



2026/07

po(二声)

开封市繁塔缪子透射 反演成像观测结果

汇报人：李辰

华北电力大学-缪子透射成像



目录

01

项目背景与研究意义

02

繁塔观测实验设计

03

观测结果与数据分析

04

未来与展望



01

项目背景与研究意义

为什么要用繆子做大型不可移动文物

无接触

深层次



任何直接接触都会再次
对历史文物进行不可逆
转的伤害



不止要关心文物的表观，
更要关心其所依附结构的
稳定性

契合缪子成像技术的特点



无损探测

无需取样或破坏被测物体，完整保留文物原貌



穿透力强

缪子可穿透数米至数十米厚的岩石与建筑结构



无需接触

特别适合珍贵文物的内部结构远程探测

1955

理论奠基

首次提出利用宇宙射线缪子探测物体内部结构，开创性地将高能物理与地球科学相结合

2015

考古突破

成功应用于埃及金字塔内部空洞探测，验证了技术在实际考古场景中的可行性

至今

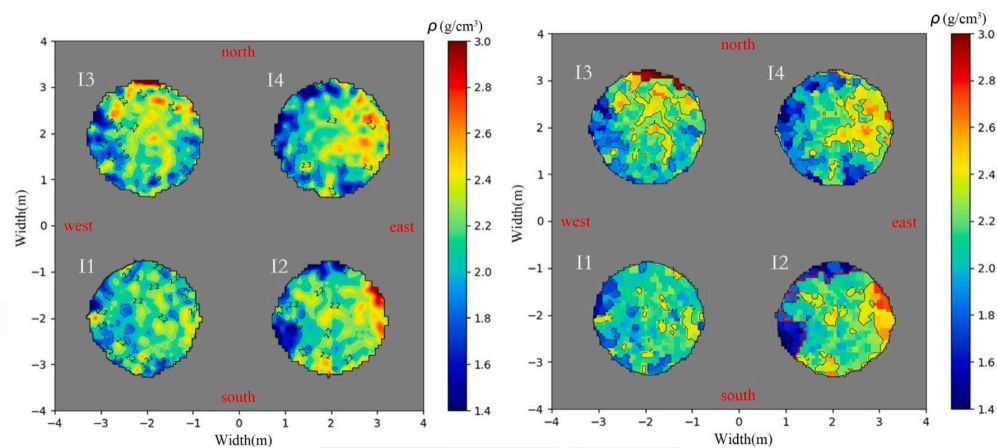
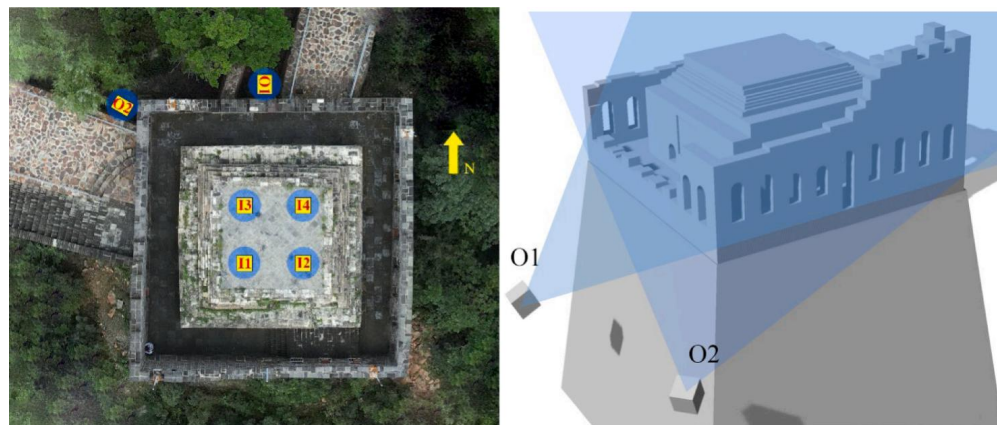
多元拓展

技术成熟后，开始广泛应用于火山监测、大型设施检查、古建筑保护等领域

文物考古隐蔽遗存

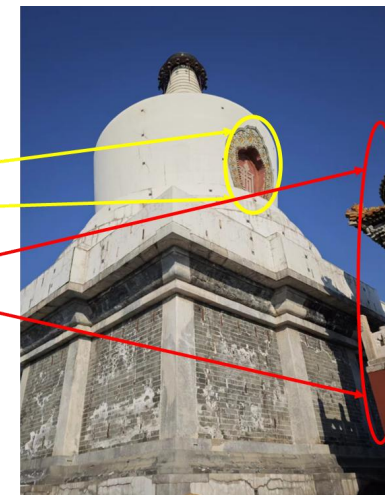
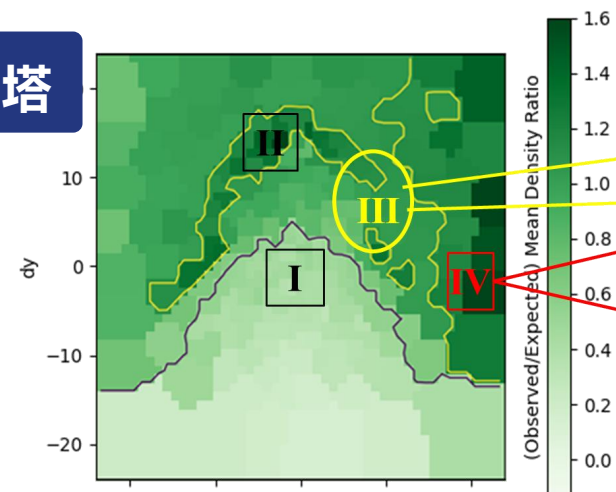
以缪子视角查看古长城楼顶的漏水问题

九眼楼长城

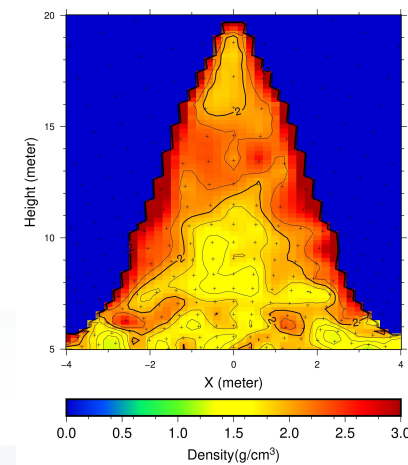
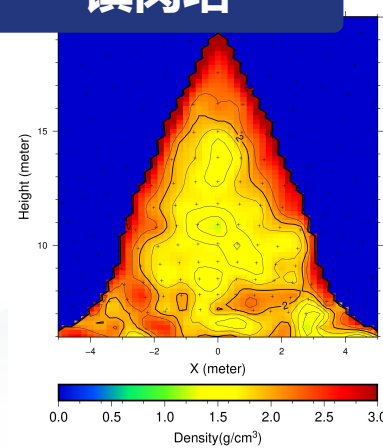


探明封闭塔的内部结构

北海白塔

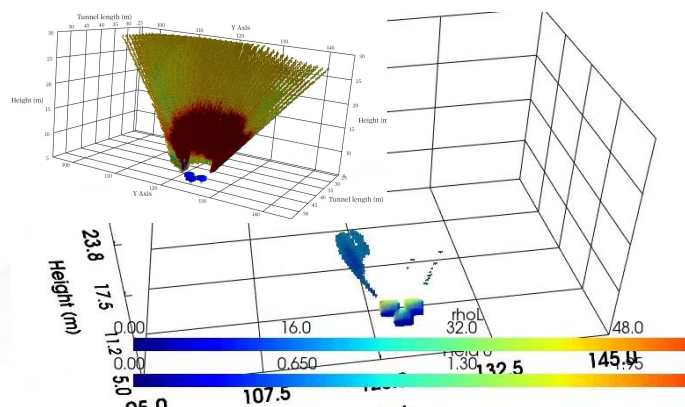
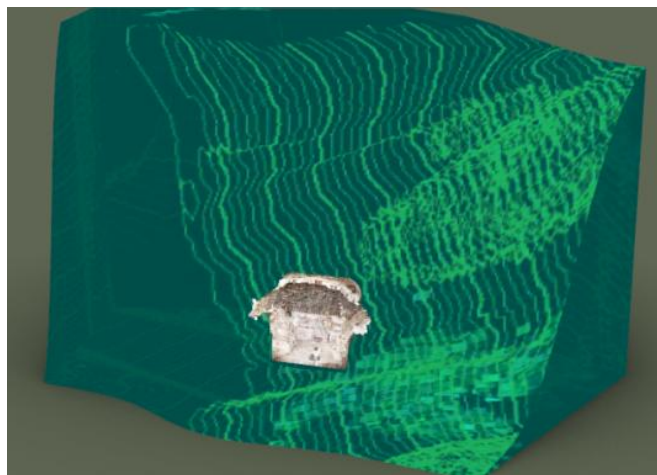


镇岗塔

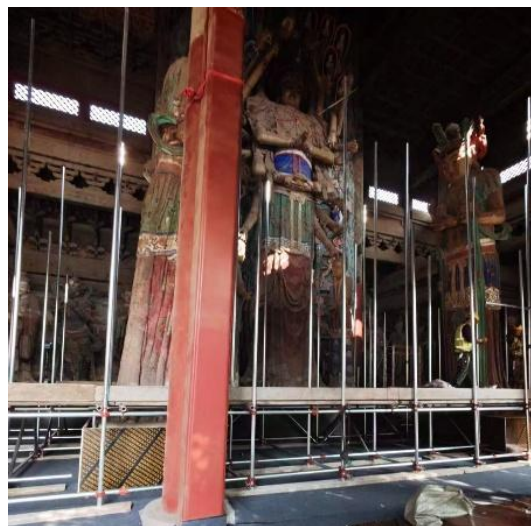


文物考古

安岳石窟

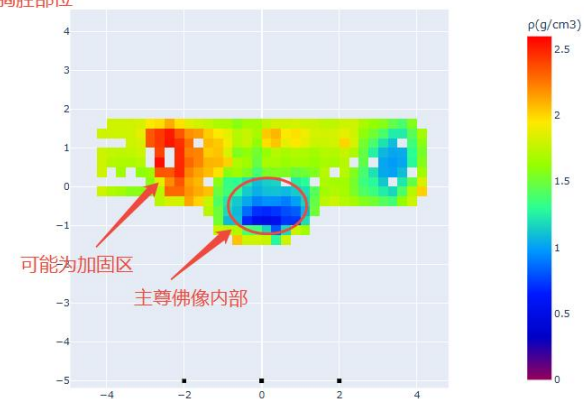


大慧寺佛像

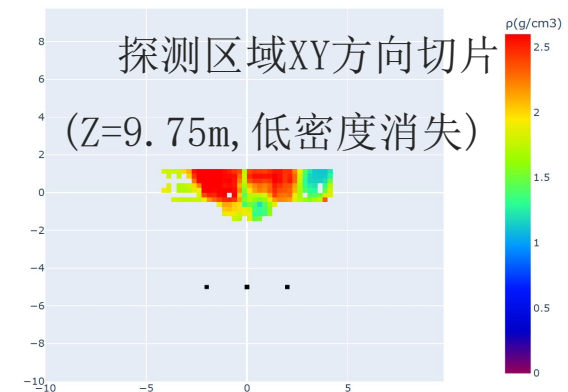
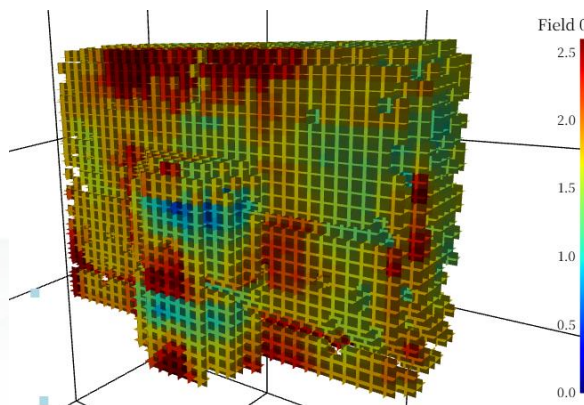


当前高度 $Z = 10.75 \text{ m}$

胸腔部位



当前高度 $Z = 9.75 \text{ m}$

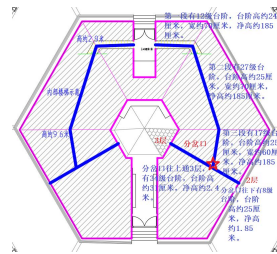


繁塔的历史价值与保护需求

繁塔——开封现存最古老建筑，始建于北宋开宝七年（公元974年）
结构：六角形砖塔，原高九层现存三层，青砖砌筑，内部含楼梯、佛龕等复杂构造

塔身内部结构

塔内外表面看均为青砖，
其墙内中心内部8米厚是否
仍为青砖



塔顶部状态

原九层变为三层，现存楼
顶为后期砌筑，其结构与
稳定性如何

整体结构探测

获取塔体内部密度分布，
识别主要构造



探测难点 塔体结构复杂

The background is a soft, stylized illustration of a traditional Chinese landscape. It features misty, layered mountains in shades of light blue and grey. In the lower center, a small pavilion with a traditional Chinese roof sits on a small island or peninsula. Several birds are depicted in flight, scattered across the upper half of the image. The overall aesthetic is minimalist and serene.

02

繁塔观测实验设计

探测器系统组成

位置灵敏探测器

采用闪烁体探测器，记录缪子入射位置，实现高精度轨迹追踪

闪烁体 气体探测器

光电转换器件

将光信号转换为电信号，常用光电倍增管或SiPM，保证信号保真度

光电倍增管 SiPM

缪子透射成像系统

信号处理、拟合、时间测量与数据记录，是成像系统的核心枢纽

- 信号放大与波形整形
- 脉冲甄别与数据记录
- 高精度时间测量(TDC)
- 数据记录与实时传输

本次使用的探测器规格：
尺寸：30cm*40cm
板间距：28cm
像素宽度：2cm



系统架构核心枢纽

支撑结构

保证探测器稳定运行，可调节探测角度，适应古建筑复杂现场环境

稳定运行 角度调节

技术指标

<2% 单点位每小时数据波动
探测器稳定性

易用性
简单采集易部署

满足探测需求

探测器布置方案



点位数量

19 45° 天顶角

方向角认为各向同性

个观测站点，围绕塔体均匀分布，实现全方位覆盖



繁衍空间的构建

模型

1：1还原实际模型，将探测数据约束在指定区域中。



观测点位

内部-外部12m

探测器从塔内布置到塔外，保证数据反演射线交叉覆盖全面

保证视野齐全

探测器信号稳定



观测时长

7440min

每个站点连续观测保证数据量充足，确保统计精度



19个点位联合观测,实现对塔体**90%以上**体积的有效覆盖

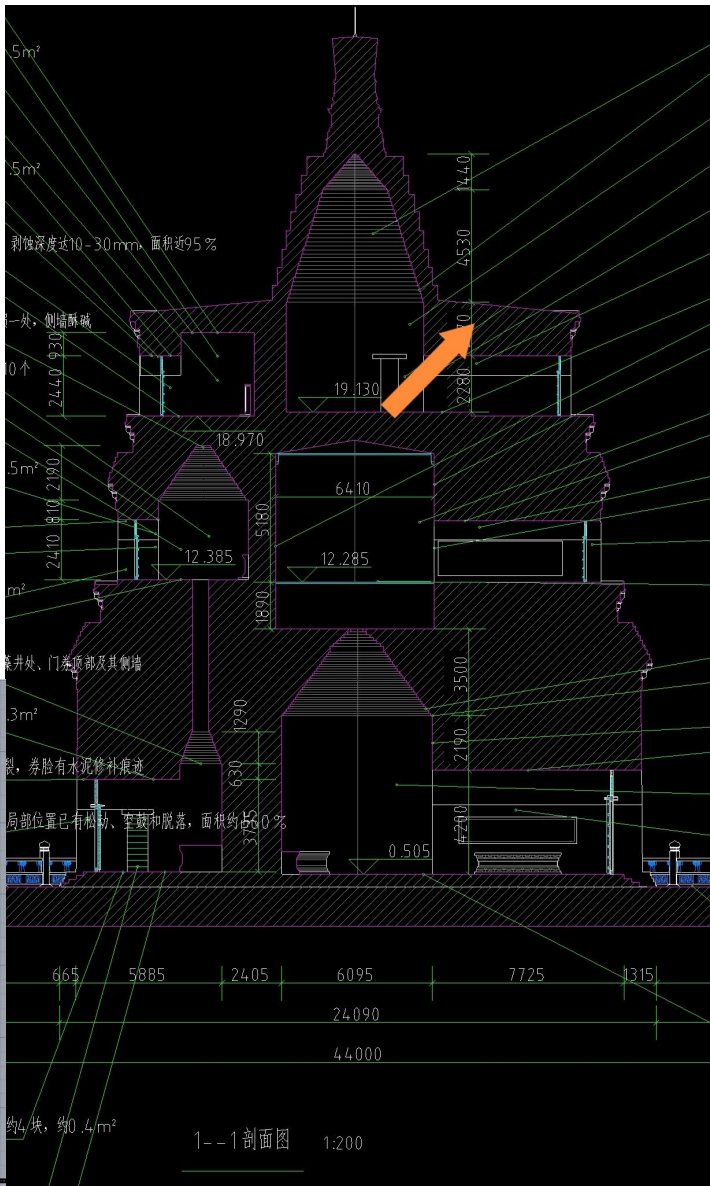
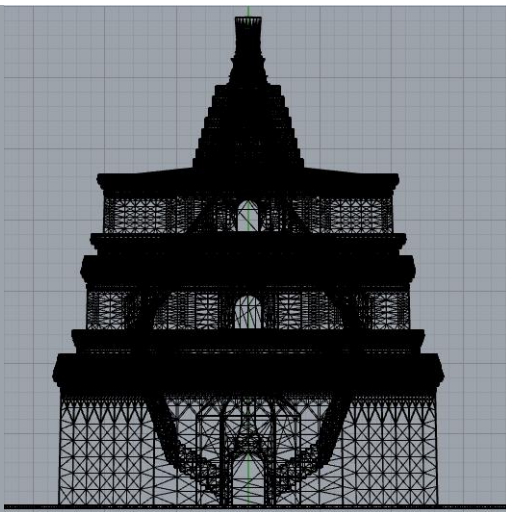
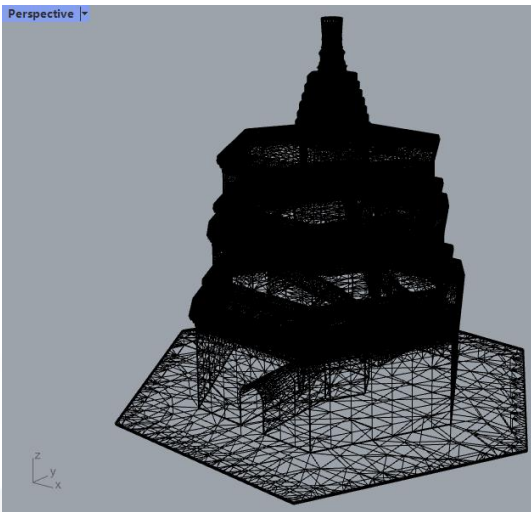
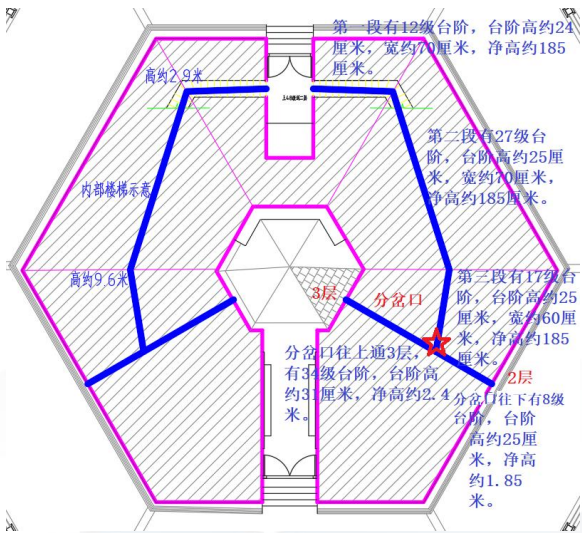
实验前准备（现场详勘）：

建模

1：1还原实际真实模型，确保将每个像素的数据都还原到正确的位置上。

建模真实

网格合理且统一



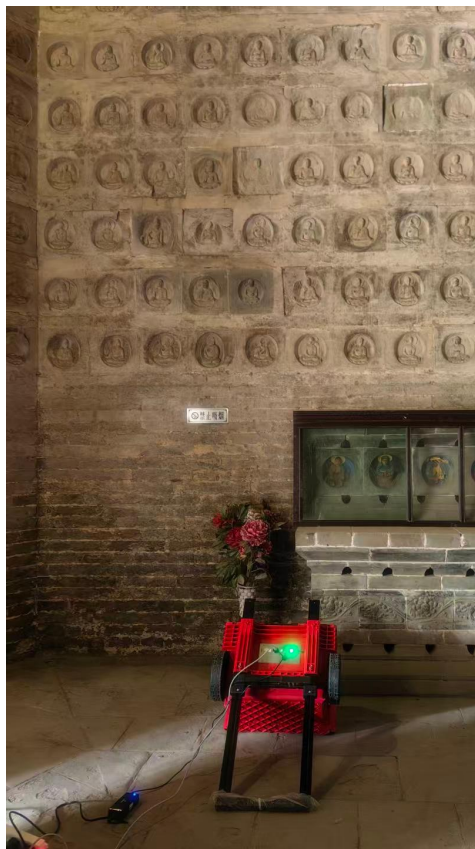
现场的实验过程



探测器本底标定



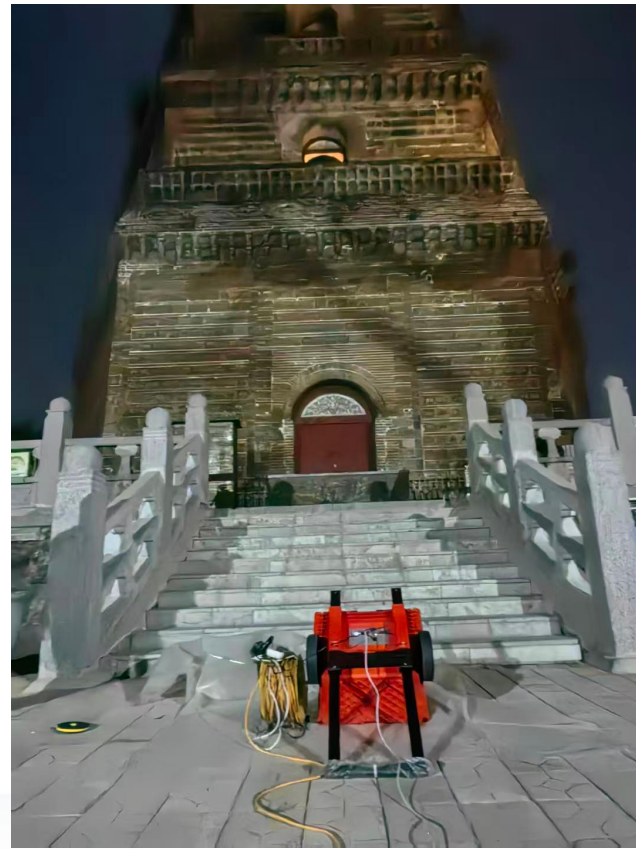
一层楼内



三层楼内



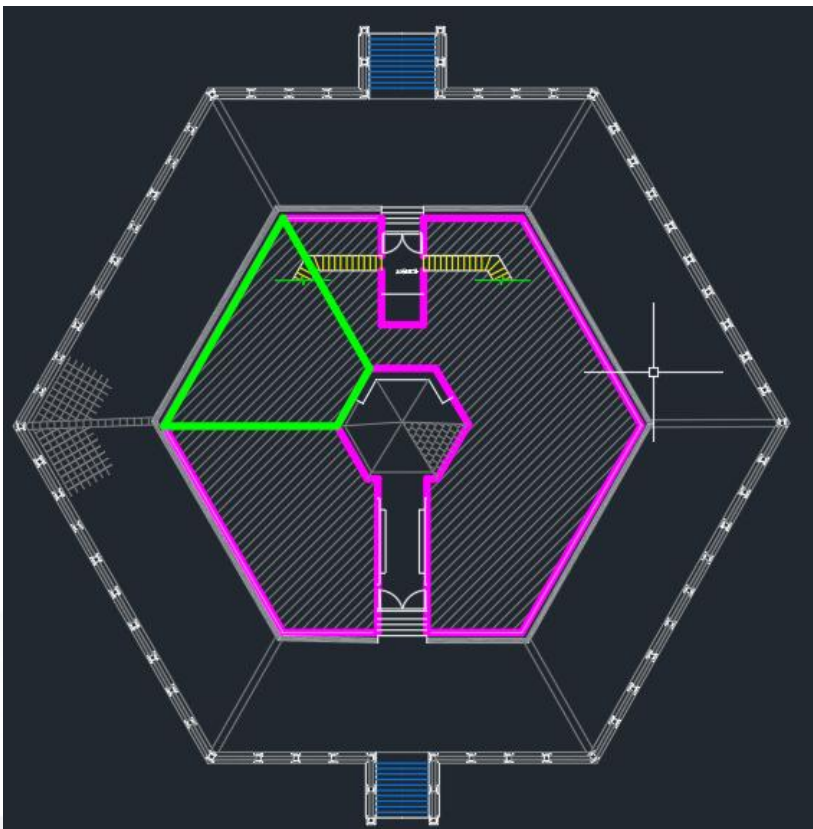
楼外点位



点位示意图

- 一层实际观测点位示意如下：

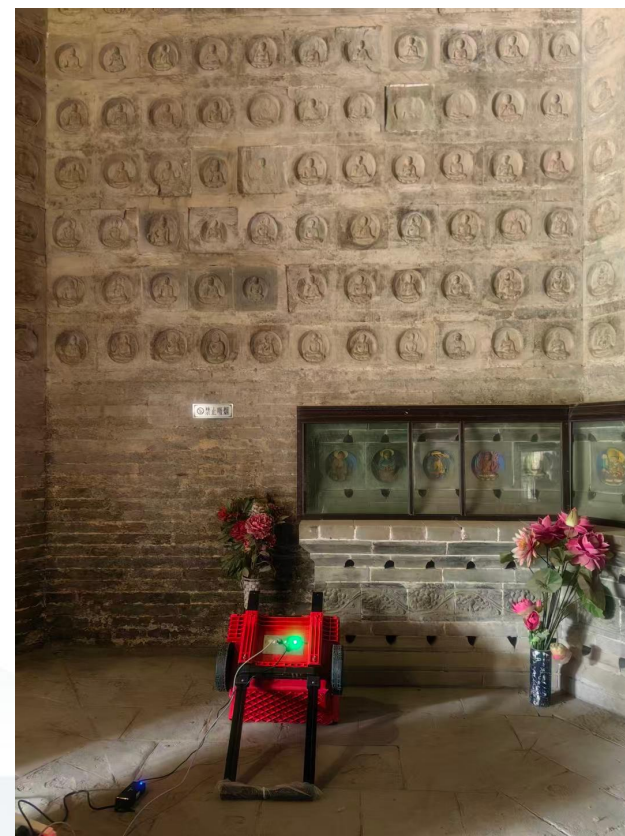
探测区域：



设备摆放点位：



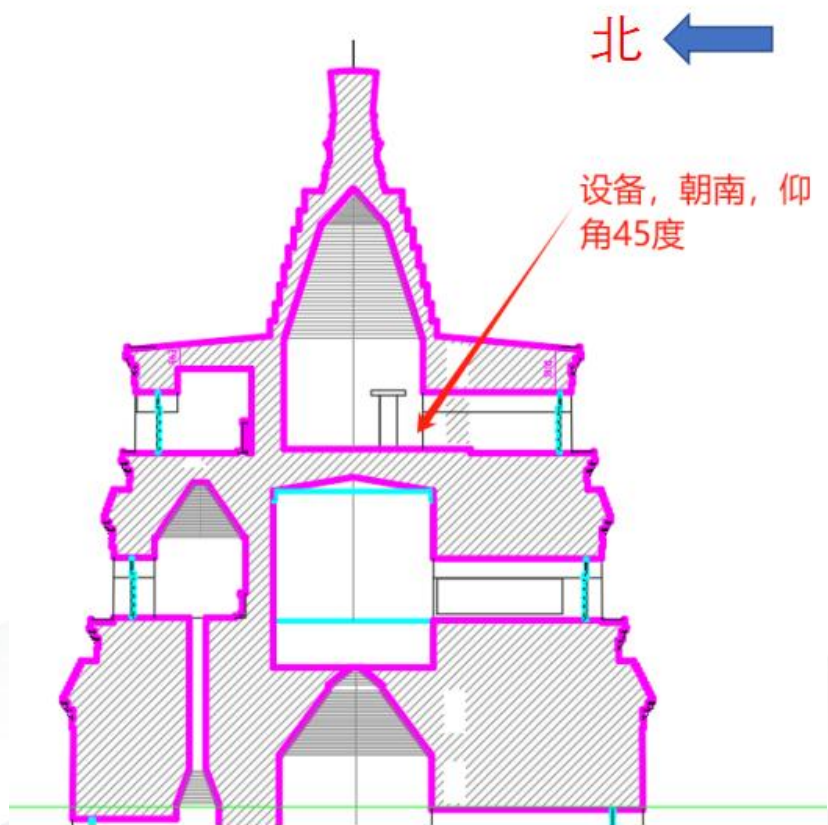
现场记录：



点位示意图

- 三层实际观测点位示意如下：

探测区域（事例为以南）：



设备摆放点位：

- 三层洞内以南
- 三层洞内东北
- 三层洞内西北
- 三层洞内西南

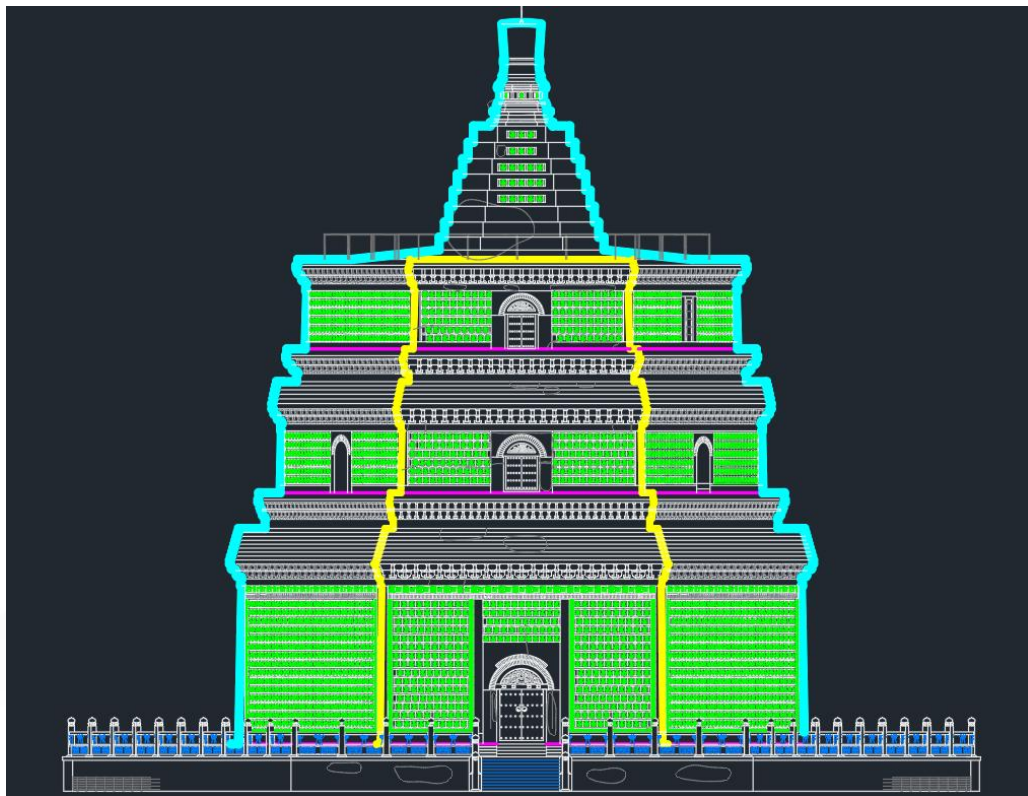
现场记录：



点位示意图

- 塔身整体实际观测点位示意如下：

探测区域（塔身全部）：

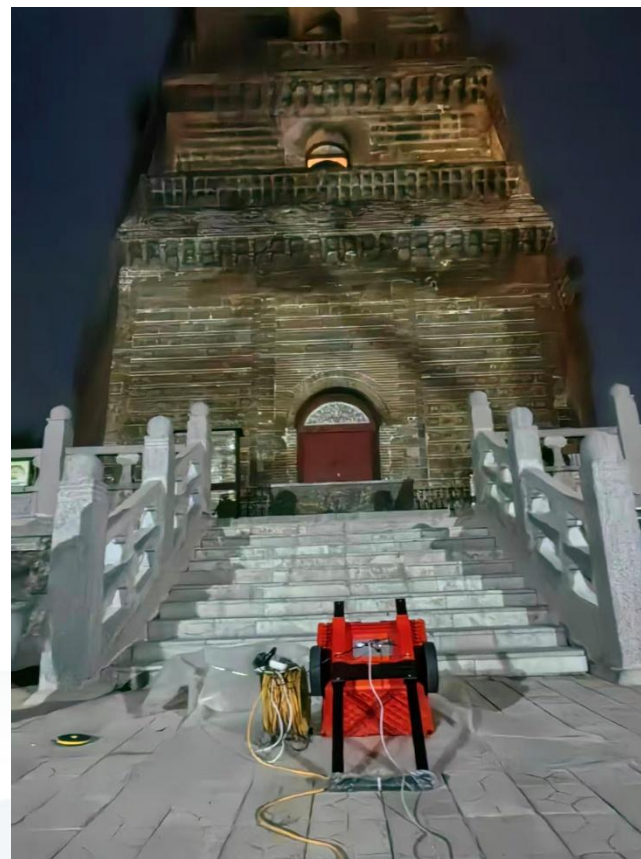


设备摆放点位：

正南正北

设备距离塔跟的
水平距离约12米，
设备仰角45度。

现场记录：

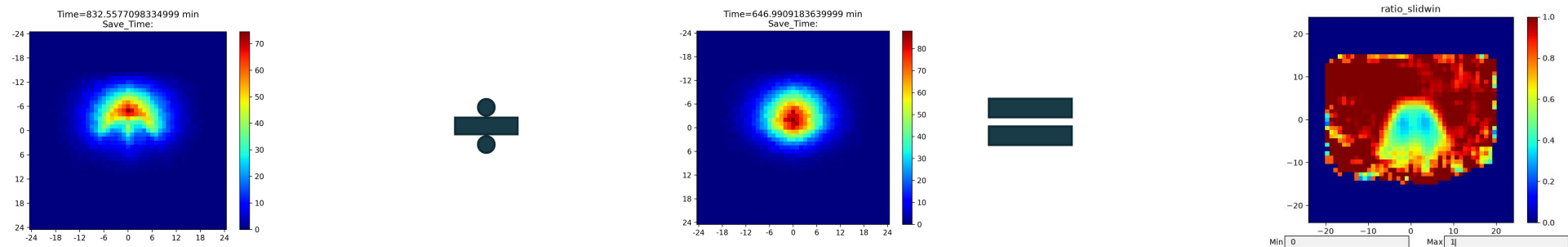




04

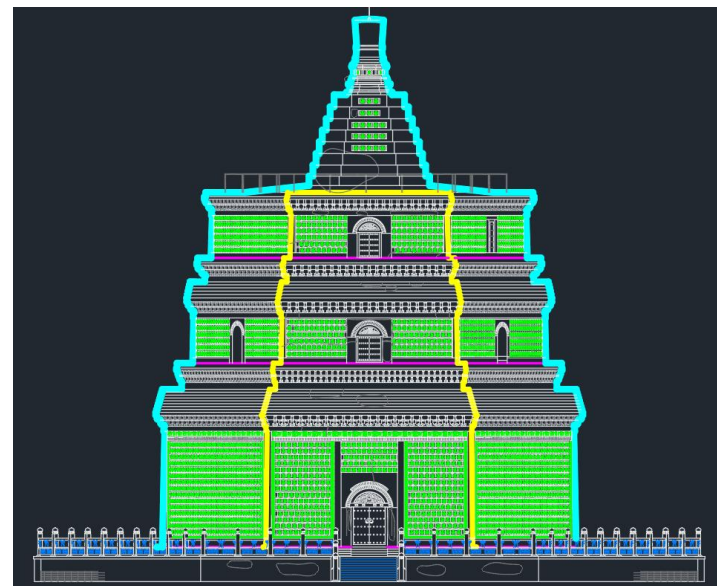
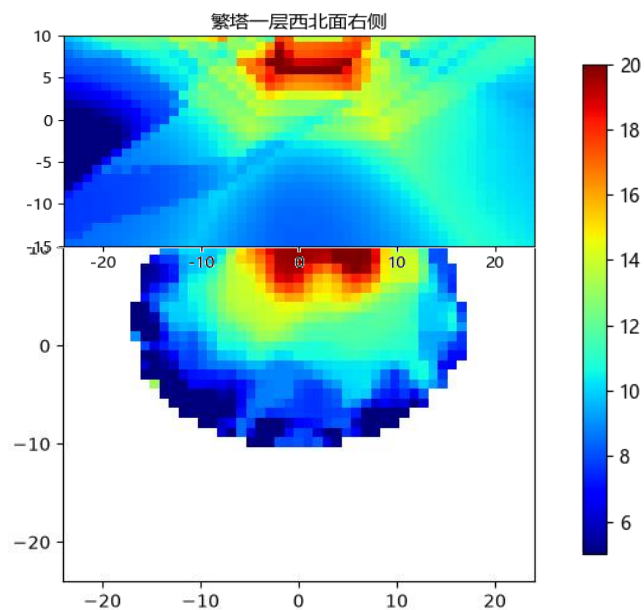
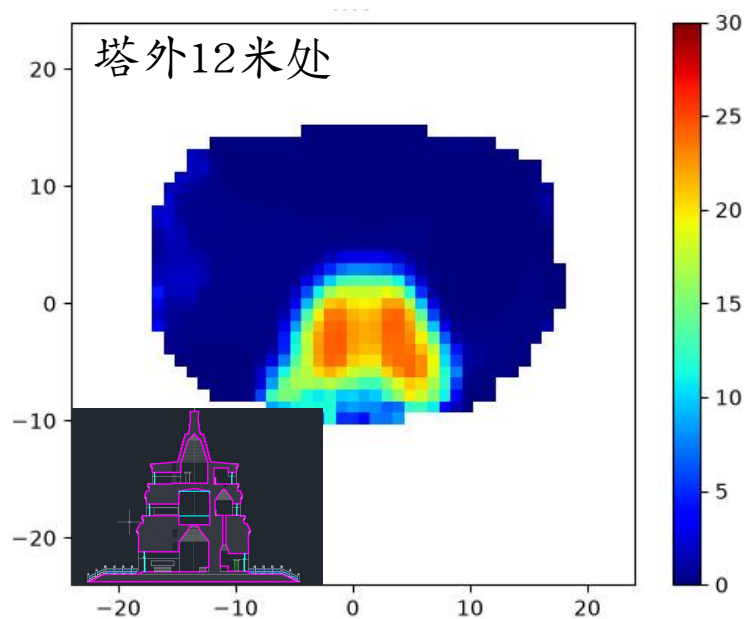
观测结果与数据分析

二维数据处理

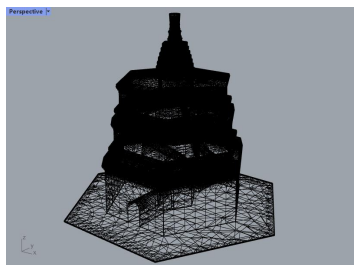
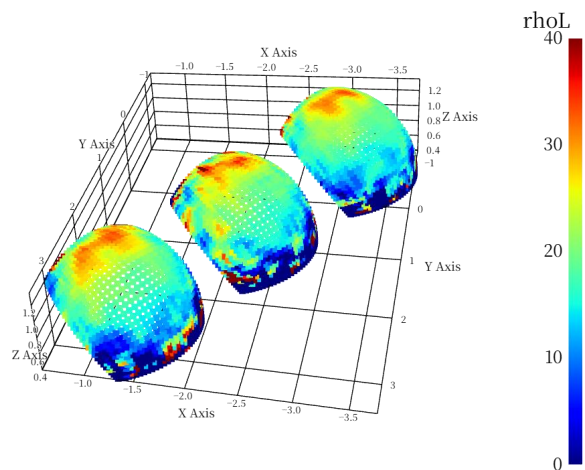


二维部分结果

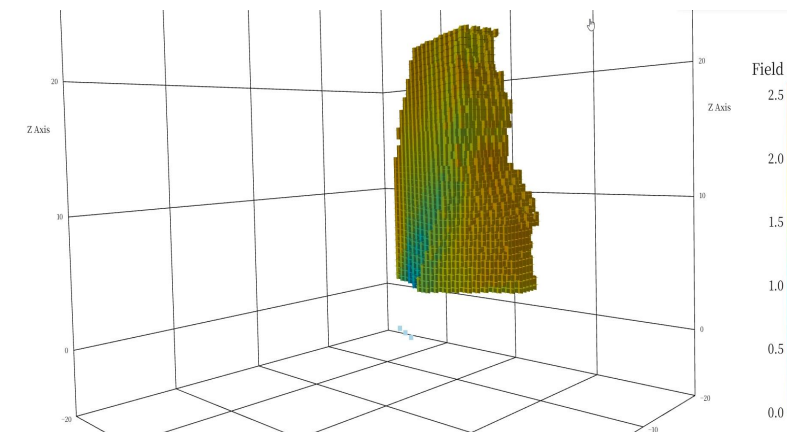
塔内一层，可看到一层一层的塔身结构



逐块三维反演（西北墙）



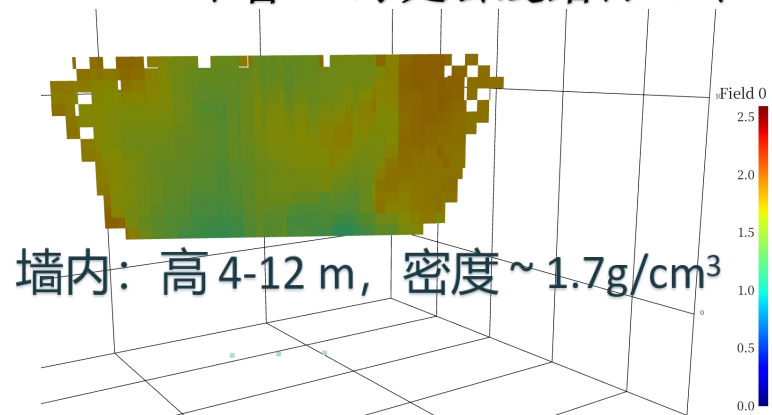
西北墙3D内部密度结构



竖直方向剖面

观测值：密度长度分布 反演到实际物理空间

距外墙2 m厚处密度结构切片

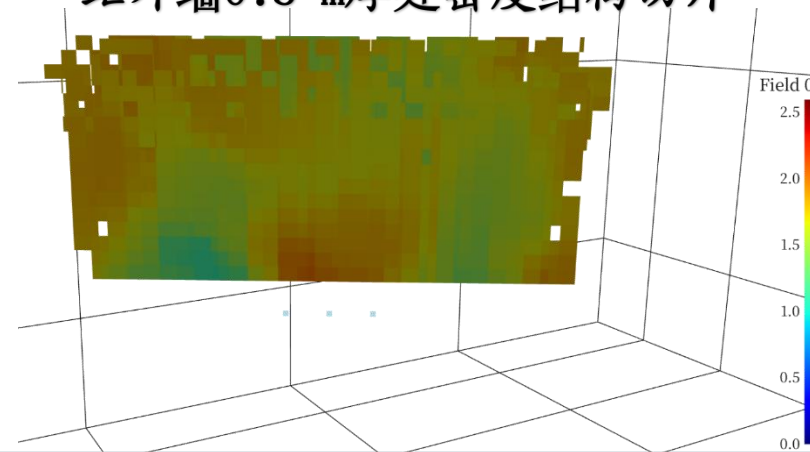


墙内：高 4-12 m，密度 $\sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$

观测到不同墙厚
处存在密度差异

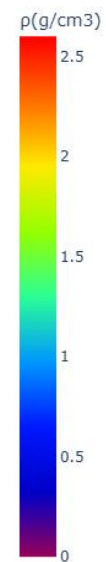
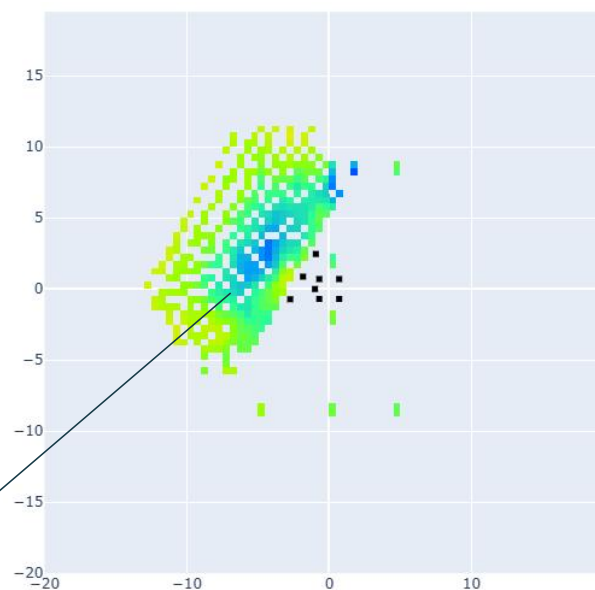
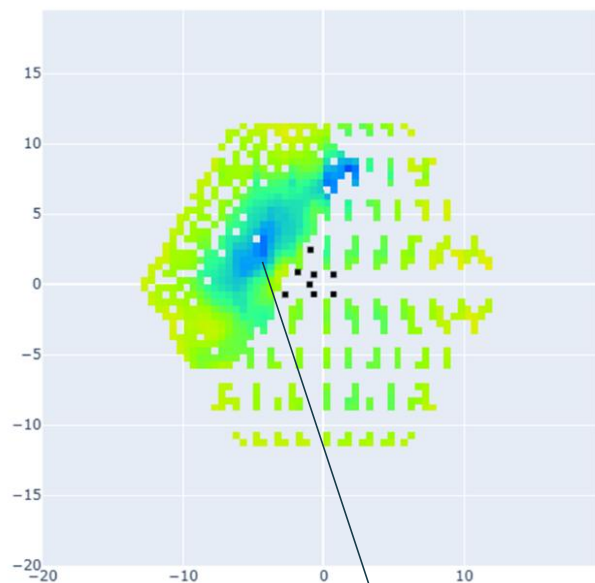
算法给出3点位反演出的3D密度结果

距外墙0.5 m厚处密度结构切片

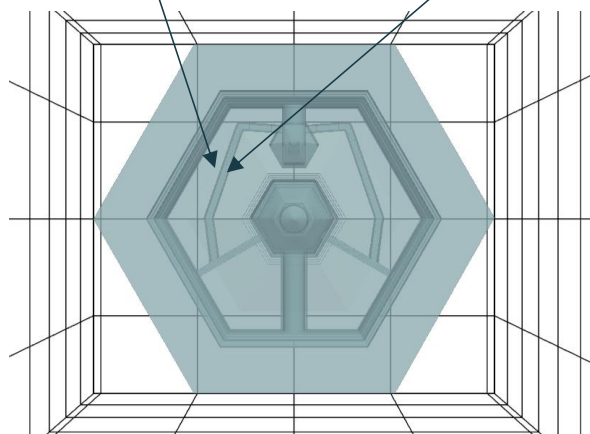


逐块三维反演（西北墙）

西北墙水平内部切片（高7.0-7.5m）

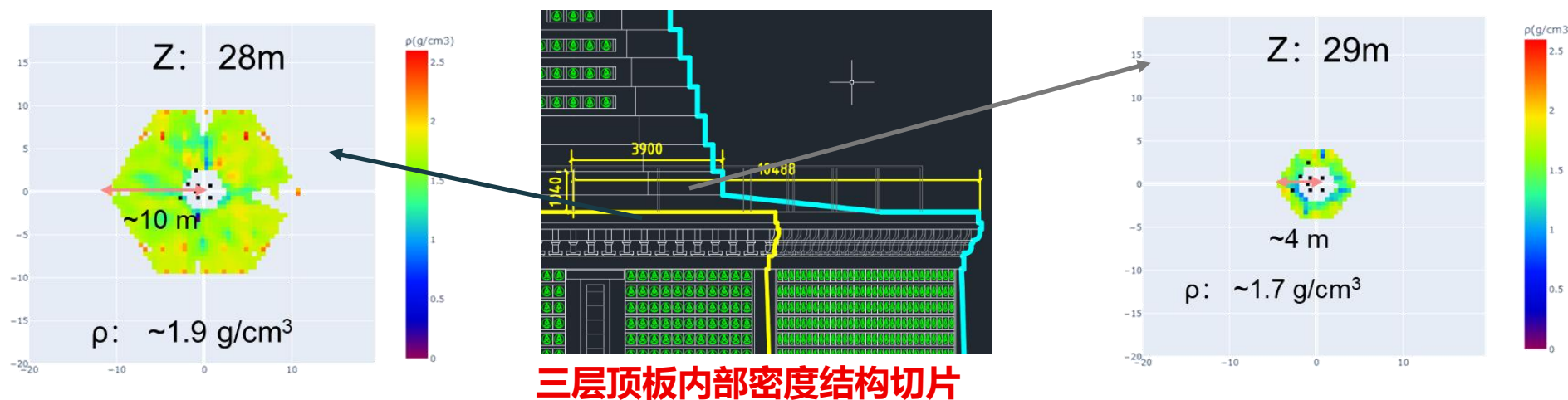
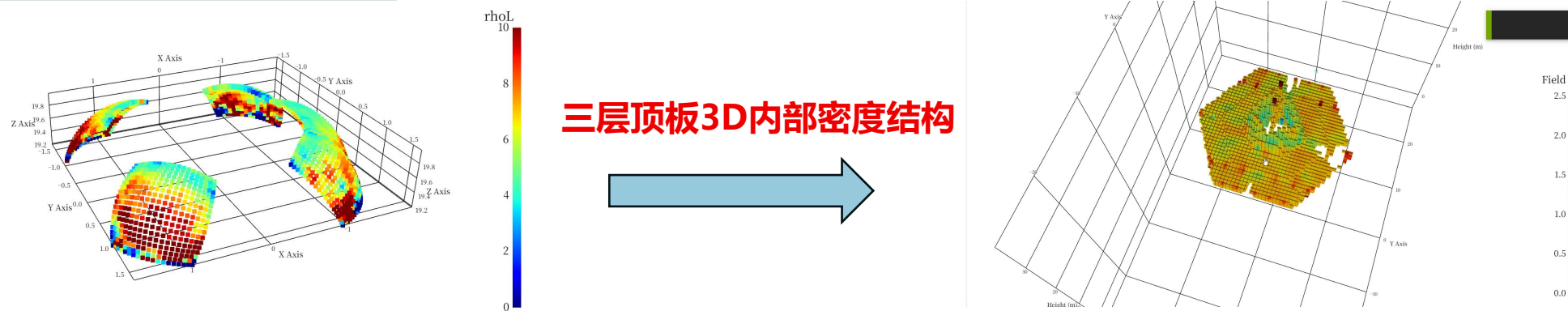


走向一致



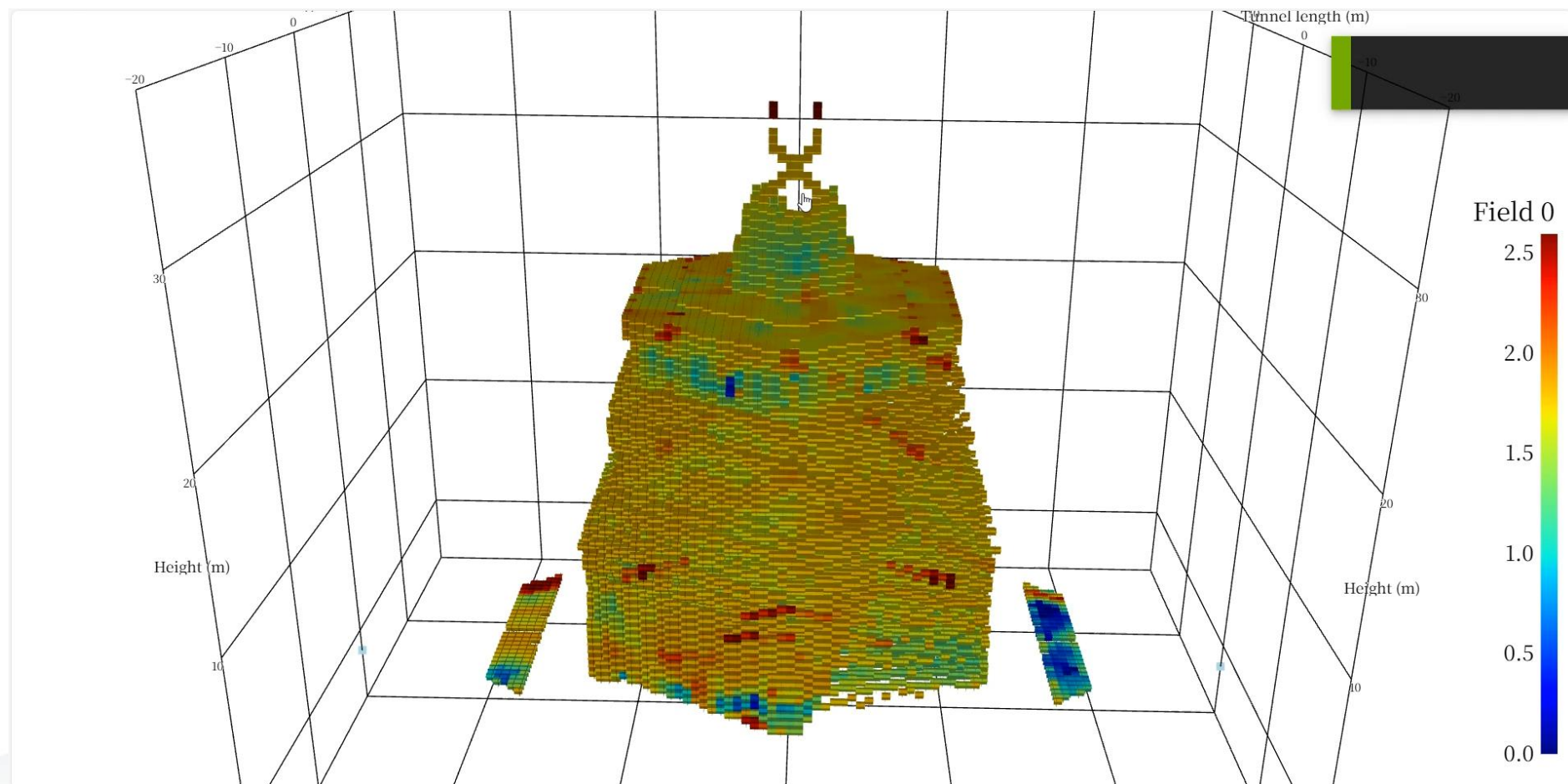
据三维切片结果显示，
墙内密度约1.7g/cm³，
墙体密度约2.0g/cm³

三维反演（顶层楼板）



- 1- 重建3D 顶板的形状和CAD基本一致：Z=28 m 处的切片半径~10 m长；高度差1 m处，即Z=29 m处的切片半径长~4 m
- 2- 重建密度与青砖密度基本一致：重建密度1.9 g/cm³，在窄顶处，密度偏小，主要原因为模型偏厚

结合所有点位，整体反演结果：



外墙较为坚固、整体平均密度为 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$



05

结论与展望

主要研究结论

本项目成功将缪子透射成像技术
应用于河南开封繁塔的内部结构探测。

未来研究方向



提高分辨率

优化探测器设计，提升空间分辨率



更好的三维算法

提高塔体内部结构的三维重建与可视化的数据精度



实时监测系统

建立长期监测系统，跟踪结构变化



应用拓展方向

希望将技术推广至其他古建筑、石窟等文化遗产
的保护工作

研究团队与致谢

数据分析单位

华北电力大学

项目总体设计与组织实施，负责缪子
成像技术研发与数据分析

合作&现场仪器布设单位

勘察设计院

提供文物保护专业指导、现场协调与
工程勘察支持

仪器提供单位

北京科斯米克科技有限公司

提供了稳定的缪子透射成像设备

致谢

 感谢开封市文物局提供现场支持

 感谢繁塔管理处协助观测工作

 感谢所有参与项目的研究人员



THE END

感谢聆听

2026.07