

---

# 颠覆传统冻土理论！新研究重塑人工冻结法设计模型

作者：writer 来源：科学网

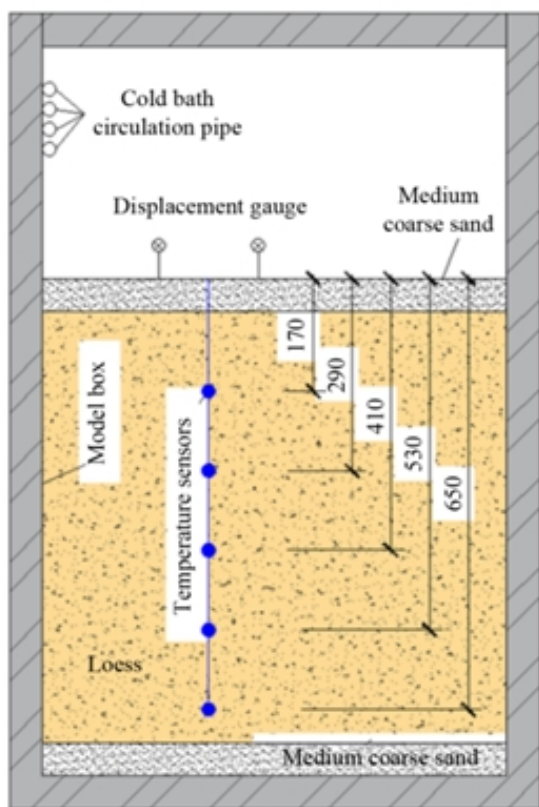
本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41568.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

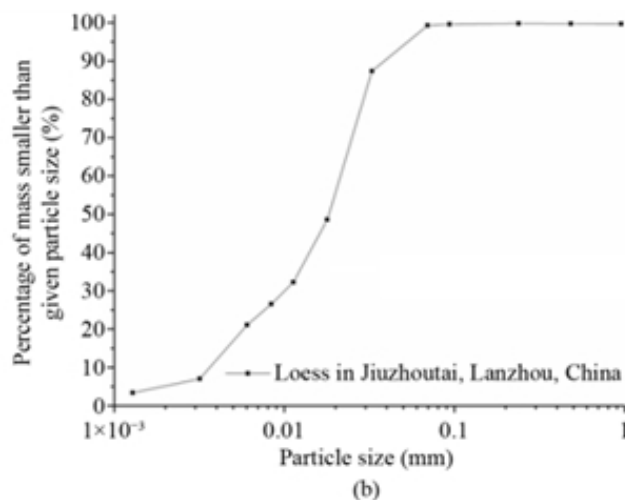
## 颠覆传统冻土理论！新研究重塑人工冻结法设计模型。

近日，同济大学禹海涛、华南理工大学徐金峰团队在ENGINEERING Structure and Civil Engineering期刊上发表了题为Study on the effect of pore air pressure on the existence form of water in soil during the cooling process的研究论文。该研究源于封闭环境冻结试验中的一个反常现象——土体在降温至自由水冰点之前，已发生显著的体积膨胀，且该阶段冻胀量占总冻胀量的52%-82%，直接挑战了冻胀仅由自由水相变引起的传统认知。

研究团队提出并验证了一个全新机制：土体降温导致孔隙气压力降低，使高密度结合水在自由水相变前提前转化为低密度自由水。数值模拟表明，考虑该机制后冻结温度计算误差从9.2 °C降至0.8 °C。该成果为人工地层冻结法（AGF）工程的精准设计和多年冻土区重大工程的冻害防治提供了新的理论基础。



(a)



(b)



(c)

图1.研究摘要图

## 冻土理论中的标准范式与工程困局

传统冻土理论长期遵循一套经典理论范式，即土体冻结过程中的体积膨胀，完全由自由水及少量弱结合水的相变所致，而强结合水因受矿物颗粒强吸附作用，在整个冻结温区（约 $0\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）内保持惰性，不参与相变。该理论已写入国内外多部规范，并成为AGF工程设计的基本依据。

当前，AGF广泛应用于城市地铁联络通道、矿山立井、越江隧道等高风险地下工程，其设计参数（冻结壁厚度、冻结时间、制冷功率）几乎全部建立在传统仅自由水参与冻结的理论模型之上。然而，工程实践中长期存在一个矛盾：按理论公式计算达到设计冻结壁厚度的时间，在实际开挖时却频频出现未冻土夹层，导致设计方被迫大幅增加安全系数，冻结工期往往大幅超出预期，造成巨额电能消耗与碳排放。

## 反常现象暴露的理论裂缝

研究团队在封闭环境（无外部水源补给）的一维冻结试验中，观测到了一个与经典理论预期相悖的异常现象：在土体温度尚未降至自由水冰点之前（约 $0\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间），冻胀量已出现显著上升，且该阶段体积增量占总冻胀量的比例高达52%-82%，随制冷温度降低而增大。图2展示了三种制冷温度（ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）下冻胀量-温度-

时间的统一曲线，在自由水相变平台期开始之前，冻胀曲线已出现明显上扬。

进一步分析表明，若仅考虑原始自由水参与相变，则理论计算出的冻结温度、平台期长度与实测值偏差极大——冻结温度误差最高达 $9.2^{\circ}\text{C}$ ，平台期结束时刻误差高达51.9%。这表明，现行理论框架根本无法解释试验数据，背后必然存在尚未揭示的物理机制。此外，研究团队还注意到一个关键细节：在三种工况中，约 $4^{\circ}\text{C}$ 恰好是冻缩区的分界点，这一温度恰好对应孔隙气压力发生显著变化的敏感区间。

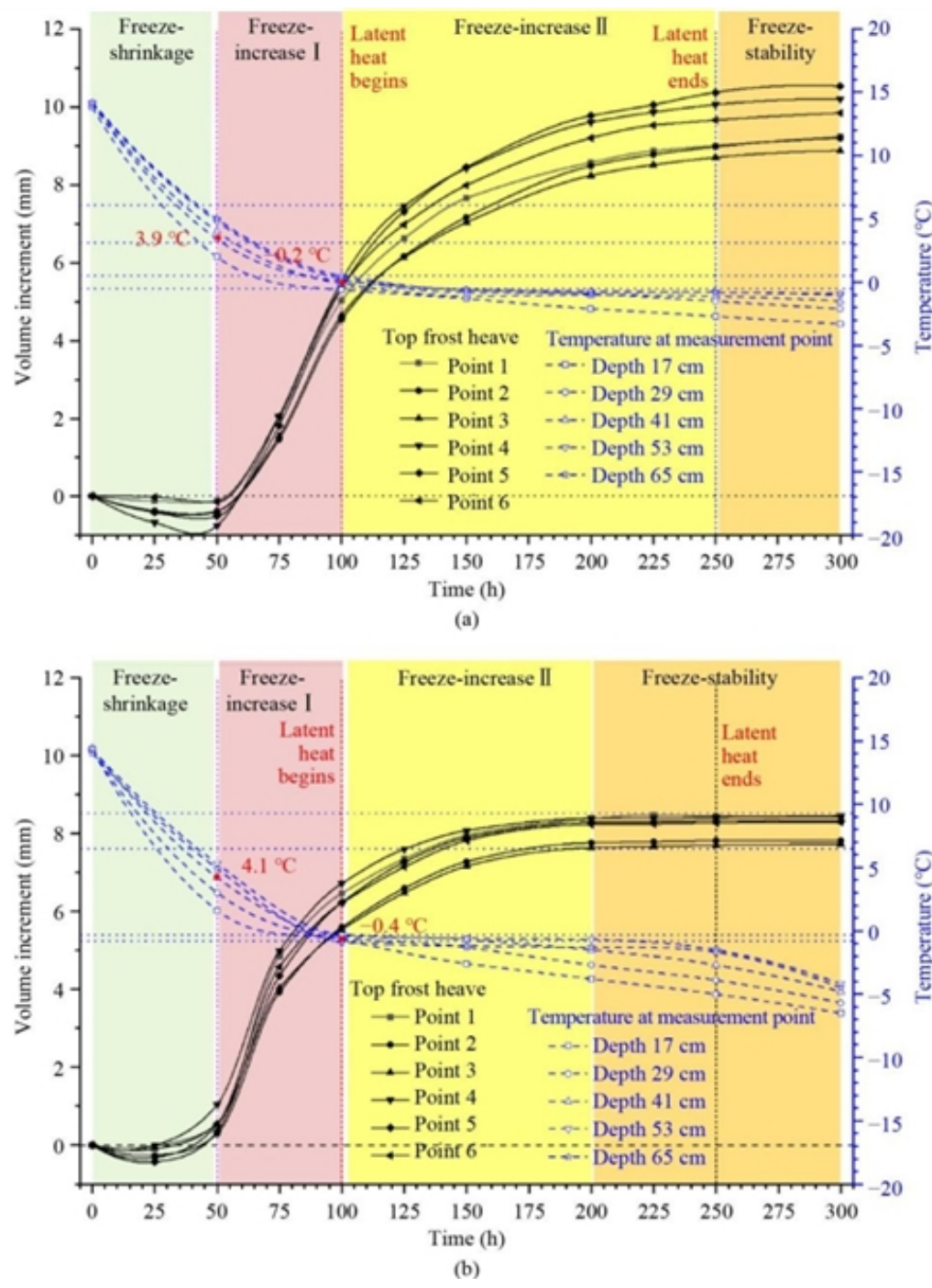


图2.不同工况下冻胀量-温度-时间变化曲线：（a）工况1：含水率16%，温度荷载- $10^{\circ}\text{C}$ ；（b）工况2：含水率16%，温度荷载- $15^{\circ}\text{C}$ ；（c）工况3：含水率16%，温度荷载- $20^{\circ}\text{C}$ 。

### 孔隙气压驱替机制的解明与验证

面对这一矛盾，研究团队跳出常规思路，将目光投向土壤三相体系中长期被忽略的配角——孔隙气体。他们提出颠覆性猜想：土体降温时，孔隙气体因热胀冷缩而压力骤降，这种压力降低会削弱矿物颗粒对水分子的吸附束缚力，从而使高密度的结合水（密度约 $1.3\text{--}1.35\text{g/cm}^3$ ）在自由水相变之前就提前解吸，转变为低密度的自由水（密度 $1.0\text{g/cm}^3$ ），引发前期冻胀。

为验证这一假说，研究团队从两个方面开展了工作：一是对经典的等温吸附试验进行气压尺度重构，定量计算出当孔隙气压力分别降低 $0.06$ 、 $0.32$ 、 $3.2\text{kPa}$ 时，自由水、弱结合水和强结合水会依次完全释放，图3清晰标定了孔隙气压力与各类水分转化阈值之间的定量关系；二是计算土体自然冷却过程中的实际孔隙气压力变化，发现从 $25^\circ\text{C}$ 降至 $4^\circ\text{C}$ 和 $0^\circ\text{C}$ 时，孔隙气压力分别降低了约 $3.0\text{kPa}$ 和 $3.5\text{kPa}$ ，这一数值已足以触发强结合水的完全转化，图4则直观呈现了温度下降过程中孔隙干空气分压、水汽分压和总孔隙气压力的同步衰减曲线。

据此，研究团队建立了考虑结合水预转化的新温度场计算模型，并在三种不同制冷温度工况下进行三维有限元数值模拟。图5（a-c）显示，考虑结合水转化后的计算温度曲线与实测曲线在全时段几乎重合，而仅考虑自由水的计算曲线则严重偏离。定量上，考虑结合水后冻结温度的最大误差从 $9.2^\circ\text{C}$ 锐减至 $0.8^\circ\text{C}$ ，平台期结束时刻的最大误差从 $51.9\%$ 归零。这一显著的精度提升，有力地证明了结合水在自由水相变前已大量转化为自由水这一机制的真实性。

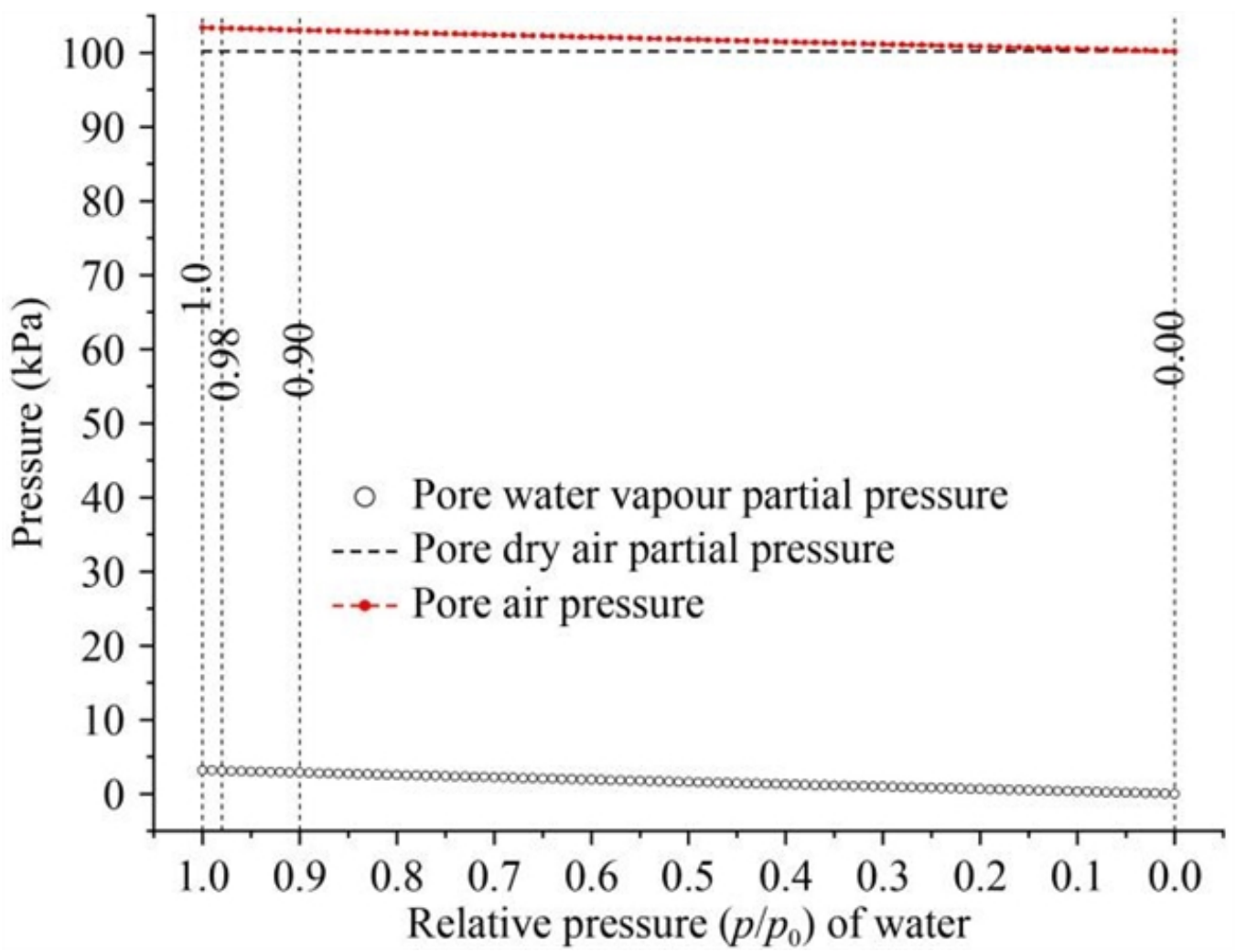




图3.水汽吸附等温测量中孔隙气压力、孔隙水汽分压、孔隙干空气分压与水相对压力之间的关系

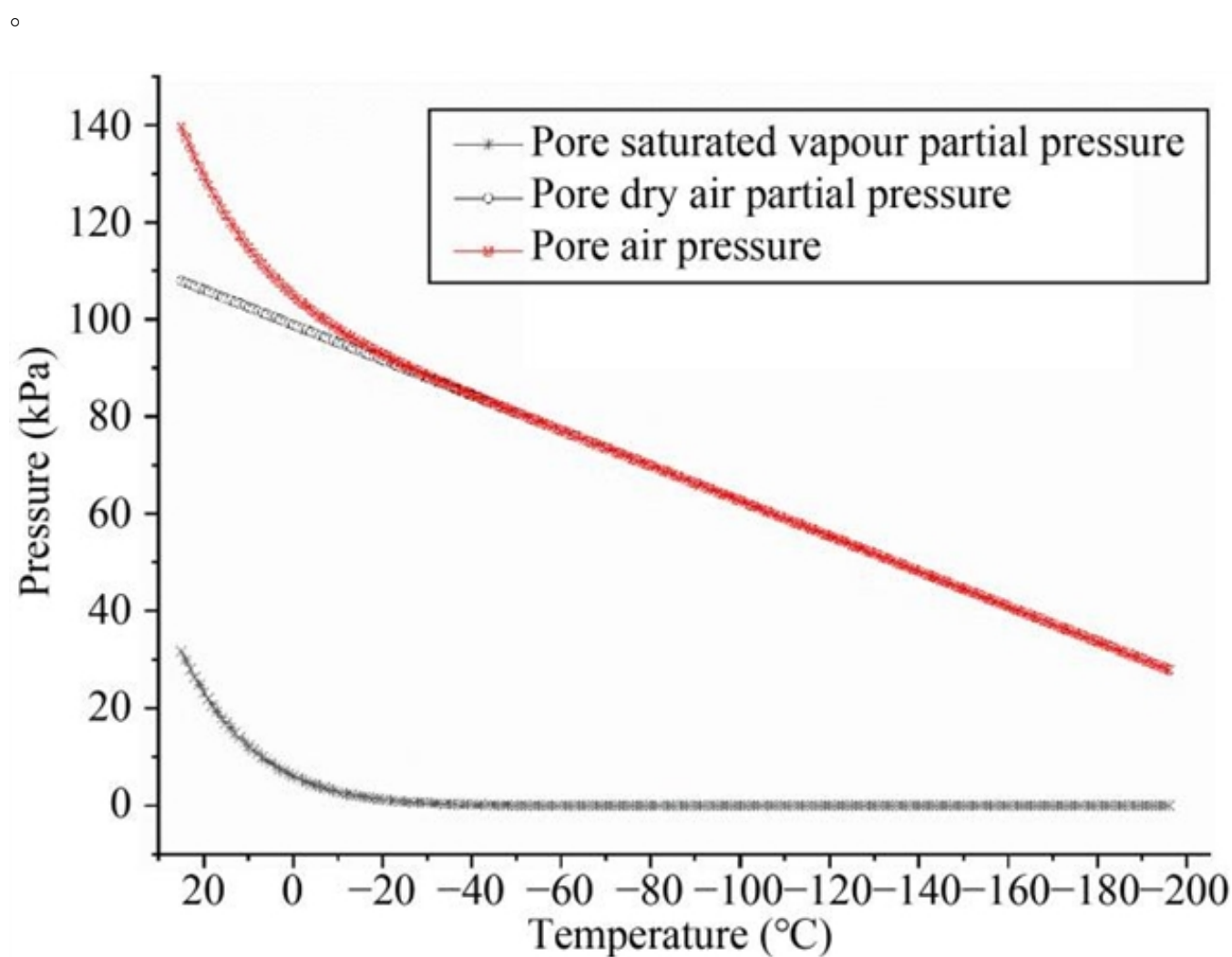


图4.土体内部孔隙气压力与温度的关系。

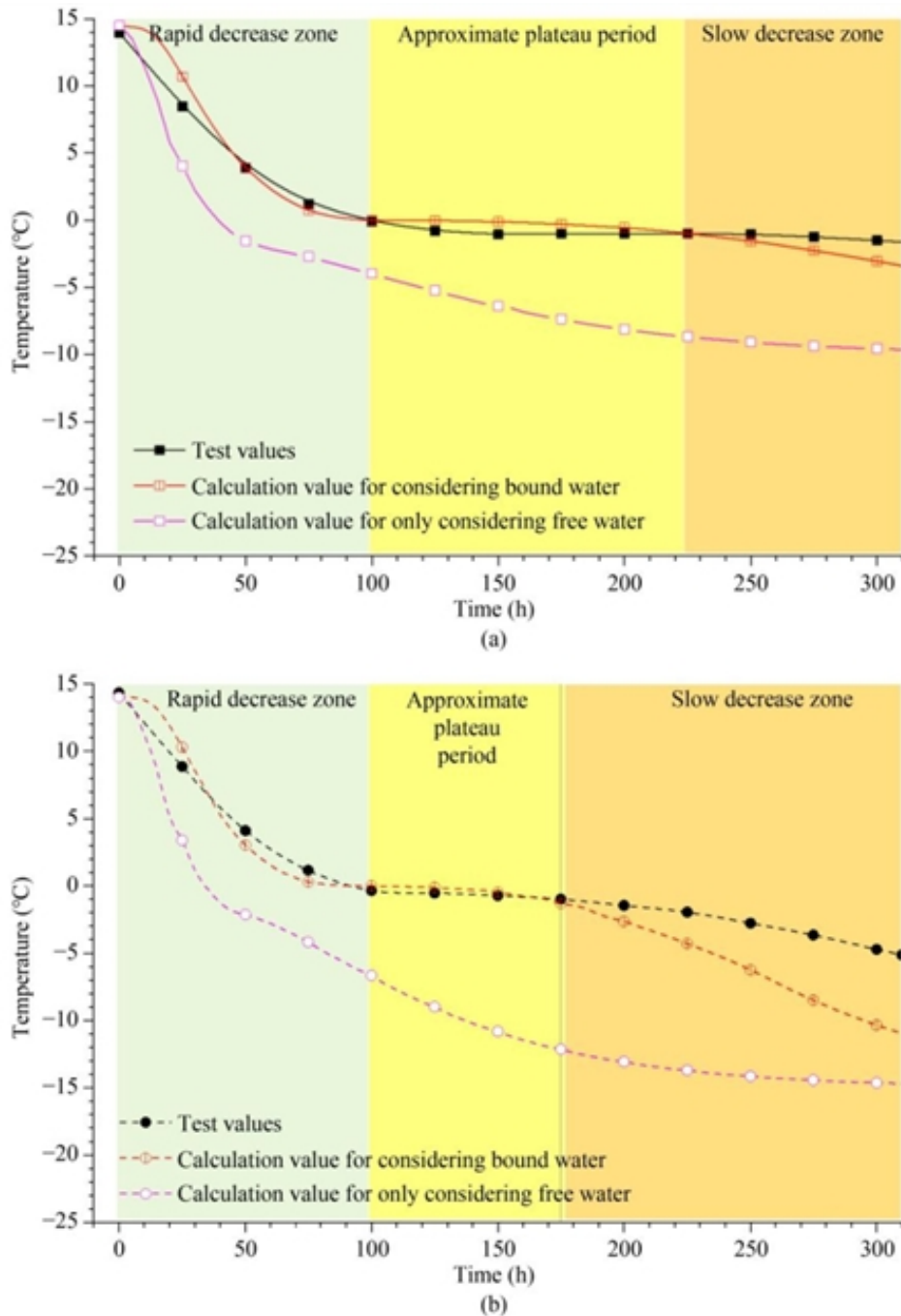


图5.考虑结合水转化的温度场发展规律：（a）工况1：含水率16%，温度荷载 $-10^{\circ}\text{C}$ ；（b）工况2：含水率16%，温度荷载 $-15^{\circ}\text{C}$ ；（c）工况3：含水率16%，温度荷载 $-20^{\circ}\text{C}$ 。

### 理论纠偏与工程参数的重新标定

该项成果的核心价值在于对传统冻土力学参数和工程计算模型的实质性修正。在AGF工程设计方面，该研究填补了传统温度场计算的盲区。传统理论因忽略了强结合水的相变潜热，导致对冻结壁形成过程的预估存在系统性偏差。引入孔隙气压驱替机制后，工程师可以更精确地模拟实际工况下的冻结温度场分布，从而对冻结壁厚度和制冷功率进行精细化设计。这不仅能有效避免因理论保守而造成的过度制冷和工期延长，更能从源头上减少不必要的电力消耗与碳排放。

---

在冻害防治方面，该研究修正了封闭体系冻胀的致灾机理。传统冻害治理往往侧重于外部水源的截断与排泄，而该研究证实，即便在无外部水源补给的封闭体系内，仅由内部结合水相变引发的冻胀占比即可高达82%。这意味着，对于青藏铁路、川藏铁路等穿越多年冻土区的重大线性工程，其冻胀融沉的防控策略必须从单一的控外水向内外因并重转变。该机制为评估封闭冻土系统的内部应力演化提供了全新的物理模型。

在基础物性参数测定方面，研究团队对现行规范提出了直接的修改依据。现行105-110 °C烘干法测得的含水率实际上包含了大量在冻结温区内不发生相变的强结合水。该研究指出，若以传统烘干法数据作为冻胀计算的初始参数，将导致严重的误差。未来，冻土学界可能需要重新标定未冻水含量的测定标准，以结合水完全散失的真实温度作为基准，这将引发多年冻土学一系列基础理论和工程规范的连锁更新。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1298-4>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：禹海涛等 来源：《工程·结构与土木工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发