

CN 8305-157

CNC-0004  
IAE-0004

# 中国核科技报告

## CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

质子激发 X 射线分析  
生物医学中痕量元素分析的新技术



中国核情报中心  
China Nuclear Information Centre

CNIC-00004

IAE-0004

# 质子激发X射线分析

——生物医学中微量元素分析的新技术

马 鑫 培

(中国原子能科学研究院)

中国核情报中心

北京·1986

## 摘 要

本文讨论了质子激发X射线分析对于生物体内各种元素的分析能力，并结合人体和动物的组织、血清、尿、头发中痕量元素分析的实例讨论了质子激发X射线分析的灵敏度、准确度和多元素分析能力，阐明了它在生物医学领域的痕量元素分析中的优点。

**关键词** X射线分析，质子激发，生物医学，痕量元素分析

**PROTON EXCITING X RAY  
ANALYSIS --- A NEW TECHNIQUE  
OF TRACE ELEMENT ANALYSIS  
IN BIOMEDICINE**

**Ma Xinpei**

**(Institute of Atomic Energy)**

**ABSTRACT**

The analyzing capability of proton exciting X ray analysis for different elements in organisms was discussed, and dealing with examples of trace element analysis in the human body and animal organisms, such as blood serum, urine, and hair. The sensitivity, accuracy, and capability of multielement analysis were discussed. Its strong points for the trace element analysis in biomedicine were explained.

## 一、引言

研究生物体内各种元素的含量及其代谢规律已经成为生物医学的一个重要课题。在世界许多国家,正在大量地进行着生物样品中元素的分析。据估计,目前每年大约测定六十亿个单元素,其中大约一千六百万个是痕量元素。在地球上一共发现的九十多种元素中,人体中有六十多种。25种元素被认为是植物和动物生命的基本元素。其中11种称为主要基本元素。表1列出了11种主要基本元素及其在人体中的含量,人体总重量的99%以上由这些元素组成。

表1 人体中11种主要基本元素及其含量

元 素	O	C	H	N	Ca	P	S	K	Na	Cl	Mg
含量, %	61	23	10	2.6	1.4	1.1	0.2	0.2	0.14	0.12	0.027

现在认为有14种是生命必需的基本痕量元素(Trace element): F(氟), Si(硅), V(钒), Cr(铬), Mn(锰), Fe(铁), Co(钴), Ni(镍), Cu(铜), Zn(锌), Se(硒), Mo(钼), Sn(锡), I(碘)。这些总含量不到1%的基本痕量元素对于生物的进化,正常的生命活动,人体的健康以及疾病的发生、发展起着重要的作用。特别是近些年,人们认识到癌症、冠心病和某些地方病等严重威胁人类寿命和健康的疾病,都与这些痕量元素含量的变化或其彼此间比值的改变有关,人们对大量人群和多种生物样品(血、尿、毛发等)的各种痕量元素进行了广泛地研究。深入地调查和研究工作需要灵敏、精确、可靠的痕量元素分析方法,特别是小量样品的多元素同时分析更受到生物学家们的欢迎。

质子激发X射线分析(简称PIXE,下同)正是这样一种应运而生的高灵敏度多元素的分析方法。它是1970年在大气样品分析上初露锋芒的。T. B. Johansson<sup>[1]</sup>应用PIXE测定了大气沉降物中的13种痕量元素,灵敏度达到 $10^{-12}$ 克水平,并且指明它的最低探测限可达 $10^{-18}$ 克。此后这种分析方法很快受到各方面广泛的重视,并得到迅速地发展。在1976年PIXE专题国际会议文集<sup>[2]</sup>和S. A. E. Johansson的评论文章中<sup>[3]</sup>对于此技术的各个方面作了精辟的论述。目前虽然技术的改进仍在进行,但是关于它的分析能力的验证性文章逐渐减少了,主要的是向着各个不同应用领域深入发展。现在,它已发展成为生物医学、环境科学领域中痕量元素分析的重要方法。

## 二、PIXE对生物组织中元素的分析能力

应用X射线发射谱进行元素的定性和定量分析有着悠久的发展历史。早在1913年莫斯利(Moseley)就给出了X射线特征谱线能量和原子序数之间的关系,指出元素特征X射线的波长正比于 $1/Z^2$ 。这就是莫斯利定律。他还注意到在黄铜的X射线谱中,铜线比锌线更强。这件事通常被认为是X射线谱化学定性和定量分析的起点。图1表示元素的特征X射线的能量与原子序数Z之间的关系。1964年Birks<sup>[4]</sup>提出质子激发X射线对于谱化学的分析能力,

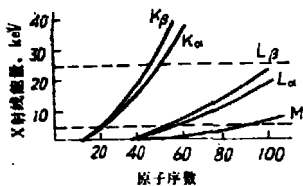


图1 元素特征X射线能量与原子序数之间的关系

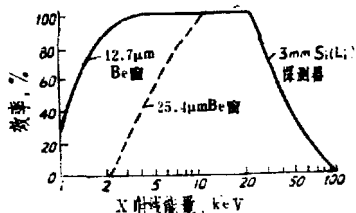


图2 Si(Li)探测器的效率曲线

并且比较了质子、电子和初级X射线激发对于X荧光分析的优缺点。初级X射线激发会产生很强的散射本底。只能激发吸收限低于初级X射线能量的元素。电子激发时，电子韧致辐射也产生很高的本底。然而质子激发时，它不仅有很高的电离截面而且产生的韧致辐射本底比电子小六个数量级，从而大大地提高了X荧光分析的灵敏度。近年来锂漂移硅半导体X射线谱仪的发展为X射线的探测提供了有利的条件。Si(Li) X射线谱仪有很高的能量分辨率。目前典型的Si(Li)探测器对于5.898keV的X射线分辨的半高全宽为160eV，能够有效地分辨 $Z \geq 14$ 元素的 $K_x$ 射线<sup>[5]</sup>。同时，Si(Li)探测器对于X射线有很高的探测效率。图2表示一个3mm厚的典型Si(Li)探测器的效率曲线。从图1和图2可见它可以有效地探测中重元素的 $K_x$ 射线和重元素的 $L_x$ 射线。质子激发方式和Si(Li) X射线谱仪相结合就产生了质子激发X射线分析这样一种高灵敏度的多元素分析技术。

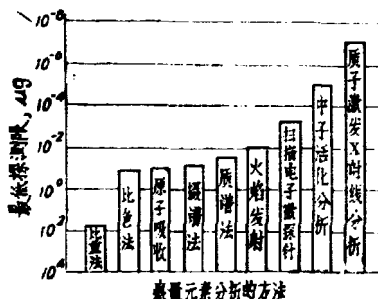


图3 质子激发X射线分析与其他分析技术的探测限的比较

图3给出了质子激发X射线分析和其他一些元素分析方法之间探测限的比较。从图3可见，质子激发X射线分析具有最低的元素探测限。质子激发X射线分析是用静电加速器提供适当能量的质子来轰击样品，使样品中各种元素的原子电离并且用Si(Li) X射线谱仪探测各种元素的特征X射线能谱，从X射线的能量和强度完成对样品中所含的多种元素的定性和定量分析。为了准确无误地进行元素分析，首先要完成对实验系统的刻度。图4表示我们的靶室装置、谱仪系统以及数据处理系统的原理图。

对于薄样品质子轰击X射线产额为：

$$N_x = \sigma_x \frac{m}{W} A_i n_p \frac{\Omega}{4\pi} e^i \quad (1)$$

式中， $\sigma_x$ 为X射线产生截面， $m$ 为靶上束流所轰击到的元素含量， $W$ 为原子量， $A_i$ 为阿伏伽

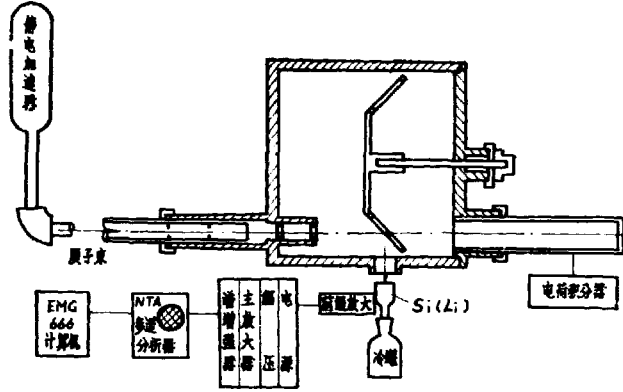


图4 质子激发X射线分析装置原理图

德罗常数， $n_p$ 为打到样品上的质子数， $\Omega$ 为探测器对靶所张立体角， $\epsilon$ 为探测效率， $t$ 为从靶面到探测器X射线的透射率。所以，两个元素单位质量的X射线计数之比为：

$$\eta_{x,y} = \frac{N_x}{m_x} / \frac{N_y}{m_y} = \frac{\sigma_x W_x \epsilon_x t_x}{\sigma_y W_y \epsilon_y t_y} \quad (2)$$

我们称 $\eta_{x,y}$ 为x元素对于y元素的相对灵敏度。对于特定的两个元素 $\eta_{x,y}$ 只和质子能量、吸收体情况有关。我们制备了18种元素的定量薄靶。每种靶中包括已知量的一种元素和内标元素钇(Y)。图5是实验系统的能量线性刻度，根据它可作元素的定性分析。图6表示元素的相对灵敏度曲线。双横轴表示不同的元素及其原子序数。纵轴表示元素的相对灵敏度 $\eta$ ， $\eta$ 为单位质量内标钇的K<sub>α</sub>计数和单位质量某元素K<sub>α</sub>射线计数之比。它表示了在我们的实验条件下，测得同样的X射线计数所需各种元素量之间的比例关系。它是应用内标法进行元素定量分析的依据。

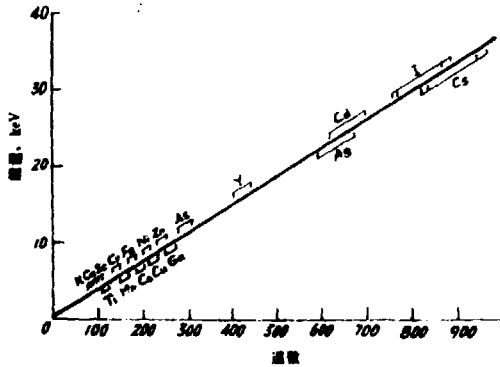


图5 实验系统能量线性刻度线

质子激发X射线分析技术应用于生物医学领域有如下一些优点：

1. 从以上分析可知它只能分析 $Z \geq 14$ 的元素<sup>(6)</sup>。在生物组织中最主要的成份是O, C,

H, N, 它们占人体总重量的96%, 可称为分析样品的基体。可见应用质子激发X射线分析测量生物组织中痕量元素, 可以没有基体干扰。

2. 在11种主要元素中, PIXE可以测定K, Ca, P, S和Cl五种元素。在14种基本痕量元素中, 从V到Se中间的九个元素落在PIXE的最高灵敏度区域中(见图6), 而且对Mo, Sn, I的分析也是很有利的, 因为它们处在很低的韧致辐射本底的位置。PIXE的元素分析能力和生物组织中元素之间的这种匹配关系, 正是其适合于生物样品分析的无可匹敌之处。

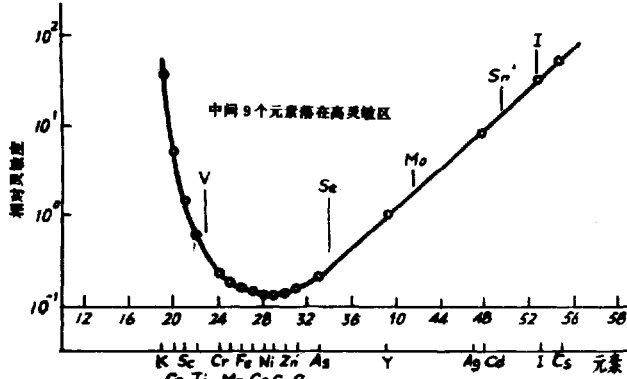


图6 元素相对灵敏度曲线

3. 环境污染对人类带来很大危害的几个元素, 如Pb, Hg, As, Cd, 正出现在质子激发X射线谱中。通过探测As和Cd的KX射线, Hg和Pb的LX射线可完成对这些元素的定量分析。这些元素“冒充”化学性质与其相似的伴内固有元素参与机体的代谢, 而对人体造成严重的损害。近年来, 对Pb, Hg, As, Cd代谢和毒理学的一些研究就是用PIXE完成的。

4. 在质子激发X射线谱中还可以见到Ti, Rb, Sr, Br, 它们的生化作用正在被逐步地认识。例如, 过量的Sr替换Ca沉积在骨骼, 使骨骼产生多孔性而引起软骨病。放射性Sr对人体就会产生更严重的危害。我们正在建立生物样品中Sr的PIXE方法, 为鉴定褐藻酸钠阻止放射性Sr吸收的效果提供可能。

从以上的分析可见, PIXE可以同时分析20几种生物体中主要元素、必需痕量元素、非必需元素和毒性元素。

5. 诚然, 单一元素的研究可以解决许多生物学中的问题。例如缺碘可以引起甲状腺肿, 并且服用碘可以预防这种疾病; 分布于红细胞中的铁是哺乳动物交换与输送氧气这一生理功能所必需的; 缺铬会引起动脉血管粥样硬化。可是在更多的情况下研究元素之间的相互比例关系对阐明某些生理和病理现象更有价值。在这种情况下, 具有多元素同时分析这一优点的PIXE方法就大有用武之地了。例如Zn和Se, Fe和Co, Zn和P之间就存在着明确的关联。对于Zn和Se的含量在不同人群之间和肝脏的不同位置切片之间都存在明显差异。生理情况下, Zn和Se的比值却变化不大, 而在某些病理情况下, 如慢性肾脏疾病时, Zn和Se的比值增大(一般都大于1.25)。尿液中Zn和Mo的比值大于300可作为进展性癌症的一个指标。有一些元素之间存在对抗作用, 例如V和Cr, As和Se。对于一个“对抗对”是无毒的





细胞白血病615纯种雌性小鼠的肝脏和脾脏中的痕量元素<sup>[21]</sup>。图9给出了白血病组和对照组小鼠肝脏质子激发X射线谱的比较。表3给出了肝、脾脏中各种痕量元素的分析结果。实验表明,急性淋巴细胞白血病引起肝脾脏中铜和锌含量明显的变化。

表2 用PIXE分析海星软体组织中各种元素的含量(In为加入的内标)

元 素	浓度, ppm干重	标 准 偏 差	元 素	浓度, ppm干重	标 准 偏 差
Si	<150		Nb	<0.14	
P	5507	±65	Mo	0.47	±0.08
S	5141	±42	Ru	<0.22	
Cl	32	±12	Rh	<1.01	
Ar	<25		Pd	<0.39	
K	6377	±40	Ag	1.7	±0.3
Ca	1172	±9	Cd	1.1	±0.3
Sc	<18		In	293.2	±1.8
Ti	<1.1		Sn	5.1	±0.5
V	2.3	±0.6	Sb	<1.69	
Cr	1.4	±0.5	Te	<3	
Mn	3.7	±0.4	I	<2.01	
Fe	90.7	±0.8	Cs	<8	
Co	<0.6		Ba	<7	
Ni	1.2	±0.2	La	<5	
Cd	10.1	±0.2	Ce	<6	
Zn	166.9	±1.1	Pr	<7	
Ga	0.48	±0.08	Ta	<3	
Ge	<0.9		W	3.7	±0.2
As	13.0	±0.2	Pt	2.0	±0.4
Se	1.0	±0.1	Au	<0.45	
Br	0.94	±0.08	Hg	<0.73	
Rb	3.69	±0.08	Tl	0.6	±0.2
Sr	30.9	±0.3	Pb	1.6	±0.2
Y	0.28	±0.07	Bi	<0.3	
Zr	0.60	±0.11	U	83.0	±0.2

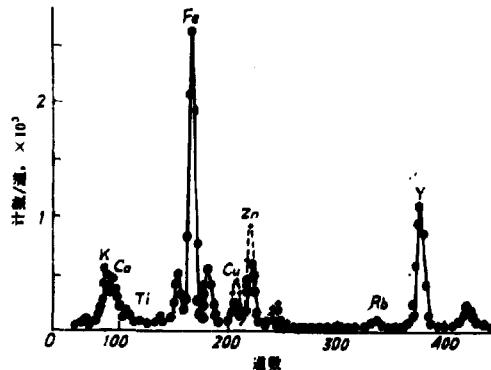


图9 白血病小鼠(+)和正常小鼠(●)肝脏的质子激发X射线谱  
道数为200—250以外各处, +点与●点重合。

表3 白血病小鼠和正常小鼠肝、脾脏中各种痕量元素的含量 (ppm)

组别	K		Ca		Ti		Fe		Cu		Zn		Rb	
	含量	误差	含量	误差	含量	误差	含量	误差	含量	误差	含量	误差	含量	误差
对照组肝	4853	8.2	199	7.1	1.5	27	82	8.14	5.5	2.23	17.6	1.6	12.1	1.8
实验组肝	4682	8.3	231	4.7	1.48	27	80	7.45	9.8	7.45	26.1	0.48	9.8	12.5
对照组脾	4872	16.8	171	27	2.4	37	133	3.6	1.59	3.0	16.4	6.7	10.6	19
实验组脾	6818	10.2	214	17.8	0.96	61	143	7.5	0.23	8.8	20.0	4.8	10.5	10.3

\* 单位, %.

表4 有机组织中痕量元素标准含量及PIXE分析灰化肾的结果

元素	灰化肾 <sup>[9]</sup> , ppm湿重	标准人		元素	灰化肾, ppm湿重	标准人	
		肝 (ppm湿)	肾 (ppm湿)			肝 (ppm湿)	肾 (ppm湿)
P		2610	1610	Cu	1.11±0.12	6.7	2.9
S		29000		Zn	35.2±3.5	4.7	48
Cl		2000	2390	As		0.1	0.03
K	235±118	2500	1900	Se	0.13±0.03	0.7	0.09
Ca	73.5±35.1	50	94	Br	1.84±0.19	2.6	5.5
V		<0.013	<0.011	Rb	0.66±0.10	31	8.7
Cr		<0.009	0.01	Sr	0.28±0.06	0.018	0.06
Mn	0.58±0.12	1.4	0.9	Mo		1	0.035
Fe	26.3±2.8	178	71	Cd	20±2.1	2.2	32
Co		0.060	0.013	Sn		0.3	0.2
Ni		<0.067	<0.055	Pb	0.12±0.08	1.7	1.1

表5 血清PIXE分析结果 (ppm)

元素	典型浓度 [14] (血浆)	[13]	[12] 100μC	[10] 100μC	[10] 1000μC	[11] 600μC
k	161					
Ca	94					50~125
V	0.01	1.01			<0.069	0~0.07
Cr	0.024	0.028	<0.3	<0.16	<0.046	0.01~0.06
Mn	0.008	0.005			<0.034	0.01~0.08
Fe	1.16	1.1	1.19	0.9		0.5~4
Co	0.0005					
Ni	0.03	0.03	<0.08	<0.066	<0.019	0~0.02
Cu	1.13	1.14	0.81	1.46		0.3~1.2
Zn	1.81	10	0.67	1.67		0.81~1.72
As	0.03	0.19	<0.08	<0.068	<0.019	
Se		0.011	<0.09	<0.075	0.022±0.011	
Br	3	5.5	<0.09	8.44		1.01~2.13
Rb	0.65	0.73			0.2±0.1	0~0.56
Sr	0.055	0.067	<0.2	<0.14	0.069±0.03	0.03~0.29
Mo	0.2	0.004	<0.5	<0.3	<0.086	
Pb	0.015	0.045		<0.23	<0.066	0.21~0.56

对于人体组织的分析我们选取了H. A. Van Rijnsvelt等的结果<sup>[10]</sup>和“标准人”的肾脏、肝脏中典型元素浓度(列于表4中)。图10表示灰化肾组织的质子X射线谱。这些资料表明,对于人体组织中主要元素P, S, Cl, K, Ca, 主要痕量元素Mn, Fe, Cu, Zn, 有毒元素Pb, Cd和非基本元素Br, Rb用质子激发X射线分析是没有问题的。通过灰化把样品浓缩可进一步分析Ni, Se, Mo, Sn, As等元素。但是V, Cr, Co在人体组织中含量太低不易探测。对于Co的测定, Fe的K<sub>β</sub>线的干扰是很重要的限制因素。

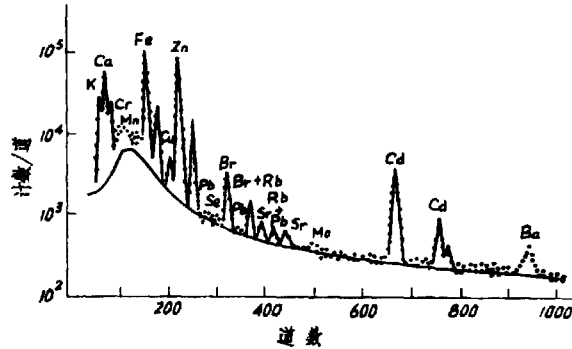


图10 灰化肾组织的PIXE谱

下面我们讨论一下血清的PIXE分析能力。表5列出了四组血清PIXE分析的结果。从这些结果可见: ①对于Fe, Cu, Zn三种元素, 结果一致并且和典型浓度值也一致。②应用质子束流大于100nA以上会引起Br明显地挥发。③Barrette等<sup>[10]</sup>增加轰击电荷到1000μC, 报道可以观测到Ni, Se, Rb, Sr和As。但是没有测到V, Cr, Mn。然而R. D. Vis等<sup>[11]</sup>却报道应用600μC看到了V, Cr, Mn, Sr和Ni。图11示出Vis所测的谱。

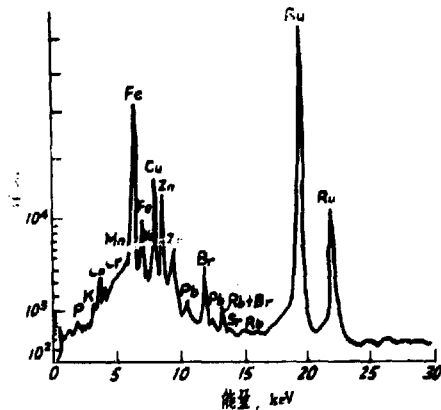


图11 2.5MeV质子轰击600μC血清X射线谱

目前关于灰化血清的数据较少。我们把1ml血清高温灰化后，溶于热硝酸（HNO<sub>3</sub>）中并滴成三块靶。每块靶约为0.3ml血清。用200nA束流轰击30分钟约360μC。图12示出我们所测得的谱。综合这些实验结果我们认为：对于血清的分析，Fe, Cu, Zn, Br, K, Ca在可以接受的精确度下是容易探测的。若希望应用PIXE提供更加完整的血清分析，灰化是需要的。这将进一步给出Cr, Mn, Ni, Se, Rb, Sr和Pb的定量结果。但是高温灰化会引起Br一类易挥发元素的丢失。应用等离子体灰化器进行低温灰化会更好。血清直接滴靶在干燥过程中会使30%的衬底薄膜破裂。因此，灰化处理血清是必要的。

PIXE方法在棉酚的研究中也作出了贡献。棉酚是一种很有发展前途的男性避孕药，效果达99.89%，因此人们对于它的避孕机理以及有无其他生理副作用是很关心的。为此我们用PIXE方法分析了Waster雄性大鼠血清中的痕量元素。从图13看到，成功地分析了血清中

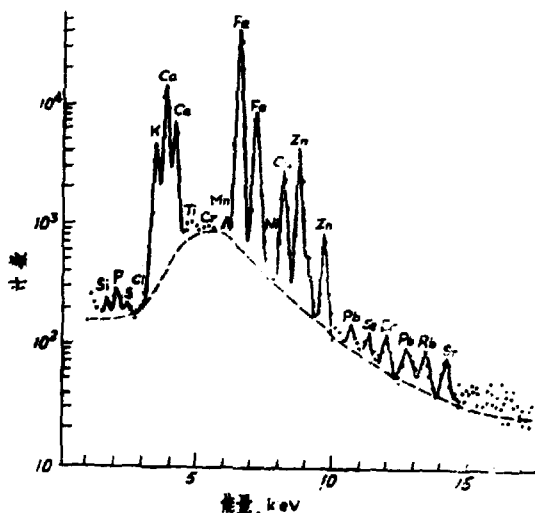


图12 灰化血清的PIXE谱

$E_p = 2.4\text{MeV}$ .

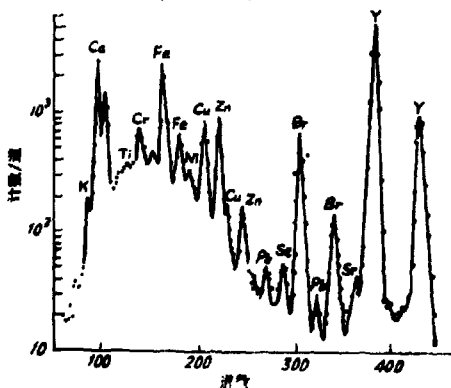


图13 大鼠血清质子激发X射线谱

K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Se, Br和Sr等13元素。

尿中痕量元素的分析可以提供许多有意义的生物医学数据。而且取样容易，浓缩方便。有人指出癌症患者从尿液中排出的Zn比正常人高三倍，但是排出的Mo有所减少，建议尿液中Zn和Mo的比值大于300可作为进展性癌症的一个指标。克山病患者尿中Mo的排泄量升高。A. S. Lodhi<sup>[15]</sup>通过分析血和尿研究了糖尿病。在尿样的分析中他没采用任何的预处理只是简单地加入100ppm的钇作内标。用2.5和1.1MeV质子激发测定了P, S, Cl, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Br, Rb, Sr等元素。

在建立生物样品Sr的分析方法工作中，我们进一步看到了PIXE方法的优越性<sup>[16]</sup>。用2.4MeV质子束轰击正常人原尿样和经湿法灰化浓缩10倍的浓缩尿样，前者Sr含量1.1ppm，后者10.2ppm（图14）。对Sr分析的探测限达到 $5 \times 10^{-8}$ 克，这接近于堆中子活化分析无干扰的理论探测限，况且它还具有简便、迅速的优点。这也证实了M. Pinta<sup>[17]</sup>的推荐。他建议对Sr的分析应选用PIXE方法。

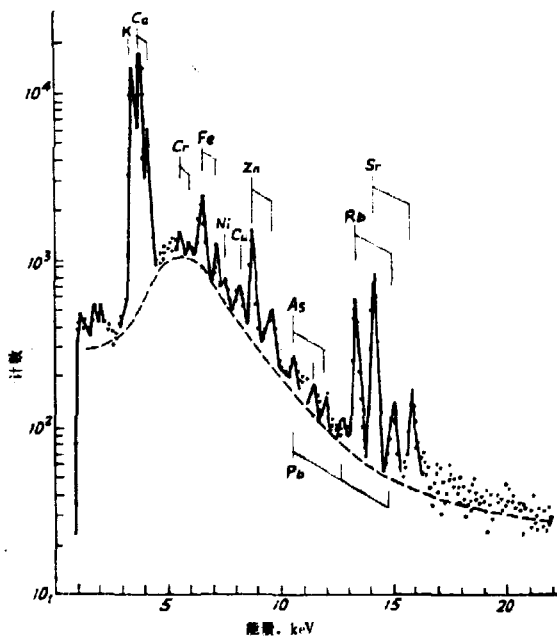


图14 尿液的质子激发X射线谱

头发是较理想的生物样品，也是研究人体痕量元素代谢的一个“橱窗”。头发中痕量元素水平可作为人体营养储存和代谢的指标，也可作为某些元素环境污染程度的指示。头发生长速度大约是1个月1cm，而且长出以后其中所含元素可以保持较长时间。尤其对于微量的重金属元素，头发是较灵敏的。Cookson等<sup>[18]</sup>用扫描微束来检验S, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Ni, Br, As和Pb的位置分布。图15表示所测的质子激发X射线谱。但是头发的分析也有其困难的一方面。因为头发中的痕量元素含量受地理位置和环境的影响较大而且易污染。

所以不同的人群之间个体差异很大。同时一根单发对于 PIXE 分析是厚靶 (~0.01mm 直径)，质子被阻止在其中，这样就产生了绝对定量的困难。复旦大学和上海冶金所对于从事接触砷的工作人员头发的分析工作，采用头发中已知量的 Zn 作标准测定砷的含量，很好地解决了定量问题，得到满意的结果。N. E. Whitehead<sup>[11]</sup>指出因为质子轰击到的头发定量不清楚，而且元素的分布形状不规律，所以绝对定量头发中的元素浓度是困难的。他把一定量的头发溶解在热硝酸中，并加入内标后滴在滤纸或薄有机膜上干燥，也很好地解决了定量问题。

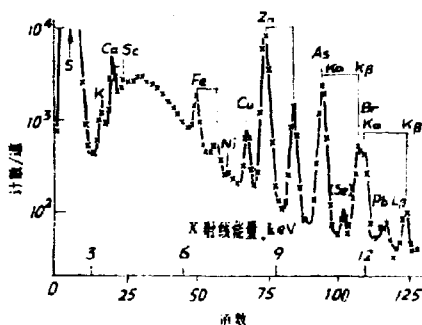


图15 从高As含量头发得到的质子激发X射线谱

#### 四、质子激发 X 射线分析的准确度

从质子激发 X 射线分析的灵敏度和分析元素的范围可见，对于生物组织体液中最微量元素的分析，它确实是一种很理想的方法。因此保证在分析过程中的准确度是很重要的。表 6 列出了由美国国家标准局 (NBS) 保证的标准参考物质牛肝的分析情况。标准参考物质牛肝

表 6 质子激发 X 射线分析对标准参考物质牛肝的分析结果

	NBS数据	[20], 厚靶	[20], 薄靶	[7], 薄靶
Cl	(2500)			2155±170
K	9700±600			10208±480
Mn	10.3±1.0	9.2±1.8	9.0±2.2	10.9±1.5
Fe	270±20	273±8.5	293±21	271.5±11.5
Cu	193±10	186±5.5	191±13	173.5±13.9
Zn	130±10	132±3.3	144±12	125.7±10.6
As	(0.065)	0.6±0.5	0.2±0.3	0.28±0.1
Se	1.1±0.1	1.4±0.5	0	0.98±0.15
Br	—	9.5±1.0	0	
Rb	18.3±1.0	16.8±1.9	20.9±2.5	15±2.5
Sr	(0.14)			0.5±0.18
Mo	(3.2)			3.06±0.7
Cd	0.27±0.04			0.56±0.13
Hg	0.016±0.002			<0.4
Pb	0.34±0.08			0.42±0.11

中各种痕量元素的推荐值是基于六种不同的分析技术得到的。R. D. Willis<sup>[20]</sup>等的结果是用两种类型的样品得到的。一种是用100mg标准牛肝粉压成饼制成厚靶。一种是用湿消化法制成溶液滴在Nuclepore滤膜上得到薄靶。从结果可见消化过程引起了挥发元素Se和Br的丢失。Jolly等<sup>[7]</sup>用10mg粉粘在Mylar衬底上制成薄靶。从表6可见三种实验结果表明PIXE分析结果与NBS推荐值符合得非常好。因此可以有把握地说PIXE的准确度是完全可以信赖的，特别是样品不经过化学处理结果的离散更小。

## 五、结 束 语

PIXE是近年来迅速发展起来的新的分析技术，属加速器离子束分析的一个分支。它和核反应分析、背散射分析一起扩大了小型加速器的应用能力。它与堆中子活化分析相辅相成共同提供了强有力的痕量元素分析方法。而痕量元素代谢规律和病理作用的研究不仅是当前生物学，也是临床医学和预防医学极为重要的方面，对痕量元素的深入研究有可能揭示某些严重病患的奥秘，为人类造福。而PIXE正是打开这个神秘大门的一把钥匙。

我们深信，PIXE方法将随着其方法学的进一步完善，生物样品预处理技术的改进，更广泛地深入到生物医学的各个领域中。核物理工作者和生物医学工作人员携起手来，让PIXE方法为揭示痕量元素在生命中的地位作出贡献。

本文承白光同志仔细审阅修改，特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] T. B. Johansson et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **84**, 141 (1970).
- [2] Proc. Int. Conf. on Particle-Induced, X-Ray Emission and its Analytical Applications, *Nucl. Instrum. Methods*, **142** (1977).
- [3] S. A. E. Johansson & T. B. Johansson, *Nucl. Instrum. Methods*, **137**, 473 (1976).
- [4] L. S. Birks et al., *J. Appl. Phys.*, **35**, 2578 (1964).
- [5] 马鑫培, Si (Li) X射线谱仪的分辨率与质子激发X射线分析, 待发表。
- [6] K. Kasparek et al., Proc. Symp. Nuclear Activation in the Life Sciences, 1972, Vienna, IAEA, p. 517.
- [7] R. K. Jolly et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **151**, 183 (1978).
- [8] 江芳林等, 内部资料, 1981.
- [9] H. A. Van Rinsvelt et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **142**, 171 (1977).
- [10] M. Barrette et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **134**, 189 (1976).
- [11] R. D. Vis et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **142**, 159 (1977).
- [12] R. M. Wheeler et al., *Med. Phys.*, **1**, 68 (1974).
- [13] P. L. Altman & D. S. Dittmer (Ed), *Biology Data Book* (2nd ed.), 1976, Vol. III.
- [14] Report of the Task Group on Reference Man, Inc. Comm. on Radiological Protection, Publication 23, Oxford Pergamon Press, 1975.
- [15] A. S. Lodhi et al., *J. Radioanal. Chem.*, **49**, 89 (1979).
- [16] 内部资料, (1), 24 (1982)
- [17] M. Pinta, *Modern Methods for Trace Element Analysis* ANN Arbor Science, 2nd Printing, 1978, p. 395.
- [18] J. A. Cookson & F. D. Pilling, *Phys. Med. Biol.*, **20**, 1015 (1975).
- [19] N. E. Whitehead, *Nucl. Instrum. Methods*, **164**, 381 (1979).
- [20] R. D. Willis et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **142**, 87 (1977).



# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



China Nuclear Information Centre