

进口矿产品的放射性远程监测设备及其探测器选择

严文勋¹ 李建军¹ 郑建明¹ 朱金连² 封亚辉¹ 程 薇¹

中图分类号: TL81 文献标识码: B 文章编号: 1004 - 714X(2011) 01 - 0091 - 04

【摘要】 目的 探讨进口矿产品放射性远程监测的探测器的合理选择。方法 在综合比较各类型监测设备探测器优缺点的基础上,提出进口矿产品放射性远程监测的探测器组成。结果 确定了用于进口矿产品放射性远程监测的探测器配置。结论 以塑料闪烁体作为口岸进口矿产品放射性远程监测设备的探测器可实现,为进口矿产品的放射性实施远程监测。

【关键词】 进口矿产品;放射性;远程监测;塑料闪烁体探测器

随着我国进一步实施改革开放政策和国际间贸易的迅速发展,我国矿产品贸易迅速增长,品种涉及到金矿粉、银矿粉、铜矿砂、铁矿石、锌矿、铅矿、锆矿砂等 210 种。近年来,一些不法商人见利忘义,把携带有放射性物质或受放射性污染的物品掺杂在矿产品中出口至我国,尤以集装箱运载的矿产品为害较重。近年来对江苏口岸进口矿产品监管情况表明:多批矿产品放射性严重超标,有些矿产品的放射性水平超过国家标准的几倍、几十倍,甚至几百倍,部分矿产品中甚至夹带有人工放射性核素。由于这些伴有放射性物质的矿产品进口时往往没有标识任何危险标志,也没有采取任何防护措施,如果对这些放射性超标的矿产品达不到有效的监测(检测),导致其进入生产和流通领域,将会给我国工业生产和人民生命健康带来不可估量的损害^[1]。因此,研究进口矿产品的放射性检测和监测技术,

尤其是远程放射性监测技术,对于有效防止高放射性矿产品流入我国具有极其重要的现实和社会意义,已经得到口岸检验检疫部门的高度重视,并加紧进行相关技术和设备的开发研究。

1 国内外非成像型放射性监测(检测)设备

放射性监测技术分为成像型监测技术和非成像型监测技术^[2],成像型监测系统具有位置分辨能力和能谱分析能力,一般应用于放射源的贮藏和运输、核废物的处理、反恐怖、环境辐射污染监测、核电站和反应堆监测、放射性实验室以及医疗部门监测等领域,目前国内还不具备成套的成像型放射性监测系统。相比成像型放射性监测系统,非成像型放射性监测系统不具备位置分辨能力,但构造更为简单,价格更为便宜,对口岸进口矿产品放射性的监测采用非成像型监测设备已足够满足监测的要求。

1.1 国内的非成像型放射性监测(检测)设备 1994 年,中国原子能研究院研制了我国第一台大型高分辨分段 γ 扫描仪 (SGS)^[3],用于秦山和大亚湾核电站燃料组件产生的可燃废物检测。

基金项目:国家质检总局科技计划项目,编号:2009IK121
作者单位:1 江苏出入境检验检疫局,江苏 南京 2010001;
2 镇江出入境检验检疫局,江苏 镇江 212003
作者简介:严文勋(1980~),男,湖北荆州人,工程师,博士,从事代矿金相关检测研究工作

表 2 实验组与对照组微核率和微核细胞率

组别	例数	观察细胞数(个)	微核率(‰)	微核细胞率(‰)
实验组 A	245	490 000	1.50(736/490)	1.50(736/490)
实验组 B	245	490 000	1.57(770/490)	1.57(770/490)
实验组 C	181	181 000	0.93(168/181)	0.99(179/181)
实验组 D	181	181 000	0.88(160/181)	0.94(170/181)

2.2 讨论 外周血淋巴细胞培养制备染色体和微核,往往是在培养基中添加一定量的动物血清或人的血清和植物血凝素 (PHA),作为供给细胞的营养成份和提供细胞增殖的生长因子。无小牛血清培养液的成分一般认为由两部分组成,即基础培养基和替代血清的补充因子,基础培养基目前大部分使用的是 RPMI1640,补充因子是无血清培养基中各种血清替代成分的总称。

血清对培养淋巴细胞的影响的主要作用在于向细胞提供生长增殖所需的激素、生长因子和其他营养物质,但由于小牛血清成分复杂,有效期短,易被病毒和支原体感染,每个批次的血清之间也存在批间差异,另也增加实验成本,按照目前市场销售的血清平均价格约为 0.25 元/ml,按 25% 添加量计算,100 ml 培养液中血清所占的成本是 6.25 元,培养基及其他添加物的成本约为 6 元,每 100 ml 培养液的成本中血清约占 51%,另外血清中还含有一定细胞毒性物质和抑制物质,也对细胞产生一定的影响。

基于血清对淋巴细胞培养的作用,我们实验室利用人体自身血清来代替小牛血清培养淋巴细胞,这样既可消除异体血清中不明成份对淋巴细胞培养的影响,又克服了易污染的难题,提高了外周血淋巴细胞染色体和微核制备的安全性,同时简便了培养液配制和操作,减轻了工作量和节约实验成本。通过有小牛血清和无小牛血清进行培养外周血淋巴细胞制备微核的实验结果显示,有或无小牛血清对培养淋巴细胞微核没有统计学意义,提示采用无血清培养外周血淋巴细胞制备微核是可行的。

参考文献:

[1] WS/T187 - 1999 淋巴细胞微核估算受照剂量方法[S].
[2] 丛慧芝,陈平乐,张慧芳,等.一种低成本、易取材制备外周血染色体新方法研究[J].中国计划生育学杂志,1994,6(14):345 - 346.
[3] 历广坤,黄秀君,程介山,等.无小牛血清外周血淋巴细胞培养液的研究[J].中国优生与遗传杂志,1999,7(2):56 - 57.
[4] 高文和,熊连富,许德新.无血清的外周血淋巴细胞制备染色体[J].中华医学遗传学杂志,1996,13(4):243.
[5] 梁星作,梁新初,毛玉蟾,等.放射工作者外周血象与淋巴细胞染色体畸变分析[J].中国辐射卫生,2000,9(2):123.
[6] 覃志英,唐孟俭,黎军,等.广西河池市 290 名放射工作人员外周血淋巴细胞微核分析[J].中国辐射卫生,2007,16(3):308 - 309.
(收稿日期:2010 - 09 - 03)

1999 年,北京防化研究院研制了一种快速放射性环境监测系统^[4],它采用塑料闪烁探测器、GPS 技术和微处理机组组成高性能多用途辐射监测系统,可用于环境监测和辐射侦察,可分辨 $10 \sim 2 \mu\text{Gy/h}$ 的放射源。

2000 年,中国原子能科学研究院放射化学研究所采用 γ 射线探测器阵列和序贯概率比检验法研制了我国第一台人员出入口核材料放射性监测装置^[5-6],用以检测通过出入口的人员是否以隐蔽方式非法携带核材料或其他放射性物质。

2002 年,成都理工大学核工系研制了一种既可用于建筑材料和环境空气放射性检测,又可用于石材勘探、评价以及核设施周围环境的 γ 剂量监测的放射性检测仪^[7]。该仪器采用 NaI (TI) 闪烁计数器配 GDB44 光电倍增管作为 γ 射线探测器,由单片机组成测量系统,配备笔记本电脑作为后备的大容量数据存储系统和数据处理系统,完成数据的保存、处理和计算工作。

2005 年,中国原子能科学技术研究院核技术应用研究所研制了一种专门用于放射性恐怖活动和放射性物质非法转移的新型放射性物质检测装置^[8]。系统采用非常稳定和可靠的探测材料,对放射性物质具有较高的探测灵敏度和很强的方位辨别能力,且其检测信息能通过有线或无线进行网络传输,实现远程控制与监测,同时具有体积小、质量轻、拆装方便和使用灵活等优点,可用于交通工具、货物、建筑材料、矿石、化矿产品、废旧物品、工业垃圾以及出入境人员携带的物品等的放射性监测。

2006 年,中国原子能科学研究院研制出了一种用于放射性废物检测的装置^[9],该检测装置中采用 3 个高纯锗探测器,可以实现径向分 3 段同时测量,测量精度很高。同年,该院放射化学研究所又研制了一种用于行李放射性检测的装置^[10],该装置可与现有的 X 射线安全检测装置联合用于放射性安全检测该装

置采用的 NaI (TI) 探测器,对核素的探测活度下限较低。

2007 年,中国原子能科学研究院研制出了一种车载式的放射性检测装置^[11],通过探测中子和 γ 射线来检测是否有人或车辆非法携带放射性物质。检测室,可以实现数据采集、数据分析、数据处理、数据显示、数据存储的功能,当达到设定的报警阈值时,可显示报警,并伴有声光报警提示。

清华同方威视公司一直致力于放射性物质监测设备的研究与开发,该公司研制的针对火车的放射性物质监测设备主要由探测器分系统、数据采集与处理分系统、图像监视分系统、声光报警分系统等四个分系统组成,已投入实际应用并取得了良好的监测效果。总的来说,我国对放射性监测设备的研究具有较高的水平,尽管对新的放射性监测技术如辐射环境成像技术的研究还远远不够。

1.2 国际上非成像型放射性监测设备 国外对放射性物质进行检测的研究工作开展得较早,并有定型的商品投入实际应用,美国、英国、法国、德国、意大利都已开发出各自不同类型的放射性监测设备并得到广泛应用,国际上通过 ITRAP 标准的公司主要有 ASPECT、NucSafe、SAPHYMO、POLIMASTER、Thermo RMP 和 Canberra 等几家公司^[12-19]。

图 1 中左图是美国 Thermo Eberline ESM 公司研制的 FHT1388 型辐射监测系统,该系统专门应用于监测火车、拖车、船只运载的货物是否放射性超标,被广泛应用于钢铁厂、废料厂、焚化厂、海关、港口、机场和核电站。图 1 中右图是 Thermo Eberline ESM 公司研制的 FHT1372 型辐射监测系统,专门用于监测通行口中人员或传送带上箱包中是否夹带有放射性物品。该两种设备主要通过监测 γ 射线的剂量率来达到对放射性是否超标的有效监控的目的,采用 8 个闪烁体探测器作为扫描探头,核心电路是单道分析器。

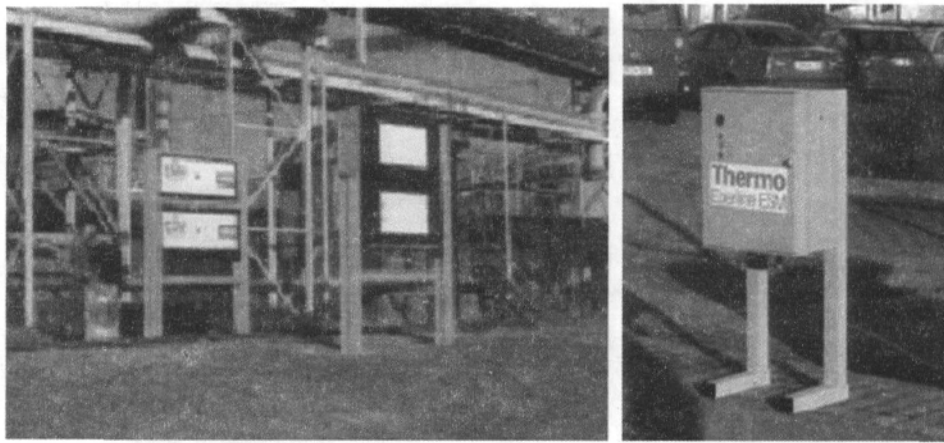


图 1 美国 Thermo Eberline ESM 公司生产的 FHT1388、FHT1372 型放射性监测系统

加拿大 Exploranium G. S. 公司早期便研发了一系列的放射性监测设备,其中包括便携式剂量率仪、车辆放射性监测系统、铁路放射性监测系统、废物处理站监测系统等。图 2 中所示是该公司生产的车辆放射性监测设备。这些设备基本上都是采用单道分析器监测通过通道的货物中 γ 射线的强度,对于强度超标的可疑点再配合多道分析器进行核素分析。



图 2 加拿大 Exploranium G. S. 公司生产的车辆放射性监测设备

美国 Canberra 公司也是专业的生产放射性监测设备的国际知名公司,图 3 中所示的为美国 Canberra 公司生产的 JPM-12A 型针对机车的放射性物质监测设备,该设备同样也为门式监测系统,灵敏度较高。



图 3 JPM-12A 型针对机车的放射性物质监测设备

满洲里口岸于 1999 年进口了 2 台 BICRONASM III 放射性检测仪^[20],分别安置在满洲里公路口岸和铁路口岸,用于对进境汽车和火车装载的废金属进行监测。BICRONASM III 放射

性检测仪是美国 Saint – Gobain industrial Ceramics 公司的产品 ,能够对经过其传感器面板的移动物体的放射性指标进行监测。

2 监测设备的探测器选择

2.1 监测原理 剂量率仪自问世以来一直是在线辐射监测最重要的设备之一 ,其原理是把核衰变时所发射的射线能量记录下来并转化为相应的脉冲信号。放射性物质的衰变通常会伴随着 α 、 β 、 γ 射线以及中子的释放 ,对于 α 、 β 、 γ 、X 射线和中子等不同的射线 ,都有相应的不同类型的剂量率仪对其进行探测 ,且针对不同的探测应用 ,其探测的形式也具有多样性。由于放射性物质发射的 α 、 β 射线的穿透力弱 ,且伴随有很强的自吸收 ,容易被外物阻挡 ,从而监测系统通常需要对 γ 射线进行探测来达到监测的目的。因此 ,对 γ 射线的探测有着重要的意义和应用价值。科学研究发现 ,几乎所有的核衰变现象都伴有特征 γ 射线产生 ,通过对 γ 射线的能谱分析 ,即可以获得核衰变现象的重要信息。同时 ,由于空气对 γ 射线的衰减程度不是太高 ,可以在适当的距离进行探测 ,这为在线远程监测提供了可能。

放射性物质发射的 γ 射线到达探测器后 ,探测器将产生一个相应的脉冲信号 ,该信号经过监测设备的数据采集和处理系统被记录下来 ,单位时间内记录的脉冲数称为计数率。除了放射性物质所发射的射线能够引起计数率的变化以外 ,宇宙射线以及环境中的天然放射性射线也能引起计数率的变化 ,这个计数率称为本底。为了达到对放射性的有效和准确监测 ,该本底计数必须被考虑进去 ,同时作出相应的修正。利用监测设备的探测器对 γ 射线引起系统计数率变化的持续采集 ,判断被监测物质是否含有放射性物质。监测设备事先设定一个阈值 ,当计数率高于此阈值 ,则设备就会报警 ,从而达到对放射性是否超标的有效监测。

2.2 探测器的选择 对放射性的监测最常用的是 γ 空气吸收剂量率仪 ,常用的 γ 空气吸收剂量率仪主要有三种类型 :高压电离室型、闪烁体型和计数管型。不论选择哪种类型的剂量率仪 ,均应满足国标 GB/T14583 – 93(环境地表 γ 辐射剂量率测定规范) 所规定的标准。可作 γ 射线探测的探测器一般有 :气体探测器、闪烁体探测器和半导体探测器 ,而上述高压电离室和计数管实际都属于气体探测器的类型。

实际可应用的探测器的选择必须考虑到监测设备对能量分辨率的要求、探测效率以及价格等等因素。一方面 ,闪烁体探测器在本文关心的能量范围(^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 以及 ^{40}K 衰变释放的 γ 射线能量范围为 :60keV 到 1.5MeV) 有高的探测效率 ;另一方面 ,监测设备对 γ 射线的监测只是作计数使用 ,因而不要求高的能量分辨率 ;最后 ,闪烁体探测器制作工艺相对简单 ,制造成本相对更低廉。因此 ,闪烁体探测器成为了口岸进口矿产品放射性监测设备的一个很好的选择。

通常 ,口岸进口矿产品所含的天然放射性核素的比活度不会很高 (除非夹带有人工放射性核素物质) ,其所发射的射线强度也是比较微弱的。因此 ,要达到必要的灵敏度和准确性 ,必须采用大面积的探测晶体来探测尽可能多的射线。基于上述的分析 ,口岸进口矿产品放射性监测设备可选择采用大面积的闪烁体探测器和低本底光电倍增管配合组成相关的计数系统来实现对 γ 射线的探测。闪烁体探测器对 γ 射线的探测一般分为如下的五步进行^[21] :①矿产品产生的 γ 射线为闪烁体探测器所捕捉 ,闪烁体与射线相互作用 ,闪烁体吸收射线能量而使原子、分子产生电离和激发 ;②受激原子、分子退激时发射荧光光子 ;③利用反射物和光导将闪烁光子尽可能多地收集到光电倍增管的光阴极上 ,由于光电效应 ,光子在光阴极上击出光电子 ;④光电子在光电倍增管中倍增 ,电子流在阳极负载上产生电信号 ;⑤此信号由后续电子学系统记录和分析。

一般常用的闪烁探测器有 NaI(Tl)、CsI(Tl)、BGO、Cd- WO₄、BaF₂ 以及塑料闪烁体等 ,各种不同闪烁体探测器的物理参数如表 1 所示。

表 1 常用闪烁体的物理参数比较^[22]

闪烁体	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	CdWO ₄	BaF ₂	塑料
最强发射波长(nm)	415	550	480	540	310	423
衰减时间(ns)	230	1000	300	5000	630	2.8
折射系数(415nm)	1.85	1.80	2.15	2.25	1.65	1.59
密度(g/cm ³)	3.67	4.51	7.13	7.90	4.48	1.05
熔点(K)	924	894	1323	159	1627	348
是否潮解	是	否	否	否	否	否
相对 NaI(Tl) 产额(%)	100	45	12 – 14	40	24	80

从表 1 可以看出 ,相对 CsI(Tl)、BGO、CdWO₄、BaF₂ 等闪烁体而言 ,塑料闪烁体相对产额更高 ,衰减时间短 ,折射系数低 ,密度小 ,而相对 NaI(Tl) 闪烁体而言 ,塑料闪烁体还具有不潮解的优点。同时 ,塑料闪烁体还具有价格便宜(同样价格的探测器 ,塑料闪烁体探测器的体积更大 ,可以探测到更多的射线 ,灵敏度更高) ,易于制成各种形状和尺寸的优点。值得一提的是 ,塑料闪烁体除探测面以外 ,其余三面用铅板作为屏蔽 ,可大大的降低本底对监测的干扰 ,还可以进一步提高监测的灵敏度。结合上述的分析 ,在众多不同类型的闪烁体中 ,本文选择塑料闪烁体作为口岸进口矿产品放射性远程监测设备的探测器。

3 小结

口岸对进口矿产品的放射性实现远程监测的关键在于监测设备对放射性探测的准确性和敏感性 ,而探测器无疑是决定监测设备准确性和敏感性的关键。国内外放射性监测(检测) 设备所采用的探测器主要有气体探测器、闪烁体探测器和半导体探测器三种类型 ,而塑料闪烁体探测器则相对更经济 ,探测灵敏度更高 ,适宜作为口岸进口矿产品放射性远程监测设备的探测器。探测器的选定为进口矿产品放射性的远程监测技术的实施提供了支持和参考。

参考文献:

[1] 张岳林 ,王远忠. 进口物品放射性入侵风险的调查报告 [J]. 口岸卫生控制 ,2007 ,12(4) :25 – 28.

[2] 李鑫. 二维辐射监测系统的研制 [Z]. 北京 :清华大学工程物理系 ,2008.

[3] 韩开春. 铁路运输中放射性物质鉴别方法 [J]. 铁道劳动安全与卫生 ,1994 ,21(1) :73 – 76.

[4] 张松寿 ,李淑媛 ,李润新. 快速放射性环境监测系统 [J]. 核电子学与探测技术 ,1999 ,19(1) :55 – 59.

[5] 黄德宝 ,张文良 ,吕钊 ,等. 人员出入口核材料放射性检测装置的研制 [J]. 原子能科学技术 ,2000 ,34(5) :445 – 447.

[6] 张文良. 人员出入口核材料放射性监测装置计算机数据采集和处理系统的研制 [J]. 原子能科学技术 ,2000 ,34(5) :464 – 468.

[7] 程渤 ,虞先国 ,周建斌 ,等. 一种新的 γ 能谱型放射性检测仪 [J]. 核电子学与探测技术 ,2002 ,22(6) :557 – 558.

[8] 杨璐 ,王国保 ,陈玉华 ,等. 放射性物质检测装置的研制 [J]. 同位素 ,2005 ,18(1 – 2) :39 – 42.

[9] 何丽霞 ,隋洪志 ,周志波 ,等. 放射性废物检测装置的研制 [J]. 中国原子能科学院年报 ,2006.

[10] 王同兴 ,张文良 ,赵荣生 ,等. 行李放射性检测装置的研制 [J]. 原子能科学技术 ,2006 ,40(5) :629 – 631.

肺部计数器测量肺内氡子体的可行性研究

成智威^{1,2}, 贾明雁², 程建平¹, 申茂泉², 黎先利², 田自宁², 巨凌军²

中图分类号: TL81 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2011)01-0094-02

【摘要】 目的 探讨利用肺部计数器对工作人员肺内氡子体测量的可行性。方法 应用活性炭吸附一定量的氡,结合躯干体模,对肺部计数器测量氡短寿命子体的探测效率进行刻度。结果 通过对测量数据进行处理分析和相关文献资料的调研,结合测量系统的性能,估算出了体外直接测量氡子体²¹⁴Bi的时机。结论 通过实验,得出了利用肺部计数器从体外直接测量氡的短寿命子体是可行的,但必须保证工作人员从现场离开后短时间内进行监测。

【关键词】 肺部计数器 氡子体 躯干体模

²²²Rn 是 ²³⁸U 系中核素 ²²⁶Ra 的衰变子体,²²²Rn 的照射是采矿、坑道挖掘等工作人员受天然辐射最重要的来源。²²²Rn 对人造成的内照射剂量主要来自其短寿命子体,这些子体核素经吸入进入人体后主要沉积在呼吸道内。氡及其子体核素的内照射剂量估算,普遍采用测氡仪或个人氡剂量计直接监测场所氡及其子体浓度,从而估算工作人员吸入氡及其子体的活度。但在工作人员采取了一定的防护措施时,该估算值会高出工作人员实际的受照剂量。体外直接测量人体吸入氡及其子体核素的活度,主要采用全身和肺部计数器系统进行。目前国内有关此类方面的研究工作开展得很少,主要原因可能是全身和肺部计数器设备较昂贵。中国辐射防护研究院曾经报道过环境中氡对全身计数器测量的影响^[1];马如维等研究过骨中²¹⁰Pb 的测量与剂量的估算^[2,3]。有关直接测量肺内氡短寿命子体的

报道较少。国外开展了一些研究工作,大多数是针对煤矿工作人员体内²¹⁰Pb 的测量,也有少量关于居住地氡气浓度较高的人员体内氡及其子体的监测报道^[4-6]。

笔者采用活性炭在氡室中吸附一定量的氡气,由实验室超低本底 HPGe γ 谱仪进行测定活性炭的氡气吸附量,用活性炭模拟人肺,将活性炭装入模拟人体的躯干体模内,对肺部计数器测量氡短寿命子体的探测效率进行了刻度。根据实验刻度的结果,并假设现场工作人员的工作时间、呼吸量、现场氡浓度等条件,通过计算估算出了肺部计数器系统测量氡子体的性能,探讨肺部计数器可以从体外直接测量氡的短寿命子体的可行性。

1 实验器材和方法

1.1 实验器材 含 4 个平板型 HPGe 探测器的肺部计数器 1 套;躯干体模 1 套^[7];实验室超低本底 HPGe γ 谱仪 1 套;含 ²⁴¹Am、¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 的混合点源 1 个;烘箱 1 台;氡室 1 套;电子天平 1 台;RAD7 测氡仪 1 台;托盘 4 个;1L 塑料量杯 2 个;活性炭若干;液氮若干升;塑料袋、药棉等其它实验辅助器材。

作者单位:1 清华大学,北京 100084;2 西北核技术研究所,陕西西安 710027

作者简介:成智威(1970~),男,江苏泰兴人,高级工程师,清华大学博士研究生在读,从事辐射防护与环境保护等相关研究工作。

- [11] 李新军,张文良,方昕,等. 车载式放射性检测装置的研制[J]. 中国原子能科学院年报,2007.
- [12] Mori C, Suzuki T, Koido S, et al. Effect of background distribution radiation shielding on natural radioactivity measurement with imaging plate[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 369: 544-546.
- [13] Allyson JD, Sanderson DCW. Monte Carlo Simulation of Environmental Airborne Gamma-Spectrometry[J]. J Environ Radioactivity, 1998, 38(3): 259-282.
- [14] Wanno Lee, Gyuseong Cho, HoDong Kim. A radiation monitoring system with capability of gamma imaging and estimation of exposure dose rate[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(3): 1547-1551.
- [15] Robert-Coutant C, Moulin V, Sauze R, et al. Estimation of the matrix attenuation in heterogeneous radioactive waste drums using dual-energy computed tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, 422: 949-956.
- [16] Espartero AG, Pina G, Suarez JA. Development and application of a radioactivity characterization system for low-level radioactive waste[J]. Nuclear Instruments and Methods

in Physics Research A, 1999, 422: 790-794.

- [17] Guillot L. Extraction of full absorption peaks in airborne gamma-spectrometry by filtering techniques coupled with a study of the derivatives. Comparison with the window method[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53: 381-398.
- [18] Clement C H, McCallum B A. Calibration of Non-discriminating Scintillating Instruments for Sensitivities to Naturally Occurring Gamma Radiation Emitting Radionuclides at Environmental Concentrations[J]. Appl. Radiat. Isot, 1996, 47(9/10): 1003-1009.
- [19] Kluson J. Environmental monitoring and in situ gamma spectrometry[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2001, 61: 209-216.
- [20] 杨年. 放射性检测仪器设备的现状、发展趋势和对策[J]. 四川地质学报, 2006, 26(1): 56-58.
- [21] 复旦大学,清华大学,北京大学合编. 原子核物理实验方法(修订第三版)[R]. 北京:原子能出版社,1997.
- [22] 林勇. 环境和货物辐射场能谱成像关键技术的研究及应用[R]. 北京:清华大学工程物理系,2003.

(收稿日期:2010-09-28)