doi:10. 3969/j. issn. 2095-1035. 2013. 01. 002

^{210}Po，^{210}Bi 和 ^{210}Pb 测试技术研究进展与现状

王玉学[1,2]　郭冬发[1]　王 哲[2]　黄秋红[1]　王 雪[2]　李红光[2]

（1 核工业北京地质研究院，北京 100029；2 核工业二四 O 研究所，辽宁 沈阳 110032）

摘　要　铀系核素 ^{210}Po、^{210}Bi 和 ^{210}Pb 的测试在铀矿地质勘查与核废物安全处置研究、沉积年代学与同位素地球化学研究、大气环境学与辐射卫生学研究等诸多领域具有重要意义。重点总结了近些年来 ^{210}Pb、^{210}Bi 和 ^{210}Po 三核素各种测试技术的研究进展与现状，评述了存在的主要问题及未来发展趋势。

关键词　^{210}Pb；^{210}Bi；^{210}Po；进展；现状；趋势

中图分类号：O657. 62；TH842　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-1035(2013)01-0011-06

Research Progress and Status of Measuring Techniques of ^{210}Po，^{210}Bi and ^{210}Pb

WANG Yuxue[1,2]，GUO Dongfa[1]，WANG Zhe[2]，HUANG Qiuhong[1]，WANG Xue[2]，LI Hongguang[2]

（1. *Beijing Research Institute of Uranium Geology of CNNC*，*Beijing* 100029，*China*；
2. *No.* 240 *Research Institute of CNNC*，*Shenyang*，*Liaoning* 110032，*China*）

Abstract　The detection of uranium series elements-^{210}Po，^{210}Bi and ^{210}Pb are significant in many fields including research on the geological exploration of uranium and the safe disposal of nuclear waste，deposition geochronology，isotope geochemistry，the atmospheric environmental science，the radiation hygiene，and so on. This article focuses on summarizing the research progress and situation of various techniques for measuring ^{210}Po，^{210}Bi ，^{210}Pb in recent years. The major technical problems and the future trend for instrumental development are reviewed.

Keywords　^{210}Pb；^{210}Bi；^{210}Po；progress；status；development trend

0　前言

铀系放射性核素 ^{210}Po、^{210}Bi 和 ^{210}Pb 的测试在铀矿地质勘查与核废物安全处置研究、沉积年代学与同位素地球化学研究、大气环境学研究、辐射卫生学研究、油气与多金属矿产勘查、地下裂隙水与温泉勘查及自然地质灾害勘查等诸多领域具有重要意义。目前的 ^{210}Po 测试技术包括同位素稀释 α 能谱法、总 α 计数法和液闪法 3 种；^{210}Bi 测试技术包括总 β 计数法、液闪法和切伦科夫计数法 3 种；^{210}Pb 测试技术包括 ^{210}Po 法、^{210}Bi 法、γ 能谱法、液闪法和 ICP-MS 法 5 种；^{210}Pb，^{210}Bi，^{210}Po 联合测定技术包括“1 次 Ag 箔自沉积-2 次阴柱分离-α 谱/总 β 联合分析”、“Ag 箔 Ni 箔 2 次自沉积-1 次阴柱分离-α 谱/总 β 联合分析”、“1 次沉淀富集-2 次 POLEX® 萃取-液闪分析”、“1 次锶树脂分离-1 次 Ag 箔自沉积-1 次阴柱分离-α 能谱/液闪/γ 能谱联合分析”和“镍箔 2 次自沉积-总 α/总 β 联合分析”5 种。对这些测试技术的研究进展与现状做了系统总结，评述了仍然存在的主要问题以及未来发展趋势。

收稿日期：2012-09-24　　**修回日期**：2012-11-29

基金项目：中国地质调查局地质调查工作项目(121201112027)资助。

作者简介：王玉学，男，博士，高级工程师，主要从事放射性分析研究。E-mail：wangyux9@163. com

1 ^{210}Po 测试技术

同位素稀释 α 能谱法为目前^{210}Po 测试技术的主流方法，多以自沉积方式制源，也有电沉积制源的报道。在示踪剂的选择上，有^{209}Po 逐渐取代^{208}Po 的趋势。仍然存在的一些主要问题包括：严重依赖于示踪剂确定回收，且国内没有稳定的示踪剂供应；制源条件的选择没有取得一致的认识；常规的防核反冲措施（如测量室保持至少 12 μg/cm^2 的空气层、在测量源上施加－5.6 V 的电压等方法）对于防止真空下^{210}Po 的挥发而引起的探测器污染无效；探测效率一般低于 25%；是否有^{210}Pb 共沉积存在争议等。

总 α 计数法测^{210}Po 主要来自国内的文献报道，可以在无示踪、不分离基体元素的情况下快速自沉积制源和近场测量（探测效率高）是该法的主要优点。

单独分析^{210}Po 的液闪法主要为 PERALS 法，目前主要受限于市售 H_3PO_4 的高试剂空白或淬灭产生的影响。

1.1 同位素稀释 α 能谱法测^{210}Po

1.1.1 自沉积制源

(1)银箔自沉积制源

Flynn[1]较早地报道了银箔自沉积制源测定岩石、铀矿石及流出物样品中^{210}Po 的方法。制源方法描述为：盐酸羟胺、柠檬酸钠和稳定铋存在下，调节盐酸的 pH 值为 2，在加热及磁搅拌下，将^{210}Po 自沉积于单面覆盖聚乙烯的银箔上。这个制源条件至今仍未做任何改变地大量应用于各类环境样品中的^{210}Po分析，只是由于回收并不稳定的原因需加入^{209}Po或^{208}Po 进行效率示踪[2-4]。

除了 Flynn 选择的制源条件，目前的应用性文献中还有各种各样的制源条件组合。选择的盐酸浓度有 0.01[2-3]，0.1[4]，0.3[5]，0.5[6]，1.0[7]，2.0 mol/L[8]；选择的温度有 60[8]，70[9]，80[7]，90 ℃[5]；选择的还原剂有盐酸羟胺[5]、抗坏血酸[7-8]和盐酸肼[6]；选择的制源溶液体积范围在 20[8]～200 mL[3]；选择的制源时间范围在 1.25～24 h[2]；部分文献选择加入柠檬酸钠掩蔽干扰[2-4]。报道的回收率平均值在 70%左右[3]，检出限典型值约为 3.0×10^{-4} Bq/L[2]。

有关银箔自沉积制源的争议性报道是：一部分^{210}Pb 是否随^{210}Po 共沉积[10-11]。

(2)铜箔自沉积制源

目前，铜箔自沉积制源用于地下水、海水、沉积物和土壤样品中^{210}Po 的分析也有很多报道。制源条件选择的盐酸 pH 值有：pH＝2[12]，pH＝1.5[13]，pH＝(0.5～1.0)[14]；选择的温度范围基本在 85～95 ℃；选择的还原剂有盐酸羟胺和抗坏血酸；选择的制源时间范围在 1.25[12]～12 h[14]；有文献采用加入柠檬酸钠掩蔽干扰[12]，部分文献给出的回收率波动范围为 30%～36%[12,15]。

一部分^{210}Pb 是否随^{210}Po 共沉积于铜箔也存在争议性[11,16]。

(3)镍箔自沉积制源

Lepore 等[17]应用^{208}Po 示踪-镍箔自沉积制源分析了海水中^{210}Po。选择的制源条件为：100 mL 盐酸(0.5 mol/L)介质，控温 85 ℃，0.2 g 抗坏血酸和 0.5 g 盐酸羟胺存在下，自沉积 6 h。Miura 等[18]报道了在盐酸(0.5 mol/L)溶液中，控温 85 ℃，抗坏血酸存在下，^{210}Po 在镍箔上的自沉积回收率约为 75%。

与银箔和铜箔一样，有关镍箔自沉积制源的争议性报道仍然是一部分^{210}Pb 是否随^{210}Po 共沉积[10,16,19]。

1.1.2 电沉积制源

电沉积制源的应用性报道比较少，Uesugi 等[20]采用^{209}Po 示踪，在 EDTA 和柠檬酸铵掩蔽下，采用 DDTC-苯萃取^{210}Po，消解有机相后，将^{210}Po 电沉积(64 mA/cm^2，2 h)于不锈钢片上，实现了金属铅中^{210}Po 的分析，给出的回收率波动范围为 63%～99%。Miura 等[21]采用^{208}Po 示踪，CuS 沉淀富集并通过锶树脂分离后，将^{210}Po 电沉积(20 mA/cm^2，2.5 h)于不锈钢片上，实现了各种化学试剂以及环境样品中的^{210}Po 的分析，给出的回收率波动范围为 56%～99%。

1.2 总 α 计数法测^{210}Po

王玉学[22-23]等采用总 α 计数法测定了岩石、土壤及沉积物等样品中^{210}Po。研究认为：当盐酸浓度为 2.0 mol/L，溶液体积为 25 mL，恒温 80 ℃，振荡频率为 180 次/min，振幅 20 mm，抗坏血酸存在下，自沉积制源 2 h，^{210}Po 可定量自沉积于铜箔；当盐酸浓度为 1.0 mol/L，溶液体积为 25 mL，恒温 90 ℃，振荡频率为 180 次/min，振幅 20 mm，盐酸肼与柠檬酸钠存在下，自沉积 1 h，^{210}Po 可定量自沉积于镍箔。

1.3 液闪法测^{210}Po

Case 等[24]首先报道了 PERALS 法分析沉积物样品中^{210}Po 的方法。在 H_3PO_4(7.5 mol/L)-HCl(0.01～0.14 mol/L)体系中，^{210}Po 可直接被萃取闪烁混合液(POLEX®)萃取。该方法目前主要受限于 H_3PO_4 的高试剂空白(市售 H_3PO_4 中^{210}Po 的含量在 8×10^{-3}～2.4 Bq/L[21])。如使用不含^{210}Po 的

H_3PO_4，方法检出限为 0.24 Bq/L。

Veronneau 等[25]的研究表明，在 H_2SO_4(3.0 mol/L)-NaCl(0.02～1.0 mol/L)混合体系中，^{210}Po 可以被 URAEX® 萃取闪烁液定量萃取，但环境样品称样量较大，该方法严重受限于颜色淬灭。

2　^{210}Bi 的测试技术

总 β 计数法测 ^{210}Bi 是目前 ^{210}Bi 测试技术的主流方法，制源方式包括沉淀制源和自沉积制源两种。沉淀制源仍然存在的问题包括：一般需稳定铋示踪，分离与制源过程繁琐耗时；测量源中部分 α 辐射体的存在也会因 α/β 串道效应而对 ^{210}Bi 的 β 测量产生正干扰；覆盖铝箔虽可以有效防止 α/β 串道，但这降低了 ^{210}Bi 的探测效率；手工铺样制源或直接将沉淀当做测量源时，均匀平整很难保证；测量时不考虑 β 自吸收效应可能会造成较大误差。自沉积制源相对简便，测量时可以忽略 α/β 串道效应和自吸收效应产生的影响，无示踪制源时需控制制源条件使回收率稳定。

液闪法测 ^{210}Bi 的探测效率一般比总 β 计数法高，但因液闪测量时本底计数也相对较高，与总 β 计数法相比品质因子并没有明显改善。

切伦科夫计数法测 ^{210}Bi 目前主要受限于方法的低探测效率。

2.1　总 β 计数法测 ^{210}Bi

Meli 等[26]采用稳定铋示踪-TOPO 萃取色层分离-Bi_2S_3 纯化并沉淀制源-总 β 计数法分析了沉积物中 ^{210}Bi。Harada 等[27]采用稳定铋示踪-$Fe(OH)_3$ 共沉淀富集-阴离子交换色层分离-BiOCl 纯化并沉淀制源测定了地下水中 ^{210}Bi。沉淀制源的回收率一般大于 80%。

Helmkamp 等[28]在通入 N_2 驱氧的情况下，采用大面积的镍箔直接在酸化的大体积尿液中自沉积制源，^{210}Bi 平均回收率为 94.5%。

王玉学等[23]的研究表明，适当选择制源条件，^{210}Bi 可与 ^{210}Po 一起定量自沉积于镍箔。

2.2　液闪法测 ^{210}Bi

Sapozhnikov 等[29]通过阴离子交换树脂色层分离和 DDTC-甲苯萃取，液闪法测定了沉积物样品中 ^{210}Bi，回收率波动范围在 61%～69%。

Momoshima 等[30]采用 $Bi(OH)_3$ 沉淀富集后再 BiOCl 沉淀纯化 ^{210}Bi，TOPO 萃取后液闪法测定了松针样品中 ^{210}Bi。

2.3　切伦科夫计数法测 ^{210}Bi

Sapozhnikov 等[29]的研究表明，^{210}Bi 的切伦科夫探测效率约为 9.6%，而本底为每分钟 1.4 个计数，品质因子(E^2/B)仅为液闪法的 1.7%，方法不适合于环境样品测量。

Peck 等[31]研究了各种增强剂的效果。研究表明，通过适当加入 Triton X-100 和水杨酸钠，可将 ^{210}Bi 的切伦科夫探测效率提高到 75%，但此时共存的 α 辐射体核素会产生严重正干扰。

3　^{210}Pb 测试技术

“^{210}Po 法”测 ^{210}Pb 技术包括放置平衡 ^{210}Po 法、除 ^{210}Po 后放置非平衡 ^{210}Po 法和不除 ^{210}Po 放置非平衡 ^{210}Po 法等 3 种，样品需满足 ^{226}Ra/^{210}Pb≤1 这个限定条件才能应用“^{210}Po 法”。3 种“^{210}Po 法”中，目前以除 ^{210}Po 后放置非平衡 ^{210}Po 法应用最多，但除了在同位素稀释 α 能谱法测 ^{210}Po 过程中存在的一系列问题外，该方法还存在一些其它问题，如示踪剂何时加入才能代表 ^{210}Po 在容器上的吸附行为，以及试液放置多长时间后进行第二次自沉积制源测量误差最小等。

“^{210}Bi 法”测 ^{210}Pb 技术包括“分离 ^{210}Bi 法”和“分离 ^{210}Pb 法”两种，检出限一般较“^{210}Po 法”高，但由于分析周期相对较短，目前也有越来越多的应用。

液闪法测 ^{210}Pb 需考虑 ^{212}Pb 以及逐渐生长的 ^{210}Bi 对测量产生的干扰，以及化学淬灭和颜色淬灭产生的影响。

γ 能谱法测 ^{210}Pb 目前应用较为广泛，但该方法除了存在样品用量大和灵敏度低的特点外，自吸收难于准确校正是本法测量不确定度的重要来源。因为对低能(<100 keV)γ 核素而言，γ 射线自吸收因子不但取决于样品的表观密度，还强烈依赖于样品组成。

由于检出限或丰度灵敏度的原因，ICP-MS 法暂不适合于一般低含量环境样品中 ^{210}Pb 的分析。

3.1　间接法测 ^{210}Pb

3.1.1　^{210}Po 法测定 ^{210}Pb

采用除 ^{210}Po 后放置非平衡 ^{210}Po 法，Connan 等[5]测定了沉积物、Vaaramaa 等[6]测定了蘑菇、Al-Masri等[32]测定了土壤及植物、Stewart 等[33]测定了海水等样品中 ^{210}Pb。

采用不除 ^{210}Po 放置非平衡 ^{210}Po 法，Garcia-Orellana 等[8]和 Santos[34]等分别测定了冻干组织样品和头发等样品中 ^{210}Pb。

虽然放置平衡法需要的分析周期比较长，但目前也有应用[35]。海洋生物样品中$^{210}Po/^{210}Pb$比值一般在 n～n×100 之间[36]，是最不适宜采用放置平衡法的样品。

3.1.2 ^{210}Bi 法测^{210}Pb

(1)分离^{210}Bi法

采用直接分离^{210}Bi并沉淀制源，Meli 等[26]测定了海洋样品、Sapozhnikov 等[29]测定了沉积物样品中^{210}Pb。采用 2 次自沉积制源法，王玉学等[23]测定了岩石、土壤、沉积物以及水体样品中^{210}Pb。采用 2 次萃取法，Katzlberger 等[37]测定了地下水样品中^{210}Pb。

(2)分离^{210}Pb法

$Fe(OH)_3$-PbS 沉淀富集后通过阴离子交换树脂纯化，$PbSO_4$ 沉淀制源并放置一个月后测^{210}Bi的β计数是目前应用较为广泛的水中^{210}Pb的间接测定方法[27]。

分离沉积物、岩石、土壤核植物样品中^{210}Pb法的方法包括：阴离子交换树脂分离-$PbCrO_4$ 沉淀制源法[38]、阴离子交换树脂分离-$PbSO_4$ 沉淀制源法[39]、阴离子交换树脂分离-$PbSO_4$-PbS-$PbSO_4$ 连续沉淀纯化制源法[40]和 TOPO 萃取色层分离-Pb-SO_4-PbS-$PbCrO_4$ 连续沉淀纯化制源法[41]等，其中阴离子交换树脂分离-$PbCrO_4$ 沉淀制源法应用较多。

3.2 直接法测^{210}Pb

3.2.1 液闪法测^{210}Pb

目前沉积物以及环境样品中^{210}Pb的液闪分析方法主要包括锶树脂分离-PbC_2O_4 纯化-液闪测量[42]和 $PbSO_4$-$PbCrO_4$-PbC_2O_4 连续沉淀纯化-液闪测量[43]两种，均需采用重量法校正回收，回收率波动范围在 57%～74%。由于^{210}Pb发射的β粒子能量较低，测量时淬灭影响显著。

3.2.2 γ 能谱法测^{210}Pb

目前，用于γ能谱法测量^{210}Pb的方法包括：^{210}Pb点源透射方程联合自吸收方程计算自吸收因子法[44]、根据样品组成计算质量吸收系数联合自吸收方程计算自吸收因子法[45]、全蒙特卡罗模拟探测效率法[46]、^{210}Pb点源透射方程联合蒙特卡罗模拟混合法[47]、^{234}Th双线比值($R_{63.3/92.6}$)经验内标法[48]等，其中^{210}Pb点源透射方程联合自吸收方程计算自吸收因子法应用较多。

Shakhashiro 等[49]报道了 IAEA 于 2006 年组织的土壤样品中^{210}Pb的能谱分析国际比对结论：只有 36%的实验室提供了合格的^{210}Pb测量数据，^{210}Pb的γ能谱测量需要继续改进。

3.2.3 ICP-MS 法测^{210}Pb

Lariviere 等[50]采用 ICP-QMS 法测量了水中^{210}Pb。水样以 Co-APDC 共沉淀富集^{210}Pb后，通过锶树脂分离纯化，并以四乙基铅衍化并结合 Tenax-TA 吸附和热解析进样以改善灵敏度。得出的结论是：只有在稳定铅浓度低于 2 μg/L 且^{210}Pb活度浓度大于 0.1 Bq/L 时才可以检测。

4 ^{210}Pb-^{210}Bi-^{210}Po 联测技术

目前文献报道的三核素联合测定技术共有 5 种，其中 3 种[13,51-52]需要使用多台设备并引入多种示踪剂，另外 2 种[23,37]仅需一台设备并无需引入示踪剂。

Luksiene 等[50]采用稳定铅、稳定铋和^{208}Po示踪，通过“1 次 Ag 箔自沉积-2 次阴柱分离-α 谱/总 β 联合分析方法”进行了气溶胶样品中的三核素联测。Church 等[51]采用稳定铅，^{207}Bi和^{208}Po示踪，通过“Ag 箔 Ni 箔 2 次自沉积-1 次阴柱分离-α 谱/总 β 联合分析方法”进行了气溶胶样品、水体样品以及沉积物样品中的三核素联测。Biggin 等[13]采用^{212}Pb，^{207}Bi和^{208}Po示踪，通过“1 次锶树脂分离-1 次 Ag 箔自沉积-1 次阴柱分离-α 能谱/液闪/γ 能谱联合分析方法”进行了海水样品中的三核素联测，该方法目前被外文文献广泛引用。Katzlberger 等[52]通过“1 次沉淀富集-2 次 POLEX® 萃取-液闪分析方法”进行了地下水样品中的三核素联测(回收仍有较宽波动)。王玉学等[23]采用“镍箔 2 次自沉积-总 α/总 β 联合分析法”实现了岩石、土壤以及水体样品中的三核素联测，该作者的一个尚未公开发表的研究结果表明，采用铜箔在盐酸(0.5 mol/L)＋氯化钠(3.5 mol/L)混合溶液体系中制源，或采用镍箔在盐酸(0.1 mol/L)＋氯化钠(2.9 mol/L)混合溶液体系中制源，抗干扰能力更强。

5 结语

尽管同位素稀释 α 能谱法测^{210}Po还存在很多问题，但作为主流方法还将长期存在。在充分研究分离或制源条件以保证稳定回收的前提下，铜箔自沉积制源-总α 计数法测^{210}Po成本较低、可以不使用示踪剂且可近场高效测量，有希望逐步成为某些样品中^{210}Po的主要测量方法。液闪法测^{210}Po的普及程度取决于液闪谱仪的普及，以及经济的特种磷酸、闪烁液的供应和萃取体系的进一步优化。

沉淀制源总 β 计数法测^{210}Bi 有希望逐步被自沉积制源总 β 计数法取代，液闪方法测^{210}Bi 目前并不存在明显优势，抗干扰增强剂的研发有望提高切伦科夫计数法测^{210}Bi 的探测效率。

间接法与直接法测^{210}Pb 将在未来很长一段时间内共存。如未来测量仪器的 β 本底计数率进一步降低，“^{210}Bi 法”测^{210}Pb 技术将会对传统的“^{210}Po 法”测^{210}Pb 技术构成实质性挑战。液闪法直接测^{210}Pb测量周期较短，定会有越来越多的研究报道出现。如未来研发出更方便、准确的自吸收校正方法，γ 能谱法测^{210}Pb 前景广阔。ICP-MS 法测^{210}Pb 的前景更多寄希望于仪器设计的改善。

与其它联测技术比较，仅需一台价格适中的设备并无需引入示踪剂的三核素联测技术在国内更容易普及，但需进一步研究制源条件以确保稳定回收。

参考文献

[1] Flynn W W. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials[J]. Anal. Chim. Acta, 1968, 43(2): 221.

[2] Matthews K Murray, Kim Chang-Kyu, Martin Paul. Determination of ^{210}Po in environmental materials: A review of analytical methodology[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2007, 65(3): 267-279.

[3] Maria Assunta Meli, Donatella Desideri, Carla Roselli, et al. Analytical methods to determine ^{210}Po and ^{210}Pb in marine samples[J]. Microchemical Journal, 2011, 99(2): 273-277.

[4] Vajda N, LaRosa J, Zeisler R, et al. A novel technique for the simultaneous determination of ^{210}Pb and ^{210}Po using a crown ether[J]. J. Environ. Radioactivity, 1997, 37(3): 355-372.

[5] Connan O, Boust D, Billon G, et al. Bouderbala. Solid partitioning and solid-liquid distribution of ^{210}Po and ^{210}Pb in marine anoxic sediments: roads of Cherbourg at the northwestern France[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2009, 100(10): 905-913.

[6] Kaisa Vaaramaa, Dina Solatie, Lasse Aro. Distribution of ^{210}Pb and ^{210}Po concentrations in wild berries and mushrooms in boreal forest ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2009, 408(1): 84-91.

[7] Kawakami H, Yang Y L, Kusakabe M. Distributions of ^{210}Po and ^{210}Pb radioactivity in the intermediate layer of the northwestern North Pacific[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, 279 (2): 561-566.

[8] Isabel Garcia-Orellana, Manuel Garcia-Leon. An easy method to determine ^{210}Po and ^{210}Pb by alpha spectrometry in marine environmental samples[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002, 56(4): 633-636.

[9] Sanchez-Cabeza J A, Masqué P, Ani-Ragolta I. ^{210}Pband ^{210}Po analysis in sediments and soils by microwave acid digestion[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1998, 227(12): 1-22.

[10] Beasley T M, Osterberg C L. Spontaneous Deposition of Lead on Silver and Nickel from Inorganic and Organic Digests[J]. Analytical Chemistry, 1969, 41(3): 541-543.

[11] MacKenzie A B, Scott R D. Separation of bismuth-210 and polonium-210 from aqueous solutions by spontaneous adsorption on copper foils[J]. Analyst, 1979, 104: 1151-1158.

[12] Bonotto D M, Caprioglio L, Bueno T O, et al. Dissolved ^{210}Po and ^{210}Pb in Guarani aquifer groundwater[J]. Brazil. Radiation Measurements, 2009, 44(3): 311-324.

[13] Biggin Colin D, Cook Gordon T, MacKenzie Angus B, et al. Time-efficient method for the determination of ^{210}Pb, ^{210}Bi, and ^{210}Po activities in seawater using liquid scintillation spectrometry[J]. Anal. Chem., 2002, 74(3): 671-677.

[14] Edgington David N, Robbins John A. Determination of the activity of lead-210 in sediments and soils, www. epa. gov/greatlakes/lmmb/methods/lead-210. pdf.

[15] Karl Irlweck, Gabriele Wallner. Reinvestigation of airborne ^{210}Pb, 137Cs and 207Bi in Vienna (Austria) after atmospheric nuclear weapons tests[J]. Environmental Radioactivity, 2001, 55(1): 61-69.

[16] Ehinger S C, Pacer R A, romines F L. Separation of the radioelements ^{210}Pb-^{210}Bi-^{210}Po by spontaneous deposition onto noble metals and verification by cherenkov and liquid scintillation counting[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1986, 98(1): 39-48.

[17] Lepore K, Moran S B, Smith J N. ^{210}Pb as a tracer of shelf-basin transport and sediment focusing in the Chukchi Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2009, 56(17): 1305-1315.

[18] Miura T, Hayano K, Nakayama K. Determination of ^{210}Pb and ^{210}Po in environmental samples by alpha ray spectrometry using an extraction chromatographic resin [J]. Anal. Sci., 1999, 15(1): 23-28.

[19] Blanchard Richard L. Rapid Determination of Lead-210 and Polonium-210 in Environmental Samples by Deposition on Nickel[J]. Analytical Chemistry, 1966, 38(2): 189-192.

[20] Masaki Uesugi, Masayasu Noguchi, Akihiko Yokoyama, Takashi Nakanishi. Improvements on the method

for determining of ^{210}Pb and ^{210}Po in lead[J]. J Radioanal Nucl. Chem., 2010,283(3):577-584.

[21] Miura T,Kawabe K,Kirita H. Determination of ^{210}Po in reagent samples by alpha ray spectrometry using an extraction chromatographic resin[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,2000,246(2):327-330.

[22]王玉学. 岩石、土壤样品中^{210}Po 测定方法的研究[J]. 铀矿地质,2005,21(4):248-256.

[23]王玉学,郭冬发,黄秋红. 镍箔恒温自沉积总 α、总 β 计数法同时或连续测定样品中^{210}Pb、^{210}Bi、^{210}Po[J]. 铀矿地质,2012,28(3):165-172.

[24] Case G N,McDowell W J. An improved sensitive assay for polonium-210 by use of a background -rejecting extractive liquid scintillation method[J]. Talanta,1982,29(10):845-848.

[25]Veronneau C,Aupiais J,Dacheux N. Selective determination of polonium by photon electron rejecting alpha liquid scintillation (PERALS® System)[J]. Anal. Chim. Acta,2000,415(1-2):229-238.

[26] Maria Assunta Meli,Donatella Desideri,Carla Roselli, et al. Analytical methods to determine ^{210}Po and ^{210}Pb in marine samples[J]. Microchemical Journal, 2011, 99(2):273-277.

[27] Koh Harada,Burnett William C,Larock Paul A. Polonium in Florida groundwater and its possible relationship to the sulfur cycle and bacteria[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1989,53(1):143-150.

[28] Helmkamp R W,Bale W F,Hrynyszyn V. The Determination of^{210} Po and ^{210}Bi in Human Urine by Direct Extraction on Nickel[J]. International Journal of Applied Radiation and Iotopoes,1979,30(4):237-246.

[29] Sapozhnikov Yu A,Egorov O B,Efimov I P,et al. Kutseva. Determination of lead-210 in bottom sediments via bismuth-210[J]. J. radioanal. nucl. chem., 1993, 176(4):353-359.

[30] Momoshima N,Takashima Y,Koike M,et al. Harada. Simultaneous determination of ^{210}Bi and ^{210}Po on pine needles by solvent extraction and liquid scintillation counting[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,1994,177(2):219-228.

[31] Peck G A,Smith J D,Cooper M B. Enhanced counting efficiency of Cerenkov radiation from bismuth-210[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1998,238(1-2):163-165.

[32] Al-Masri M S,Al-Akel B,Nashawani A,et al. Transfer of ^{40}K,^{238}U,^{210}Pb and ^{210}Po from soil to plant in various locations in south of Syria[J]. Journal of Environmental Radioactivity,2008,99 (2):322-331.

[33] Stewart G,Cochran J K,Miquel J C,et al. Comparing POC export from ^{234}Th/^{238}U and ^{210}Po/^{210}Pb disequilibria with estimates from sediment traps in the northwest Mediterranean[J]. Deep-Sea Research, 2007, 54(9):1549-1570.

[34] Santos P L,Gouvea R C,Dutra I R. Concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in hair and urine of workers, of the uranium mine at Pogos de Caldas (Brazil)[J]. The Science of the Total Environment,1994,148(1):61-65.

[35] Cunningham H S, Turner S P, Patia H, et al. (^{210}Pb/^{226}Ra) variations during the 1994～2001 intracaldera volcanism at Rabaul Caldera[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2009, 184(3/4):416-426.

[36] Carvalho Fernando P. Polonium (^{210}Po) and lead (^{210}Pb) in marine organisms and their transfer in marine food chains[J]. Journal of Environmental Radioactivity,2011,102(5):462-472.

[37] Katzlberger C,Wallner G,Irlweck K. Determination of ^{210}Pb, ^{210}Bi and ^{210}Po in natural drinking water[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2001,249(1):191-196.

[38] Silva C M,Amaral R S,Tabosa J N,et al. Pb-210 in Rock and Soils of the Semi-Arid Agreste Region of Pernambuco[J]. Brazil. Bull Environ Contam Toxicol, 2009,82(6):647-649.

[39] Das B K, Singh M. Rate of sediment accumulation in lakes of Udaipur, Rajasthan, India, using the ^{210}Pb method[J]. Environmental Geology,1994,24(1):28-33.

[40] Jia Guogang, Torri Giancarlo. Determination of ^{210}Pb and ^{210}Po in soil or rock samples containing refractory matrices[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2007, 65(1):1-8.

[41] Godoy J M,Lauria D C,Godoy MLuiza D P,et al. Development of a sequential method for the determination of ^{238}U, ^{234}U, ^{232}Th, ^{230}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{226}Ra, and ^{210}Pb in environmental samples[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,1994,182(1):165-169.

[42] Kim Chang-Kyu,Martin Paul,Fajgelj AleS. Quantification of measurement uncertainty in the sequential determination of ^{210}Pb and ^{210}Po by liquid scintillation counting and alpha-particle spectrometry[J]. Accred Qual Assur.,2008,13(12):691-702.

[43] Blanco P,Lozano J C,Gomez Escobar V,et al. A simple method for ^{210}Pb determination in geological samples by liquid scintillation counting[J]. Applied Radiation and Isotopes,2004,60(1):83-88.

(下转第 23 页)