

DOI: 10.11779/CJGE20230301

基于核磁共振技术的土体冻结特征曲线试验研究

应 赛^{1,2,3}, 夏晓舟¹, 文 桃³, 周凤玺⁴, 曹亚鹏⁵, 李国玉⁵, 章 青^{*1}

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 苏州纽迈分析仪器股份有限公司, 江苏 苏州 215151; 3. 长江师范学院建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100; 4. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 5. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 冻结特征曲线描述了土中未冻水含量随温度变化的规律, 给出适用不同土质的冻结特征曲线计算模型具有重要的工程价值。利用核磁共振技术对6种土体的冻结特征曲线进行了测试, 给出了描述土体冻结特征曲线的Michalowski模型参数的确定方法, 分析了初始含水率和土体性质对冻结特征曲线的影响, 利用Michalowski模型参数的特征对模型进行了改进。研究表明, 冻结特征曲线与初始含水率无关, 冻结过程中不同初始含水率土体的冻结特征曲线相同。在不考虑温度影响时, 模型参数 w_a 近似等于土中最大结合水含量, 可以作为分析和评价黏性土特性的重要指标参数。改进后的单参数Michalowski模型可实现对未冻水含量的良好预测, 降低了模型的复杂性, 提升了模型的实用价值, 但模型的适用范围, 有待验证。

关键词: 冻结特征曲线; 未冻水含量; 冻结温度; 核磁共振; 结合水含量

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)07-1437-08

作者简介: 应 赛(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: yingsai35910@163.com。

Experimental study on freezing characteristic curve of soils based on nuclear magnetic resonance technology

YING Sai^{1,2,3}, XIA Xiaozhou¹, WEN Tao³, ZHOU Fengxi⁴, CAO Yapeng⁵, LI Guoyu⁵, ZHANG Qing¹

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Suzhou Niumag Analytical Instrument Corporation, Suzhou 215151, China; 3. Engineering Research Center for Health Monitoring in Building Life Cycle and Disaster Prevention, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 4. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China; 5. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The freezing characteristic curve describes the variation of unfrozen water content with temperature in soils, and it is of engineering value to provide a model for calculating freezing characteristic curves suitable for different soil types. The freezing characteristic curves of six kinds of soils are tested by using the nuclear magnetic resonance technology, and a method for determining parameters of Michalowski model describing the freezing characteristic curves of soils is given. The influences of the initial water content and soil properties on the freezing characteristic curve are analyzed, and the model is improved by using the characteristics of Michalowski model parameters. The study shows that the freezing characteristic curve is independent of the initial water content, and that of the soils with different initial water contents is the same during the freezing process. Without considering the influences of temperature, the model parameter w_a is approximately equal to the maximum of bound water content in the soils, which can be used as an important index parameter to analyze and evaluate the characteristics of clay. The practical value is improved by the single-parameter Michalowski model as it performs well in predicting unfrozen water content with less model complexity, but the applicability of the model needs to be verified.

Key words: freezing characteristic curve; unfrozen water content; freezing temperature; nuclear magnetic resonance; bound water content

0 引言

土体冻结后并非土中所有的液态水都转变为固态冰, 由于颗粒表面能的作用, 土体中始终保持一定数

基金项目: 国家自然科学基金项目(12362032, 11932006); 重庆市教委科技项目(KJQN202101447, KJQN202201426, KJQN202301401); 甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0063); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA472)

收稿日期: 2023-04-10

*通信作者(E-mail: lxzhangqing@hhu.edu.cn)

量的液态水，称作未冻水^[1]，是影响冻土导热性、渗透性、强度、变形等特性的重要参数。冻结特征曲线描述了土中未冻水含量随温度变化的规律，给出适用于不同土质的冻结特征曲线计算模型具有重要的工程价值。利用核磁共振技术测量土壤水分中氢原子核的横向弛豫时间，根据氢质子的含量及分布特性可以快速、准确、无损测试土壤水分含量及水分运动特性^[2-4]，已广泛应用于冻土未冻水含量的测试研究^[5-9]。

Tsytovich^[10]指出土中未冻水含量随温度的降低而减小，并根据温度变化1°C时未冻水含量变化大于1%、在0.1%~1%之间和小于0.1%，将土中未冻水变化过程分为剧烈相变阶段、过渡阶段和冻实阶段，如图1所示。Michałowski等^[11-12]认为剧烈变化阶段并不是一个温度区间，而是对应于土体的冻结温度 T_f ，并给出了过渡阶段未冻水含量的计算表达式，通常称为Michałowski模型：

$$w_u = w_b + (w_a - w_b) e^{a(T - T_f)} \quad (1)$$

式中： w_u 为温度 T 条件下的未冻水含量； T_f 为土体冻结温度； w_b 为在温度极低情况下土体中存在的未冻水含量； w_a 为 T_f 温度下土体中最小未冻水含量； a 是与土质有关的参数。

Tsytovich^[10]描述的冻结曲线在温度点 T_f 处发生突变，具有不连续变化的特点，Michałowski模型描述的冻结特征曲线描述了过渡阶段的水分变化，不包括剧烈相变阶段和冻实阶段（图1中曲线b所示），这样解决了冻结特征曲线在冻结温度点（剧烈相变阶段）处不连续的问题，在应用于数值模拟计算时十分方便，而且能很好地描述未冻水含量的变化规律。Michałowski模型中的有4个参数，其中 T_f 可由冻结温度曲线试验得到， w_a 和 w_b 可由未冻水含量试验得到， a 可利用未冻水含量的实测数据拟合得到，可见Michałowski模型参数的确定十分依赖实测数据，且试验测试的工作量较大，这限制了该模型的应用。

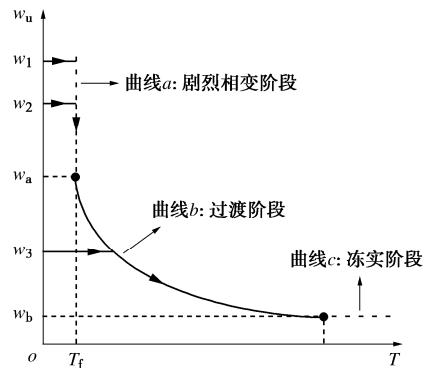


图1 Michałowski模型冻结特征曲线

Fig. 1 Freezing characteristic curve of Michałowski model

本文利用核磁共振技术对6种土体的冻结特征曲线进行了试验研究，分析了初始含水率和土体性质对Michałowski模型冻结特征曲线的影响，给出了土中最大结合水含量的测定方法，利用Michałowski模型参数的特征对其模型进行了改进，提升了该模型的实用价值。

1 试验方法

1.1 试验材料

为了分析不同黏性土体的冻结曲线变化规律，试验使用的土体为黄土和蒙脱石混合而成，通过控制黄土和蒙脱石混合比例来控制土体黏性大小。6种土体的蒙脱石掺入量分别为0%，20%，40%，60%，80%，100%。其中0%代表土体为纯黄土，100%代表样品为纯蒙脱石。黄土采自甘肃兰州狗娃山，土颗粒相对质量密度为2.71；蒙脱石为钙基蒙脱石，蒙脱石含量>95%，土颗粒相对质量密度为2.45。采用Bettersize2600E激光粒度分布仪测量样品的粒径分布，得到黄土和蒙脱石样品的颗粒级配曲线，如图2所示。采用X’Pert PRO多晶粉末X射线衍射仪，衍射角度范围为3°~40°，扫描速度为12°/min，得到的XRD衍射谱图，如图3所示，蒙脱石主要矿物成分为蒙脱石、方石英，石英和钠长石，黄土主要矿物成分为石英，方解石、钠长石、高岭石和白云母。各试样的基本物理性质指标如表1所示。

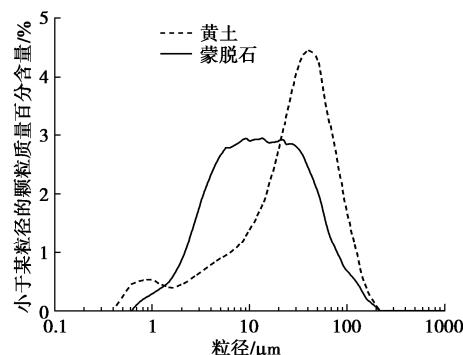
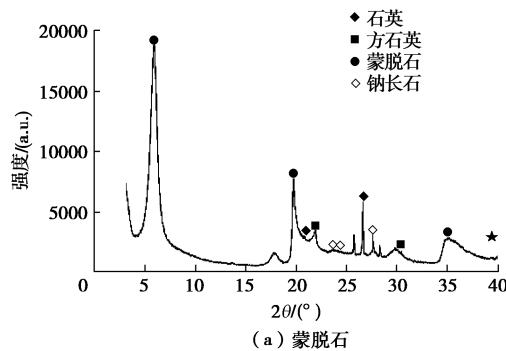


图2 土体粒度分布曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of soil



(a) 蒙脱石

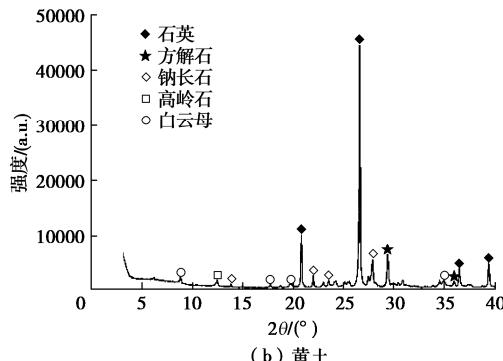


图3 土体XRD衍射谱图

Fig. 3 Spectra of XRD diffraction of soils

表1 土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soils

土样 编号	蒙脱石掺 量 S%	土颗粒相 对密度	塑限 w_p /%	液限 w_l /%	塑性指 数 I_p
#1	0	2.71	19.2	28.3	9
#2	20	—	26.1	39.6	14
#3	40	—	34.6	53.3	19
#4	60	—	41.3	73.4	32
#5	80	—	51.8	89.8	38
#6	100	2.45	62.2	104.5	42

1.2 试验仪器

(1) 温度控制及测量设备

试验所采用的控温装置为低温冷浴, 量程为 $-30^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 测温装置采用中科院西北生态环境资源研究院生产的温度探头, 精度为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 核磁共振设备

采用纽迈分析仪器股份有限公司生产的 PQ-001 核磁共振分析仪进行未冻水含量测试。核磁共振分析仪主要由永磁体、试样管、射频系统和数据采集分析系统组成。永久磁体磁场强度为 $0.5 \pm 0.08\text{T}$, 共振频率为 $18 \sim 24\text{ MHz}$, 探头内径为 28.6 mm , 接收机死时间为 $11\text{ }\mu\text{s}$, 磁体均匀区范围为直径 25 mm 、高 25 mm 的圆柱体, 为了保证主磁场的均匀性与稳定性, 磁体温度维持在 $32 \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 试验方法

将配制好的土样装入直径为 25 mm 的玻璃试管中(土样高度 20 mm), 用隔水膜包裹后放入冷浴, 由冷浴控制土样温度, 样品达到目标温度并稳定 1 h 后, 将试管从冷浴中取出, 放入核磁共振分析仪中, 测试该温度条件下未冻水的核磁信号。为避免采样过程中样品温度产生过大变化, 采样时间控制在 10 s 左右。测试完成后放入冷浴, 进行下一级目标温度控制。利用文献[4]给出的方法, 对核磁信号进行温度校正后得到未冻水含量。由于降温过程中会存在过冷现象, 过冷现象的触发会受试验过程中温度、振动、土体性

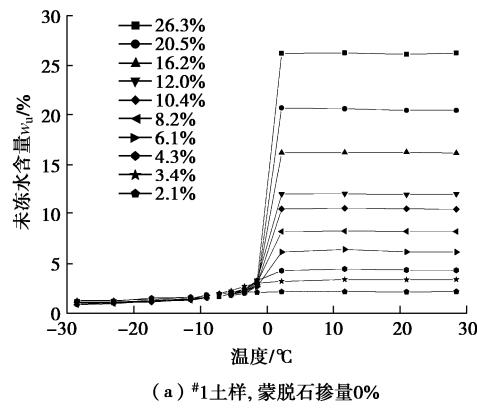
质等方面的影响, 并不稳定, 所以会导致未冻水含量测试结果产生较大波动, 采用升温过程测定未冻水含量可以避免过冷现象导致的数据波动。试验过程中利用冷浴将土样温度从室温降至 -30°C , 然后升温至 30°C , 在升温区间内对样品进行核磁共振测试, 以此消除过冷现象的影响。

核磁共振测试序列采用 CPMG 序列, 参数设置为: 采样点数 TD=12796, 采样频率 SW=200 kHz, 采样间隔时间 TW=600 ms, 回波个数 NECH=800 个, 回波时间 TE=0.08 ms, 累加次数 NS=16 次。

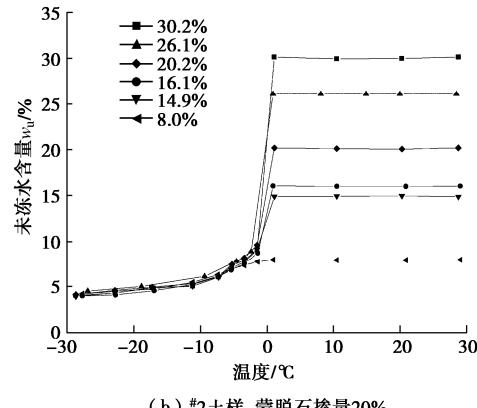
2 试验结果与分析

2.1 初始含水率对冻结特征曲线的影响

关于土体冻结后的未冻水含量, 是否受初始含水率的影响这一问题的认识存在争议。有学者认为土体初始含水率会显著影响未冻水含量, 未冻水含量随着初始含水率的增大而增大^[13-19]; 部分学者认为当土体总含水率大于液限时, 初始含水率对未冻水含量没有影响或影响很小^[10, 20], Watanabe 等^[21]、Kurylyk 等^[22]指出除了盐渍土或非常高孔隙率的土壤之外, 土体未冻结水含量与初始总水分含量无关。本文对 6 种土体配制不同初始含水率的样品, 利用核磁共振仪测定其降温条件下的未冻水含量, 得到不同温度下土样的未冻结含水率曲线, 如图 4 所示。



(a) #1土样, 蒙脱石掺量0%



(b) #2土样, 蒙脱石掺量20%

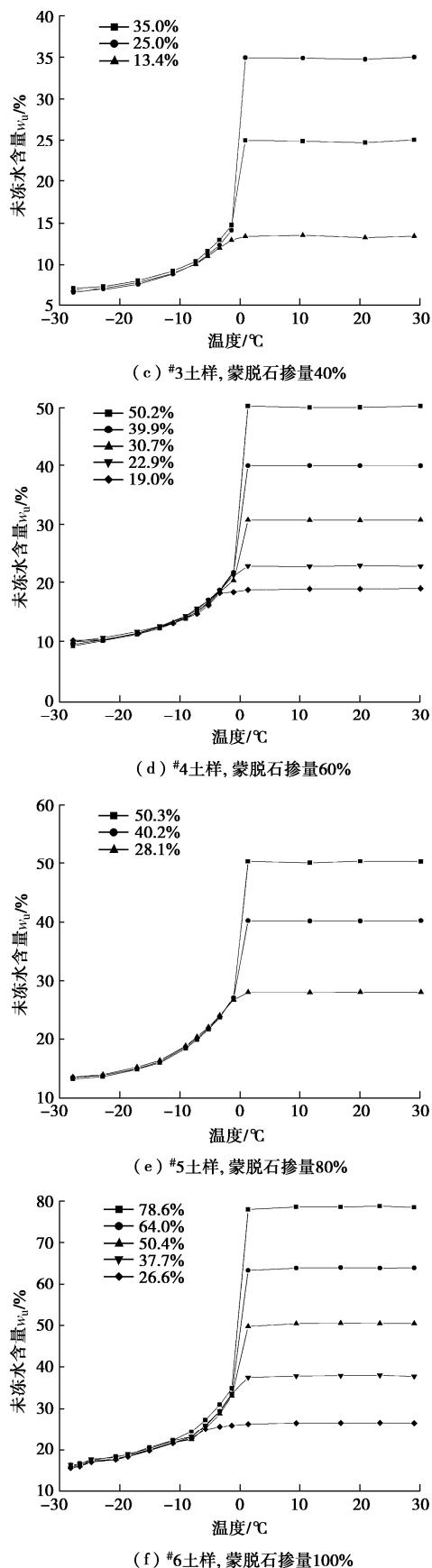


图4 不同初始含水率样品降温过程中的未冻结含水率变化曲线

Fig. 4 Change curves of water content of samples with different initial water contents during cooling process

图4给出不同土质的样品的冻结曲线试验结果,可以看出,当土样温度高于冻结温度 T_f 时,土体含水率不随温度变化,当土样温度达到冻结温度 T_f ,土样含水率变化进入剧烈变化阶段,不同初始含水率土样中水分快速变化后,达到相同含水率 w_a ,该过程对应于图1中的曲线a。当土样温度小于冻结温度 T_f 时,土样含水率变化进入过渡阶段,土体含水率随着温度的降低,从含水率 w_a 降低至含水率 w_b ,且不同初始含水率土样的未冻水含量变化路径相同,该过程对应于图1中的曲线b和曲线c(图1中初始含水率 w_1 和 w_2 对应的未冻水变化路径所示)。上述情况在土样初始含水率大于 w_a 时适用,当初始含水率小于 w_a 时,土样的冻结曲线不存在快速变化阶段,随着温度降低,土体含水率保持不变,直到土样的温度-含水率曲线与冻结特征曲线相交时,土样含水率变化进入过渡阶段,其含水率开始随温度的降低而减小,且变化过程与冻结特征曲线保持一致(图1中初始含水率 w_3 对应的未冻水变化路径所示)。

上述规律表明冻结特征曲线与初始含水率无关,当土体的初始含水率大于 w_a ,冻结过程中不同初始含水率土体的冻结特征曲线相同。从试验结果来看,这一规律对于本试验配制的6种土体均适用。冻结水的性质与未冻水有明显差异,所以 Michalowski 模型不考虑剧烈变化阶段的水分相变是合理的,且消除了初始含水率对冻结特征曲线的影响。

2.2 Michalowski 模型参数分析

模型参数 w_a 为土体冻结温度 T_f 条件下的土中未冻水含量,如何快速准确的确定模型参数 w_a 和 T_f ,是在使用 Michalowski 模型前首先要解决的问题。在 Michalowski 模型冻结特征曲线上,以 w_a 为分界点可以将 T_f 温度下的土中水分分为两部分,这里将在剧烈变化阶段发生相变的水为冻结水,在剧烈变化阶段未发生相变的水为未冻水。很明显冻结水与未冻水的成分不同,由于二者土水相互作用存在差异,所以冻结水与未冻水的冰点不同。未冻水是吸附于土颗粒表面的薄膜水,土水相互作用较强,其冰点低于冻结水冰点,且其冰点随着薄膜水水膜厚度的减小逐渐降低。Michalowski 模型 T_f 即为冻结水冰点,由于冻结水的土水相互作用较弱, T_f 与纯水冰点十分接近受土质影响较小。基于上述规律,取纯水的冻结温度 0°C 作为土体的冻结温度,则模型可以简化为三参数模型:

$$w_u = w_b + (w_a - w_b)e^{aT} \quad (2)$$

未冻水主要为吸附于土粒表面的薄膜水,未冻水含量 w_u 和温度之间存在幂律关系^[24]:

$$\lg w_u \propto \frac{1}{3} \lg(T_m - T) \quad (3)$$

式中, $T_m=0^\circ\text{C}$, T 为试样温度。

图 5 给出了 6 种土样在负温下未冻水含量 w_u 与温度 (T_m-T) 幂律关系的拟合曲线。拟合结果见表 2, 可以看出拟合方程可以很好地描述未冻水含量和温度的关系, 但土体的拟合参数 k 值与理论值 $-1/3$ 存在一定偏差, 且不同土体的 k 值并不相同, 变化范围为 $-0.38 \sim -0.24$ 。

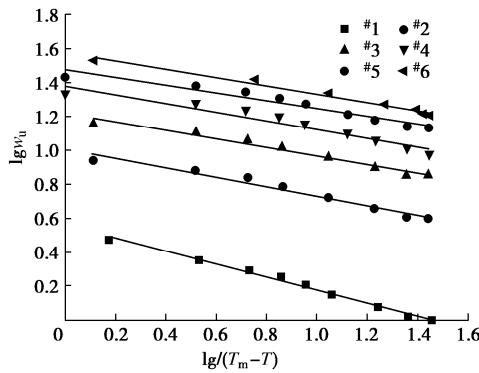


图 5 未冻水含量 w_u 与温度 (T_m-T) 的幂律关系

Fig. 5 Power law relationship between unfrozen water content w_u and temperature (T_m-T)

表 2 拟合曲线参数
Table 2 Parameters of fitting curve

土体编号	斜率 k	截距 m	相关系数 R^2
#1	-0.38	0.56	0.99
#2	-0.28	1.01	0.97
#3	-0.25	1.22	0.98
#4	-0.26	1.38	0.95
#5	-0.23	1.47	0.95
#6	-0.24	1.58	0.98

影响水膜厚度的因素有很多, 且影响机制也很复杂。范德华分子间力、静电力、固体颗粒表面水分子结构变化产生的作用都会影响水膜厚度, 实测数据拟合得到的 k 值往往偏离理论值^[24]。所以在没有实测数据时, 式(3)难以直接应用于未冻水含量的预测。通过对实测数据进行拟合, 可以得到 w_a (这里取温度为 -1°C 时的未冻水含量为 w_a), 取实测数据最低温度对应的未冻水含量为 w_b , 由 w_a , w_b 和实测数据的拟合, 可以得到参数 a , 表 3 给出 6 种土样的冻结特征曲线的参数。

表 3 Michalowski 模型参数表

Table 3 Parameters of Michalowski model

土体编号	$w_a/\%$	$w_b/\%$	a
#1	3.58	0.99	0.18
#2	10.09	3.99	0.15
#3	16.32	7.19	0.15
#4	23.75	9.53	0.13
#5	29.58	13.48	0.13
#6	37.38	15.94	0.12

将表 3 中的模型参数代入式(2)可以得到 6 种土体冻结特征曲线的拟合方程, 如图 6 所示, 可以看出,

由 Michalowski 模型计算得到的未冻水含量理论值与试验值吻合很好, 说明 Michalowski 模型可以很好地描述土体冻结过程中未冻水的变化规律, 本文给出的 Michalowski 模型的参数 w_a , w_b 和 a 的取值方法是可行的。

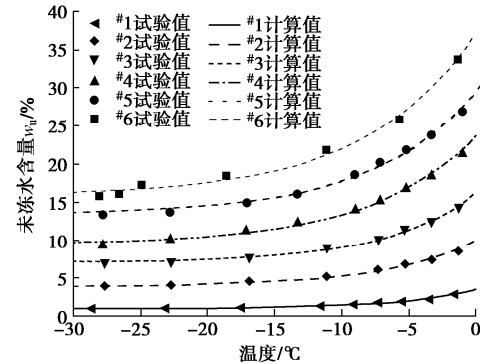


图 6 三参数 Michalowski 模型的冻结特征曲线

Fig. 6 Freezing characteristic curves of three-parameter Michalowski model

2.3 土体性质对冻结特征曲线的影响

Michalowski^[11]认为每种土体都有固定的冻结特征曲线, 冻结特征曲线可以反映土体性质。利用表 1, 3 的数据可以得到土样的 Michalowski 模型参数 w_a , w_b 与蒙脱石掺量 S 的关系曲线, 如图 7 所示, 可以看到 Michalowski 模型参数与蒙脱石掺量之间有明显相关性, 这说明 Michalowski 模型参数带有土体的特征信息。

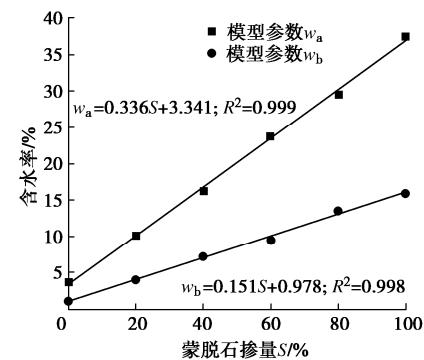


图 7 模型参数与蒙脱石掺量关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between model parameters and montmorillonite content

许多黏土表现出较高的膨胀和收缩特征、高压缩性、高保水性, 这些特征主要取决于土颗粒的粒度分布和矿物组成, 常用液塑限指标来反映。利用表 1, 3 的数据可以得到土样的 Michalowski 模型参数 w_a 与液塑限指标 w_L , w_P 的关系曲线, 如图 8 所示, w_a 和界限含水率指标之间具有非常好的正相关性, w_a 越大, 土体黏性越强, 这表明 w_a 可以很好地反映黏性土特征。 w_a 和土体液塑限指标的拟合公式如下:

$$w_L = 2.35w_a + 17.58 \quad , \quad (4)$$

$$w_p = 1.272w_a + 13.619 \quad , \quad (5)$$

$$I_p = 1.073w_a + 3.965 \quad . \quad (6)$$

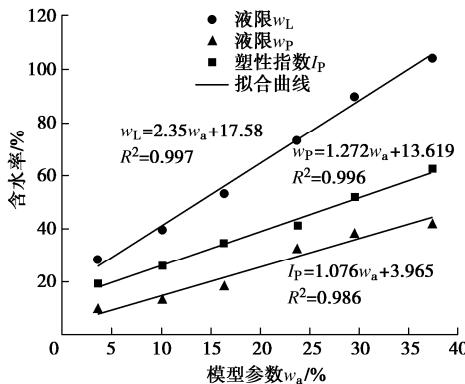


图 8 模型参数 w_a 与界限含水率指标关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between model parameter w_a and
Atterberg limits

未冻水是存在于土颗粒表面薄膜吸附水，水膜厚度主要是由分子间作用力所控制。这种分子间作用力和土体颗粒表面矿物组成密切相关，主要包括固体表面所带电荷与极性水分子之间的静电力、vander Waals 力、水分子电极与固体颗粒表面的相互作用力、氢键作用等。未冻水含量可用土颗粒比表面积和颗粒表面未冻水最大水膜厚度的乘积来计算。土体比表面积反映了土体颗粒的粒度分布，未冻水最大水膜厚度可以反映土体颗粒的矿物组成。 w_a 带有土体颗粒粒度分布和矿物组成两方面信息，相较于土体的液塑限指标具有更加明确的物理含义，可以作为表征和分析黏性土特性的重要指标参数。从上文的分析可以看出，由 w_a 作为分界点划分出的冻结水和未冻水在性质上存在明显的差异，可以近似认为冻结水主要成分为毛细水和自由水，未冻水主要成分为结合水。当不考虑温度对结合水含量的影响时， w_a 可以作为土中毛细水和结合水的含水率分界点^[25]。当土体含水率大于 w_a 时， w_a 即为该状态下土中结合水含量，当土体含水率小于 w_a 时，土体含水率为该状态下土中结合水含量，所以模型参数 w_a 为土中最大结合水含量。

2.4 Michalowski 未冻水模型改进

Michalowski 模型方程是由未冻水含量的实测数据拟合得到，所以 Michalowski 模型的参数确定十分依赖实测数据，需要测定从 0°C 降温至一个极低温度（本文取-30°C 附近）过程中的含水率变化。较准确未冻水含量测试需要使用核磁共振分析仪和控温设备，对试验设备的要求高，工作量大，极大限制了 Michalowski 模型的实用性。

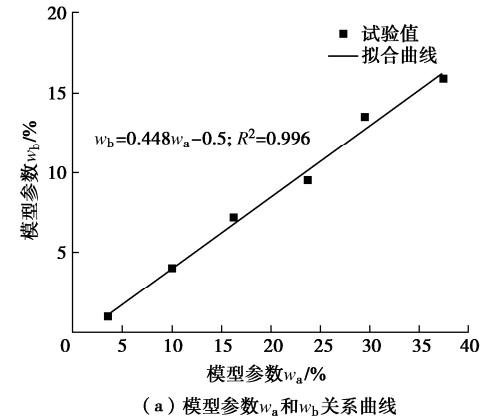
图 9 给出了三参数之间的关系曲线， w_a 和 w_b 之间的相关度很高，二者线性方程的相关系数达到

0.992， w_a 和 a 关系曲线的相关系数为 0.85，这说明 Michalowski 模型 3 个参数之间存在联系，并非完全独立。利用 3 个参数之间的关系，可以简化模型参数，降低模型的使用难度。式 (7)，(8) 分别给出了 w_a 和 w_b 、 w_a 和 a 之间的相关关系，将式 (7)，(8) 代入式 (2)，得到只有一个参数 w_a 的 Michalowski 模型，见式 (9)，这里称为单参数 Michalowski 模型。

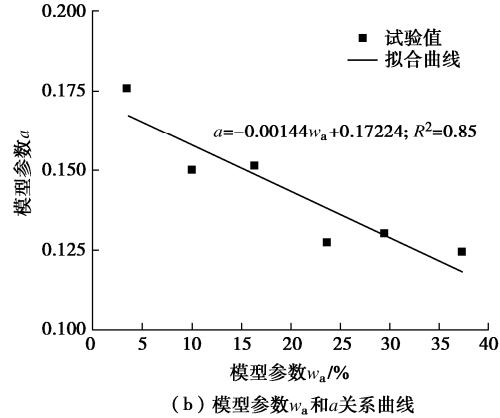
$$w_b = 0.448w_a - 0.5 \quad , \quad (7)$$

$$a = -0.00144w_a + 0.17224 \quad , \quad (8)$$

$$w_u = 0.448w_a - 0.5 + (0.552w_a + 0.5)e^{(-0.00144w_a + 0.17224)T} \quad . \quad (9)$$



(a) 模型参数 w_a 和 w_b 关系曲线



(b) 模型参数 w_a 和 a 关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between model parameters

只需知道模型参数 w_a ，就可以利用单参数模型得到描述土体未冻水含量冻结特征曲线，图 10 给出了 6 种土体的单参数 Michalowski 模型计算值。可以看出，单参数模型的计算结果和改进前的三参数模型的计算结果差异不大，单参数模型计算值和实测值的吻合很好，说明简化后的单参数 Michalowski 模型可以实现对未冻水含量的良好预测。由于三参数模型简化为单参数模型，是基于 Michalowski 三参数之间存在一定的相关性，无疑相关性越强，简化后的误差越小，所以模型简化后的误差的大小，取决于 Michalowski 三参数之间相关关系的准确性，而本文给出的 Michalowski 三参数之间相关关系是否适用于所有土

体, 还需要更多土体的试验结果进行探索。

土体界限含水率指标和 w_a 之间存在很强的相关性, 利用单参数模型, 在无未冻水含量测试相关设备时, 使用土体液塑限指标, 即可对未冻水含量进行预测。以土体液限为例, 将土体液限代入式(4)可得 w_a , 再将 w_a 代入式(9), 可以得到土体冻结特征曲线, 结果如图 11 所示。可以看到该方法可以实现对未冻水含量的良好预测, 但是该方法中 w_a 是利用液限指标由经验公式计算得到, 和实测 w_a 的方法相比, 预测效果要差一些。

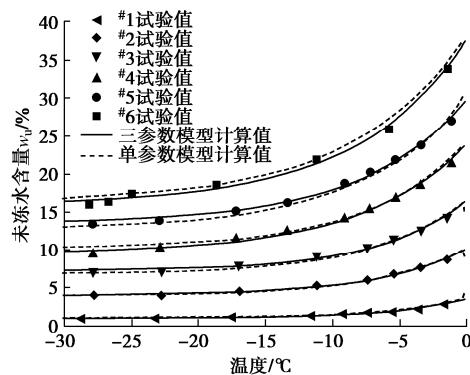


图 10 单参数 Michalowski 模型冻结特征曲线

Fig. 10 Freezing characteristic curves of single-parameter Michalowski model

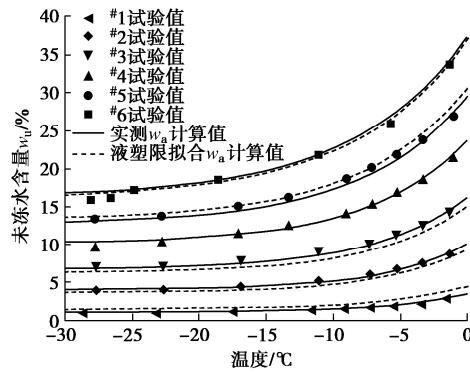


图 11 利用液限计算得到的冻结特征曲线

Fig. 11 Freezing characteristic curves calculated by liquid limit

综上, 单参数 Michalowski 模型能实现对未冻水含量的良好预测, 同时可极大的降低 Michalowski 模型的使用难度, 提升 Michalowski 模型的实用价值。本模型中未考虑盐分, 外荷载、密度和冻融历史的影响, 模型的适用范围, 有待更多数据验证, 在使用时应对其局限性予以考虑。

3 结 论

本文利用核磁共振技术对 6 种土体的冻结特征曲线进行了试验研究, 从初始含水率和土质两方面对 Michalowski 模型参数进行了分析, 利用 Michalowski 模型参数的特征对模型进行了改进, 得到以下 4 点结论。

(1) 冻结特征曲线与初始含水率无关, 当土体的初始含水率大于 w_b , 冻结过程中不同初始含水率土体的冻结特征曲线相同。

(2) 在 Michalowski 模型冻结特征曲线上, 以 w_a 为分界点可以将 T_f 温度下的土中水划分为冻结水和未冻水两部分。冻结水主要成分是毛细水和自由水, 与土颗粒表面作用较弱, 其冰点接近纯水冰点。

(3) 不考虑温度影响时, 模型参数 w_a 近似等于土中最大结合水含量, w_a 带有土体颗粒粒度分布和矿物组成两方面信息, 相较于土体的液塑限指标具有更加明确的物理含义, 可以作为表征和分析黏性土特性的重要指标参数。

(4) 单参数 Michalowski 模型在实现对未冻水含量的良好预测的同时, 可极大的降低模型的使用难度, 提升模型的实用价值。模型中未考虑盐分, 外荷载、密度和冻融历史的影响, 应用时具有一定局限性, 模型的适用范围, 有待更多数据验证。

参考文献:

- [1] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xuezhu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen Soil Physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 孔超, 王美艳, 史学正, 等. 基于低场核磁技术研究土壤持水性能与孔隙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1130-1137. (KONG Chao, WANG Meiyuan, SHI Xuezheng, et al. Study on water holding capacity and pore characteristics of soils based on LF-NMR[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1130-1137. (in Chinese))
- [3] 田慧会, 韦昌富, 魏厚振, 等. 压实黏质砂土脱湿过程影响机制的核磁共振分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2129-2136. (TIAN Huihui, WEI Changfu, WEI Houzhen, et al. A NMR-based analysis of drying processes of compacted clayey sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2129-2136. (in Chinese))
- [4] 叶万军, 吴云涛, 杨更社, 等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137. (YE Wanjun, WU Yuntao, YANG Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137. (in Chinese))
- [5] 谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1566-1572. (TAN Long, WEI Changfu, TIAN Huihui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear

- magnetic resonance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(6): 1566-1572. (in Chinese))
- [6] 周家作, 谭 龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 777-785. (ZHOU Jiazu, TAN Long, WEI Changfu, et al. Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 777-785. (in Chinese))
- [7] 孔令明, 梁 珂, 彭丽云. 比表面积对土冻结特征曲线影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(7): 1883-1893. (KONG Lingming, LIANG Ke, PENG Liyun. Experimental study on the influence of specific surface area on the soil-freezing characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(7): 1883-1893. (in Chinese))
- [8] 孟祥传, 周家作, 韦昌富, 等. 盐分对土的冻结温度及未冻水含量的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(3): 952-960. (MENG Xiangchuan, ZHOU Jiazu, WEI Changfu, et al. Effects of salinity on soil freezing temperature and unfrozen water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(3): 952-960. (in Chinese))
- [9] 万旭升, 赖远明, 张明义, 等. 土中未冻含水率与温度关系研究[J]. 铁道学报, 2018, **40**(1): 123-129. (WAN Xusheng, LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, et al. Research on relationship between unfrozen water content in soil and temperature[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, **40**(1): 123-129. (in Chinese))
- [10] TSYTOVICH N A. The Mechanics of Frozen Ground[M]. Washington D C: Scripta Book Co, 1975.
- [11] MICHALOWSKI R L. A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations[J]. Cold Regions Science and Technology, 1993, **22**(1): 47-63.
- [12] MICHALOWSKI R L, ZHU M. Frost heave modelling using porosity rate function[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, **30**(8): 703-722.
- [13] YONG R. Soil suction effects on partial soil freezing[J]. Highway Res Rec, 1965, **68**: 31-42.
- [14] ANDERSON D, MORGESTERN N. Physics, chemistry, and mechanics of frozen ground. A review conference[C]// North American contribution to the 2nd Internat. Conference. Permafrost, 1974.
- [15] WEN Z, MA W, FENG W J, et al. Experimental study on unfrozen water content and soil matric potential of Qinghai-Tibetan silty clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **66**(5): 1467-1476.
- [16] BAI R Q, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Theory and application of a novel soil freezing characteristic curve[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **129**: 1106-1114.
- [17] SPAANS E J A, BAKER J M. The soil freezing characteristic: its measurement and similarity to the soil moisture characteristic[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(1): 13-19.
- [18] SUZUKI S. Dependence of unfrozen water content in unsaturated frozen clay soil on initial soil moisture content[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, **50**(4): 603-606.
- [19] 冷毅飞, 张喜发, 杨凤学, 等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3758-3764. (LENG Yifei, ZHANG Xifa, YANG Fengxue, et al. Experimental research on unfrozen water content of frozen soils by calorimetry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3758-3764. (in Chinese))
- [20] 李东阳. 冻土未冻水含量测试新方法的试验和理论研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011. (LI Dongyang. The Experiment and Theoretical Research on a New Test Method to Measure Unfrozen Water Content in Frozen Soil[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2011. (in Chinese))
- [21] WATANABE K, WAKE T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **59**(1): 34-41.
- [22] KURYLYK B L, WATANABE K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils[J]. Advances in Water Resources, 2013, **60**: 160-177.
- [23] 应 赛, 周凤玺, 文 桃, 等. 盐渍土冻结过程中的特征温度研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(1): 53-61. (YING Sai, ZHOU Fengxi, WEN Tao, et al. Characteristic temperatures of saline soil during freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(1): 53-61. (in Chinese))
- [24] 田慧会, 韦昌富. 基于核磁共振技术的土体吸附水含量测试与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, **44**(3): 295-305. (TIAN Huihui, WEI Changfu. A NMR-based testing and analysis of adsorbed water content[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, **44**(3): 295-305. (in Chinese))
- [25] CHEN Y Q, ZHOU Z F, WANG J G, et al. Quantification and division of unfrozen water content during the freezing process and the influence of soil properties by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Hydrology, 2021, **602**: 126719.