

^{210}Po 在吸烟过程中的分布

王 元¹ 於国兵² 顾先宝² 谭华艳¹ 闻德运² 王金龙² 陈 志¹ 徐 榭¹

1 (中国科学技术大学 合肥 230027)

2 (安徽省辐射环境监督站 合肥 230071)

摘要 运用 α 能谱法分别测量了烟丝、烟灰、滤嘴中 ^{210}Po 的含量,研究了吸烟过程中 ^{210}Po 在香烟不同部分的分布情况。通过湿法消解方式分别消解了7种品牌香烟烟丝、烟灰以及滤嘴。测量结果表明,7种品牌香烟烟丝中 ^{210}Po 的比活度范围是 $(28.13 \pm 1.75) - (47.78 \pm 2.83) \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $36.60 \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$; 7种品牌香烟每支烟丝中 ^{210}Po 的比活度范围是 $(14.39 \pm 0.90) - (27.91 \pm 1.65) \text{ mBq}$, 均值为 20.77 mBq 。在吸烟过程中,平均 13.24% 的 ^{210}Po 会滞留在烟灰中,平均 14.39% 的 ^{210}Po 会滞留在滤嘴中,平均 72.37% 的 ^{210}Po 会转移到燃烧烟雾中。

关键词 α 能谱法, ^{210}Po 分布情况

中图分类号 TL99, O657.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070301

Distribution of ^{210}Po during smoking

WANG Yuan¹ YU Guobing² GU Xianbao² TAN Huayan¹ WEN Deyun²
WANG Jinlong² CHEN Zhi¹ XU Xie¹

1 (University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

2 (Anhui Radiation Environment Supervision Station, Hefei 230071, China)

Abstract Background: Due to direct deposition on leaves or root uptake, the tobacco leaves may contain ^{210}Po in significant concentration. There have been many surveys on the ^{210}Po activity concentration in cigarettes, yet few researches on the distribution of ^{210}Po during smoking. **Purpose:** The study aims to research the distribution of ^{210}Po during smoking. **Methods:** ^{209}Po was used for chemical recovery calculation and ^{210}Po was measured by α spectrometry using a passivated implanted planar silicon (PIPS) detector after chemical leaching and spontaneous on silver disk. The ^{210}Po of fresh tobacco, filter, post-smoking filter and cigarette ash were measured. The ^{210}Po activity concentration in smoke was determined on the basis of above data. **Results:** The ^{210}Po activity concentration of the 7 types of cigarettes ranged from $(28.13 \pm 1.75) \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$ to $(47.78 \pm 2.83) \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$, and the average is $36.60 \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$. On average, about 13.24% of total ^{210}Po was retained in the cigarette ash, about 14.39% of total ^{210}Po was retained in the filter. **Conclusion:** About 72.37% of ^{210}Po was transferred in the cigarette smoke, which may be deposited in the lung tissues.

Key words α spectrometry, Distribution of ^{210}Po

安徽省省级环保科研课题(No.2016-05)、国家自然科学基金(No.11575178)资助

第一作者: 王元, 男, 1992 年出生, 2015 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 主要从事核探测与辐射防护研究

通信作者: 陈志, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

收稿日期: 2017-03-01, 修回日期: 2017-03-21

Supported by Provincial Environmental Protection Scientific Research Project of Anhui Province (No.2016-05), National Natural Science Foundation of China (No.11575178)

First author: WANG Yuan, male, born in 1992, graduated from University of South China in 2015, master student, mainly engaged in the research of nuclear detection and radiation protection

Corresponding author: CHEN Zhi, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

Received date: 2017-03-01, accepted date: 2017-03-21

^{210}Po 半衰期 138.4 d, 纯 α 放射性核素, α 射线能量 5.3 MeV, 为极毒性放射性核素^[1-2]。 ^{210}Po 核素备受人们关注的原因之一是其可能对人体造成的放射性危害。联合国原子辐射效应科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UN-SCEAR)报告指出, 天然放射性核素所致的内照射剂量约 7% 是核素 ^{210}Po 贡献的^[3]。烟草植株通过根部吸收以及烟叶直接沉积的方式对 ^{210}Po 核素具有选择性富集, 其中烟叶直接沉积是烟草富集该核素的主要方式^[4-5]。烟草产地、制备工艺以及使用磷肥情况等是导致不同烟草中 ^{210}Po 的含量差异的主要原因^[6]。有文献报道, 只用 300 °C 的温度处理生物样品, 就会有超过 90% 的 ^{210}Po 由于挥发而损失掉^[2]。烟草燃烧过程中, 中心温度可以达到 600–800 °C, 烟草中大部分的 ^{210}Po 会因为挥发转移到主流烟雾中, 当烟雾进入人体的呼吸系统后, ^{210}Po 会在支气管以及肺部沉积对人体造成持续的内照射^[7-8]。 ^{210}Po 所致的内照射剂量被认为是引起肺癌的原因之一^[9-10]。在吸烟过程中, ^{210}Po 会分布在烟灰、滤嘴以及可吸入烟雾中。其中烟灰以及滤嘴中的 ^{210}Po 不会被人体摄入, 可吸入烟雾中部分 ^{210}Po 会沉积在人体内。研究吸烟过程中, ^{210}Po 在烟灰、滤嘴以及可吸入烟雾中的分布情况对估算吸烟人群摄入核素 ^{210}Po 的量具有重要的现实意义。

国内外很少有关于吸烟过程中 ^{210}Po 在香烟不同部分的分布情况的文献。本文基于吸烟过程中 ^{210}Po 总量恒定的这一原理, 运用 α 能谱法分别测量烟丝、滤嘴以及烟灰中 ^{210}Po 的含量。滤嘴以及烟灰中 ^{210}Po 滞留量与烟丝中 ^{210}Po 含量的比值即可得到 ^{210}Po 在滤嘴以及烟灰中的分布情况, 其余的 ^{210}Po 则转移到了燃烧烟雾中。

1 样品收集与实验方法

1.1 样品收集

根据从市场上购买的香烟价格高低将香烟分为低档、中档以及高档三种类型。选择 7 种受大众喜爱的香烟品牌, 每种品牌的香烟购买完全相同的两包, 一包用于测量烟丝以及空白滤嘴中 ^{210}Po 的含量, 每种品牌每支香烟中烟丝的质量约 0.55 g。另一包香烟抽完之后, 测量烟灰以及用后滤嘴中 ^{210}Po 的浓度。

1.2 实验仪器

钝化离子注入平面硅探测器 (Passivated Implanted Planar Silicon, PIPS) 使用美国堪培拉公司

(Canberra) 8 路 PIPS-7200 型 α 谱仪测量系统, 探测效率 13%–25%, 能量分辨率优于 18 keV。赛多利斯公司生产的感量为 0.1 mg 的 BT224S 型电子天平, 白塔金昌实验仪器厂生产的 SY-2 型沙浴锅, ZNCL-S-5D 多点智能磁力搅拌器。

1.3 试剂

使用的试剂有浓硝酸(14 mol·L⁻¹)、浓盐酸(12 mol·L⁻¹)、盐酸(0.5 mol·L⁻¹)、高氯酸、过氧化氢溶液(30%)、抗坏血酸、盐酸羟胺溶液(25%)、乙醇($\geq 95\%$)等。除特殊说明外所使用的试剂均为分析纯, 水为去离子水。 ^{209}Po 标准源溶液, 其量值可以追溯到美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)。

1.4 实验及样品制备

本次需要测量的样品包括烟丝、烟灰、空白滤嘴以及用后的滤嘴。其中烟丝在烘箱中(80 °C)放置 24 h, 烘干后研磨均匀、用天平称取 1 g 左右(约两支)的烟丝进行湿法消解。正常吸烟过程中, 收集 4 支烟草所产生的烟灰进行湿法消解。每种品牌的香烟取 4 只空白滤嘴以及 4 支用后滤嘴进行湿法消解。采用两次消解的方式, 提高了湿法消解效果, 减小了用酸量。湿法消解程序及制源步骤如下:

1) 将样品放入烧杯中, 先后加入 0.2 mL ^{209}Po 标液、10 mL 浓硝酸并放置过夜。

2) 第二天将烧杯放在 140 °C 的电热板上加热 30 min, 冷却 10 min, 待样品稍冷后加入 3 mL 过氧化氢溶液并放在 100 °C 的电热板上加热 10 min。

3) 待样品冷却 30 min 后, 过滤, 保留滤液。将滤渣转移到原来装样品的烧杯中, 加入 10 mL 的浓硝酸静置 3 h。

4) 重复步骤 2), 待样品冷却 30 min 后, 过滤, 合并两次得到的滤液。将装有滤液的烧杯放在 110 °C 的沙浴锅中蒸发至近干, 加入 1 mL 的高氯酸, 在 110 °C 的沙浴锅中蒸发至没有白烟冒出。

5) 加入 2 mL 的浓盐酸, 在 110 °C 的沙浴锅中蒸发至近干, 并重复一次。

6) 加入 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ 的盐酸、3 滴盐酸羟胺溶液、2 g 抗坏血酸, 轻轻振荡 3 min。

7) 将银片一面喷上红色油漆, 另一面在砂纸上磨光, 去离子水冲洗干净。光面朝上放在烧杯中的支架上, 放入一个搅拌磁子并将烧杯放在磁力搅拌器上, 温度控制在 95 °C 自沉积 2.5 h。

8) 取出银片, 用去离子水冲洗, 无水乙醇中浸泡 30 min, 去离子水冲洗, 银片放入培养皿中, 自

沉积表面朝下, 贴上标签后, 在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 2 h, 冷却后将银片放在 α 谱仪上测量 48 h。

1.5 样品中 ^{210}Po 的计算公式

样品中 ^{210}Po 的计算公式为:

$$C_{\text{Po-210}} = A_{\text{Po-209}} \cdot \frac{N_{\text{Po-210}}}{N_{\text{Po-209}} \cdot m} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{Po-210}}$ 表示样品中 ^{210}Po 的比活度, $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$; $A_{\text{Po-209}}$ 表示示踪剂 ^{209}Po 的添加量, Bq ; $N_{\text{Po-210}}$ 、 $N_{\text{Po-209}}$ 分别表示测量得到的 ^{210}Po 、 ^{209}Po 的峰面积; m 表示样品的质量, g 。

2 结果与讨论

2.1 烟丝中 ^{210}Po 的含量

如表 1 所示, 其中品牌 A、B 为低档香烟; C、

D、E 为中档香烟; F、G 为高档香烟。表 1 给出了 7 种品牌香烟的焦油含量、烟碱量、CO 量以及本实验测定的烟丝中 ^{210}Po 的含量。

结果表明, 香烟烟丝中 ^{210}Po 的比活度范围是 $(28.13 \pm 1.75) - (47.78 \pm 2.83) \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $36.60 \text{ mBq} \cdot \text{g}^{-1}$; 根据记录的 7 种品牌每支香烟烟丝的质量(g), 7 种品牌香烟每支香烟中 ^{210}Po 的比活度范围是每支 $(14.39 \pm 0.90) - (27.91 \pm 1.65) \text{ mBq}$, 均值为每支 20.77 mBq 。值得关注的是: 低档品牌香烟烟丝中 ^{210}Po 的含量要比中档品牌、高档品牌香烟烟丝中 ^{210}Po 的含量略低。这可能是由于低档香烟中含有较多的烟叶梗, 而烟草梗部位的 ^{210}Po 含量相对较低^[11]。

表 1 烟丝中 ^{210}Po 的含量
Table 1 Activity concentration of ^{210}Po in cigarette tobacco.

样品名称 Brand	焦油 Nicotine / mg	烟碱 Tar / mg	Co / mg	^{210}Po / $\text{mBq} \cdot \text{g}^{-1}$	每支香烟 ^{210}Po 含量 ^{210}Po in each cigarette / mBq
A	10	0.8	12	28.82 (5.03%)	18.97 (5.03%)
B	8	0.8	10	28.13 (6.22%)	14.39 (6.22%)
C	5	0.4	6	36.77 (5.57%)	20.33 (5.57%)
D	10	1.0	11	37.29 (6.86%)	20.86 (6.86%)
E	8	0.8	9	41.49 (6.31%)	21.38 (6.31%)
F	11	1.2	11	47.78 (5.92%)	27.91 (5.92%)
G	11	1.0	11	35.92 (6.62%)	21.53 (6.62%)

注: 括号内为测量结果的不确定度, $k=2$

Note: The uncertainty of measurement results in brackets, $k=2$.

2.2 烟灰中 ^{210}Po 的含量

吸烟过程中, 烟草燃烧中心的温度可以达到 $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大部分 ^{210}Po 会挥发进入主流烟气中, 但由于部分烟丝燃烧不完全, 会有部分 ^{210}Po 滞留在烟灰中。为评估滞留在烟灰中 ^{210}Po 的份额, 正常抽烟收集烟灰并通过湿法消解方式测量了 7 种品

牌香烟烟灰中 ^{210}Po 的含量。结果如表 2 所示, 给出了 7 种品牌香烟烟灰中 ^{210}Po 的含量、每支香烟烟灰 ^{210}Po 含量与每支香烟烟丝中 ^{210}Po 含量的比值。滞留在烟灰中 ^{210}Po 比例是 $9.80\% - 15.90\%$, 均值为 13.24% 。

表 2 烟灰中 ^{210}Po 的含量
Table 2 Activity concentration of ^{210}Po in cigarette ash.

样品名称 Brand	每支香烟烟灰中 ^{210}Po 的含量 ^{210}Po in each cigarette ash / mBq	每支香烟烟灰 ^{210}Po 含量/烟丝 ^{210}Po 含量 ^{210}Po in each cigarette ash / ^{210}Po in tobacco / %
A	3.00 (8.67%)	15.90
B	1.41 (9.92%)	9.80
C	2.57 (9.73%)	12.64
D	2.72 (13.24%)	13.04
E	2.62 (7.63%)	12.25
F	3.89 (7.46%)	13.94
G	3.26 (9.20%)	15.14

注: 括号内为测量结果的不确定度, $k=2$

Note: The uncertainty of measurement results in brackets, $k=2$.

2.3 滤嘴中 ^{210}Po 的滞留量

现在卷烟技术中滤嘴的使用可以有效截留主流烟气中的焦油、烟碱及其他多种有害成分^[12]。为了评估滤嘴对放射性核素的截留效率,通过湿法消解程序测量了7种品牌香烟的空白滤嘴以及用后滤嘴中的 ^{210}Po 含量,两者的差值即为滤嘴中 ^{210}Po 的滞

留量。结果如表3所示,给出了空白滤嘴、用后滤嘴中 ^{210}Po 的含量。滤嘴滞留量的范围是每支2.17–3.43 mBq。每支滤嘴中 ^{210}Po 的滞留量与每支烟丝中 ^{210}Po 的含量的比值即为 ^{210}Po 滞留在滤嘴中的比例,范围为10.50%–21.74%,均值为14.39%。

表3 滤嘴中 ^{210}Po 的含量
Table 3 Activity concentration of ^{210}Po in cigarette filter.

样品名称 Brand	每支空白滤嘴 Each cigarette filter / mBq	每支用后滤嘴 Each cigarette post-smoking filter / mBq	每支滤嘴滞留量 Each cigarette filter / mBq	每支滤嘴 ^{210}Po 滞留量/烟丝 ^{210}Po 含量 Each cigarette filter/ ^{210}Po in tobacco / %
A	0.18 (33.3%)	2.82 (12.1%)	2.64	13.91
B	0.11 (45.5%)	2.28 (9.6%)	2.17	15.08
C	0.23 (30.4%)	4.65 (10.5%)	4.42	21.74
D	0.48 (31.3%)	2.67 (8.6%)	2.19	10.50
E	0.18 (32.2%)	3.16 (8.5%)	2.98	13.94
F	0.27 (23.0%)	3.70 (7.6%)	3.43	12.29
G	0.20 (31.0%)	3.05 (8.2%)	2.85	13.24

注: 括号内为测量结果的不确定度, $k=2$

Note: The uncertainty of measurement results in brackets, $k=2$.

2.4 燃烧烟雾中 ^{210}Po 的份额

直接测量燃烧烟雾中 ^{210}Po 的含量很困难。可基于 ^{210}Po 总量恒定这一原理,间接测量燃烧烟雾中 ^{210}Po 的含量。每支香烟烟丝中 ^{210}Po 的含量减去

烟灰以及滞留在滤嘴中的份额,即为燃烧烟雾中 ^{210}Po 的含量。结果如表4所示,转移到燃烧烟雾中 ^{210}Po 的份额范围是65.62%–76.46%,平均72.37%的 ^{210}Po 会转移到燃烧烟雾中。

表4 燃烧烟雾中 ^{210}Po 的含量
Table 4 Activity concentration of ^{210}Po in smoke.

样品名称 Brand	每支烟雾中 ^{210}Po 含量 ^{210}Po in each cigarette smoke / mBq	每支烟雾 ^{210}Po 含量/烟丝 ^{210}Po 含量 ^{210}Po in each cigarette smoke/ ^{210}Po in tobacco / %
A	13.33	70.19
B	10.81	75.12
C	13.34	65.62
D	15.95	76.46
E	15.78	73.81
F	20.59	73.77
G	15.42	71.62

3 结语

通过湿法消解方式测量了7种品牌香烟烟丝、烟灰、滤嘴 ^{210}Po 的含量。7种香烟品牌烟丝中 Po 含量的范围为每支14.4–27.9 mBq。通过测量对比7种品牌香烟烟丝的 ^{210}Po 含量,结果表明,低档品牌香烟烟丝中 ^{210}Po 的含量要比中、高档品牌香烟烟丝中 ^{210}Po 的含量略低。7种香烟品牌烟灰中 ^{210}Po 的含量范围为每支1.41–3.89 mBq,7种香烟品牌滤嘴中 ^{210}Po 滞留量的范围为每支2.17–4.42 mBq。

基于 ^{210}Po 总量恒定这一原理,可得到吸烟过程中 ^{210}Po 的分布情况。结果表明,在吸烟过程中,

烟丝中高达72.37%的 ^{210}Po 将转移到燃烧烟雾中。本文为精确估算吸烟者由于摄入 ^{210}Po 所致的有效剂量提供了可靠的数据。

参考文献

- 祝小惠, 於国兵, 闻德运, 等. 微波消解法快速测定气溶胶中 ^{210}Po [J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(2): 201–204. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.02.020.
ZHU Xiaohui, YU Guobing, WEN Deyun, et al. A fast determination method of polonium-210 in atmospheric aerosol with microwave digestion[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(2): 201–204. DOI:

- 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.02.020.
- 2 Matthews K M, Kim C K, Martin P. Determination of ^{210}Po in environmental materials: a review of analytical methodology[J]. *Applied Radiation & Isotopes Including Data Instrumentation & Methods for Use in Agriculture Industry & Medicine*, 2007, **65**(3): 267–279.
- 3 Charles M. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2001, **21**(1): 83–86.
- 4 Karunakara N, Avadhani D N, Mahesh H M, *et al.* Distribution and enrichment of ^{210}Po in the environment of Kaiga in South India[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, **51**(3): 349–362.
- 5 Tso T C, Harley N, Alexander L T. Source of lead-210 and polonium-210 in tobacco[J]. *Science*, 1966, **153**(3738): 880–882. DOI: 10.1126/science.153.3738.880.
- 6 Martell E A. Tobacco radioactivity and cancer in smokers[J]. *American Scientist*, 1975, **63**(63): 404–412.
- 7 Skwarzec B, Ulatowski J, Struminska D I, *et al.* Inhalation of ^{210}Po and ^{210}Pb from cigarette smoking in Poland[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, **57**(3): 221–230.
- 8 Khater A E. Polonium-210 budget in cigarettes[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, **71**(1): 33–41.
- 9 Jr R E, Hunt V R. Polonium-210: a volatile radioelement in cigarettes[J]. *Science*, 1969, **143**(3603): 247–249.
- 10 Prueitt R L, Goodman J E, Valberg P A. Radionuclides in cigarettes may lead to carcinogenesis via p16INK4a inactivation[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, **100**(2): 157–161.
- 11 王欣, 陈兴安, 潘颖东. 香烟中钋-210 含量及其对人体肺组织所致剂量的研究[J]. *中国辐射卫生*, 2000, **9**(3): 129–133.
WANG Xin, CHEN Xing'an, PAN Yingdong. ^{210}Po in cigarette and the radiation dose inhaled by smoker[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2000, **9**(3): 129–133.
- 12 李艳平, 文建辉, 彭斌, 等. 不同结构滤嘴的烟碱截留效率和空间分布模式[J]. *烟草科技*, 2013, **307**(2): 57–61.
LI Yanping, WEN Jianhui, PENG Bin, *et al.* Filtration efficiencies and spatial distribution patterns of nicotine in filters of different structure[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2013, **307**(2): 57–61.