
第二节 冻融过程中田间土壤的温度场	61
一、地面温度	61
二、地中温度	62
三、耕作及覆膜对越冬期土壤温度的影响	68
第三节 土壤的季节性冻融过程及特点	71
一、冻融过程及影响因素	71
二、冻融特点	73
第四节 小结	74
第四章 冻融土壤中的水分入渗	75
第一节 冻融土壤入渗基本特征	75
一、入渗的一般过程	75
二、冻融土壤入渗的季节性变化特征	77
三、入渗的日变化特征	79
第二节 冻土入渗减渗机理探讨	85
一、冻融土壤的减渗特性	85
二、冬春季节田间土壤的冻融特点及其减渗作用	85
三、冻融土壤减渗机理分析	86
第三节 土壤质地对冻融土壤入渗特性的影响	88
第四节 土壤结构对冻融土壤入渗特性的影响	92
第五节 土壤含水率对冻土入渗特性的影响	96
一、试验条件	96
二、试验结果与分析	96
第六节 冻(融)层厚度对冻土入渗特性的影响	100
第七节 地下水埋深对冻融土壤入渗特性的影响	105
一、地下水埋深对冻融土壤入渗能力的影响	105
二、地下水埋深对冻融土壤相对稳定入渗率的影响	107
三、不同地下水埋深条件下冻融期间土壤入渗能力的变化过程	108
四、地下水埋深通过对土壤含水率的影响实现其对土壤入渗能力的影响	109
第八节 灌溉水温对冻土入渗规律的影响	110
一、试验条件	110
二、试验结果及分析	111

第九节 小结	114
第五章 冻融土壤入渗能力和入渗模型参数的预报	115
第一节 冻融土壤入渗能力的预报模型研究	115
一、模型结构	115
二、模型变量选择	116
三、模型参数估计	117
四、回归模型的显著性检验	118
五、回归系数的显著性检验	120
六、预测	120
七、预报模型的选择及其在土壤入渗能力预报方面的应用	121
第二节 冻融土壤入渗模型参数的预报模型	122
一、概述	122
二、模型及参数估计	122
三、预测模型在其他试区土壤入渗模型参数预测中的应用	123
第三节 冻融土壤入渗过程的预报方法及实例	123
一、预报方法	123
二、预报实例	124
第四节 小结	125
第六章 冻融土壤中的水分迁移	126
第一节 冻融过程中的水分迁移	126
一、冻融过程中的土壤含水率变化	126
二、土壤冻结过程中水分迁移机理	128
三、土壤冻融过程中所发生的主要物理过程	129
四、冻融土壤水热盐耦合迁移问题的研究方法	130
第二节 冻融条件下土壤水热溶质运动基本方程	131
一、水分运动基本方程	131
二、热流迁移基本方程	135
三、溶质运移基本方程	138
第三节 一维雪-冻融土壤系统水热盐耦合迁移数学模型的建立	143
一、概述	143
二、雪-冻融土壤系统的大气边界条件	143
三、系统的能量平衡方程	148
四、系统的水量平衡方程	152
五、冻融土壤中的溶质平衡	155
六、降雨和入渗的计算	157
第四节 数值计算方法	159
一、冻融土壤水热盐迁移方程的有限差分计算格式	159
二、Newton-Raphson 迭代法	160
三、Newton-Raphson 迭代解的偏导数	161
四、计算程序小结	165
第五节 一维冻融土壤水热盐耦合迁移数值模拟模型的验证	167
一、田间试验概况	167

二、数值模拟模型的建立	172
三、模型的检验与校正	174
第六节 土壤水分迁移规律的模拟研究	182
一、季节性冻融过程中土壤含水率动态变化规律	182
二、冻融过程中土壤水分迁移规律	187
三、冬灌对冻融期土壤水分状况的影响	192
第七节 小结	197
第七章 越冬期地面灌溉水流运动数值模拟与灌溉技术	200
第一节 冬灌地面灌溉水流运动的数值模拟	200
一、冬灌地面灌溉水流运动模拟模型选择及其定解问题	200
二、灌水条件的近似、假定及有关参数的处理	202
三、定解问题的数值求解	203
四、灌水技术参数优化	206
五、模型验证	208
第二节 冬灌水流特性及灌溉效果	210
一、冬灌水流特性	210
二、冬灌灌水效果	210
第三节 提高冬灌灌水效果的技术措施	213
一、短畦灌溉技术措施	213
二、小流量灌溉	214
三、长畦灌溉	215
四、秋耕灌溉	216
五、最冷月免灌	217
第四节 小结	218
参考文献	219
附录 冻融土壤系统水热耦合迁移数值计算程序	224

CONTENTS

INTRODUCTION	(1)
Research significance of soil moisture movement	(1)
Outline of present research	(3)
Research contents	(10)
CHAPTER 1 BASIC PROPERTIES OF FREEZING AND THAWING SOILS	(12)
1.1 General properties of freezing and thawing soils	(12)
1.1.1 Composition of freezing and thawing soils	(12)
1.1.2 Features of soil grain surface	(13)
1.1.3 Physical properties of freezing and thawing soils	(17)
1.2 Thermal properties of freezing and thawing soils	(19)
1.2.1 Heat absorption capacity	(19)
1.2.2 Thermal diffusivity	(20)
1.2.3 Volumetric heat capacity and specific heat	(20)
1.2.4 Heat conductivity and thermal coefficient of conductivity	(22)
1.2.5 Latent heat of phase transition	(26)
1.3 Unfrozen water in frozen soil and its affecting factors	(27)
1.3.1 Granularity and mineral components of soil	(27)
1.3.2 Salinity of soil	(28)
1.3.3 Soil water content and dry density	(29)
1.3.4 Load	(29)
1.3.5 Temperature	(30)
1.4 Hydraulic properties of frozen soil	(31)
1.4.1 Unsaturated conductivity	(31)
1.4.2 Specific water capacity	(32)
1.4.3 Diffusion coefficient	(33)
1.5 Soil-water potential of freezing and thawing soil	(33)
1.5.1 Feature classification of soil water	(33)
1.5.2 Energy theory of soil water	(35)
1.5.3 Energy of soil water—soil-water potential	(35)
CHAPTER 2 FIELD EXPERIMENT	(40)
2.1 Experimental conditions	(40)
2.1.1 Climatic conditions	(40)
2.1.2 Soil conditions	(44)
2.1.3 Experimental apparatus and facilities	(48)

2.2	Experimental scheme and method	(51)
2.2.1	Field experiments on freezing and thawing processes	(51)
2.2.2	Experiments on infiltration	(51)
2.2.3	Experiments on winter irrigation	(53)
CHAPTER 3 SEASONAL FREEZING AND THAWING OF SOIL		(55)
3.1	Mechanism of freezing and thawing of soil	(55)
3.1.1	Time process of soil water freezing	(55)
3.1.2	Temperature of soil water freezing	(56)
3.1.3	Space process of soil water freezing	(57)
3.1.4	Types of ice formed in frozen soil	(60)
3.2	Soil temperature field in the process of soil freezing	(61)
3.2.1	Surface temperature	(61)
3.2.2	Soil temperature with varying depths	(62)
3.2.3	Effect of tillage and mulch on soil temperature during winter and spring	(68)
3.3	Seasonal freezing-thawing process of soil and its features	(71)
3.3.1	Freezing and thawing of soil and their influencing factors	(71)
3.3.2	Features of soil freezing and thawing	(73)
3.4	Summary and conclusions	(74)
CHAPTER 4 INFILTRATION IN FREEZING AND THAWING SOIL		(75)
4.1	Basic features of infiltration in freezing and thawing soils	(75)
4.1.1	General infiltration process	(75)
4.1.2	Seasonal variation of infiltration in freezing and thawing soils	(77)
4.1.3	Daily variation of infiltration in freezing and thawing soil	(79)
4.2	Mechanism of infiltration reduction caused by soil freezing	(85)
4.2.1	Characteristics of infiltration reduction in frozen soil	(85)
4.2.2	Freezing and thawing features of soil and infiltration reduction in winter and spring	(85)
4.2.3	Mechanism of infiltration reduction in frozen soil	(86)
4.3	Effect of soil texture on infiltration characteristic of frozen soil	(88)
4.4	Effect of soil structure on infiltration characteristic of frozen soil	(92)
4.5	Effect of soil moisture on infiltration characteristic of frozen soil	(96)
4.5.1	Experimental condition	(96)
4.5.2	Results and discussion	(96)
4.6	Effect of frost (thawed) depth on infiltration characteristic of frozen soil	(100)
4.7	Effect of groundwater level depth on infiltration characteristic of frozen soil	(105)
4.7.1	Effect of groundwater level depth on infiltration capacity of frozen soil	(105)
4.7.2	Effect of groundwater level depth on steady infiltration rate of frozen soil	(107)
4.7.3	Infiltration capacity variation during seasonal freezing-thawing period	(108)
4.7.4	Soil moisture profiles with varying groundwater level depths and their effect on infiltration capacity	(109)

4.8	Effect of irrigation water temperature on infiltration characteristic of frozen soil	(110)
4.8.1	Experimental condition	(110)
4.8.2	Results and discussion	(111)
4.9	Summary and conclusion	(114)
CHAPTER 5 FORECASTING MODEL FOR INFILTRATION CAPACITY		
AND PARAMETER OF FREEZING AND THAWING SOIL		
5.1	Forecasting model for infiltration capacity of freezing and thawing soil	(115)
5.1.1	Model structure	(115)
5.1.2	Selection of model variables	(116)
5.1.3	Estimation of model parameter	(117)
5.1.4	Significance test of regression model	(118)
5.1.5	Significance test of regression coefficient	(120)
5.1.6	Forecast	(120)
5.1.7	Application of forecasting model	(121)
5.2	Forecasting model for infiltration parameter of freezing and thawing soil	(122)
5.2.1	Introduction	(122)
5.2.2	Infiltration model and estimation of parameter	(122)
5.2.3	Application of forecasting model	(123)
5.3	Forecasting of infiltration process of freezing and thawing soil	(123)
5.3.1	Forecast method	(123)
5.3.2	Example of forecasting model application	(124)
5.4	Summary and conclusion	(125)
CHAPTER 6 SOIL WATER TRANSFER IN FREEZING AND THAWING SOIL		
6.1	Soil water transfer in freezing and thawing soil	(126)
6.1.1	Soil water content regime in winter and spring	(126)
6.1.2	Mechanism of soil moisture transfer in freezing and thawing soil	(128)
6.1.3	Main physical process occurring in freezing and thawing soil system	(129)
6.1.4	Research method for freezing and thawing soil system	(130)
6.2	Moisture, heat and solute movement equations in freezing and thawing soil system	(131)
6.2.1	Moisture movement equation	(131)
6.2.2	Heat transfer equation	(135)
6.2.3	Solute migration equation	(138)
6.3	Mathematical model of moisture, heat and solute transfer in one-dimension snow-frozen and unfrozen soil system	(143)
6.3.1	Introduction	(143)
6.3.2	Atmospheric boundary condition	(143)
6.3.3	Energy balance of the system	(148)
6.3.4	Water balance of the system	(152)

绪 论

一、冻融土壤系统水分运动规律的研究意义

1. 研究意义

土壤和水是自然环境和农业生产的两项基本资源，也是人类赖以生存的两大支柱，称之为土水体系。土壤和水作为一个系统，与外界环境不断地进行着水分和热量的交换，同时水分、溶质和热量在土水系统内进行着复杂的运动和迁移，因此这一体系属于动态开放体系。

水分是土壤的三相组成中最活跃的因素，水分的运动及变化是土壤中物质运动的主要形式，水分运动的同时伴有热量和溶质的传输。土壤中水分的运动主要包括入渗、迁移及其转化过程。土壤中的水流、含水率分布、溶质分布和热流、温度分布相互作用、相互影响，水热盐的耦合迁移决定了土壤的水热状况。一方面，土壤含水率的分布与变化，引起土壤热特性参数及溶质在空间和时间上的变化，从而影响土壤热流和温度分布；另一方面，温度及溶质的变化将引起水分物理化学性质的变化，从而导致土壤水分运动参数和基质势的变化而影响水分运动，同时温度梯度本身亦会引起水分运动。与土壤中水分运动紧密相关的另一个问题是土壤与大气之间的水、热交换。地气间的水热交换与土壤水热盐状况和近地表处大气边界层的状态有关。水分交换一般以蒸发和凝结的形式进行，同时在这一过程中伴随着巨大的相变潜热的吸收或释放，对土壤和大气之间的水量和热量平衡产生很大的影响。

季节性冻土是一种含冰晶的特殊土水体系。据研究，地球上中纬度大部分地区经受季节性冻融作用的影响。在我国，季节性冻土主要分布于北纬 30°以北地区，面积为 $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全国国土面积的 54%（徐学祖等，1991），这些地区大多属于干旱、半干旱的水资源短缺地区。土壤的冻融作用过程伴随着相组成的变化，土壤中的固相是由矿物质和冰共同组成的，同时伴随着土壤物理、化学以及物理化学性状的变化。冻土含冰率的变化既相当于液态水的动态储量，又等价于热量的动态变化。冻融土壤的相变及其伴生现象使得本来就不稳定的土水体系变得更加复杂。冻土中的水分运动方式主要有液态水运动和气态水运动两种，但液态水运动是冻土中水分运动的主要方式。冻土中水分运动的驱动力仍为总土水势，它是压力、重力、温度、基质、溶质等分势之和。这些分势既可以单独作用，又可以耦合作用，所以冻土体系是一个多因素综合作用的复杂系统。

在土壤冻融过程中，由于受相变的影响，土壤中冰、水共存，水、热、盐分的迁移具有更强烈的耦合性。土壤冻结过程中，冻结区水分冻结成冰，使土壤水热状况发生变化，土水系统的动态平衡遭到破坏，水分在土水势梯度作用下不断从未冻区向冻结区迁移。其结果是冻结区冰的含量不断增加，未冻水中的盐分不断积累，并引起土体冻胀。随着气候的逐渐变暖，土壤从表层开始融化，而其下的冻结层阻碍上层融水下渗，致使上层土壤含水率增加，出现春涝、翻浆等现象。在冻融过程中，土壤的水、热、盐分状况发生了剧烈

变化。

冻融土壤系统的水分运动作为自然界水循环的一个重要环节，在农业、水资源、环境及人类工程中占有极其重要的地位。这一课题的研究涉及到土壤、农业、水利、水文、气象及地质等多学科理论和相关知识，属于交叉复合型课题。对冻融土壤水分运动的深入研究，掌握其运动规律，不仅有助于促进非饱和带土壤水分入渗和迁移基础理论的发展，而且可为综合评价地表、地下水资源、有效利用土壤水资源、合理确定农田灌溉技术参数提供科学依据。因此，无论在理论上，还是在指导生产实践方面都具有重要意义。

2. 冻融土壤水分运动研究在农业生产方面的应用

在农业生产中，土壤水是陆生植物水分的源泉，热量则是生物赖以生存繁衍的基础。土壤中许多物理的、化学的、生物的过程，需要在一定的水分、温度条件下进行。水分、热量条件是影响植物分带及作物产量的决定性因素。在土壤含盐量较高的地区，冻结期盐分随水分运动迁移至表层，融化期随着水分的蒸发，盐分便积累在表层，出现地表泛盐和作物因生理脱水而死亡等现象。同时，在我国北方的大中型灌区，绝大部分冬、春灌溉都是在地表及其附近有冻层的条件下进行的，冬、春灌溉后土壤水分的保持和运移、农田灌溉合理灌水技术参数的确定都与土壤水分运动密切相关。因此土壤水分运动规律的研究对于农业的可持续稳定发展至关重要。随着水资源的日益短缺，我国农业用水所面临的形势极为严峻，农业节水灌溉和高效率用水已成为全社会所重视和关注的重大问题之一。

21世纪世界农业灌溉的发展趋势之一是灌溉方法仍然以地面灌溉为主，喷、微灌面积逐步扩大。到目前为止，我国95%以上的灌溉面积仍采用传统的地面灌水方法，而且可以预测，在今后很长时间内，地面灌水方法在我国农业灌溉中仍占绝对的主导地位。在中纬度地区，出于满足越冬作物水分需求、对水资源供需矛盾调节、污水水利用、灌水习惯和农事、劳动力安排等方面的考虑，冬小麦冬灌、秋地储水灌溉和播前灌溉以及盐碱地的冲洗灌溉等各种灌水，在早冬和早春进行的频度很高，且随着水资源供需矛盾的突出日益增高。如山西省汾河灌区（灌溉面积150万亩[●]，占到全省灌溉面积的10%）的秋地储水灌溉、冬灌及早春灌溉以及汾河冬季污水的利用灌溉都是在地表冻结的条件下进行的。汾河灌区的冬灌一般开始于11月上旬，一直延续到12月中下旬，几乎全部冬灌都在夜冻昼融或地表已稳定冻结的土壤条件下进行。春灌一般开始于3月上旬，此时，地表耕作层土壤处于夜冻昼融的状态，耕作层之下的犁底层处于完全冻结状态，犁底层的完全解冻一般年份在3月下旬或4月上旬，因此大部分春灌也是在冻融条件下进行的。据统计，汾河灌区多年平均供水量2.5亿m³，其中60%（1.5亿m³）在冬、春季节实施灌溉。冻融期间土壤水分运动规律的研究在农业灌溉中的应用主要表现在以下两个方面。

(1) 冻融期地面灌溉合理灌水技术参数的确定和灌水效果和灌溉质量的评价。在现行的地面灌溉技术中，灌水技术参数包括灌溉单宽流量、畦田规格、放水时间或封口成数等。这些灌水技术参数的合理确定和灌水质量的评价都以土壤水分入渗参数为依据。

(2) 地面灌溉灌水技术参数优化技术。随着地面灌溉水流运动理论的成熟，计算机模拟技术和优化技术在地面灌溉水流运动模拟中的应用，地面灌溉灌水技术参数优化技术即

● 1亩=666.6m²——编辑注。