DOI：10.11779/CJGE2025S10012

# 组装成孔改进双针热脉冲法测定土体比热容研究

周殷康[1,2]，阎长虹*[2]，张红扣[1]，吴 云[3]，祁磊磊[4]，袁宏光[4]，郝凯旋[4]

（1. 安徽工业大学建筑工程学院，安徽 马鞍山 243002；2. 南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210023；3. 中国矿业大学资源与地球科学学院，江苏 徐州 210008；4. 北京城建中南土木工程集团有限公司，北京 102200）

**摘 要**：比热容是土体基本的热物理性质之一，双针热脉冲法广泛应用于土体比热容测试。引孔是双针热脉冲法土体比热测试的关键，要求单孔完全垂直且双孔之间严格共面平行。然而，由于土体存在穿透阻力，传统的限位钻孔法无法满足这一要求，进而影响测试稳定性。本研究针对性地提出了组装成孔法，根据热脉冲法双针探头的形状尺寸，设计了相应的成型模具，并通过静压在两块土料上分别制得一对平行半圆双孔，对称拼接组装成双针热脉冲法所需共面平行垂直双圆孔。结果表明，组装成孔法相较于限位钻孔法能大幅提高双针热脉冲法在土体比热容测试中的稳定性，且组装成孔法测试结果与 DSC、TPS 法所测土体比热容接近，表明组装成孔改进的双针热脉冲法可更好地测定土体比热容。

**关键词**：土体比热；双针热脉冲法；组装成孔；改进测试

**中图分类号**：TU415 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−4548(2025)S1-0031-05

**作者简介**：周殷康(1988— )，男，安徽太湖人，博士，主要从事岩土体传热相关的实验和模拟工作。E-mail: Zhouyk@ahut.edu.cn。

# Determination of heat capacity of soils by improved dual-probe heat pulse method through hole-assembling approach

ZHOU Yinkang[1,2], YAN Changhong[2], ZHANG Hongkou[1], WU Yun[3], QI Leilei[4], YUAN Hongguang[4], HAO Kaixuan[4]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. School of Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 210008, China; 4. Beijing Urban Construction Zhongnan Civil Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract**: The specific heat capacity is a fundamental thermal property of soils, which has been widely determined by the dual-probe heat pulse method. The pilot holes are crucial for the heat pulse measurement of specific heat capacity of soils, necessitating that each individual hole should be perfectly vertical and strict coplanar parallelism between two holes. However, the traditional space-fixed borehole approach is compromised by penetration resistance of soils, failing to fulfill the above requirements and thus affecting the measuring stability. An innovative holes-assembling approach is proposed, specially designed to accommodate the dimensions and shapes of heat pulse probes. By employing the custom-designed forming dies, a pair of parallel semi-circular holes is created in two soil blocks under static pressure, followed by symmetrically block-assembling to achieve the necessary coplanar parallel vertical double circular holes. The results indicate that holes-assembling approach can significantly enhance the stability of the dual-probe heat pulse method in measuring the specific heat capacity of soils compared to the conventional space-fixed borehole method. Moreover, the test outcomes through the holes-assembling approach align closely with those obtained by the DSC and TPS methods, signifying that the modified dual-probe heat pulse method can more accurately determine the specific heat capacity of soils.

**Key words**: heat capacity of soil; dual-probe heat pulse; hole-assembling; improved measurement

## 0 引 言

比热容是土体重要的热物理性质之一，物理意义是改变单位质量土体单位温度所吸收或放出的热量，表征着土体的蓄热能力的大小。在涉及土体传热以及温度场分析的工程中，如冻结法施工[1]、浅层地温能提取[2]、核废料处置库散热设计[3]等，比热容都是必不可少的重要参数。

**基金项目**：国家自然科学基金项目（42307244）；安徽省自然科学基金项目（2108085QD168）；安徽省建筑结构与地下工程重点实验室开放课题（KLBSUE-2022-04）

**收稿日期**：2025-04-05

*通信作者（E-mail: Yanchh@nju.edu.cn）

在土工测试中，涉及土体比热容部分普遍采用的是混合量热法[4-5]，通过将土体与不同温度的溶液（通常是水）均匀混合后达到热平衡状态，该过程中高温物体释放的热量应等于低温物体吸收热量，通过热量守恒公式计算土体比热容。实际上，混合量热法测试的是土体平均比热容，更适用于比热容不随温度变化的材料，但不同温度下土体比热容并不是固定不变的。

双针热脉冲法广泛用于不同温度下土体比热容测试，Mengistu 等[6]采用双针热脉冲法测试南非风积砂比热容；Yoon 等[7]也采用该法测试 Kyeongju 膨润土比热容，并提出了相应的预测模型。然而，传统双针热脉冲法也存在测试不稳定和误差大等问题[8]，特别是探针偏斜与双针间距波动对比热容的测试精度有很大影响。理论上，2%的探针间距变化会引起比热容出现 4%的相对误差，或者 1° 偏转会导致比热容出现 10%的误差[9]。有学者通过对埋孔探针间距进行修正，部分提高了双针热脉冲法比热容的测试精度，但依然不能从源头上解决问题。

基于此，笔者对双针热脉冲法进行了系统分析，明确探针偏斜和双针间距改变的根本原因，据此提出新的改进策略，与原方法比较验证改进测试的有效性。在此基础上，将该方法与标准的差示扫描量热法和瞬态平面法进行比较，进一步验证测试的可靠性。

## 1 双针热脉冲法测定土体比热容分析

### 1.1 双针热脉冲法测试原理

双针热脉冲法使用一个加热探针和一个温度探针。加热探针内有绝缘电阻制成的加热丝，测量时可释放热量，温度探针内有热电偶或热敏电阻，可以测量温度变化。Campbell 等[10]假设一个瞬时发热的线状热源，在径向距离 $r$ 处温度变化值($\Delta T$)的表达式为

$$\Delta T(r,t)=-\frac{q}{4\pi\lambda}\mathrm{E}_i\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad 。 \tag{1}$$

瞬间放热的热源难以实现，改进为热脉冲模型，加热探针从 0 到 $t_0$ 释放脉冲热量，在径向距离 $r$ 处的温度变化值($\Delta T$)的表达式为

$$\Delta T(r,t)=\begin{cases}-\dfrac{q}{4\pi\lambda}\mathrm{E}_i\left(\dfrac{-r^2}{4\alpha t}\right) & 0<t<t_0,\\ -\dfrac{q}{4\pi\lambda}\left\{\mathrm{E}_i\left[\left(\dfrac{-r^2}{4\alpha t}\right)\right]-\mathrm{E}_i\left(\dfrac{-r^2}{4\alpha t}\right)\right\} & t>t_0。\end{cases} \tag{2}$$

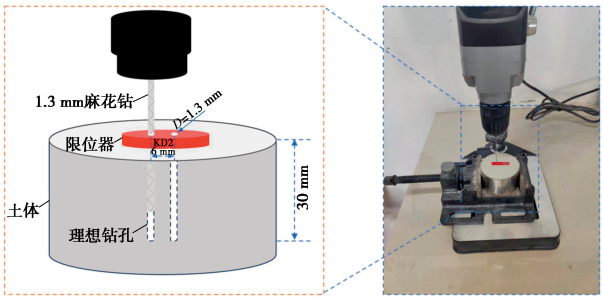
式中：$E_i(x)$为指数积分；$q$ 为单位时间内单位长度的线性热源释放的热量(W·m$^{-1}$)，$\alpha$ 为土壤热扩散系数(m$^2$·s$^{-1}$)；$\lambda$ 为土壤的热导率(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$)，$C_v$ 为土壤容积热容(单位 MJ·m$^{-3}$·K$^{-1}$)，对应关系为 $\lambda=C_v\cdot\alpha$。

从公式（2）中温度上升到最大值 $\Delta T_m$ 所用的时间 $t_m$ 中可以求得 $C_v$ 和 $\alpha$：

$$C_v=\frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m}\left\{\mathrm{E}_i\left[\frac{-r^2}{4\alpha(t_m-t_0)}\right]-\mathrm{E}_i\left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m}\right)\right\}, \tag{3}$$

$$\alpha=\frac{r^2}{4}\left\{\frac{\dfrac{1}{t_m-t_0}-\dfrac{1}{t_m}}{\ln\left(\dfrac{t_m}{t_m-t_0}\right)}\right\} \quad 。 \tag{4}$$

双针热脉冲法采用的探针很细，直径 1.3 mm（间距 6 mm）。然而，待测土样通常质地较为坚硬，测试时直接将细针插入到坚硬土块当中几乎是不可能的，需提前钻孔。基于此，现行双针热脉冲法测试系统都配备了与探针直径和间距匹配的先导片，先导片上有双圆孔，采用台钻穿过双圆孔在土块当中钻进，前后两次即可在土块中引出双圆孔，该引孔方法可称为限位钻孔法，如图 1 所示。



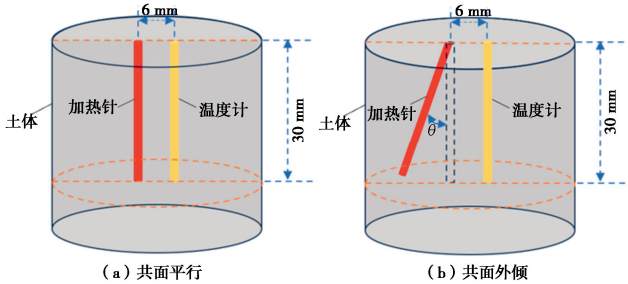

（a）限位钻孔法详图 （b）限位钻孔法实物图

图 1 先导片辅助限位钻孔法示意图

Fig. 1 Space-fixed drilling method aimed by guiding pilot

### 1.2 限位钻孔法不足分析

土体总是存在一定的穿透阻力，在限位钻孔法中，钻头及钻杆很难确保完全垂直，常出现弯曲甚至蛇形轨迹，从而导致单一孔槽的偏斜，包括内倾、外倾和蛇曲偏移等。对于两孔槽间的空间特征，基于限位钻孔法维持理想的共面平行更具挑战性，双孔间距的变化以及异面偏移等问题几乎是不可避免的。图 2 展示了限位钻孔法理想的共面平行双孔状态以及实际中出现的各种单孔外倾模式。




（a）共面平行 （b）共面外倾

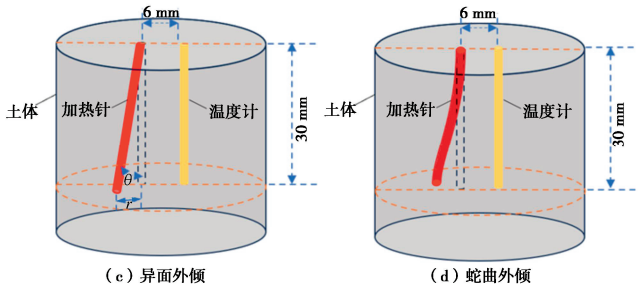



图 2 理想双圆孔及其单孔外倾示意图

Fig. 2 Schematic view of an ideal dual-probe channel and its corresponding outward inclination mode

可见，对于限位钻孔法，尽管借助先导片可以固定土体顶端孔位，据此保证了两个孔眼间的固定间距，但对于整个孔槽深度范围内的间距特征，该方法难以实现长程精确控制。然而，双针热脉冲法的测试原理要求两个探针所在孔槽总是保持共面平行和固定间距，但推荐的限位钻孔法既不能保证严格共面，也不能保证完全平行，更不能保证间距固定。

## 2　组装成孔法

如前所述，限位钻孔法无法规避土体穿透阻力问题，迫切需要开发新的成孔技术以满足双针热脉冲法测试原理中的要求。与限位钻孔法的单体开挖策略不同，本研究采用一种反向的组合拼装策略：双圆孔试样可对称地分为一对半圆双孔试样，则一对半圆双孔试样也可反向组装成所需的双圆孔试样。

基于此，半圆双孔试样可借助传统压样法制取，但传统压样法只能制取表面平整的样品，需要进行改装。笔者特制了与半圆双孔尺寸匹配的反向突隼型压实块，采用传统静压制样法即可制得表面具有半圆双孔土样，相应的中间步骤和细部详图如图 3。

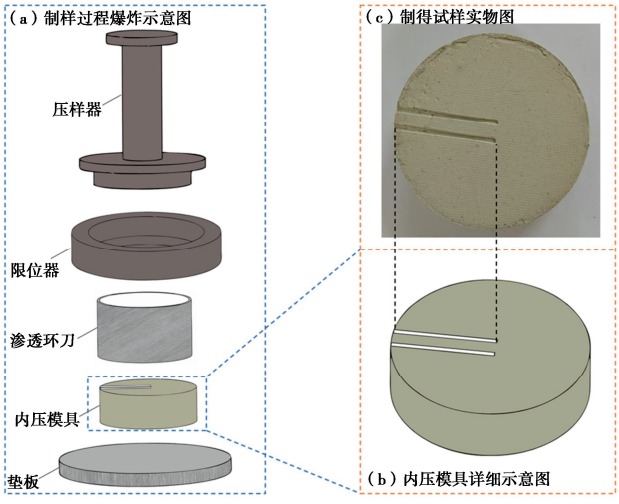



图 3 组装成孔法制样设备及半圆双孔试样

Fig. 3 Channel-assembling method with equipment and half dual-hole specimen

通过特制的突隼型模具，采用两次静压法分别制取表面带有平行半圆孔槽的环刀样，每个环刀样对应半块完整试样。进一步地，将两个环刀样在平行半圆孔位置处进行对称组装，即可形成一组完整共面平行的双圆孔，恰好满足双针热脉冲法的测试需要。为区别于原来的限位钻孔法，可将这种新型成孔技术称为组装成孔法。在此基础上，将组装好的试样夹于两个垫块之间，然后整体移置到测试台架之上；从台架上部缓慢旋下螺杆使之与上垫块贴紧，然后将 SH-3 探针平稳地插入试样孔槽中，再缓慢旋紧螺杆。为防止空气对流影响试样热平衡，用一个塑料盒罩住试样和测试台架，仅通过 SH-3 探针外接线与 KD-2pro 热物性分析仪相连以控制测试过程并计取测试结果。土块组装和试样测试示意图如图 4。

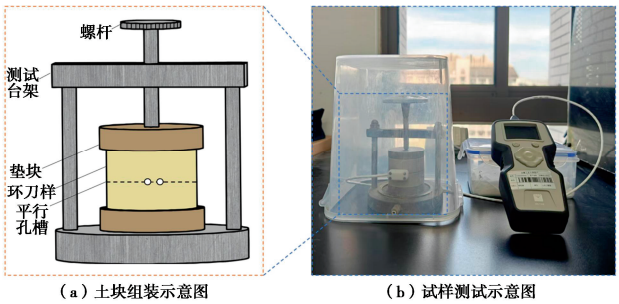
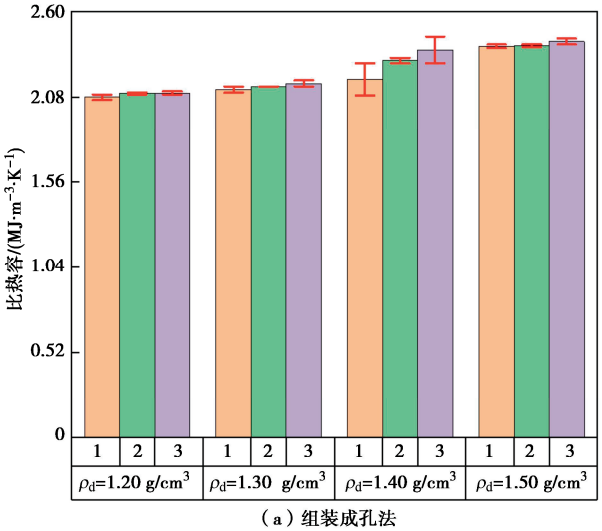



图 4 土块组装和试样测试示意图

Fig. 4 Schematic diagram of block assembly of soils and specimen measurement

## 3　结果分析

以 MX80 膨润土为研究对象，分别采用组装成孔法和限位钻孔法，对含水率为 21.8%的 4 个不同干密度压实膨润土样品开展比热容测试。每个干密度下设置 3 组平行样，每组样品重复测试 3 次，测试间隔 15 min，每个干密度下 3 组样品总计 9 次测量结果，如图 5 所示。



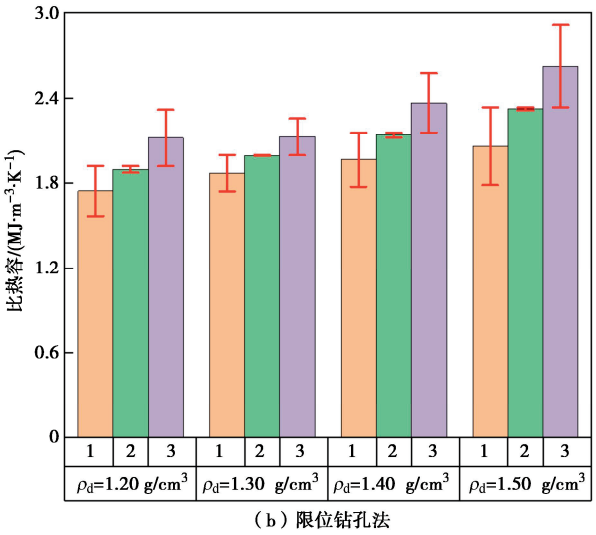



图 5 土体比热容测试比较

Fig. 5 Comparison of measured specific heat capacities of soils

由图 5 可知，基于组装成孔法备样，各干密度下所测土体比热容，3 个平行组间数据波动性较小，呈现较好的稳定性，最大误差为 0.097 MJ·m$^{-3}$·K$^{-1}$。相比之下，基于限位钻孔法备样，相同条件下所测土体比热容数据波动较大，3 个平行组间最大测试误差可达 0.28867 MJ·m$^{-3}$·K$^{-1}$。由此可见，对于双针热脉冲法测定土体比热容技术，组装成孔法测试稳定性明显高于传统限位钻孔法。

## 4 比较验证

土作为三相多孔介质，其比热容是其内部各组分比热容的综合体现，其理论计算模型为土体固相、液相、气相组分比热容的加权平均值：

$$C_{\mathrm{m}} = C_{\mathrm{s}} m_{\mathrm{s}} + C_{\mathrm{l}} m_{\mathrm{l}} + C_{\mathrm{g}} m_{\mathrm{g}} \quad 。 \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{m}}$ 为土体质量比热容(kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$)；$C_{\mathrm{s}}$、$C_{\mathrm{l}}$、$C_{\mathrm{g}}$ 分别为土体中固相、液相和气相的比热容(kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$)，$m_{\mathrm{s}}$、$m_{\mathrm{l}}$、$m_{\mathrm{g}}$ 分别为土体中固相、液相和气相的质量百分比(%)。

实际上，可忽略土体中气相对比热容的影响，得到更加简化的预测模型如下：

$$C_{\mathrm{m}} = \frac{C_{\mathrm{d}} + C_{\mathrm{w}}\omega}{1+\omega} \quad 。 \tag{6}$$

式中：$C_{\mathrm{m}}$ 为土体比热容(kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$)，$C_{\mathrm{d}}$ 为固体颗粒的比热容(kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$)，$C_{\mathrm{w}}$ 为水比热容(kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$)，常温下干土比热容 $C_{\mathrm{d}}$=0.75 kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$[11]，水比热容 $C_{\mathrm{w}}$ =4.18 kJ·kg$^{-1}$·K$^{-1}$。

以 MX80 膨润土为例，含水率设置为 11.1%、15.8%、21.8%、25.8%和 29.0%，干密度为 1.2 Mg·m$^{-3}$，基于式（6）计算膨润土比热容理论值。分别使用改进的 DPHP、TPS（Hot Disk）以及 DSC 方法对 MX80 膨润土的比热容进行测定，并与理论值进行比较，图 6 展示了三种比热容方法实测值与理论值的比较结果。

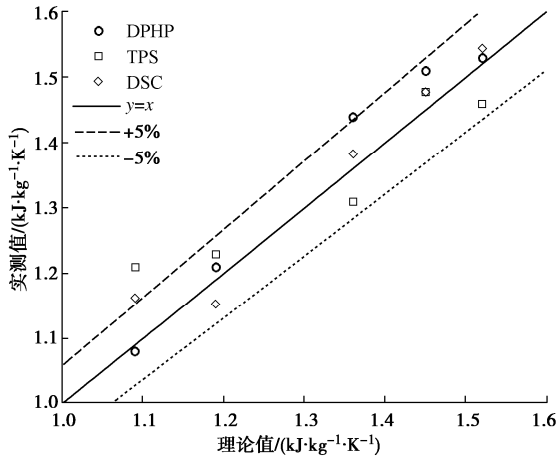



图 6 三种比热容方法实测值与理论值比较

Fig. 6 Comparison in specific heat capacity between theoretic and measured values by three methods

由图 6 分析可知，3 种方法所测土体比热容值与理论值高度一致，大部分实测值均位于理论值±5%的范围内，呈现出微小波动。差示扫描量热法（DSC）作为测定土体比热容的标准技术，其准确性得到广泛认可，而瞬态平面热源法（TPS-Hot Disk）也在岩土体比热测试中得到广泛应用。经改进的组装成孔法（DPHP）测试结果与 DSC 和 TPS 方法所得数据吻合较好，进一步证实了基于组装成孔法改进的 DPHP 方法在测定土体比热容方面的精确性与可靠性，适用于测定土体比热容参数。

## 5 结 论

双针热脉冲法广泛应用于测定土体比热容，但前处理中传统限位钻孔法无法保证双针孔槽之间严格的共面平行与固定间距，使得测试结果不稳定。笔者开发了新的组装成孔技术，可实现孔槽空间的长程精确控制，符合双针热脉冲法测试原理的技术要求，与限位钻孔法相比所测比热容结果波动性显著降低。同时，基于组装成孔技术改进的双针热脉冲法测定土体比热容，测试结果与标准的差示扫描量热法和瞬态平面法测定土体比热容高度吻合，表明组装成孔改进的双针热脉冲法可以更好地测定土体比热容。

**参考文献：**

[1] 黄建华, 严耿明, 杨鹿鸣. 水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(5): 108-116. (HUANG Jianhua, YAN Gengming, YANG Luming.

Analysis of freezing temperature field in connecting passage of cement improved soil layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(5): 108-116.(in Chinese) )

[2] 杨　燕, 翟晓强, 余　鑫, 等. 地源热泵空调系统热平衡及土壤温度分布实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, **32**(11): 1819-1822. (YANG Yan, ZHAI Xiaoqiang, YU Xin, et al. The experimental study on heat balance and soil temperature distribution of ground source heat pump of air-conditioning system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, **32**(11): 1819-1822. (in Chinese) )

[3] 周祥运, 孙德安, 林宇亮. 基于散热的高放废物处置库废物罐间距研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2069-2077. (ZHOU Xiangyun, SUN Dean, LIN Yuliang. Canister spacing in a high level radioactive nuclear waste repository based on heat conduction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2069-2077. (in Chinese) )

[4] 李顺群, 王杏杏, 夏锦红, 等. 基于混合量热原理的冻土比热容测试方法[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1684-1689. (LI Shunqun, WANG Xingxing, XIA Jinhong, et al. Test methods for specific heat capacity of frozen soil based on principles of mixing calorimetry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40(**9): 1684-1689. (in Chinese) )

[5] 刘造保, 吴　名. 康定花岗岩热物性参数与深部储层采热潜力评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(8):1821-1831. (LIU Zaobao, WU Ming. Thermal properties of Kangding granite and evaluation of thermal extraction potential in deep reservoirs [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(8): 1821-1831. (in Chinese))

[6] MENGISTU A G, VAN RENSBURG L D, MAVIMBELA S S W. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa[J]. Catena, 2017, **158**: 184-193.

[7] YOON S, JEON J S, KIM G Y, et al. Specific heat capacity model for compacted bentonite buffer materials[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **125**: 18-25.

[8] LIU G, WEN M M, REN R Q, et al. A general in situ probe spacing correction method for dual probe heat pulse sensor[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 226-227: 50-56.

[9] LIU G, LI B G, REN T S, et al. Analytical solution of the heat pulse method in a parallelepiped sample space[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(5): 1607-1619.

[10] CAMPBELL G S, CALISSENDORFF C, WILLIAMS J H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, **55**(1): 291-293.

[11] WANG Y J, LU Y L, HORTON R, et al. Specific heat capacity of soil solids: influences of clay content, organic matter, and tightly bound water[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, **83**(4): 1062-1066.

（编校：明经平）