

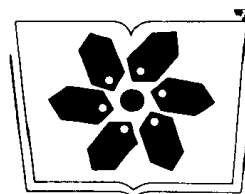
徐学祖  
王家澄 著  
张立新



# 冻土物理学



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

# 冻土物理学

徐学祖 王家澄 张立新 著

科学出版社

2001

## 内 容 简 介

本书集大量室内试验及国内外相关研究资料于一体,侧重论述冻土物理学中能量和物质输运的基本理论,分析土体冻结和融化诱发不均匀冻胀、融化下沉、盐胀、地表次生盐渍化及土地沙化的原因及对策和冻土利用。具体内容包括:冻土分布定名及勘测要求,冻土的基本物理性质,温度在地中的传播,未冻水动力学原理,土中水冻结时的成冰作用及冻土中冷生构造形成的影响因素,土体的冻胀和盐胀,冻土的改造和利用,以及冻、融土基本性质比较先进的测定方法。

本书旨在为自然地理专业冻土专门化及地质工程专业的研究生提供冻土物理学的基本教材,同时可供从事冻土学、寒区旱区工程建设、农业物理的研究、设计人员参考,并可作为高等院校工程地质、土木工程、农业物理和生态环境等专业的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

冻土物理学/徐学祖,王家澄,张立新著.-北京:科学出版社,2001  
ISBN 7-03-006555-7

I. 冻… II. ①徐… ②王… ③张… III. 冻土学:物理学 IV. P642.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 61894 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| 2001 年 4 月第 一 版 | 开本:787×1092 1/16 |
| 2001 年 4 月第一次印刷 | 印张:22 3/4        |
| 印数:1—1 000      | 字数:520 000       |

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 致 谢

本书由下列单位联合资助出版：

- 国家自然科学基金委员会(特殊学科人才培养基金)
- 中国科学院科学出版基金委员会
- 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所  
冻土工程国家重点实验室
- 绍兴文理学院

# 前 言

我国是世界上多年冻土分布面积的第三大国。多年冻土和季节冻土区分布面积分别占全国面积的 21.5% 和 53.5%。盐渍土面积约占全国面积的 2%。目前我国约有 1/5 耕地存在不同程度的盐渍化和次生盐渍化特征,有 2.6 亿亩受潜在盐渍化威胁的土壤。我国沙漠化土地面积占国土面积的 3.86%,年发展速率为 1.47%。冻土区土体冻胀和融沉及严寒区的地表盐渍化、盐胀及沙化是制约我国干寒区经济发展的重要因素。

土壤和水是构成自然环境和农业的两项基本资源,也是人类赖以生存的两大支柱。随着气候的波动,由于温度因子的参与,使本来就十分不稳定的土水体系加剧了冻融、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,冻土及其演化对人类的生存环境、生产活动和可持续发展具有极其重要的影响,加深和传播冻土中热质迁移的知识就显得愈加重要了。

笔者徐学祖<sup>①</sup>从 1981 年开始踏上冻土中水分迁移课题研究的征途,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,筹建实验室并在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。

本书是笔者徐学祖研究员多年工作,特别是与同事王家澄研究员、张立新研究员、邓友生高级工程师和李萍博士共同完成“冻土中水分迁移规律的试验研究”、“正冻土中盐分迁移全过程的实验研究”和“正冻土中冻结缘的成因和特征的实验研究”等三项国家自然科学基金资助课题及冻土工程国家重点实验室组织中、俄、日国际合作研究的结晶,在此基础上搭起了我国冻土物理学的框架,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学科的专业工作者和师生们,希望读者们能在温度梯度诱导下,在冻土中水分、盐分和颗粒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冻土利用和冻害防治等方面有所收益。

本书第 2.3.3 和 2.3.5 节由张立新研究员撰写,第五章、4.5 节、8.1 至 8.5 及 8.13 节由王家澄研究员撰写,其余章节由徐学祖研究员撰写,全书由程国栋院士审阅。

冻土物理学的研究内容十分广泛,影响因素错综复杂,本书所涉及的内容和深度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、中国科学院兰州寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室在完成课题研究中给予的资助和支持,施雅风、程国栋院士和绍兴文理学院费君清院长对我们的鼓励和指导,吴紫旺和朱元林研究员的关心和支持,邓友生、陶兆祥、王玉杰、顾同欣、赵建军和李萍等同志在工作中提供的方便和帮助,科研处全体同志及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前所长和美国寒区研究和工程实验室、俄罗斯莫斯科大学冻土教研室和日本北海道大学低温科学研究所有关学者进行的协作。

徐学祖  
1999 年 3 月

<sup>①</sup> 徐学祖工作单位:绍兴文理学院,联系地址:浙江省绍兴市环城西路 5 号,邮编:312000

# 目 录

## 前 言

|           |       |
|-----------|-------|
| 绪 论 ..... | ( 1 ) |
|-----------|-------|

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第一章 冻土分布定名及勘测要求 ..... | ( 9 ) |
|-----------------------|-------|

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 1.1 我国冻土的分布 ..... | ( 9 ) |
|-------------------|-------|

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 1.1.1 我国冻土分布总体格局 ..... | ( 9 ) |
|------------------------|-------|

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 1.1.2 冻土分布与环境因素的关系 ..... | (12) |
|--------------------------|------|

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 1.1.3 多年冻土下界高度与雪线高度的关系 ..... | (17) |
|------------------------------|------|

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 1.2 冻土定名、分类描述及勘测要求 ..... | (18) |
|--------------------------|------|

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 1.2.1 美国工程土的定名分类系统及勘测要求 ..... | (19) |
|-------------------------------|------|

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 1.2.2 原苏联的冻土定名分类及勘测要求 ..... | (28) |
|-----------------------------|------|

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 1.2.3 我国的冻土定名分类及勘测要求 ..... | (32) |
|----------------------------|------|

|                     |      |
|---------------------|------|
| 第二章 冻土的基本物理性质 ..... | (39) |
|---------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.1 冻土的物质组成及其相互关系 ..... | (39) |
|-------------------------|------|

|                 |      |
|-----------------|------|
| 2.2 土的持水性 ..... | (41) |
|-----------------|------|

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 2.3 冻土中的未冻水含量及其影响因素和确定方法 ..... | (43) |
|--------------------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.3.1 土质对未冻水含量的影响 ..... | (43) |
|-------------------------|------|

|                        |      |
|------------------------|------|
| 2.3.2 多晶冰中的未冻水含量 ..... | (46) |
|------------------------|------|

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 2.3.3 盐类和浓度对未冻水含量的影响 ..... | (48) |
|----------------------------|------|

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 2.3.4 冻融过程对未冻水含量的影响 ..... | (58) |
|---------------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.3.5 外载对未冻水含量的影响 ..... | (59) |
|-------------------------|------|

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 2.3.6 确定未冻水含量的快速方法 ..... | (60) |
|--------------------------|------|

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 2.3.7 含盐冻土中未冻水含量预报模式的建立 ..... | (62) |
|-------------------------------|------|

|               |      |
|---------------|------|
| 2.4 土水势 ..... | (69) |
|---------------|------|

|                     |      |
|---------------------|------|
| 2.4.1 土水势及其分量 ..... | (69) |
|---------------------|------|

|                      |      |
|----------------------|------|
| 2.4.2 土水势的影响因素 ..... | (71) |
|----------------------|------|

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 2.5 热交换系数及其影响因素 ..... | (75) |
|-----------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.5.1 容积热容量及其影响因素 ..... | (75) |
|-------------------------|------|

|                        |      |
|------------------------|------|
| 2.5.2 导热系数及其影响因素 ..... | (77) |
|------------------------|------|

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 2.5.3 导温系数(热扩散系数)及其影响因素 ..... | (83) |
|-------------------------------|------|

|                 |      |
|-----------------|------|
| 2.5.4 相变热 ..... | (86) |
|-----------------|------|

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 2.5.5 根据土物理指标求取计算热参数 ..... | (86) |
|----------------------------|------|

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 2.6 质交换系数及其影响因素 ..... | (91) |
|-----------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.6.1 微分水容量及其影响因素 ..... | (91) |
|-------------------------|------|

|            |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
| 2.6.2      | 导湿系数及其影响因素                        | (92)         |
| 2.6.3      | 扩散系数及其影响因素                        | (97)         |
| <b>第三章</b> | <b>温度在地中的传播</b>                   | <b>(99)</b>  |
| 3.1        | 地温                                | (99)         |
| 3.1.1      | 地面温度                              | (99)         |
| 3.1.2      | 地面温度向地中传播                         | (103)        |
| 3.1.3      | 热传导问题的数学描写                        | (105)        |
| 3.2        | 地中温度场的计算                          | (108)        |
| 3.2.1      | 一维平壁稳定温度场计算                       | (108)        |
| 3.2.2      | 冻土地温特征值计算                         | (110)        |
| 3.3        | 土的季节冻结和融化                         | (112)        |
| 3.3.1      | 土中水冻结的时间和空间过程                     | (112)        |
| 3.3.2      | 土的冻结和融化温度                         | (113)        |
| 3.3.3      | 土的季节冻结和融化计算                       | (115)        |
| 3.4        | 多年冻土区地温状况(以青藏高原为例)                | (119)        |
| 3.5        | 地面扰动及地面温度长期变化对地温的影响               | (122)        |
| <b>第四章</b> | <b>未冻水动力学原理</b>                   | <b>(125)</b> |
| 4.1        | 概述                                | (125)        |
| 4.2        | 正冻土中的水分迁移                         | (130)        |
| 4.2.1      | 开放系统饱水正冻土中的水分迁移                   | (130)        |
| 4.2.2      | 封闭系统正冻土中的水分迁移                     | (135)        |
| 4.2.3      | 非饱和正冻土在不同地下水位情况下水分迁移的现场观测         | (140)        |
| 4.3        | 封闭系统已冻土中的水分迁移                     | (145)        |
| 4.4        | 封闭系统正融土中的水分迁移                     | (152)        |
| 4.5        | 含盐正冻土和已冻土中的离子迁移                   | (155)        |
| 4.5.1      | 溶液冻结时盐冰脱盐和未冻溶液浓缩作用                | (155)        |
| 4.5.2      | 封闭系统非饱和含盐正冻土中的离子迁移                | (156)        |
| 4.5.3      | 开放系统饱和含盐正冻土中的盐分迁移                 | (160)        |
| 4.5.4      | 天然条件下盐分迁移的试验观测                    | (162)        |
| 4.6        | 单向冻结时土颗粒位移的热筛效应及对流迁移              | (164)        |
| 4.6.1      | 单向冻结过程中土颗粒垂向位移的热筛效应及对流迁移假说        | (164)        |
| 4.6.2      | 热筛效应及微粒对流迁移的实验验证                  | (165)        |
| <b>第五章</b> | <b>土中水冻结时的成冰作用及冻土中冷生构造形成的影响因素</b> | <b>(168)</b> |
| 5.1        | 土中水冻结时的成冰作用                       | (168)        |
| 5.1.1      | 冻结时土中发生的物理过程                      | (168)        |
| 5.1.2      | 冻土颗粒外围的界面状态及冰水动态平衡原理              | (172)        |
| 5.1.3      | 土中水的成冰类型                          | (174)        |
| 5.1.4      | 冻结缘和分凝冰透镜体的成因                     | (175)        |
| 5.1.5      | 冻结缘的基本特征及特征参数的确定方法                | (178)        |

|                                        |              |
|----------------------------------------|--------------|
| 5.2 土类对正冻土的冷生构造形成的影响 .....             | (184)        |
| 5.2.1 正冻黏土、粉土和砂土中的冷生构造 .....           | (184)        |
| 5.2.2 孔隙特征对多孔材料冻胀位移的影响 .....           | (188)        |
| 5.2.3 原状土和扰动土中成冰的差异 .....              | (190)        |
| 5.3 水分对正冻土的冷生构造形成的影响 .....             | (191)        |
| 5.3.1 土中水分迁移机理 .....                   | (191)        |
| 5.3.2 外界水源补给的影响 .....                  | (193)        |
| 5.4 温度和压力对正冻与冻土中冷生构造形成的影响 .....        | (193)        |
| 5.4.1 温度、上部载荷和侵入压力对正冻土中冷生构造形成的影响 ..... | (193)        |
| 5.4.2 已冻土融化过程中的冰分凝 .....               | (199)        |
| 5.4.3 不同气压条件下土体冻结后的孔隙特征 .....          | (200)        |
| 5.5 易溶盐的成分和浓度对正冻土中冷生构造形成的影响 .....      | (204)        |
| 5.6 不同外力作用方式引起冻土细微结构的变化特征 .....        | (205)        |
| <b>第六章 土体的冻胀和盐胀 .....</b>              | <b>(208)</b> |
| 6.1 概述 .....                           | (208)        |
| 6.2 土体冻胀机理 .....                       | (213)        |
| 6.2.1 反复冻融引起的真空渗透机制 .....              | (213)        |
| 6.2.2 溶质浓度梯度引起的渗压机制 .....              | (215)        |
| 6.3 土体冻胀发育的几种类型 .....                  | (219)        |
| 6.4 不同冷却速度下开放系统正冻土的冻胀 .....            | (223)        |
| 6.5 预报冻胀的有关模型 .....                    | (227)        |
| 6.6 含盐土的盐胀和冻胀 .....                    | (231)        |
| 6.6.1 易溶盐的基本特性 .....                   | (231)        |
| 6.6.2 含氯化钠盐土的盐胀和冻胀 .....               | (233)        |
| 6.6.3 含碳酸钠盐土的盐胀和冻胀 .....               | (236)        |
| 6.6.4 含硫酸钠盐土的盐胀和冻胀 .....               | (239)        |
| <b>第七章 冻土改造和利用 .....</b>               | <b>(246)</b> |
| 7.1 多年冻土区沙金矿开采中土层防冻和解冻技术 .....         | (246)        |
| 7.1.1 土层防冻技术 .....                     | (246)        |
| 7.1.2 冻土解冻技术 .....                     | (254)        |
| 7.2 多年冻土区土木建筑工程中土层防冻技术 .....           | (257)        |
| 7.2.1 设置隔热层 .....                      | (257)        |
| 7.2.2 设置热穴 .....                       | (259)        |
| 7.3 构筑物防冻胀和防融沉技术 .....                 | (260)        |
| 7.3.1 冻害特征及病因简析 .....                  | (260)        |
| 7.3.2 冻害防治措施 .....                     | (261)        |
| 7.4 盐渍土防治技术 .....                      | (265)        |
| 7.4.1 甘肃省河西地区盐渍土概况 .....               | (265)        |
| 7.4.2 土壤盐渍化的影响因素及分布规律 .....            | (270)        |

|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| 7.4.3 水的情况 .....                        | (271)        |
| 7.4.4 关于甘肃省盐渍土防治措施的新思维 .....            | (275)        |
| 7.5 多年冻土作为能源(天然气水合物)仓库 .....            | (278)        |
| 7.6 人工冻土利用技术 .....                      | (283)        |
| 7.6.1 利用天然冷源的人工冻结技术——各种热桩(自冷桩)的应用 ..... | (283)        |
| 7.6.2 人工冻结技术的应用 .....                   | (291)        |
| <b>第八章 冻土基本性质的测定方法 .....</b>            | <b>(303)</b> |
| 8.1 颗粒分析 .....                          | (303)        |
| 8.1.1 概述 .....                          | (303)        |
| 8.1.2 样品制备 .....                        | (304)        |
| 8.1.3 操作步骤 .....                        | (304)        |
| 8.1.4 操作注意事项 .....                      | (306)        |
| 8.2 密度 .....                            | (306)        |
| 8.2.1 概述 .....                          | (306)        |
| 8.2.2 操作步骤 .....                        | (307)        |
| 8.2.3 注意事项 .....                        | (308)        |
| 8.3 比重 .....                            | (309)        |
| 8.3.1 概述 .....                          | (309)        |
| 8.3.2 操作步骤 .....                        | (309)        |
| 8.3.3 注意事项 .....                        | (311)        |
| 8.4 比表面积 .....                          | (312)        |
| 8.4.1 概述 .....                          | (312)        |
| 8.4.2 操作步骤 .....                        | (313)        |
| 8.4.3 注意事项 .....                        | (315)        |
| 8.5 孔隙特征 .....                          | (315)        |
| 8.5.1 概述 .....                          | (315)        |
| 8.5.2 样品制备 .....                        | (316)        |
| 8.5.3 操作步骤 .....                        | (316)        |
| 8.5.4 注意事项 .....                        | (319)        |
| 8.6 冻结温度 .....                          | (320)        |
| 8.6.1 概述 .....                          | (320)        |
| 8.6.2 主要仪器设备 .....                      | (321)        |
| 8.6.3 操作步骤 .....                        | (322)        |
| 8.7 未冻水含量 .....                         | (322)        |
| 8.7.1 概述 .....                          | (322)        |
| 8.7.2 仪器设备及操作步骤 .....                   | (324)        |
| 8.8 冻胀敏感性 .....                         | (325)        |
| 8.8.1 概述 .....                          | (325)        |
| 8.8.2 操作步骤 .....                        | (326)        |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 8.9 导热系数 .....      | (328) |
| 8.9.1 主要仪器设备 .....  | (328) |
| 8.9.2 操作步骤 .....    | (328) |
| 8.9.3 注意事项 .....    | (329) |
| 8.10 土水势 .....      | (329) |
| 8.10.1 概述 .....     | (329) |
| 8.10.2 操作步骤 .....   | (330) |
| 8.11 导湿系数 .....     | (332) |
| 8.11.1 概述 .....     | (332) |
| 8.11.2 操作步骤 .....   | (333) |
| 8.12 扩散系数 .....     | (334) |
| 8.12.1 概述 .....     | (334) |
| 8.12.2 操作步骤 .....   | (335) |
| 8.13 土体细微结构分析 ..... | (337) |
| 8.13.1 概述 .....     | (337) |
| 8.13.2 样品制备 .....   | (338) |
| 8.13.3 操作步骤 .....   | (338) |
| 8.13.4 注意事项 .....   | (342) |
| 参考文献 .....          | (343) |

# 绪 论

## 1. 冻土及其研究意义

什么是冻土？冻土是一种温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  且含有冰的土岩。冻土中的冰可以冰晶或冰层的形式存在，冰晶可小到微米甚至纳米级，冰层可厚到米或百米级，从而构成冻土中五花八门、千姿百态的冷生构造。

冻土是一种特殊土类。其特殊性主要表现在它的性质与温度密切相关。常规土类的性质主要受其颗粒的矿物和机械成分、密度和含水量的控制，只要这些因素一确定，土的性质就基本稳定，因此多半表现为静态特性。冻土就不一样了，冻土的特性除与上述因素有关外，还受含冰量的控制，而含冰量直接与温度挂钩，温度升高含冰量减少，温度降低含冰量增高。在人类生产活动的深度范围内（一般不超过 20m），由于气候季节变化，引起土温的变化是不可避免的，因此，冻土的性质随时都在变化，表现为动态特性。所以，冻土是一种对温度十分敏感且性质不稳定的土体。

为什么要研究冻土？冻土是广泛分布在地球表层的一种低温地质体且冻土区有丰富的土地、森林和矿藏资源，它的存在及其演变对人类的生存环境、生产活动和可持续发展具有重要影响。

根据冻土存在的时间长短，地球上主要分布着两种冻土：一种称作多年冻土，两年以上处于冻结状态，只有表层几米的土层处于夏融冬冻的状态，该层也称作季节融化层或季节活动层。另一种称作季节冻土，只在地表几米范围内冬季冻结，夏季消融，该层也称作季节冻结层或季节活动层。

多年冻土的分布面积约占全球陆地面积的 23%，主要分布在俄罗斯、加拿大、中国 and 美国的阿拉斯加等地，其中我国的多年冻土分布面积约占世界多年冻土分布面积的 10%，占我国国土面积的 21.5%，是世界第三冻土大国，同时我国的多年冻土主要分布在中、低纬度的、号称世界第三极的青藏高原上。季节冻土则遍布纬度高于  $24^{\circ}$  的地区，我国季节冻土分布面积占国土面积的 53.5%。因此，冻土首先被视作宝贵的土地资源。

如何利用这些土地来发展农业？遇到了种种难题。土地冻结后，冰晶堵塞了土体的孔隙，加之温度低，植物根系不能发育生长，冻土不能耕种；多年冻土季节融化层融化后，由于下伏多年冻土是隔水层，阻止融水下渗，形成地表溢流、养分流失及坡面冲刷；干寒的季节冻土区，由于土体冻结时的水分迁移，同时把盐分也带向冻结锋面，加之地表强烈蒸发，造成盐分二次抬升，诱发地表次生盐渍化发育；气候变迁或人类工程活动，使本来就十分脆弱的多年冻土区生态环境发生急剧变化，诸如植被退化、土地沙化和生态环境的荒漠化等。

如何在冻土地区修建各种工程构筑物？困难重重。早期在冻土区修筑的各种构筑

物,包括房屋、道路、桥涵、渠道等等,都遭到不同程度的破坏,有的开裂、有的倾斜、有的甚至倒塌,其原因何在呢?

多年冻土区蕴藏着丰富的矿藏,诸如,东北大小兴安岭地区富含沙金矿,从清朝时期就进行开采,以后在伪满时期以及解放后进行过多次开采,每次都在相同地区,为什么在这些地区的沙金矿会采之不绝呢?

人类从生存和发展的需要,对冻土产生了浓厚的兴趣,带着上述种种问题,对其进行孜孜不倦的研究。

怎样研究冻土?从冻土利用和改造的角度,冻土研究主要涉及三个方面,分别把冻土作为资源、材料和低温环境来研究。

当把冻土作为一种土地资源来研究时,主要要解决土层防冻和快速解冻、冻土中水分和盐分的控制等技术问题,以及由于冻土变异引起的土壤沙化、荒漠化和次生盐渍化等。使得冻土区森林茂密、草原肥沃、牛羊成群、农作物高产。

当把冻土作为构筑物地基材料、隔水材料或直接用作构筑物(如地下冷库等)时,主要研究在不同边界条件(温度、外载等)下,冻土的物理力学性质、与构筑物的相互热、力作用以及冻土性质的改良问题。

当把冻土作为低温环境来研究时,主要研究冻土与周围环境(大气和下垫面)的热、质交换及相互作用,由此引发的地球化学过程、低温及冻结和融化环境下的沙金和天然气水合物的成矿机理和赋存条件等。

由此可见,所谓冻土研究,并非只孤立研究冻土本身的分布、状态和特性,而且很多的注意力却集中在研究天然和人为活动条件下,土的冻结和融化过程及其伴生现象的机理、调控和预测预报上。冻土研究的对象虽然比较简单,只是冻土本身及土的冻结和融化过程及其与周围环境的相互作用,但麻雀虽小,五脏齐全。上述问题的研究,必须借助于相邻学科的许多基本理论,诸如地理学、地质学、土壤学、土质学、工程地质学、水文地质学、土木工程学、传热学、热力学、物理化学、材料力学和流体力学等。所以,冻土学是一门交叉学科。

冻土研究的手段应包括现场调查、长期观测、室内试验、理论计算及计算机模拟等。综合利用上述手段,采取宏观现象与微观机理相结合、理论计算与实践验证相结合的思路是推进我国冻土物理学研究不断深化的驱动力。

## 2. 冻土学的学科体系

任何一门学科的建立、发展和完善的驱动力都来自于人类社会的需求,通过实践、认识、再实践的循环,经历螺旋式的上升,而达到认识世界和改造世界的目的。冻土学也不例外,经历了一个多世纪的努力,至今冻土学已初步建立了如下学科体系(图 0.1):

这里我们不再赘述冻土学的发展史,仅列举不同阶段的代表作,有兴趣的读者可查阅原著。

冻土学定义为以冻结岩石作为研究对象的学科,1927 年俄罗斯学者 М. И. Смутин 发表了《苏联境内的永久冻土》一书,标志了冻土学作为一门独立的学科已经问世。

普通冻土学主要通过现场调查的手段研究冻土成因、成分、性质、组构、分布及其与发

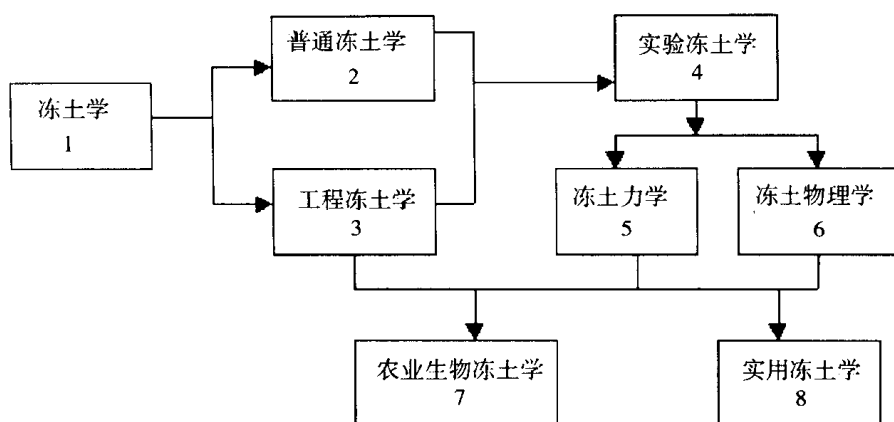


图 0.1 冻土学的学科体系

生在冻土中的地质作用、地球化学作用和生物作用的关系。《普通冻土学》(Смутин 编, 1940)是第一部冻土学教科书。随后,又发展了区域冻土学和历史冻土学。1959 年原苏联科学院出版两卷本巨著《地冰学原理》(Шведова, 1959),其中第一卷是普通冻土学。其后,教科书《普通冻土学》(Достовалови Кудрявцев, 1967; Ершов, 1990)均颇有影响。1974 年莫斯科大学 Кудрявцев 教授出版了《工程地质研究中的冻土预报原理》一书(郭东信等译, 1992),系统地论述天然和人为条件下预报冻土的温度、厚度、季节冻结和融化深度及冷生过程和融区产生的数学、热物理方法原理。

工程冻土学主要通过工程实践的手段研究天然和人为条件下,冻土与建筑物之间的相互热、力作用以及冻土区建筑物的设计和施工方法。1912 年原俄罗斯学者 Н.С.Богданов 出版了《永久冻土与永久冻土上的建筑物》一书,阐述了外贝加尔永久冻土条件下建造建筑物的方法,为工程冻土学的发展作出了巨大贡献。1958 年原苏联科学院出版社出版了 Н.А.Цытович《冻土上的地基与基础》一书,论述了冻土的基本物理、力学性质,冻土中的物理力学过程及冻土上基础设计、施工方法。1959 年原苏联科学院出版两卷本巨著《地冰学原理》,其中第二卷是工程冻土学。1970 年原苏联科学院出版了 Г.В.Порхаев 的《房屋及构筑物与永久冻土的相互热作用》一书,论述了冻土融化深度的求解和正融土沉降预报。1980 年美国寒区研究和工程实验室出版了 K. A. Linell 主编的《深季节冻土区和多年冻土区基础设计和施工》一书,提出了深季节冻土区和多年冻土区特殊工程设计标准和施工准则。1999 年臧恩穆、吴紫汪主编的《多年冻土退化与道路工程》一书,侧重介绍了我国 214 国道路基路面的修筑技术。

冻土的野外调查及工程实践,除发现许多奇异的冰缘现象,诸如冻胀丘、分选石环、串珠状湖塘和融冻泥流等,还发现冻土区许多构筑物,诸如公路、铁路、管道、房屋和桥梁都遭到了严重破坏。在忧虑和好奇之余,有识之士都在思索:怎样才能防范冻土给人类带来的灾害?怎样才能揭开奇异的冰缘现象之谜?答案是肯定的,那就是要对冻土进行诊断和解剖,冻土实验科学就由此应运而生。实验冻土学是用现场和室内测试和模拟试验手段,研究天然和人为条件下,冻土中的物理、物理化学和力学过程、现象和性质。《冻土实

验室研究资料》第一、二和三集(Цытович, 1953, 1955, 1957)的出版,系统地介绍了冻土物理、力学和热物理性质的室内测试方法和结果。《冻土测绘原理》、《冻土野外研究方法》(Полтев, 1961; Ершов, 1986),论述了现场冻土调查的方法、程序及仪器设备。

冻土力学主要研究冻土的强度和变形特性及其在工程实践中的应用。1937年原苏联学者 Н. А. Цытович 和 М. И. Сумгин 出版了第一部冻土力学专著《冻土力学基础》。1952年 Н. А. Цытович 出版了《冻土力学原理》一书,奠定了冻土力学基础。1959年原苏联科学院出版社出版了 С. С. Вялов《冻土的流变性质及承载力》一书和 1971年 Ю. К. Зарецкий 的博士论文“土体蠕变和固结理论问题及其实际应用”对冻土力学理论的深化起到了推波助澜的作用。1973年 Н. А. Цытович 出版了《冻土力学》一书(张长庆、朱元林译, 1985),系统地论述了冻土力学的实验、理论和实际应用。1994年中国科学院兰州冰川冻土研究所吴紫汪和马巍出版了《冻土强度和蠕变》一书,系统地论述了我国学者在冻土流变、强度特性、抗剪强度、变形的结构效应和人工冻结壁蠕变变形与应力研究方面的最新成果。

冻土物理学是以冻土(处于正冻、已冻和正融状态)为对象,研究在外界条件影响下,其内部能量和物质输运规律的一门学科。《正冻和正融土热物理学》一书(Порхаев, 1964)论述了正冻、正融土中的热质迁移。随后,《冻土温度状况计算方法》(Фельдман, 1973, 徐学祖等译, 1982),《非饱和正冻土中的水分迁移》(Чистотин, 1973)、《细颗粒土中的水分迁移及冷生构造》(Ершов, 1979)和《正冻、正融土中的水分迁移》(Фельдман, 1988)等专著相继问世。1982年日本北海道大学低温科学研究所木下诚一出版了《冻土物理学》一书(王昇、张志权译, 1985),论述了土体冻胀机理、冻结和冻胀的数学解析及人工冻土利用。1979, 1986年莫斯科大学 Э. Д. Ершов 教授出版了《细粒土中水分迁移和冷生组构》、《冻土的物理化学和力学》两本书,论述了正冻土中水分迁移及冷生组构的形成规律以及冻土的分子物理学和热力学、冻土的物理化学过程、冻土力学的物理化学原理及正冻、正融和已冻土中的结构构造成因。国内《土的冻胀与建筑物冻害防治》(童长江、管枫年, 1985)、《冻土的温度水分应力及其相互作用》(安维东等, 1989)、《冻结凿井冻土壁的工程性质》(吴紫汪、丁德文等, 1988)、《冻土中水分迁移的实验研究》(徐学祖、邓友生, 1991)、《土体冻胀和盐胀机理》(徐学祖、王家澄等, 1995; Xu Xiaozu et al., 1999)、《冻融土中的水热输运问题》(李述训、程国栋, 1995)等七本专著从不同侧面论述了冻土物理学的有关内容。

农业生物冻土学主要研究土壤的冻结作用与作物生理的相互关系。1980年美国 Cornell大学农艺系的 R. D. Miller 教授在《实用土壤物理学》一书中撰写了第十一章“土中的冻结现象”,论述了土壤冻结过程中水盐迁移、冻胀及其对春涝、土壤冲刷、养分流失和作物生理干旱的影响。“甘肃省河西走廊季节冻结盐渍土及其改良利用”(邱国庆, 1996)论述了甘肃省河西走廊季节冻结盐渍土中的水盐输运规律。

实用冻土学建立在上述分支学科的基础上,侧重冻土水热改良、天然和人工冷源利用及冻土利用技术研究。《苏联东北部冻土水热改良措施》(Перлыштейн, 1979)论述了沙金矿区土层防冻和冻土解冻技术。1978年至 1997年间 8次国际地层冻结会议论文集和中国煤炭学会矿井建设专业委员会等单位编辑的《地层冻结工程技术和应用》一书(1995)发表了大量人工冻结技术用于矿井、地铁、隧道工程建设和深基坑开挖支护的实例。

综观冻土学的各分支学科,我们可以看到其间的交叉性及相对独立性。其中,冻土物理学显得更为微观和抽象,冻土的分布、特征和演变均受到其内部的能量和物质输运规律的制约,所以它是联系其他分支学科的纽带和桥梁。

### 3. 我国冻土物理学的研究进展

近 20 年来,广大科技工作者瞄准冻土学国际前沿领域,紧密结合国民经济建设中的重大问题,使得我国冻土物理学研究取得长足的进展,逐渐从冻土学中分离出来,成为一门独立的学科(徐学祖,1996f)。

#### (1) 学科发展方向及近期主要任务

干寒区地表土层由于气温年周期波动产生反复冻结和融化,导致土壤剖面再造。这种再造现象突出地表现在三方面:一是由于水分迁移引起分凝冰层出现,导致土体冻胀,严重威胁着寒区各项工程建筑物的安全运营。作为该领域中的第一研究板块,国际冻土学界在 20 世纪 50~70 年代掀起冻胀课题的研究热潮。二是伴随水分迁移产生溶质迁移,引起土层中高浓度带的出现,导致土层中融弱层的存在和干寒区地表盐渍化加剧,严重影响寒区工程建筑物的安全运营及农业生产发展。作为第二研究板块,国际冻土学界在 20 世纪 80 年代以来,掀起冻土中溶质迁移的研究热潮。三是在外力和内应力作用下土颗粒位移、分异和粉碎,引起冷生剖面的变化,导致土体性质改变及部分不良物理地质现象的出现。作为第三研究板块,近年来干寒区表土颗粒位移、分异课题研究逐步引起国际同行的重视。1992 年在俄罗斯普希金市召开了第一届国际冷生土壤会议。1993 年在北京召开的第六届国际多年冻土会议期间,国际多年冻土协会专门成立了“冷生土壤”工作组,计划在今后五年中将积极开展土壤气候特征、多年冻土与冷生土壤的相互关系等课题研究,举办野外考察和专业会议等。国际研究动向为我国冻土物理学的研究展示出明确的方向。国内干寒区灾害地质研究及防治问题的提出及人工冻结技术的推广应用,为我国冻土物理学研究提出了明确的任务。

干寒区灾害地质指土、岩在干燥且寒冷气候影响下出现的一系列对国计民生具有重大不良影响的地质现象,包括冻害:土体冻胀、融化下沉及融冻滑塌和冰川融水诱发的泥石流等;盐害:冻结和融化诱导土层中高浓度带的形成、地表盐渍化和盐胀等;沙害:由物理风化和物理化学风化诱导的农田和牧场荒漠化和沙漠化等。人工冻结技术用于我国煤矿竖井开凿已有 40 年历史,最大深度已达 415m(Pang Rongqing, 1991),近期又准备推广用于深基坑开挖支护工程(徐学祖,1996),高地压情况下冻结壁厚度的正确判定及土层冻结和融化对临近建筑物的影响等问题又提到议事日程上来了。因此,把土岩与大气环境作为一个系统,以土岩的冻结和融化过程为龙头,大气环境和地中热流作为边界条件,侧重研究土岩内部的能量和物质输运机理,剖析干寒区灾害地质成因和研究相应对策,解决人工冻结技术应用中的问题是我国冻土物理学近期的主要研究任务。

我国是世界上多年冻土分布面积的第三大国。多年冻土和季节冻土区分布面积分别占全国面积的 21.5% 和 53.5%(徐学祖、王家澄,1983c)。盐渍土面积约占全国面积的

2%。目前我国约有 1/5 耕地存在不同程度的盐渍化和次生盐渍化特征,有 2.6 亿亩<sup>①</sup> 受潜在盐渍化威胁的土壤。我国沙漠化土地面积占国土面积的 3.86%,年发展速率为 1.47%(朱震达、陈广庭等,1994)。冻土区土体冻胀和融沉及干寒区的地表盐渍化、盐胀及沙化是制约我国干寒区经济发展的重要因素。无疑加强该领域的研究,将为培养高层次的科技人才、促进冻土物理学的深化起积极推动作用,并通过揭示寒区土壤冷生剖面及部分不良物理地质现象的形成机理、冷生土壤利用、环境生态保护及灾害地质防治而产生重大社会效益。

## (2) 近期主要研究进展

近 20 年来,我国冻土物理学研究主要集中在科研、设计单位和大专院校中开展,部分研究工作分别与美国寒区研究和工程实验室、俄罗斯莫斯科大学及日本北海道大学低温科学研究所合作完成。研究成果除以论文形式发表在第五、六和七届国际多年冻土会议论文集和第五、六和七届国际地层冻结研讨会论文集和国内专业性杂志如《冰川冻土》、《岩土工程》上外,比较集中地反映在《土的冻胀与建筑物冻害防治》(童长江、管枫年,1985)、《冻土的温度水分应力及其相互作用》(安维东,1989)、《冻结凿井冻土壁的工程性质》(吴紫汪、丁德文等,1988)、《冻土中水分迁移的实验研究》(徐学祖、邓友生,1991)、《土体冻胀和盐胀机理》(徐学祖、王家澄等,1995)、《甘肃省河西走廊季节冻结盐渍土及其改良利用》(邱国庆,1996)、《Mechanisms of frost heave and salt expansion of soils》(Xu Xiaozu et al., 1999)、《多年冻土退化与道路工程》(臧恩穆、吴紫汪,1999)等八本专著及正在编制中的“冻土地区建筑地基基础设计规范”、“冻土工程地质勘察规范”、“水工建筑物抗冰冻设计规范”和“冻土试验方法标准”等国家和行业标准中。

从 80 年代开始,中国科学院兰州冰川冻土研究所与煤炭部特殊凿井公司、中国矿业学院和淮南矿业学院等单位合作,系统地进行了冻土壁基本物理力学性质、冻土壁温度场和应力场研究(吴紫汪、丁德文等,1988)。近期又对立井冻结法凿井和深基坑开挖支护工程进行了热工计算(李述训,1994;甘正常和徐学祖,1998)。

综上所述,近 20 年来我国冻土物理学研究取得了丰硕的成果:突出地表现在土体冻胀和盐胀机理研究及冻害盐害防治等方面。研究工作的特点是科研与生产相结合、室内室外相结合、国内和国外相结合和宏观与微观相结合。实践证明,以任务带学科是学科发展的生命线,科研坚持为生产服务,学科才能不断寻找新的生长点并保持发展的强大动力。冻土物理学涉及有相变界面移动的多孔介质中热质迁移,其中的物理和化学过程十分复杂,涉及许多目前仪器设备也难以观测的现象,至今仍有许多未知领域尚待探索。针对我国的实际情况,今后拟着重进行下列工作:

(1) 建立健全土体冻胀、盐胀敏感性的试验方法和评定程序。尽管以往各单位进行了大量的室内外试验并积累了丰富的数据,但由于试验方法上的差异或基础资料不全,因此资料的可比性差,低水平重复现象严重,造成人力物力的浪费。近年来,国际冻土界也十分重视冻土试验和评价方法的标准化问题,已组织国际编写小组着手进行这项工作。

---

<sup>①</sup> 1 亩 = 666.6m<sup>2</sup>

(2) 加强冻胀、盐胀机理研究:目前的研究重点应集中在冻结缘和不同盐类的物理特性上,包括冻结缘的形成和变化规律、冻结缘中未冻水势能及导湿系数与试验的初始和边界条件的关系。硫酸和碳酸盐类与土的相互作用及与温度的关系等。这是建立有关物理和数学模型的基础。

(3) 建立预报冻胀、盐胀量的简化模式:该模式应具有物理意义明确、能反映冻胀、盐胀发育的时间和空间过程,特别是分凝冰位置等特点。

(4) 加强干寒区表土颗粒位移、分异和风化规律研究。

(5) 大力开展无源和有源技术调控地温和新材料应用研究:为保证寒区工程建筑物的安全运营,人们迫切期待着价廉效高的防冻胀和盐胀材料。这种材料应具有脱湿或改变导热、结晶性能等特点。

通过上述五项工作的开展和不断进展,相信我国的冻土物理学将逐步完善和深化,并为我国干寒区灾害地质防治、人工冻结技术的推广應用和标准化设计、施工提供可靠保证。

## 4. 冻土物理学的学习方法和要求

### (1) 学习方法

① 弄清基本概念。冻土物理学是一门交叉学科,它汲取了自然地理学、工程地质学、水文地质学、土壤物理学、热力学、表面物理化学和传热学等诸多学科的营养而发展起来。因此,学习冻土物理学,首先要弄清基本概念。例如,对于“能量”一词,在传热学中,温度是物体所具有热能的量度;在土壤物理学中,土壤水的势能(土水势)是土壤水的能量的量度。在土水体系中,“物质”一词具体指土颗粒、土壤水及其中的溶质。“冻土”一词,从静态观察,它指温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 且含有冰的土。从动态观察,冻土中的冰的含量随温度而变,由此派生出土的正冻、正融和已冻三种状态。

② 注意各影响因素和过程之间的相互联系和相互制约作用。随着自然界气候的波动,由于温度因子的参与,使本来就十分不稳定的土水体系加剧了冻融、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。因此,当我们把地表和下垫一定深度的土层作为一个系统,来研究其内部的能量和物质交换时,首先必须抓住土(土质)、水(水量和补给方式)、温(温度及其变化速率)、力(压力,外载大小和施加方式)和盐(溶质的成分和含量)五大要素。同时注意各影响因素和过程之间的相互联系和相互制约作用。

③ 运用综合分析和逻辑推理的手段,对书中的内容取其精华,去其糟粕。本书中大量资料是通过室内试验得到的,单因素和单一过程的规律可能是正确的,但放到浩瀚的大自然中,由于各影响因素和过程之间的相互联系和相互制约作用,总体规律可能发生变化。因此,面对丰富的实验资料,必须运用综合分析和逻辑推理的手段,对书中的内容取其精华,去其糟粕。取舍的唯一标准是实践。本书所涉及的内容,只代表笔者当前对冻土物理学的认识。人类通过科学研究对自然界的认识总是不断发展和深化的。期望研究生们能为该学科的完善和发展,作出积极的贡献。