



国产小型加速器质谱仪及其应用前景

沈洪涛 陈定雄 张国峰 唐俊森 王立 祁林杰 欧阳河 韩欣怡 吴凯勇 王一飞 吴滨 谢意 包轶文 李康宁 何明 姜山

The Homemade Compact Accelerator Mass Spectrometry and It's Applications

SHEN Hongtao, CHEN Dingxiong, ZHANG Guofeng, TANG Junsen, WANG Li, QI Linjie, OUYANG He, HAN Xinyi, WU Kaiyong, WANG Yifei, WU Bin, XIE Yi, BAO Yiwen, LI Kangning, HE Ming, JIANG Shan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022082>

引用格式:

沈洪涛, 陈定雄, 张国峰, 唐俊森, 王立, 祁林杰, 欧阳河, 韩欣怡, 吴凯勇, 王一飞, 吴滨, 谢意, 包轶文, 李康宁, 何明, 姜山. 国产小型加速器质谱仪及其应用前景[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(2):257–263. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022082

SHEN Hongtao, CHEN Dingxiong, ZHANG Guofeng, TANG Junsen, WANG Li, QI Linjie, OUYANG He, HAN Xinyi, WU Kaiyong, WANG Yifei, WU Bin, XIE Yi, BAO Yiwen, LI Kangning, HE Ming, JIANG Shan. The Homemade Compact Accelerator Mass Spectrometry and It's Applications[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2):257–263. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022082

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

TMSR白光中子源本底屏蔽设计

Background Shielding Design for TMSR Photoneutron Source

原子核物理评论. 2020, 37(3): 777–783 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC38>

($n, xn \gamma$) 反应截面测量的实验本底改进研究

Research for Improving the Background of the Experiment of ($n, xn \gamma$) Cross Section

原子核物理评论. 2017, 34(2): 195–203 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.195>

小型加速器质谱系统研制及分析技术研究

Development the Miniaturized AMS System and Its Analysis Technique

原子核物理评论. 2020, 37(3): 784–790 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC01>

一种测量重核素的小型高压型加速器控制系统的研制

Development of a Control System for a Small High-pressure Accelerator for Measuring Heavy Nuclide

原子核物理评论. 2019, 36(4): 426–432 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.426>

等时性质量谱仪中 $N=Z$ 核质量测量的方法探索

Study of Mass-measurement Method for $N=Z$ Nuclei with Isochronous Mass Spectrometry

原子核物理评论. 2019, 36(3): 294–304 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.294>

低能加速器质子束流性质的测量(英文)

Measurement of the Proton Beam Characteristics of Low-energy Accelerators

原子核物理评论. 2017, 34(3): 454–458 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.454>

文章编号: 1007-4627(2023)02-0257-07

国产小型加速器质谱仪及其应用前景

沈洪涛^{1,2}, 陈定雄¹, 张国峰¹, 唐俊森^{1,2}, 王立¹, 祁林杰¹,
欧阳河¹, 韩欣怡¹, 吴凯勇¹, 王一飞¹, 吴滨¹, 谢意¹,
包轶文³, 李康宁³, 何明³, 姜山³

(1. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 广西师范大学小型加速器质谱系统 (GXNU-AMS) 于2017年底圆满建成并投入使用, 是我国首台自行研制的单极专用 AMS 装置, 也是目前设计能量最低的 AMS 装置之一。该装置采用 150 kV 端电压, 氦气剥离, 选择+1 电荷态测量, 在几年的运行中, 性能不断得到改进, ^{14}C 和 ^3H 的测量丰度灵敏度分别达到 $(3.14 \pm 0.05) \times 10^{-15}$ 和 $(1.23 \pm 0.17) \times 10^{-16}$, 并在多个学科领域中开展了应用研究。本工作简要介绍其性能特点、运行情况和应用概况, 为 AMS 的小型化和国内产业化提供实验数据, 同时为低能 AMS 在核物理, 地球科学, 环境科学和生命科学的应用提供技术手段。

关键词: 国产; 加速器质谱; 测量精度; 本底

中图分类号: O571.1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022082

0 引言

加速器质谱 (AMS) 技术是一种基于加速器和离子探测技术用于分析微量核素和探测稀有粒子的新方法^[1-3]。与其它依靠特定间接信息来获得被分析核素的分析技术相比较, AMS 能直接记录原子个数, 具有排除分子离子干扰以及鉴别同量异位素等多方面优势, 比常规分析技术和普通质谱计具有更高的灵敏度^[4]。同时 AMS 方法还具有样品用量少 (1 mg, 探测限可达 10^4 个原子), 测量时间短等优点, 在核物理学、考古学、地球科学、环境科学和生命科学等领域中具有十分广泛的应用^[5-8]。近年来, 加速器质谱设计趋于小型化, 建设成本大幅度降低^[9-10], 广西师范大学加速器质谱计 (GXNU-AMS) 于2017年底建成并成功地进行了 ^{14}C 测量, 继而在2020年完成了 ^3H 测量方法的建立^[11-13], 2018年以来正式投入运行并开始了系列应用研究和测量服务。此后在日常测试中, 不断针对束流品质, 测量精度、灵敏度等参数和方法进行了改进, 已成为具备自身特色且国际上有一定影响力的核物理实验平台。

1 GXNU-AMS 加速器质谱装置特点

广西师范大学 GXNU-AMS 系统是广西师范大学与中国原子能科学研究院联合研制的我国首台国产加速器质谱仪, 主要由铯溅射负离子源、预加速器、注入磁铁、电四极透镜、主加速器、气体剥离器、分析磁铁、静电分析器和探测器组成, 整个系统占地面积为 $2.5\text{ m} \times 4.6\text{ m}$, 如图1所示。离子源采用美国 NEC 公司 MC-SNICS 型 40 靶位多阴极铯溅射负离子源, 注入磁铁采用偏转角度 90° 、偏转半径 300 mm 的双聚焦二极磁铁, 磁铁内

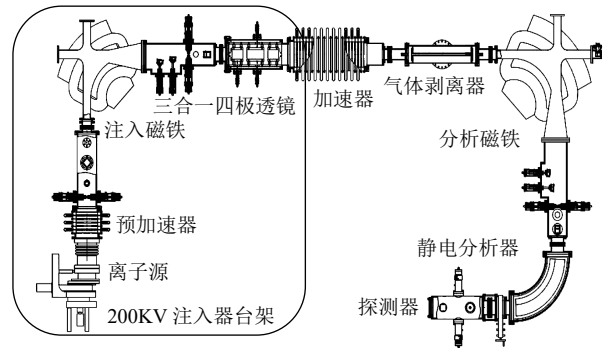


图1 GXNU-AMS 系统布局

收稿日期: 2022-11-17; 修改日期: 2023-01-25

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY22096024); 国家自然科学基金资助项目 (11775057, 11765004); 广西自然科学基金资助项目 (2017GXNSFFA198016, 2018GXNSFAA281233); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

作者简介: 沈洪涛 (1978-), 男, 广西桂林人, 教授, 博士, 从事加速器质谱技术研究, E-mail: shenht@mailbox.gxnu.edu.cn

部真空盒可交替施加高频电位以实现质量数为 12, 13 和 14 的负离子快交替注入, 束流在电四极透镜下聚焦并经 150 kV 加速管加速进入气体剥离器, 如图 2 所示。剥离管长度 500 mm, 内径为 10 mm, 中央部位开有 2 mm 的进气孔用于连接外部气瓶供气, 供气量采用质量流量计控制, 安装在外管壁的真空计 (ZJ-27 型宽量程热阴极电离规) 可监测剥离管中的剥离气体质量厚度值变化, 气体最后由剥离器下部 600 L/s 的涡轮分子泵机组抽离。负离子经气体剥离外层电子后, 以正离子的形式进入偏转角度 90°、偏转半径 355 mm 的双聚焦分析磁铁进行离子动量选择, 继而由偏转角度 90°、偏转半径 300 mm 的双聚焦球面型静电分析器对离子进行能量选择, 最后由半导体探测器对 ^{14}C 计数进行测定。探测器收集到的信号经过前置放大和谱仪放大器后, 由 ADC (ORTEC EASY-MCA-8k) 进行模数转换传输到后台计算机, 最终得到 ^{14}C 能谱图。注入磁铁和分析磁铁的像点分别设有两个偏置法拉第筒用于同时监测 ^{12}C 和 ^{13}C 束流。数据处理采用 ORTEC 多通道分析仪软件 MAESTRO^[14] 对 ^{14}C 能谱进行实时记录。同时, ^{14}C 计数率、高能端和低能端法拉第杯 ^{12}C 和 ^{13}C 束流数据被分别实时记录到 Microsoft Excel 表中, 用于样品的同位素分馏校正和 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 丰度分析^[11]。每个待测样品根据计数率大小分别进行 9 次 1~5 min 不等时段测量, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 丰度值和不确定度分别基于 9 次测量的平均值和相对标准偏差获得。同时, 待测样品和系列 ^{14}C 标准样品 OXII、IAEA-C7、IAEA-C8 和 IAEA-C1 等进行交替测量, 最后由标准样品测量值归一化后获得待测样品的 ^{14}C 丰度值。

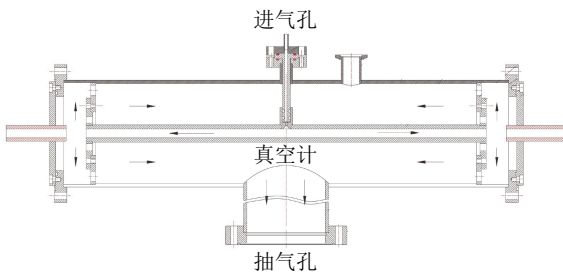


图 2 气体剥离器结构(在线彩图)

2 GXNU-AMS 测量方法的建立

2.1 剥离气体及其电荷态

在低能 ^{14}C -AMS 测量中, 选择合适的剥离气体和电荷态, 对提高 ^{14}C -AMS 测量灵敏度和精度具有极其重要的作用^[15-16]。在端电压为 150 kV 条件下, 实验采用了 4 种剥离气体 He、 N_2 、 O_2 、Ar, 通过改变剥离气体气压确定了 ^{12}C -离子经剥离气体后生产 +1、+2、+3 电荷的最佳传输效率。剥离气体与传输效率结果如表 1

所示。实验结果表明, 剥离气体种类对低能离子传输效率影响较大, 经 He 气剥离器的传输效率明显高于其他气体, 且 +1 态电荷传输效率明显高于 +2、+3 态。因此综合剥离气体性质、传输效率等方面因素考虑, 装置选择 He 作为剥离气体, +1 作为待测电荷态。

表 1 端电压 150 kV 下不同剥离气体中的 $^{12}\text{C}^+$ 、 $^{12}\text{C}^{2+}$ 和 $^{12}\text{C}^{3+}$ 的传输效率

剥离气体	传输效率/%		
	$^{12}\text{C}^+$	$^{12}\text{C}^{2+}$	$^{12}\text{C}^{3+}$
He	47.00	15.30	0.40
N_2	20.90	6.20	0.30
O_2	24.80	7.50	0.40
Ar	25.70	5.10	0.10

2.2 分子本底与剥离气体质量厚度

压低本底干扰是实现 AMS 高灵敏测量的必要途径, 由于 ^{14}N 不能形成负离子, ^{14}C 测量不存在同量异位素 ^{14}N 的干扰, 所以测量本底主要来自分子离子的干扰(如: $^{13}\text{CH}^-$, $^{12}\text{CH}_2^-$)。气体剥离技术是抑制分子本底的有效手段, 通过增加剥离气体质量厚度可有效瓦解并抑制分子离子本底干扰^[17-18], 但随着剥离气体的质量厚度的增高, 离子能量和传输效率大幅降低, 同时也会造成真空问题增加通过电荷交换带来的同位素(如 ^{13}C 、 ^{12}C)干扰几率。因此, 设置合适的剥离气体质量厚度, 达到传输效率与本底计数的平衡, 这是低能 AMS 高灵敏测量的关键。图 3 中分别利用标准样品和空白样品研究了剥离气压与束流传输效率及离子计数率的关系。

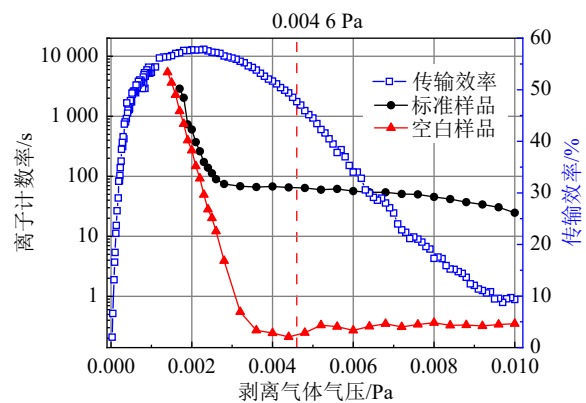


图 3 分子离子本底、传输效率随剥离气压的变化关系(在线彩图)

实验结果显示, 束流传输效率随着剥离气体质量厚度的增大先急剧增大, 然后达到一个平台后缓慢下降, 但这并不意味着选择较低的剥离气压对 AMS 测量更有利, 因为剥离气压更低时分子本底计数更高。因此, 在考虑剥离气压对传输效率的影响的同时还需要考虑对分

子本底水平的压低。综合考虑上述因素，选择 4.6×10^{-3} Pa 的剥离气压值作为最佳的剥离气压，可在充分排除分子本底计数干扰(^{14}C 测量灵敏度优于 3.2×10^{-15})的同时保证传输效率达到 47% 以上。

2.3 GXNU-AMS 系统调试

AMS 系统的调试是确定加速器各部分电磁原件参数的过程，特别对于国产系统而言，细致而恰到好处的调试是 AMS 的高灵敏度和精确度的关键。首先，等待离子源状态稳定后，引出 ^{13}C 离子束流调试装置中各电磁部件的工作参数，使探测器端法拉第杯达到尽可能高

的束流，即获得尽可能高的传输效率。然后引出 ^{14}C 离子调试系统中各磁部件的对应工作参数，特别是获得磁元件参数随系统计数率变化的“平顶”特性曲线，尽可能确保磁元件有较宽的“平顶”区。为保证装置长时间运行时束流传输效率的稳定性，要求在系统调试时每个磁部件的工作参数尽量位于其“平顶”曲线的中央平台位置，如图 4 所示。最后，调节探测器和数据获取系统参数使 ^{14}C 离子在能谱上位于一个合适的位置，即可开始测量。目前，GXNU-AMS 对于 OXII 标样的探测计数率约 120 计数/s。

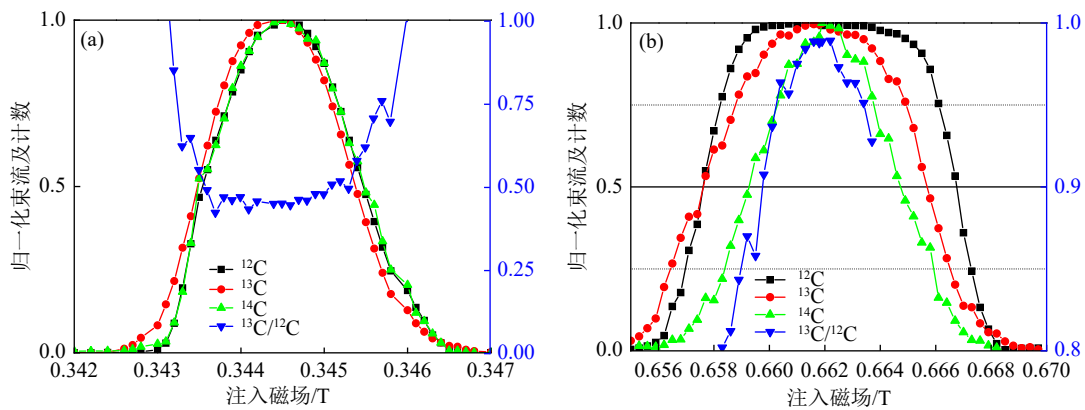


图 4 注入磁铁 (a) 与分析磁铁 (b) ^{12}C 、 ^{13}C 束流 ^{14}C 计数平顶调试 (在线彩图)

2.4 ^{14}C 测试性能

为了检验 GXNU-AMS ^{14}C 测量性能，利用系列 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 原子数比值已知的国际标准样品 OXII (134.07 pMC)、IAEA-C7 (49.53 pMC)、IAEA-C8 (15.03 pMC)、IAEA-C1 (0.00 pMC) 和商业空白石墨样品 (0.00 pMC) 进行了测定，其中 pMC 代表现代碳的百分含量。测量结果如图 5 所示，标准样品的测量结果与标称值符合线性关系，验证了研制的 AMS 系统测量数据的可靠性。未经加工的商业石墨机器本底测量结果如图 6 所示，本底值为 0.27 ± 0.02 pMC ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值为 $3.14 \pm 0.27 \times 10^{-15}$)，相当于 ^{14}C 年龄约 47 000 a。流程空白测量结果如图 7 所

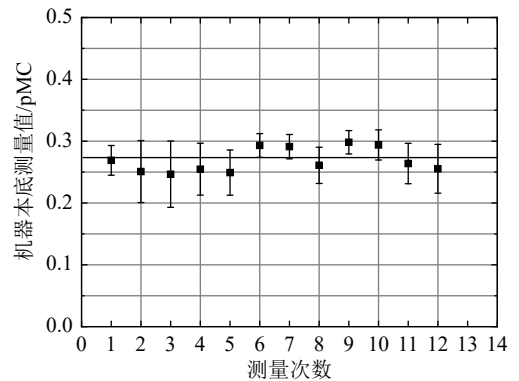


图 6 AMS 机器本底测量值

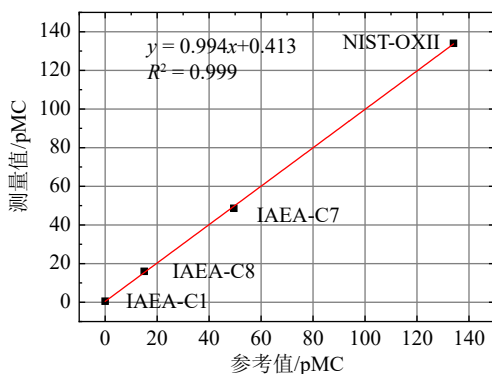


图 5 标准样品测量值与标称值线性关系 (在线彩图)

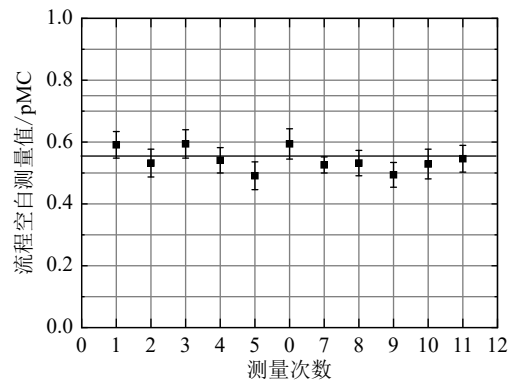


图 7 流程空白多次测量值

示, 流程本底值在 0.49~0.62 pMC 之间, 平均值为 (0.55±0.04) pMC [¹⁴C/¹²C 比值为 (6.47±0.48)×10⁻¹⁵] 相当于 ¹⁴C 年龄约为 40 500 a。此外, 国际标准样品草酸测量结果如图 8 所示, 平均 pMC 为 (134.11±0.41) pMC, 在允许误差范围内与公认标准值 134.07 pMC 一致, IAEA-C8 的 pMC 值为 (15.17±0.22) pMC, 亦与公认的标准值 15.03 pMC 一致。同时, 标准样品的不同时段多次测试结果得出系统的精度在 0.6% 左右 (相对标准偏差), 表明 AMS 系统有良好的测量精度和稳定性, 可满足 4.7 万年本底范围内地球科学、环境科学和生命科学等领域的测量需要。

2.5 ³H 测试性能

为了验证 GXNU-AMS ³H 测量性能, 实验室配备了一系列浓度梯度的氚水样品 (如表 2): 1[#] (4.55×10⁷ TU)、

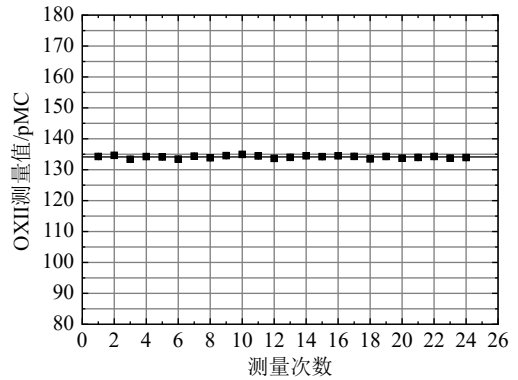


图 8 标准样品 OXII 多次测量值

2[#] (4.83×10⁶ TU)、3[#] (5.37×10⁵ TU)、4[#] (5.46×10⁴ TU) 和美国阿法埃莎公司的商业 TiH₂ (0.00 TU) 作为加速器测量的标准样品核本底样品, 其中 1 TU 代表 ³H/H=1×10⁻¹⁸。

表 2 梯度浓度的氚水放射性活度表

编号	配置方法	标准液浓度	H-束流/μA	³ H 计数率/s	AMS 实测浓度/TU
1 [#]	标准原液	4.55×10 ⁷ TU	17.85	2 138.00	(4.47±0.05)×10 ⁷
2 [#]	1.072 g 标准原液+9.024 g 的去离子水	4.83×10 ⁶ TU	16.93	210.00	(4.63±0.03)×10 ⁶
3 [#]	1.127 g 的样品 2+9.022 g 的去离子水	5.37×10 ⁵ TU	15.68	21.90	(5.21±0.05)×10 ⁵
4 [#]	1.069 g 的样品 3+9.077 g 的去离子水	5.46×10 ⁴ TU	13.76	1.98	(5.37±0.09)×10 ⁴

标准样品经实验室制备系统制备成 TiH₂, 由 GXNU-AMS 系统测量。商业 TiH₂ 本底和标样测量谱图如图 9 所示, 剥离气体外部气压优化为 6.5×10⁻³ Pa 的条件下, 未发现明显的其他干扰离子。测量结果线性拟合见图 10 所示, 标准样品的测量结果与标称值符合线性

关系, 验证了系统测量 ³H 数据的可靠性。从氚样品的引出束流大于 10 μA, 已能满足 AMS 实验测量对样品的要求; 未经加工的 TiH₂ 样品机器本底测量值为 T/H 为 (1.23±0.17)×10⁻¹⁶ (~100 TU), 已达国际 ³H-AMS 测量水平。

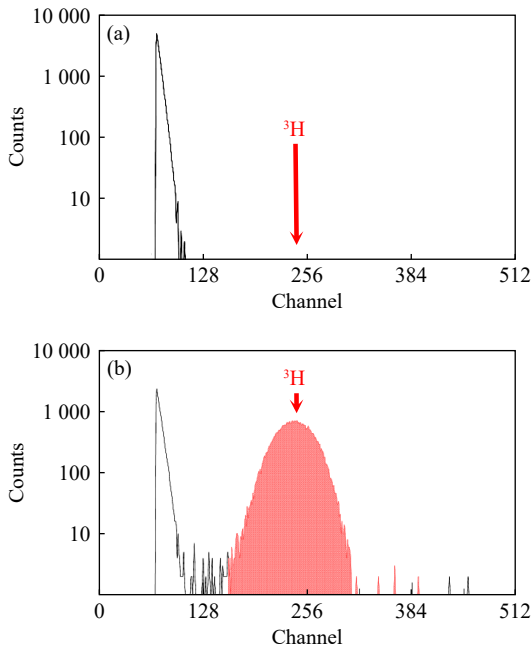


图 9 商业 TiH₂ 本底 (a) 和标准样品 2[#] 测量谱图 (b) (在线彩图)

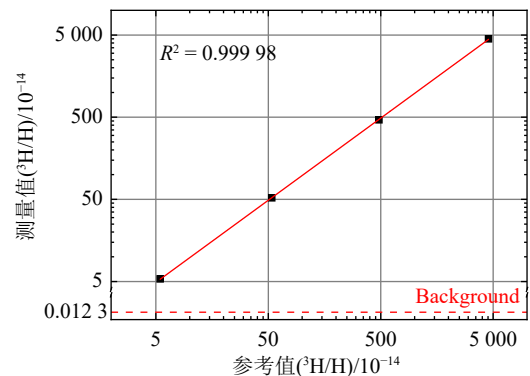


图 10 不同浓度氚水 ³H/H 的标准样品测量值与标称值线性关系 (在线彩图)

3 GXNU-AMS 与国际上同类型商用 AMS 的性能对比

近年国际上商用 AMS 装置已逐渐向低成本、小型化和标准化的方向发展。在小型化方面, 美国 NEC 公司推出了端电压为 250 kV 的单级静电加速器的 AMS 系

统(SSAMS)^[19-20]; 瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)的AMS实验室与Ionplus公司合作研制了端电压200 kV专用¹⁴C桌面AMS系统^[21-22]; 荷兰HVEE近年也推出了200 kV小型¹⁴C专用AMS^[23]。广西师范大学于2017年建成了150 kV单极静电AMS(GXNU-AMS)系统。正

式投入运行以来, 不断针对提高束流品质、测量精度、灵敏度等测量方法进行了一些改进, 进一步提高了GXNU-AMS的各项性能。目前国产AMS性能指标与国际上同类型小型化商业AMS性能对比如表3所列, 主要参数指标已接近或达到同类型商业AMS水平。

表3 国际上同类型小型化商用AMS产品和技术特点

产地和关键技术参数	美国NEC(SSAMS)	瑞士Ionplus(MICADAS)	荷兰HVEE(4102Bo-AMS)	中国(GXNU-AMS)
端电压/kV	250	200	200	150
传输效率/%	41~43	47	50	47
测量本底	2×10^{-15}	$< 1 \times 10^{-15}$	1.5×10^{-15}	3×10^{-15}
测量精度/%	0.2	0.2%	0.2%	0.6
¹² C束流/ μ A	25~30	35~50	50~100	30~50
设备尺寸/m	5.3×4.2	2.5×3.0	3.1×2.8	2.5×4.5
加速器类型	单极静电加速器	串列加速器	串列加速器	单极静电加速器
测量核素	¹⁴ C专用	¹⁴ C专用	¹⁴ C专用	¹⁴ C和 ³ H

4 GXNU-AMS应用研究概况

4.1 ¹⁴C-AMS技术油田井间示踪应用

我国中原油田自1979年投入开发至今, 已有30多年的开发历史。大部分油田已进入高含水、特高含水开发后期, 目前全油田平均综合含水已达86.1%, 而采出程度仅21.5%, 特别是胡状集等油田经过多年的强注强采, 大部分开发区块已普遍存在大孔道现象, 严重威胁着中原油田的稳产开发。鉴于此, 课题组采用¹⁴C示踪技术, 以加速器质谱作为测量手段在中原油田胡136块油藏开展油田井间示踪研究, 见文献^[24]。示踪剂采用¹⁴C标记的尿素, 结合中原油田实际情况, 将定量示踪剂注入注入流体, 使其通过注入井进入储层并跟随注入流体穿越地层, 最后被采油井采出。

根据井间示踪监测方案要求, 自投放之日起, 隔天对注入井组周边对应油井取样一次进行示踪剂产出情况监测, 并及时进行AMS测量分析。AMS测量所得到的实验数据经过本底校正及标准样品归一化后, 将示踪实验各时间点的测量结果对应取样日期作图。此次实验从2020年10月30日开始到2021年3月27日, 监测时长149天, 共298井次。H136-C1井组的H136-2和H136-8两口采出井均有示踪剂产出, 从示踪剂产出曲线分析可明显看出, H136-2井第14天就见到示踪剂, 浓度峰值时间在第65天、第77天。H136-8井在第58天见到示踪剂, 峰值浓度时间在第92天、第135天。利用建立好的井间示踪监测解释模型对油田实验得出的示踪剂实际响应曲线进行拟合, 获得注水井-采油井之间流体和储层的信息。此工作首次建立了¹⁴C示踪评价地下油藏特征的标准分析方法, 为我国油田的二次、三次开采过程提供了科学指导方案和理论依据。

4.2 广西野生古茶树断代

野生古茶树是一种珍贵的自然资源, 通过野生古茶树的年龄可了解树木的种群动态, 确定树木历史变化原因, 有助于发展可持续的茶叶资源产业实践。课题组采用¹⁴C-AMS测年法测定广西百色隆林、凌云地区、贵港等地野生古茶树的年龄^[25], 经过日历年龄的校正后的测量结果表明, 所研究的10余个野生古茶树样品年龄分布在250~700 a之间, 生在中国的清朝至元代间。其中, 年代最久远的茶树编号为5#隆林, 树木半径为28.66 cm, 树身高度15.00 m, 年龄达到682 a; 年代距2016年最近的茶树编号为13#凌云, 树木半径为10.40 cm, 树身高度22.00 m, 年龄为264 a。结合广西桂林茶科所已知年龄的12棵幼龄茶树信息进行模型拟合, 结果表明茶树年龄与半径、生长速率高度相关, 其中茶树半径与年龄成正比关系为: $y=27.302x-51.594$; 茶树径向生长速率受茶树年龄限制, 最终趋向于平衡; 茶树纵向生长速率与年龄呈反比关系, 树高的生长最终受到其年龄的限制; 茶树树幅与树高也显著相关, 为今后优质茶叶产业的发展和茶树相关研究工作提供了重要经验依据。

4.3 其他¹⁴C应用研究

地下水的年龄或滞留时间与地下水的补给径流过程密切相关, 是含水层或含水系统与外界水量交换及其内部物质运移过程的体现, 反映了含水层的可更新能力, 同时也是地下水资源管理很重要的指标。课题组研发出一种全新水样制备系统用于加速器质谱¹⁴C测年^[26-27], 并与中国人民解放军某部合作开展了新疆地区地下水测年研究工作, 前期工作共分析了40余个样品, 测定年龄为3 000~20 000 a不等, 为研究沉积盆地的地下水年

龄及地下水纹环境提供了解决方案。同时,项目组与中国原子能科学研究院合作对我国第一座重水研究堆(101堆)石墨热柱中的 ^{14}C 和 ^3H 含量进行了专项测试分析,对我国新型反应堆中新构件、新材料的设计、研发,以及核设施设备的运行、老化和寿命评估等,都具有重要的参考价值。这批应用成果的取得进一步验证了GXNU-AMS装置和测量方法是成功且可靠的^[23-26]。

5 结论与展望

广西师范大学小型加速器质谱系统(GXNU-AMS)是首台我国自行研制的单极静电 ^{14}C 专用AMS装置,对我国获取原始创新成果和自主知识产权,突破技术封锁都有重要的意义。通过近五年的运行及相关技术方法升级,离子源真空度由原来的 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 提高到 $2.0\times 10^{-5}\text{ Pa}$,高能端系统真空度由原来的 $2.0\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 提高到 $8.0\times 10^{-6}\text{ Pa}$,加速器束流值由原来 $15\text{ }\mu\text{A}$ 提高到 $50\text{ }\mu\text{A}$,通过优化加速器管道和探测器准直, ^{14}C 探测效率大幅增高,OXII标样每 $\mu\text{A}^{12}\text{C}$ 引出束流的 ^{14}C 计数率由原来 $1.5\text{ counts}/(\mu\text{A}\cdot\text{s})^{12}\text{C}$ 增加到优于 $2.5\text{ counts}/(\mu\text{A}\cdot\text{s})^{12}\text{C}$,测量丰度灵敏度由原来 1×10^{-14} 提高到 3×10^{-15} ,已接近国际同类型加速器质谱性能,建成了能反映我国科技实力,在国内外具有一定影响力的小型加速器质谱科学装置。同时利用该装置开展了包括油田示踪技术、广西古茶树断代、地下水断代等多项区域特色应用研究,使传统理论学科成果转化为促进区域科技进步的能力,为区域社会经济发展贡献力量,为国家战略发展的产业需求提供了有力技术支撑。但是,国产AMS系统今后要实现产业化,技术和应用全面成熟还需要一个过程,特别是对于普通实验室用户而言,国产AMS系统的自动化控制、人机互动性和界面系统的友好性仍有改进的空间。这个过程仍需要政府和相关部门在政策上的支持,仍需要AMS领域科学家进一步的努力和科研实践。今后,GXNU-AMS装置的运行将遵循全面开放、高效运行的机制,建设成服务于核科学、地球科学、环境科学和生命科学等研究领域的开放性AMS装置,成为凝聚和培养高水平人才的西部地区高水平科研平台。

参考文献:

- [1] MULLER R A. *Science*, 1977, 196: 489.
- [2] ELMORE D, PHILLIPS F M. *Science*, 1987, 236(4801): 543.
- [3] MENG Qi, SHEN Hongtao, MAO Liqiang, et al. *Journal of Guangxi Normal University*, 2017, 35(1): 16. (in Chinese)
- [4] SHEN Hongtao. *Guangxi Physics*, 2012(2): 41. (in Chinese) (沈洪涛. 广西物理, 2012(2): 41.)
- [5] TUNIZ C, BIRD J R, FINKD, et al. *Accelerator Mass Spectrometry: Ultrasensitive Analysis for Global Science*[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998: 371.
- [6] FIFIELD L K. *Reports on Progress in Physics*, 1999, 62: 1223.
- [7] DONG Kejun, HE Ming, WU Shaoyong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2006, 23(1): 18. (董克君, 何明, 武绍勇, 等. 原子核物理评论, 2006, 23(1): 18.)
- [8] HE Ming, JIANG Shan, DONG Kejun, et al. *Nuclear Physics Review*, 2004, 21(3): 210. (in Chinese) (何明, 姜山, 董克君, 等. 原子核物理评论, 2004, 21(3): 210.)
- [9] HE Ming, BAO Yiwen, SU Shengyong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3): 784. (in Chinese) (何明, 包轶文, 苏胜勇, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(3): 784.)
- [10] HE Ming, ZHAO Qingzhang, ZHANG Wenhui, et al. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(1): 54. (in Chinese) (何明, 赵庆章, 张文慧, 等. 原子核物理评论, 2022, 39(1): 54.)
- [11] SHEN H, ZHANG G, TANG J, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2022, 532: 68.
- [12] TANG J, SHEN H, WANG L, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2023, 535: 261.
- [13] ZHAO Zhenchi, QIN Yongfu, LI Jiahao, et al. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2020, 41(5): 462. (in Chinese) (赵振池, 覃永富, 李嘉浩, 等. 质谱学报, 2020, 41(5): 462.)
- [14] ORTEC. MAESTRO多道分析仪仿真. [EB/OL]. [2022-07-25]. <https://www.ortec-online.com.cn/products/application-software/maestro-mca>.
- [15] LITHERLAND A E. *Nucl Instr and Meth B*, 1984, 5(2): 100.
- [16] LEE H W, GALINDO-URIBARRI A, CHANG K H, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 1984, 5(2): 208.
- [17] SUTER M, JACOB S, SYNAL H A. *Nucl Instr and Meth B*, 1997, 123: 148.
- [18] SYNAL H A, JACOB S, SUTER M. *Nucl Instr and Meth B*, 2000, 162: 29.
- [19] SKOG G. *Nucl Instr and Meth B*, 2007, 259: 1.
- [20] YOKOYAMA Y, MIYAIRI Y, AZE T, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2019, 455: 311.
- [21] BARD E, TUNA T, FAGAULT Y, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2015, 361: 80.
- [22] MOLLENHAUER G, GROTHEER H, GENTZ T, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2021, 496: 45.
- [23] SCOGNAMIGLIO G, KLEIN M, VAN DE HOEF F L, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2021, 492: 29.
- [24] SHEN Hongtao, SHI Shulin, TANG Junsen, et al. *Radiocarbon*, 2022, 64(5): 1159.
- [25] CHEN Jia, SHEN Hongtao, SASA K, et al. *Radiocarbon*, 2019, 61(6): 1741.
- [26] QI Mingli, LI Zhaomei, TANG Junsen, et al. *Journal of Isotopes*, 2021, 34(3): 273. (in Chinese) (齐明丽, 李昭梅, 唐俊森, 等. 同位素, 2021, 34(3): 273.)
- [27] SHEN H, TANG J, WANG L, et al. *Radiocarbon*, 2022, 64(6): 1501.

The Homemade Compact Accelerator Mass Spectrometry and It's Applications

SHEN Hongtao^{1,2,1)}, CHEN Dingxiong¹, ZHANG Guofeng¹, TANG Junsen^{1,2}, WANG Li¹, QI Linjie¹, OUYANG He¹, HAN Xinyi¹, WU Kaiyong¹, WANG Yifei¹, WU Bin¹, XIE Yi¹, BAO Yiwen³, LI Kangning³, HE Ming³, JIANG Shan³

(1. College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Guangxi key laboratory of nuclear physics and nuclear technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The Accelerator Mass Spectrometry System of Guangxi Normal University(GXNU-AMS) was successfully installed and operated in 2017. It is the first homemade single-stage AMS system facility and one of the lowest-energy AMS systems in China. The system adopts 150 kV terminal voltage, helium stripping, and +1 charge state in measurements. During several years of operation, its performance has been improved continuously. The measured abundance sensitivity of ^{14}C and ^3H has reached $(3.14\pm 0.05)\times 10^{-15}$ and $(1.23\pm 0.17)\times 10^{-16}$, respectively, and the application research has been carried out in multidisciplinary field. The performance characteristics, operation, and application of AMS are briefly introduced to provide experimental data for the miniaturization and industrialization of AMS in China and to provide technical tools for the application research of low-energy AMS in nuclear physics, geological science, environmental science, and biomedicine.

Key words: homemade; accelerator mass spectrometry; measurement accuracy; background

Received date: 17 Nov. 2022; **Revised date:** 25 Jan. 2023

Foundation item: Central Government Guidance Funds for Local Scientific and Technological Development, China(ZY22096024), National Natural Science Foundation of China(11775057, 11765004); Natural Science Foundation of Guangxi Province, China(2017GXNSFFA198016, 2018GXNSFAA281233); High-level Innovation Team and Outstanding Scholars Program of Guangxi Colleges and Universities

1) E-mail: shenht@mailbox.gxnu.edu.cn