

基于CSNS Back-n开展的NRTA核素分析进展

陈永浩^{1,2}, 唐生达^{1,2,3}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京, 100049
2. 散裂中子源科学中心, 东莞, 523803
3. 中山大学中法核工程与技术学院, 珠海, 519082

第九届白光用户研讨会 中国·安徽·六安 2025.7.22-25

目 录

研 究 背 景

开 展 实 验

阶 段 进 展

小 结 展 望



NRTA技术

中子共振透射分析（Neutron Resonance Transmission Analysis, NRTA）方法是基于穿过样品的透射中子，结合不同元素/核素独有的特征，来对样品进行定性和定量分析的无损分析技术。

$$T = N_T \frac{C_{in} - B_{in}}{C_{out} - B_{out}} = e^{-\sigma N_v d} = e^{-[\sum_i N_{vi} d_i \sum_j \sigma_{ij}(E) A_{ij}]}$$

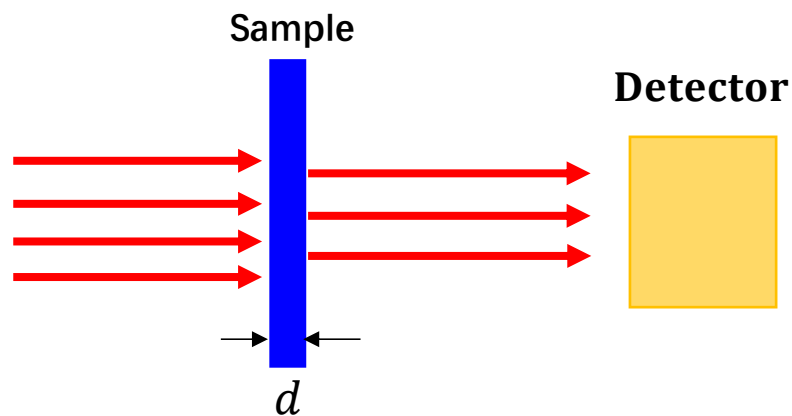
平行入射到均匀介质，穿过样品的透射中子全被探测到且不包括散射中子

T : 透射率 C_{in}, C_{out} : 有样/ 无样反应率计数 d : 样品厚度

B_{in}, B_{out} : 有样/无样中子本底计数 N_T : 中子通量归一因子

$N_v d$: 单位面积的靶核数 σ : 考虑多普勒展宽的中子全截面

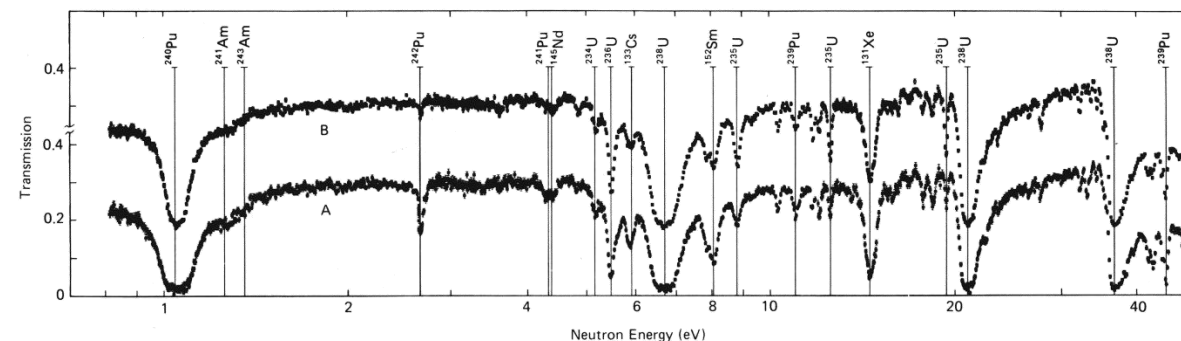
i : 元素 i j : 同位素 j A_{ij} : 元素 i 中各同位素的丰度



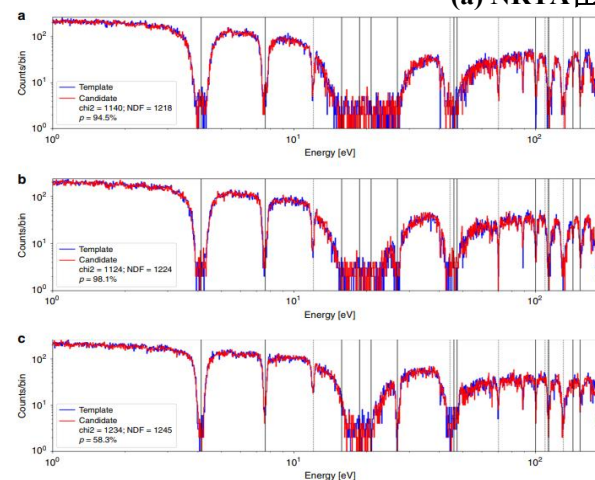
- 核素的共振特征具有“**指纹**”效应，可根据此特性分析核素的成分和含量。
- NRTA具有**无损**、**对样品要求相对较低**等特点，在**成像**、**核数据测量**、**材料成分分析**、**测温**等领域有广泛应用。

NRTA应用场景

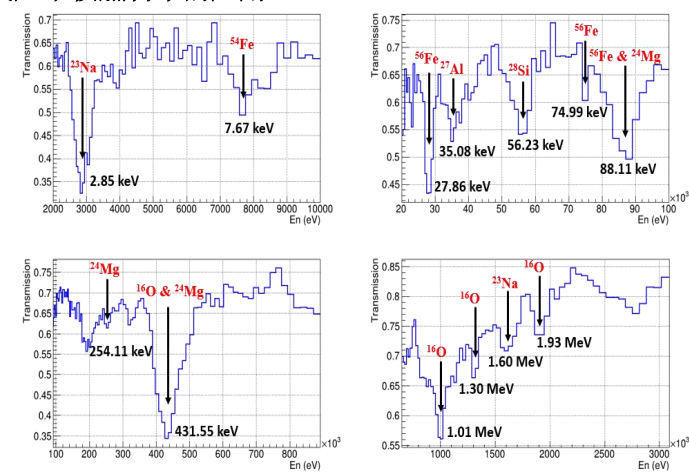
- NRTA方法早期应用于反应堆核燃料中的铀、钚同位素及其他共振产物（例如Tc、 ^{133}Cs 、 ^{145}Nd 、 ^{152}Sm ）的定量分析中，取得了重要成果。
- 早期以欧盟联合研究中心（JRC Geel）为代表的白光中子装置（GELINA），基于NRTA方法，在核工业、核安全，考古等领域开展了深入研究。
- Back-n作为我国的第一台高性能白光中子源，其通量高、中子能量范围宽、能量分辨优等特点为NRTA技术的研究提供了良好的平台。



(a) NRTA在反应堆核燃料中的应用



(b) NRTA在国防中的应用



(c) NRTA在科技考古中的应用

- (a) -James W. Behrens, Ronald G. Johnson & Roald A. Schrack (1984) Neutron Resonance Transmission Analysis of Reactor Fuel Samples, Nuclear Technology, 67:1, 162-168
- (b) -Engel, E.M., Danagouliau, A. A physically cryptographic warhead verification system using neutron induced nuclear resonances. Nat Commun 10, 4433 (2019).
- (c) -Tang, SD., Chen, YH., Tang, JY. *et al.* Nondestructive technique for identifying nuclides using neutron resonance transmission analysis at CSNS Back-n. NUCL SCI TECH 35, 17 (2024).

- 基于模拟月壤、南海文物开展了NRTA定性分析。
- 选择厚度均匀/非均匀厚度的天然银样品开展定量研究。
- 样品放置在ES#1，探测器（FIXM）放置ES#2开展实验测量。



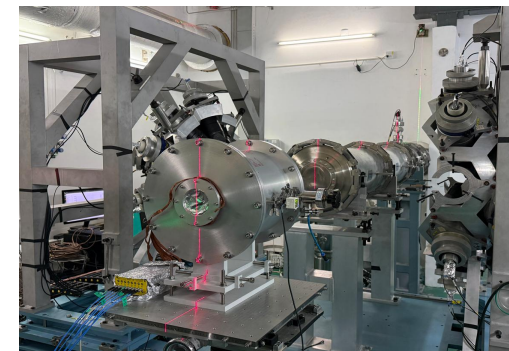
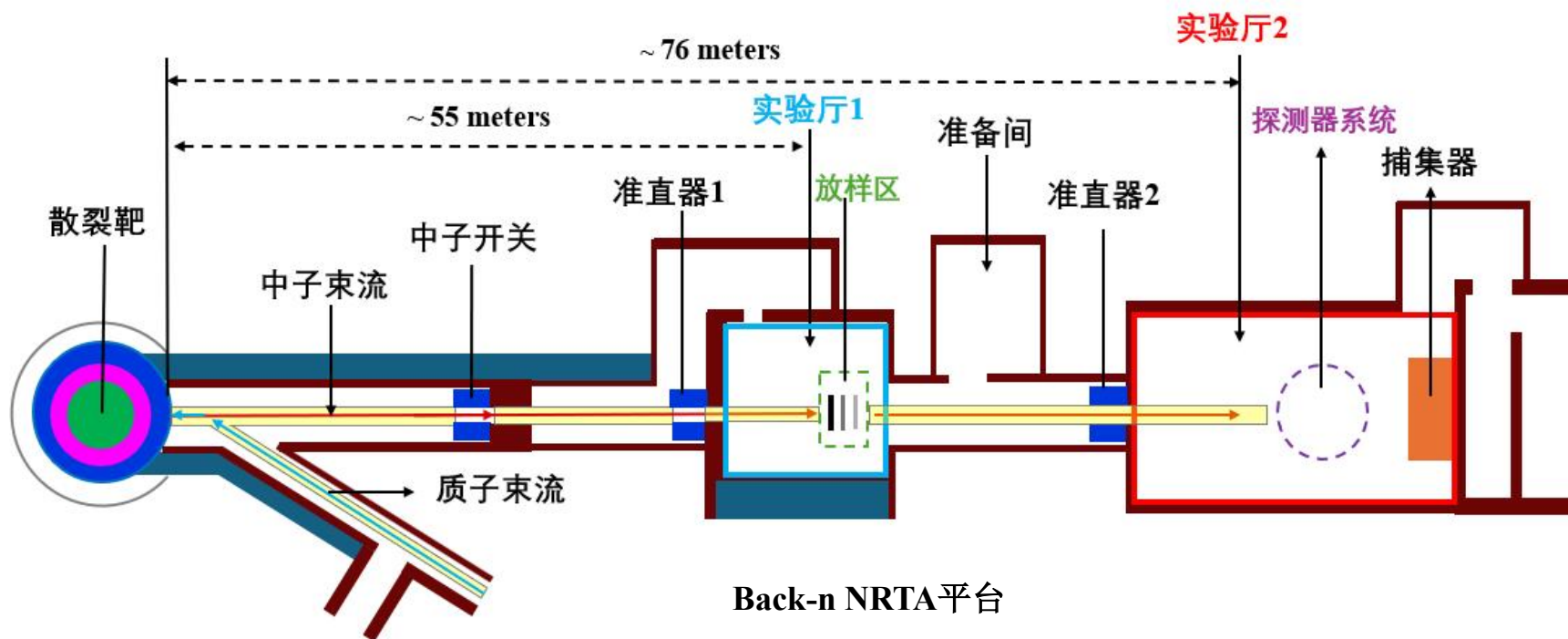
南海文物



模拟月壤



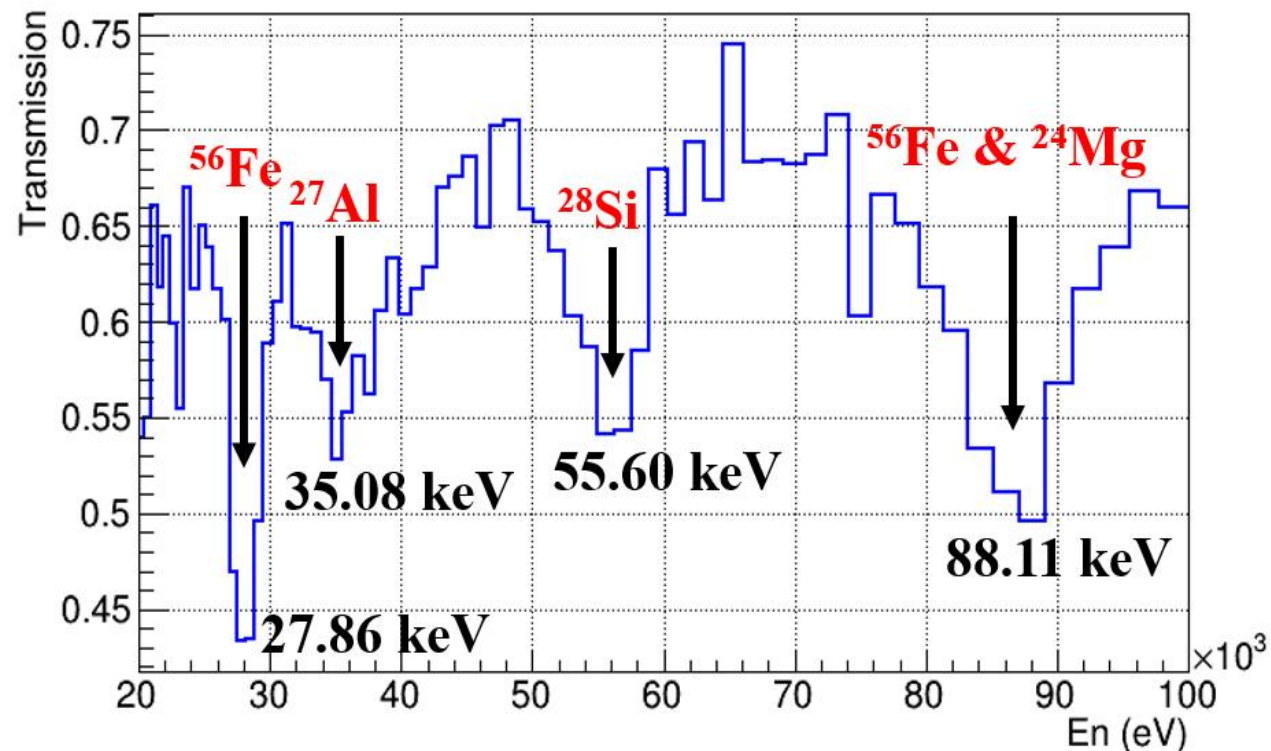
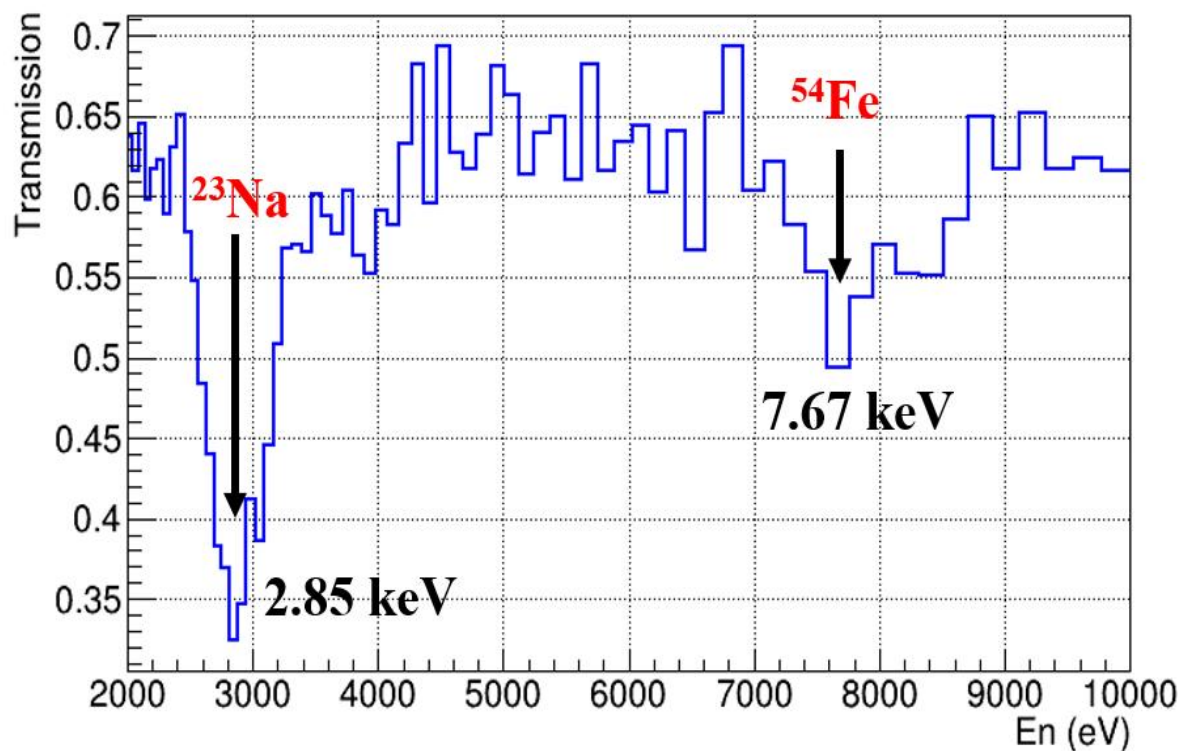
银样品 均匀厚度（左）/非均匀厚度（右）



探测器配置 - ES#2

定性分析-模拟月壤

< 100 keV模拟月壤中子透射率谱

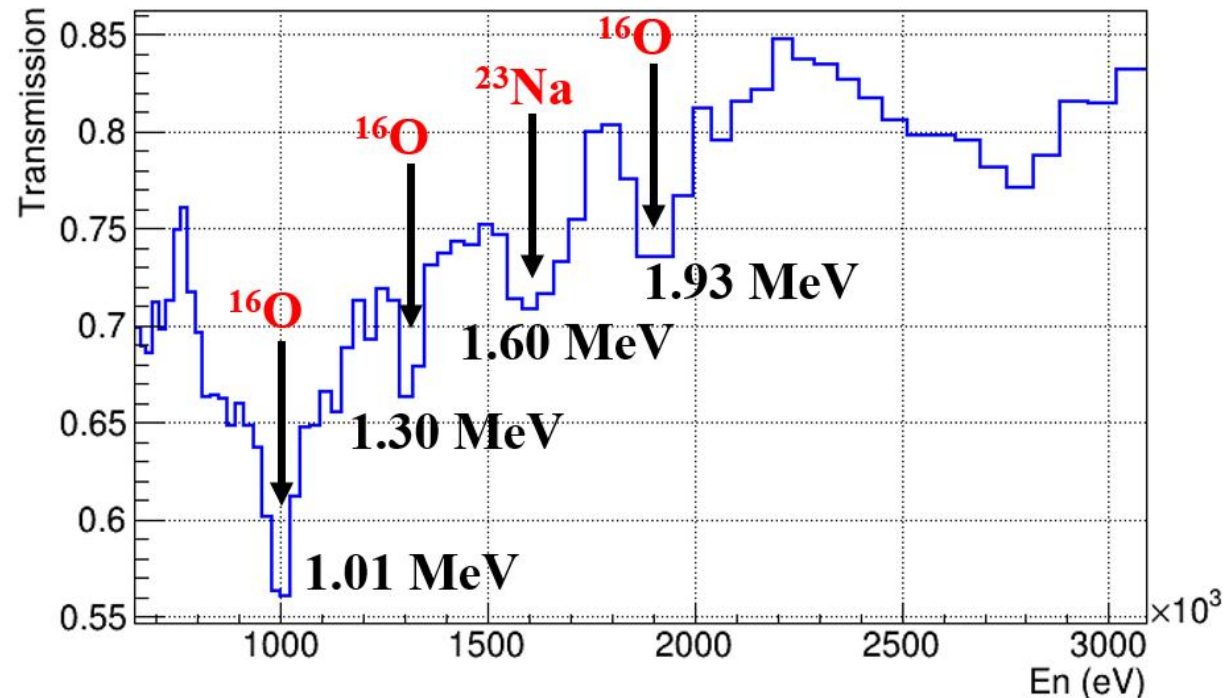
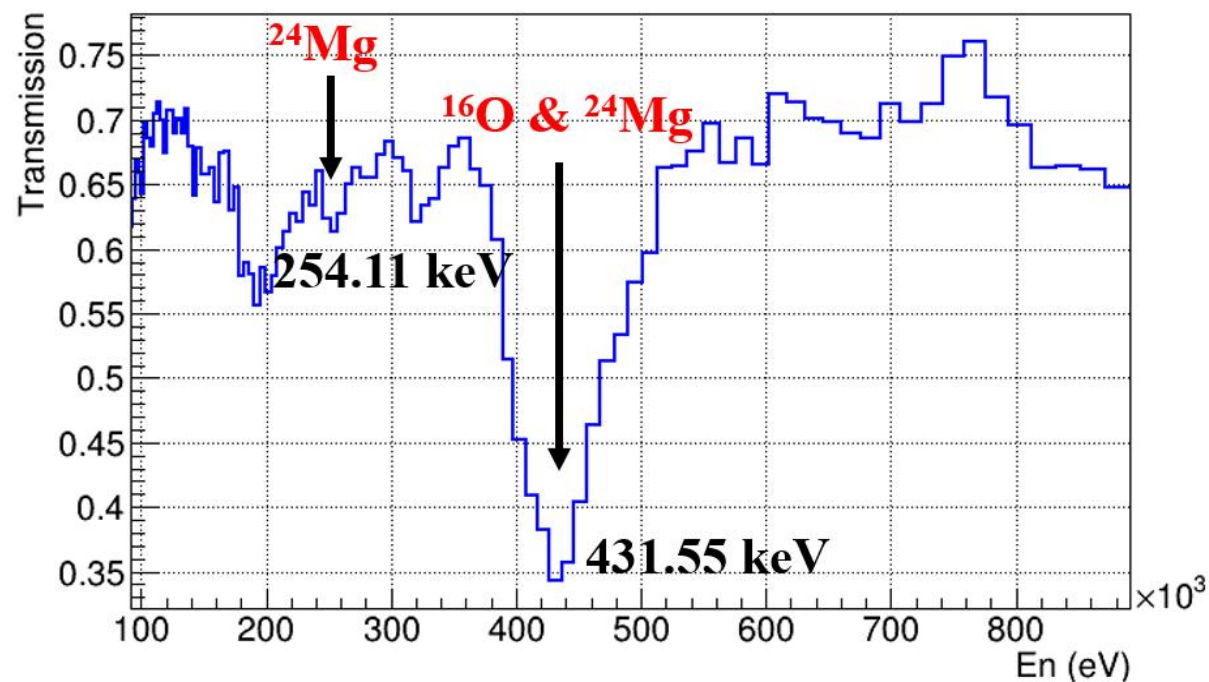


模拟月壤样品中的 Na 、 Mg 、 Fe 、 Al 、 Si 对应的同位素特征在100 keV以下能区清晰可见。



定性分析-模拟月壤

> 100 keV能区模拟月壤中子透射率谱

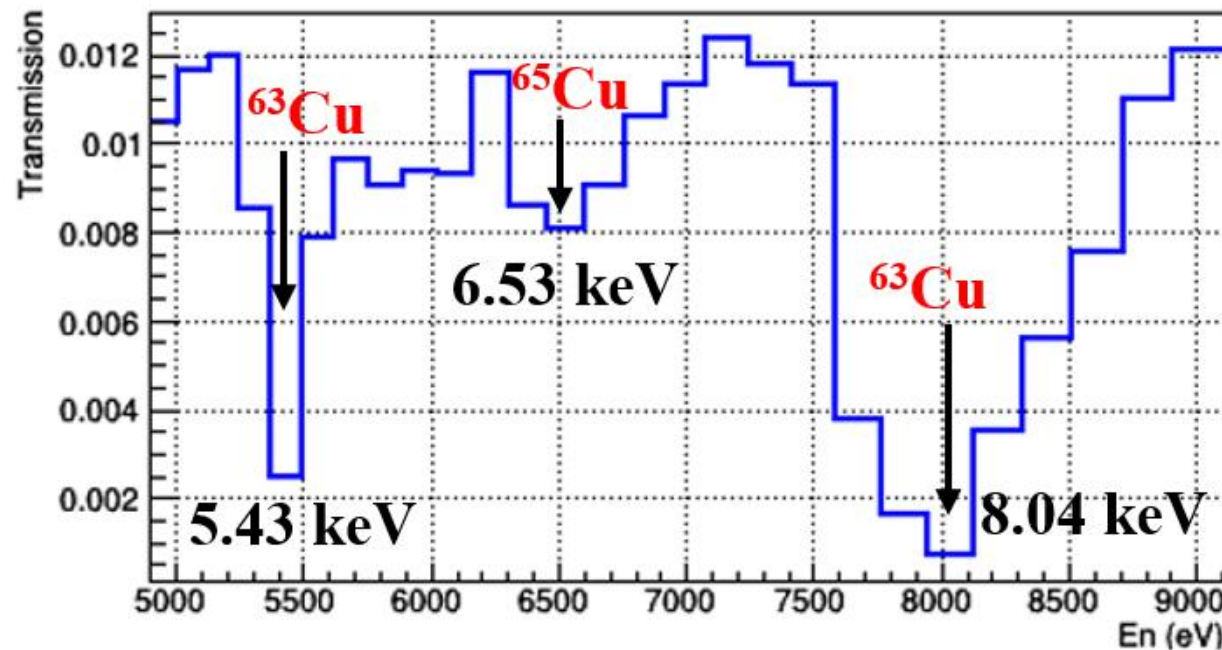
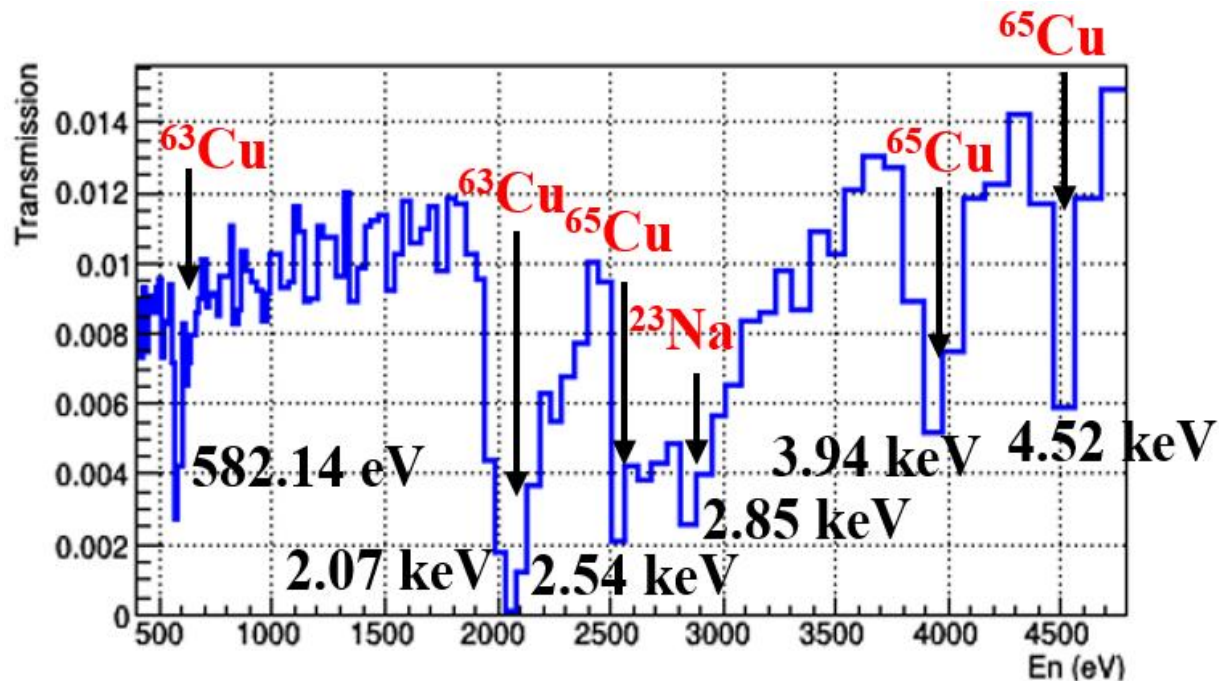


在更高能区（>100 keV），除了 ^{24}Mg 、 ^{23}Na 的共振结构外， ^{16}O 的共振吸收特征也清晰可见。



定性分析-南海文物

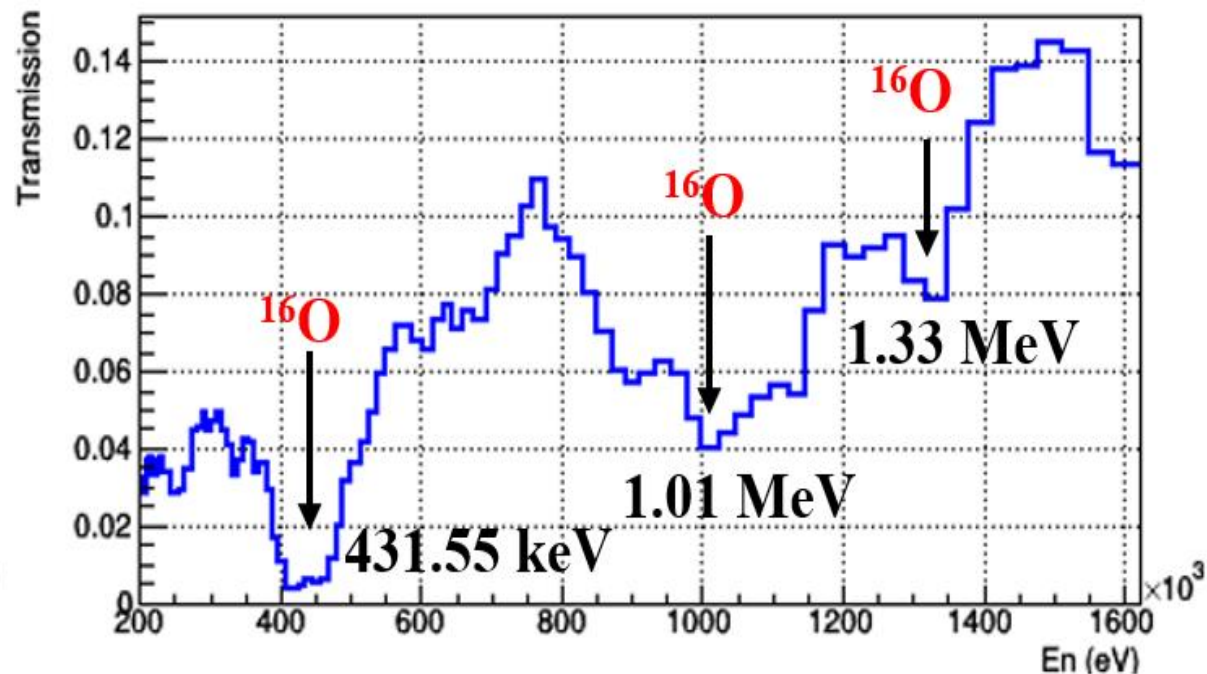
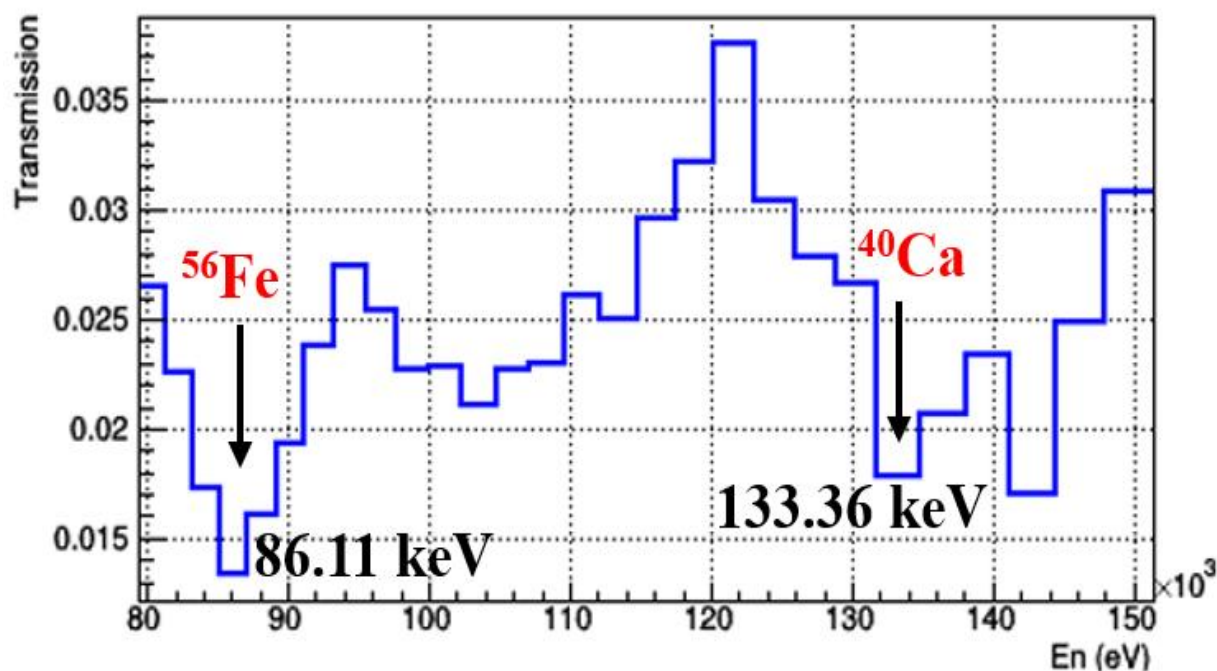
< 10 keV南海文物中子透射率谱



10 keV以下能区存在诸多 ^{63}Cu 、 ^{65}Cu 同位素共振吸收谷，对应于南海文物中的古铜钱币。

定性分析-南海文物

> 50 keV南海文物中子透射率谱

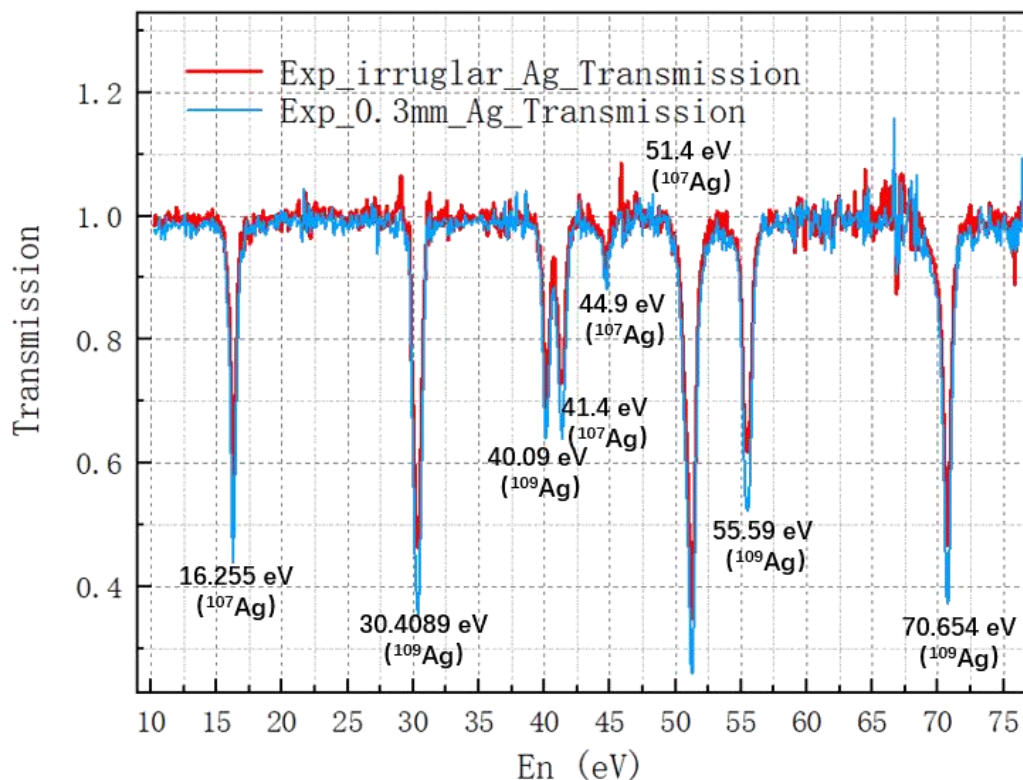


> 50 keV能区，能够看到⁵⁶Fe、⁴⁰Ca、¹⁶O核素的共振吸收谷，这对应于南海文物样品中的部分氧化沉积物（如铁氧化物、钙碳酸盐）。

阶段进展

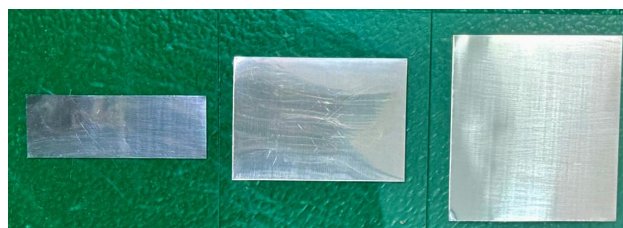
定量分析-天然银

天然银样品含有 ^{107}Ag 、 ^{109}Ag 两种同位素，且低能区中子共振特征明显，重叠少，是开展NRTA定量研究的理想样品，基于均匀/非均匀厚度场景开展了实验研究。

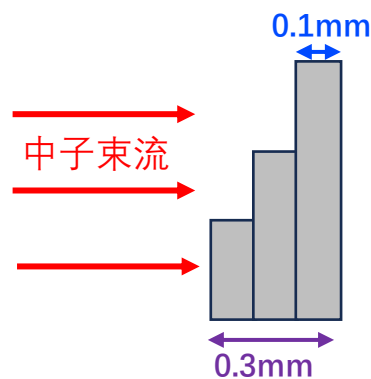


均匀/非均匀厚度的中子透射率

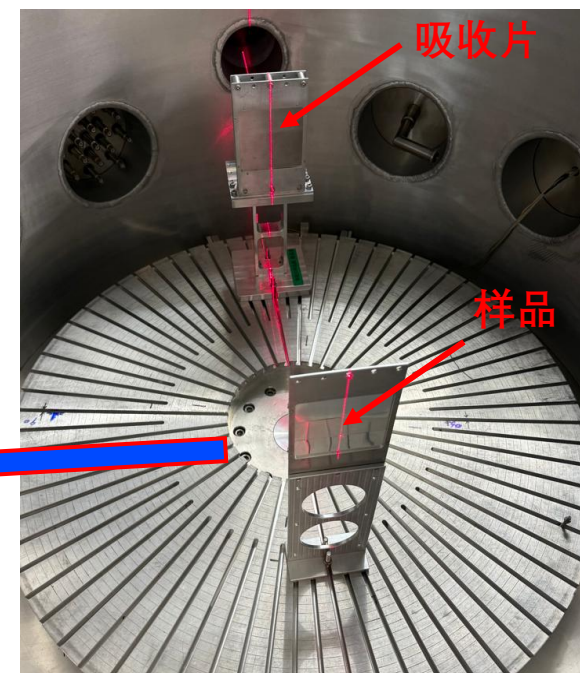
中子本底吸收片: 1mm 钴、0.2mm 金
准直器配置: $\phi 50\ 50\ 58\ \text{mm}$
束流功率: 170 kW, 频率: 25 Hz
样品: 0.3mm 银、非均匀厚度银样品
探测器: 多层裂变电离室 FIXM



非均匀厚度天然银样品组成



非均匀厚度天然银样品示意图
(侧视图)

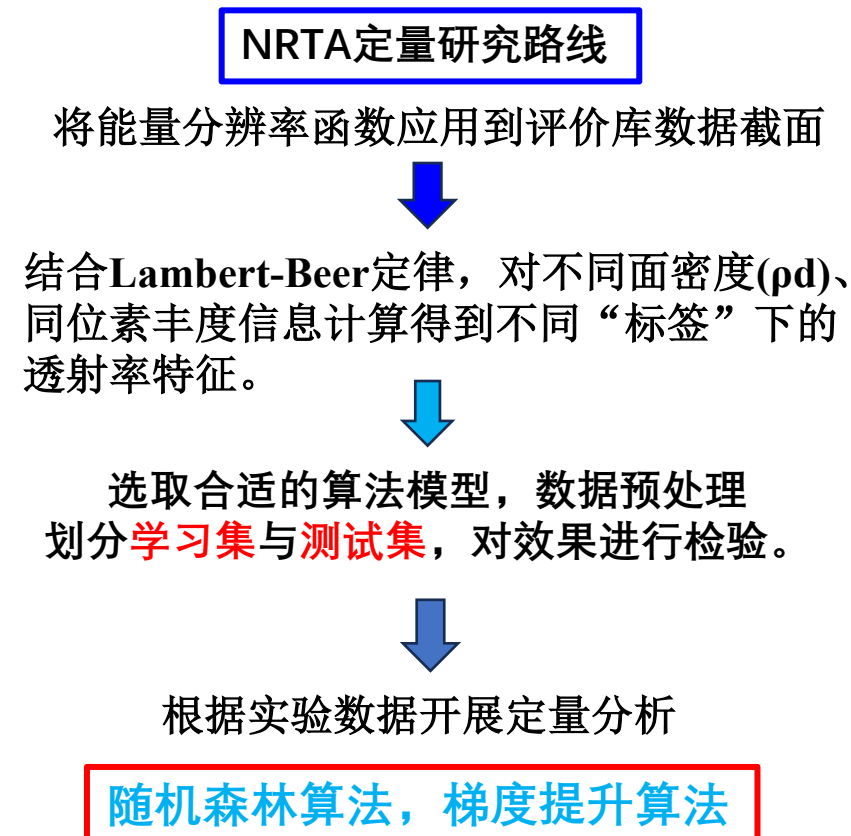
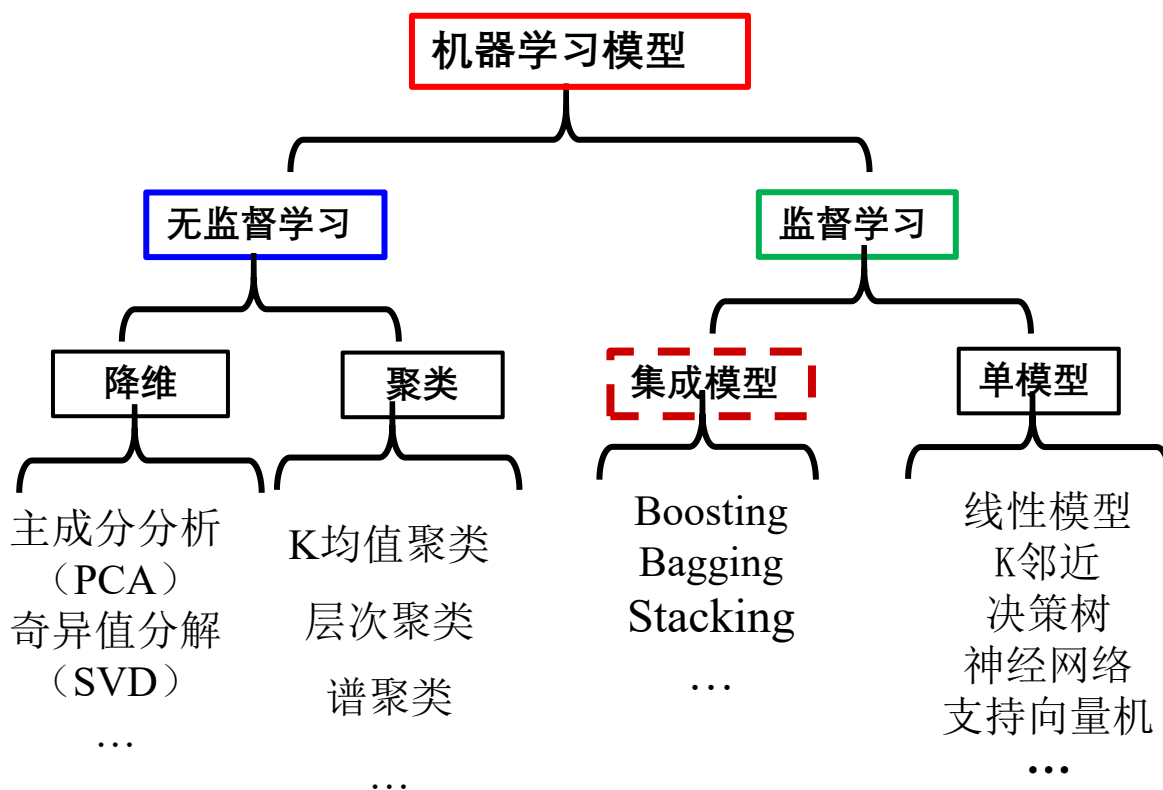


实验样品配置
(非均匀厚度天然银)

阶段进展

结合机器学习方法开展NRTA定量

- NRTA定量分析可被视为“回归”场景，机器学习作为流行的数据处理方式或可为NRTA提供新思路。
- 传统机器学习模型涵盖了多种简单模型，适合对小样本数据进行学习和预测。



随机森林算法模型

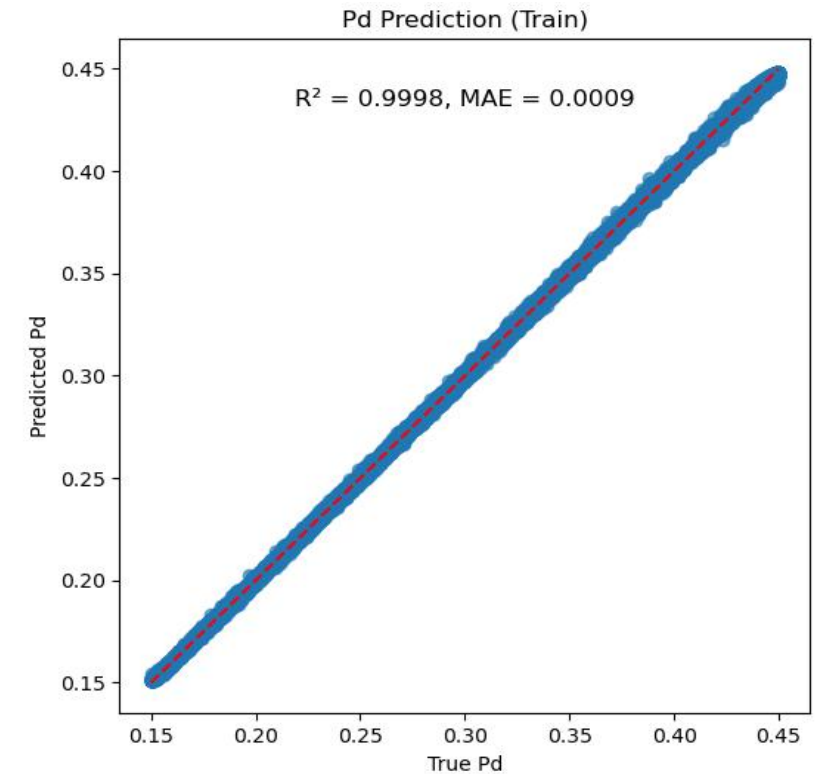
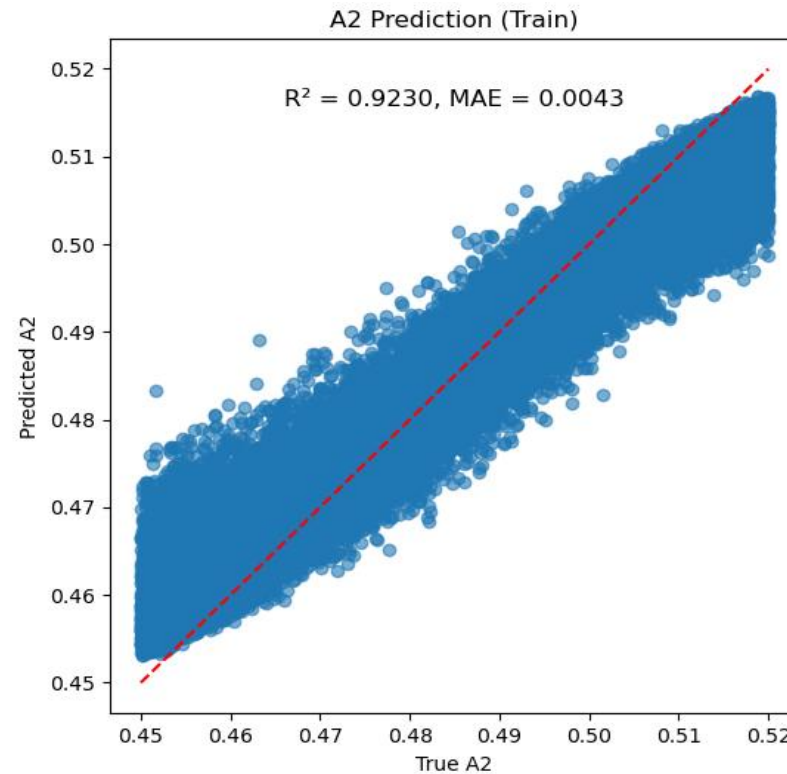
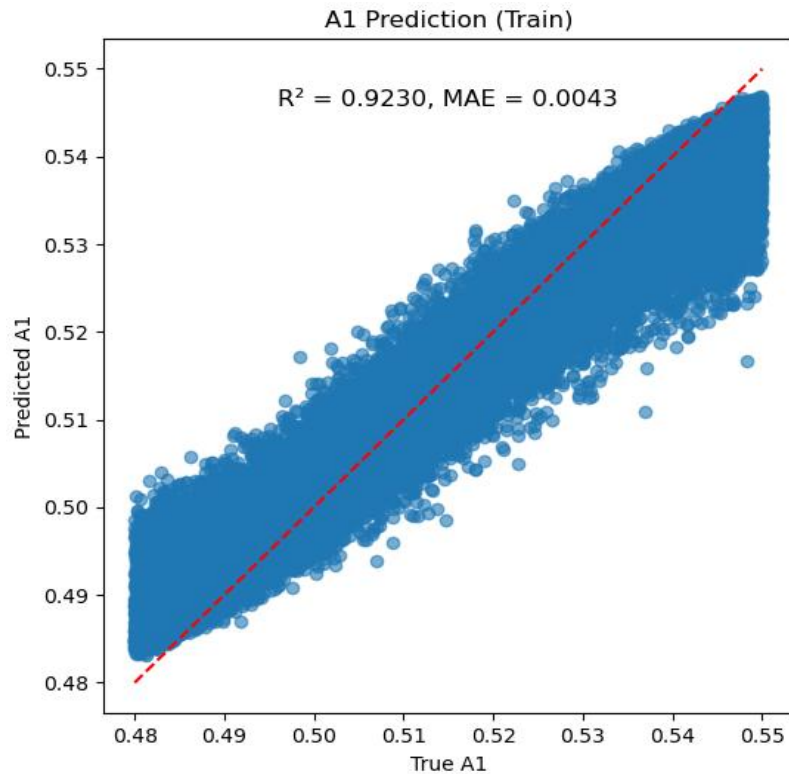
采用五折交叉检验来评估模型的学习与泛化能力

交叉验证指标:

A1 (Ag-107丰度): $MAE=0.0059, R^2=0.8641$

A2 (Ag-109丰度): $MAE=0.0059, R^2=0.8641$

Pd(面密度) $MAE=0.0015, R^2=0.9995$



基于随机森林算法模型，在学习集上的表现

梯度提升算法模型

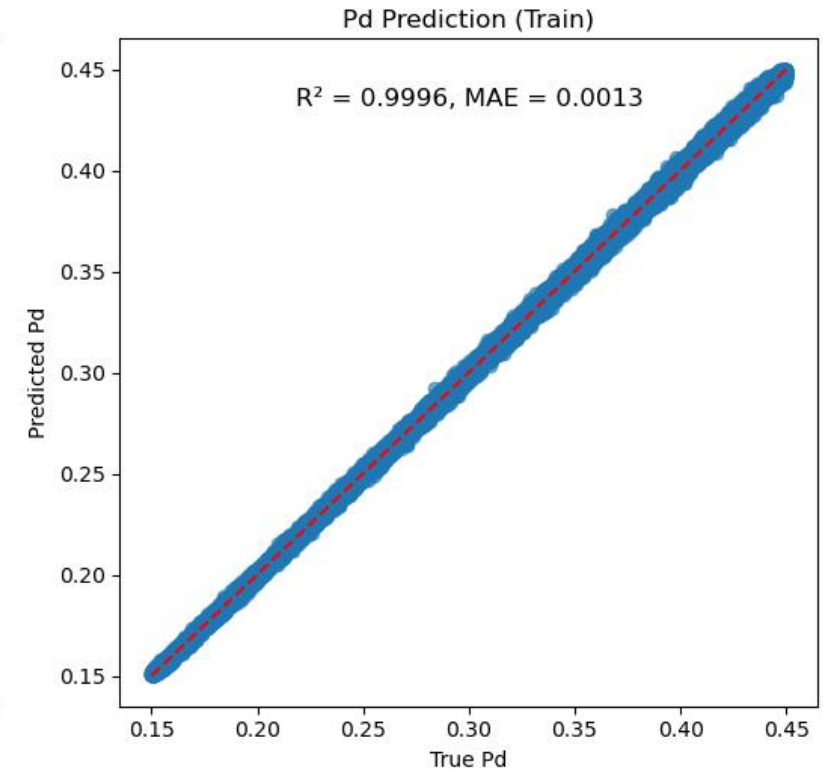
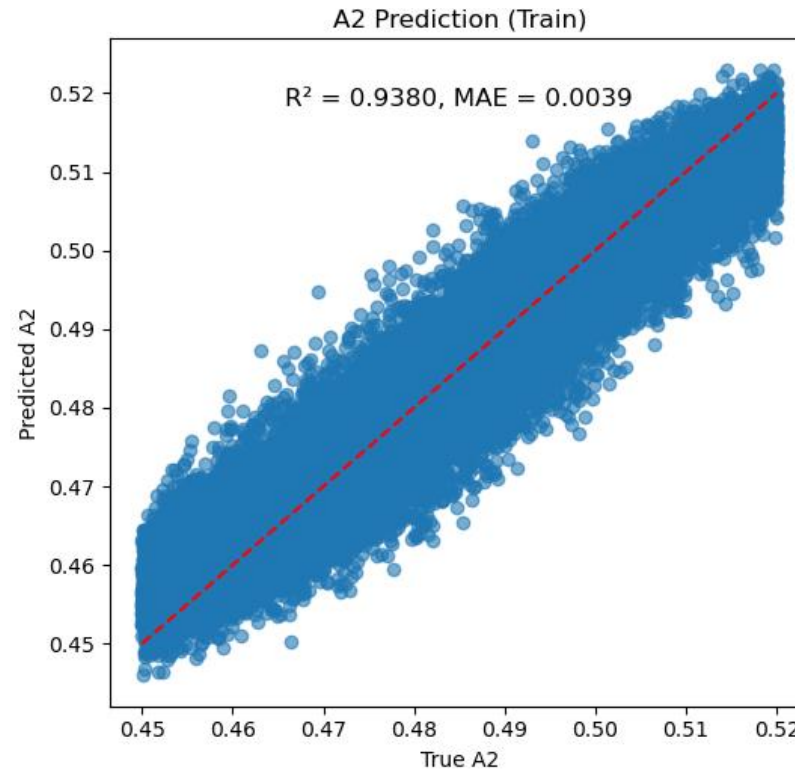
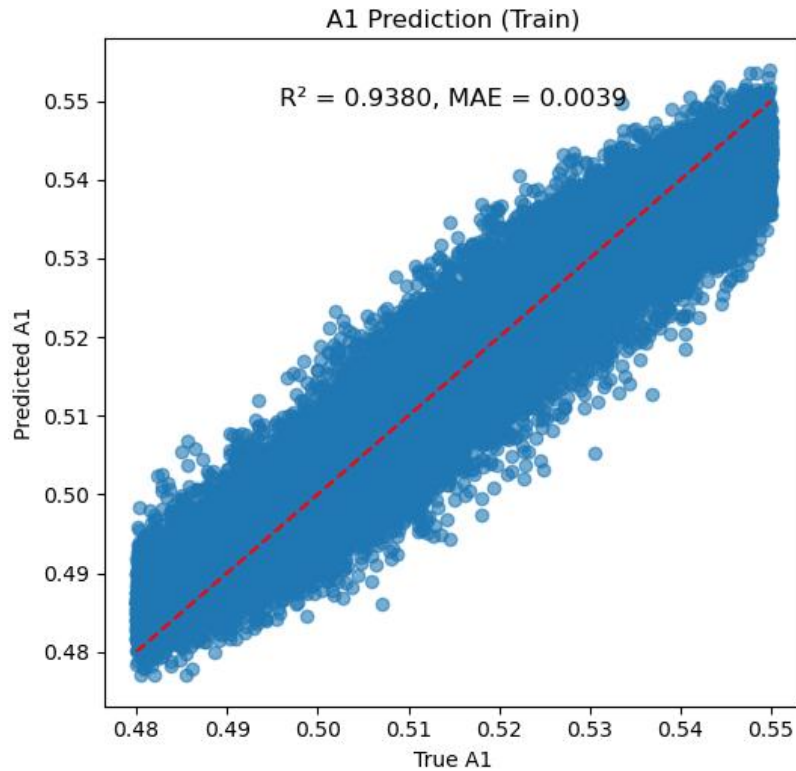
同样采用五折交叉检验来评估模型的学习与泛化能力。

交叉验证指标:

A1 (Ag-107丰度): $MAE=0.0043, R^2=0.9259$

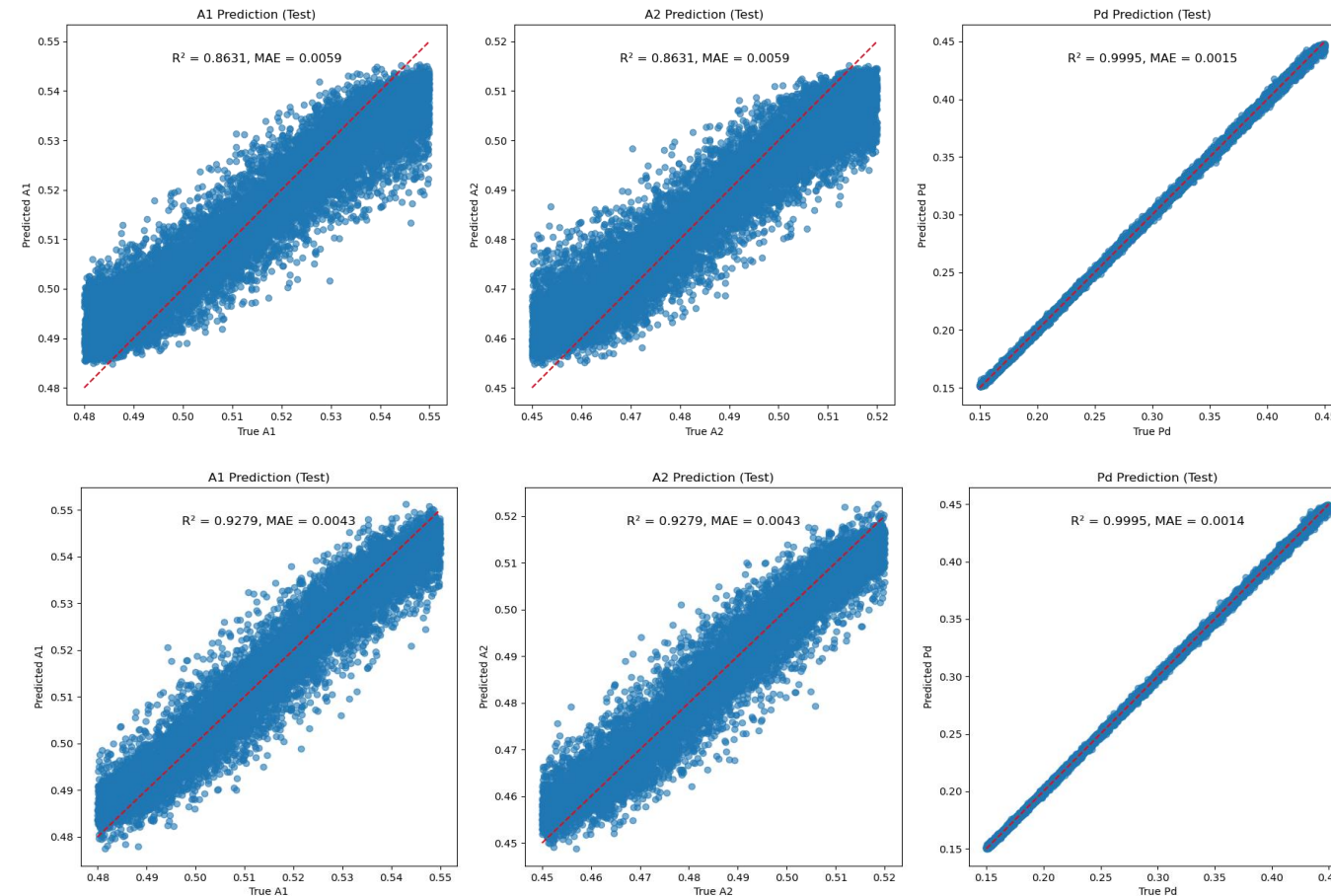
A2 (Ag-109丰度): $MAE=0.0043, R^2=0.9259$

Pd(面密度) $MAE=0.0014, R^2=0.9995$



基于梯度提示算法模型，在学习集上的预测表现

结合不同算法模型分析实验数据



两种模型各自在测试集上的预测表现（上：随机森林模型，下：梯度提升模型）

均匀场景下的定量预测结果

待分析参数	A1: ¹⁰⁷ Ag丰度(%)	面密度 (g/cm ²)
参考值	51.84	0.3184
随机森林	50.04 (Diff: 3.6%)	0.285 (Diff: 11.7%)
梯度提升	50.3 (Diff: 3%)	0.286 (Diff: 11.2%)

非均匀场景下的定量预测结果

待分析参数	A1: ¹⁰⁷ Ag丰度(%)	面密度 (g/cm ²)
参考值	51.84	0.2408
随机森林	51.39 (Diff: 0.85%)	0.212 (Diff: 12.1%)
梯度提升	50.62 (Diff: 2.4%)	0.217 (Diff: 10.96%)

利用测试集数据验证模型预测可靠性，进一步将实验数据作为分析对象，结合两种模型开展测试，结果表明:丰度偏差<5%，面密度偏差相对较大（~11%），初步分析和截面本身的准确度有关。

小结展望

小结

- 基于Back-n分别开展南海文物、模拟月壤的定性分析研究，样品中的主要核素共振吸收特征清晰可见，体现了Back-n开展NRTA研究的特有潜力。
- 选择成分简单的天然银样品，结合机器学习方式开展了NRTA定量分析研究，现有面密度预测结果误差较大，均匀/不均匀厚度场景下的误差均在~11%水平，这可能和截面本身的精度有关。

展望

- 截面本身的精度是限制NRTA定量分析的主要因素之一，准确的NRTA定量分析工作离不开高质量的中子核数据，未来需进一步提高天然银中子全截面的精度。
- 针对现有场景，还可以尝试用更多的机器学习方法或深度学习框架开展定量分析，来交叉验证定量分析的精度和可信度。

谢谢大家！

