

## 一种土壤冻结特征曲线的测定方法

黄兴法<sup>①</sup> 曾德超  
(中国农业大学机械工程学院)

**摘 要** 介绍一种土壤冻结特征曲线的测定方法,并用自制的恒温冻结室和量热装置测量了4种典型土壤的冻结特征曲线;通过曲线,讨论了土壤冻结过程的一些特性。

**关键词** 土壤;冻结;特征曲线

**中图分类号** S 152.7

### Determination of Soil Water Freezing Characteristic Curve

Huang Xingfa Zeng Dechao  
(College of Machinery Engineering, CAU)

**Abstract** A determining method of the soil water freezing characteristic curve is put forward. The curves of four types of soil were obtained to discuss some characters during the soil water freezing by the tests at different freezing temperatures with a devised apparatus.

**Key words** soil; freezing; characteristic curve

为了有效地开展我国北方地区土壤盐碱化的防治和抗春旱春寒等工作,必须研究冻期土壤水热盐状况的动态变化规律;而冻期土壤水热盐特性参数的试验测定和计算确定,不仅有助于研究冻期土壤水分、温度、盐分的状况,也是运用数值方法进行定量研究水热盐相互影响及变化规律所必需的前期工作之一。这里介绍其中一种测定土壤冻结特征曲线的方法,并用自制的恒温冻结室和量热装置测量几种典型土壤的冻结特征曲线,借助这些曲线讨论土壤冻结过程中的一些特性问题。

#### 1 土壤冻结特征曲线测定方法及装置

当土壤温度降低到一定程度时,土壤发生冻结,土壤中的水分发生相变,但是并非所有的水分全部转换成冰,而其中仍有一部分保持为液态水,通常称这部分水为未冻水或液态水。这是冻土与非冻土的根本区别之所在。已有的研究表明,冻土中液态水含量与冰的含量都随土壤冻结温度的变化而变化<sup>[1,2]</sup>。人们通常把土壤冻结时液态水含量随土壤冻结温度变化的规律称为土壤冻结特征曲线,一般可通过实验方法测定。

根据测定原理的不同,测定方法有多种,如脉冲核磁共振法和物理解吸法<sup>[3]</sup>,以及热量平衡法等,但由于核磁共振装置和物理解吸设备价格十分昂贵,国内研究机构仅有几家拥有,推广该方法有一定的困难。这里只介绍热量平衡法。

现采用如图1所示的自制实验装置测量土壤冻结特征曲线。将土样温度恒定在不同的零

收稿日期:1997-09-22

<sup>①</sup>黄兴法,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)146信箱,100083

下温度,改变盐水溶液的浓度,就可调节恒温冻结室的零下温度。将测量好含水量的土样经过初冻后放入恒温冻结室中,待一定时间冻结稳定后,再放入量热装置中,经过一定时间的热交换,土样温度与量热水温度达到平衡。根据土样吸收热量应与量热水和量热装置放出的热量相等的原理可以推得土样中的含冰量。

假设量热水质量为  $m_{cw}$ ,量热水的初始温度为  $\theta_w$ ,量热装置常数为  $k$ ,冻土的干质量为  $m_s$ ;总含水量为  $m_w$ ,其中冰的含量为  $m_i$ ,液态水含量则为  $m_w - m_i$ ;土壤冻结温度为  $\theta_i$ ;当把土样放入量热装置后,土样和量热水的平衡温度为  $\theta_e$ 。令干土、液态水和冰的比热容分别为  $c_s, c_L$  和  $c_i$ ,冰的溶化潜热为  $Q_i$ ,则放出的热量为

$$Q_1 = (c_L m_{cw} + k)(\theta_w - \theta_e)$$

而土样吸收的热量为

$$Q_2 = [c_s m_s + c_L (m_w - m_i)](\theta_e - \theta_i) + m_i Q_i + c_i m_i (0 - \theta_i) + c_L m_i (\theta_e - 0) = (c_s m_s + c_L m_w)(\theta_e - \theta_i) + m_i Q_i + (c_L - c_i) m_i \theta_i$$

由  $Q_1 = Q_2$  得

$$m_i = \frac{(c_L m_{cw} + k)(\theta_w - \theta_e) - (c_s m_s + c_L m_w)(\theta_e - \theta_i)}{Q_i + (c_L - c_i) \theta_i}$$

量热装置常数  $k$  可采用冰溶法标定,即将一定量的冻结冰块放入量热装置中,测量量热水的平衡温度,同理按热量平衡方法可得到  $k$  的计算公式

$$k = [m_i (Q_i + c_L \theta_e - c_i \theta_i) + c_L m_{cw} (\theta_w - \theta_e)] (\theta_w - \theta_e)^{-1}$$

根据冰的质量,可按式计算冻土中液态水含量:

$$\eta_L = \frac{m_w - m_i}{m_s} \times 100\%$$

## 2 典型土壤冻结特征曲线测定

用上述方法测定不同冻结温度下土壤的液态水含量,即可确定该土壤的冻结特征曲线。表 1 给出了实测所得的内蒙古河套灌区巴盟市 4 种典型土壤的冻结特征曲线的数据。

表 1 河套灌区 4 种土壤的冻结特征曲线实测数据

| 粘土           |          | 砂壤土          |          | 砂土           |          | 壤土           |          |
|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| $\theta / C$ | $w / \%$ |
| -0.2         | 20.89    | -0.3         | 20.49    | -0.2         | 17.55    | -0.2         | 19.17    |
| -0.3         | 19.07    | -0.3         | 18.62    | -0.3         | 15.16    | -0.3         | 20.18    |
| -0.8         | 16.69    | -0.7         | 15.82    | -0.7         | 15.57    | -0.7         | 16.07    |
| -1.1         | 14.04    | -1.0         | 13.11    | -1.1         | 9.39     | -1.1         | 13.59    |
| -1.8         | 13.01    | -1.7         | 10.91    | -1.7         | 6.18     | -1.7         | 12.67    |
| -4.1         | 9.91     | -6.1         | 7.97     | -6.0         | 5.28     | -4.0         | 10.62    |
| -10.0        | 6.34     | -10.1        | 5.03     | -10.0        | 4.45     | -10.0        | 7.41     |

说明:表中  $\theta$  为土壤的冻结温度,  $w$  为液态水的质量分数。

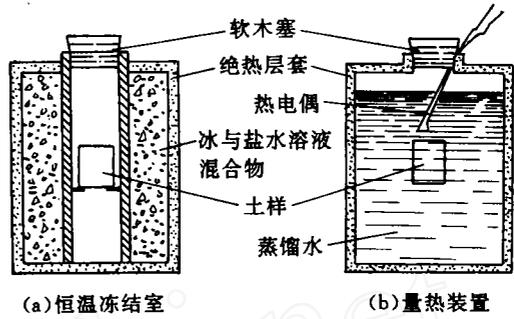


图 1 土壤冻结特征曲线测量装置简图

### 3 结果分析

4种典型土壤的冻结实验结果表明:

1)4种土壤开始发生冻结的临界冻结温度都低于 $0^{\circ}\text{C}$ (接近 $-0.2^{\circ}\text{C}$ ),这是因为土壤水不同于纯水,它一般都含有可溶性盐分,所以,临界冻结温度较低。

2)土壤一旦开始发生冻结,液态水的含量先是急剧减少,然后随着土壤冻结温度的进一步降低,减少趋势逐渐平缓。当土壤冻结前的总含水量大于最大的吸附水含量时,土壤冻结的这一变化规律不受土壤总含水量变化的影响。这可以认为:土壤冻结时,自由水先冻结成冰,结果表现为液态水含量在土壤冻结开始时急剧减少,然后,土壤冻结温度进一步降低时,土壤中的吸附水逐渐开始冻结,此时,受土壤颗粒吸附作用弱的吸附水在较高的冻结温度下就能冻结成冰,而受土壤颗粒吸附作用强的吸附水则在较低的冻结温度下才能冻结成冰,最内一二层分子则保持吸附结构不变;因此,土壤冻结时,液态水的含量总是随着冻结温度的降低而减少。

3)4种土壤的实测冻结特征曲线都可以用下面的经验公式进行拟合:

$$\eta_L = a|\theta|^{-b} \quad (1)$$

式中 $a, b$ 为实验常数。

由式(1)所得的拟合曲线与实测的土壤冻结特征曲线的结果的对比示于图2。可以看出,拟合曲线与实验结果比较吻合。表2给出了根据式(1)对实测的4种土壤冻结特征曲线进行拟合所得的计算结果。

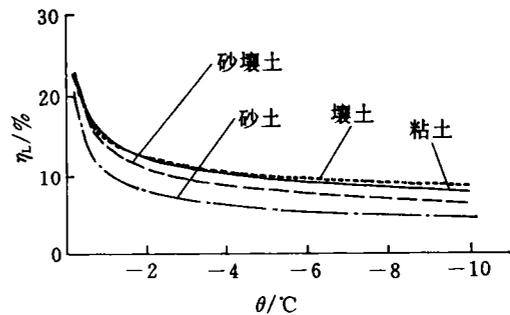


图2 河套灌区4种土壤冻结特征曲线的实验结果

表2 河套灌区4种土壤冻结特征曲线的回归结果

| 实验常数 | 粘土        | 砂壤土       | 砂土        | 壤土        |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $a$  | 14.157 41 | 12.820 03 | 10.009 61 | 14.122 78 |
| $b$  | 0.290 90  | 0.335 81  | 0.372 83  | 0.248 95  |

### 4 结束语

用自制的恒温冻结室和量热装置测量了4种典型土壤的冻结特征曲线。测得的冻结特征曲线均可用公式 $\eta_L = a|\theta|^{-b}$ 来拟合,因而推荐这一公式作为土壤冻结特征曲线的拟合公式。

### 参 考 文 献

- 1 Zeng Dechao, Lian Guoping. A computer simulation of water heat salt movement in frozen soils. Proc 11th Int Congress on Agri Engi, Dublin, U K, 1989. 4~8
- 2 Cary J W, Papendick R I, Campbell G S. Water and salt movement in unsaturated frozen soil; Principle and field observation. Soil Sci Soc of Am J, 1979, 43: 3~7
- 3 奥利奋特, 泰斯, 朱元林, 等. 用脉冲核磁共振法及物理解吸法测定冻土中的冰和未冻水之间的关系. 冰川冻土, 1983, 5(2): 37~45