

CSNS反角白光中子源用户研讨会

NRCA技术在清代古钱币 分析中的应用



安振东 高功率靶室
中国科学院 近代物理研究所



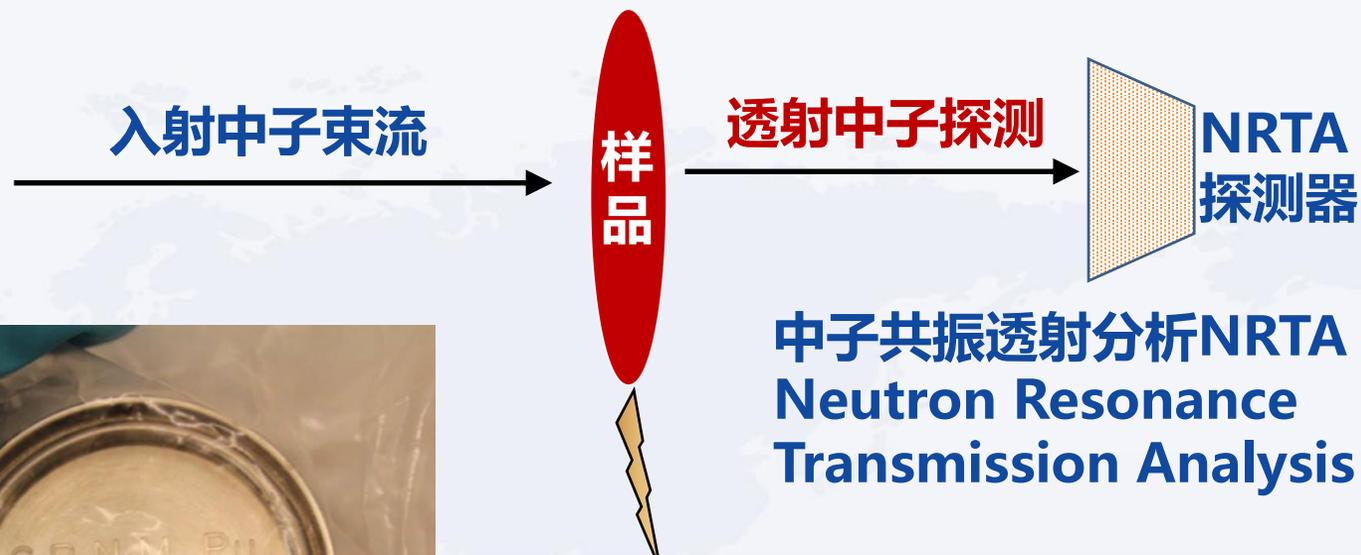


目录

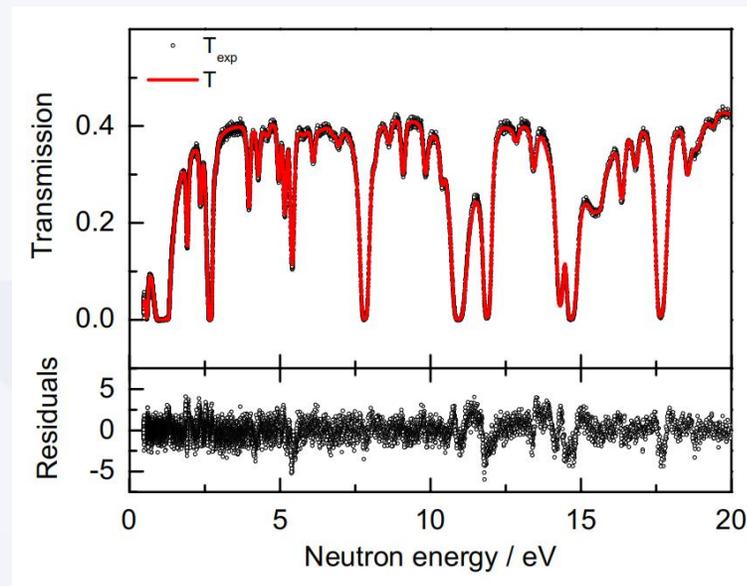
CONTENTS

- ❖ 中子共振分析NRA基本原理与应用
 - NRTA与NRCA原理
 - 科技考古应用：古笛、古剑、铜斧、古钱币
- ❖ 清朝古钱币成分分析实验@CSNS Back-n
 - 黄铜合金钱币主量元素：Cu、Zn, Sn
 - 青铜合金钱币主量元素：Cu、Sn
 - 微量元素：青铜与黄铜钱币比较
- ❖ NRCA在科技考古中的定量方法研究
 - 标样 $K_{\mu,\lambda}$ 的确定与数据分析
 - Cu、Zn, Ag、As、Sb标样数据的分析
- ❖ 下一步的工作计划

❖ 中子共振分析NRA基本原理: NRTA与NRCA无损检测分析

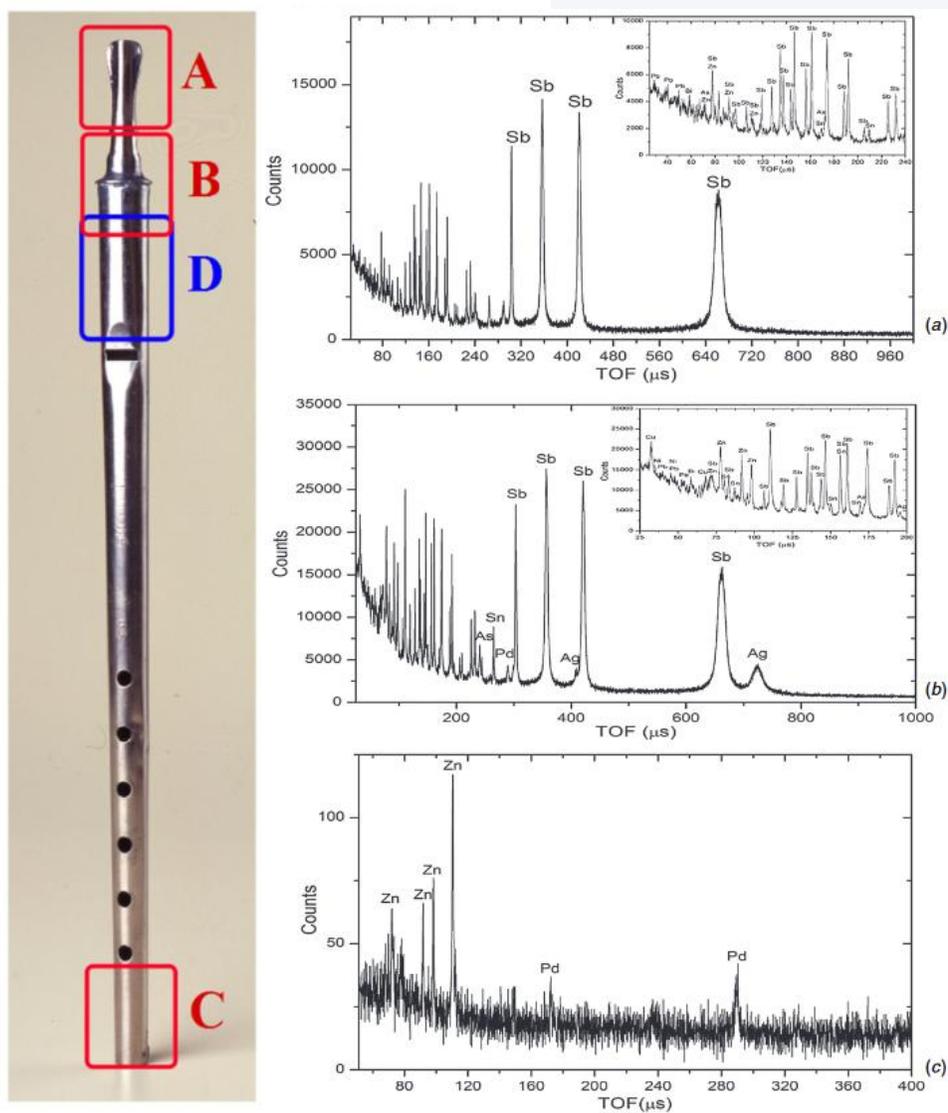


Nuclide	n_{NRTA}	n_{REF}	n_{NRTA}/n_{REF}
^{238}Pu	0.0098 ± 0.0002	0.00952	1.029 ± 0.020
^{239}Pu	0.625 ± 0.001	0.62602	0.999 ± 0.002
^{240}Pu	0.2625 ± 0.0002	0.25272	1.039 ± 0.001
^{241}Pu	0.0157 ± 0.0001	0.01564	1.007 ± 0.006
^{242}Pu	0.0398 ± 0.0001	0.04149	0.960 ± 0.002
^{241}Am	0.0632 ± 0.0001	0.0629	1.005 ± 0.001



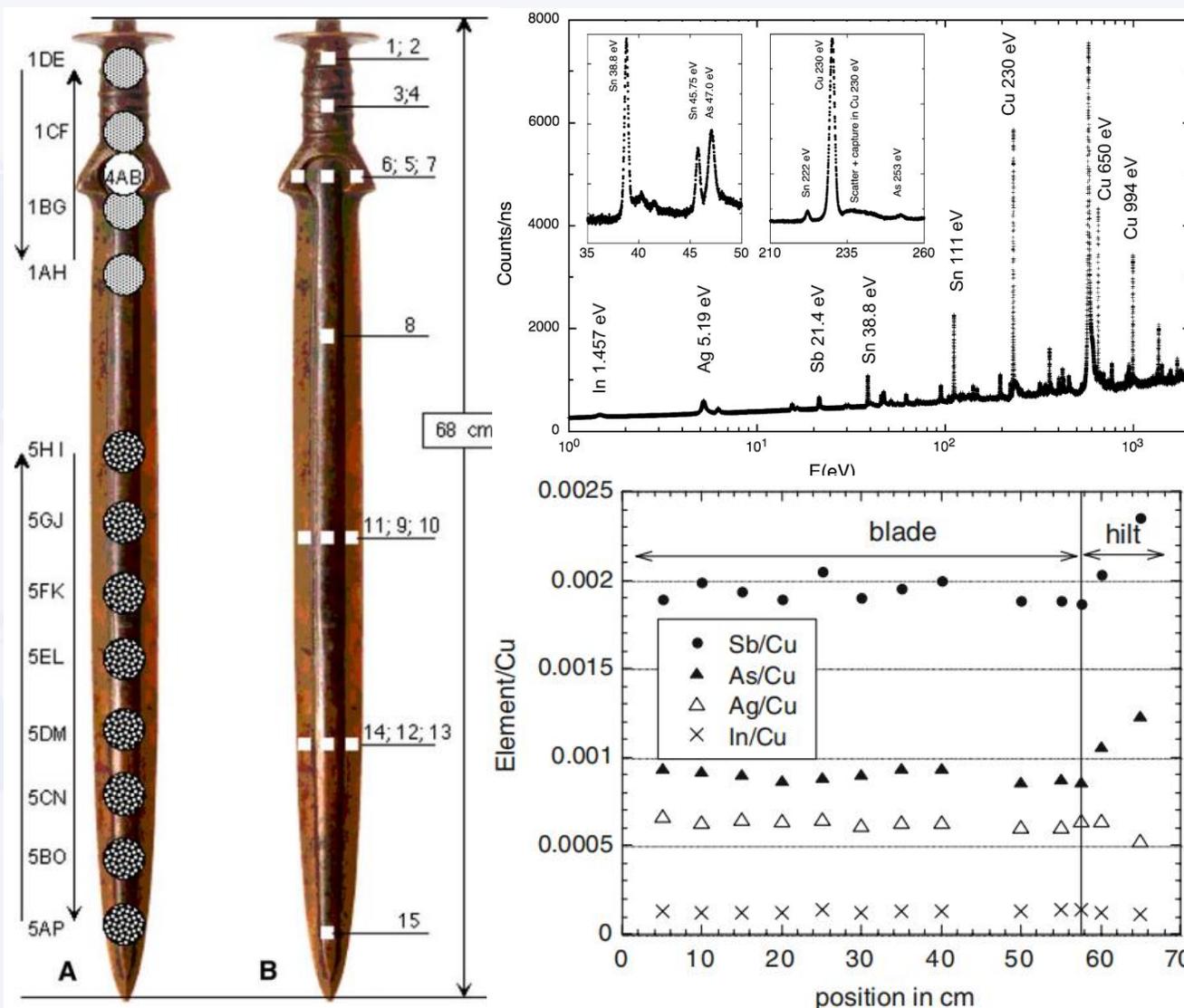
	Sword	Location	Cu	Sn	Sb	As	Ag	In	Co	Zn
C		I	90.58	9.24	0.0156	0.0708	0.0060	< 0.0002	0.0263	< 0.12
1σ as %			0.13	1.3	5.1	4.9	5.0		6.9	
		II	90.62	9.20	0.0159	0.0672	0.0063	< 0.0002	0.0263	< 0.14
1σ as %			0.13	1.3	5.0	5.1	4.8		6.9	
		IV	91.06	8.70	0.0209	0.0612	0.0070	< 0.0002	0.0240	< 0.27
1σ as %			0.13	2.0	5.3	5.1	4.0		7.0	
E		I	89.67	9.65	0.278	0.282	0.022	0.0035	0.0305	< 0.13
1σ as %			0.14	1.2	5.0	5.0	1.5	11	7.2	
		II	90.00	9.31	0.234	0.306	0.022	0.0042	0.0306	0.090
1σ as %			0.13	1.3	5.1	4.9	1.5	10	7.2	6.7
		IV	89.64	10.22	0.0043	< 0.0018	0.00242	0.0005	< 0.0036	0.134
1σ as %			0.13	1.2	4.7		5.4	20		7.5
G		I	86.40	13.41	0.0120	0.0288	0.0088	0.0020	0.0150	0.130
1σ as %			0.17	1.1	5.0	5.2	4.5	10	7.3	6.9
H		I	88.34	11.00	0.140	0.329	0.261	0.0032	0.0760	< 0.18
1σ as %			0.16	1.1	5.0	5.2	5.0	10	7.0	

ISIS facility



元素成分: Pb Zn Sb Ag Sn As Pd

GELINA facility in Geel



Cu Sb As Ag In

Journal of Archaeological Science 38 (2011) 1810–1817

Contents lists available at ScienceDirect



Journal of Archaeological Science

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jas>



The metal compositions of a series of Geistingen-type socketed axes

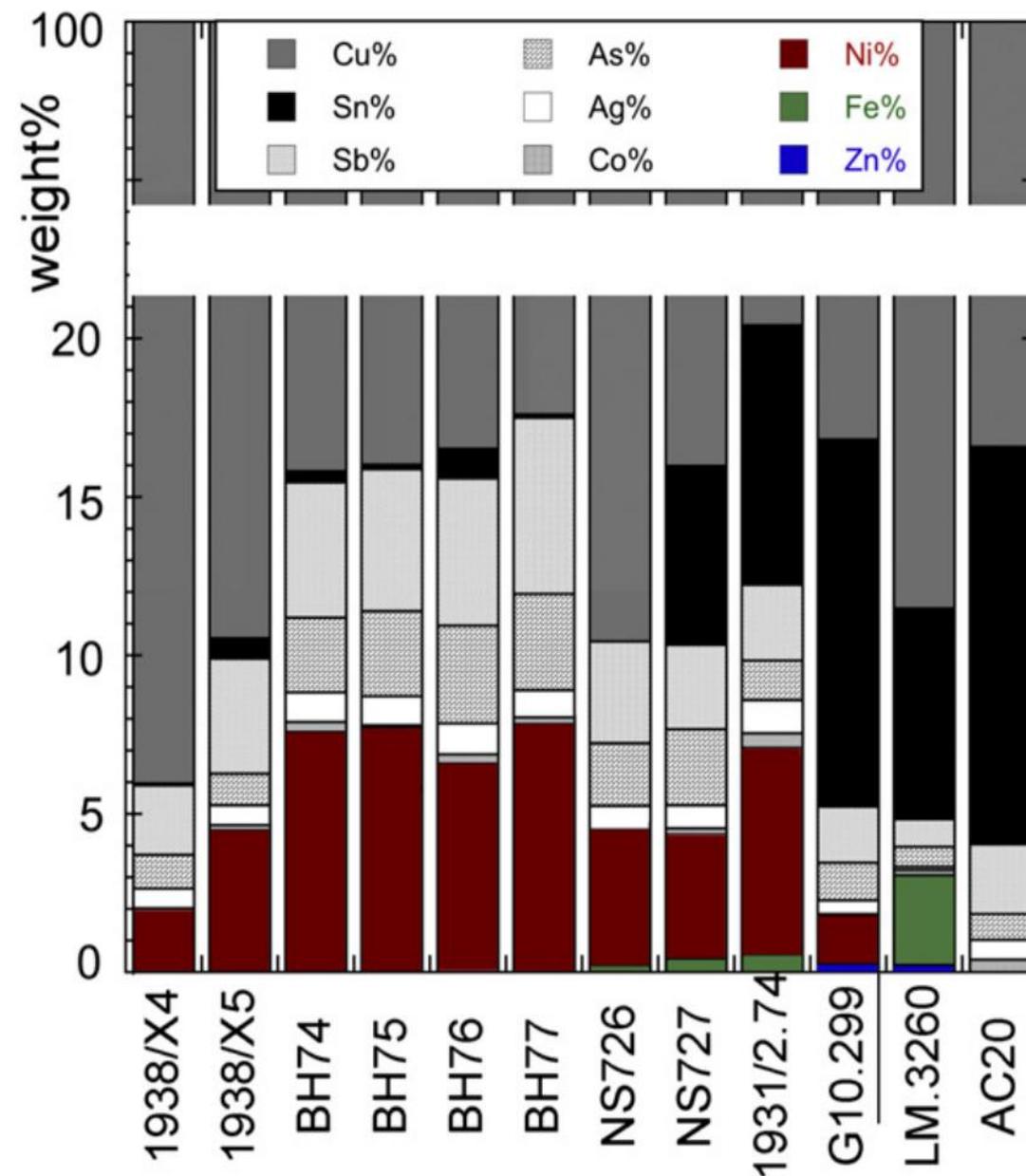
H. Postma^{a,*}, P. Schillebeeckx^b, W. Kockelmann^c



Table 1a
Composition of 12 Geistingen axes in weight%.

Inv. No.	Find spot	Owner	Cu	Sn	Sb	As	Ag	Co	Ni	Fe	Zn	In	Pb
1938/X4	Caberg/Maastricht	GIA	94.04	0.073	2.17	1.07	0.61	0.056	1.97	<0.07	<0.26	2e-4	<2.5
1938/X5	Caberg/Maastricht	GIA	89.46	0.644	3.62	1.00	0.62	0.179	4.47	<0.08	<0.15	15e-4	<1.8
BH74	Geistingen hoard	GRM	84.19	0.354	4.27	2.36	0.93	0.328	7.58	<0.18	<0.26	13e-4	<1.8
BH75	Geistingen hoard	GRM	83.98	0.143	4.47	2.69	0.92	0.067	7.73	<0.30	<0.11	<2e-4	cnbd
BH76	Geistingen hoard	GRM	83.46	0.943	4.65	3.09	0.97	0.292	6.59	<0.13	<0.26	14e-4	cnbd
BH77	Geistingen hoard	GRM	82.38	0.124	5.54	3.05	0.86	0.222	7.83	<0.20	<0.60	7e-4	<1.8
NS726	Kleve 1	NMA	89.57	<0.15	3.21	1.97	0.74	<0.06	4.30	0.22	<0.13	10e-4	<1.8
NS727	Kleve 2	NMA	84.02	5.65	2.66	2.39	0.73	0.185	3.95	0.43	<0.21	13e-4	<1.8
1931/2.74	Nijmegen	NMA	79.58	8.20	2.40	1.24	1.03	0.462	6.53	0.64	<0.21	18e-4	<3.0
G10.299	Herten/Roermond	LM	83.19	11.58	1.76	1.19	0.42	0.075	1.50	<0.09	0.28	15e-4	cnbd
LM.3260	Herten/Roermond	LM	88.53	6.64	0.87	0.62	0.11	0.186	<0.90	3.0	0.21	13e-4	cnbd
AC-20	Ubbergen	MhV	83.42	12.53	2.21	0.82	0.61	0.409	<2.5	<0.35	<0.26	33e-4	cnbd

NMA: National Museum of Antiquities (Leiden, NL), GIA: Groningen Institute of Archaeology (Groningen, NL), LM: Limburg Museum (Venlo, NL), GRM: Gallo-Roman Museum (Tongeren, Be), MhV: Museum het Valkhof (Nijmegen, NL), cnbd = could not be detected.





ELSEVIER

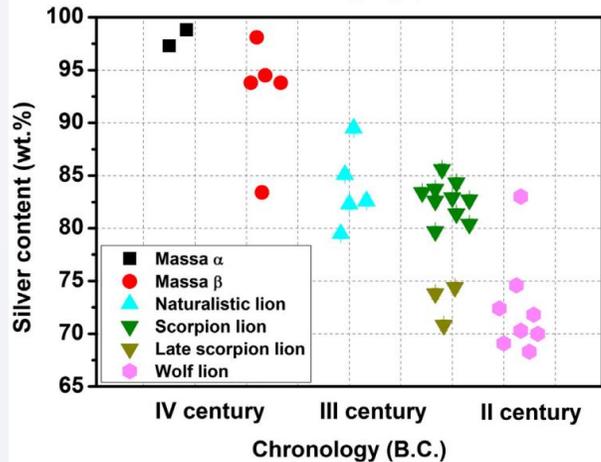
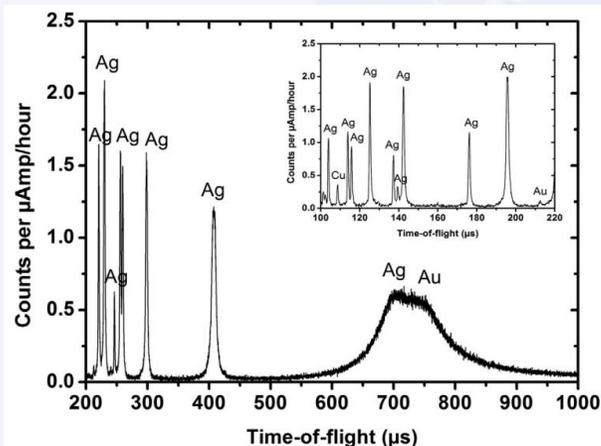
Contents lists available at ScienceDirect

Microchemical Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/microc



Compositional and microstructural characterization of Celtic silver coins from northern Italy using neutron diffraction analysis☆

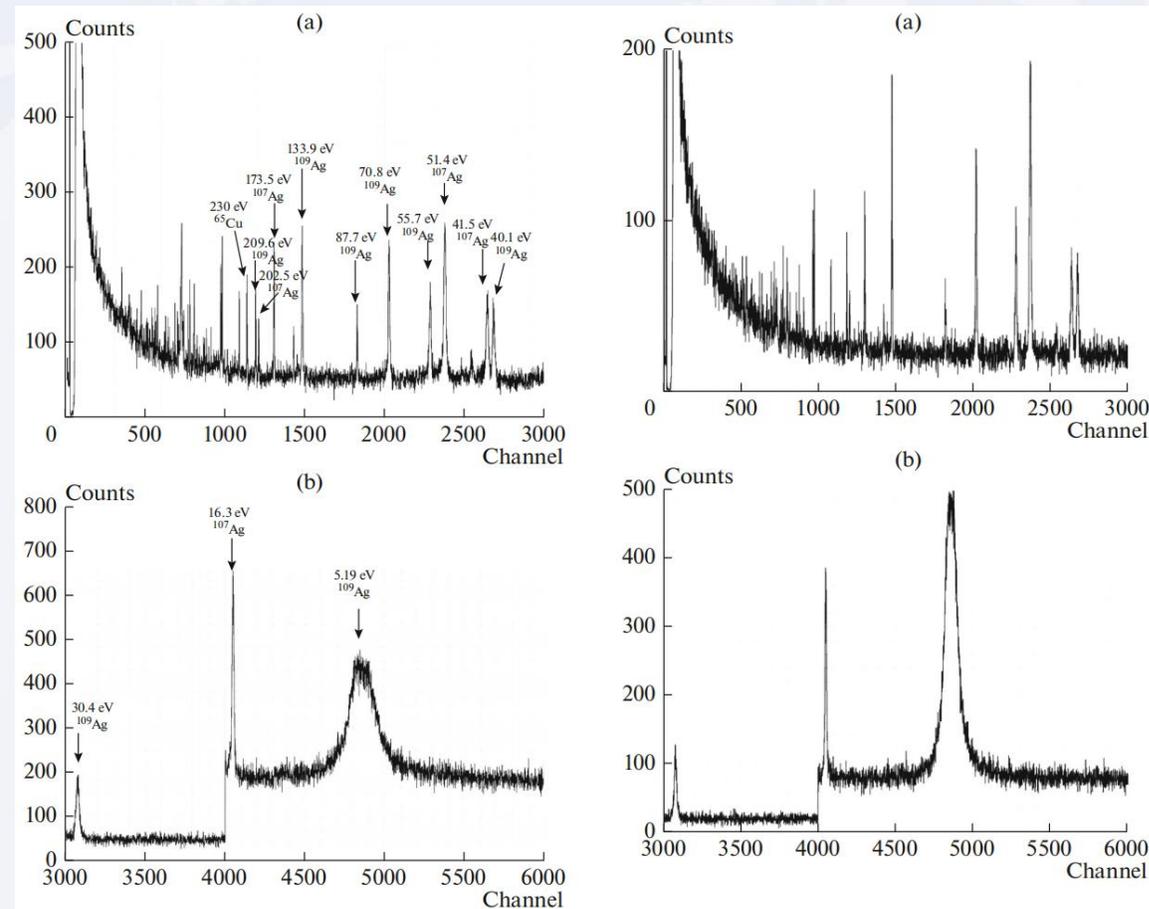


ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 389–400. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020. Russian Text © The Author(s), 2020, published in Pis'ma v Zhurnal Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra, 2020.

NEUTRON
PHYSICS

Determining the Elemental Composition of Antique Coins of Phanagorian Treasure by Neutron Spectroscopy at the Pulsed Neutron Source IREN in FLNP JINR

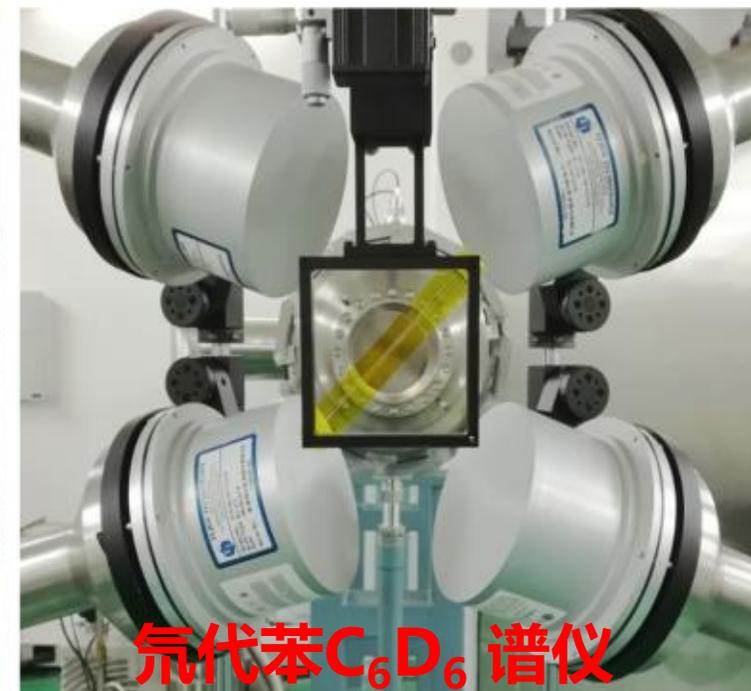
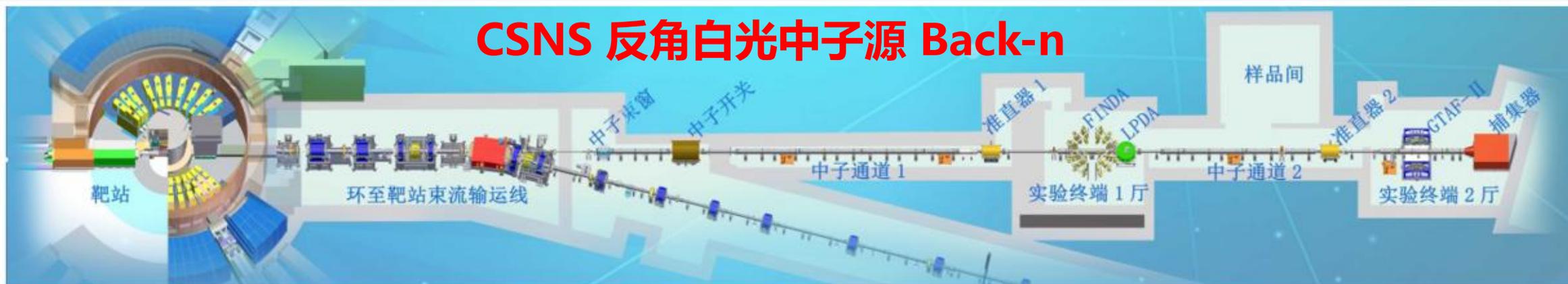
P. V. Sedyshev^a, N. V. Simbirtseva^{a, b, *}, A. M. Yergashov^{a, b}, S. T. Mazhen^{a, b}, Yu. D. Mareev^a, V. N. Shvetsov^a, M. G. Abramzon^c, and I. A. Saprykina^d



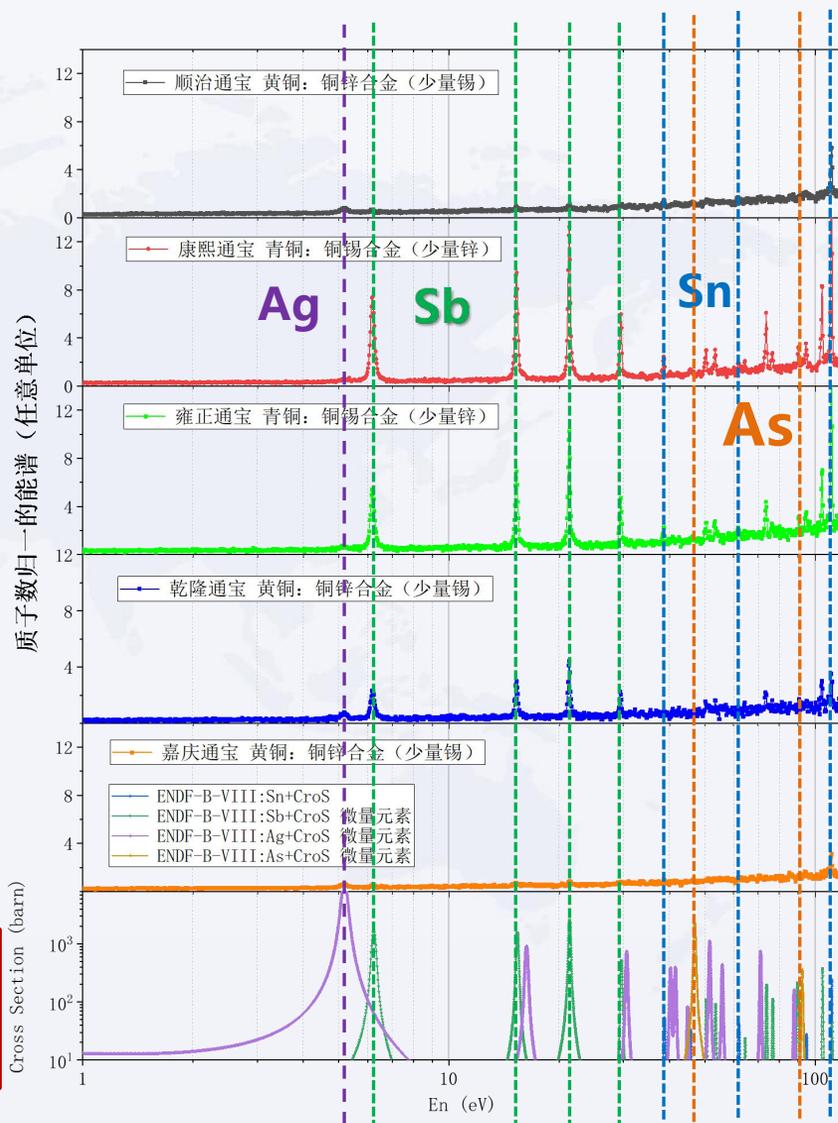
2

清朝古钱币成分NRCA分析

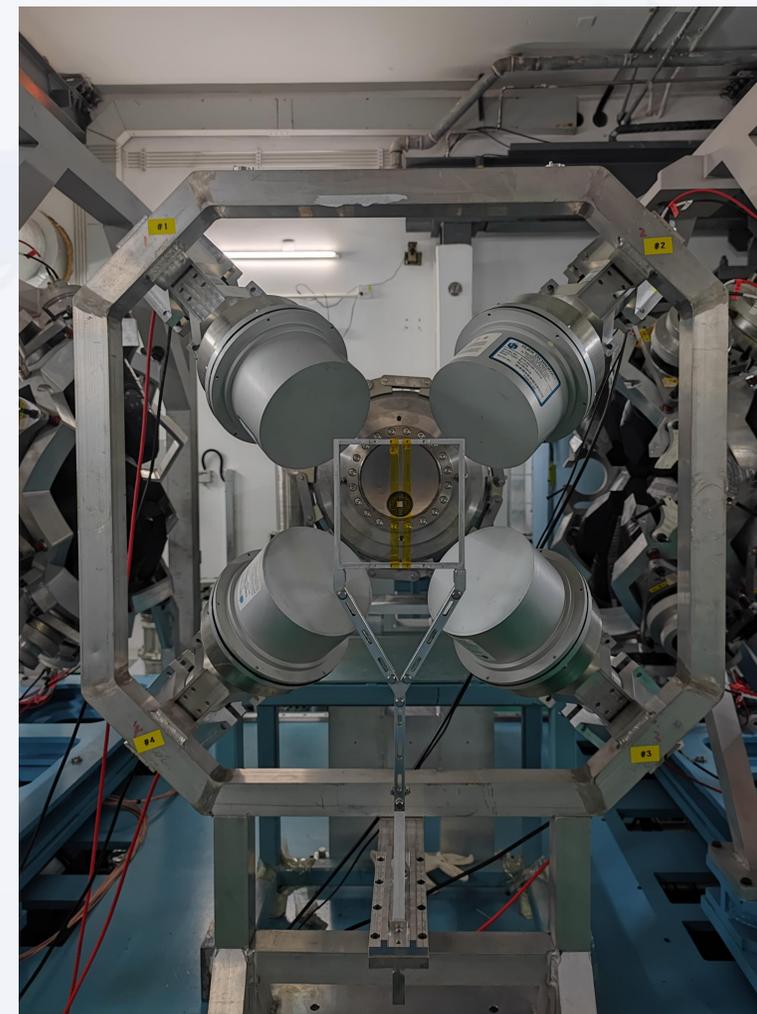
❖ 实验方案: CSNS反角白光中子源 + 氘代苯 C_6D_6 谱仪 + 铜钱样品 + 波形采样数据获取



❖ 清代古钱币进行了元素成分分析工作：检验了NRCA方法在科技考古中样品成分的分析能力



Ag, Sb As 微量元素
Sn 主量元素



70年代以后,随着现代科学分析仪器的的发展,一些无需取样(即所谓的无损分析)或少取样、微取样的分析仪器被用于古钱币合金成分的分析,如电子探针(EPMA)、带能谱的扫描电子显微镜(SEM)、X射线荧光分析(XRF)、原子吸收分光光度分析(AAS)、中子活化分析(NAA)等,这些新兴的实验分析手段大大推动了古钱币合金成分检测工作的开展。从70年代到80年代国际科技考古(archaeometry)界和科技史界发表了大批古钱币合金成分方面的分析数据,其中,中国古代钱币有数百例之多(主要由日本文物考古界人士所做)^⑦。但是,中国古代钱币是浇铸制品,并且大都是高合金铸造,内在组织很不均匀,用这类仪器分析的数据,往往不够准确,其研究价值很受影响。

表 3231-1 黄铜钱合金组成的演变(数据表)

年号	Cu	Zn	Pb	Sn
嘉靖	71.40	16.00	5.30	6.23
隆庆	70.14	21.11	2.60	4.89
万历	65.53	28.81	3.33	1.04
天启	63.34	29.35	5.05	1.07
崇祯	61.78	33.93	2.52	0.32
顺治	63.52	24.84	6.73	2.63
康熙	61.03	27.19	6.03	2.21
雍正	64.58	25.67	4.46	1.35
乾隆	54.81	35.76	5.00	1.74
嘉庆	55.91	35.31	2.77	1.96
道光	51.02	40.05	3.37	1.22
咸丰	59.98	29.09	6.12	1.88
同治	54.12	36.50	3.93	1.36
光绪	49.22	41.46	3.01	1.71
宣统	55.02	36.74	4.30	1.73

表 3131-1 各个时期青铜钱的平均成分

朝代	Cu	Pb	Sn	样品数
先秦	55.78	35.15	4.86	464
秦汉	81.33	10.46	4.17	318
六朝	74.81	18.22	7.86	24
隋唐	69.98	18.01	8.78	150
五代	68.04	23.38	5.95	12
北宋	65.87	24.04	8.06	510
南宋	56.74	35.91	3.88	96
元朝	73.18	17.73	7.42	7
明代前期	74.95	15.31	7.97	33

由表图可见,青铜钱合金组成的演变规律是:

- (1)铜:低→高→低→高;
- (2)铅:高→低→高→低;
- (3)锡:低→高→低→高。

其中,每一段的变化不仅反映了一个时期政治、经济的发展状况与矿冶的兴衰,而且与青铜铸钱技术和货币自身的发展密切相关,有其丰富的内涵。

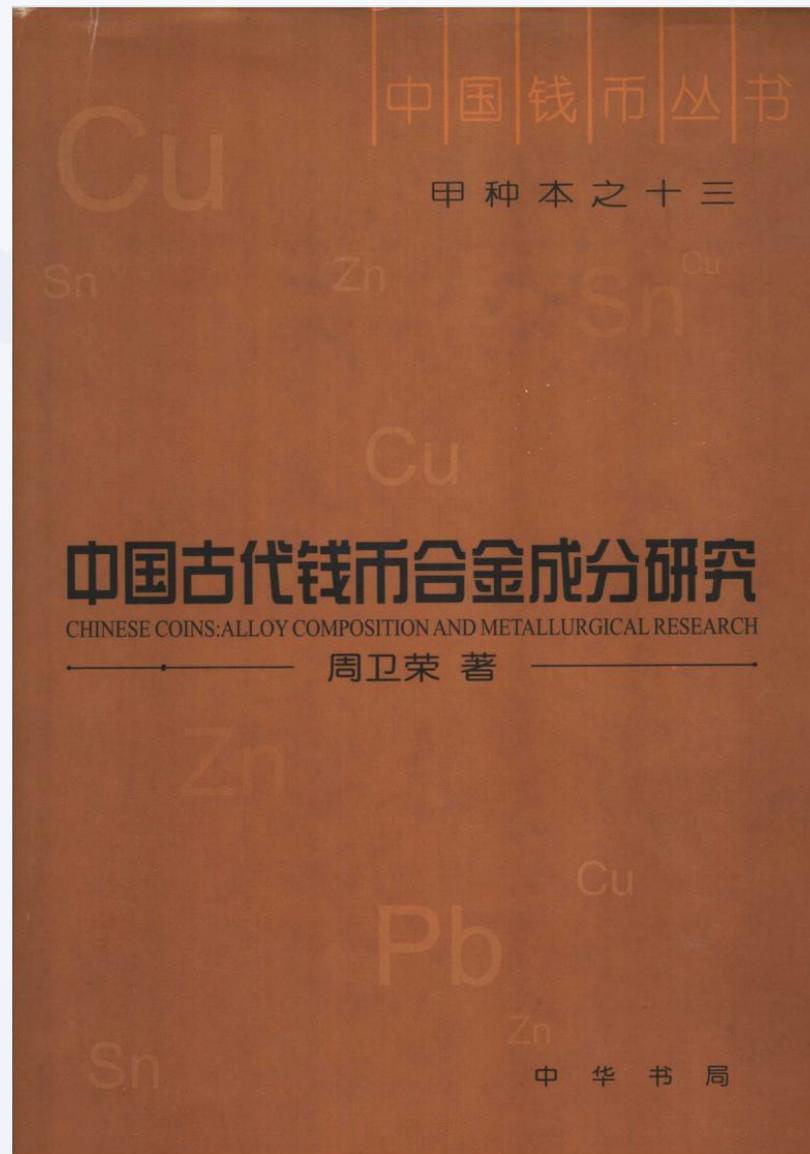
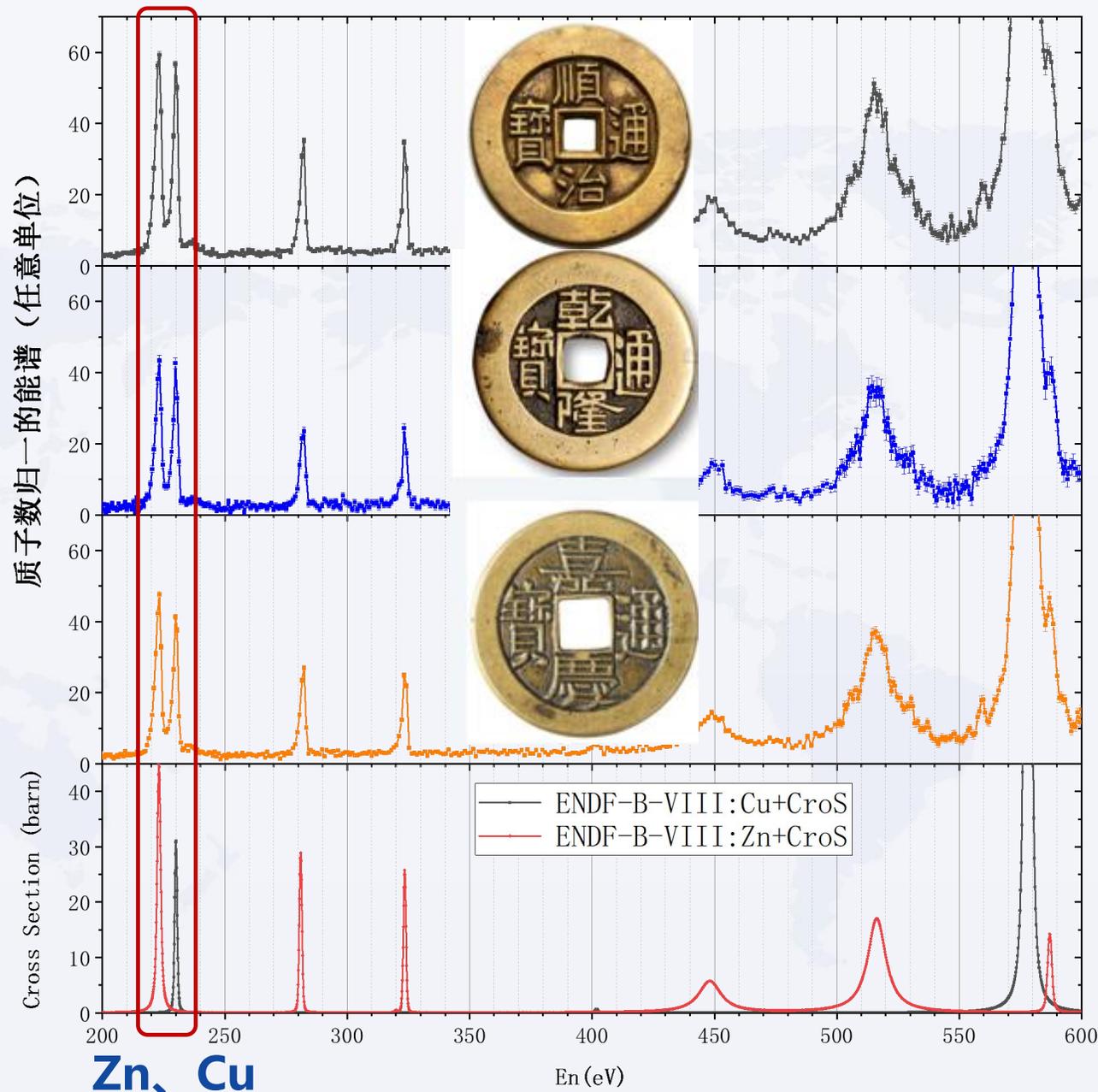
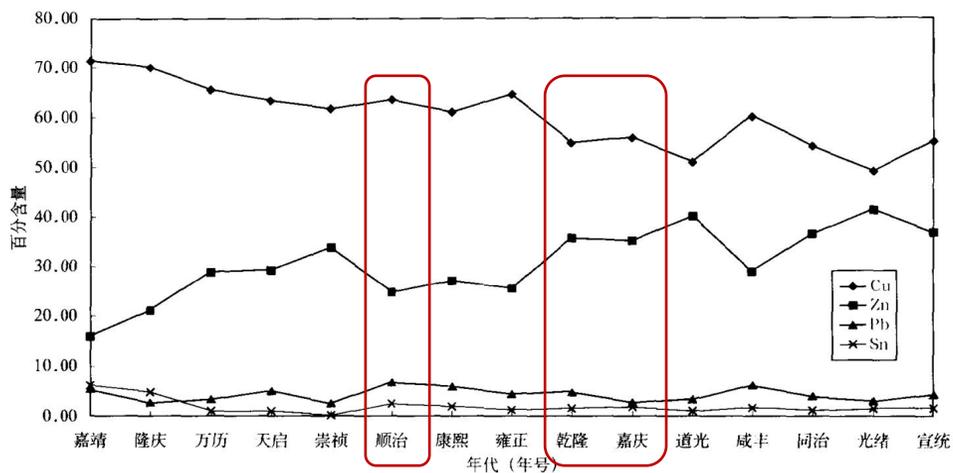


表 3231-1 黄铜钱合金组成的演变(数据表)

年号	Cu	Zn	Pb	Sn
嘉靖	71.40	16.00	5.30	6.23
隆庆	70.14	21.11	2.60	4.89
万历	65.53	28.81	3.33	1.04
天启	63.34	29.35	5.05	1.07
崇祯	61.78	33.93	2.52	0.32
顺治	63.52	24.84	6.73	2.63
康熙	61.03	27.19	6.03	2.21
雍正	64.58	25.67	4.46	1.35
乾隆	54.81	35.76	5.00	1.74
嘉庆	55.91	35.31	2.77	1.96
道光	51.02	40.05	3.37	1.22
咸丰	59.98	29.09	6.12	1.88
同治	54.12	36.50	3.93	1.36
光绪	49.22	41.46	3.01	1.71
宣统	55.02	36.74	4.30	1.73



- ❖ 青铜较黄铜：Cu的含量高10%-20%
- ❖ 青铜中Sn的含量，是黄铜含量的3-4倍

(一) 青铜钱合金组成发展的一般趋势

我们将上述各个时期的青铜钱的合金组成分别取平均值,作表、图如下:

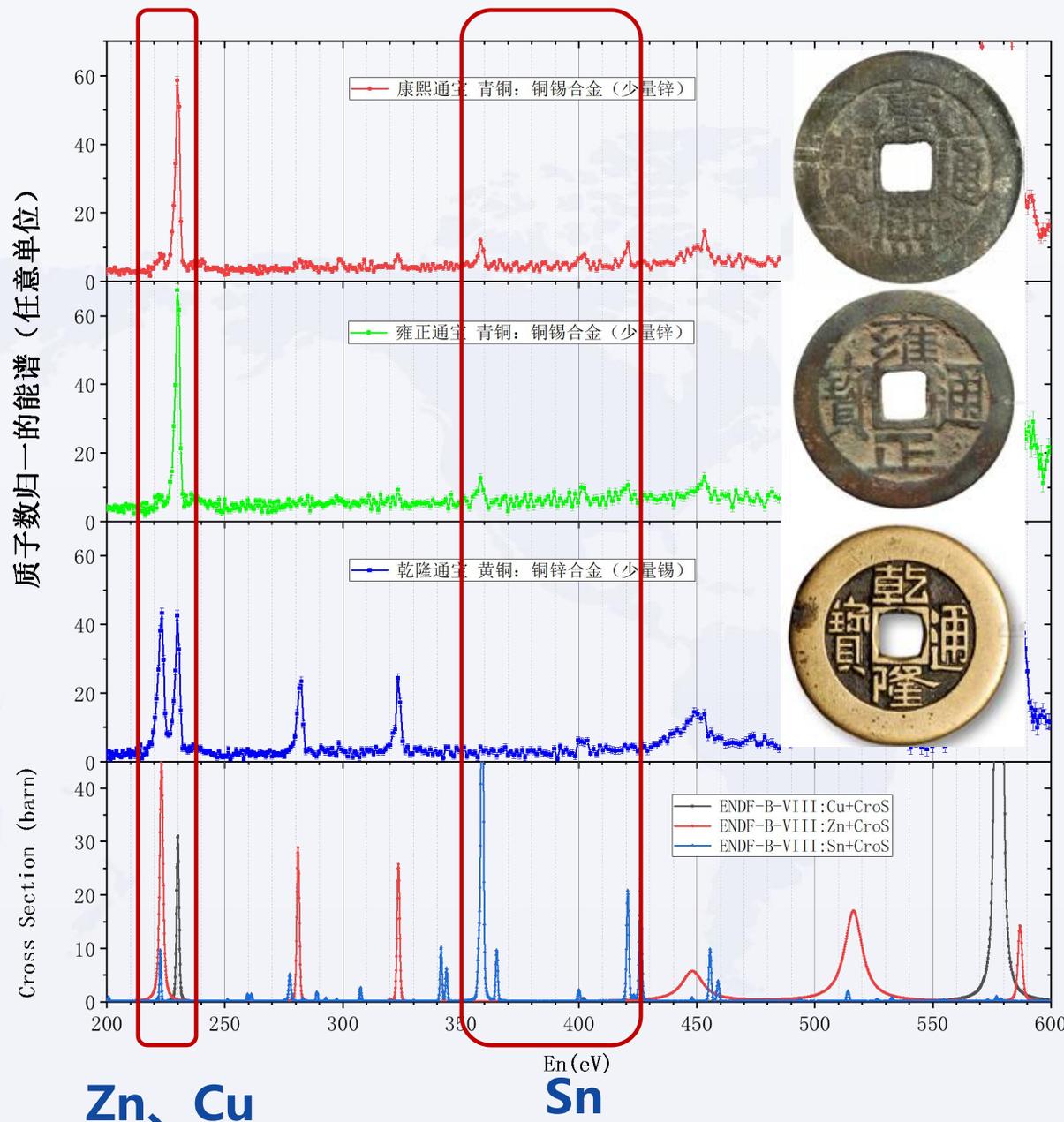
表 3131 -1 各个时期青铜钱的平均成分

朝代	Cu	Pb	Sn	样品数
先秦	55.78	35.15	4.86	464
秦汉	81.33	10.46	4.17	318
六朝	74.81	18.22	7.86	24
隋唐	69.98	18.01	8.78	150
五代	68.04	23.38	5.95	12
北宋	65.87	24.04	8.06	510
南宋	56.74	35.91	3.88	96
元朝	73.18	17.73	7.42	7
明代前期	74.95	15.31	7.97	33

由表图可见,青铜钱合金组成的演变规律是:

- (1) 铜:低→高→低→高;
- (2) 铅:高→低→高→低;
- (3) 锡:低→高→低→高。

其中,每一段的变化不仅反映了一个时期政治、经济的发展状况与矿冶的兴衰,而且与青铜铸钱技术和货币自身的发展密切相关,有其丰富的内涵。



二、银

在黄铜钱中,由于合金元素锌基本上不可能引入银,而铅的含量大都较低,因此,黄铜钱中的杂质元素银无疑主要来自原料铜。

由表 32-1 和表 32-2 中数据可知,明代黄铜钱中银的含量是很低的,大都在 0.01% 的水平,最高 0.041%,平均只有 0.018%。清代黄铜钱中银的含量要明显高于明代,最高达 0.14%,平均为 0.046%。现将明清两代黄铜钱的银含量按年号取平均值表列于下:

表 3222-1 明代黄铜钱中的银含量

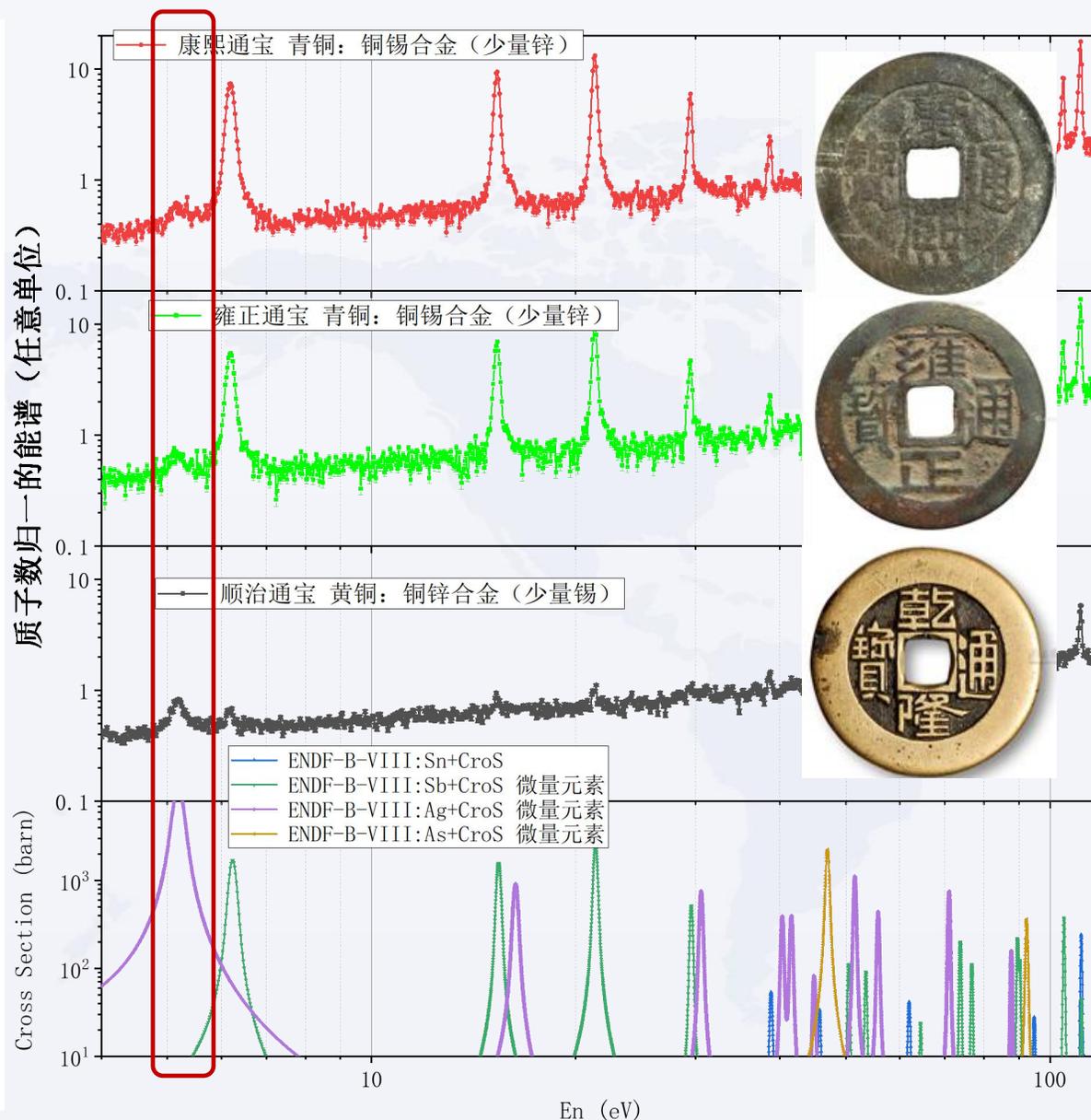
年号	嘉靖	隆庆	万历	天启	崇祯
银含量 (%)	0.016	0.015	0.017	0.025	0.013

表 3222-2 清代黄铜钱中的银含量

年号	顺治	康熙	雍正	乾隆	嘉庆
银含量 (%)	0.052	0.058	0.034	0.040	0.029
年号	道光	咸丰	同治	光绪	宣统
银含量 (%)	0.034	0.049	0.046	0.045	0.042

明代铜钱中银含量低,一方面是其铜料总体纯净的结果。另一方面,根据《菽园杂记》等的记载,明代炼铜常有从粗铜中提银的做法。清代则不一样,滇铜的纯度一直不高,从吴其浚《滇南矿厂图略》和严中平《清代云南铜政考》等文献的记载来看,滇铜冶炼过程中也无提银的做法,因此,清代铜钱中杂质银的含量自然要高于明代。

微量杂质银的存在对黄铜钱无影响,它从一个方面反映了原料铜的纯度。



❖ 青铜较黄铜：Sb的含量高很多

❖ 有希望给出As元素的含量

五、砷、锑

砷和锑也是青铜合金中常见的杂质元素，特别是砷，因为铜矿床中常常有砷铜共生矿生成，而在冶炼过程中砷又很容易以合金的形式进入铜中。到目前为止，钱币分析中砷和锑的含量测定都较少，很难作细致的讨论，现有的测定结果表明：

(1) 早期青铜钱的砷、锑含量较高，后期青铜钱中的砷、锑含量较低。现将现有的数据取平均值列表于下：

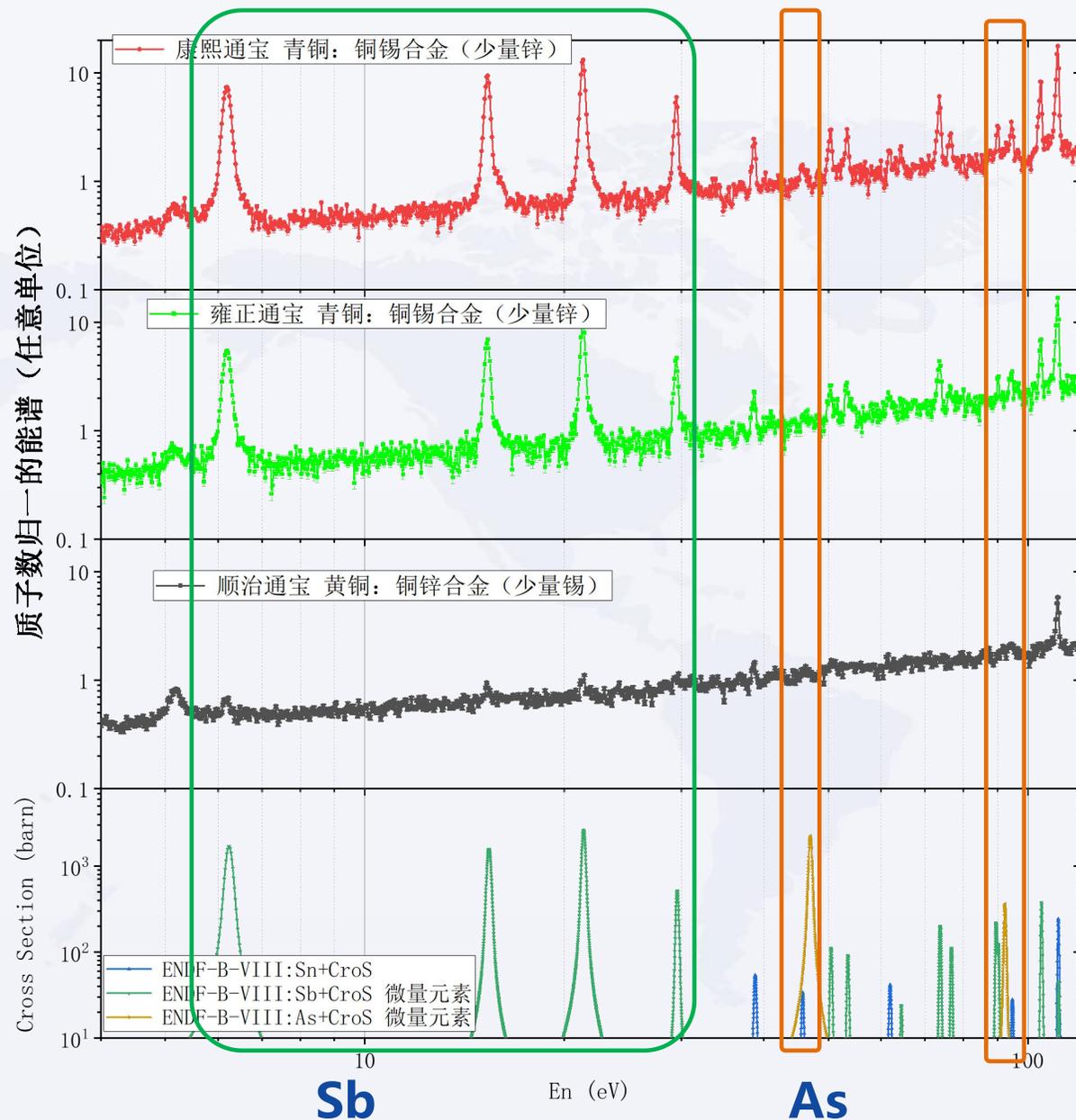
表 3125 -1 青铜钱中微量元素砷、锑含量对比

朝代	分析数量(枚)	平均值(%)
先秦	As: 87; Sb: 47	As: 0.42; Sb: 0.12
汉朝	As: 10	As: 1.25
六朝	As: 10; Sb: 10	As: 0.38; Sb: 0.36
唐朝	As: 10; Sb: 10	As: 0.49; Sb: 0.26
宋朝	As: 22; Sb: 22	As: 0.18; Sb: 0.08

这一结果表明，青铜钱中砷、锑杂质含量的高低也与原料的精炼程度和精炼水平有关。

表 32-2 清钱的合金成分

编号	名称	参数	背文	Cu	Pb	Sn	Fe	Zn	Cd	Ag	Ni	Co	资料来源	出土或收藏地	锌含量	品质得分	品质评估	备注
QQ1	顺治通宝	3.2g, 2.6-0.57cm	宁	62.56	4.82	2.43	0.76	26.25	0.0025	0.058	0.055	0.0069	[1]	收首都博物馆	36.92	20	一般(C)	图QQ1
QQ2	顺治通宝	4.0g, 2.7-0.6cm	宣	67.32	8.12	3.63	0.82	18.87	0.0010	0.071	0.079	0.013	[1]	收首都博物馆	34.20	10	很差(E)	图QQ2
QQ3	顺治通宝	4.5g, 2.7-0.6cm	东	65.19	6.96	2.55	0.67	24.74	0.0011	0.056	0.078	0.012	[1]	收首都博物馆	36.46	15	差(D)	图QQ3
QQ4	顺治通宝	4.3g, 2.7-0.58-0.12cm	昌	64.72	8.19	2.77	0.15	23.03	0.002	0.045	0.069	0.007	[1]	收首都博物馆	36.31	15	差(D)	图QQ4
QQ5	顺治通宝	3.3g, 2.7-0.58-0.08cm	临	57.65	6.03	2.42	0.25	32.17	0.003	0.046	0.077	0.014	[1]	收首都博物馆	42.87	15	差(D)	图QQ5
QQ6	顺治通宝	3.7g, 2.7-0.55-0.11cm	河	64.75	7.20	2.42	0.25	24.10	0.002	0.051	0.075	0.007	[1]	收首都博物馆	35.96	15	差(D)	图QQ6
QQ7	顺治通宝	3.5g, 2.6-0.53-0.11cm	苏	63.51	6.75	2.52	0.06	22.86	0.003	0.047	0.071	0.006	[1]	收首都博物馆	35.34	15	差(D)	图QQ7
QQ8	顺治通宝	4.3g, 2.7-0.59-0.11cm	原	64.49	7.57	2.37	0.06	22.61	0.003	0.047	0.073	0.008	[1]	收首都博物馆	35.16	15	差(D)	图QQ8
QQ9	顺治通宝	4.1g, 2.7-0.57-0.10cm	东	61.76	6.00	2.56	0.19	27.94	0.004	0.05	0.066	0.004	[1]	收首都博物馆	38.85	20	一般(C)	图QQ9
QQ10	顺治通宝			63.20	5.68	3.11	0.96	25.79					[21]		37.89	20	一般(C)	



3

NRCA在科技考古中的定量方法研究

❖ 共振形状分析(Resonance Shape Analysis)

中子俘获测量方法类似，需要进行复杂的R-矩阵拟合。

❖ 标定法(Calibration Approach)

成分已知的靶作为标准样品的测量，给出对含量未知的靶的成分测量的标定法。

靶中X, Y两种物质的含量比

$$\frac{W_{X,\mu}}{W_{Y,\lambda}} = K_{\mu,\lambda} \frac{F_\lambda}{F_\mu} \frac{N_\mu}{N_\lambda}$$

其中 N_μ/N_λ 是X, Y两种物质的共振峰面积的比。 $K_{\mu,\lambda}$ 是对在相同实验条件下对

已知成分标样靶测量得到的修正因子(Ag/Cu, Sb/Cu, Sn/Cu, Zn/Cu)

F_μ , F_λ 是由中子自屏蔽引起的中子通量衰减的修正因子，通常由模拟给出。

$$F_\lambda = \frac{\int \sigma_{\gamma,\lambda}(E_n) F(E_n) dE_n}{\int \sigma_{\gamma,\lambda}(E_n) dE_n}$$

- ❖ 标定法 (Calibration Approach) : 主量元素初步的定量研究 (顺治通宝)
- ❖ 共振形状分析方法 (Resonance Shape Analysis) : R-矩阵共振参数拟合

$$\frac{W_{X,\mu}}{W_{Y,\lambda}} = K_{\mu,\lambda} \frac{F_{\lambda}}{F_{\mu}} \frac{N_{\mu}}{N_{\lambda}}$$

共振峰区间		Zn/Cu比值 —— %				
		(215.0, 225.3)	(277.0, 285.0)	(317.0,328.0)	(434.0,467.0)	(492.0,545)
Cu	(225.3,233.0)	74.6 [14.9]	65.2 [13.0]	66.8 [13.4]	68.8 [13.7]	71.9 [14.4]
	(642.0,661.0)	50.5 [10.1]	44.1 [8.8]	45.2 [9.0]	46.6 [9.3]	48.7 [9.7]
	(978.0,1005)	38.7 [7.7]	33.8 [6.8]	34.6 [6.9]	35.6 [7.1]	37.3 [7.5]

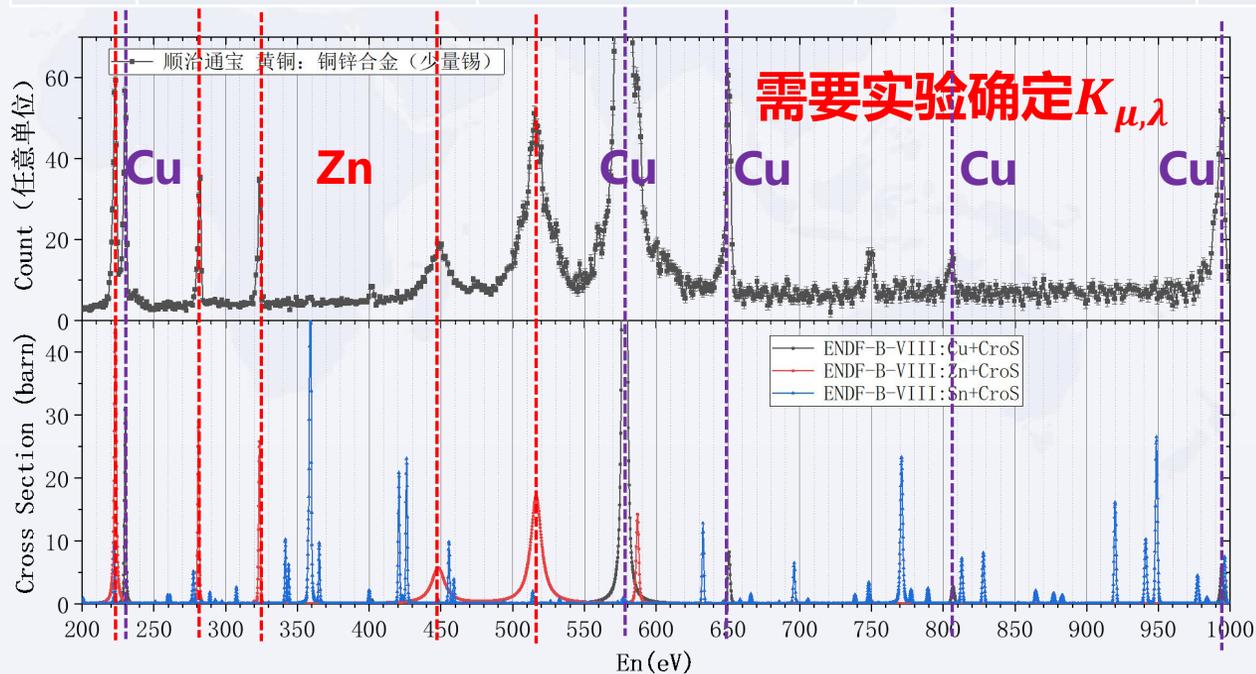


表 3231 - 1 黄铜钱合金组成的演变 (数据表)

年号	Cu	Zn	Pb	Sn
嘉靖	71.40	16.00	5.30	6.23
隆庆	70.14	21.11	2.60	4.89
万历	65.53	28.81	3.33	1.04
天启	63.34	29.35	5.05	1.07
崇祯	61.78	33.93	2.52	0.32
顺治	63.52	24.84	6.73	2.63
康熙	61.03	27.19	6.03	2.21
雍正	64.58	25.67	4.46	1.35
乾隆	54.81	35.76	5.00	1.74
嘉庆	55.91	35.31	2.77	1.96
道光	51.02	40.05	3.37	1.22
咸丰	59.98	29.09	6.12	1.88
同治	54.12	36.50	3.93	1.36

❖ 标定法(Calibration Approach): 利用成分已知的标准样品, 测量给出铜钱样品的成分信息。

		Sb				Sn	Ag
		(5.6,6.7)	(14.76,16.0)	(20.3,22.55)	(28.73,30.5)	(106.4,113.0)	(4.8,5.6)
Cu	(225.3,233.0)	0.016 [0.003]	0.035 [0.007]	0.089 [0.018]	0.083 [0.017]	1.76 [0.35]	0.025 [0.005]
	(551.5,603.0)	0.032 [0.006]	0.071 [0.014]	0.180 [0.036]	0.170 [0.034]	3.59 [0.72]	0.052 [0.010]
	(642.0,661.0)	0.011 [0.002]	0.024 [0.005]	0.060 [0.012]	0.056 [0.011]	1.19 [0.24]	0.017 [0.003]
	(798.3,812.1)	0.027 [0.005]	0.057 [0.012]	0.152 [0.038]	0.143 [0.029]	3.02 [0.60]	0.044 [0.009]
	(978.0,1005)	0.008 [0.002]	0.018 [0.004]	0.046 [0.009]	0.043 [0.009]	0.91 [0.18]	0.013 [0.003]

五、砷、锑

砷和锑也是青铜合金中常见的杂质元素,特别是砷,因为铜矿床中常常有砷铜共生矿生成,而在冶炼过程中砷又很容易以合金的形式进入铜中。到目前为止,钱币分析中砷和锑的含量测定都较少,很难作细致的讨论,现有的测定结果表明:

(1) 早期青铜钱的砷、锑含量较高,后期青铜钱中的砷、锑含量较低。现将现有的数据取平均值列表于下:

表 3125 - 1 青铜钱中微量元素砷、锑含量对比

朝代	分析数量(枚)	平均值(%)
先秦	As: 87; Sb: 47	As: 0.42; Sb: 0.12
汉朝	As: 10	As: 1.25
六朝	As: 10; Sb: 10	As: 0.38; Sb: 0.36
唐朝	As: 10; Sb: 10	As: 0.49; Sb: 0.26
宋朝	As: 22; Sb: 22	As: 0.18; Sb: 0.08

这一结果表明,青铜钱中砷、锑杂质含量的高低也与原料的精炼程度和精炼水平有关。

Sn	Fe	Zn	Cd	Ag	Ni	Co	资料来源	出土或收藏地	锌当量	品质得分	品质评估	备注
2.43	0.76	26.25	0.0025	0.058	0.055	0.0069	[1]	收首都博物馆	36.92	20	一般(C)	图 QQ1
3.63	0.82	18.87	0.0010	0.071	0.079	0.013	[1]	收首都博物馆	34.20	10	很差(E)	图 QQ2
2.55	0.67	24.74	0.0011	0.056	0.078	0.012	[1]	收首都博物馆	36.46	15	差(D)	图 QQ3
2.77	0.15	23.03	0.002	0.045	0.069	0.007	[1]	收首都博物馆	36.31	15	差(D)	图 QQ4
2.42	0.25	32.17	0.003	0.046	0.077	0.014	[1]	收首都博物馆	42.87	15	差(D)	图 QQ5
2.42	0.25	24.10	0.002	0.051	0.075	0.007	[1]	收首都博物馆	35.96	15	差(D)	图 QQ6
2.52	0.06	22.86	0.003	0.047	0.071	0.006	[1]	收首都博物馆	35.34	15	差(D)	图 QQ7
2.37	0.06	22.61	0.003	0.047	0.073	0.008	[1]	收首都博物馆	35.16	15	差(D)	图 QQ8
2.56	0.19	27.94	0.004	0.05	0.066	0.004	[1]	收首都博物馆	38.85	20	一般(C)	图 QQ9
3.11	0.96	25.79					[21]		37.89	20	一般(C)	

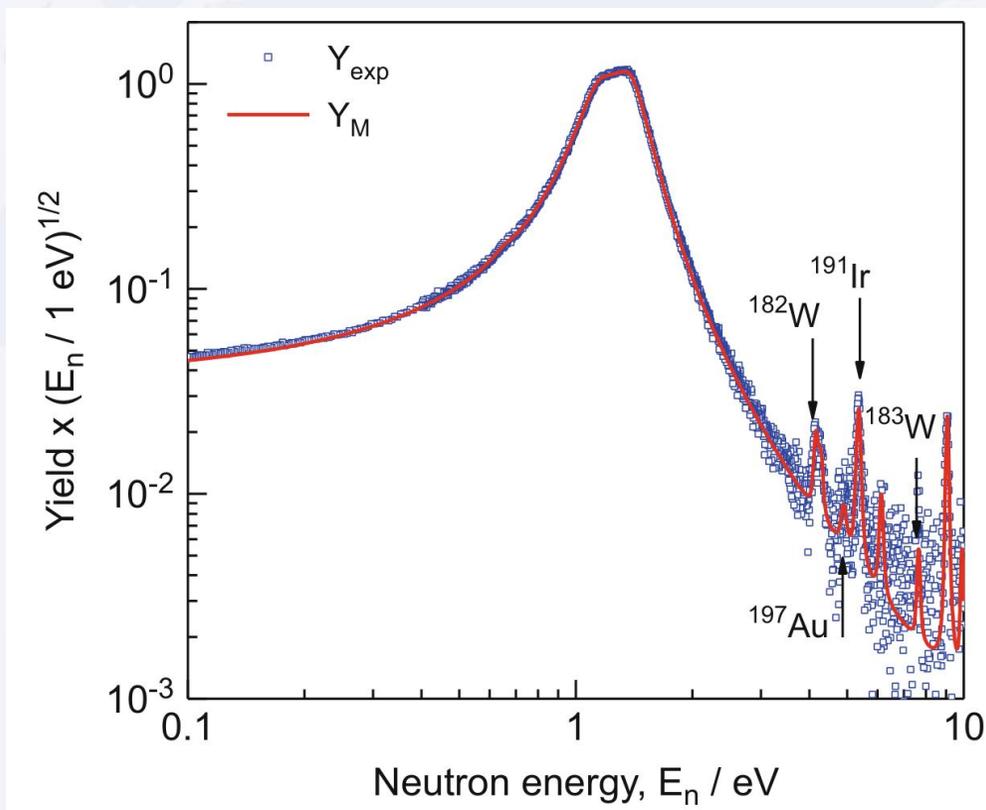
- ❖ **统计量不够**: 铜钱样品测量4.5小时, 铜钱面积约为截面测量样品的1/5, 相当于之前1小时测量
- ❖ **共振峰面积计算**: 目前只是简单的共振峰积分面积, 必须引入R-矩阵精确拟合
参考了Cu、Zn, As截面测量时, 归一确定精确的截面
- ❖ **实验确定 $K_{\mu,\lambda}$** : 成分已知的复合样品 Cu+Zn+Sn+Ag+In+Au
- ❖ **共振形状分析方法 (Resonance Shape Analysis)**: R-矩阵共振参数拟合

		Zn/Cu比值 —— %				
		(215.0, 225.3)	(277.0, 285.0)	(317.0,328.0)	(434.0,467.0)	(492.0,545)
Cu	(225.3,233.0)	74.6 [14.9]	65.2 [13.0]	66.8 [13.4]	68.8 [13.7]	71.9 [14.4]
	(642.0,661.0)	50.5 [10.1]	44.1 [8.8]	45.2 [9.0]	46.6 [9.3]	48.7 [9.7]
	(978.0,1005)	38.7 [7.7]	33.8 [6.8]	34.6 [6.9]	35.6 [7.1]	37.3 [7.5]

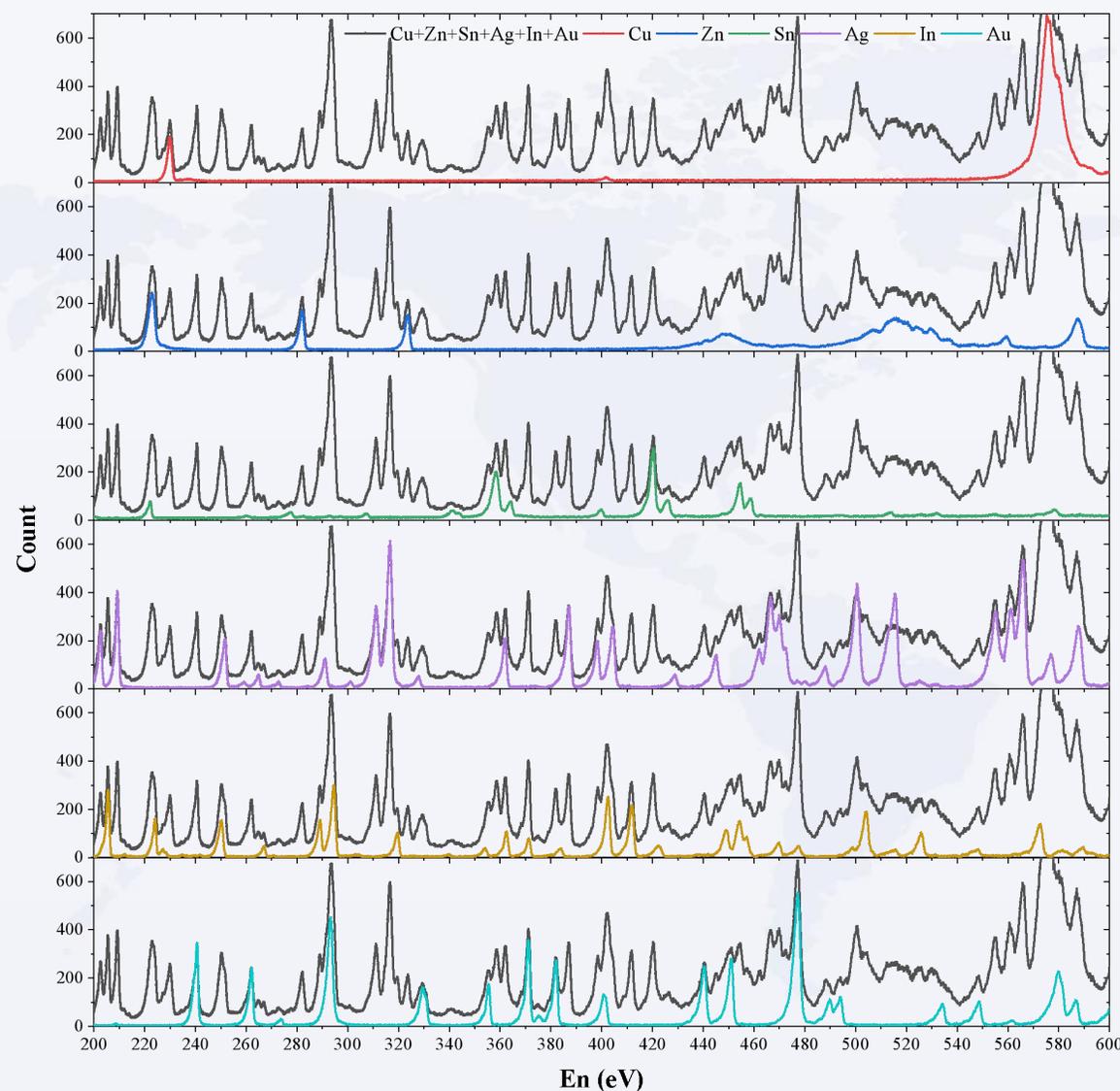
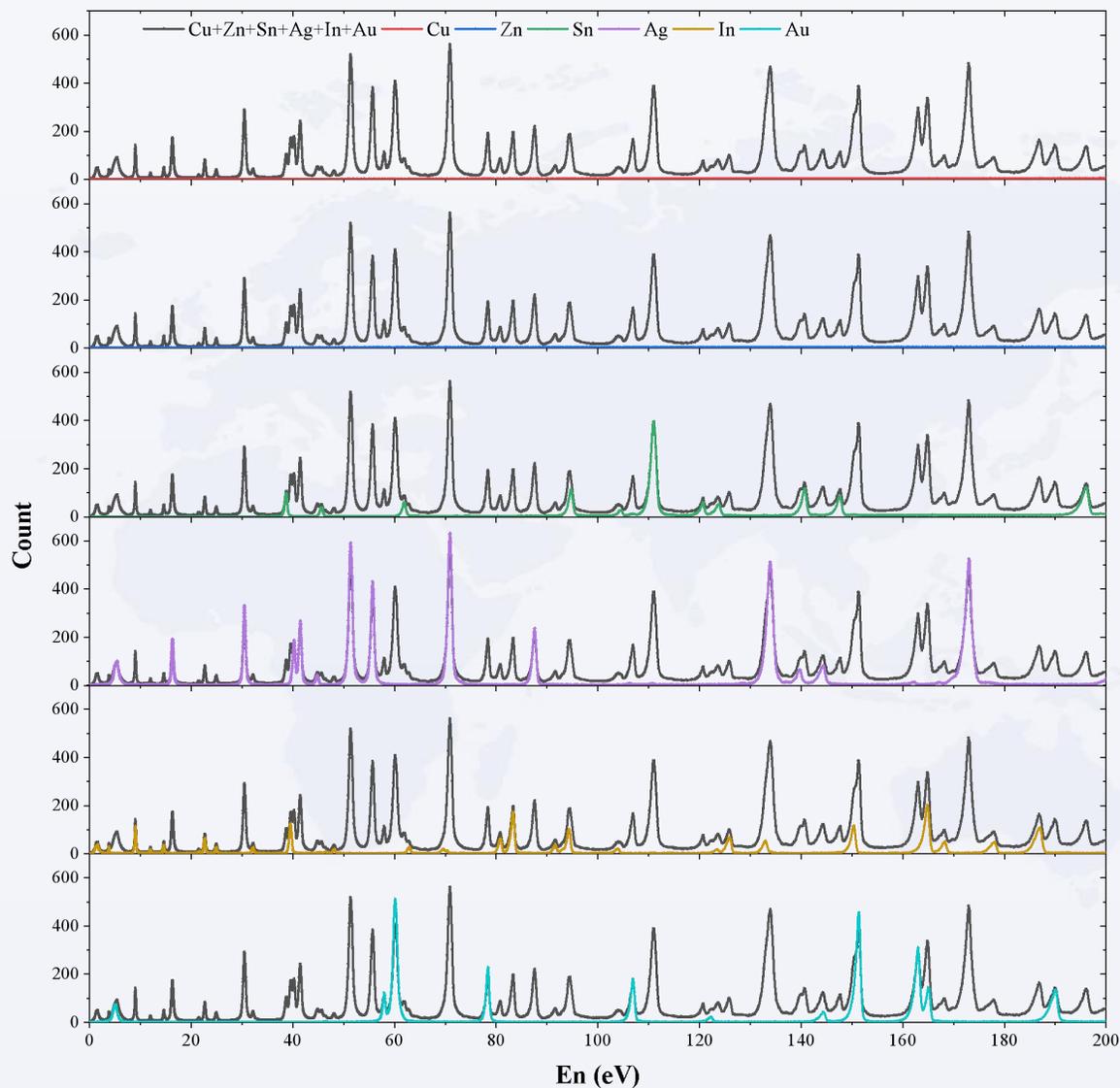
❖ 科技考古复合样品：共振形状分析(Resonance Shape Analysis)-SAMMY程序

A least squares fitting program for resonance analysis of neutron transmission and capture data computer code, MC Moxon, JB Brisland, G REFIT - AEA-InTec-0630

❖ 标定法(Calibration Approach): 复合样品 Cu+Zn+Sn+Ag+In+Au



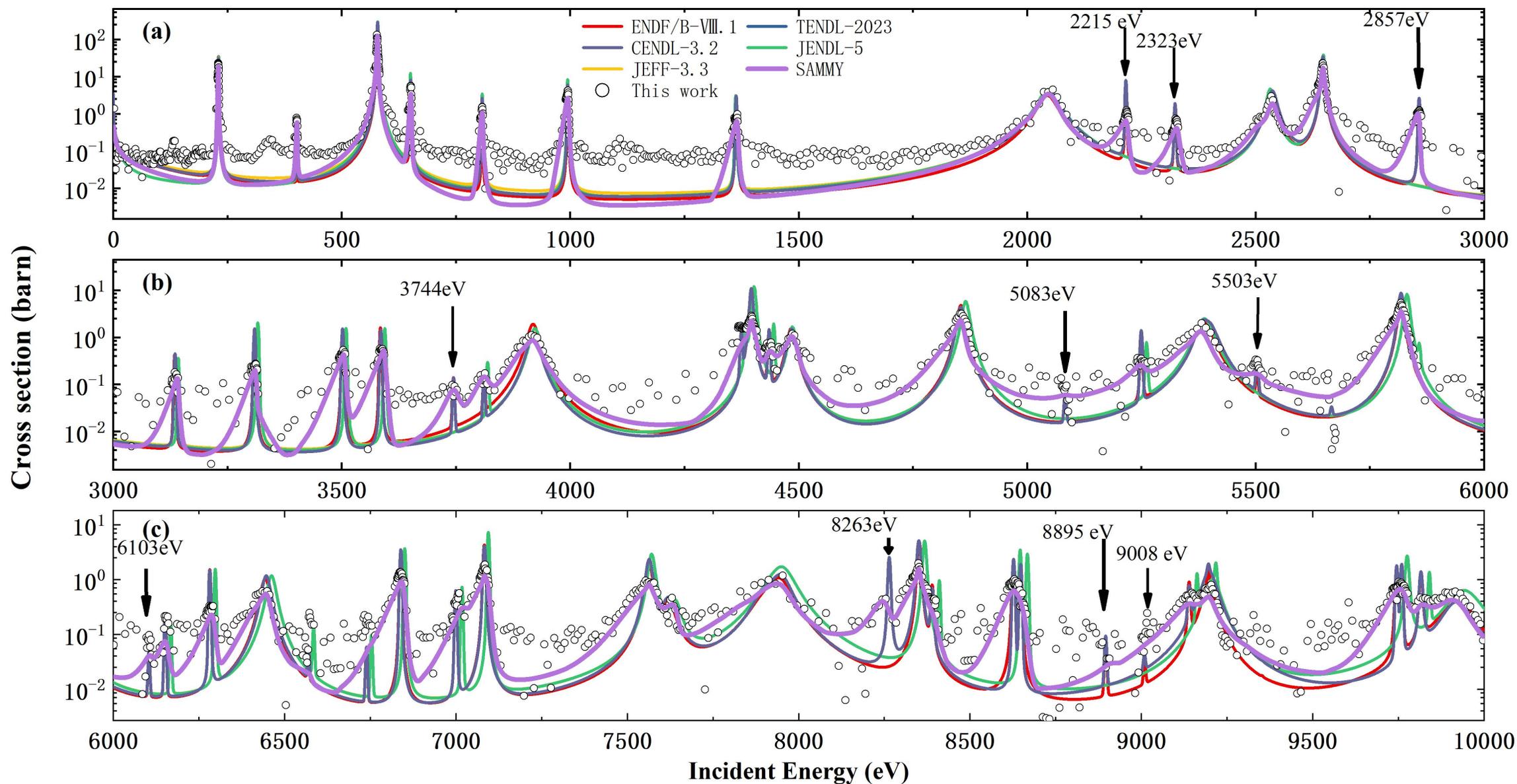
Cu+Zn+Sn+Ag+In+Au

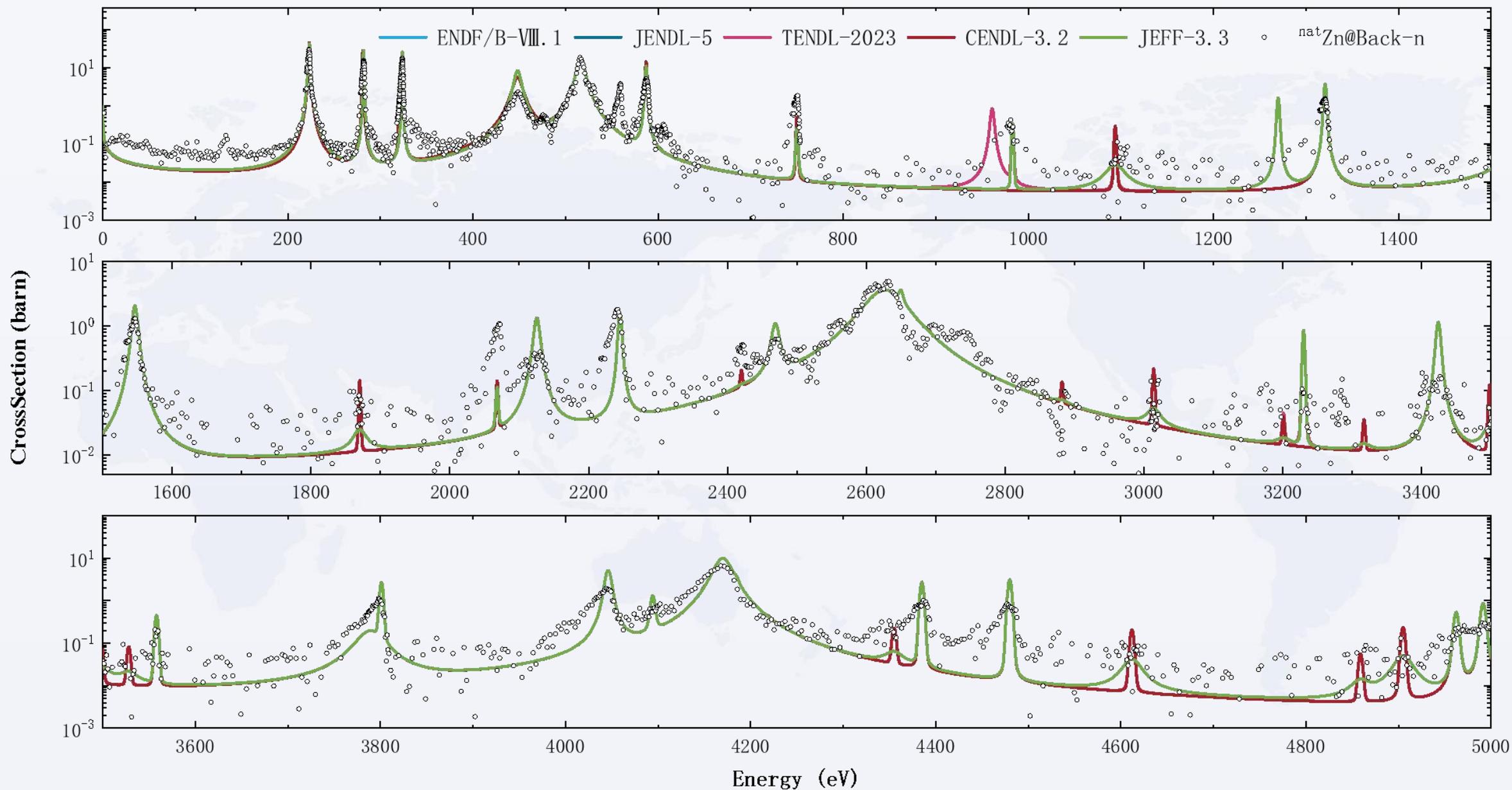


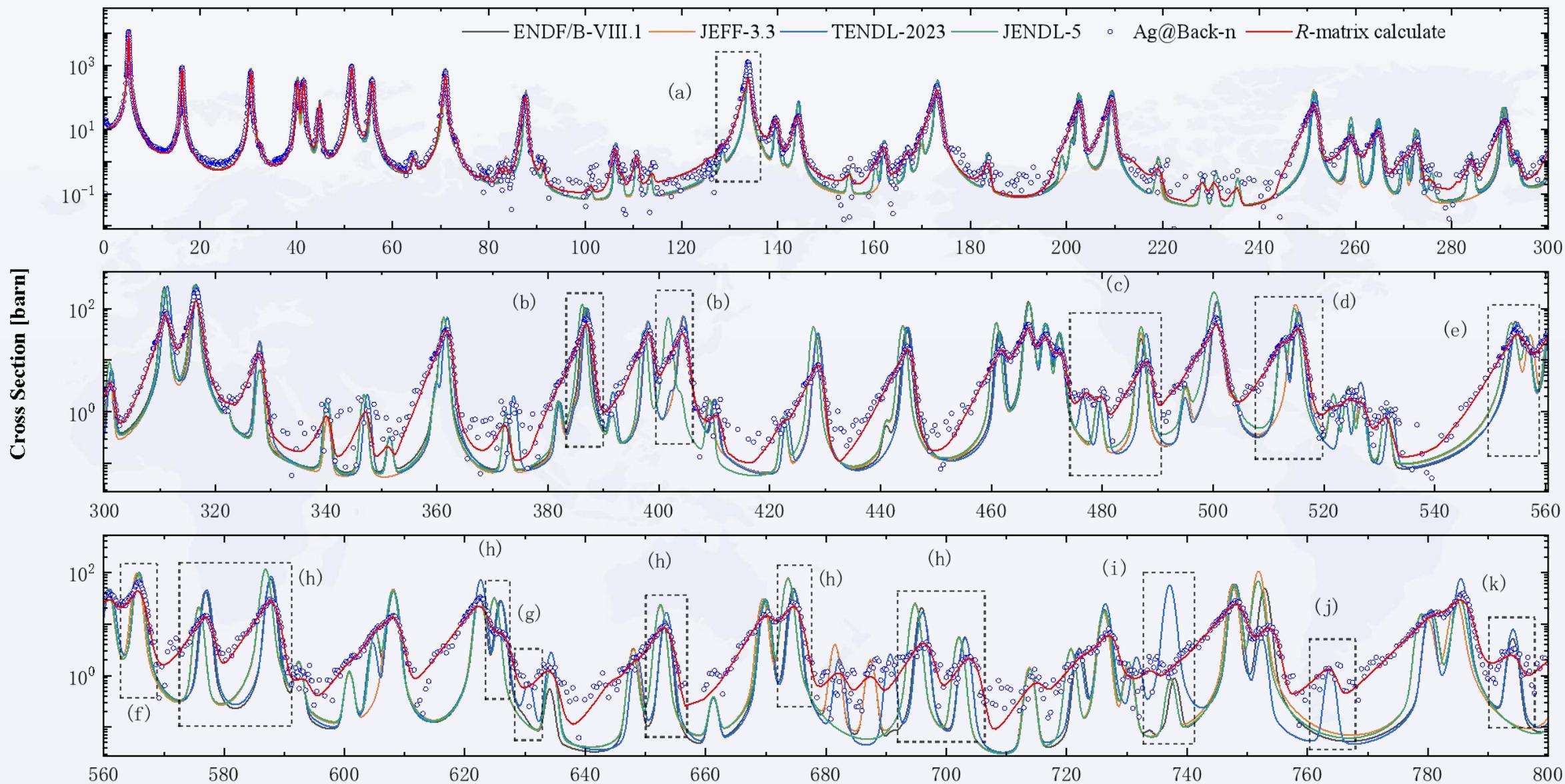
❖ $K_{\mu,\lambda}$ 是对在相同实验条件下，**已知成分标样靶测量得到的修正因子**

- $\text{natCu} \rightarrow {}^{63,65}\text{Cu}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- $\text{natAg} \rightarrow {}^{107,109}\text{Ag}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- ${}^{75}\text{As}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- $\text{natSb} \rightarrow {}^{121,123}\text{Sb}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- $\text{natZn}(n, \gamma)$ 反应截面进
- $\text{natSn}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- $\text{natIn} \rightarrow {}^{113,115}\text{In}(n, \gamma)$ 反应截面进展
- 复合样品数据
 $\text{Cu} + \text{Zn} + \text{Sn} + \text{Ag} + \text{In} + \text{Au}$

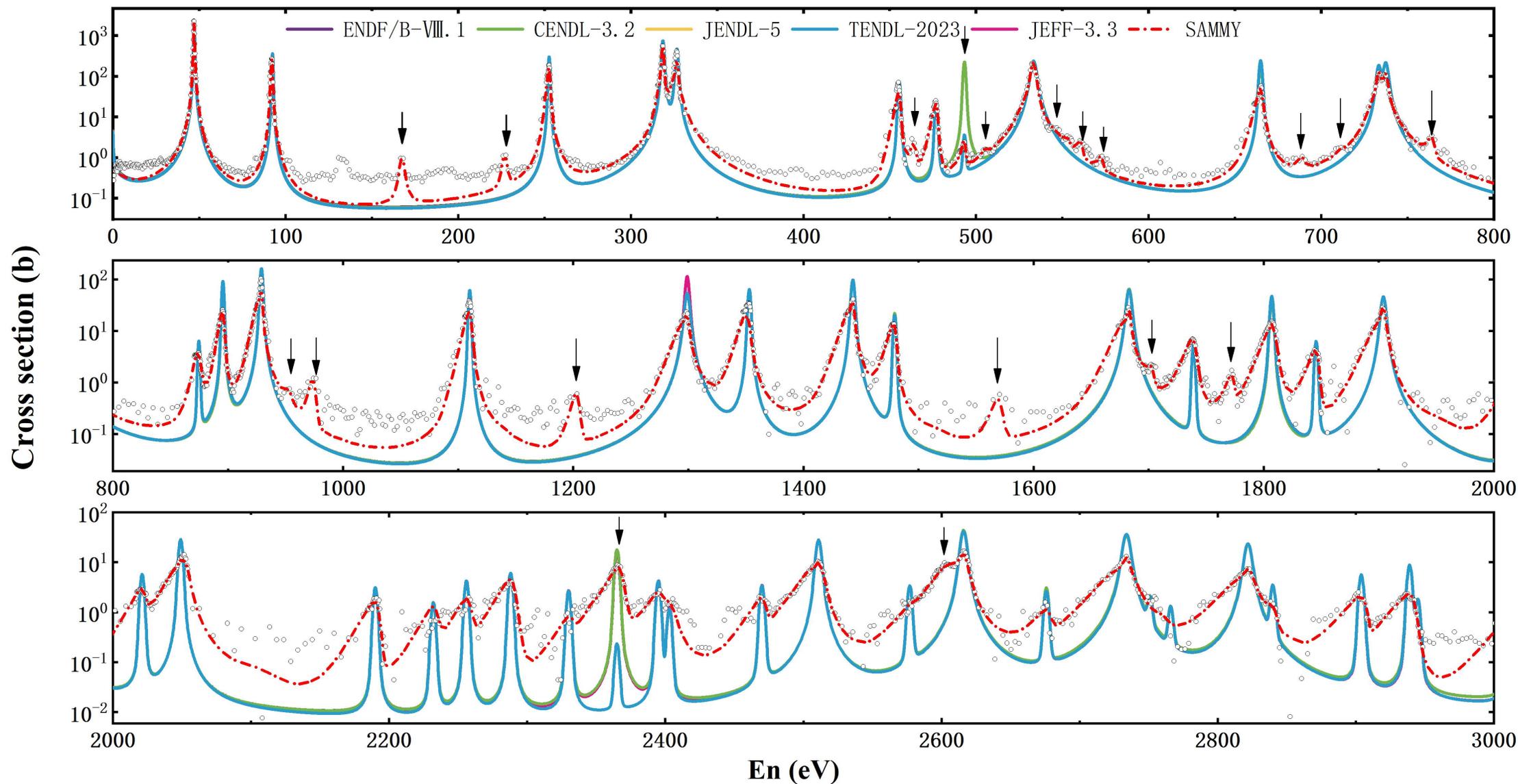


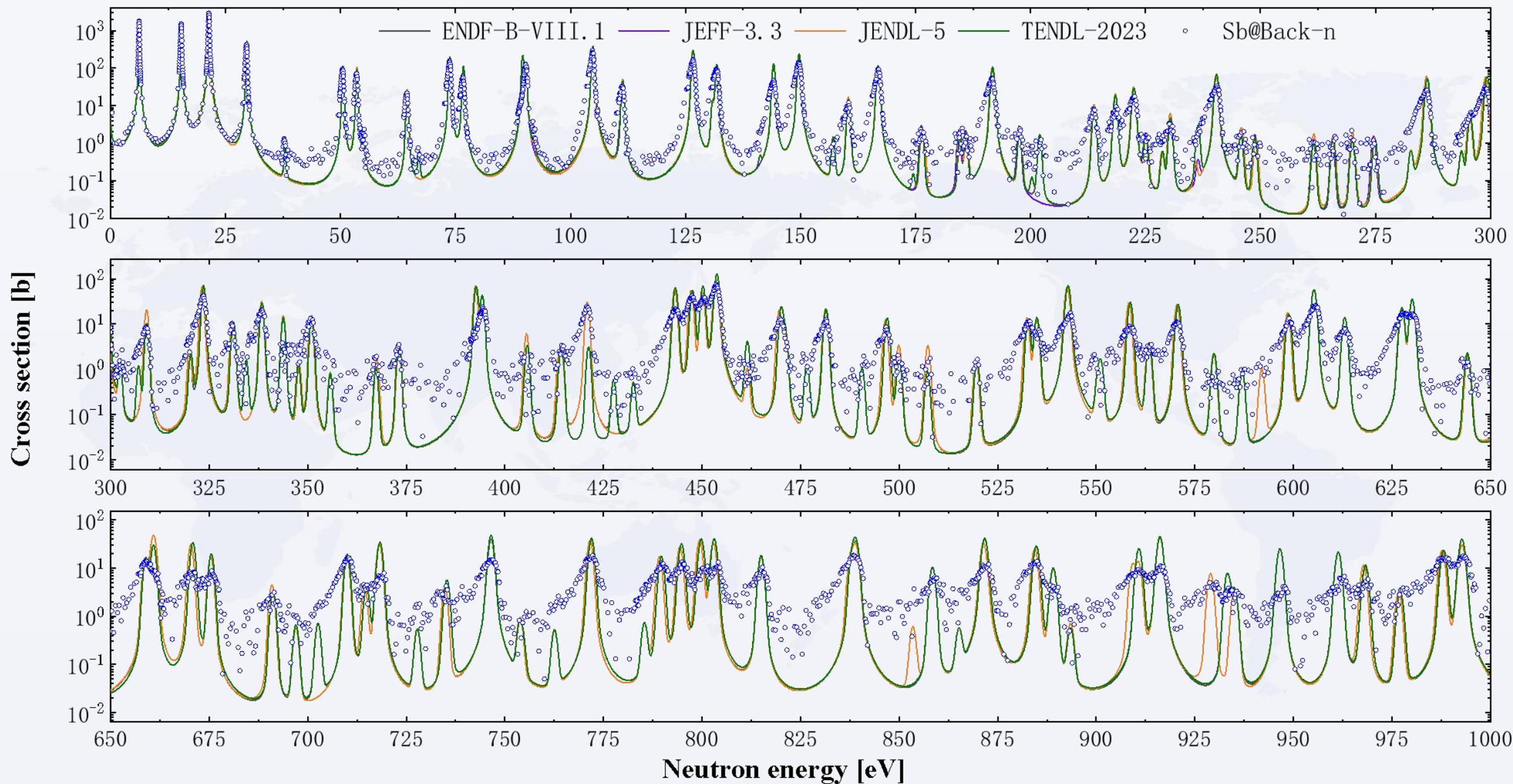




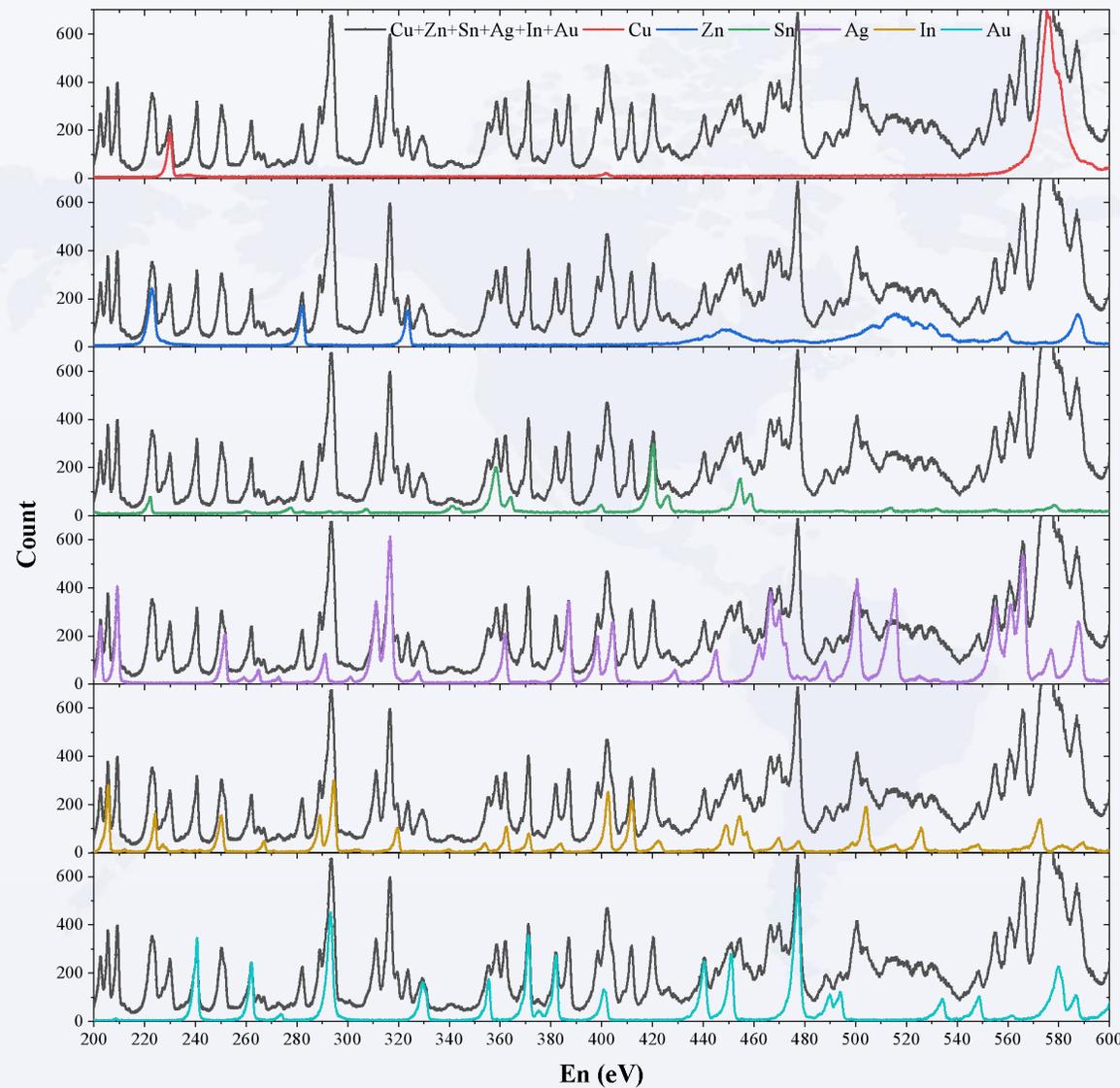
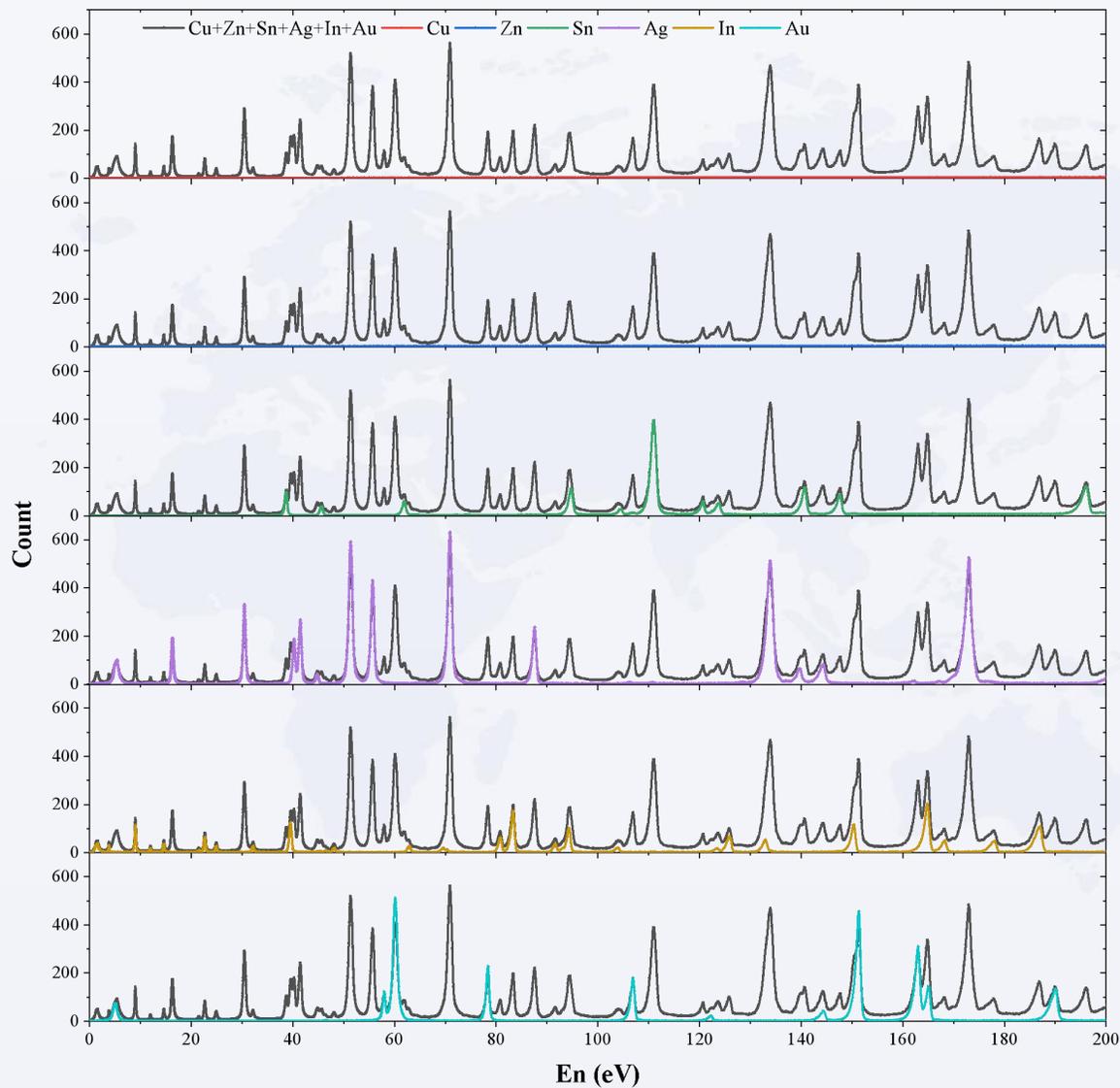


❖ 共振能区：1-3000eV 新发现了17个新的共振结构





❖ 共振形状分析(Resonance Shape Analysis), 给出样品的绝对含量



敬请批评指正!



单位：中国科学院近代物理研究所 惠州研究部

Email: anzhendong@impcas.ac.cn

NEutron, X-ray, and mUon Source

