

# 基于 pF meter 传感器的土体冻融过程中 基质势与未冻水量关系研究\*

薛珂<sup>1,2</sup>, 温智<sup>1</sup>, 张明礼<sup>3</sup>, 李德生<sup>1,2</sup>, 高樯<sup>1,2</sup>

(1. 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 兰州 730000; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 兰州理工大学 土木工程学院 兰州 730050)

**提 要:** 基质势是驱动冻土中水分发生迁移的关键驱动力之一,但由于以往的技术限制,负温下土体的基质势难以被直接测量,冻土基质势相关问题成为冻土水热过程研究中的难题。利用可用于极端负温条件下的 pF meter 基质势传感器,针对青藏红黏土、兰州粉土以及张掖细砂这三种不同粒径级配的土体,分别从粒径大小和初始含水量的角度,通过室内试验,研究了土体冻结与融化过程中基质势、未冻水量以及温度三者之间动态变化的关系。结果表明:冻土中的冰晶体对基质势和未冻水量的影响类似于融土中的气体,而冰晶体的含量又与土体温度相关;由粒径级配决定的比表面积对冻土基质势存在着决定性的影响;此外,初始含水量的多少对冻土基质势也存在与融土类似的影响。研究成果揭示了负温冻土中未冻水的数量与能量状态随冻结与融化过程的变化关系,为研究冻土中水分在基质势驱动下的迁移过程提供了理论基础和试验支撑。

**关键词:** 冻土; 基质势; 未冻水量; 冻融; pF meter; 冻结特征曲线

中图分类号: TU445

文献标识码: A

多年冻土与季节性冻土在我国广泛分布<sup>[1]</sup>。土体在随温度变化的冻结与融化过程中,水分发生相变并产生运移,在宏观上造成土体的冻胀及融沉,这对工程构筑物、农业设施均有破坏作用,同时也是造成土壤盐渍化以及土壤营养成分流失的主要原因之一<sup>[2-3]</sup>。冻胀和融沉问题一直都是冻土学研究中的重要内容,它们的发生主要是由水分从未冻区向冻结区迁移进而累积形成冰透镜体引起<sup>[4-6]</sup>。关于土体冻结与融化过程中水分迁移驱动力的假设种类颇多,早在19世纪,俄国科学家就提出了毛管力理论<sup>[7,8]</sup>,后来又有人曾先后提出毛细力、渗透压力、结晶力、真空抽吸力等14种假说<sup>[9-11]</sup>。然而,各种假说均存在一定的局限性,对解释冻土水分迁移的机理并不完善。上世纪30年代能量的观点被引入到土壤水分研究中,借鉴融土中水分运移,认为冻土中不同位置的液态水同样具有不同的能量状态,在这种能量差异的驱动下,水分从高势能位迁移至低势能位,从而导致了冻土水分重分布。土壤水的自由能与标准状态下水的自由能差值称为土水势,它是衡量土壤水能量的指标<sup>[12]</sup>。土水势包括基质势、压力势、渗透势和重力势。在冻土水分迁移过程中,由于液态水向冻结区的迁移过程非常缓慢,因此若不考虑溶质所造成的渗透势时,基质势则被认为是主要的水分迁移驱动力。所以,研究土体冻结过程中基质势的变化是解决土壤水分迁移的最基本问题。

然而长期以来,能够专门应用于负温条件下基质势的测量手段匮乏,冻土基质势缺乏相应的研究。传统用来测量基质势的方法,比如张力计法、压力板法、滤纸法等测量手段很难被应用于冻土中。所以,在过去的冻土水热研究中,经常使用 Clapyron 方程间接转换得到冻土基质势,这种依靠经验公式的方法其可靠性和准确度还有待商榷<sup>[13-16]</sup>。PF meter 是近年来发明的一种可直接测量极端负温条件下冻土基质势的新型探头,它利用摩尔热容原理,采用特殊设计的陶瓷平衡系统,可以快速获得土壤基质势值,它的出现为

\* 收稿日期: 2017-1-10; 修回日期: 2017-2-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471061和41690144); 冻土工程国家重点实验室自主课题(SKLFSE-ZT-22); 中科院寒旱所STS项目(HHS-TSS-ST-1502)共同资助。

作者简介: 薛珂(1990-),男,甘肃渭源人,博士研究生,主要从事冻土物理学与寒旱区工程研究。E-mail: tumuxk@163.com

通讯作者: 温智(1976-),男,研究员,博士生导师,主要从事冻土物理学与寒旱区工程研究。E-mail: wenzhi@ns.lzb.ac.cn

明确冻土水热研究中土体中液态水的能量状态提供了新的手段<sup>[17]</sup>。文中利用 pF meter 基质势传感器获得土体冻结与融化过程中基质势的变化情况,同时利用 5TM 水分传感器监测得到土体在冻结与融化过程中未冻水在数量上的变化,从而获得土体中液态水的数量变化与能量变化之间的对应关系。分别从粒径大小以及初始含水量角度对冻土中基质势与未冻水量的关系做了相关研究,进而为冻土水分迁移机制的研究提供理论基础和试验支撑。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 试验对象

为了研究土体粒径大小对土壤水数量-能量的影响,试验共选取红黏土、粉土以及细砂这三种粒径级配不同的土体作为试验对象。其中,红黏土取自青藏高原北麓河地区五道梁附近,是具有典型冻胀特征的土体;粉土取自兰州周边场地;细砂取自张掖地区。三种试验土体的粒径级配曲线如图 1 相关物理参数(表 1)。

### 1.2 试验设备

(1) pF meter 基质势传感器。该传感器为德国 Eco-Tech 公司所生产并经我方要求微型化后的小型传感器,微型化后的传感器能够更好地适用于室内试验。该传感器采用新技术,可快速准确的测量负温土壤基质势,突破了原有张力计等方法不能应用于负温冻土中的限制。测量范围为 0-106kPa,精度可以达到 ±0.05pF 值。该传感器理论技术成熟,目前已被许多国内外研究者用于极地以及高寒地区土壤水的研究中<sup>[18]</sup>。

(2) 5TM 土壤水分传感器。试验使用 5TM 土壤水分传感器来完成土体冻结与融化过程中未冻液态水含量的动态监测。该传感器为 Decagon 公司生产的 ECH2O 系列水分传感器之一,它利用测量土体的介电常数来获得体积含水量,其规格为 100mm × 32mm × 7mm(长 × 宽 × 高)测量范围为 0%~100%,工作的温度范围为 -40℃~50℃。已有研究者对 5TM 在冻土中的适用性做了相关研究,认为它可以被应用于冻土水热研究中<sup>[19]</sup>。

### 1.3 试验方法

设计两组试验,分别为不同粒径饱和土体以及不同初始含水量的兰州粉土的冻结与融化试验。

(1) 按照表 2 配置不同含水量的土样。使用去离子水制备不同初始含水量的土样,制备完毕后将土样置于密封罐内 12h,使得土样中水分均匀分布且与土矿物颗粒均匀接触。

(2) 将闷样完成后的土样均匀分层置于专门加工的试样罐内,试样罐规格为 20cm × 20cm(直径 ×

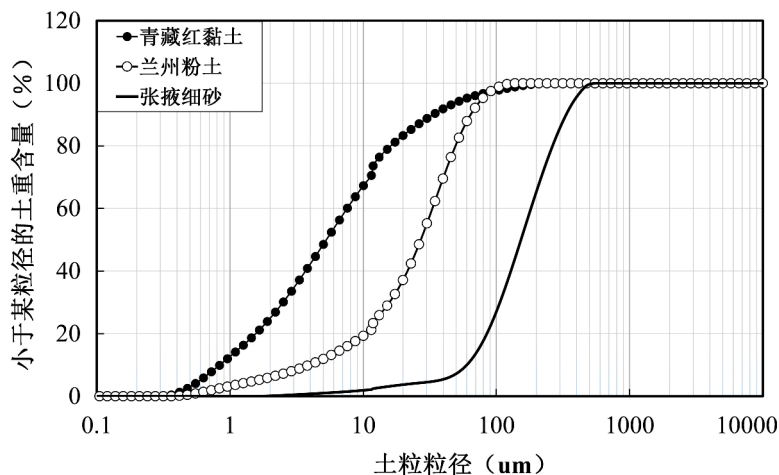


图 1 青藏红黏土、兰州粉土及张掖细砂粒径级配曲线  
Figure 1 Grain-size distribution of Qinghai-Tibet red clay, Lanzhou silty and Zhangye fine sand

表 1 青藏红黏土、兰州粉土及张掖细砂的物理参数与不同初试含水量时的冻结温度

Table 1 Physical properties and initial freezing temperature of Qinghai-Tibet red clay, Lanzhou silty and Zhang-ye fine sand in different initial water contents

	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	饱和含 水率(%)	液限 (%)	塑限 (%)	初始含水量 (%)	初始冻结 温度(℃)
青藏红黏土	1.33	33.19	35	21	33.12	-0.51
兰州粉土	1.42	28.72	29	16	28.72	-0.20
					10.26	-4.06
张掖细砂	1.93	14.38	/	/	13.78	-0.16

表 2 试验参数设计

Table 2 Parameters of the experiments

	不同粒径试验		不同初始含水量试验	
	设计含水 量(%)	实际含水 量(%)	设计含水 量(%)	实际含水 量(%)
青藏红黏土	33.12	33.27	/	/
兰州粉土	28.72	28.82	28.72	28.68
			10	10.26
张掖细砂	13.78	13.85	/	/

高)。

(3) 将 pF meter 基质势传感器和 5TM 土壤水分传感器, 分别埋置于各样品中。

(4) 完成上述准备工作后, 将试样密封后小心放置于冻土工程国家重点实验室的可控温冻融循环箱内。设置冻结参数, 从室温开始降温冻结, 降至 -15℃ 后稳定 12h, 随后开始升温融化。同时, 使用 CR3000 记录数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒径大小对冻融过程中基质势 - 未冻水量 - 温度关系的影响

考虑到冻土中相组成的复杂性(土颗粒 - 冰晶 - 液态水 - 气体 - 水汽), 为了研究土体粒径对冻融过程中液态水数量 - 能量关系的影响, 采用三种粒径不同的饱和土体(青藏红黏土 - 兰州粉土 - 张掖细砂)作为试验对象, 这样排除了气体与水汽的影响, 从而可以更简明的分析对比粒径对试验结果的影响。

(1) 未冻水量随温度的变化。土体冻结后, 并非所有液态水都相变为冰, 由于土体所具有的颗粒表面能以及毛管势能, 导致负温土体中仍有一部分水分以液态水的形态存在着。已有试验证明, 即便是极端负温下, 在土颗粒表面仍有一层水膜难以被冻结。冻土中的未冻水量与温度之间保持着动态平衡的关系, 即温度降低, 未冻水量随之降低, 反之亦然。

图 2(a)、(b) 为三种不同粒径饱和土体在冻结与融化过程中未冻水量与温度之间的关系曲线。可以看出, 在相同温度下, 未冻水量与土体粒径大小的关系为: 青藏红黏土 > 兰州粉土 > 张掖细砂。此外, 在冻结与融化过程中, 青藏红黏土中未冻水量对温度的响应过程较张掖细砂而言更为缓慢, 未冻水量减小和增大的速率均小于后者, 即平均粒径越小, 土中的液态水对于温度的响应越不灵敏。这主要是由于土体平均粒径越小, 则其比表面积越大, 从而对液态水的表面吸附势也越大, 越大的吸附势能意味着液态水被土颗粒束缚的程度越高, 从而越不容易受温度的影响。

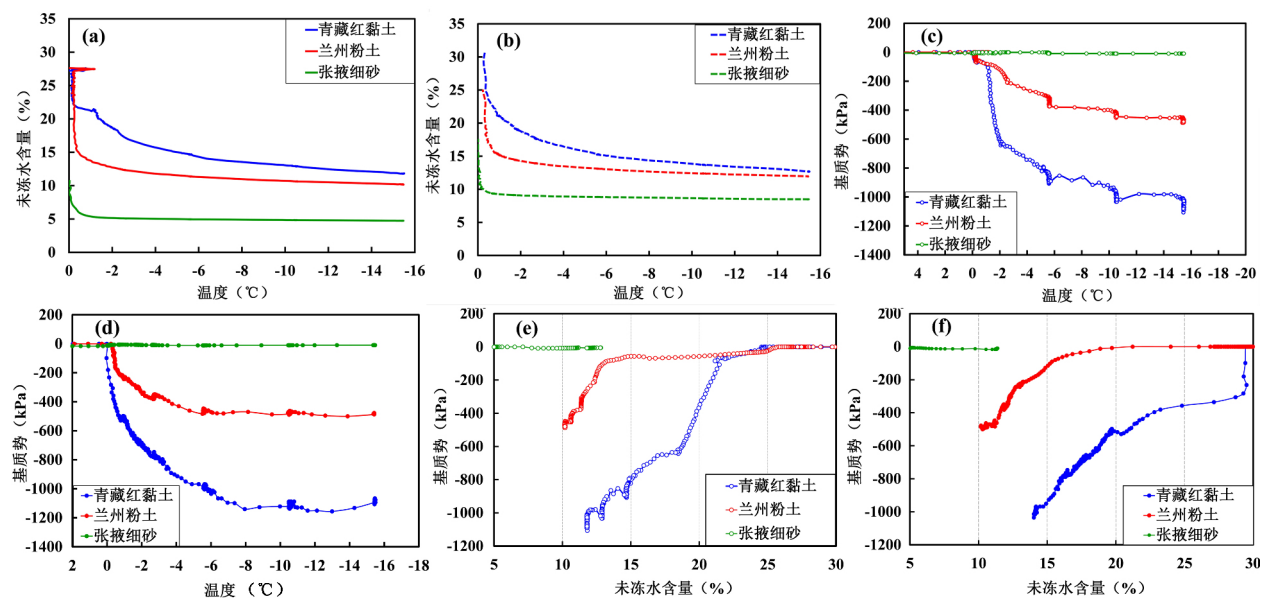


图 2 不同粒径饱和土冻结 - 融化过程中的未冻水量 - 基质势 - 温度关系

(a) 冻结过程中未冻水量随温度变化曲线 (b) 融化过程中未冻水量随温度变化曲线

(c) 冻结过程中基质势随温度变化曲线 (d) 融化过程中基质势随温度变化曲线 (e) 冻结特征曲线 (f) 融化特征曲线

Figure 2 Relationships between unfrozen water content, matric potential and temperature during saturated soil freezing and thawing

(a) Variation of unfrozen water content with temperature during freezing; (b) variation of unfrozen water content with temperature

during thawing; (c) variation of matric potential with temperature during freezing; (d) variation of matric potential with

temperature during thawing; (e) soil freezing characteristic curves; (f) soil thawing characteristic curves

(2) 基质势随温度的变化。土体基质势的大小与粒径关系密切。基质势由毛管势和吸附势组成。土颗粒的大小级配决定了土中孔隙的分布情况, 而土孔隙的大小和多少也决定了土壤毛管势的量级; 此外, 由土壤粒径级配所支配的土壤颗粒比表面积决定了吸附势的大小。图 2(c)、(d) 为三种不同粒径饱和土

体在冻结过程中基质势随温度的变化曲线。整体而言,土体在未冻结时,基质势基本不随温度变化,当土体温度小于冻结温度后,基质势随温度的降低而减小,当温度降低到一定程度,基质势开始趋于稳定,这是由于当土体温度降低到一定值后,土中液态水的含量趋于稳定。分析不同粒径土体的基质势变化过程,其随温度变化的范围大小为:青藏红黏土 > 兰州粉土 > 张掖细砂。对于细砂而言,即便是温度减小到 -15℃,基质势才达到 -16kPa,相较于青藏红黏土,其随温度变化的曲线近似于一条直线。

(3) 土体冻结/融化特征曲线。土体的冻结/融化特征曲线反映的是土体冻结与融化过程中液态水量与基质势之间动态变化的关系。它描述了冻土中水的数量与能量之间的关系。冻土的特殊性在于其力学及物理性质与温度密切相关,更重要的是土体中存在的冰晶体使得土中各相的接触方式不同,因而与融土有本质区别。图 2(e)、(f) 为三种不同粒径饱和土体冻结与融化过程中基质势和未冻水量的关系曲线。当土体未冻结时,各试样中基质势为 0,此时土体的所有孔隙均被水分充满,土体中的液态水既不具有毛管势,也不具有吸附势。当温度达到初始冻结温度以下后,土中大孔隙中的液态水先行发生冻结,基质势从 0 开始减小,此时冰晶首先在大孔隙内出现,基质势缓慢减小;当土体的温度达到一个临界值,即大孔隙中的冰晶贯通连接成一个整体的时候,土中水不再具有毛管势,基质势则由土颗粒表面对液态水的吸附势提供,此后,随着温度的进一步降低,基质势快速减小,融化过程反之亦然。

同样,粒径级配的不同也使得土体的冻结/融化特征曲线存在明显差异。在相同未冻水量下,比较基质势绝对值的大小有:青藏红黏土 > 兰州粉土 > 张掖细砂。对于张掖细砂而言,较大的颗粒级配决定了其较小的比表面积以及单个孔隙较大的特性,这使得张掖细砂中的液态水含量较小并且具有的能量状态也远小于青藏红黏土和兰州粉土。

2.2 初始含水量对冻融过程中基质势 - 未冻水量 - 温度关系的影响

为了研究初始含水量对土体冻结与融化过程中基质势 - 含水量 - 温度变化关系的影响,选择平均粒径介于黏粒土和粗颗粒土之间的兰州粉土作为研究介质,分析其在不同初始含水量的条件下,冻结与融化过程中土中液态水的数量与能量变化关系。从图 3 可以看出,对于未冻水量而言,在温度的诱导下,土壤中液态水的数量发生变化,进而导致土壤水所具有的能态发生变化。初始含水量越小,冻结与融化过程越缓慢。初始含水量越高,则土体在完全冻结时,未冻水量也越高。对于基质势而言,初始含水量越大,其在整个冻结与融化过程中的变化范围则越小,这是由于土中初始含水量越小时,土颗粒表面对水分的吸附势越大,初始含水量越大时,土颗粒对水分的作用力反而越小。无论初始含水量多少,整个冻结与融化过程中基质势与未冻水量变化曲线几乎在同一条曲线上,这说明对于粉土而言,土体冻结与融化特征曲线与初始含水量无关,而只与土体中的未冻水量以及与其对应的基质势值有关。

2.3 冻结与融化过程中未冻水与基质势的滞后效应

冻土中的未冻水量在一定温度条件下依赖于土壤固体颗粒的组成成分、比表面积以及土壤孔隙空间的结构,与温度的关系则满足动平衡原则<sup>[20]</sup>,同时冻融过程中未冻水量随温度的变化不可逆,存在一种滞后现象(图 3(a)),即冻结过程未冻水量始终大于融化过程的未冻水量,对同种土而言,冻融过程未冻水量的差值随初始含水量增大而增大;同样,与基质势在融土的脱湿与吸湿过程中类似,基质势在冻结与融

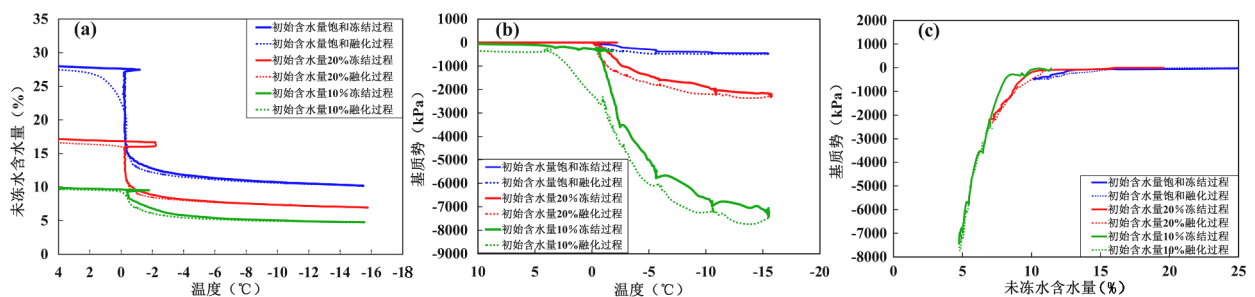


图 3 不同初始含水量兰州粉土冻结/融化过程中未冻水量 - 基质势 - 温度变化  
 (a) 未冻水量随温度的变化 (b) 基质势随温度的变化 (c) 土体冻结/融化特征曲线

Figure 3 Variations of unfrozen water content, matric potential and temperature for Lanzhou silty with different initial water content.

(a) variation of unfrozen water content with temperature, (b) variation of matric potential with temperature, (c) freezing/thawing characteristic curves

化过程中也存在滞后现象(图 3(a)、(b)),这主要是由于土体孔隙内比孔隙开口处的直径大造成冻结与



融化过程中存在水势差,以及冻结过程与融化过程造成的土颗粒间接触角的变化以及土颗粒重排列有关。

### 3 讨论

冻土基质势的测量一直是冻土学研究中的难点,而由冻土基质势衍生出来的土体冻结与融化过程中未冻水量与基质势之间的关系是解决冻胀机制与冻土水分迁移问题最为基础的研究内容。基质势的大小由土壤基质对液态水的吸附作用以及土壤孔隙中气液界面相互作用引起,由于冻土中存在的冰晶体在一定程度上使得冻土基质势的研究更为复杂,同时,冰晶体的含量以及土体自身的结构特征,均对冻土基质势有直接的影响。已有研究认为,土体冻结与融化过程中基质势与未冻水量的关系和融土在脱湿与吸湿过程中基质势与含水量关系具有类似的变化规律,冻土中随温度改变而增多或减小的冰晶体,充当了融土中气体的角色。唯一不同的是冰-水接触界面力与气-水界面力的不同导致二者在数值上不相同。

与融土一样,冻土基质势以及未冻水量在土体冻结/融化过程中的变化与土体的粒径级配关系密切。同一负温下,粒径越小,未冻水量越大,基质势的绝对值则越大。这主要是由于粒径越小,土体的比表面积越大,在相同的温度下,土体颗粒表面对液态水的吸附作用也越大,也就是说粒径越小,土颗粒表面与土中水的相互作用关系愈加紧密,土颗粒对液态水的影响也越大。此外,土体的初始含水量也是决定土体冻结与融化过程中基质势与含水量关系的另一个重要因素。从结果来看,同一负温下,初始含水量越低,则未冻水量越小,基质势的绝对值也越大。这是由于土体中液态水含量较小时,土颗粒表面对液态水的吸附作用增大,这一部分被吸附的液态水所具有的能量状态也越不稳定,基质势的绝对值也越大。

冻结与融化过程中基质势与未冻水量的关系在微观上反映了土壤固体颗粒表面与液态水以及液态水与冰晶表面之间的能量平衡关系,表明了粒径大小以及初始含水量对冻融过程中基质势与未冻水量关系的影响,可以为研究冻土中水分在基质势的驱动下的迁移过程提供了理论基础和试验支撑。

### 4 结论

(1) pF meter 基质势传感器和 5TM 土壤水分传感器可完整获得土体冻结与融化过程中基质势-液态水量-温度的动态变化情况,二者可以被应用于冻土水热的研究中。

(2) 对于粒径级配不同的饱和土而言,平均粒径越小,冻结过程中基质势的变化范围越大,未冻水量也越大。由粒径级配决定的土壤比表面积决定了土颗粒与未冻水间的接触关系,青藏红黏土中未冻水受土颗粒的吸附作用最大,张掖细砂中液态水受吸附作用最小,兰州粉土居于二者之间。

(3) 对同种土体而言,初始含水量越大,冻融过程中未冻水量越大,基质势变化范围越小。初始含水量的多少决定了未冻水能量状态的高低,初始含水量越大,同温下土颗粒对液态水的吸附作用越小。

(4) 冻融过程中基质势与未冻水量的变化关系和融土的脱/吸湿过程中类似,未冻水和基质势在土体冻结与融化过程中也存在滞后效应。

#### 参考文献

- [1]程国栋,徐学祖.从第六届国际冻土会议看中国冻土学的研究进展和任务[J].冰川冻土,1993,15(3):421-423.
- [2]周幼吾,郭东信.我国冻土的主要特征[J].冰川冻土,1982,4(1):1-19.
- [3]牛春霞,杨金明,张波,等.天山北坡季节性积雪消融对浅层土壤水热变化影响研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(11):131-136.
- [4]Taber S. Frost heaving[J]. Journal of Geology, 1992, 37(5): 428-461.
- [5]Taber S. The mechanics of frost heaving[J]. Journal of Geology, 1930, 38(4): 303-317.
- [6]张明礼,温智,薛珂.北麓河多年冻土活动层水热迁移规律分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(9):176-181.
- [7]Taylor G S, Luthin J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical journal, 2011, 15(4): 548-555.
- [8]Sill R C, Skapaki A S. Method for the determination of the surface tension of solids, from their melting points in thin wedges[J]. Journal of Chemical Physics, 1956, 24(4): 644-651.
- [9]陈飞熊,宋战平,李宁.基于吸附薄膜理论的正冻土水分驱动力模型探讨[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3):1-4.
- [10]Nakano Y, Tice A R, et al. Transport of water in frozen soil: Experimental determination of soil-water diffusivity under isothermal conditions[J]. Advances in Water Resources, 1982, 5(4): 221-226.
- [11]Iwata S. Thermodynamics of soil water: IV. Chemical potential of soil water[J]. Soil Science, 1974, 117(3): 135-139.
- [12]徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001:68-74.
- [13]Tice A R, Oliphant J L, Nakano Y, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soil as determined by pulsed nuclear

- magnetic resonance and physical desorption data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1983 5(2) : 37 – 46.
- [14] Tuller M. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. *Water Resources Research* ,2005 ,41(9) : 319 – 335.
- [15] Campbell G S. Soil water potential measurement: An overview[J]. *Journal of Soil Science* ,1986 ,37(3) : 357 – 362.
- [16] Williamms P. Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction[J]. *Geotechnique* ,1964 ,14(3) : 231 – 246.
- [17] 温智, 马巍, 薛珂, 等. 基于 pF meter 基质势传感器的冻土水分迁移研究[J]. *土壤通报* ,2014 ,45(2) : 370 – 375.
- [18] Berg R , Ingersoll J , et al. Frost heave in an instrumented soil column[J]. *Cold Regions Science and Technology* ,1980 3(3) : 211 – 221.
- [19] 薛珂, 温智, 张明礼, 等. 5TM 传感器在冻土水热研究中的适用性评价[J]. *工程地质学报* 2015 23(增刊) : 668 – 675.
- [20] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 31 – 69.

## PF meter – based study on the relationship between soil matric potential and unfrozen water content during soil freezing and thawing

XUE Ke<sup>1 2</sup> , WEN Zhi<sup>1</sup> , ZHANG Mingli<sup>3</sup> , LI Desheng<sup>1 2</sup> , GAO Qiang<sup>1 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering , Northwest Institute of Eco – Environment and Resources , CAS , Lanzhou 730000 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. College of Civil Engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China)

**Abstract:** As one of the key factors driving moisture migration in frozen soil , soil matric potential has historically been a hard problem to measurement directly due to the limitation of technical. PF meter is a new sensor invented in recent years , which can be used in extreme negative temperature conditions. A study on the relationships of soil matric and unfrozen water content for Qinghai – Tibet red clay , Lanzhou silty and Zhangye fine sand during freezing and thawing was carried out. The results show that the ice crystal in frozen soil can be analogous to the air in unsaturated soil under room temperatures. The specific surface area which determined by the soil particles size has a significant effect on the matric potential of frozen soil. In addition , initial water content has a similar impact on matric potential of frozen soil. This research illustrated the relationship between liquid water amount and energy state during soil freezing and thawing , and provided a theoretical basis and experimental support for the moisture migration research under the driving of matric potential.

**Key words:** frozen soil; soil matric potential; unfrozen water content; freezing and thawing; PF meter; SFCC