

冻土中水分 迁移的实验研究

徐学祖 邓友生 著

科学出版社

冻土中水分迁移的实验研究

徐学祖 邓友生 著

国家自然科学基金资助项目

科学★出版社

1991

内 容 简 介

本书以大量实验资料为基础,从驱动力、迁移量和迁移系数三个方面较系统地论述冻结作用诱导下正冻土和已冻土中水分迁移规律。为增强实用性,对水分迁移引起的伴生现象(诸如冷生组构、冰分凝、冻胀和地表盐渍化等)及其工程实践意义和防治原理作了概述,并介绍了冻土中水分迁移的实验研究方法。

本书可供从事普通冻土学、工程冻土学、土壤物理学、土质学、地理学和寒区土木工程学等研究的工作者和工程技术人员,以及高等院校有关专业的师生参考。

冻土中水分迁移的实验研究

徐学祖 邓友生 著

责任编辑 朱升堂 吴三保

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

《冰川冻土》编辑部 微机编排

天水新华印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年4月 第一版 开本:787×1092 1/16

1991年4月第一次印刷 印张:9 $\frac{1}{2}$

印数:001—800 字数:225千字

ISBN 7-03-002490-7/P·508

定价:8.00元

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，我们称之为土水体系。在寒冷地区，随着气候的波动，由于温度因子的参与，会使本来就十分不稳定的土水体系加剧冻融、干湿、胀缩、分散和凝聚，以及开裂和团聚等一系列物理、力学和物理化学过程的交替演变，给人类的工程活动、农林牧业生产和自然环境带来危害。因此，掌握冻土中热质迁移的知识显得十分重要。

笔者徐学祖从1981年开始踏上冻土水分迁移课题的研究征途，有幸于1983—1984年间作为访问学者在美国寒区研究和工程实验室做了专题进修，回国后立即得到了国家自然科学基金委员会和中国科学院兰州冰川冻土研究所的资助，正式筹建实验室，工作中得到冻土工程国家重点实验室提供有关仪器设备及技术上的帮助。

本书是笔者徐学祖多年工作，特别是与助手邓友生同志共同完成“冻土中水分迁移规律的试验研究”这一国家自然科学基金资助课题的一份总结，把它献给从事普通冻土学、工程冻土学、土壤物理学、地质学、地理学和土木工程学等科学研究的专业工作者和师生们，希望读者们能在冻土中水分迁移的基本原理及其与冻胀、盐分迁移和冷生构造的关系，以及如何开展有关实验等方面有所收益。

冻土中水分迁移课题的研究内容十分广泛，影响因素错综复杂，本书所涉及的内容还远不能包罗问题的各个方面，研究工作还有待于深化。

我们衷心感谢国家自然科学基金委员会、中国科学院兰州冰川冻土研究所、冻土工程国家重点实验室在完成本课题研究中给予的资助，施雅风、谢自楚和周幼吾所领导对我们的鼓励和指导，吴紫汪、程国栋和朱元林同志的关心和支持，王家澄和刘继民等同志的通力合作，张长庆、沈忠言、吴邦俊、张学珍和赵新民等同志在工作中提供的方便和帮助，张园等计划处全体同志、朱国才和谢应钦等技术处全体同志与孙兴柏等低温机房全体同志的大力协助，内蒙古自治区水利科学研究所高维跃副所长和王风娥等同志进行的有关协作，程国栋同志对本书的精心审阅，《冰川冻土》编辑部何兴同志负责编辑出版，徐月珍、梁博文、祝国存同志参加编辑、校对和出版工作。

徐学祖 邓友生

1990年3月

本研究成果由下列单位资助完成:

国家自然科学基金委员会

中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室

目 录

前言	(i)
绪论	(1)
第一章 冻土中水分迁移的驱动力	(9)
第一节 概述	(9)
一、土和水	(9)
二、影响水分迁移驱动力的基本要素	(13)
第二节 地温	(13)
一、地面温度	(13)
二、地中温度	(18)
三、土的冻结和融化温度	(19)
第三节 未冻水	(21)
一、未冻水含量的影响因素	(21)
二、确定未冻水含量的快速方法	(26)
第四节 土水势	(29)
一、土水势及其分量	(29)
二、土水势的影响因素	(32)
第五节 小结	(35)
第二章 不同条件下冻土中水分迁移规律	(36)
第一节 开放系统饱水正冻土中的水分迁移	(36)
一、试验方法	(36)
二、试验结果和分析	(37)
第二节 封闭系统正冻土中的水分迁移	(45)
一、试验方法	(45)
二、结果和分析	(45)
第三节 封闭系统已冻土中的水分迁移	(52)
一、试验方法	(52)
二、结果和分析	(54)
第四节 开放系统非饱和正冻土中水分迁移的现场观测	(60)
一、试验方法	(60)
二、结果和分析	(61)
第五节 小结	(69)
第三章 土的热质交换系数及其影响因素	(71)
第一节 热交换系数及其影响因素	(71)
一、容积热容量	(71)

二、导热系数·····	(73)
三、导温系数 (热扩散系数) ·····	(78)
四、相变热·····	(81)
五、根据土物理指标求取计算热参数·····	(82)
第二节 质交换系数及其影响因素·····	(82)
一、微分水容量·····	(82)
二、导湿系数·····	(88)
三、扩散系数·····	(93)
第三节 小结·····	(94)
第四章 水分迁移过程中的伴生现象·····	(95)
第一节 冰分凝及土层构造变化·····	(95)
一、冻结时土中发生的物理过程·····	(95)
二、冻结后土层结构构造的变化·····	(98)
三、冰分凝及土层构造变化的研究意义·····	(100)
第二节 冻胀·····	(101)
一、冻胀机理·····	(101)
二、冻胀防治方法原理·····	(103)
第三节 地表盐渍化·····	(106)
一、地表盐渍化的形成机理·····	(106)
二、地表盐渍化的防治方法原理·····	(108)
第五章 水分迁移的试验研究方法·····	(114)
第一节 水分迁移的室内试验装置·····	(114)
一、设计思想·····	(114)
二、装置结构·····	(114)
三、装置运行效果·····	(118)
第二节 起始冻结温度的测试方法 (热电偶测温法) ·····	(120)
一、试验原理·····	(120)
二、仪器设备及操作步骤·····	(120)
第三节 未冻水含量的测试方法 (脉冲核磁共振技术) ·····	(121)
一、试验原理·····	(121)
二、仪器设备及操作步骤·····	(121)
第四节 土水势的测定方法·····	(123)
一、吸湿法·····	(124)
二、冰点降低法·····	(125)
三、压力排水法·····	(125)
第五节 导湿系数的测定方法·····	(127)
第六节 扩散系数的测定方法·····	(129)
参考文献·····	(132)

Experimental Study on Water Migration in Freezing and Frozen Soils

CONTENTS

Preface.....	(i)
Introduction	(1)
Chapter 1 Driving Force of Water Migration in Freezing and Frozen Soils	(9)
1.1 Introduction	(9)
1.1.1 Soil and water	(9)
1.1.2 Essential factors affecting driving force of water migration	(13)
1.2 Ground Temperature	(13)
1.2.1 Ground surface temperature	(13)
1.2.2 Ground temperature	(18)
1.2.3 Freezing and thawing temperatures of soils	(19)
1.3 Unfrozen Water	(21)
1.3.1 Factors affecting unfrozen water content of frozen soils	(21)
1.3.2 Speed method of measuring unfrozen water content in frozen soils	(26)
1.4 Soil Water Potential	(29)
1.4.1 Soil water potential and its component	(29)
1.4.2 Factors affecting soil water potential	(32)
1.5 Summary	(35)
Chapter 2 Regularity of Water Migration in Freezing and Frozen Soils	(36)
Under Different conditions	(36)
2.1 Water Migration of Saturated Freezing Soils in Open System	(36)
2.1.1 Experimental method	(36)
2.1.2 Results and analysis	(37)
2.2 Water Migration of Freezing Soils in Closed System	(45)
2.2.1 Experimental method	(45)
2.2.2 Results and analysis	(45)
2.3 Water Migration of Frozen Soils in Closed System	(52)
2.3.1 Experimental method	(52)
2.3.2 Results and analysis	(54)
2.4 Field Observation of Water Migration of Unsaturated Freezing Soils in Open System	(60)
2.4.1 Experimental method	(60)

2.4.2 Results and analysis	(61)
2.5 Summary	(69)
Chapter 3 Heat and Mass Transfer Coefficients of Soils and Their Influencing	
Factors	(71)
3.1 Heat Transfer Coefficients and Their Influencing Factors	(71)
3.1.1 Heat capacity	(71)
3.1.2 Thermal conductivity	(73)
3.1.3 Thermal diffusivity	(78)
3.1.4 Heat of phase transition	(81)
3.1.5 Determination of heat transfer coefficients by physical parameters of soils	(82)
3.2 Mass Transfer Coefficients and Their Influencing Factors	(82)
3.2.1 Differential water capacity	(82)
3.2.2 Hydraulic conductivity	(88)
3.2.3 Hydraulic diffusivity	(93)
3.3 Summary	(94)
Chapter 4 Associated Phenomena in Water Migration Processes	(95)
4.1 Ice Segregation and Structure Changing of Soil Layers	(95)
4.1.1 Physical processes during soil freezing	(95)
4.1.2 Change of soil structure after freezing	(98)
4.1.3 Significance of studying ice segregation and structure changing of Soils	(100)
4.2 Frost Heaving	(101)
4.2.1 Mechanism of frost heaving	(101)
4.2.2 Principle of preventing engineering construction from frost heaving	(103)
4.3 Salinization on Ground surface	(106)
4.3.1 Mechanism of salinization formation on ground surface	(106)
4.3.2 Principle of preventing salinization on ground surface	(108)
Chapter 5 Experimental Methods for studying Water Migration in Freezing and	
Frozen Soils	(114)
5.1 Apparatus Used for Water Migration Test in the Laboratory	(114)
5.1.1 Design of apparatus	(114)
5.1.2 Structure of apparatus	(114)
5.1.3 Operation effect of apparatus	(118)
5.2 Method Used for Determining Initial Freezing Point of Soils (Determination of Temperature by Thermocouple)	(120)

5.2.1 Test principle	(120)
5.2.2 Device and operation	(120)
5.3 Method Used for Determining Unfrozen Water Content in Frozen Soils (Technique of Pulsed Nuclear Magnetic Resonance)	(121)
5.3.1 Test principle	(121)
5.3.2 Device and Operation	(121)
5.4 Methods Used for Determining Soil Water Potential	(123)
5.4.1 Method of moisture absorption	(124)
5.4.2 Method of freezing point depression	(125)
5.4.3 Method of pressure extraction	(125)
5.5 Method Used for Determining Hydraulic Conductivity	(127)
5.6 Method Used for Determining Hydraulic diffusivity	(129)
References	(132)

绪 论

地球上中纬度地区的大部分土地都遭受季节冻结。在高纬度地区，除了表层有一个季节融化层外，地下的土层在某个深度范围内长年处于冻结状态（多年冻土）。我国多年冻土区的分布面积约为 $2.068 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，季节冻土区的分布面积为 $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，两者合计约占全国面积的 75%（徐学祖、王家澄，1983）。

湿土的冻结，引起水分向正冻带运动，并试图以冰的形式充填这个带。在非压缩土体中，这些冰体通常排列成与等温线相平行的透镜状，在高压压缩土体中，通常呈交错的冰脉在三维空间构成网状。

土中冰体的形成和发育，引起冻胀。冻胀能产生巨大的力，使得挡土构筑物产生位移，铺砌物、构筑物的基础、管道、栅栏和电线杆被抬起、扭曲甚至断裂破坏。经历水分迁移和冻胀的道路，常常形成“搓板”式，不但影响行车速度，而且大大加速部件的损耗。

因为冰要作为纯净相而形成，溶质在未冻水中就要浓缩，所以在冻结锋面附近的潮湿带中会发育一个溶质浓度较高的带。处于高浓度带中的生物组织将由于土壤环境冻结而强烈脱水。地下水埋藏浅且矿化度高的地区，盐分随水迁移而引向地表，加剧了土壤盐渍化的进程。融化期，冻结带以上的土保持过剩的融水并可能完全失去强度。融水通过表土向上渗出，不但形成“春涝”影响春耕，而且使肥沃的营养流失。

冻害防治的实践，使人们深刻的认识到土层冻融过程中的水分迁移是万恶之源。目前冻土（包括正冻土和已冻土）中的水分迁移，已被视为土冻结作用中的一个核心问题，分别列入了土木工程、农业和地质学科的科学原理之一，并作为土壤科学、环境科学、建筑学和地理学中的一个重要研究课题，受到世界上许多国家的重视。

已经召开的五届国际多年冻土会议和国际土冻结会议分别涉及了这方面的内容，美国公路研究部及其它国家的类似组织已多次进行了有关专题会议，联合国科教文组织专门开办过寒区水土问题的讲习班等等。据不完全统计，除我国外，国外目前开展该课题研究的主要有 10 个国家（见表 1），研究成果除以会议论文集和专著的形式发表外，经常可以在下列四种杂志里看到：《地球表面过程》(Earth Surface Processes)、《土壤科学》(Soil Science)、《水资源研究》(Water Resources Research)和《加拿大土工杂志》(Canadian Geotechnique)。

国内从 60 年代开始，先后有东北水利科学院长春水利科学研究所、哈尔滨工业大学土木工程系、北京建筑科学研究院以及中国科学院兰州冰川冻土研究所，开展冻土中水的相成分测试。进入 70 年代后，铁路、交通、水利和林业部门的有关单位逐步开展了现场观测。80 年代中国科学院兰州冰川冻土研究所开展了较系统的室内试验研究。

冻土中水分迁移是指冻结过程中由温度梯度诱导土中毛细水和薄膜水的迁移。该课题所涉及的研究内容及其相互关系大致可用下列方框图来表示（图 1）。

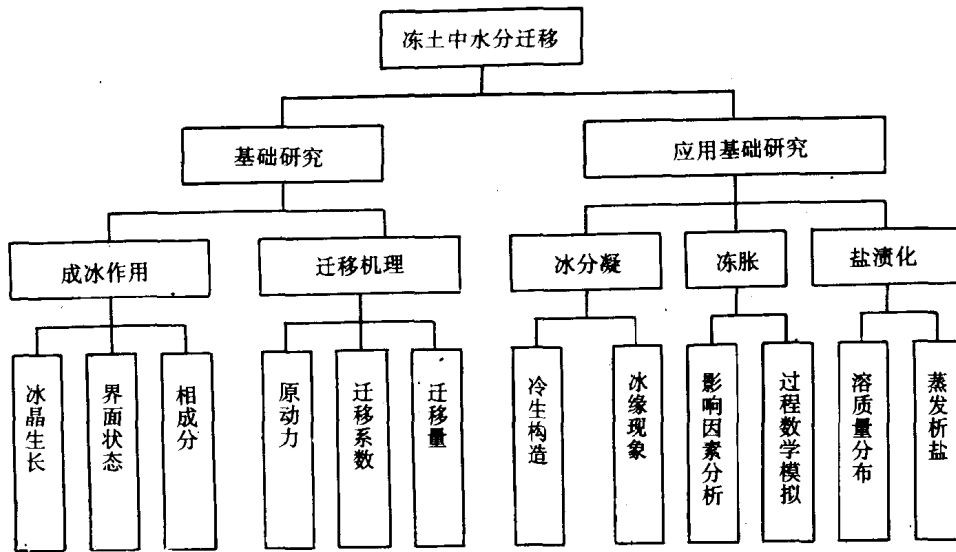


图1 水分迁移课题研究内容方框图

这里不再追溯该课题的研究历史，仅就上述内容近年来的研究概况作一轮廓介绍。由图1可见，冻土中水分迁移可分为基础研究和应用基础研究两大部分，相应表现为两个研究方向：一是从分子水平上探讨土与水（包括液态水和固态冰）的相互作用。根据表面现象理论、土与水相互作用的物理化学实质、相转换动力学原理、水和冰结构的分子能量概念以及构成冰-水-土颗粒体系的界面分子能量概念，阐明土颗粒影响范围内的水（溶液）分子活动规律。二是研究土中水的性状与土的分散性、成分、结构、含水量、温度及其它因素的定量关系和肉眼看不见的规律性，在进行实验研究的同时，广泛应用微分方程及其解来描述冻土水分迁移过程。

目前已分出四种界面：冰-冰界面、水-冰-汽界面、硅酸盐-水-硅酸盐界面以及硅酸盐-水-冰界面。

在浓缩成冰-冰界面后，所有其它的界面都变成具有类液特征的成分。类液成分在熔结和晶粒边界移动中应该起作用，其基本原动力是内部自由能的降低和缓慢冻结期间创造的晶体内部应力。目前，对于不涉及冰-汽界面的地方，晶粒边界移动是通过晶格空穴扩散而出现，并且似乎不涉及类液特征，这一点基本上是被人们接受的。

在冰-汽界面的情况下，由于冰表面经常有杂质，且由于红外线或其它辐射能的影响，因此许多学者假设了类液迁移层的存在。

硅酸盐-水界面通常在冻结温度以上出现。这种类型的水已被广泛研究。近年来，主要的争议在于用静电理论和双电层理论来解释土-水相互作用的适用范围，以及是否粘土与水之间的亲和力有助于建立土矿物表面上的氢键水的结构。

根据最近电导、核磁共振和红外吸附的资料，得到了这样一种看法，即最接近硅酸盐表面的水不是强的氢键，在粘土吸附水中的氢键比自由水中要少而不是多。

在这些研究中，很重要的一点是随着矿物水合作用的下降，质子有效性增大。水化

表 1 国外研究冻土中水分迁移课题的主要国家和地区

序号	国 名	部 门	人 名
1	加拿大	国家研究理事会建筑研究部	E.Penner(已退休)、O.G.Svec
		埃德蒙顿阿尔伯塔大学土木工程系	D.Hill 和 N.R.Morgensten
		轧尔夫大学陆地资源科学系	B.D.Kay
		滑铁庐大学地球科学系	J.M.Konrad
		渥太华卡莱通大学地理系	P.J.Williams
		卡尔加略大学	S.A.Harris
2	美国	华盛顿国家科学院	D.M.Anderson
		陆军寒区研究和工程实验室	S.Takagi、Y.Nakano、A.R.Tice
		柯纳尔大学农艺系	R.D.Miller(已退休)& T.P.G.Loch
		加利福尼亚州立大学陆地、空气和水资源系	J.N.Luthin
		新泽西州立大学土木环境工程系	A.R.Jumikis
		阿拉斯加费尔班克斯大学水资源研究所	R.F.Carlson
3	苏联	莫斯科大学地质系	A.D.Earchov、U.P.Arkimov Yu.P.Lebedenko、Ye.Chuvilin
		全苏水文地质工程地质科学研究所	A.A.Ananyan
		地基和地下建筑研究所冻土物理化学实验室	L.V.Chistotinov
		北方物理技术问题研究所	H.V.Kostetskaga & N.N.Kozhevaikov
		苏联科学院西伯利亚分院冻土所	G.M.Feldman、V.P.Romanov、A.S.Olovin
4	法国	国家科学研究中心空气动力学实验室	J.Aguirre Puente
		道路桥梁中心实验室	M.Fremond
		刚大学地貌研究中心	Van Viet- Lanoe B
5	日本	北海道大学低温科学研究所	M.Fukuda & K.Horiguchi
		东京塔凯纳卡技术研究实验室	T.Ueda

续表 1

序号	国 名	部 门	人 名
6	英国	诺丁汗大学土木工程系	J.T.Holden & R.H.Jones
		布里斯托大学地理系	T.P.Burt
7	瑞典	鲁尔大学土力学系	R.Pureh
		道路交通研究所	R.Gandahl
8	挪威	特隆德赫姆工学院物理化学系	K.S.Føland
		特隆德赫姆工学院冷冻工程系	Φ.Johansen & R.S.Norval
9	芬兰	吞普尔技术大学土木工程系	L.S.Keinonen
10	意大利	佛罗伦萨大学数学系	A.Fasano

离子和吸附水愈接近矿物表面，则酸性愈大。接触界面是以一个很大的几何不均匀性的区域出现的，而不是准结晶状态。

在讨论冰成核作用中，已提出一个有用的硅酸盐—水的模型，描绘了在固体外面达到一定距离的一个带，设想了氢键区域的扩大，因此有助于冰核晶芽的形成和生长。这是均质成核作用的一种特殊情况。

直到目前为止，关于硅酸盐—水—冰界面的情况还研究得很少。但根据冻结的蒙脱土—水混合物 X 射线衍射研究已经知道，随着负温的变化会出现晶格的收缩和扩张，即冰的逐渐融化和融水迁移回到层间空间，或融水重新结冰。此外，还发现粘土—水混合物中的未冻水含量与层间空间的体积相一致，这说明粘土—水体系冻结时，冰在外层空间结晶。于是，确定了冻土中有两种界面共存的情况，即层间空间的硅酸盐—水—硅酸盐界面和围绕单个胶粒外的硅酸盐—水—冰界面。在蒙脱土—水体系中，层间的硅酸盐—水—硅酸盐界面占优势，而在高岭土—水体系中，则是硅酸盐—水—冰界面占优势。

冻土中界面水的类液特征已经很好地确定了。电导测量已证明了界面水电子的高的迁移率。冰中悬浮土粒沿热梯度方向迁移的事实表明，矿物颗粒除了与冰有最弱的和暂时的联系外，它是相当自由的。

相成分研究中，冻土中水和冰的平衡状态原理，即冻土中含的未冻水和冰的数量、成分和性质，不是固定不变的，而是随外界作用的变化而变化，并且水与冰处于动力平衡之中（Цетович, Н. А., 1945），至今仍被接受。目前则侧重于冰点降低的机理和相转换动力学的研究。

冻土中水分迁移机理一个完整的定性定义应该包括原动力、迁移系数和迁移量的确定。

关于冻土中水分迁移原动力的一种普遍的提法叫做吸着力，即一系列分子作用力的

总和。为了确定原动力的数值，曾提出过下列 14 种假说：

- (1) 毛细力 (Шмукенберн, 1885, 1894);
- (2) 液体内部的静压力 (Прасолов, 1914; Драницын, 1914; Сумгин, 1937 等);
- (3) 结晶力 (Taber, 1917, 1930, Вовуосос, 1923);
- (4) 蒸汽状态水的位移 (Лебедев, 1936);
- (5) 气压液泡 (Гольдштейн, 1940);
- (6) 允吸力 (Ruckli, 1943; Пузаков 等, 1950);
- (7) 渗透压力 (Гольдштейн, 1948);
- (8) 电渗力 (Ананян, 1956);
- (9) 真空抽吸力 (Таисев, 1956);
- (10) 化学势 (Тютюнов, 1960);
- (11) 趋向冻结锋面的液压降低 (Everett; Williams, 1968);
- (12) 冻结带中的液压梯度 (Hoekstra, 1969);
- (13) 冻结带中自发孔隙充填 (Miller, 1973);
- (14) 冰压力梯度 (Miller 等, 1975)。

因为自然条件下，水分迁移取决于力学的、物理的和物理化学因素的总和，所以上述每一种假说，都只能代表某种特定条件下水分迁移的原动力。

30 年代以来，国外把能量观点逐步引入这个领域，用以解释土壤的持水性并进行土壤水分动态研究。土中任何一个给定位置上的水分都受到许多力的作用，包括处于潜水位以上水的重量、在非饱和土中水与固体颗粒的相互作用、土壤水中溶质的存在以及高程等等。因为这些力有不同的作用方向，很难找出它们对水分迁移的综合效应，所以引进土壤水的势能概念后，水势梯度就从数量上和方向上给出了水分迁移的原动力。60 年代初期，国际土壤学会提出了土壤水分势能的划分及其定义。土壤水的总势等于由压力、重力、温度、基质、溶质和电力等构成的分势的总和，其中任何一种分势梯度都可引起水分迁移。

试验已经肯定，由于冻土中有未冻水存在并把冰和土颗粒分割开来，因此冻土中液相水迁移的薄膜假说已得到大多数学者的承认。土颗粒外围的未冻水层是不对称的，暖面最厚，冷面最薄。这种不对称性导致了一个不平衡的渗透压力，于是所产生的液流提供了冰透镜体生长所要求的水分（复冰现象）。蒸汽输运不是冻土中水分迁移的主要方式。非饱和冻土中，只有在相互联系的孔隙中被冰堵塞时，蒸汽输运才起作用。

研究土中水分迁移系数的方法可分为三大类，即稳定态、准稳定态和非稳定态法。

稳定态法被认为是最可靠并通常视为标准的方法。测定未冻土水分迁移系数的准稳定态法已广泛用于室内外条件，这种方法是基于把不稳定的水分迁移过程人为地分为许多个很小的时间区段，并认为在此时段内是稳定的。准稳定态法的精度随时间间隔的缩短而提高，但与稳定态法相比，总要低一些。基于利用两个相互接触的半无限体系水分迁移方程非线性解的分析，来测定土中水分迁移系数的非稳定态法是一种近似方法。研究冻土中水分迁移系数还做得很少。饱和未冻土的导湿系数取决于土类、密度并与土的

成因历史有关,在非饱和未冻土中有更复杂的函数依赖关系。可以预料,冻土中由于冰的存在,这种关系就更为复杂了。

建立在能量和质量守恒定律基础上的毛细——多孔介质中热质迁移理论已广泛用于冻土中水分迁移的计算。已提出了一些描述正冻土中热质迁移的数学模型及其数值分析的实例,但这些模型大都是建立在母岩具有一定几何形状的假设基础上,不适用于富冰冻土。总之,正冻土和已冻土中水分迁移过程的研究还是不很深入的,综合考虑土中水热运输的数学模型仍处于探索阶段,绝大多数模型没有经过野外验证。

在冻土中水分迁移的应用基础研究中,冰分凝或冷生构造的形成问题,被看作是水分迁移过程的一个必然的组成部分,而不是一个具有独立意义的综合性问题。冰分凝的研究大致可分出四个方向:

岩石学方向——把冰看作为一个特殊的地质矿物体,研究冰晶形态和主要生长方向与矿物成分和冻结速度的关系,在此基础上解释各种冷生构造的形成和发育机理。

物理力学方向——侧重正冻土中冷生构造形成的热学和力学条件,研究各种排列的冰层以及加积和继承冷生构造类型的形成原理和机理。

热物理方向——从土中热交换和水分迁移条件出发,研究冷生构造形成机理。其中冻结锋面上的热平衡条件对冰条带的生长起主导作用。热平衡一旦被破坏就导致土层的进一步冻结和新冰层的生长。

地质成因方向——侧重研究地质因素在各种类型冷生构造形成中的作用。

到目前为止,只有关于正冻土中冰条带产生位置、发育条件和排列(垂直的、水平的、倾斜的、连续的和连续的)等有限的试验研究。一种普遍的看法是,要弄清并全面分析冰晶生长和冰层特征、收缩过程的作用、冷生构造形成过程中的膨胀和组构等规律,必须把冻土的热物理、质交换、物理力学和地质成因条件密切结合起来。

冻胀是冻土中水分迁移课题应用基础研究中,工程冻土界十分关心和活跃的课题。近年来的研究主要集中在冻胀与冰透镜体的形成和位置的关系、冻胀与冻渗、外加载荷和放热率的关系以及冻胀过程的数学模拟等方面。

密勒(R.D.Miller, 1972)提出正冻粘性土中,在冰透镜体底面与冻结锋面之间,存在着一个低含水量、低导湿率和无冻胀的一个带,称作冻结缘(Frozen fringe)。潘纳(Penner)和尤塔(Ueda)(1977)的试验结果也支持了冻结缘这个概念。这是一个很重要的概念,因为生长冰透镜体底面的温度决定着最大冻胀压力。用克劳修斯—克拉伯隆方程可算出冰透镜体底面的温降,然后假定冻结过程中水压没有变化,则根据温度可算出冻胀压力。

康莱德(Konrad)和莫更斯吞(Morgensten, 1980, 1981),在忽略积土压力的情况下,研究了正冻土柱中准稳定条件(冰透镜体生长的极限条件),得到冻结缘中的液体入流速度与估算的温度梯度之间成正比关系,比例系数称作分凝势。对于每一种特定的土,分凝势的数值取决于冻结缘中的总的渗透性、分凝冻结温度和冻结缘中的平均负压。分凝势及其依赖关系作为质通量与热力驱动力之间的基本联接纽带是先进的,因此它已被看作是冻胀工程理论的基础。

为了了解冻胀率与冻渗速率之间的关系,潘纳等作了许多实验。他们用两种办法来

增加冻胀率：一是保持冷面温度不变，逐级降低暖面温度；二是保持暖面温度不变，逐级降低冷面温度。

在保持暖面温度不变的情况下，冻胀率的变化可达 5 倍。这是由于降低冷面温度后，增加了生长冰透镜体与土接触界面的负压。而在保持冷面温度不变的情况下，尽管冻渗的速率是变化的，但每一次实验都可以得到相同的总冻胀率。这种现象已引起有关学者的注意和兴趣，并在探讨其原因。一种可能的解释是，土中水原位冻结时，每散失 334.56kJ/Kg 热量仅使体积膨胀 0.09cm^3 ，而对向试样提供的水来说，散失同等数量的热量，则会造成体积膨胀 1.09cm^3 。因此，出现冻胀的生长冰透镜体锋面（在试样中其位置是不断变化的）上的负压是不变的，并且在生长冰透镜体（虽然它是向下移动的）前面的冻结缘的渗透性在这样的试验中是冻胀率的控制因素。

对任何一种给定的土，在给定荷载的情况下，冰分凝锋面都会出现一个负压，且这个负压只随放热率的增大而达到某个极值。至于冻胀率的对数与外加荷载之间存在着线性相关关系，这是目前一致公认的。

描述冻胀的必要的方程，必须包括导致热和水分梯度的热流和水流方程。目前提出的方程一般都考虑了水热的共轭作用，且用平衡热力学方法来预报或描述给定条件下土的冻胀率、冻胀量、含冰量和未冻水含量以及冻胀压力。

泰卡基 (Takagi) 曾指出了用平衡热力学来描述动力过程占优势情况的缺点，并提出用不可逆热力学方法来描述土冻胀动力过程的可能性。但有的学者认为，平衡方法仍然是有效的，并应进一步发展。

关于冻结过程中盐分迁移的研究，国内外都尚处于初始阶段。已有的研究表明，开放系统单向冻结的正冻土中，水分和盐分均向正冻带迁移。但在水溶液单向冻结时，盐分则向未冻溶液迁移，且其相对迁移量随溶液原始浓度和冻结速度的增大而减小。在盐随水迁的总趋势下，由于冰作为纯净相析出，因此在冰透镜体附近，会出现盐分的“高浓度带”，由此产生盐分在浓度梯度下的扩散机理。

冻融过程中的盐分迁移，不但会改变土的物理化学和力学性质，导致寒区表土盐渍化的形成和发育，而且可以控制冻胀，对于同一种土，增加其中的易溶盐含量，可使冻土中的未冻水含量相应增大、冻胀量和总含冰量减小。

综上所述，国内外关于冻土中水分迁移课题的研究，在科研、生产和教育部门的密切配合下，近年来取得了许多可喜的进展，其具体表现是：在大量宏观现象试验观测的基础上，加强了微观结构和界面状态的试验分析和定量研究。但由于该课题的复杂性（冻土中水分迁移本身是多种因素综合作用的结果，且野外地质条件错综复杂），研究尚待深化。国际冻土学会主席佩威(Pewe)教授曾指出，查明冻融过程中水盐迁移规律，这是冻土学发展中一条潜力很大的新途径。