中国科学: 物理学 力学 天文学 2025 年 第 55 卷 第 11 期: 111014
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 锦屏深地前沿研究专题

人体痕量放射性核素测量实验TRACE研究进展

刘圆圆[1,2,3], 吴彬[1,2,3*], 孟祥鹏[2,3,4*], 闫聪冲[5], 王宇[1,2,3], 王菁[1,2,3], 周来[1,2,3], 鞠澳[1,2,3], 曾志[4], 岳骞[4], 程建平[1,2,3]

1. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875
2. 生态环境部 北京师范大学锦屏极低辐射本底测量联合实验室, 北京 100875
3. 锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 凉山 615000
4. 清华大学工程物理系, 北京 100084
5. 苏州大学苏州医学院放射医学与防护学院, 苏州 215031
*联系人, 孟祥鹏, E-mail: mengxp@mail.tsinghua.edu.cn; 吴彬, E-mail: bwu6@bnu.edu.cn

收稿日期: 2024-10-01; 接受日期: 2024-11-21; 网络出版日期: 2025-02-07
国家自然科学基金(编号: 12222502)资助项目

摘要 长期、低剂量辐射暴露健康效应研究是辐射防护领域的重要科学前沿之一. 相较于高剂量明确的健康效应, 低剂量健康风险评价严重缺少基础实验数据支撑. 北京师范大学TRACE团队依托中国锦屏地下实验室, 正致力于通过人体痕量放射性核素测量的途径, 为长期、低剂量辐射的潜在风险评价提供重要的科学基础实验数据. TRACE团队第一阶段研究对象为人体头骨Pb-210活体直接测量, 其中主要关键问题包括: (1) 测量信噪比低; (2) 效率刻度误差大; (3) 人体Pb-210来源广泛且代谢规律复杂. 针对上述关键问题, 本文介绍了TRACE团队的主要研究进展. 针对问题(1), TRACE团队开展了活体直接测量中屏蔽室内本底来源分析, 结果表明宇宙射线、屏蔽材料及测量设备中的本底, 以及受试者体内的K-40是主要本底贡献, 占比分别约为12%, 24%和58%. 针对问题(2), TRACE团队研究了不同体模类型对头骨Pb-210效率刻度的影响, 结果表明仿真度较低的BOMAB和MIRD体模与高仿真MIDA体模的计数效率偏差可达40%以上. 针对问题(3), TRACE团队建立了人体Pb-210全身生物动力学模型, 并开展了人体Pb-210溯源分析, 结果表明作为典型摄入来源的茶叶和烟草中Pb-210比活度范围分别为8.15–49.67和21.74–31.16 Bq/kg.

关键词 低剂量辐射, 直接测量, Pb-210

PACS: 87.19.xj, 87.52.-g, 87.53.-j, 87.66.Jj

1 引言

低剂量电离辐射人体健康效应研究是辐射防护领域的前沿热点之一. 近年来, 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)正在持续推动相关研究[1–3]. 与高剂量电离辐射引发的明显健康效应相比, 低剂量健康

引用格式: 刘圆圆, 吴彬, 孟祥鹏, 等. 人体痕量放射性核素测量实验TRACE研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111014
Liu Y Y, Wu B, Meng X P, et al. Research progress in the trace-level radionuclides *in vivo* counting experiment (TRACE) (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111014, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0428

© 2025 《中国科学》杂志社

效应研究仍处于探索阶段. 目前, 低剂量健康风险评价多通过较高剂量数据外推而来, 尚无法建立准确的“剂量-健康风险”模型, 主要原因在于缺乏充分的基础实验数据支撑, 如图1所示[4]. 其中, 曲线b代表研究中常使用的线性无阈模型(LNT).

低剂量辐射暴露具有长期、持续性等特点, 特别是当放射性核素通过吸入、食入、皮肤渗透等途径进入人体内后, 能够对人体产生持续内照射损伤. 目前TRACE(Trace-level RAdionuclides *in vivo* Counting Experiment)团队正通过人体痕量放射性核素测量, 为长期、低剂量辐射的潜在风险评价提供基础实验数据. 其中, 活体直接测量技术是实现该方法的重要手段之一, 它可通过完全无损的方式, 利用体外探测器测量放射性核素自发衰变发射的γ射线, 从而推算器官或组织中目标核素活度, 并据此评估内照射引起的损伤. 在此基础上, TRACE团队关注的目标核素包括U-235/238, Th-234, Pb-210等较长寿命放射性核素, 通过直接测量此类核素的含量可以评估个体累积暴露量, 实现个体回顾性健康评价.

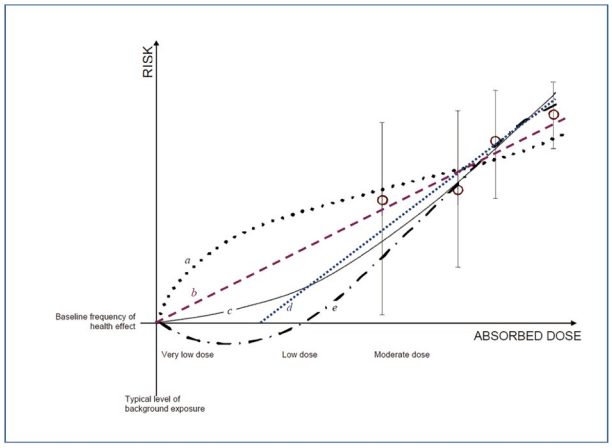


图 1 剂量与健康风险的关系. 这里的剂量是指在自然辐射暴露基础上增加的剂量. 图中数据点和置信区间表示在人群中观察到的由于中等剂量辐射暴露增加的患癌风险. 不同类型线条代表在低剂量和极低剂量范围内几种由外推得来的剂量-健康风险模型: a, 超线性; b, 线性无阈(LNT); c, 线性二次方; d, 阈值; e, 激励[4]

Figure 1 The relationships between dose and health risk. The doses in the figure are in addition to the total background exposure to natural sources of radiation. The data points and confidence intervals marked on the graph represent observations of increased risk of cancer in populations exposed to moderate doses. The various lines represent several dose-health risk models extrapolated in the low and very low dose ranges: a, supralinear; b, linear non-threshold (LNT); c, linear-quadratic; d, threshold; e, hermetic [4].

目前, TRACE团队第一阶段主要关注的人体痕量放射性核素为Pb-210, 它是氡的衰变子体. 氡被列为I类致癌物质, 是导致肺癌的第二大诱因, 仅次于吸烟. 世界卫生组织(WHO)指出, 全球3%–14%的肺癌病例与氡暴露有关[5]. 此外, 氡暴露引发的健康效应并不限于矿工. 根据美国环境保护署(EPA)估计, 包括普通人口在内, 大约13.4%的美国肺癌病例与氡暴露有关[6]. 因此, 研究氡暴露致患肺癌风险对于保障职业人员以及普通公众的健康安全至关重要.

氡累积暴露量是国际放射防护委员会(ICRP)[7,8]用于评估个体患肺癌风险的关键依据. 目前, 研究人员正在探索一种前沿方法, 即通过活体直接测量头骨中Pb-210活度来重构氡的累积暴露量(如图2所示)[9]. 该方法的科学基础主要包括以下几点: 首先, Pb-210是Rn-222的衰变子体, 半衰期约为22年; 其次, Pb-210衰变产生的46.5 keV γ射线可穿透人体并被体外探测器探测到; 最后, Pb-210具有亲骨性, 可视为在骨骼中均匀分布. 因此, 通过测量骨骼中Pb-210活度有望重构氡的累积暴露量, 从而实现个体回顾性健康评价. 其中, 在人体的所有骨骼中, 头骨表面积最大, 约占总体骨骼质量的13%–15%, 其上层表皮最薄, 且个体间的差异较小, 是进行Pb-210活体直接测量的最佳选择[10].

自从Eisenbud等人[11]1969年对科罗拉多高原54名铀矿工人的头骨的Pb-210活度进行了活体直接测量实验, 并验证了人体头骨Pb-210计数与氡累积暴露量的正相关性(线性相关系数为0.64)以来, 半个多世纪里, 美国[12–14]、德国[15]、巴西[16,17]、中国[18]等国家的研究机构纷纷开展了相关研究. 然而, 这项技术仍然面临很多挑战, 主要表现在以下三个方面: (1) 理论计算表明人体头骨中Pb-210含量接近痕量量级(~10^{-12} g), 且活度和射线能量较低, 导致探测器中有效信号仅为本底计数的~1/100, 因此头骨Pb-210活体直接测量极易受到本底干扰; (2) 效率刻度必须尽可能与受测人实验条件保持一致, 因此研究人员通常制备仿真体模复刻受测人的测量场景, 但由于个体间解剖学和生理学特征存在差异, 给人体头骨Pb-210仿真体模制作带来了困难, 造成了效率刻度因子存在较大误差; (3) 人体Pb-210来源广泛且代谢规律复杂. 除氡及其子体的贡献外, 水和食物中的Pb-210摄入也是重要来源. 此外, 不同的摄入途径(吸入或食入)导致Pb-210在体内的代谢规律有所不同, 进一步增加了Pb-210溯源分析的难度.

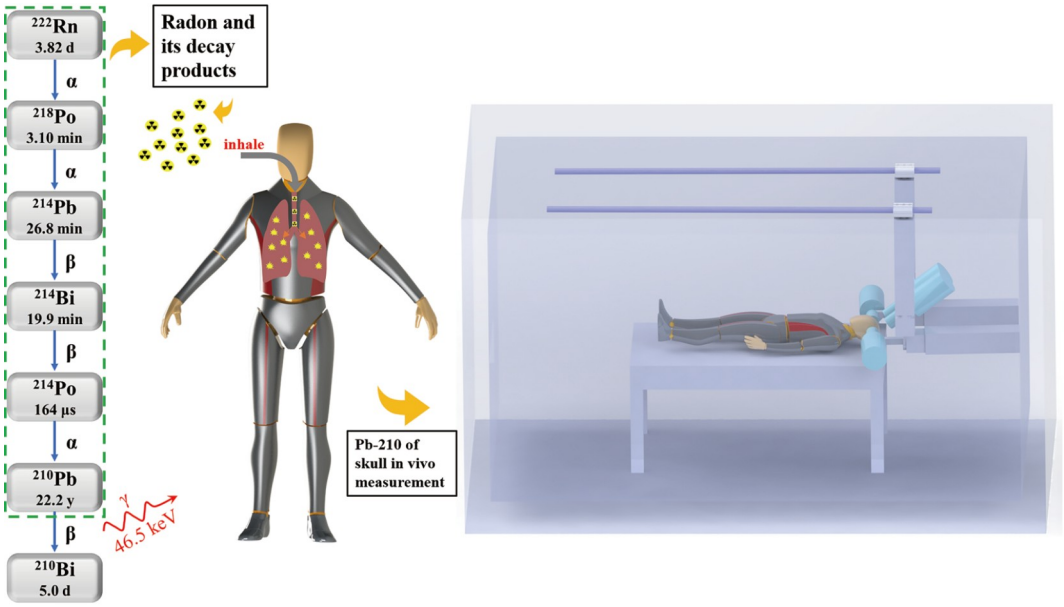


图 2 人体头骨Pb-210直接测量示意图[9]

Figure 2 Schematic diagram of *in vivo* measurement of Pb-210 in the skull [9]. Copyright©2021, Frontiers in Energy Research.

为解决上述关键问题, TRACE团队已经在北京师范大学开展了本底来源分析及抑制(第2节)、头骨Pb-210效率刻度(第3节)以及Pb-210全身生物动力学模型构建及来源分析(第4节), 成果可为长期氡暴露人体健康评价提供重要基础实验数据, 如图3所示. 本文将介绍TRACE团队的初步研究成果, 并对现阶段的工作进展分别进行详细阐述.

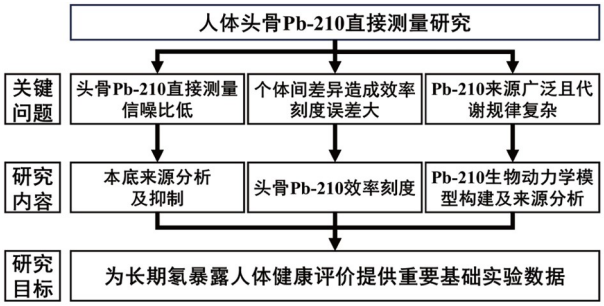


图 3 人体头骨Pb-210直接测量关键问题、研究内容以及研究目标的关系框图

Figure 3 Relationship diagram of key issue, research content, and objective for *in vivo* measurement of Pb-210 in the skull.

2 本底来源分析及抑制

2.1 本底来源分析

在活体直接测量过程中, 本底来源主要包括: 受试者体内的放射性核素K-40、屏蔽材料及测量设备中的放射性、宇宙射线、环境γ辐射及空气中的氡. TRACE团队针对国内4套典型的直接测量装置(其内部结构如表1所示)进行了本底测量, 分析了不同本底来源的贡献[19]. 研究结果显示, 屏蔽室内的本底约有4%来自环境γ辐射的衰减. 通过调节通风系统发现, 空气中氡引起的本底约占总本底的3%. 另外, 受试者体内的K-40贡献最大, 约占58%. 其余的12%和24%分别来自宇宙射线和屏蔽材料及测量设备中的自发放射性. 图4展示了各本底来源的具体贡献[19]. 该结果表明, 通过建造屏蔽室可以有效抑制环境γ辐射. 然而, 宇宙射线、屏蔽材料及测量设备中的本底, 以及受试者体内的K-40仍占较大比重, 需进一步采取措施加以降低. 为提高头骨Pb-210的信噪比, TRACE团队已开展了一系列本底抑制方法研究, 具体方法将在下文详细介绍.

2.2 屏蔽室设计

环境γ辐射是无屏蔽条件下测量装置中主要的本底来源, 借助屏蔽材料对γ射线的吸收和衰减, 可以有效降低其水平. 为了有效抑制环境中γ辐射, TRACE团队基于蒙特卡罗模拟, 开展了屏蔽材料选择和厚度优化的研究. 该研究的核心在于构建环境γ本底模型, 其

表 1 四套直接测量装置的屏蔽室材料及尺寸[19]

Table 1 Materials and dimensions of the shielding room for 4 sets of *in vivo* measurement devices [19]. Copyright©2022, Nuclear Science and Techniques

测量装置	材料	厚度 (cm)	等效钢厚度 (cm)	内部尺寸 (m)
A	钢	15	17.8	1.8×1.1×1.7
	铅	1.5		
	铜	0.5		
	聚乙烯	0.5		
B	钢	10	11.2	2×1×1.46
	铅	0.3		
	铜	0.6		
	聚乙烯	0.4		
C	钢	20	22.9	2.2×1.7×2.1
	铅	2		
D	钢	15	15	2.18×2.08×1.22

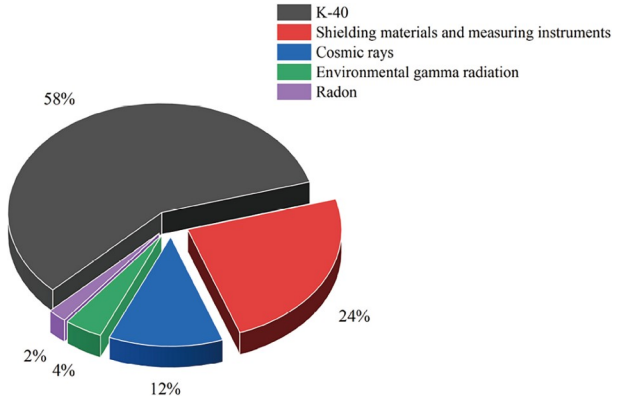


图 4 直接测量装置中的各本底来源的贡献[19]

Figure 4 Contribution of each background source for an *in vivo* measurement device [19]. Copyright©2022, Nuclear Science and Techniques.

特征包括辐射源的种类、空间分布和强度. 本底源的类型通常为天然放射性核素或其衰变产生的特征γ射线, 例如K-40衰变产生的1.46 MeV γ射线. 源的空间分布则代表这些辐射源在环境中的几何形状和大小. 环境γ本底模型的构建旨在通过合理组合辐射源的类型、空间分布和强度, 使得蒙特卡罗模拟得到的本底谱尽可能与探测器测量的实际本底谱一致.

TRACE团队提出了一种基于多元非线性优化的数学方法同时调配本底源强度和空间分布, 以提高环境γ本底模型模拟谱的重建质量. 相较传统方法, 本方法增加了额外的优化参数数量, 提升了优化的自由度. 如图5所示[20], 构建了一系列混凝土材质的同心球壳区域以近似室内房间环境, 每个球壳分别由一种天然放射性核素释放的γ射线起点填充, HPGe探测器则置于各球壳的几何中心, 最终通过多元非线性优化方法调配各球壳厚度和射线强度以最小化重建谱与实验谱在感兴趣区域的差异. 该方法已应用于室内HPGe探测器实验本底谱的重建, 并与传统方法进行了对比分析(如图6所示). 结果表明, 所提出的方法在重建谱与实验谱的一致性方面表现更优[20].

基于上述本底重构方法, 结合蒙特卡罗模拟方法可确定屏蔽材料及其厚度. 目前, TRACE团队正在开展屏蔽室原型机测试工作, 基于原型机的模拟和实验结果, 最终建造大型屏蔽室. 图7展示了原型机屏蔽室的一种候选的屏蔽结构, 其思路为利用外层钢对环境γ辐射起到主要屏蔽作用, 辅以少量高原子序数材料(如铅)对外层钢中的天然放射性(U, Th, K)起到进一步的吸收作用, 最内层使用低本底洁净材料阻挡外层材料自身的本底辐射. 关于屏蔽室原型机的优化设计和实验结果, 将于近期发表.

2.3 宇宙射线本底抑制

根据屏蔽室原型机的测试结果, TRACE正在开展地面直接测量装置的建设. 对于该地面直接测量装置,

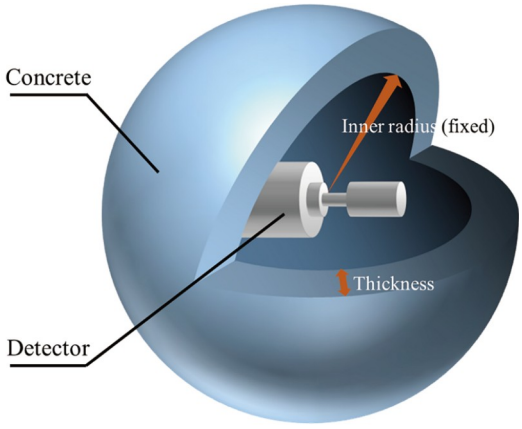


图 5 环境γ本底球壳模型. 特征γ射线的起点均匀地分布在混凝土球壳中, 探测器的中心与球壳的中心重合[20]

Figure 5 Spherical shell model of environmental γ background. The initial points of characteristic γ-rays are uniformly distributed in the spherical shell made of concrete. The center of the detector's axis of symmetry coincides with the center of the spherical shell [20]. Copyright©2024, Radiation Measurements.

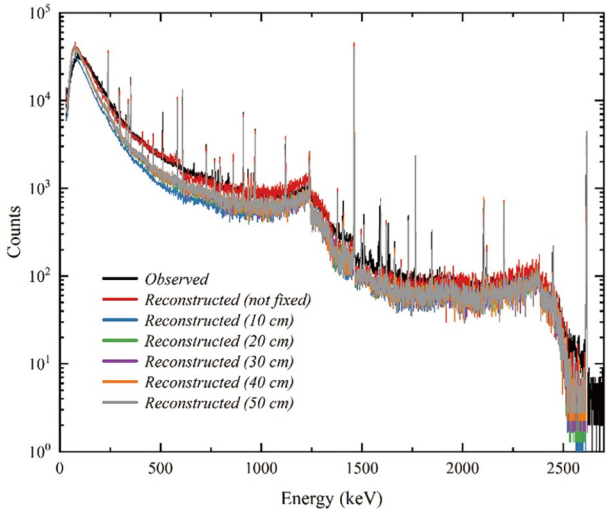


图 6 探测器的实验谱与重建谱的比较. 重建谱包括两类: 一类是源厚度可调的谱(本研究), 另一类是源厚度固定为10, 20, 30, 40和50 cm的谱[20]

Figure 6 Comparison of observed and reconstructed spectra for the detector. The reconstructed spectra comprise two categories: one where the thickness of the source is adjustable (our study), and the other where the thickness of the source is fixed at 10, 20, 30, 40, and 50 cm, respectively [20]. Copyright©2024, Radiation Measurements.

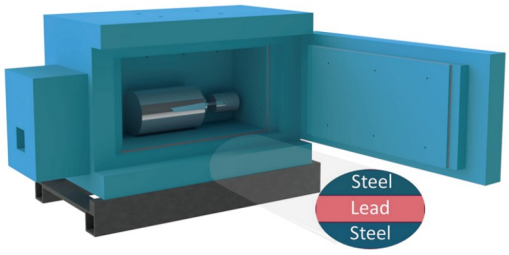


图 7 屏蔽室原型机模型, 结构为"钢-铅-钢", 内部放置了一个HPGe探测器[21]

Figure 7 Prototype model of the shielding room has a "steel-lead-steel" structure, with an HPGe detector placed inside [21].

通过在装置外部设置塑料闪烁体探测器反符合阵列, 并将宇宙射线所致反符合信号传输至装置内部的主探测器, 以实现反宇宙射线的目的. 未来TRACE将基于地面测量装置的测量结果和实践经验, 开展深地人体痕量放射性核素测量装置建设, 利用深地实验室提供的良好被动屏蔽来抑制宇宙射线本底. 位于四川省凉山州的中国锦屏地下实验室(CJPL)是目前世界上最深的地下实验室, 岩石垂直深度达2400 m, 能够有效阻挡宇宙射线射线所带来的本底, 平均缪子通量约为2.0×10^{-10} cm^{-2} s^{-1}, 约为地面上的1/10^{8}[22]. 因此, CJPL能够提供极低的本底环境, 为微弱信号的探测提供了得天独厚的条件. 目前CJPL正在进行一系列科学前沿研究, 包括中国暗物质实验(CDEX)、粒子和天体物理氙探测器(PandaX)、锦屏深地核天体物理实验(JUNA)、锦屏中微子实验(JNE). 人体痕量放射性核素测量实验(TRACE)下一步将进驻CJPL, 成为新一项科学实验项目. 目前, 此项研究已通过CJPL科学委员会评审, 将入驻CJPL二期实验室C2实验厅开展相关实验, 如图8所示.

2.4 人体K-40本底抑制

人体K-40本底来源分别为1.46 MeV γ射线与人体组织和探测器相互作用产生的康普顿散射本底和1.31 MeV β^-射线与人体组织相互作用产生的韧致辐射本底. 根据前期调研, 研究人员常利用Phoswich探测器的反符合模式抑制人体K-40本底, 它的结构如图9所示. 我们的模拟研究结果表明, Phoswich探测器能够降低人体K-40康普顿散射本底, ~40%(如图10), 而韧致辐射本底抑制效果较差, 仅为~4%[23](如图11). 因此, 韧致辐射本底作为人体K-40的主要本底贡献, 将是未来研究的重要方向.

3 头骨Pb-210效率刻度

效率刻度是人体头骨Pb-210直接测量的关键环节, 它可将测量得到的计数转化为核素活度. 其中, 效率刻度因子大小与几何因素和人体自衰减有关. 因此, 为了效率刻度的准确性, 研究人员通常制备仿真体模

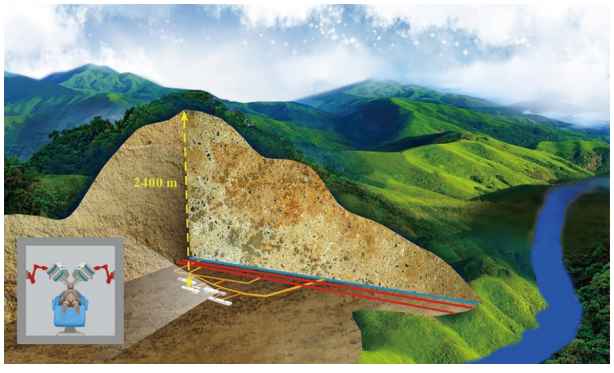


图 8 中国锦屏地下实验室人体痕量放射性核素测量实验示意图

Figure 8 Schematic diagram of trace-level radionuclides *in vivo* counting experiment at China Jinping Underground Laboratory.

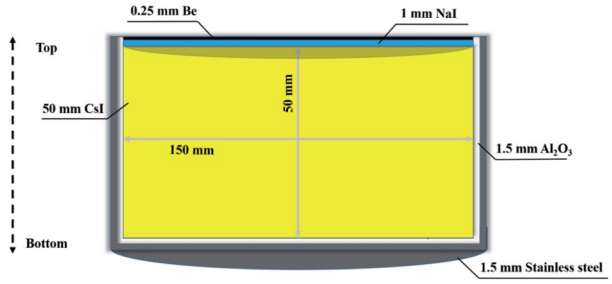


图 9 Phoswich探测器内部结构[23]

Figure 9 Internal structure of Phoswich detector [23]. Copyright©2021, Nuclear Technology.

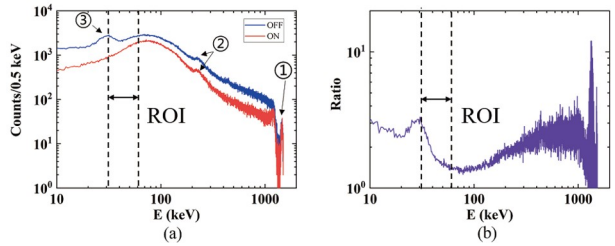


图 10 Phoswich探测器反符合对于人体中1.46 MeV γ射线造成的本底的抑制能力. (a) 红线和蓝线分别表示反符合模式开启和关闭的计数. 图中包含三个特征峰, 分别是① 1.46 MeV全能峰, ② 背散射峰, ③ 碘的逃逸峰; (b) 图(a)中蓝色曲线和红色曲线结果的比值[23]

Figure 10 Ability of the Phoswich detector to suppress the background caused by 1.46 MeV gamma rays from a human body. (a) The red and blue lines represent the counting with the anticoincidence mode on and off, respectively. The figure contains three characteristic peaks: ① the 1.46-MeV full-energy peak, ② the backscattering peak, and ③ iodine characteristic X-ray peak. (b) The plot corresponds to the ratio of the blue line and the red line shown in (a) [23]. Copyright©2021, Nuclear Technology.

复刻受测人的测量场景. TRACE团队通过利用BOMAB, MIRD以及MIDA仿真体模(从左至右仿真度依次增高)进行了无源效率刻度, 研究了不同体模类型对头骨Pb-210效率刻度的影响, 研究方法如下.

3.1 头骨Pb-210效率刻度用计算体模

图12(a)–(c)分别代表BOAMB, MIRD和MIDA头颅体模, 仿真度依次增加. 其中, BOMAB体模由一系列不同大小的椭圆柱形的聚乙烯瓶组成[24]. MIRD体模拥有超过20多种内部器官或组织, 由数学方程代表[25]. MIDA体模是基于MRI医学影像数据开发的高仿真头颈计算体模[26]. 为了和MIDA体模进行对比, BOAMB和MIRD体模分别选择的是头颈部分. 图12(d)和(e)分别代表MIDA体模内部组织和头部骨骼结构[27].

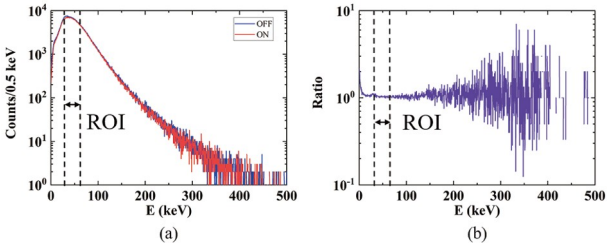


图 11 Phoswich探测器反符合对于人体中1.31 MeV β^-射线导致的本底的抑制能力. (a) 红线和蓝线分别表示反符合模式开启和关闭时的计数; (b) 图(a)中蓝线和红线结果的比值[23]

Figure 11 Ability of the Phoswich detector to suppress the background caused by 1.31 MeV β^- rays from the human body. (a) The red and blue lines represent the counting with the anticoincidence mode on and off, respectively. (b) The plot corresponds to the ratio of the blue line to the red line shown in (a) [23]. Copyright©2021, Nuclear Technology.

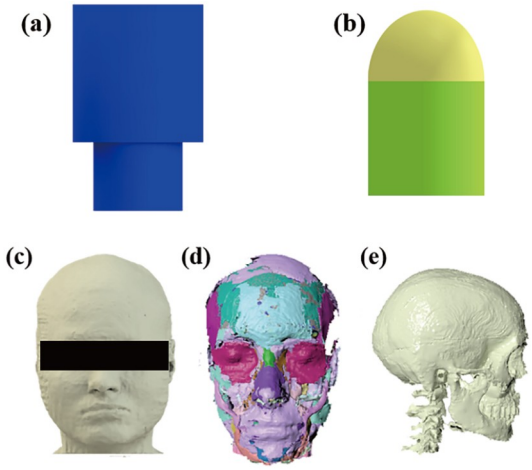


图 12 (a) BOMAB头颅体模; (b) MIRD头颅体模; (c) MIDA头颅体模; (d) MIDA体模内部组织结构; (e) MIDA头部骨骼结构[27]

Figure 12 (a) BOMAB head phantom; (b) MIRD head phantom; (c) MIDA head phantom; (d) internal tissue structure of MIDA phantom; (e) skeletal structure of MIDA phantom [27]. Copyright©2024, Applied Radiation and Isotopes.

3.2 无源效率刻度条件设置

在本项工作中利用蒙特卡罗工具Geant4进行体模之间效率刻度比对研究, 使用的探测器类型为HPGe BE5030探测器, 其内部结构如图13所示[27]. 图13(a)代表探测器的整体结构, 主要由液氮罐、铜基座、冷指以及探头组成. 图13(b)代表探头结构, 由铝壳、碳窗、Ge晶体组成, Ge晶体长度为31.3 mm, 直径为80.5 mm.

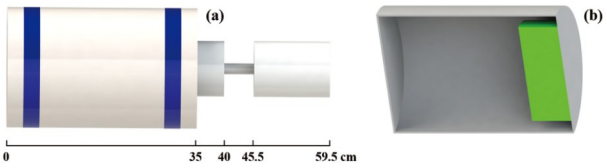


图 13 HPGe BE5030探测器模型. (a) 探测器整体结构; (b) 探头内部结构, 灰色代表铝壳, 绿色代表Ge晶体[27]

Figure 13 HPGe BE5030 detector model. (a) Structure of the detector; (b) internal structure of the probe, with gray and green representing the aluminum casing and the Ge crystal, respectively [27]. Copyright©2024, Applied Radiation and Isotopes.

在效率刻度中, 探测器被放置在头部的三个测量位置, 分别是头顶、头侧、头底. 其中, 探测器碳窗与头部表面的距离为1.5 cm. 上述模拟条件设置如图14所示[27], 图14(a)–(c)表示探测器放置在BOMAB体模的背面、侧面和顶部; 图14(d)–(f)表示探测器放置在MIRD体模的背面、侧面和顶部; 图14(g)–(i)表示探测器放置在MIDA体模的背面、侧面和顶部. 此外, 本研究中使用的三个计算模型解剖结构有明显差异, 因此采用了不同的Pb-210布源方式. 首先, BOMAB体模中水代替了头部所有器官或组织, 不包含头骨结构, 因此Pb-210被均匀分布在头部中. 其次, MIRD体模利用椭圆球代替头骨结构, Pb-210被均匀分布在其中. 最后, MIDA体模包含精细的头骨结构, 其中在实际制作体模时, Pb-210常被分布在头盖骨中, 因此在本研究中Pb-210也采用了同样的分布方式. 为了使计数统计误差小于1%, Pb-210粒子源数量被设置为5×10^7.

3.3 不同体模类型的效率刻度比对研究

基于3.2节的模拟条件, 利用BOMAB体模、MIRD体模和MIDA体模的效率刻度结果如表2所示. 第1列表示体模类型, 第2–5列分别表示探测器放置在体模的底部、侧面、顶部的计数效率以及三个测量位置的平均值. 此外, 由于Pb-210在三个体模中的布源区域不尽相同, 其中BOMAB体模和MIRD体模可以视为在头骨中均匀分布, 而MIDA体模中布源区域占整个头骨的50.55%. 因此, 为了尽可能公平地比较三种体模的计数效率, 在这项工作中利用质量分数η对结果进行归一化, 表达方式如下:

$$\bar{v}_{\text{skull}} = \bar{v} \cdot \eta, \tag{1}$$

式中, $\bar{v}$表示在初始布源方式下得到的计数效率, 这里指第5列三个测量位置的平均值; $\bar{v}_{\text{skull}}$表示Pb-210在头骨中均匀分布时得到的效率刻度因子, 如表2第7列所示. 其中, 在使用式(1)对MIDA结果进行归一化时, 包含如下假设: 探测距离很小时, 头盖骨以外的区域在探测器中计数没有贡献. 该假设条件可成立的原因在于Pb-210 γ射线穿透能力弱, 很容易被人体自身组织和探测器外壳所衰减, 由于探测器通常紧贴头部, 因此有效计数主要来自于探测器正对区域的贡献.

根据归一化后的结果可以发现, 利用三种体模得到的计数效率之间存在显著差异. 低仿真度的BOMAB体模和MIRD体模与高仿真MIDA体模相比, 计

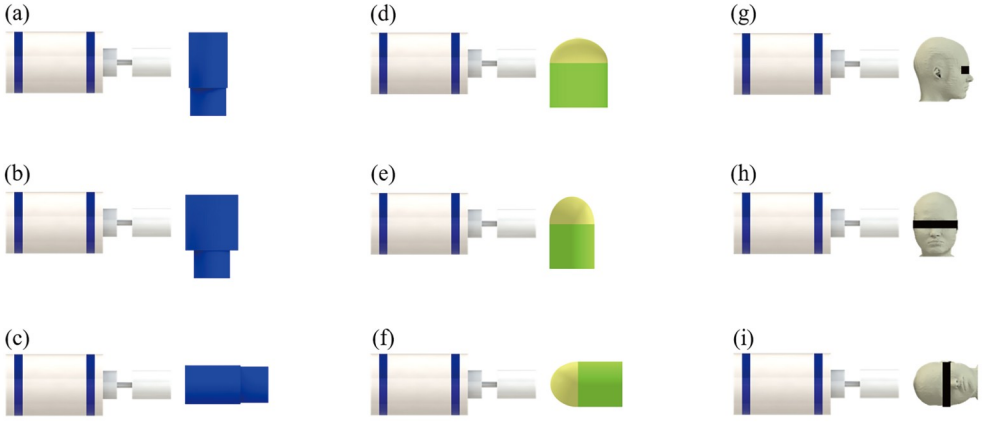


图 14 模拟中使用BOMAB体模、MIRD体模以及MIDA体模进行效率刻度的示意图. (a) BOMAB-背面; (b) BOMAB-侧面; (c) BOMAB-顶部; (d) MIRD-背面; (e) MIRD-侧面; (f) MIRD-顶部; (g) MIDA-背面; (h) MIDA-侧面; (i) MIDA-顶部[27]

Figure 14 Schematic diagram of efficiency calibration using the BOMAB, MIRD, and MIDA phantoms in the simulation. (a) BOMAB-back; (b) BOMAB-side; (c) BOMAB-top; (d) MIRD-back; (e) MIRD-side; (f) MIRD-top; (g) MIDA-back; (h) MIDA-side; (i) MIDA-top [27]. Copyright©2024, Applied Radiation and Isotopes.

数效率偏差分别约为51%和42%. 换而言之, 在使用BOMAB体模或MIRD体模进行效率刻度时, 受测人头骨Pb-210活度将被显著低估. 然而, 尽管本研究中三种类型体模的效率刻度条件比较一致, 但由于体模的形状、解剖结构以及源分布方式存在一定差异, 因此很难确定哪个影响因素造成了计数效率的较大偏差, 这个问题在未来需要进一步深入研究.

4 Pb-210生物动力学模型构建及来源分析

4.1 Pb-210生物动力学模型

Pb-210在全身的生物动力学模型如图15所示, 分别参考了ICRP 100号出版物[28]中的消化道模型、130号出版物[29]的呼吸道模型和137号出版物[30]的系统模型. 生物动力学模型将粒子的传输以隔室为单位, 图15中每个方框代表一个隔室, 不同颜色对应不同组织或器官[31]. 箭头表示隔室之间Pb-210的传输方向, 箭头上的数字表示相应传输路径的传输速率(d^{-1}). 从图中可以看出, 隔室之间的运输并不总是双向的.

图15中紫色区域表示呼吸道中的各隔室, 黄色区域表示消化道中的各隔室, 其余为系统模型的隔室. 将三个模型连接起来的部分包括: 呼吸道中的胸腔外区2向消化道模型中的食道慢区传输; 小肠内容物向血液传输, 血液向右结肠内容物传输. 连接完成后即

表 2 BOMAB体模、MIRD体模以及MIDA体模计数效率的比较[27]

Table 2 Comparison of counting efficiency between BOMAB, MIRD, and MIDA phantoms [27]. Copyright©2024, Applied Radiation and Isotopes

体模类型	计数效率 ($\times10^{-4}$ cps/Bq)			$\bar{\nu}$及其标准偏差 ($\times10^{-4}$ cps/Bq)	布源方式 (质量分数η)	$\bar{\nu}_{skull}$ ($\times10^{-4}$ cps/Bq)
	底部	侧面	顶部			
BOMAB	4.09	2.73	5.31	4.04±1.29	头骨(100%)	4.04
MIRD	4.59	3.32	3.45	3.79±0.70	头盖骨(100%)	3.79
MIDA	5.61	4.74	5.50	5.28±0.47	头盖骨(50.55%)	2.67

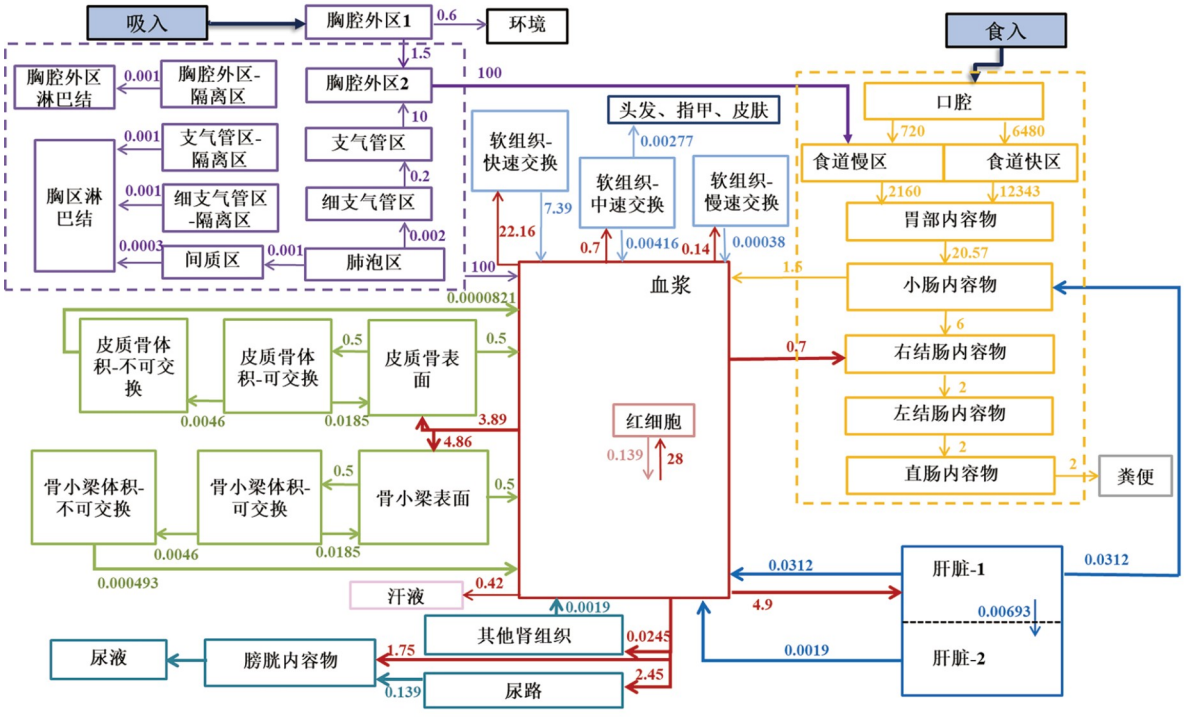


图 15 Pb-210全身生物动力学模型示意图[31]

Figure 15 Schematic diagram of the whole-body biokinetic model for Pb-210 [31]. Copyright©2024, Health Physics.

可形成Pb-210的全身生物动力学模型.

4.2 全身生物动力学模型实现方法

本研究基于Simulink仿真平台建立了Pb-210全身生物动力学模型, 用于模拟放射性核素在体内随时间变化的运输规律[31]. 其中, 每个隔室都是作为一个单独子系统建造. 以软组织隔室之一ST1为例, ST1只接收来自血浆的输入, 其输出包括通过头发、指甲和皮肤排泄, 部分返回血浆. 此外, Pb-210自身的物理衰变过程也会导致活度降低. 用Simulink求解ST1的一阶常微分方程如下:

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{ST1}}(t)}{\mathrm{d}t} =& \lambda_{\mathrm{plasma}\to\mathrm{ST1}} \times A_{\mathrm{plasma}}(t) \\ &-\lambda_{\mathrm{ST1}\to\mathrm{excreta}} \times A_{\mathrm{SI}}(t) \\ &-\lambda_{\mathrm{ST1}\to\mathrm{plasma}} \times A_{\mathrm{SI}}(t) - \lambda_{\mathrm{phy}} \times A_{\mathrm{ST1}}(t), \end{aligned} \tag{2}$$

式中, $A_{\mathrm{plasma}}(t)$表示血浆隔室中Pb-210活度, $A_{\mathrm{SI}}(t)$是ST1隔室Pb-210活度, $\lambda_{\mathrm{plasma}\to\mathrm{ST1}}$表示Pb-210从血浆到ST1的传输速率, $\lambda_{\mathrm{ST1}\to\mathrm{excreta}}$表示Pb-210从ST1转移到排泄物的速率, $\lambda_{\mathrm{ST1}\to\mathrm{plasma}}$表示Pb-210从ST1到血浆的传输速率, λ_{phy}表示Pb-210衰变常数.

其余隔室仿真基本原理与ST1一致, 通过将每个隔室的模型模块结构分别封装成多个子系统, 根据转移关系将这些子系统进行连接, 建立了适用于全身范围的Pb-210生物动力学模型, 如图16所示. 其中, 从左至右依次为呼吸道模型、系统模型和消化道模型.

为了验证模型编程的准确性, 将相同摄入场景下Pb-210在关键器官的部分计算结果与ICRP 137号报告进行了比较, 如图17所示. 其中, 灰色虚线代表本研究模型计算结果, 它表示在连续10 d摄入1 Bq Pb-210的场景下, 骨骼内Pb-210活度随时间的变化规律. 蓝色三角点表示ICRP 137报告提供的数据. 结果表明, 模型计算结果与ICRP结果具有很好的一致性.

4.3 Pb-210来源分析

利用人体头骨中的Pb-210含量进行氡暴露量重构的前提之一, 即要扣除由于日常食物和饮用水等中的Pb-210摄入导致最终在头骨中的累积量. 目前TRACE团队已经基于图7中展示的小型屏蔽室, 配合高纯锗γ探测器, 测量了多种典型的烟草和茶叶中的Pb-210含量. 测量结果显示, 所选茶叶中Pb-210比活度为8.15–49.67 Bq/kg, 所选烟草中Pb-210比活度为21.74–31.16 Bq/kg[32]. 此外, TRACE团队正在开展海鲜、酒类、谷物、面粉等食物和饮品中的Pb-210含量测量, 相关结果将于近期发表. 将以上测量结果设置为

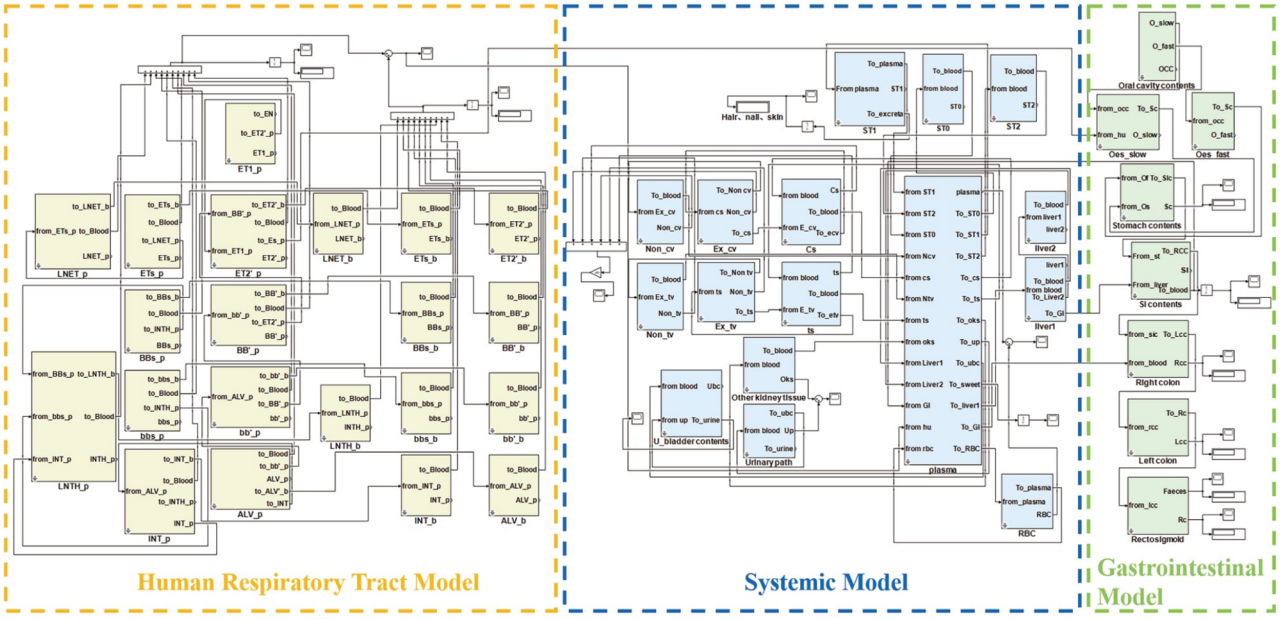


图 16 Pb-210全身生物动力学模型编程可视化

Figure 16 Programming visualization of the whole-body biokinetic model for Pb-210.

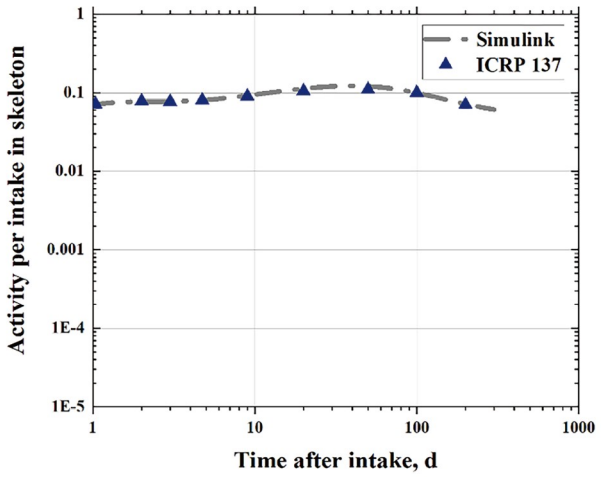


图 17 本研究计算值与ICRP 137数据比对结果

Figure 17 Comparison of our calculated results in this study with ICRP 137 Data.

4.1和4.2节中所构建的Pb-210生物动力学模型的输入, 可以有效归溯人体头骨中非氡暴露所致Pb-210的来源.

5 总结

本文介绍了人体痕量放射性核素测量实验(TRACE)项目, 该实验将由北京师范大学与合作单位联合开展, 主要包括清华大学、雅砻江水电公司、生态环境部及系统单位、中国辐射防护研究院、中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、中国原子能科学研究院、苏州大学、北京大学等. TRACE的目标是通过人体痕量放射性核素测量的途径, 为长期、低剂量辐射的潜在风险评估提供关键的科学基础实验数据.

TRACE团队第一阶段关注的人体痕量放射性核素为Pb-210, 通过活体直接测量得到头骨Pb-210活度, 可为长期氡暴露人体健康评价提供重要基础实验数据. 该方法的主要难点在于测量信噪比低、效率刻度误差大以及人体Pb-210来源广泛且代谢规律复杂. 为了克服上述困难, TRACE团队已经开展了本底来源分析及抑制、头骨Pb-210效率刻度以及Pb-210生物动力学模型构建及来源分析. 首先, TRACE团队分析了活体直接测量中屏蔽室内的本底来源, 结果表明宇宙射线、屏蔽材料及测量设备中的本底以及受试者体内的K-40是主要本底贡献, 分别占12%, 24%和58%. 为了进一步抑制上述本底, TRACE团队正在开展屏蔽室优化设计、宇宙射线以及人体K-40本底抑制方法研究. 其次, TRACE团队研究了不同体模类型对头骨Pb-210效率刻度准确性的影响, 与高仿真MIDA体模结果相比, 仿真度较低的BOMAB和MIRD体模的结果与其相对偏差较大, 分别为~51%和~42%. 最后, 基于ICRP推荐的最新生物动力学模型, 构建了全身范围内完整的Pb-210生物动力学传输模型. 进一步, 基于γ能谱法测量得到作为人体典型摄入来源的茶叶和烟草中Pb-210比活度范围分别为8.15–49.67和21.74–31.16 Bq/kg, 结果可为非氡暴露所致头骨Pb-210溯源分析提供基础实验数据.

目前TRACE项目已通过CJPL科学委员会评审, 计划在2025年正式入驻中国锦屏地下实验室二期实验室C2实验厅.

参考文献

1 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2017 Report: Sources, effects, and risks of ionizing radiation. Technical Report. New York: United Nations, 2018
2 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2019 Report: Sources, effects, and risks of ionizing radiation. Technical Report. New York: United Nations, 2020
3 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2020/2021 Report: Sources, effects, and risks of ionizing radiation. Technical Report. New York: United Nations, 2022
4 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2012 Report: Sources, effects, and risks of ionizing radiation. Technical Report. New York: United Nations, 2015
5 World Health Organization (WHO). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO, 2009
6 Environmental Protection Agency (US EPA). EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. US EPA, 2003
7 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP

Publication 115, Ann ICRP, 2010, 40: 1–64
8 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126, Ann ICRP, 2014, 43: 1–73
9 Meng X, Liu Y, Wu B, et al. Minimum detectable activity of Pb-210 in skull from *in vivo* measurements: Insights from the literature. Front Energy Res, 2021, 9: 759850
10 Wahl W, Haninger T, Kucheida D, et al. Study of long-term radon progeny in humans for retrospective evaluation of radon exposure. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 243: 447–450
11 Eisenbud M, Laurer G R, Rosen J C, et al. *In vivo* measurement of lead-210 as an indicator of cumulative radon daughter exposure in uranium miners. Health Phys, 1969, 16: 637–646
12 Cohen N, Jaakkola T, Wrenn M D E. Lead-210 concentrations in the bone, blood and excreta of a former uranium miner. Health Phys, 1973, 24: 601–609
13 Cohen N, Spitz H B, Wrenn M D E. Estimation of skeletal burden of “bone-seeking” radionuclides in man from *in vivo* scintillation measurements of the head. Health Phys, 1977, 33: 431–441
14 Laurer G R, Estrada J J S, Cohen N. Lung exposure from inhalation of radon progeny. Health Phys, 1999, 76: 380–387
15 Scheler R, Dettmann K, Brose J. Retrospective estimation of exposure to short-lived ^{222}Rn progeny by measurements of ^{210}Pb in the skull. Radiat Prot Dosim, 1998, 79: 129–132
16 Dantas A L A, Dantas B M, Lipsztein J L, et al. *In vivo* measurements of ^{210}Pb in skull and knee geometries as an indicator of cumulative ^{222}Rn exposure in a underground coal mine in Brazil. Radiat Prot Dosim, 2007, 125: 568–571
17 Dantas A L A, Dantas B M, Lipsztein J L. A method for analyzing low statistics high resolution spectra from ^{210}Pb in underground coal miners from Brazil. J Radioanal Nucl Chem, 2006, 269: 435–439
18 Zheng R Z, Wang S L, Ma R W, et al. Measurement of cranial ^{210}Pb content and estimation of lung dose due to radon daughters in tin miners (in Chinese). Radiat Protect Bull, 1992, 3: 45–53 [郑仁折, 汪松龄, 马如维, 等. 颅骨^{210}Pb含量测量与锡矿工氡子体所致肺剂量估算. 辐射防护通讯, 1992, 3: 45–53]
19 Wang Y, Liu Y Y, Wu B, et al. Experimental investigation on the radiation background inside body counters. Nucl Sci Tech, 2022, 33: 20
20 Wang Y, Liu Y, Wu B, et al. Reconstruction of indoor gamma-ray background spectrum for HPGe detectors. Radiat Measurem, 2024, 174: 107139
21 Wang Y, Liu Y Y, Wu B, et al. Shielding room design for body counters: A trade-off between background reduction and building cost. In: Proceedings of 7th International Symposium on the System of Radiological Protection. Tokyo: ICRP, 2023
22 Wu Y C, Hao X Q, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing underground laboratory. Chin Phys C, 2013, 37: 086001
23 Meng X, Liu Y, Wu B, et al. Assessment of radiation background suppression using Phoswich detectors for *in vivo* Pb-210 measurements: A simulation study. Nucl Tech, 2021, 208: 753–760
24 Bush F. The integral dose received from a uniformly distributed radioactive isotope. British J Radiol, 1949, 22: 96–105
25 Snyder W S, Fisher H L, Ford J M R, et al. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. J Nucl Med, 1969, 3: 7–52
26 Iacono M I, Neufeld E, Akinnagbe E, et al. MIDA: A multimodal imaging-based detailed anatomical model of the human head and neck. PLoS ONE, 2015, 10: e0124126
27 Meng X, Liu Y, Wu B, et al. Virtual calibration for *in vivo* measurement of Pb-210 activity in the skull using BOMAB, MIRD, and MIDA phantoms. Appl Radiat Isotopes, 2024, 205: 111192
28 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. Ottawa: ICRP, 2006
29 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Ottawa: ICRP, 2015
30 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. Ottawa: ICRP, 2017
31 Wang J, Liu Y, Wu B, et al. Theoretical prediction of the ^{210}Pb burden in the skeleton from radon exposure and other intake routes. Health Phys, 2024, 127: 287–297
32 Wang Y, Liu Y Y, Wu B, et al. Measurement on specific activity of ^{210}Pb and ^{40}K in tea and tobacco via low background high purity germanium gamma spectrometer (in Chinese). Atomic Energy Sci Technol, 2023, 57: 1048–1056 [王宇, 刘圆圆, 吴彬, 等. 基于低本底高纯锗γ谱仪测量茶叶和烟草中^{210}Pb和^{40}K的比活度. 原子能科学技术, 2023, 57: 1048–1056]

Research progress in the trace-level radionuclides *in vivo* counting experiment (TRACE)

LIU YuanYuan[1,2,3], WU Bin[1,2,3*], MENG XiangPeng[2,3,4*], YAN CongChong[5], WANG Yu[1,2,3], WANG Jing[1,2,3], ZHOU Lai[1,2,3], JU Ao[1,2,3], ZENG Zhi[4], YUE Qian[4] & CHENG JianPing[1,2,3]

[1] *School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[2] *Joint Laboratory of Jinping Ultra-low Radiation Background Measurement of Ministry of Ecology and Environment and Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[3] *Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, Liangshan 615000, China*
[4] *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[5] *School of Radiation Medicine and Protection, Suzhou Medical College of Soochow University, Suzhou 215031, China*
**Corresponding authors (MENG XiangPeng, email: mengxp@mail.tsinghua.edu.cn; WU Bin, email: bwu6@bnu.edu.cn)*

The assessment of health risks from long-term and low-dose radiation exposure is one of the important scientific frontiers in the field of radiation protection. In contrast to the clear health effects of high doses, assessing health risk of low doses lacks the support of foundational experimental data. Based on the China Jinping Underground Laboratory, the TRACE group from Beijing Normal University is committed to providing essential scientific foundational experimental data for the assessment of potential risks of long-term and low-dose radiation through measurements of trace-level radionuclides in the human body. The first phase of TRACE group focuses on in vivo measurement of Pb-210 in the skull, with key issues including: (1) low signal-to-noise ratio; (2) significant efficiency calibration errors, and (3) the widespread sources of Pb-210 in the human body coupled with complex metabolic patterns. This paper introduces the main research progress made by the TRACE group on the key issues mentioned above. To address issue (1), the TRACE group conducted background source analysis in the shielding room of in vivo measurement. The results showed that cosmic rays, background from shielding materials and measuring instruments, and K-40 in the subject's body are the main contributors, accounting for approximately 12%, 24%, and 58%, respectively. To address issue (2), the TRACE group studied the impact of different phantom types on efficiency calibration of Pb-210 in the skull. The results indicated that counting efficiency deviations between the lower-fidelity BOMAB and MIRD phantoms and the higher-fidelity MIDA phantom can exceed 40%. To address issue (3), the TRACE group developed a whole-body Pb-210 biokinetic model and performed Pb-210 source tracing. The results showed that the specific activity range of Pb-210 in typical intake sources, such as tea and tobacco, is 8.15–49.67 Bq/kg and 21.74–31.16 Bq/kg, respectively.

low-dose radiation, *in vivo* measurement, Pb-210

PACS: 87.19.xj, 87.52.-g, 87.53.-j, 87.66.Jj

doi: 10.1360/SSPMA-2024-0428