

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.006

寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展

薛珂¹,郑涛¹,张明礼²,刘建平¹,阳峰¹

(1. 四川农业大学水利水电学院,四川 雅安 625014; 2. 兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 综合分析了冻土液态水和气态水迁移机制以及水热耦合数值模型,归纳了土水势理论和水汽迁移成冰理论的研究进展,综述了冻土传统水分迁移驱动力理论和水汽迁移驱动力理论,分析了工程地基土体增水机理,对水热力和水热汽耦合作用理论进行了总结分析,并对比了不同数值模型的特点。因冻土冰水相压力的不明确,Clapeyron 方程在冻土中的适用性还需进一步探究;水汽遇冷冷凝作用和水汽蒸发凝结作用很好地解释了非饱和土体的增水机理;传统水分迁移理论多是基于液态水展开研究,忽略了水汽运移的影响,水汽迁移成冰理论很好地解释了水汽运移引起的工程冻害;水热力耦合迁移理论没有充分表征应力场的作用,不能完全揭示土体冻胀的形成和发展过程。

关键词: 冻土;混合态水分迁移;水汽迁移成冰理论;锅盖效应;水热力耦合模型

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)03-0039-08

Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region

XUE Ke¹, ZHENG Tao¹, ZHANG Mingli², LIU Jianping¹, YANG Feng¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;
2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Considering that most projects in cold regions are located in arid or semi-arid regions, this paper comprehensively analyzes the migration mechanism of liquid water and gaseous water in the frozen soil and the model of hydrothermal coupling, in order to provide theoretical support for the study of the migration mechanism of mixed state water in frozen soil, as well as the prevention and control of engineering freezing damage. The research progress of soil water potential theory and vapor transfer-induced freezing theory are summarized, and at the same time, detailed reviews on the traditional moisture migration force theory of frozen soil and migration force theory of water vapor are analyzed. Then, a deeply analysis on the water increasing mechanism in the engineering foundation is conducted, and in addition, this study also summarizes coupled models of the water thermal force and water-vapor, with comparing the characteristics of different numerical model. According to the analysis, the following results can be obtained that considering that the concept of pressure of ice-water phase pressure is not clear, the applicability of Clapeyron equation in the frozen soil needs to be further evaluated. The traditional water migration theory is based on liquid water and ignores the influence of water vapor migration. The water accumulation mechanism of unsaturated soil is well explained by cold condensation and evaporation condensation of water vapor. Meanwhile, the theory of the vapor transfer-induced freezing can well explain the engineering freezing damage caused by the water vapor migration. Finally, the hydro-thermal coupling theory does not fully represent the action of stress field and cannot fully reveal the formation and development process of soil frost heave.

Key words: frozen soil; mixed water transport; theory of vapor transfer-induced freezing; canopy effect; coupled hydro-thermal-mechanical model

基于冻土极易受环境温度影响的特性,如何在冻土区发展农业、进行工程建设以及工程冻害的防治成为当今冻土领域研究的热点。土体冻胀是诱发寒区工程冻害问题的主要原因在之一,地基开裂、冻土退化以及土地次生盐碱化等问题均与土体冻胀有关^[1-2]。土体冻胀变形的根本原因是在土体冻结过程中,浅层土体环境温度降低,深层土体温度稳定不变,整体土壤沿垂向形成“浅低深高”的温差,土体中水分在温差作用下往浅层土体方向输送并相变为冰,进而影响寒区道路、机场跑道以及输水渠道等工程设施的稳定性^[3-4]。因此,

基金项目: 国家自然科学基金(41907242)
作者简介: 薛珂(1990—),男,讲师,博士,主要从事冻土物理学与寒区工程研究。E-mail:tumuxk@163.com
引用本文: 薛珂,郑涛,张明礼,等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):39-46.
XUE Ke, ZHENG Tao, ZHANG Mingli, et al. Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 39-46.

研究冻土的水分迁移机制是防治寒区冻害问题的关键。

天然地表浅层土体大多为非饱和状态,土体冻结过程中发生的水分输运不仅包含孔隙中液态水的迁移,还涉及水汽运移,因此,冻土水分迁移机制的探究是对土体冻结过程混合态水分运移问题的认识。非饱和土体的混合态水分迁移规律复杂,常规试验和数值模拟均较难满足要求。早期研究普遍认为水汽运移在冻土中的水分传输占比很低,可忽略不计^[5-6],因此以往研究多是基于饱和土或液态水开展土体冻胀特性的相关研究。但有研究发现,在降雨稀少、土壤含水率低且地下水位较深的寒旱地区,土体中的水分迁移是以水汽运移为主,其传输过程中伴随的相变会产生或消耗大量的潜热,即使是粗颗粒填料的铁路路基也会发生明显的冻胀现象^[7]。较早的 Richard^[8] 基于达西定律,推导出非饱和土体的渗流方程;之后 Saito 等^[9] 建立了用于计算地下液态水、水汽和热量的耦合模型,但该模型是针对融土建立的。贺再球^[10] 通过演算给出了非饱和土体中水汽运移引起的含水量变化方程。杨高升等^[11] 采用光滑粒子法 (SPH) 计算非饱和冻土水热汽耦合模型,发现相较于水-热模型,该模型更好地表征了土体的水热汽迁移特征。毕骏^[12] 系统研究了含水率、粒径以及温度等因素对水热汽迁移的影响,发现试样顶部含水率均增加,证明了气态水的迁移。高建强等^[13] 基于非饱和土体冻结试验,发现在外界补水条件下,混有粗颗粒的土样冻胀量最大。

综上,冻土液态水迁移和水汽传输的相关研究已取得一些阶段性的成果,但仍存在不少问题急需解决。例如:水分迁移驱动力理论不能充分契合冻土的实际情况;冻土水热力耦合模型涉及参数过多,以及水分场、温度场和应力场三者之间没有达到真正意义上的耦合;冻土水汽运移理论研究聚集于水热力多场耦合模型的建立,已有模型较单一,边界条件简单,并不完全符合实际非饱和土体中复杂的水汽运移和水汽相变规律;学者们结合实际工程背景详细分析了土体的增水机理,并提出铺设隔气防水土工膜的防治方法,但该措施还需要实际工程的进一步验证。基于此,本文对前人有关冻土液态水、气态水迁移相关的理论基础、数值模型、试验进行梳理总结,以期为寒区冻土工程建设和土体冻胀理论的研究提供参考。

1 冻土水分迁移相关理论

1.1 土水势理论及其发展

土水势理论^[14]是目前常用于研究冻土中水分迁移的理论之一,提出水分迁移是土水势存在梯度差的结果,避免了从纯力学角度分析水分迁移驱动力的复杂性和未知性。土体中的孔隙水受到毛细管作用力、土颗粒的吸附力、溶质的吸引力等作用产生的基质势、溶质势和重力势等统称为土水势,它可以定量反映水分的运移方向和能量状态。正冻土中,土体各处温度存在时间和空间上的差异,基于温度与未冻水数量呈数值对应关系,未冻水数量也表现出时空性,使得水分受到的作用力发生改变。即冻土中各处未冻水的土水势发生变化,土水体系中的水处于不平衡状态,从而发生运移。据此,研究者将土水势的概念引入冻土水分迁移研究中,建立土水势与导湿系数的关系式,确定并预测冻土中的水分传输和冻胀特性。

针对冻土含水率和土水势难以测定的问题,常用的解决方法有:①经验公式。早期研究通过试验得到。②利用 Clapeyron 方程。该方程可以描述物质相变平衡时物理量的变化。考虑到冻土中冰水相压力难以测定,将 Clapeyron 方程用于冻土可以定量表征冰水两物质发生相变平衡时温度与作用力的关系。由于冻土的孔隙结构和冰水相界面与温度紧密相关,Williams 等^[15-16] 发现 Clapeyron 方程只适用于部分多孔介质,认为孔隙水状态由毛细管作用力和吸附力两者维持,并假设针对不同类型的力应使用不同的关系方程,这一假设的背后原因是,界面力和冰-水界面曲率的改变会降低孔隙水的冰点,冰水系统的能量已发生改变。在这种情况下,Clapeyron 方程改写为广义形式:

$$\frac{P_w}{\rho_w} - \frac{P_i}{\rho_i} = L \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{1}$$

式中: P_w 、 P_i 分别为冰水相界面的水压力、冰压力,Pa; ρ_w 、 ρ_i 分别为水和冰的密度,kg/m³;L 为相变潜热,kJ/kg; T_0 为水的冻结温度,℃;T 为温度,℃。

此外,为简化冰水相压力的数值计算,有学者提出饱和正冻土中固体-水-冰系统的能量状态关系与非饱和多孔介质融土中固体-水-空气系统的能量状态关系类似^[12]。根据这一理论思想,Harlan^[17] 将简化后的冰水相压力结合广义 Clapeyron 方程计算土体冻结过程中的土水势。Lebeau 等^[18] 假定空气-水界面与冰-水界面的压差相同,在广义 Clapeyron 方程的基础上,建立了更加符合冻土水分传输的毛细-薄膜流动模型。广义

Clapeyron 方程适用的前提是土水系统处于稳态或类稳态,由于土体冻结过程孔隙水含量、热量的传递以及土体内部的微观结构时时刻刻处于动态变化中,Style 等^[19]指出饱和正冻土中冰/水系统的能量状态与非饱和融土中水/气系统的能量状态并不相似,Clapeyron 方程不适用于冻土。

对此,Biermans 等^[20]认为在使用达西定律表述冻土水分流动的前提下,引入或替换参数建立的广义 Clapeyron 方程可以求取正冻土的水分迁移速率。薛珂等^[21]利用 pF-Meter 传感器开展有关土体冻结特征曲线的研究,发现广义 Clapeyron 方程用于冻土的研究是可行的。Watanabe 等^[22]基于广义 Clapeyron 方程建立了描述冻土中水分流动的毛细管束模型。王永涛等^[23]认为,Clapeyron 方程的应用受土中水流、冰压力等多种因素的影响,在稳态情况下,广义 Clapeyron 方程是成立的,但它的使用受温度的限制。

已有研究基于土水势理论建立了诸多不同的冻胀模型,而目前多数模型以基质势作为水分迁移的驱动力。为了简化模型,排除重力、上覆压力以及溶质吸力对水分运移的影响。在该情形下,建立的冻胀模型主要是针对分别由毛细管作用力和吸附力起主要作用时冰-水界面系统的能量状态进行分析。因此,广义 Clapeyron 方程在冻土中的适用性是土水势理论发展的主要难题之一,虽然多数研究者认可并使用 Clapeyron 方程建立基于土水势的冻胀模型,但正冻土内温度的变化时刻改变着土体结构和物理特征参数,加上冰颗粒、水流流动、溶质等对系统中冰水相压力的影响机制难以确定等因素,致使冰水相压力概念不统一,这些问题均使得 Clapeyron 方程在冻土中的适用性还需研究。对此,常用的方法是添加或修改参数以获得与试验结果相符合的理论模型,因此不同研究者建立的冻胀模型各有差异。

1.2 水汽迁移成冰理论

土体的锅盖效应现象是由冻土混合态水分迁移而诱发工程冻害的典型实例,李强等^[24]指出,低温季节时期,土体内部形成明显的温度梯度,密闭的上覆结构使土体表面蒸发效应受阻,土体水分不能排出且在结构表面处聚集,致使大量的气态水和液态水于密闭结构下方土体汇集,并将这一现象称为锅盖效应。大量水分聚集会影响工程地基的稳定,诱发工程结构变形或开裂等冻害问题。基于此,腾继东等^[25]提出一种水汽迁移成冰理论,该理论指出,在非饱和土体冻结过程中,液态水和气态水分别发生冻结和凝华,降低了孔隙的相对湿度,促使土中液态水(地下水)不断蒸发为水汽以提高土体孔隙的相对湿度,保证非饱和土体中的水汽平衡;同时水汽运移至冷端土体发生冷凝或凝华。非饱和土体冻结过程中,混合态水分迁移和水汽相变主要受温度梯度和水势梯度的控制,水汽迁移还与土中空气湿度有关。土体边界低温时期,浅层土体中液态水和气态水发生相变,土体孔隙的相对湿度减小,水汽平衡被打破,同时浅层土体水势降低,土体内形成明显的水势梯度。浅层土体土水系统的变化加剧了深层土体液态水(地下水)的蒸发,以水汽的形式运移至浅层土体。此外,水汽相变会产生或消耗大量的潜热,影响液态水和气态水的迁移。至此,整个非饱和冻结土体内部在温度梯度和水势梯度的影响下,完成了水分蒸发、水汽冷凝或凝华以及水-汽耦合迁移。水汽迁移成冰理论开创性地揭示了非饱和冻结土体中水-汽耦合迁移机制,该理论指出负温环境下发生的水汽运移不容忽视。姚仰平等^[26-27]利用低含水率土体进行水分迁移试验,发现在冷凝或冷冻条件下引发的锅盖效应会引起工程灾害。张升等^[28]开展了不同含水率土体的单向冻结水汽运移试验,发现冻结状态下冷端土体含水率显著增加,且温度梯度越大,水汽运移现象越明显,并指出铺设隔气、防气的土工膜可以有效防治寒旱地区的冻害问题。王琳^[29]也提出在最优位置铺设隔气防水隔断层,可以有效防治冻土锅盖效应引起的工程问题。但该措施是基于试验提出的,还需实际工程来进一步验证,同时,水汽迁移成冰理论是在第一类边界条件土样冻结试验条件下提出的,理论基础简单,不能完全反映实际冻土内部的水汽运移现象。

2 冻土混合态水分迁移驱动力

2.1 冻土水分迁移驱动力理论

水分迁移和水分相变会改变土体结构,破坏土水体系的平衡,造成土样冻结过程的复杂化,明确水分迁移驱动力及过程对于认识土体冻胀机制和预防工程冻害很有必要。马巍等^[30]首次提出土体冻结形成的冻结孔隙与土体中孔隙类似,会驱使水分往冻结锋面迁移,诱发土体冻胀,但该假说未得到论证。之后,Taber^[31-32]分别用液态苯和硝基苯材料替代水进行了多次土体冻结试验,发现土体产生了冻胀,同时在有外界水源补给的土柱试验中发现,土柱在冻结过程中体积会增大,较为直接地证明了水分迁移是土体产生冻胀的关键因素。

为明确土体冻结过程中水分迁移的动力来源,已有研究者提出了多种理论假说^[1],这些理论从多角度出发,基于不同假设分别提出了某一特定条件下的水分迁移驱动力,其中被大家广为接受的有毛细管作用力理论^[33]、薄膜水迁移理论^[34]、结晶力理论以及吸附-薄膜迁移理论等^[35-36]。然而,冻土中的水分迁移不是某个力单独作用的结果,未冻水会受到多种力的驱使,在这些力的综合作用下,土体中水分发生迁移。但由于力的数量和方向均不确定,很难从力学角度定量表征水分运移的驱动力。为此,徐敦祖等^[1]引入土水势的概念,在数量和方向上给出了水分迁移驱动力。Harlan^[17]指出,可将土水势梯度视作水分迁移的主要驱动力,通过 Clausius-Clapeyron 方程计算土水势。基于 Harlan 水热耦合模型,Taylor 等^[37-38]提出水分迁移的驱动力是未冻水含量梯度、温度梯度和压力梯度的共同作用。温智等^[39]采用 pF-meter 基质势传感器测量土体基质势的动态变化,提出水分运移的驱动力是基质势梯度。土水势概念的引入,将研究出发点从纯力学角度向热力学角度转变,避免探究水土环境中复杂作用力的大小和方向,从而达到简化冻胀模型建立的目的。但由于冻土结构自身的复杂性、物理参数的动态化、冰水相压力概念不统一等问题,冻土水分迁移驱动力理论还不能充分揭示冻土的水分迁移现象。

目前冻土水分迁移驱动力理论研究的支点多为液态水,有关冻土水汽迁移的研究相对滞后。冻土混合态水分迁移驱动力相关研究虽已取得较大进展,但由于冻土混合态水分迁移和水汽相变的复杂性,试验测试与理论假说互相验证的难度较大,研究常常选择简化土体边界条件或修正物理性质参数,无法充分阐释冻土混合态水分迁移机制。

2.2 非饱和冻土水分迁移驱动力理论

为探明土体内水汽迁移驱动力和水汽迁移增水机理,国内外研究者进行了诸多研究。Jackson 等^[40]在试验中发现土体湿润锋推移速度不同,认为这是土体温度差异导致的,并提出温度变化会改变土体孔隙中水汽密度,引起水汽的运移。王铁行等^[41]在土力学理论和流体力学理论的基础上,根据非饱和土体气态水迁移特征,提出温度梯度和含水量梯度可分别或共同驱使水汽运移。Nakano 等^[42]基于试验发现,当非饱和冻土含水量存在梯度差异时,土体也会发生明显的水汽运移。滕继东等^[25,28]分别从试验和数值模型方面探究水汽迁移机理,发现非饱和冻土中的水汽运移主要受温度和基质势的影响。总结现有研究可知,水汽遇冷冷凝作用和水汽蒸发凝结作用是水汽迁移引起非饱和土体增水的两种主要方式。

第一种增水机理是土体边界温度未达到冻结状态时,土体内温度梯度不明显,以毛细水的输送为主,同时伴随着水汽运移和水汽相变。深层土体的气态水运移至浅层土体区域并发生相变,此时,深层土体孔隙中的水汽平衡被打破,土体中的液态水蒸发,补给深层土体中水汽的损失。由于土体内部温度梯度和水势梯度不明显,毛细水和水汽迁移及水汽相变均不会很剧烈,宏观表现为密闭结构下方土体含水率的增加有限,土体较难达到饱和状态。第一种土体增水方式常涉及水汽冷凝、水汽耦合迁移以及液态水蒸发,目前相关研究有:吴谋松等^[43]分别进行了有无地下水补给的室内非饱和土体冻结试验,试验结果表明,稳定的地下水补给会加剧水分迁移。关于液态水迁移量与气态水迁移量的比较,Smith^[44]与 Gurr 等^[45]通过试验得到了完全相反的结果,Smith 发现一定边界条件下液态水迁移量更大,而 Gurr 等得到的结果与之相反。

第二种增水机理是土体的边界温度达到冻结状态时,土体中发生的水分传输以水汽运移为主。土体中温度梯度和水势梯度较明显,大量的气态水会直接运移至浅层土体并发生冷凝或凝华,增加了上覆结构下方土体的含水量,同时,深层土体的液态水(地下水)蒸发以弥补水汽的损失,保证土体孔隙的水汽平衡。此外,剧烈的水汽运移和水汽相变会引起土体孔隙的相对湿度大幅度减小,加剧水分蒸发和水汽运移,使得大量地下水以水汽的形式运移至浅层土体并发生相变,宏观表现为密闭结构下的浅层土体含水率大幅增加,甚至达到饱和状态,引起工程地基开裂等冻害问题。第二种土体增水方式涉及水分蒸发、冻结、冷凝以及凝华,常发生在雨量稀少、土体含水率低的地区,目前相关理论研究较少,多侧重于室内试验研究。陈伟^[46]基于马氏瓶原理,自制了非饱和冻土的水汽迁移试验装置,通过试验发现土体边界温度越低,水汽迁移速度越快,土体冷端位置形成的冷凝水和凝华冰越多。任朝霞^[47]分别考虑试样顶端有无荷载、含水率梯度、土样压实梯度等情况,结合 COMSOL Multiphysics 软件模拟数值,将计算结果与试验数据进行论证,以探究非饱和膨胀土的水分迁移规律。

陈含^[48]根据土体持水特性的相关理论,提出了锅盖效应水汽循环理论,即存在于上覆结构的土体内部会发生水汽循环运动。在温度梯度作用下,深层土体的水蒸发为水汽向上迁移,并在温度较低处发生冷凝,

以液态水的形式保持在土颗粒周围。当液态水含量一定时,浅层土体会达到饱和状态,在重力作用下,持续迁移的水汽冷凝后向下发生渗流,回到深层土体中,在温度梯度作用下又发生运移,不断循环运动。在这个过程中,液态水蒸发为水汽,水汽遇冷变为液态水并在重力作用下渗流。罗汀等^[49-50]通过冻结试验研究干密度和冻结时间对水汽迁移的影响,发现在以粗颗粒为主要成分的土样中,液态水迁移量有限,水汽运移现象显著;延长冻结时间,水汽持续迁移,冷端土体含水量增加。

综上,寒区非饱和冻土水汽迁移主要受温度梯度和基质势梯度的作用,地下水的补给、土颗粒的成分也会影响冻土的水汽迁移。水汽遇冷冷凝作用和水汽蒸发凝结作用很好地诠释了工程地基土体的增水机理,证明了水汽运移在冻土水分传输中扮演着重要的角色,处于寒旱地区的工程设施应重视水汽迁移引起的冻害问题,将防气、隔气作为防治工程冻害的措施之一。

3 冻土水热力(汽)耦合作用理论

3.1 冻土水热力耦合作用理论

土体冻结的本质是热量输运耦合的过程,包含水分场、温度场以及应力场三场之间的交互作用。土样在冻结过程中,温度梯度的产生引起水分迁移和相变,改变了土体水分场的分布,同时该过程伴随着大量的相变潜热,影响了土体的热物理参数,从而改变了温度场分布和冻结深度;温度变化又反作用于水分迁移,再次改变了土体水分场分布,而水分场和温度场的分布情况决定了土体的冻胀情况,引起应力场的改变,应力场的改变又影响了水分场和温度场;水分场、温度场及应力场之间的相互影响复杂多变,也是土体冻结过程的又一体现。数值模型可以更好地表征冻土的水分迁移与冻胀,从简单的水分迁移模拟到水热耦合模型再到水热力、水热汽耦合模型,这些模型均从水分场、温度场、应力场三者角度分析冻土的水分迁移和冻胀特性,并建立了相互之间的数学模型,从而可以更好地理解和预测土体的水分迁移和冻胀变化^[51]。水热(力)耦合模型是基于质能守恒方程建立水分迁移控制方程和热传导方程,目前较为成熟的水热(力)耦合模型主要有流体动力学模型、刚性冰模型、热力学模型和水热力耦合模型^[52]。

流体动力学模型认为正冻土的水分迁移与非饱和土体中的水分迁移是相似的,均视冻土中的冰晶为空气,建立基于达西定律的土中水流控制方程和热传导方程。Harlan^[17]较早提出了水热耦合模型,但该模型没有考虑土体冻结过程中外荷载的影响,且只解释了连续冰透镜体的形成机理;后续研究建立的水热模型多基于 Harlan 模型,如周家作等^[53]利用移动泵的思想建立土体水热耦合模型,将土体划分为冻结区和未冻结区,分别建立质量和能量守恒方程,该方法避免了处理复杂边界条件的问题。刚性冰模型是流体力学模型的完善,该模型考虑了冻结缘参数、冰颗粒形成等因素的影响,其核心理论是将分凝冰和下端的孔隙冰视作整体,两者共同向土体暖端方向移动。由于冻结缘的复杂性,刚性冰模型存在计算量大、参数过多的问题。

水热力耦合模型是水热模型与应力场的结合,该模型基于外力边界条件,将热量迁移的流体动力学模型和力学方程相联系。毛雪松等^[54-55]将温度梯度和应力作用与水分迁移方程相结合,以弹性力学理论分析土体温度场、水分场和应力场。但水热力耦合模型没有表征应力场对冻土中热量、水分迁移的影响,应力场只是温度场和水分场对其影响的数值表现,没有和温度场、水分场完全耦合。

热力学模型从微观角度进行冻土的水热力耦合,综合考虑了水分迁移方程、热传导方程以及孔隙吸力等因素,同样存在参数过多的问题。

此外,土体中盐分的存在会影响冻结土体的热量输运耦合过程,基于水热力耦合作用理论,开展水热盐耦合模型的研究是目前表征冻土盐胀的常用有效手段。冻土中盐分影响水分场和温度场的方式具体表现在:盐分结晶会释放潜热,影响土体的温度场分布,温度场的变化会影响水分场的重分布;而水分作为盐分运移的载体,水分运移规律会作用于盐分场的分布。因此,水分场、温度场和盐分场之间相互影响,建立合理的水热盐耦合模型,可以有效表征土体的冻胀和盐胀特性。于天文^[56]结合盐分、水分、热量的运移方程,基于质量和能量守恒方程,建立盐渍土水热盐力耦合数学模型,并分析了水盐迁移机理。汤瑞^[57]以季节冻土地区盐渍土为对象,构建了水热盐耦合分离冰冻-盐胀理论模型,该模型可以较好地预测分凝冰和结晶盐的发育。目前水热盐模型可以表征水分场、温度场以及盐分场的分布,但不能较好地解释分凝冰和结晶盐的生长形成。

3.2 冻土水汽耦合作用理论

水热(力)耦合模型和水热盐耦合模型侧重于液态水和盐分对土体冻胀特性的影响,忽略了水汽运移对冻土水分传输的贡献。在非饱和土体水热耦合运移理论研究方面,最早由 Philip 等^[58] 基于质量和能量守恒方程建立了涉及水汽相变的水热汽耦合运移模型(PDV)。Sakai 等^[7] 针对低含水率非饱和土体的水热汽耦合迁移研究,提出可以精确修正水热汽耦合运移计算的方法。与融土不同,冻土的水汽迁移问题更为复杂。An 等^[59] 利用气象资料估算了考虑土壤与大地相互作用的土壤表面热流和水通量边界,通过所建立的理论模型,研究了二维路基的温度和体积含水率的变化规律。Rubin^[60] 构建了三维水汽迁移模型,该模型可以较好地模拟水汽往低温区的运移过程。水热汽模型的合理构建,可以为防治工程冻害问题提供理论依据。滕继东等^[25] 基于冰水相变和水汽相变过程,建立了非饱和冻土水-热-汽耦合理论模型,据此提出现行工程设计应多考虑防气、隔气的建议。但非饱和冻土水-热-汽耦合理论模型的计算边界条件为第一类热边界,不适用于多年冻土地区。张明礼等^[61] 基于对液态水、水汽相变以及水汽运移的考量,建立了可以有效反映降水等气象因素对多年冻土水热影响的耦合模型。李杨^[62] 以季冻区非饱和土体为研究对象,结合有限元求解,构建了水迁移热耦合模型。

水热汽耦合模型的构建是水热力耦合模型的补充,两者均是在质能守恒方程的基础上建立水分迁移控制方程和热传导方程。在建立水热汽耦合模型的过程中,质量守恒方程还需考虑水汽相变对冰体积含量、液态水体积含量的影响;能量守恒方程要将水汽热对流、水汽扩散潜热等与水汽相关的土体水热物理过程考虑在内。水汽相变和水汽运移使水热汽耦合模型的建立更加复杂化,因此研究者多选择简化土体边界条件,同时,冻土内水汽运移机制的研究不够深入,影响了模型的完善。

综上,传统水热耦合数值模型还需完善考量,而水热力耦合模型的发展较为完善,它综合考虑了水分场、温度场以及应力场在土体冻结过程中的动态变化,体现了水分场和温度场对应力场的影响变化。但多数模型应力场对水分场和温度场的反作用并未体现,三者之间的关系没有形成闭环,即没有达到完全意义上的三场耦合,这也是目前水热耦合理论发展急需攻克的重点。模型建立过程中土体物理性质参数的复杂化和动态化一直是难点。相较于传统水热耦合理论,水热汽耦合运移的研究较为滞后。由于水汽运移和水汽相变的复杂性,致使现有的非饱和土体水热耦合迁移理论不能充分表征和揭示非饱和土体冻胀的形成和发展过程。

4 结 论

a. 土水势理论是目前研究冻土水分迁移和冻胀机制的重要手段,采用 Clapeyron 方程求解水势梯度是关键。但由于冻土自身的复杂性、土样特性指标对 Clapeyron 方程的影响以及冰水相压力的物理含义模糊不清等问题,Clapeyron 方程在冻土问题中的适用性还需讨论,研究者各持己见,建立了诸多的冻胀模型。因此,明确冰水相压力的物理意义和 Clapeyron 方程的适用条件,是发展土水势理论的重要一步。

b. 水分迁移驱动力理论不能充分解释冻土混合态水分迁移现象,传统水分迁移驱动力理论是基于特定条件下提出的,这些假说理论均忽略了水汽运移对土体冻胀的影响。因而,为充分理解土体冻胀机理,有必要探究非饱和冻土的水汽相变和运移机制。

c. 正冻土水热力耦合模型的建立是复杂多变的。因为正冻土中各物理参数处于动态变化中,变化的参数使得冻胀模型更加复杂化;此外,水分场、应力场和温度场三者之间未达到完全耦合。因此,应深入探究冻结缘内各个参数的变化规律,使其更接近实际冻土水热力耦合问题;同时要着手分析应力场对冻土中水分迁移和热量传输的影响,达到真正意义上水分场、应力场和温度场的耦合。如,冰透镜体发育完全时,低温致使未冻水含水量和导湿系数减小到定值,冰水相压力也达到临界值,应探究此时压力与温度或含水量的关系。

d. 冻土中水汽迁移耦合模型的研究相对较少,目前建立的水热汽耦合模型多是针对多年冻土区或模型边界条件较为简单,不能充分反映冻土内部水热汽的运移。因此,为更好地预测和表征水汽运移引起的土体冻胀问题,有必要建立更完善的水热汽耦合模型。

参考文献:

[1] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001:68-74.
[2] 马巍,牛富俊,穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展,2012,27(11):1185-1191. (MA Wei, NIU

- Fujun, MU Yanhu. Basic research on major permafrost projects on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 27(11):1185-1191. (in Chinese)
- [3] 常启昕,孙自永,马瑞,等. 冻土区地下水流程及其与地表水转化关系研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(5): 87-94. (CHANG Qixin, SUN Ziyong, MA Rui, et al. A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(5): 87-94. (in Chinese))
- [4] 盛岱超,张升,贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 594-605. (SHENG Daichao, ZHANG Sheng, HE Zuoyue. Evaluation of soil frost heave sensitivity[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 594-605. (in Chinese))
- [5] ZHOU J, WEI C, LI D, et al. A moving-pump model for water migration in unsaturated freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 104: 14-22.
- [6] ZHANG S, TENG J, HE Z, et al. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 126: 1-9.
- [7] SAKAI M, TORIDE N, SIMUNEK J. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 707-717.
- [8] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [9] SAITO H, SIMUNEK J, MOHANTY B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(2): 784-800.
- [10] 贺再球. 非饱和土气态水迁移规律及其与液态水混合迁移的耦合计算[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [11] 杨高升, 白冰, 姚晓亮, 等. 非饱和冻土水汽迁移与相变过程的光滑粒子法模拟[J]. *岩土力学*, 2021, 42(1): 1-10. (YANG Gaosheng, BAI Bing, YAO Xiaoliang, et al. Simulation of water vapor migration and phase transition in unsaturated frozen soil by smooth particle method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 毕骏. 冻土的水热变化特征及水热气迁移机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [13] 高建强, 白瑞强, 马勤国. 非饱和粗颗粒土体的冻结试验研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 94-101. (GAO Jianqiang, BAI Ruiqiang, MA Qinguo. Experimental study on freezing of unsaturated coarse-grained soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 94-101. (in Chinese))
- [14] O'NEIL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(3): 281-296.
- [15] WILLIAMS P J. Suction and its effects in unfrozen water of frozen soils[R] // Division of Building Research. Ottawa, Canada: National Research Council, 1966.
- [16] SHENG D, ZHANG S, NIU F, et al. A potential new frost heave mechanism in high-speed railway embankments[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(2): 144-154.
- [17] HARLAN R L. An analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9: 1314-1323.
- [18] LEBEAU M, KONRAD J M. An extension of the capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of air-free frozen porous media[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): 183-197.
- [19] STYLE R W, PEPPIN S S L. The kinetics of ice-lens growth in porous media[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 692: 482.
- [20] BIERMANS M, DIJKEMA K M, DE VRIES D A. Water movement in porous media towards an ice front[J]. *Journal of Hydrology*, 1978, 37(1/2): 137-148.
- [21] 薛珂, 杨明彬, 温智, 等. 基于 pF Meter 的土体冻结特征曲线研究[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(3): 22-29. (XUE Ke, YANG Mingbin, WEN Zhi, et al. Research on soil freezing characteristic curve based on PF Meter[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(3): 22-29. (in Chinese))
- [22] WATANABE K, FLURY M. Capillary bundle model of hydraulic conductivity for frozen soil[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): 29-37.
- [23] 王永涛, 王大雁, 马巍, 等. 青藏粉质黏土单向冻结冷生构造发育及冻胀发展过程试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1333-1342. (WANG Yongtao, WANG Dayan, MA Wei, et al. Experimental study on the development of cryogenic structure and frost healing process of Qinghai-Tibet silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(5): 1333-1342. (in Chinese))
- [24] 李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. *工业建筑*, 2014, 44(2): 69-71. (LI Qiang, YAO Yangping, HAN Liming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. *Industrial Building*, 2014, 44(2): 69-71. (in Chinese))
- [25] 滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1813-1821. (TENG Jidong, HE Zuoyue, ZHANG Sheng, et al. Water vapor migration and phase transition in unsaturated soils: mechanism and numerical reconstruction of two kinds of "pot lid effect"[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1813-1821. (in Chinese))

- [26] 姚仰平,王琳,王乃东,等. 锅盖效应的形成机制及其防治[J]. 工业建筑,2016,46(9):1-5. (YAO Yangping, WANG Lin, WANG Naidong, et al. Formation mechanism and prevention of pot cover effect[J]. Industrial Building, 2016, 46(9):1-5. (in Chinese))
- [27] 姚仰平,王琳,王乃东. 干寒区锅盖效应致灾特征及案例分析[J]. 工业建筑,2016,46(9):21-24. (YAO Yangping, WANG Lin, WANG Naidong. Disaster characteristics and case analysis of pot cover effect in dry and cold area[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9):21-24. (in Chinese))
- [28] 张升,贺佐跃,滕继东,等. 非饱和土水汽迁移与相变:两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(5):961-968. (ZHANG Sheng, HE Zuoyue, TENG Jidong, et al. Water vapor transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study on two types of canopy effect[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5):961-968. (in Chinese))
- [29] 王琳. 双锅盖效应下土体中水气运移规律分析研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2019.
- [30] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [31] TABER S. Frost heaving[J]. The Journal of Geology, 1929, 37(5):428-461.
- [32] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. The Journal of Geology, 1930, 38(4):303-317.
- [33] SILL R C, SKAPSKI A S. Method for the determination of the surface tension of solids, from their melting points in thin wedges[J]. The Journal of Chemical Physics, 1956, 24(4):644-651.
- [34] 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(3):1-4. (CHEN Feixiong, SONG Zhanping, LI Ning. Study on water driving force model of positive frozen soil based on adsorption film theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering and Civil Engineering, 2006(3):1-4. (in Chinese))
- [35] LEBEAU M, KONRAD J M. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12):W12554.
- [36] IWATA S. Thermodynamics of soil water; IV. Chemical potential of soil water[J]. Soil Science, 1974, 117(3):135-139.
- [37] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4):548-555.
- [38] HORIGUCHI K. An osmotic model for soil freezing[J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(1):13-22.
- [39] 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. (WEN Zhi, MA Wei, XUE Ke, et al. Study on moisture migration of frozen soil by matrix potential sensor[J]. Soil Science Bulletin, 2014, 45(2):370-375. (in Chinese))
- [40] JACKSON R D. Temperature and soil-water diffusivity relations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(4):363-366.
- [41] 王铁行,赵树德. 非饱和土体气态水迁移引起的含水量变化方程[J]. 中国公路学报,2003(2):19-22. (WANG Tiexing, ZHAO Shude. Water content change equation induced by gaseous water migration in unsaturated soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003(2):19-22. (in Chinese))
- [42] NAKANO Y, TICE A, OLIPHANT J. Transport of water in frozen soil IV. Analysis of experimental results on the effects of ice content[J]. Advances in Water Resources, 1984, 7(2):58-66.
- [43] 吴谋松,黄介生,谭霄,等. 不同地下水补给条件下非饱和砂壤土冻结试验及模拟[J]. 水科学进展,2014,25(1):60-68. (WU Mousong, HUANG Jiesheng, TAN Xiao, et al. Freezing experiment and simulation of unsaturated sandy loam under different groundwater recharge conditions[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1):60-68. (in Chinese))
- [44] SMITH W O. Thermal transfer of moisture in soils[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1943, 24(2):511-524.
- [45] GURR C, MARSHALL T, HUTTON J. Movement of water in soil due to a temperature gradient[J]. Soil Science, 1952, 74(5):335-346.
- [46] 陈伟. 锅盖效应室内试验研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2020.
- [47] 任朝霞. 冻融作用对非饱和土路基水分迁移及强度的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [48] 陈含. 冻融循环条件下锅盖效应机理及试验研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2020.
- [49] 罗汀,陈含,姚仰平,等. 寒区路基土锅盖效应气态水迁移试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019, 52(A01):29-34. (LUO Ting, CHEN Han, YAO Yangping, et al. Experimental study on gaseous water migration by pot cover effect of subgrade soil in cold region[J]. Journal of Tianjin University(Natural Science & Engineering), 2019, 52(A01):29-34. (in Chinese))
- [50] 张龙党. 非饱和黄土冻结作用下水分迁移的实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.
- [51] 路建国,张明义,张熙胤,等. 冻土水热力耦合研究现状及进展[J]. 冰川冻土,2017,39(1):102-111. (LU Jianguo, ZHANG Mingyi, ZHANG Xiyin, et al. Review of the coupled hydro-thermo-mechanical interaction of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1):102-111. (in Chinese))