

I-131 核素在核医学应用中的辐射防护评价与监测技术

薛红才

内蒙古弘远环境科技有限公司, 内蒙古自治区包头市, 014030;

摘要: 碘-131 (I-131) 是核医学领域常用放射性核素, 在甲状腺疾病诊治中作用不可替代。但 I-131 核衰变特性使其辐射可能危害医护、患者及公众健康, 辐射防护评价与监测技术是保障其安全应用的关键。本文梳理了 I-131 核医学应用现状, 从辐射源项特性、防护对象风险评估、防护措施有效性评价三方面阐述辐射防护评价体系, 综述个人剂量、工作场所、环境及患者体内辐射监测等核心监测技术的原理、应用场景和研究进展, 分析当前 I-131 辐射防护与监测工作问题, 并展望未来技术趋势, 为核医学机构优化 I-131 辐射防护策略、提升监测技术提供参考。

关键词: I-131 核素; 核医学; 辐射防护评价; 监测技术

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.001

引言

核医学是融合多学科的前沿领域, 通过放射性核素标记药物的体内代谢分布实现疾病诊疗与评估。I-131 是人工放射性核素, 半衰期 8.02 天, 衰变释放 β 和 γ 射线, β 射线用于甲状腺疾病内照射治疗, γ 射线用于显像诊断。自 20 世纪 40 年代用于甲状腺疾病治疗后, 其临床应用范围不断扩大, 成为核心治疗手段。但 I-131 应用存在辐射安全问题, 医护人员可能受照射, 患者体内残留 I-131 会污染环境, 生产等环节也有泄漏隐患。因此, 建立防护评价体系、采用监测技术对其全流程辐射管控, 是保障核医学安全、促其发展的基础。本文结合相关成果与经验, 对 I-131 核医学应用的辐射防护评价与监测技术进行综述, 提供参考。

1 I-131 核素的核医学应用现状

1.1 诊断应用

I-131 在核医学诊断中主要用于甲状腺功能显像和甲状腺结节良恶性鉴别。因甲状腺能高度选择性摄取碘, 患者注射或口服适量 I-131 后, 甲状腺会摄取核素, 用 SPECT 等设备采集 γ 射线信号, 可显示甲状腺的形态、大小、位置和功能。比如, 诊断甲亢时, 检测甲状腺对 I-131 的摄取率可判断类型和严重程度; 诊断甲状腺结节时, 根据结节对 I-131 的摄取情况可初步鉴别良恶性, 为治疗提供依据。此外, I-131 标记的单克隆抗体可定位甲状腺癌转移灶, 为肿瘤分期和疗效评估提供参考。

1.2 治疗应用

I-131 的 β 射线射程短, 能在甲状腺内产生电离辐射, 破坏滤泡上皮细胞, 对周围正常组织损伤小, 适合治疗甲状腺疾病。治疗甲亢时, 口服 I-131, 核素被甲状腺摄取, β 射线抑制甲状腺激素合成与分泌, 该方法疗效确切、疗程短、创伤小, 是成人甲亢首选治疗方案之一。

治疗分化型甲状腺癌时, I-131 用于术后残留甲状腺组织消融和转移灶治疗。癌细胞保留摄取碘的特性, 术后口服大剂量 I-131, 可清除残留组织、降低复发风险, 还能被转移灶摄取杀伤癌细胞。研究显示, I-131 消融治疗可提高患者无病生存率、改善预后。

2 I-131 核医学应用中的辐射防护评价体系

2.1 辐射源项特性分析

辐射源项特性是辐射防护评价基础, 包括 I-131 核衰变特性、辐射能量、活度分布及释放途径等。I-131 物理半衰期约 8.04 天, 这一特性使其在核医学应用中具有良好的时效性, 既能够提供足够的治疗时间窗口, 又不会在体内长期滞留造成累积性辐射损伤。I-131 衰变释放的 β 射线与 γ 射线危害不同: 用于治疗的 β -粒子和用于诊断的 γ 射线。 β -粒子的最大能量为 606keV, 平均能量为 192keV, 在组织中的射程约为 0.5 毫米, 这种短射程特性确保了辐射损伤主要局限在甲状腺细胞内, 对周围组织的影响较小。 γ 射线的主要能量为 364keV, 占总发射强度的 81.2%。 β 射线电离强, 造成内照射损伤, I-131 进入体会富集在甲状腺破坏细胞; γ 射线穿透力强, 造成外照射损伤, 威胁医护及周围人

群。

核医学应用中，I-131活度因场景而异：诊断用活度低，辐射风险小；治疗用活度高，风险显著增加。其释放途径有呼吸、汗液等，尿液是主要途径，也是环境辐射污染主因。所以，辐射防护评价要结合活度、辐射类型等源项特性识别风险点。

2.2 防护对象辐射风险评估

I-131核医学应用的辐射防护对象有医护、患者、公众及环境，不同对象暴露途径和风险水平不同，需针对性评估。

医护是高危人群，暴露途径有：制备、给药时吸入气溶胶或皮肤接触造成内照射；检查、治疗患者时受 γ 射线外照射。研究显示，其年有效剂量主要来自患者 γ 射线外照射，甲状腺疾病治疗室医护剂量较高，且剂量与工作年限等因素相关。

患者辐射风险主要是内照射损伤，大剂量治疗患者体内核素会损伤甲状腺及周围组织，引发不良反应。同时，患者是移动辐射源，治疗后会释放I-131，对周围人群有外照射风险，特殊人群需严格评估。

公众暴露主要源于患者环境释放及生产等过程意外泄漏，剂量通常低，但要关注累积效应和群体风险。环境辐射风险主要是I-131对水体、土壤大气污染可能通过食物链富集对生态系统造成潜在影响。

2.3 防护措施有效性评价

防护措施有效性评价是辐射防护评价核心，通过科学方法验证现有防护措施能否降低辐射风险，确保辐射剂量达标。I-131核医学应用防护措施分操作规范与时间-距离-屏蔽原则，其有效性评价需结合场景开展。

操作规范是确保I-131安全应用的关键措施，必须严格遵循国际和国内相关标准的要求。在I-131的操作过程中，应始终遵循时间（Time）、距离（Distance）、屏蔽（Shielding）三大基本原则，这是辐射防护的核心策略。

时间原则要求尽量缩短与辐射源的接触时间。在I-131的操作过程中，应事先做好充分的准备工作，减少在辐射源附近的操作时间。对于高剂量I-131的操作，应制定详细的操作流程，确保操作的熟练和快速。同时，应建立轮换制度，避免单个工作人员长时间暴露在辐射环境中。

距离原则利用了辐射强度与距离平方成反比的规律，通过增加与辐射源的距离来降低辐射暴露。在I-131的操作过程中，应尽可能使用长柄工具，如镊子、钳子等，避免直接用手接触辐射源。在患者护理过程中，应保持适当的距离，特别是对于高剂量治疗的患者，护理人员应在满足医疗需要的前提下尽量减少接触。

屏蔽原则是通过使用屏蔽材料来减弱辐射强度。对于I-131，由于其主要发射 β 和 γ 射线，屏蔽设计需要考虑两种射线的不同特性。 β 射线的屏蔽通常使用低原子序数的材料，如有机玻璃、塑料等，以减少韧致辐射的产生。 γ 射线的屏蔽则需要使用高原子序数的材料，如铅、钨等。

个人防护指医护人员佩戴剂量计、铅围裙、防护眼镜、防护手套、口罩、工作帽和鞋套等，评价结合个人剂量监测数据、防护用品性能开展。如监测累积剂量判断能否降辐射暴露水平，检测口罩过滤效率验证防护效果。

3 I-131核医学应用中的辐射监测技术

3.1 个人剂量监测技术

个人剂量监测针对医护人员、患者等个体开展辐射剂量监测，目的是掌握个体辐射暴露水平、发现异常。I-131核医学应用中，包括外照射与内照射剂量监测。

外照射剂量监测主要针对医护人员，常用设备有热释光剂量计（TLD）、光致发光剂量计（OSL）、个人剂量报警仪等。热释光剂量计利用热释光材料储存能量加热释放荧光计算剂量，应用广泛，可长期监测累积剂量；光致发光剂量计利用光致发光材料经激光激发释放荧光，测量快、可重复，适用于短期监测；个人剂量报警仪用半导体探测器实时监测，超阈值报警，保障医护人员操作安全。

内照射剂量监测针对医护人员与接受I-131治疗的患者，常用方法有生物样品监测与全身计数器监测。生物样品监测采集尿液等样品，用 γ 能谱仪测活度结合代谢模型计算剂量，如测医护人员24小时尿液判断内污染；全身计数器用高纯度锗探测器测人体或器官内I-131活度，精度高、无创伤，用于大剂量治疗患者残留核素监测，为评估与防护提供数据。

3.2 工作场所辐射监测技术

工作场所辐射监测是保障核医学科医护人员安全

的关键,工作场所的设计应遵循分区原则,将工作区域划分为控制区、监督区,监测辐射剂量率与放射性表面污染。

工作场所辐射剂量率监测常用设备有 γ 剂量率仪、便携式辐射监测仪等。 γ 剂量率仪用闪烁探测器测 γ 射线剂量率,实时显示数据,适用于日常巡测,I-131药物制备时在关键位置设监测点确保安全;便携式辐射监测仪体积小、操作简便,用于移动监测。现存在辐射泄漏隐患。工作场所放射性污染监测针对地面、墙面、操作台面、防护用品等,常用表面污染监测与气溶胶监测。表面污染监测仪用电离室或闪烁探测器测物体表面放射性活度,是I-131辐射防护体系中的重要组成部分,主要用于检测工作场所、设备表面和人员体表是否存在放射性污染;表面污染监测应采用多种技术手段相结合的方式,确保能够及时发现和处理各种类型的污染;气溶胶监测仪采集空气中气溶胶颗粒,用 γ 能谱仪测I-131活度,评估污染水平,为通风系统优化提供依据。此外,工作场所放射性废水、固体废物也需监测活度,达标后排放或处置。

3.3 环境辐射监测技术

环境辐射监测系统是确保I-131工作场所辐射安全的重要设施,主要用于监测工作场所和周围环境的辐射水平,及时发现异常情况并采取相应措施。环境辐射监测系统应包括固定式监测设备和便携式监测设备两大类。

固定式监测设备通常安装在关键位置,如储存室、给药室、治疗室等,能够实时监测辐射水平并在超过预设阈值时发出警报。固定式监测设备应具备数据记录功能,能够记录监测数据并生成监测报告。监测设备的探测范围应覆盖整个工作区域,确保没有监测盲区。

便携式监测设备主要用于日常巡检和应急监测,具有操作简单、携带方便等优点。常用的便携式监测设备包括剂量率仪、表面污染监测仪、个人剂量报警仪等。便携式设备应定期校准,确保测量结果的准确性。

应急监测是环境辐射监测系统的重要组成部分。在发生放射性物质泄漏、设备故障等意外情况时,应立即启动应急监测程序,使用便携式监测设备对整个工作区域进行全面扫描,确定污染范围和污染水平。应急监测应配备足够的监测设备和人员,确保能够快速响应和处理。

3.4 患者体内辐射监测技术

患者体内辐射监测针对接受I-131治疗的患者,掌握体内I-131残留活度与代谢规律,为疗效评估、辐射防护指导提供数据。常用全身计数器监测、甲状腺功能检测及生物样品监测。全身计数器监测是核心技术,用高灵敏度 γ 探测器测患者全身或甲状腺部位I-131活度,可精准计算体内残留核素活度。有效半衰期。如分化型甲状腺癌患者术后接受I-131消融治疗,通常在治疗后1周、1个月、3个月进行全身计数器监测,评估残留甲状腺组织清除与转移灶治疗效果。同时,监测患者体内I-131代谢规律,指导患者采取防护措施,如治疗后1周内避免与孕妇、儿童密切接触,减少环境辐射污染。

甲状腺功能检测通过测量患者血液中甲状腺激素(T₃、T₄)、促甲状腺激素(TSH)水平,间接评估I-131对甲状腺组织的辐射损伤程度。例如,甲亢患者接受I-131治疗后,若TSH升高、T₃、T₄降低,表明治疗有效,但需警惕甲减。

生物样品监测通过采集患者尿液、粪便样品,测量其中I-131活度,结合代谢模型计算体内内照射剂量,用于评估患者辐射暴露水平,为制定个体化辐射防护方案提供依据。

4 现存问题与发展趋势

4.1 现存问题

尽管目前I-131核医学应用中的辐射防护与监测技术已较为成熟,但在实际应用中仍存在问题。一是监测技术的精准度有待提升,例如在低活度I-131监测场景中,环境背景辐射易对监测结果产生干扰,导致监测误差较大;二是个性化防护评价体系不完善,现有防护评价多基于群体平均水平,未充分考虑患者年龄、性别、身体状况等个体差异,难以实现精准防护;三是基层核医学机构的辐射防护与监测能力薄弱,部分基层机构缺乏专业的监测设备与技术人员,辐射安全管理制度执行不到位,存在较大的辐射安全隐患;四是环境辐射监测的覆盖面不足,现有监测多集中于核医学科周边的关键点位,对I-131在环境中的长期迁移转化规律研究不足。

4.2 发展趋势

针对上述问题,未来I-131核医学应用中的辐射防护评价与监测技术将呈现以下发展趋势。一是监测技术

的智能化与精准化,随着探测器技术的发展,高灵敏度、高分辨率的监测设备将不断涌现,例如基于量子点探测器、超导探测器的监测设备,可显著提升低活度 I-131 的监测精准度;同时,结合人工智能、大数据技术,可实现监测数据的实时分析与异常预警,提升辐射监测的智能化水平。

二是个性化辐射防护评价体系的建立,通过结合患者的个体特征(如年龄、性别、体重、甲状腺功能)、治疗方案(如 I-131 活度、给药方式),利用蒙特卡洛模拟等剂量计算方法,建立个性化的辐射剂量评估模型,实现对患者与医护人员的精准辐射风险评估与防护指导。

三是基层核医学机构辐射防护能力的提升,通过加强基层机构的辐射安全培训、配备标准化的监测设备、建立远程辐射监测与咨询平台,可有效提升基层机构的辐射防护与监测能力,降低辐射安全隐患。

四是环境辐射监测体系的完善,通过建立覆盖大气、水体、土壤、生物的全方位环境辐射监测网络,结合卫星遥感、无人机监测等技术,实现对 I-131 环境辐射影响的全链条、常态化监测,为生态环境辐射安全评估提供数据支持。此外,随着核医学技术的发展, I-131 与其他核素联合应用的场景将不断增多,未来还需开展多核素联合应用的辐射防护评价与监测技术研究,保障核

医学诊疗的安全开展。

5 结论

I-131 核素在甲状腺疾病诊疗中具重要临床价值,但其辐射安全问题需重视。辐射防护评价与监测技术是保障 I-131 核医学应用安全的核心手段,建立含辐射源项特性分析、防护对象风险评估、防护措施有效性评价的防护评价体系,采用个人、工作场所、环境、患者体内辐射监测等多元化监测技术,可降低辐射风险。不过, I-131 辐射防护与监测工作存在监测精准度不足、个性化防护体系不完善、基层机构能力薄弱等问题。未来,要聚焦监测技术智能化与精准化,建立个性化辐射防护评价体系,加强基层机构辐射防护能力建设,完善环境辐射监测网络,为 I-131 核医学应用安全提供有力技术支撑。同时,需加强辐射防护跨学科研究,推动核医学与辐射防护技术协同发展,助力核医学高质量发展。

参考文献

- [1] 刘宝华,孔令丰,王美霞. 131I 在核医学应用中的辐射防护及评价[J]. 中国辐射卫生, 2008, 17(2):182-183. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2008.02.028.
- [2] 李石银. I-131 核素在核医学应用中的辐射防护与安全研究[D]. 南华大学, 2019.