

冻融土壤水热迁移与作用机理研究

付强 侯仁杰 李天霄 马梓霖 彭莉
(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 季节性冻融土壤的水热变异及空间迁移过程是一个复杂的动力学系统,冻融土壤水热系统作为自然界能量循环的重要环节,在水资源、环境、能源以及人类工程等方面占有极其重要的地位,详细探求冻融土壤的水热扩散机理,准确地掌握土壤的水热迁移状况,对于科学合理的制定春播制度具有深远的影响。以高效利用冻土资源、提高农业经济、改善生态环境为宗旨,在总结国内外研究成果的基础上,阐述了土壤冻融交替的物理过程、冻层水分入渗、热量传导、土壤溶质的转化过程以及工程冻害防治,概括了冻融土壤的水热分布对于地表环境改变以及气候因子差异的响应机制,进而从机理上对冻融土壤特征参数、水热耦合动态模拟及预测模型进行了论述。同时,提出了冻融土壤结构多尺度结合、土壤覆被联合体间反演、统计模型与随机模型并行的研究思路,旨在为寒旱区季节性冻土水热循环、水热平衡研究以及科学合理的指导农业生产提供借鉴。

关键词: 冻融土壤; 水热迁移; 能量循环; 特征参数; 耦合模型

中图分类号: S152.8; P642.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0099-12

Soil Moisture – Heat Transfer and Its Action Mechanism of
Freezing and Thawing Soil

Fu Qiang Hou Renjie Li Tianxiao Ma Ziao Peng Li
(School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The moisture – temperature variation and spatial migration of seasonal freezing and thawing soil is a complex dynamic system, as an important part of energy circulation in nature, the soil moisture and heat system of freezing and thawing soil plays an extremely important role in water resources, environment, energy and human engineering, etc. Research on moisture and temperature diffuse mechanism details of freezing and thawing soil and getting hold of soil moisture and heat transfer condition accurately can make a profound influence on producing scientific and reasonable spring sowing system. In order to utilize resources of frozen soil efficiently, promote agricultural economy and improve ecological environment, on the basis of summarizing the research achievements in China, the physical process of soil freezing and thawing, the water infiltration in frozen region, heat transfer and the transformation of soil solute were expatiated, the summary of response mechanism of water and heat distribution of freezing and thawing soil to the change of surface environment and difference of climatic factors was given, and the characteristic parameters of freezing and thawing soil, dynamic simulation of coupled water and heat and forecasting model on mechanism were discussed. Meanwhile, the research ideas on combination structure of multi-scale, oil-cover union inversion, parallel operation of statistical and stochastic mode were proposed to provide references for moisture and temperature circulation of seasonal frozen, studying on balance of water and heat, and guiding the agricultural production scientifically and reasonably in cold and arid regions.

Key words: freezing and thawing soil; water and heat transfer; energy circulation; characteristic parameters; coupling model

引言

据统计,地球上中纬度的大部分地区受季节性冻融作用的影响,中国的季节性冻土面积约占国土面积的 54%,主要位于中国的东北、华北以及西北地区,这些地区大多属于干旱、半干旱的水资源短缺地区^[1]。土壤的冻融过程是一个较为复杂的过程,它伴随着物理、物理化学、力学的现象,主要体现为土壤的水热传输、水分相变以及盐分的积累^[2]。土壤的冻融循环使得土壤中的水、热状况发生着复杂的迁移变化。一方面,土壤含水率的变化影响着土壤的热特性参数以及土壤溶质的扩散,促使土壤热传导与温度重分布;另一方面,土壤温度梯度的存在影响着土壤水分的迁移以及水分特征参数的变化^[3-4]。

国内外的大量试验研究表明,冻融循环作用影响着土壤水分的相变,冻结期土壤水分的蒸发量减小,积蓄水量,融化期冻结水的下渗增加了土壤浅层水资源量,含水率的增加抑制了土壤温度的提升,减小了土壤热量的散失与能量的传递,对于缓解土壤水资源短缺和“春旱”以及促进作物的稳定生长具有积极的影响^[5-9]。同时,冻融循环过程中,土壤水热运移会促使盐分向着表层扩散,使表层土壤出现次生盐渍化,在一定程度上影响着作物的生长发育^[10-11]。因此,深入地研究寒区冻融土壤的水热分布特征、空间运移规律以及耦合效应机理,对于合理开发土壤水热资源、高效利用寒区冻融土壤具有重要的理论价值和现实意义。

本文在阅读前人文献基础上,梳理冻融交替对土壤理化性质的影响、冻融土壤水热环境响应及冻融土壤水热耦合模型等方面的研究前沿内容,并对该领域今后的研究方向提出设想。

1 冻融交替对于土壤理化性质的影响

1.1 冻融土壤的物理过程

土壤的冻融循环必然会伴随着土壤的水热传递过程。土壤冻结期,一部分液态水转变为固态冰,随着液态水含量的降低,土壤的基质势减小,在土壤基质势梯度的驱动作用下,土壤液态水不断向土壤的冻结锋面移动,导致土壤冻结锋面土壤含水率出现峰值^[12]。融化期,土壤冻结锋面积聚的固态水转变为液态水,在重力梯度的驱动下,土壤垂直剖面出现水分聚集现象^[13]。冻结期,土壤冻结锋面由地表逐渐向深层移动,在土壤垂直剖面形成一个温度梯度,在此驱动力作用下,热量从高温区向低温区传递,形成一个复杂的水热交换界面^[14]。

冻融作用改变了土壤的结构,降低了土壤的容重,影响着土壤中冰晶体的形成、水分迁移和土壤颗粒的组成。反复的冻融交替会对土体产生一定的机械破坏,进而降低土壤团聚体的稳定性,加剧土壤侵蚀^[15]。冻融期,土壤中水分向冻结锋面移动,使得冻结锋面的冰晶含量增加,导致土壤的体积发生膨胀。融化期,冰晶融化为液态水并发生迁移扩散,而土壤颗粒靠自身的重力以及颗粒间的粘性并不能恢复原状,土壤的孔隙度增加、密度降低,土壤的大团聚体破碎为小的颗粒体,进而降低了土壤的结构稳定性^[16]。

1.2 冻融土壤水分入渗特征

季节性冻土区土壤包气带中持有特定的含冰土体,冻土层具有一定的透水性、储水性以及抑制水分蒸发的性能,致使土壤冻融期融雪水入渗、土壤墒情状况以及降水、蒸发、径流之间的转换异于非冻结土壤^[17]。同时,土壤水入渗是地表水转化为土壤水以及地下水的唯一途径,地表水的入渗补给将会影响土壤中水分的空间变异过程。因此,研究冻融土壤的水分入渗特征对于寒旱区春季判断土壤墒情、春涝防治以及合理利用农业水土资源具有重要的参考价值^[18]。

1.2.1 冻融土壤入渗机理研究

对于土壤入渗机理的研究最早始于 1856 年法国的达西根据饱和沙土的水分渗透试验,总结出土壤水分渗透量与水力梯度和过水断面面积呈正比、与断面间距呈反比的结论,也就是所谓的达西定律。

1931 年 RICHARDS 将该定律进行改进,应用于非饱和土壤的水分入渗过程中,将非饱和土壤水分通量 q 定义^[19]为

$$q = -K(\psi_m) \nabla \psi \tag{1}$$

式中 ψ ——土壤的土水势

ψ_m ——土壤基质势

$K(\psi_m)$ ——土壤非饱和导水率

研究冻融土壤的水分入渗特性通常采用上述公式,但是冻结土壤的基质势在测量过程中难度较大,假设土壤的基质势与冻土未冻水含量之间存在一一对应的关系,那么冻土中的水分通量即可以用土壤未冻水含量 θ_u 的梯度来表示^[20],即

$$q = -D \nabla \theta_u \tag{2}$$

式中 D ——土壤水扩散率

20 世纪 80 年代,美国陆地寒区研究实验室的一系列试验研究认为,冻融土壤水分通量取决于土壤的总含水量梯度^[21]

$$q = -D(\theta, T) \nabla \theta \tag{3}$$

MORGENSTERN 等^[22]进行了不同温度梯度下

冻土水分迁移试验,根据试验结果得出了冻融土壤水分通量与温度梯度 ∇T 呈正比,即

$$q = -S_p \nabla T \tag{4}$$

式中 S_p ——分凝势

因此,非饱和冻土中水分迁移的驱动力主要包括土壤含水量梯度和温度梯度,二者是相互独立的,则冻土水分通量可表示为

$$q = -D_1 \nabla \theta - D_2 \nabla T \tag{5}$$

式中 D_1 、 D_2 ——经验系数

根据目前的研究成果,由于该线性关系描述土壤水流方程的准确性尚没有得到明确的结论,因此,在冻融土壤入渗特性研究过程中,通常采用非饱和土壤水分迁移理论和能量的观点将土壤冻结区和非冻结区的土壤水分入渗进行统一处理,以便对土壤水热传递的物理机制进行研究。

1.2.2 冻融土壤入渗影响因素

冻融土壤水分入渗特征不仅受土壤理化特征(土壤结构、土壤含水率、土壤质地)的影响,而且还受到冻层厚度、冻层埋深以及地下水水位等因素的制约^[23]。

土壤的结构类型决定其入渗能力。冻结期土壤颗粒周围冰晶聚集并且彼此分离,土壤颗粒结构孔隙较大,土壤水早期入渗能力相对较大^[24],随着土壤含水率的升高而逐渐减小,同时,累计入渗率随着土壤含水率的变化符合幂函数的变化规律;另外,冻土质地黏重和高含冰量是土壤入渗率降低的重要因素^[25],土壤相变水平及其相应的物理变化共同决定了土壤的水力传导度降低,随着冻层厚度的增加,土壤的入渗率降低;冻结期内,土壤冻结锋面不断下移,土壤冻层埋深不断加大,冻层对于土壤入渗能力的控制作用降低^[26]。同时,土壤地下水对地表含水率具有一定的补给作用,土壤剖面的含水率受到地下水埋深的影响,因此,出现了土壤入渗能力随地下水埋深增加而增大的现象。

1.3 冻融土壤热传导率

土壤热性质是决定土壤热状况的内在因素,影响着土壤的能量交换、土壤微生物的活动、种子发芽以及作物生长等^[27]。热传导率作为冻融土壤温度场的主要热力学指标,一直以来都是岩土、农业资源和地热领域主要的物理参数。土壤热传导特性不仅是描述土壤中温度变化、能量传输的前提,也是研究水热耦合迁移、气体扩散以及土壤溶质运移的基础。

1.3.1 冻融土壤热传导率的测定

在冻土地区,土壤中的水分会随着温度的变化而发生冻结-融化循环,随着土壤冻融循环次数的增加以及地基出现的不均匀沉降,使得农田环境设施、

道路桥梁、输油管道等工程造成了不同程度的危害。为了对冻土热力学指标进行可靠的观测与研究,2001 年我国颁布了 GB 50324—2001《冻土工程地质勘察规范》,明确规范了对于冻土的热力学参数的试验方案。

土壤的热传导方法主要分为瞬态法和稳态法 2 类。瞬态法包括瞬时热线法、热探针和传热模型反解法;稳态法包括平板法、比较法和热流计法^[28-29]。上世纪 80 年代,前苏联科学家萨威利亚耶维奇对冻土测试中的稳态平板法的试验方法和误差产生原因做了深入阐述,20 世纪末,澳大利亚科学家将双针热脉冲探测仪用于非饱和和砂的热力学测试中^[30]。上世纪 80 年代,徐学祖等^[1]采用热流计法测定了冻土的比热系数和热导系数。目前,最常用的测定方法为热探针法。如:SHIOZAWA 等^[31]采用单针法将加热源与温度感应器放在同一个探针中,加热量较低,且探针不易变形,测定结果较为准确;KLUITENBERG 等^[32]研究了多探针间距对测定结果的影响,认为间距的不确定性是误差的主要来源;ZHANG 等^[33]采用了 11 针热脉冲法测定了土壤热力学参数,并将测定结果与显热平衡原理相结合研究了表层土壤蒸发。

1.3.2 冻融土壤热传导率的影响因素

土壤的热传导率主要依赖于土壤含水率、孔隙度、颗粒组成、有机质含量以及温度。同时,由于各地土壤类型的差异,土壤质地对土壤的热传导率也将产生较大的影响^[34-35]。

冻融土壤热传导率的确定是一个相对复杂的过程。CAMPBELL 等^[36]研究发现,土壤热传导率 K_s 随着液态含水率 θ 的增加而增大,土壤冻结过程中液态水的相变在一定程度上降低了土壤热传导率;LU 等^[37]发现土壤颗粒组成存在一定的差异,砂粒、粉粒和粘粒对于土壤的热传导率贡献程度也各不相同,由大到小依次为:砂粒、粉粒、粘粒;刘晨辉等^[38]采用 KD2 Pro 测试了粉砂质粘壤土的热传导率,发现由于水汽潜热传热作用在高温条件下表现得较为明显,随着土壤温度的升高,土壤热传导率越加明显;反之,冻结土壤的热传导率明显低于常温下土壤热传导率水平。李毅等^[39]通过水平土柱热特性试验发现,土壤越密实,其热传导率越大;在含水率相同的情况下,砂土热传导率高于砂壤土,粘土的热传导率最低,即土壤质地中的砂土含量越高,土壤的热传导能力越强。

1.4 冻融作用对土壤元素转化及有机碳含量的影响

频繁的冻融交替可以显著改变土壤的团聚体结构、盐分迁移、生物活性和腐殖质的浓度^[40-41]。氮、

磷元素以及有机质在土壤中的缺失会直接影响到植物的生长发育,且矿质元素会伴随着地表径流和地下水渗漏排入水体中,引起土壤的富营养化^[42]。而土壤有机碳含量又是反映土壤质量的重要标准,直接影响着土壤的物理、化学和生物效应的进程。因而,探求土壤氮、磷元素以及有机碳在冻融作用下的迁移转化过程,探求寒区土壤中的生物地球化学循环机理已成为国内外研究的热点^[43]。

1.4.1 冻融土壤中氮、磷元素转化

在土壤季节性冻融循环过程中,土壤冻结锋面处,由于水分的迁移聚集,冻融界面处的含氧量相对较低,加快了微生物的反硝化作用,造成一定区域内的氮元素损失^[44]。另有学者研究发现,冻融循环作用加强了土壤的释水性和透水性,养分易于溶出,加快了土壤中有机物的矿化和消化速率,有效氮的浓度整体呈增加趋势^[45]。其次,冻融作用会导致大量微生物死亡,同时释放微生物氮,生成大量硝酸盐,增加了土壤中氮元素含量^[46]。冻融期,土壤中的氮元素含量处于一个动态变化的状态。

文献[47]认为土壤冻融循环作用会破坏其物理结构,降低土壤团聚体的密实程度,土壤颗粒粒径变小,增强磷酸盐的吸附能力,有利于土壤中磷元素的贮存。TASKIN 等^[48]的研究结果发现,冻融交替使得土壤中磷由土壤固相向液相释放,包括吸附磷的解吸、有机磷的矿化等;HINMAN 等^[49]提出土壤团聚体的破坏,使更多的游离态离子与磷酸盐离子竞争吸附位点,土壤对于磷酸盐的吸附率降低,大量的磷元素流失;TOWNSEND 等^[50]通过测试发现土壤水在冻结过程中,磷酸盐浓缩在未冻水中,在低温作用下,磷酸盐沉淀不断地析出,并且在土壤融化过程中,释放的磷酸盐随着融化水形成地表径流和壤中流汇集到河流湖泊中。

1.4.2 冻融对土壤有机碳含量的影响

可溶性有机碳与土壤中的微生物密切相关,它既是微生物代谢的产物又是微生物生存利用的底物,尤其是在土壤冻融过程中,可溶性有机碳为微生物的生长提供了碳源,而微生物的分解、植物的腐质体则补充了有机碳的含量。对于土壤中有机碳含量变化的观点:STARICKA 等^[51]认为冻融交替影响土壤中水分的有效性以及运动方向,导致土壤中的微生物大量死亡并且分解,补充了土壤中的氨基酸含量,进而增加了土壤中有机碳的含量;周汪明等^[52]通过对三江平原湿地土壤进行冻融循环研究,发现随着冻融次数的增加,土壤的可溶性有机碳的含量呈现出先增加后减小的趋势;LARSEN 等^[53]试验发现,土壤冻融作用会破坏土壤团聚体结构,大分子的

有机物会发生氢键断裂,生成更多小分子结构有机化合物,从而释放出更多可溶性有机碳。

1.5 冻融土壤的物理力学特性及工程应用

当土壤温度降低到液态水的结晶点时,土壤的体积会随着土壤水的冻结膨胀而出现增大的现象,导致地表土体出现不均匀的上升。当气候回暖时,土壤中的冰晶体融化成液态水,体积缩小,膨胀的土壤结构框架在重力作用下会出现融沉现象,引起地基承载力的降低。冻融过程中土壤膨胀作用使得寒区建筑物出现上拔现象,而融沉又会使建筑物基础出现不均匀沉降。在寒区进行的各种工程活动,包括能源、交通、通讯、水利、给排水以及石油管道运输等基础设施都在一定程度上受到土壤冻融作用的影响。

冻胀作用对于寒区建筑物所产生的危害可以追溯到 17 世纪,而发展到 20 世纪,人们才认识到土壤冻胀源于土壤水分的相变与迁移^[54]。20 世纪 30 年代,美国学者贝斯考观察了冰的冻结过程,将土壤的分散性特征与毛细管作用联系在一起,并将土壤的毛细管作用的强弱作为土壤冻胀性的评价标准。1961 年,EVERETT^[55]首次根据土壤的毛细理论,对土壤的冻胀力进行了定性与定量的阐述,该理论被称为第一冻胀理论。在此基础上,MILLER^[56]提出:土壤的冻结锋面和最暖冰透镜底面存在一个低含水率、低导湿率和无冻胀的区域,该理论考虑了土壤的冻胀压力,被称为第二冻胀理论。在 1997 年的“国际地层冻结和冻结作用研讨会”上,学者们根据前人的大量冻胀机理研究,提出了土工布隔断毛细水、石灰土换填等方法来处理工程地基的冻胀问题。

我国对于土壤冻胀及工程防治开始于 20 世纪 60 年代,1965 年的全国道路冻害防治技术会议上,交通部针对公路的水文地质条件,总结出路基水分聚集计算公式,对于改善公路地基水温状态,减少冻害方面取得了一定的成效。70 年代以后,以中国科学院寒区旱区环境与工程研究所为基地,对普通冻土学、冻土物理力学以及冻土工程学进行了系统的研究,并对冻融循环条件下的土壤融沉制定了规程^[57]。总结前人研究的成果,姜海波等^[58]探明了工程建筑中刚柔混合衬砌渠道的冻胀机理,分析了渠道冻胀变形规律以及冻胀过程中的水分迁移规律,为衬砌冻胀分类以及冻害防治技术提供了理论基础。基于前期的科研成果,众多研究者针对于工程建筑的地基冻害原因也进行了大量的试验研究分析。

2 冻融土壤水热状况对环境的响应机制研究

2.1 冻融土壤的水热空间分布

土壤冻融循环是指因热量季节性交替变化,在表土及以下一定深度土壤形成的反复冻结融化过程。土壤水热的迁移变化以及空间分布不仅改变着

土壤的持水性,决定了土壤墒情状况,而且影响着农田作物生存环境,同时也制约着地表活动层的能量平衡与水量重分配,最终反馈于气候变化^[59]。近年来,各相关领域的研究学者对冻融过程中土壤水、热运移问题从不同角度进行了大量的研究,如表 1 所示。

表 1 冻融土壤水热空间分布状况研究
Tab.1 Studies on spatial distribution of water and heat in freezing and thawing soil

作者	研究内容	主要结果和结论
JAME 等 ^[60]	非饱和和多孔介质中水分和温度的迁移变化过程研究	发现冻结过程中土壤水分随着冻结锋面向下迁移,同时热量也会随之传递,冻层土壤含水率和温度降低
STÄHLI 等 ^[61]	地表冻结之后,土壤水分向砂土中入渗再分布的规律	得知冻结土壤中液态水在水势梯度的作用,由高水势向低水势扩散,导致冻融土壤中液态水出现传输转化的状态
WOLLSCHLÄGER 等 ^[62]	使用 GPR 监测了喀拉昆仑地区 85 m × 60 m 不同地表状况下冻土的水热特征	对冻融期土壤水热空间效应进行了尺度分析,进而对区域土壤内部的水热分布状况进行全面的描述与分类
李瑞平等 ^[63]	内蒙古河套灌区冻融期不同土层水分进行均值、方差、标准差和变异系数计算	冻融期不同土层水分样本呈非正态分布,均存在正偏或负偏现象。由于土壤水分的相变,融化期内土壤水分相对于冻结期变异更加活跃
王子龙等 ^[64]	地统计学的理论与方法对季节性冻土剖面水平变异特性进行了究	上层土壤冻结期受冻结过程控制,有较小的规律性变化;融化期则受环境影响较为剧烈,表现出较大的随机性
杨梅学等 ^[65]	利用 GAME-Tibet 所获得的高分辨率土壤温度和含水率资料	研究发现各观测点土壤含水率的分布并不是随着深度的增加而增加或减小,而是在垂直剖面上出现一个高含水层

从上述分析可知,随着土壤冻结融化作用的交替发生,土体中的含水率和温度也会出现周期性的迁移演变过程。但是,由于不同层次的土壤与环境之间能量交换过程的强弱差异,土壤水热的周期性波动程度也存在异同。另外,季节性冻融土壤中的液态含水率和温度之间也存在着一定的相互作用关系,由于水的比热容较大,降低了土壤温度的波动幅度,而土壤温度的变化也驱动着土壤水分的迁移,二者之间存在较强的影响与制约关系。

2.2 冻融土壤水热对地表条件的响应机理

冻融土壤的水热条件是描述土壤活动层的重要指标,与地表生态要素和地下冻土特征密切相关。地表覆盖条件对于土壤的冻结、融化作用以及土壤水热的动态变化具有重要的影响,不仅抑制土壤热量散失、减小水分蒸发、增加土壤墒情,同时还能够培肥改土、协调养分与盐分的供应^[66]。国内外研究学者对于秸秆、积雪、地膜、砂石、植被以及冬灌和滴灌等不同地表处理对于冻融土壤的水热效应进行了大量研究,如表 2 所示。

由上述研究可知,季节性冻融土壤的覆盖处理改善了土壤的水热环境。总体表现为冻结期覆盖阻碍了土壤热量的散失,融化期覆盖抑制了土壤水分的蒸发,地表覆盖处理减弱了土壤水热的传递与转化,保证了冻融期土壤水热环境处于一个相对稳定

的状态,同时促进了土壤积蓄能量、储水保墒、缓解冻胀。因此,科学合理的覆盖作用对于土壤的水热具有较好的调节作用,对于合理高效的利用寒区冻土资源具有重要的现实意义。

2.3 冻融土壤水热特性的区域气候效应

土壤活动层作为季节性冻土区的下界面,是地气之间能量交换的纽带。冻融土壤活动层的水热特征变化受到气候变化的制约,例如气温、降水量、水汽压以及大气辐射等,任何因素的差异都会影响土壤活动层水热在时间和空间尺度上的变化,进而影响陆地生态系统的稳定性,同时,土壤活动层水热动态变化过程也会对大气环境产生反馈作用^[72-73]。随着全球变暖趋势的加剧,越来越多的研究侧重于大气过程与地表水热动态过程的耦合模拟研究。

为了量化研究陆地与大气之间的耦合模式,识别冻融土壤水热特征的区域气候效应,FRAUENFELD 等^[74]根据俄罗斯 242 个测点 1930—1990 年的数据分析了季节性冻融土壤冻结区域的演变特征,结果显示,冻结土壤的退化趋势日益凸显,随着全球气温的提升,土壤季节性冻结深度减少了 34 cm;HALSEY 等^[75]对加拿大北部森林地区土壤温度和冻结-融化过程进行了研究,表明自小冰期以来冻结土壤逐渐向北部迁移,土壤温度呈现升高的趋势,气候转暖对于冻土区域的演变具有重要

表 2 冻融土壤水热对覆盖的响应机理研究

Tab.2 Studies on response mechanism of water and heat in freezing and thawing soil		
作者	研究内容	主要结果和结论
FLERCHINGER 等 ^[67]	地表不同覆盖物和植被对于土壤温度和含水率的变化规律影响	地表覆盖物阻碍土壤与环境之间的能量交换,同时也减弱冻结期由于气温降低造成的热量散失,具有聚集能量,蓄水保墒的效用
SAUER 等 ^[68]	冻融期秸秆覆盖对土壤水分的影响试验研究	地面覆盖可以抑制土壤浅层水分蒸发,减弱土壤中水分的迁移扩散,同时有效缓解冻结期土壤盐分积累的现象
GOODRICH 等 ^[69]	冻融期积雪覆盖条件下地表温度的数值模拟	积雪和覆盖厚度都在一定程度上影响土壤的冻结深度和土壤温度垂直剖面的分布规律
杨金凤等 ^[66]	冻融期地膜覆盖条件下土壤水分变异研究	地表覆膜处理导致土壤冻融过程中含水率高值区及低值区出现的时间、深度以及持续时间相对于无覆盖处理产生异同
李元寿等 ^[70]	冻融期植被覆盖条件下土壤水分运移情况	土壤冻融的相变水对于植被覆盖度的变化响应明显,由于受植被蒸腾与地表蒸散发和土壤温度梯度的影响,融化期土壤剖面含水率呈现出向上部和底部迁移的现象
付强等 ^[71]	冻融期积雪覆盖条件下土壤水热耦合互作关系	冻融期土壤水热具有较强的作用关系,冻结期随着积雪覆盖厚度的增加,水热耦合关系增强,而融化期随着积雪覆盖量的增加,二者的作用关系逐渐减弱

的影响;DELWORTH 等^[76]利用大气环流模式模拟了土壤湿度变化,发现高纬度地区土壤湿度周期变化长,低纬度地区周期变化短,原因是不同地区潜在蒸发速率的差异导致土壤水分流失不同;WANG 等^[77]研究表明当近地面温度提升 5.29℃ 时,地下 5、20、40 cm 处的土壤温度分别提升 3.84、2.23、1.42℃,同时发现缩短连续冻结时间可以提高浅层土壤温度和不同土层的累计温度;付强等^[4]采用灰色关联度分析的方法分析了季节性冻土热状况主要气象影响因子,发现环境温度与大气净辐射与土壤温度的相关性较强;张山清等^[78]采用线性趋势分析、Mann-Kendall 以及基于 ArcGIS 的混合差值等方法,对新疆 96 个气象站 1961—2010 年的逐日平均气温和冻土资料进行了分析,发现负积温每减少 100℃,最大冻土深度减少 4.6 cm;唐振兴等^[79]利用环境观测仪(ENVIS)的长期观测数据,发现土壤水分在季节性冻融过程中的主要控制因素为温度、空气相对湿度;土壤水分主要控制因素为气温、饱和水汽压和向上净辐射。利用气象要素在月尺度上对 20、40、60 cm 处的土壤温度估算效果最好。结合土壤水热迁移机理以及大气和土壤水热统计结果,总结土壤冻融与气候变化的响应关系如图 1 所示。

3 冻融土壤水热运移及耦合模型研究

土壤水热耦合模型的研究是 20 世纪 50 年代在在热平衡原理基础之上发展起来的,与大气环流、水资源利用以及农业遥感技术密切相关。以往的研究已建立了相应的水分迁移模型。随着土壤水分运动研究的不断深入,广大学者发现土壤中的水分和温度是相互影响、相互制约的,土壤中的热量差异和改

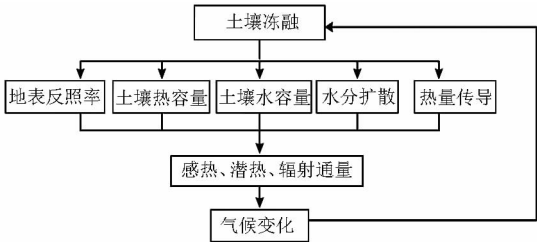


图 1 冻融土壤水热效应与气候变化物理联系

Fig.1 Relationship between water thermal effect of freezing and thawing soil and climate change

变会引起水分的迁移和转化,由此,土壤水热耦合迁移模型的数值模拟逐渐兴起^[80-81]。进入 20 世纪 80 年代,国内外的研究者更加注重覆盖模式下的水热耦合运移模型,并且在一维水热耦合模型的基础上发展为二维土壤耦合模型。

3.1 冻融土壤水热参数监测

冻融土壤的水热参数是描述冻结土壤强度、土壤的热性质、水分入渗以及水热耦合运动的重要物理参数,我国已对季节性冻土的水热特征参数开展了广泛的研究。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所自 20 世纪 70 年代以来,对土壤的冻融循环过程进行了大量的模拟试验研究^[82]。对土壤水分扩散率、导水率、土壤水分特征曲线、土壤热容量、热导率以及热扩散率等水热参数的监测以及变化特征的分析取得了大量的研究成果。

土壤的持水量受到土壤温度变异的显著影响,已有研究表明温度每升高 0.002℃,土壤湿润锋处的吸力减小 1 cm,且随着土壤温度的升高,土壤水势增加,土壤水分特征曲线也会逐渐下移并且趋于平缓^[83-84];HOPMANS 等^[85]和 GARDNER 等^[86]对非饱和土壤导水率与温度之间的关系进行了详细的

研究,认为温度对于土壤饱和导水率的影响主要归结于温度对水粘滞系数的影响,即导水率与水的粘滞系数呈负相关,与水表面张力呈正相关;BURT 等^[87]研究发现高含冰的冻土相对于含等量液态水的冻土具有较高的热导率;土壤冻结过程中,冰含量的增加会降低土壤的热导率;KAUNE 等^[88]测定了不同结构土壤的温度,研究了土壤团聚体对于土壤热性质的影响,发现结构良好、密实度高的土壤热扩散率较大;李韧等^[89]通过对青藏高原下垫面土壤水热特性的分析,认为冻结期土壤热导率较小,主要与土壤细粒结构、较小的未冻水含量以及较低的饱和度有关;李毅等^[90]通过采用一维土柱试验测定非饱和土壤水分扩散率,证明了在温度梯度下水分扩散率与温度呈正比。

3.2 冻融土壤水热耦合模型构建

由于冻融土壤水热迁移问题本身的复杂性以及影响因素的不稳定性,采用单一方法来掌握水热的迁移规律难以实现。随着计算机技术的不断发展,将试验研究和数值模拟相结合的方法逐渐受到研究者的重视。为了更好地体现季节性冻融土壤水热交换的复杂物理过程,根据地表能量平衡原理,将冻结条件下的土壤水热迁移方程、微气象学原理以及地气之间水热交换的上边界条件相结合,建立了冻融土壤水热耦合迁移模型。

自 20 世纪 60 年代起,随着土壤水势能理论的兴起,在冻融土壤水分运移与非饱和非冻结土壤水分迁移状况相类似的前提下,HARLAN^[91]根据试验观测结果建立了第一个冻土水热耦合迁移模型,该模型忽略了冻结土壤中冰与水之间的相互作用,认为土壤中的冻结水含量仅与负温相关,并且与负温呈动态平衡状态。建立的土壤水热耦合模型为

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + L_f \rho_B \frac{\partial \theta_B}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D(\theta_l) \frac{\partial \theta_l}{\partial Z} - K(\theta) \right) - \frac{\rho_B}{\rho_l} \frac{\partial \theta_B}{\partial t} \quad (7)$$

式中 $D(\theta)$ ——土壤水扩散系数, m^2/s

$K(\theta_l)$ ——土壤水导水系数, m/s

ρ_B ——冰密度, kg/m^3

ρ_l ——水密度, kg/m^3

θ_l ——体积含水率, %

θ_B ——体积含冰量, %

C_s ——土壤体积热容量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

λ ——土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

L_f ——相变潜热, J/kg

T ——温度, $^\circ\text{C}$ Z ——空间坐标

t ——时间, s

采用有限单元体积法在容积 i 及 Δt 时间内离散式(1)、式(2),化简得到

$$A_i T_{i-1}^{n+1} + C_i T_i^{n+1} + B_i T_{i+1}^{n+1} = \varphi_i \quad (8)$$

$$G_i (\theta_l)_{i-1}^{n+1} + F_i (\theta_l)_i^{n+1} + E_i (\theta_l)_{i+1}^{n+1} = \psi_i \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad A_i = -\frac{\Delta t \lambda_{i-1/2}}{(\Delta Z_i)^2} \quad (10)$$

$$B_i = -\frac{\Delta t \lambda_{i+1/2}}{(\Delta Z_i)^2} \quad (11)$$

$$C_i = C_{Si} - A_i - B_i \quad (12)$$

$$\varphi_i = C_s T_i^n + L_f \rho_B (\theta_{Bi}^{n+1} - \theta_{Bi}^n) \quad (13)$$

$$G_i = -\frac{\Delta t D_{i-1/2}}{(\Delta Z_i)^2} \quad (14)$$

$$E_i = -\frac{\Delta t D_{i+1/2}}{(\Delta Z_i)^2} \quad (15)$$

$$F_i = 1 - G_i - E_i \quad (16)$$

$$\psi_i = (\theta_l)_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta Z_i} (K_{i-1/2} - K_{i+1/2}) - \frac{\rho_B}{\rho_l} ((\theta_B)_i^{n+1} - (\theta_B)_i^n) \quad (17)$$

当已知任意时刻初各节点的含水率、温度、各层的 C_s 、 L_f 、 λ 、 K 、 D 以及边界条件,求解矩阵代数方程组,得到时段末各个节点的未冻水含量和温度值。

JAME 等^[92]在 HARLAN 的水热耦合模型基础上,演变出另外一种模型形式,并采用有限差分法研究了水平土柱冻结情况下液态含水率和温度之间的动态变化趋势,与室内实际测定结果具有较高的一致性;FLERCHINGER 等^[93]基于 HARLAN 的水热耦合迁移模型,提出了模拟土壤冻结和融化过程的 SHAW 模型,该模型在考虑积雪覆盖的同时,还增加了土壤的水热迁移过程;SAXTON 等^[94]建立了垂向的一维水热耦合模型,对土壤的冻融过程进行了研究,提出了土壤的水热特征与近地表的气象因素、上下边界条件以及冻结土壤的覆盖条件有关;KANE 等^[95]采用二维热传导模型,研究了气候变化对土壤冻深的影响,基于实测数据也验证了该模型的可靠性;郑秀清等^[96]也在 HARLAN 模型的基础上,通过考虑土壤与近地表大气之间的水热交换,建立了一维冻融土壤水热耦合迁移模型,并对实施了冬灌处理的季节性冻融土壤的水热动态过程进行了仿真模拟;尚松浩等^[97]在全面考虑了土壤水分迁移、热量扩散、水分相变以及相变潜热的前提下,求解了冻融土壤水热耦合方程,该模型从本质上反映了冻融土壤的物理过程,模拟结果良好;叶佰生等^[98]在研究冻土水热迁移机理过程中,将 Clapeyron 方程引入到模型,这种处理方法不仅具有较强的适应性,而且该方程与土壤水分特征曲线具有较好的相容性;任理

等^[99]研究了条带覆盖条件下的土壤水热运移规律,并且在一维水热耦合模型基础上发展了二维水热耦合机理模型,对冻融土壤水热耦合迁移模型理论的研究起到了积极的推动作用。

3.3 冻融土壤水热动态预测

冻融土壤的水热迁移变化是一个复杂的时间序列系统,其变化与区域气象因子和生态因素之间有着极强的非线性关系。冻融土壤的水热监测及预报是合理安排春季种植与确定灌溉制度的前提,也是土壤可持续利用、农业水土资源的合理规划与管理、节水农业技术研究的重要基础,利用新的预测理论和方法对该系统进行准确、及时的预测具有重要的理论意义和科学价值。

近些年来,国内外对于冻融土壤水热预测模型与数值算法进行了大量的研究,主要包括两大类,一类是从物理成因出发,开发预测模型;另一类是采用数学方法构建数学模型进行预测。对于物理模型,荷兰瓦赫宁根大学开发的 SWAP 模型,在定点的土壤水热系统预测方面具有较强的优势,但这些方法需要大量的试验数据和区域参数,在一定程度上降低了模型的实用性;KAHIMBA 等^[100]采用修正后的 SHAW 模型,对冻结期土壤含水率进行了预测,结果精度较高、真实可靠,为春季融化期土壤含水率的准确预测提供了强有力的保证;XU 等^[101]开发和验证了基于 HVACSIM + 平台的一维数值模型,并对冻融土壤的热传导、水分迁移、积雪融化和土壤冻结过程进行了模拟预测,结果表明,其计算效率与预测的精度均能满足要求;对于数学模型,尚松浩等^[102]采用 BP 模型,考虑多个因素对土壤贮水量的影响,对季节性冻土区冬小麦的土壤墒情进行了预报,取得了较好的预测效果;李瑞平等^[103]利用人工神经网络对冻融土壤水盐耦合运移进行了联合预测,结果表明越冬期初始地下水埋深、初始含水率、秋浇水量等 10 个因素可以有效地表征土壤水分和盐分的耦合关系。

4 结 论

(1)冻融土壤的理化性质研究关系农业的可持续发展。今后的任务是:深入探讨冻融循环作用对于土壤结构重组、水热动态、溶质运移和地气之间的能量交换过程;研究冻融条件下农田土壤结构与持水率、入渗特性以及热传导之间的相互作用机理;确定不同时空尺度下的土壤结构与有机质成分以及土壤生物过程的耦合机制;利用试验与模拟相结合、参数优化与模型构建相结合的方法,分别从微观角度研究土壤团聚体、空隙率和宏观尺度评价农田、区域的冻融土壤理化过程,从而为科学合理的利用寒区冻土资源提供理论指导。

(2)冻融土壤的水热状况很大程度上受大气环境的制约。冻融期由于气候变化的周期性和波动性,土壤含水率和温度的空间分布也呈现出一定的规律性。季节性冻土的覆被作用阻碍了环境与土壤之间的水分传输与能量交换,影响了土壤的质地、颗粒组成和土壤的水热传输过程。目前的研究主要侧重于覆盖层与大气和土壤交换界面间的能量传递,因此,需要加强不同覆盖层对冻融土壤活动层水热特性的模拟研究,尤其是建立大气环境-覆被层面-冻融土壤活动层之间相互关系和相互作用的响应函数和关键参数的率定显得尤为重要。

(3)在热力学平衡的基础上优选参数化方案,建立一个合理通用的水热耦合模型对于简化和模拟干旱、半干旱以及冻融土壤的水热过程具有重要的现实意义。在后续研究工作中,应不断完善土壤基质势与水热运动参数的机理性研究,提高模型数值模拟的稳定性。另外,还可提出统计性和随机性等数学模型,在简化模型预测的基础上,根据实际情况建立有针对性的数值模拟模型,进而有效地表征冻融条件下土壤水热的动态变化以及与其影响因素之间的内在关系,为实现冻融土壤的水热动态预报以及春播期土壤墒情的识别提供科学支撑。

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.
- 2 李伟强,雷玉平,张秀梅,等. 硬壳覆盖条件下土壤冻融期水盐运动规律研究[J]. 冰川冻土,2001,23(3):251-257.
LI Weiqiang, LEI Yuping, ZHANG Xiumei, et al. Study of water and salt migration in soil under concrete mulch during freezing/thawing period[J]. Journal of Glaciology Geocryology, 2001,23(3):251-257. (in Chinese)
- 3 郑秀清,樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(6):52-55.
ZHENG Xiuqing, FAN Guisheng. Influence of moisture content on infiltration characteristics in seasonal frozen and thawed soils[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(6):52-55. (in Chinese)
- 4 付强,侯仁杰,王子龙,等. 积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究[J]. 农业机械学报,2015,46(7):154-161.
FU Qiang, HOU Renjie, WANG Zilong, et al. Soil thermal regime under snow cover and its response to meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):154-161. (in Chinese)
- 5 刘小燕,刘巧玲,刘廷玺,等. 科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J]. 水科学进展,2015,26(3):331-339.

- LIU Xiaoyan, LIU Qiaoling, LIU Tingxi, et al. Rules of the dynamic water-heat-salt transfer in soil of Horqin meadow during freezing and thawing period[J]. *Advance in Water Science*, 2015, 26(3): 331–339. (in Chinese)
- 6 MAURER G E, BOWLING D R. Seasonal snowpack characteristics influence soil temperature and water content at multiple scales in interior western US mountain ecosystems[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 5216–5234.
- 7 ZHAO Y, YU B, YU G, et al. Study on the water-heat coupled phenomena in thawing frozen soil around a buried oil pipeline[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(2): 1477–1488.
- 8 WANG H, MA M, WANG X, et al. Seasonal variation of vegetation productivity over an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau in China: modeling the interactions of vegetation productivity, phenology, and the soil freeze-thaw process[J]. *Ecological Research*, 2013, 28(2): 271–282.
- 9 CHENG H, WANG G, HU H, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the head water region of the Yellow River, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(8): 1755–1762.
- 10 富广强, 李志华, 王建永, 等. 季节性冻融对盐荒地水盐运移的影响及调控[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(4): 645–654.
FU Guangqiang, LI Zhihua, WANG Jianyong, et al. Effects of seasonal freeze thawing on water and salt movement in saline lands [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(4): 645–654. (in Chinese)
- 11 LI X, CHANG S X, SALIFU K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review[J]. *Environmental Reviews*, 2013, 22(1): 41–50.
- 12 DINULESCU H A, ECKERT E R G. Analysis of the one-dimensional moisture migration caused by temperature gradients in a porous medium[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1980, 23(8): 1069–1078.
- 13 BROUCHKOV A. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, 11(2): 153–160.
- 14 KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1981, 18(4): 482–491.
- 15 刘绪军, 景国臣, 杨亚娟, 等. 冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 42–46.
LIU Xujun, JING Guochen, YANG Yajuan, et al. Effects of alternate freezing and thawing on the structure of black topsoil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 42–46. (in Chinese)
- 16 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1269–1274.
WANG Yang, LIU Jingshuang, WANG Quanying. The effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1269–1274. (in Chinese)
- 17 DAI Changlei, LI Xinxin, SUN Simiao. Analysis and design for physical model of infiltration gallery under frozen layer[C] // 2010 Conference on Modern Hydraulic Engineering, 2010: 309–312.
- 18 郑和祥, 李和平, 郭克贞, 等. 河套灌区冬小麦冻结期土壤入渗特性分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 70–78.
ZHENG Hexiang, LI Heping, GUO Kezhen, et al. Soil infiltration characteristics of winter wheat field during freezing in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(4): 70–78. (in Chinese)
- 19 RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Journal of Applied Physics*, 1931, 1(5): 318–333.
- 20 PERFECT E, WILLIAMS P J. Thermally induced water migration in frozen soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, 3(2): 101–109.
- 21 OLIPHANT J L, TICE A R, NAKANO Y. Water migration due to a temperature gradient in frozen soil[C] // *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost*, 1983: 951–956.
- 22 ANDERSON D M, MORGENSTERN N R. Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: a review[C] // *Permafrost: The North American Contribution to the Second International Conference*, 1973: 257–288.
- 23 樊贵盛, 郑秀清, 潘光在. 地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的试验研究[J]. *水利学报*, 1999, 30(3): 22–27.
FAN Guisheng, ZHENG Xiuqing, PAN Guangzai. Experimental study on the influence of the buried depth of groundwater level on the infiltration characteristics of freeze-thaw soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(3): 22–27. (in Chinese)
- 24 STOECKELER J H, WEITZMAN S. Infiltration rates in frozen soils in northern Minnesota[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1960, 24(2): 137–139.
- 25 BO T, LARS-CHRISTER L, STEN L. Infiltration into a frozen heavy clay soil[J]. *Nordic Hydrology*, 1989, 20(3): 153–166.
- 26 樊贵盛, 贾宏骥, 李海燕. 影响冻融土壤水分入渗特性主要因素的试验研究[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(4): 88–94.
FAN Guisheng, JIA Hongji, LI Haiyan. Experimental study on main factors influencing water infiltration features of freezing and thawing soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(4): 88–94. (in Chinese)
- 27 王铎, 王全九, 樊军, 等. 土壤导热率测定及其计算模型的对比分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 78–84.
WANG Shuo, WANG Quanjiu, FAN Jun, et al. Soil thermal properties determination and prediction model comparison[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5): 78–84. (in Chinese)
- 28 SHIOZAWA S, CAMPBELL G S. Soil thermal conductivity[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5(1): 301–310.
- 29 BAI Y, NIEDZWECKI J M. Modeling deepwater seabed steady-state thermal fields around buried pipeline including trenching and backfill effects[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 61(3): 221–229.
- 30 ROBIN P, CELLIER P, RICHARD G. Theoretical and field comparison of two types of soil heat fluxmeter[J]. *Soil Technology*, 1997, 10(3): 185–206.
- 31 SHIOZAWA S, CAMPBELL G S. Soil thermal conductivity[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5(1): 301–310.

- 32 KLUITENBERG G J, HAM J M, BRISTOW K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(6): 1444 – 1451.
- 33 ZHANG X, LU S, REN T S, et al. Measuring subsurface soil-water evaporation with an improved heat-pulse probe[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 876 – 879.
- 34 GHUMAN B S, LAL R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some nigerian soils[J]. *Soil Science*, 1985, 139(1): 74 – 80.
- 35 FAROUKI O T. Thermal properties of soils, series on rock and soil mechanics[M]. Germany: Trans Tech Publications, 1986.
- 36 CAMPBELL G S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems[M]. New York: Elsevier, 1985.
- 37 LU Sen, REN Tusheng, GONG Yuanshi, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 8 – 14.
- 38 刘晨晖, 周东, 吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1877 – 1886.
- LIU Chenhui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1877 – 1886. (in Chinese)
- 39 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 62 – 65.
- LI Yi, SHAO Ming'an, WANG Wenyan, et al. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4): 62 – 65. (in Chinese)
- 40 WOOD P M. Autotrophic and heterotrophic mechanisms for ammonia oxidation[J]. *Soil Use and Management*, 1990, 6(2): 78 – 79.
- 41 WANG L, SUN X, CAI Y, et al. Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission affected by freeze-thaw event[J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2008, 2(3): 290 – 295.
- 42 李垒, 孟庆义. 冻融作用对土壤磷素迁移转化影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 1074 – 1078.
- LI Lei, MENG Qingyi. Reviews of phosphorus transport and transformation in soil under freezing and thawing actions [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 1074 – 1078. (in Chinese)
- 43 EDWARDS K A, MCCULLOCH J, KERSHAW G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843 – 2851.
- 44 SCHIMEL J P, BILBROUGH C, WELKER J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 217 – 227.
- 45 BOCHOVE E, JONES H G, BERTRAND N, et al. Winter fluxes of greenhouse gases from snow-covered agricultural soil: intra-annual and interannual variations[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 113 – 125.
- 46 SOULIDES D A, ALLISON F E. Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population[J]. *Soil Science*, 1961, 91(5): 291 – 298.
- 47 LEHRSCHE G A, SOJKA R E, CARTER D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1401 – 1406.
- 48 OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. *CATENA*, 2003, 52(1): 1 – 8.
- 49 HINMAN W C. Effects of freezing and thawing on some chemical properties of three soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1970, 50(2): 179 – 182.
- 50 TOWNSEND-SMALL A, MCCLELLAND J W, HOLMES R M, et al. Seasonal and hydrologic drivers of dissolved organic matter and nutrients in the upper Kuparuk River, Alaskan Arctic[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 103(1–3): 109 – 124.
- 51 STARICKA J A, BENOIT G R. Freeze-drying effects on wet and dry soil aggregate stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(1): 218 – 223.
- 52 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 1 – 6.
- ZHOU Wangming, WANG Jinda, LIU Jingshuang, et al. Effects on freezing and thawing on dissolved organic carbon and nitrogen pool and nitrogen mineralization in typical wetland soils from Sanjiang Plain, Heilongjiang, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3): 1 – 6. (in Chinese)
- 53 LARSEN K S, JONASSON S, MICHELSEN A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3): 187 – 195.
- 54 李萍, 徐学祖, 陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 90 – 95.
- LI Ping, XU Xuezu, CHEN Fengfeng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. *Journal of Glaciology Geocryology*, 2000, 22(1): 90 – 95. (in Chinese)
- 55 EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57(7): 1541 – 1551.
- 56 MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. *Highway Research Record*, 1972, 39(3): 1 – 11.
- 57 毕贵权, 张侠, 李国玉, 等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. *兰州理工大学学报*, 2010, 36(2): 114 – 117.
- BI Guiquan, ZHANG Xia, LI Guoyu, et al. Experiment of impact of freezing, thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2010, 36(2): 114 – 117. (in Chinese)
- 58 姜海波, 田艳. 季节冻土区刚柔混合衬砌梯形渠道冻胀机理试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 145 – 151.

- JIANG Haibo, TIAN Yan. Test for frost heaving damage mechanism of rigid-soften composite trapezoidal canal in seasonally frozenground region[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 145–151. (in Chinese)
- 59 李述训, 程国栋. 冻融土中的水热运输问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995.
- 60 JAME Y W, NORUM D I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium[J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 811–819.
- 61 STÄHLI M, JANSSON P E, LUNDIN L C. Soil moisture redistribution and infiltration in frozen sandy soils[J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 95–103.
- 62 WOLLSCHLÄGER U, GERHARDS H, YU Q, et al. Multi-channel ground-penetrating radar to explore spatial variations in thaw depth and moisture content in the active layer of a permafrost site[J]. The Cryosphere, 2010, 4(3): 269–283.
- 63 李瑞平, 史海滨, 付小军, 等. 干旱寒冷地区冻融期土壤水分和盐分的时空变异分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 86–90.
- LI Ruiping, SHI Haibin, FU Xiaojun, et al. Temporal and spatial variation analysis of freezing thawing soil moisture and salinity on arid and cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 86–90. (in Chinese)
- 64 王子龙, 付强, 姜秋香, 等. 季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2010, 30(5): 772–776.
- WANG Zilong, FU Qiang, JIANG Qiuxiang, et al. Spatial variability of soil moisture profile in seasonal frozen soil region in different stages[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(5): 772–776. (in Chinese)
- 65 杨梅学, 姚嬅栋. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 553–558.
- YANG Meixue, YAO Tandong. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(5): 553–558. (in Chinese)
- 66 杨金凤, 郑秀清, 孙明. 地表覆盖对季节性冻融土壤温度影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(3): 358–360.
- YANG Jinfeng, ZHENG Xiuqing, SUN Ming. The effect of different surface mulchings on soil temperature during seasonal freezing thawing period[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(3): 358–360. (in Chinese)
- 67 FLERCHINGER G N, PIERSON F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 56(3): 227–246.
- 68 SAUER T J, HATFIELD J L, PRUEGER J H. Corn residue age and placement effects on evaporation and soil thermal regime [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1558–1564.
- 69 GOODRICH L E. The influence of snow cover on the ground thermal regime[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 421–432.
- 70 李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 157–165.
- LI Yuanshou, WANG Genxu, ZHAO Lin, et al. Response of soil moisture in the permafrost active layer to the change of alpine meadow coverage on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 157–165. (in Chinese)
- 71 付强, 侯仁杰, 王子龙, 等. 冻融期积雪覆盖下土壤水热交互效应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 101–107.
- FU Qiang, HOU Renjie, WANG Zilong, et al. Soil moisture thermal interaction effects under snow cover during freezing and thawing period[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 101–107. (in Chinese)
- 72 吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 250–255.
- WU Qingbai, SHEN Yongping, SHI Bin. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 250–255. (in Chinese)
- 73 ZHAO L, CHENG G, LI S, et al. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(23): 2181–2187.
- 74 FRAUENFELD O W, ZHANG T, BARRY R G, et al. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D5): D05101.
- 75 HALSEY L A, VITT D H, ZOLTAI S C. Disequilibrium response of permafrost in boreal continental western Canada to climate change[J]. Climatic Change, 1995, 30(1): 57–73.
- 76 DELWORTH T L, MANABE S. The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate [J]. Journal of Climate, 1988, 1(5): 523–547.
- 77 WANG J, WU Q. Impact of experimental warming on soil temperature and moisture of the shallow active layer of wet meadows on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 90(5): 1–8.
- 78 张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 1961—2010 年新疆季节性最大冻土深度对冬季负积温的响应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1419–1427.
- ZHANG Shanqing, PU Zongchao, LI Jinglin, et al. Response of the maximum depth of seasonal freezing to the cumulated negative temperature in Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1419–1427. (in Chinese)
- 79 唐振兴, 何志斌, 刘鹄. 祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1056–1065.
- TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hao. Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1056–1065. (in Chinese)
- 80 PHILIP J R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil[J]. Journal of Meteorology, 1957, 14(4): 354–366.

- 81 孙菽芬. 土壤内水分流动及温度分布计算-耦合型模型[J]. 力学学报, 1987, 19(4): 374-380.
SUN Shufen. The computation of moisture movement and temperature profile in an unsaturated soil-the coupled model[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1987, 19(4): 374-380. (in Chinese)
- 82 程国栋. 中国冰川学和冻土学研究 40 年进展和展望[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 213-226.
CHENG Guodong. Glaciology and geocryology of China in the past 40 years: progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 213-226. (in Chinese)
- 83 HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soil water retention curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 562-567.
- 84 张一平, 白锦鳞, 张君常. 温度对土壤水势影响的研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(4): 454-458.
ZHANG Yiping, BAI Jinlin, ZHANG Junchang. A study of the temperature effect on soil water potential[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(4): 454-458. (in Chinese)
- 85 HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(1): 4-9.
- 86 GARDNER W R. Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(3): 183-187.
- 87 BURT T P, WILLIAMS P J. Hydraulic conductivity in frozen soils[J]. Earth Surface Processes, 1976, 1(4): 349-360.
- 88 KAUNE A, TURK T, HORN R. Alteration of soil thermal properties by structure formation[J]. Journal of Soil Science, 1993, 44(2): 231-248.
- 89 李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏高原北部不同下垫面土壤热力特性研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 1076-1084.
LI Ren, ZHAO Lin, DING Yongjian, et al. Study on soil thermodynamic characteristics at different underlying surface in northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(6): 1076-1084. (in Chinese)
- 90 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 温度势梯度下土壤水平一维水盐运动特征的实验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 4-8.
LI Yi, WANG Wenyan, WANG Quanjiu, et al. One-dimensional water and salt transport induced by temperature gradient[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 4-8. (in Chinese)
- 91 HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- 92 JAME Y W, NORUM D I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium[J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 811-819.
- 93 FLERCHINGER G N, KUSTAS W P, WELTZ M A. Simulating surface energy fluxes and radiometric surface temperatures for two arid vegetation communities using the SHAW model[J]. Journal of Applied Meteorology, 1998, 37(5): 449-460.
- 94 FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system II. field verification[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 573-578.
- 95 KANE D L, HINZMAN L D, ZARLING J P. Thermal response of the active layer to climatic warming in a permafrost environment [J]. Cold Regions Science and Technology, 1991, 19(2): 111-122.
- 96 郑秀清, 樊贵盛. 冻融土壤水热迁移数值模型的建立及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 308-311.
ZHENG Xiuqing, FAN Guisheng. Numerical emulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under freezing and thawing conditions[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(3): 308-311. (in Chinese)
- 97 雷志栋, 尚松浩, 杨诗秀, 等. 地下水浅埋条件下越冬期土壤水热迁移的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 51-54.
LEI Zhidong, SHANG Songhao, YANG Shixiu, et al. Numerical simulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under shallow ground water table in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 51-54. (in Chinese)
- 98 叶佰生, 陈肖柏. 非饱和土冻结时水热耦合迁移的数值模拟[C]//第四届全国冰川冻土学术会议论文选集. 北京: 科学出版社, 1990: 77-79.
- 99 任理, 张瑜芳, 沈荣开. 条带覆下土壤水热动态的田间试验与模型建立[J]. 水利学报, 1998, 29(1): 76-84.
REN Li, ZHANG Yufang, SHEN Rongkai. Field experiments and numerical simulation of soil water and heat regimes under the condition of summer corn partially covered by mulch strips[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(1): 76-84. (in Chinese)
- 100 KAHIMBA F C, RANJAN R S, MANN D D. Modeling soil temperature, frost depth, and soil moisture redistribution in seasonally frozen agricultural soils[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6): 871-882.
- 101 XU H, SPITLER J D. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions[J]. Renewable Energy, 2014, 72(4): 1-11.
- 102 尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋, 等. 冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型[J]. 水利学报, 2002, 33(4): 60-63.
SHANG Songhao, MAO Xiaomin, LEI Zhidong, et al. Back-propagation neural network model for soil moisture forecast of winter wheat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(4): 60-63. (in Chinese)
- 103 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 季节性冻融土壤水盐动态预测 BP 网络模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 23(11): 125-128.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. BP network model research on water and salt transfer forecast in seasonal freezing and thawing soils[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 23(11): 125-128. (in Chinese)