



HUANJING YANGPIN FANGSHEXING JIANCE YU FENXI

# 环境样品放射性 监测与分析

主编 王延俊



甘肃科学技术出版社



HUANJING YANGPIN FANGSHEXING JIANCE YU FENXI

# 环境样品放射性 监测与分析

主编 王延俊



甘肃科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

环境样品放射性监测与分析 / 王延俊主编. -- 兰州 :  
甘肃科学技术出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5424-2100-5

. ①环… . ①王… . ①环境标准样品—放射性  
测定②环境标准样品—放射性分析 . ①X837

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 188070 号

出 版 人 王永生

责任编辑 陈学祥(0931-8773274)

封面设计 豆 霞

出版发行 甘肃科学技术出版社(兰州市读者大道 568 号 0931-8773237)

印 刷 兰州万易印务有限责任公司

开 本 880mm×1230mm 1/32

印 张 13.875

字 数 290 千

插 页 1

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1~1 000

书 号 ISBN 978-7-5424-2100-5

定 价 36.00 元

# 编 委 会

主 编 :王延俊

编 委 (以姓氏笔画为序)

王 芳 王 洁 王 贇 王延俊

李 慧 孙 卫 邬家龙 张 飏

罗伟立 吴小琴 牛丽梅 杨海燕

# 前 言

随着核能技术的飞速发展和普遍应用,面临越来越严重的能源问题和环境污染问题。自2011年日本福岛核事故发生后,人们开始关注周围环境中存在的放射性物质以及放射性污染。环境样品放射性监测开始受到重视。同时,为了更好地发展核能、核技术事业,保护人类健康,有必要对环境样品中的放射性进行监测分析,并做好长期的监督工作。

本书包括放射性、射线与物质的相互作用、放射性强度与辐射量单位、环境放射性的来源和进入人体的途径、放射性物质对人体的生物学效应、核辐射的探测、环境样品的采集和制备、放射化学分析、放射性核素的测定以及数字修约等章节。本书的目标是为将来从事核化学、放射化学及相关环境样品检验任务的工作人员提供理论基础和相关知识,进一步提升检验工作人员的检验能力。

本书由王延俊主编完成。其中参与编写的有王芳(第一章)约0.2万字,王洁(第一章)约0.2万字,王赟

(第四章)约 0.3 万字,王延俊(第十、十一章)约 13 万字,李慧(第三章)约 0.1 万字,孙卫(第四章)约 0.2 万字,邬家龙(第四章)约 1.0 万字,张飏(第三章)约 0.1 万字,罗伟立(第四章)约 0.3 万字,吴小琴(第二章)约 1.0 万字,牛丽梅(第五、六、七、八、九章)约 12.5 万字,杨海燕(第三章)约 0.1 万字。由于编者学识水平有限,书中内容会有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 4 月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 放射性和放射性元素的发现 .....	1
第二节 实现人工核反应和发现人工放射性 .....	4
第二章 放射性 .....	11
第一节 放射性和同位素 .....	11
第二节 放射性衰变的基本类型 .....	16
第三节 放射性衰变的基本规律 .....	23
第三章 射线与物质的相互作用 .....	27
第一节 $\alpha$ 粒子及重离子束与物质的相互作用 .....	28
第二节 $\beta$ 射线与物质的相互作用 .....	32
第三节 X 射线和 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	34
第四节 中子与物质的相互作用 .....	41
第四章 放射性强度与辐射量单位 .....	44
第一节 描述辐射场性质的辐射量 .....	46
第二节 照射量 .....	49
第三节 吸收剂量 .....	51
第四节 比释动能 .....	55

## 2 | 环境样品放射性监测与分析

第五节	剂量当量与剂量当量率 .....	57
第六节	有效剂量当量 .....	61
第五章	环境中的放射性 .....	63
第一节	环境中的放射性来源 .....	63
第二节	环境放射性物质进入人体的途径 .....	67
第三节	放射性污染的特点 .....	69
第四节	放射性核素在环境中的分布 .....	70
第六章	放射性物质对人体的生物学效应 .....	76
第一节	概述 .....	76
第二节	放射性物质对人体的生物学效应分类 .....	77
第三节	随机性效应、确定性效应与组织反应 .....	80
第四节	细胞效应 .....	85
第五节	放射性物质致癌与遗传效应 .....	95
第六节	电离辐射其他效应 .....	104
第七节	小剂量/低剂量率照射生物效应 .....	124
第七章	核辐射的探测 .....	130
第一节	气体探测器 .....	131
第二节	闪烁探测器 .....	149
第三节	半导体探测器 .....	157
第四节	其他类型的辐射探测器 .....	166
第五节	放射性活度的测量 .....	167
第六节	射线测量仪器 .....	171
第八章	样品的采集、制备和总放射性的测量 .....	178
第一节	概述 .....	178

第二节	放射性沉降物 .....	185
第三节	放射性气溶胶 .....	191
第四节	水 .....	201
第五节	土壤 .....	203
第六节	生物样品 .....	204
第七节	海水和海生生物 .....	207
第八节	总放射性标准源的选择 .....	209
第九节	总放射性的测量和计算 .....	211
第九章	放射化学分离 .....	214
第一节	放射化学分离的主要特点 .....	214
第二节	放射化学分离方法 .....	223
第十章	放射性核素的测定 .....	254
第一节	铯-90 的放射化学测定 .....	254
第二节	铯-89 的放射化学测定 .....	295
第三节	铯-137 的放射化学测定 .....	307
第四节	磷-32 的放射化学测定 .....	333
第五节	钴-60 的放射化学测定 .....	337
第六节	锌-65 的放射化学测定 .....	342
第七节	镉-95 的放射化学测定 .....	345
第八节	碘-131 的放射化学测定 .....	351
第九节	钋-210 的放射化学测定 .....	358
第十节	氡-222 的放射化学测定 .....	361
第十一节	镭-226 的放射化学测定 .....	376
第十二节	铀-237 的放射化学测定 .....	384

4 | 环境样品放射性监测与分析

第十三节 钷-239 的放射化学测定 .....	401
第十四节 钷的测定 .....	414
第十一章 数据处理 .....	419
第一节 有效数字与计算法则 .....	419
第二节 统计误差 .....	425
参考文献 .....	432

# 第一章 绪 论

## 第一节 放射性和放射性元素的发现

自古以来人类就受到电离辐射的照射,但真正开始注意到它的损伤和防护等问题,还是 19 世纪发现 X 射线和天然放射性之后。1895 年伦琴发现 X 射线,但当时人们还不了解 X 射线的生物学作用,所以在发现了 X 射线后短短几个月里,操作人员就受到不同程度的放射损伤,如手的放射性皮炎、眼睛损伤和脱发等。1896 年,法国科学家贝克勒尔首次发现放射性现象;1898 年居里夫妇发现了镭,由于长期接触铀、镭,他们也都受到了辐射危害。到 1902 年已有关于辐射引起皮肤溃疡转变为皮肤癌以及周围血液和骨髓改变的报道。

在 19 世纪末,资本主义工业有了很大的发展,作为动力的电气工业发展速度很快。1895 年末德国物理学家 W.Roentgen 用 Crookes 管研究高压放电现象,当阴极电子束流轰击玻璃管壁时,观察到了荧光以及 X 射线。当时的物理学家曾经一时错误地认为 X 射线是由荧光所发生的。法国的 H.Becquerel 在这一重大发现后的几个星期,将几种矿物标本放置在用黑厚纸包

严的照相底版上,然后在阳光下暴晒一下。按 Becquerel 的设想,经阳光暴晒的矿物凡是能发出荧光的,也一定能同时发出 X 射线,X 射线可穿过黑纸使底版感光。但是结果却发现,只有一种铀盐即硫酸铀酰钾复盐 $[K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O]$ ,能使底片感光。到了 1896 年 2 月 29 日,Becquerel 有了一次奇妙的发现。一天,他在抽屉里将铀盐放在一块包了黑纸的照相底板上,而由于天阴没有拿出去。但过了两天突然发现这块与荧光无关的铀矿却能发射射线而使照相底版感光,且其感光强度比在阳光下暴晒几小时的还要强。Becquerel 认为他的发现“非常重要,而且超出了想象中各种现象的范围”。继续检验后,发现其他的铀化合物也能发出这种射线,到 1896 年 5 月他又证明了纯金属铀的放射性大于铀化合物的放射性。

生于波兰、在法国学习的 M. Curie 对 Becquerel 的发现十分关注,她检验了许多元素及其化合物,发现除了铀和铀的化合物外,钍和钍的化合物也有类似的放射现象。由此她得出了放射现象是一种特有的原子现象的重要概念,其理由是铀和钍发出射线只决定于原子的性质,而与其化合物的组成无关。后来 M. Curie 在发现钋和镭元素后才将这一现象称为放射性。

1898 年春天,居里夫人发现沥青铀矿的放射性比纯铀的放射性大约 4 倍,因而推测出在沥青铀矿中还有一种放射性更强的放射性元素。门捷列夫(Mendeleev)周期表中的若干空位也启示着她去寻求这种前人从未发现的新元素。她的丈夫、物理学教授 P. Curie 放弃了结晶学的研究,也怀着极大的科学热情,协助她去努力探求放射性新元素。

他们的工作方法大体上是將沥青铀矿磨碎溶解于盐酸,进行硫化物沉淀等多步化学分离。在整个分离过程中,他们始终用跟踪放射性的办法,来确定大量其他元素中微量放射性元素的去向,并巧妙地根据放射性的行踪来判断该元素的某些化学性质。这种创造性的方法,是一种崭新的放射化学研究方法,至今仍被放射化学工作者广泛采用。

用这样的流程和方法, Curie 夫妇于 1898 年 6 月得到了很少量的放射性比铀强 150 倍的黑色粉末,再经过一番提炼又得到了放射性比铀强 400 倍的新元素。为了纪念自己的祖国波兰, M. Curie 将这个放射性元素命名为钋 (polonium)。值得一提的是柏林的 W. Marckwald 几乎同时和独立发现了这一种新元素,当时他称之为“射碲”。

同年年底, Curie 夫妇在 G. Bemont 的协助下,在铅的沉淀中又发现了放射性更强的另一种元素镭。为了确证钋和镭这两种新元素, Curie 夫妇买来了  $2 \times 10^3$  kg 提取铀后的沥青铀矿渣,在简陋的实验室里经过两年多艰苦的劳动,终于在 1902 年提炼出了 120mg 在光谱中见不到钡的纯氯化镭,并初测其原子量为  $225 \pm 1$  (现为 226.0254)。最后精制镭的方法是用氯化钡共沉淀载带微量的镭,然后用“分级结晶”的方法将钡和镭分离。

1903 年诺贝尔物理学奖授予 H. Becquer 和 Curie 夫妇,奖励 Becquerel 发现自发的放射性和 Curie 夫妇在发现放射现象中的贡献。1911 年, Curie 夫人又获得诺贝尔化学奖,表彰她发现钋和镭并研究了他们的性质和化合物的成就。

## 第二节 实现人工核反应和发现人工放射性

1903年根据许多实验事实,英国的 E. Rutherford 和 F. Soddy 提出了著名的放射性衰变理论。到 1910 年,又证实了镭的分解产物是氦和氦核,使衰变理论得到了肯定。Rutherford 的  $\alpha$  散射实验又证实了原子核的存在。这时关于原子的不可变性的传统观念已经被推翻了,人们认识到某些原子核能够自发地按照一定规律进行某种转变。Rutherford 在研究了原子核对  $\alpha$  粒子的散射并导出了著名的 Rutherford 散射公式之后,设想当  $\alpha$  粒子能量足够大时,轻核和  $\alpha$  粒子间的库仑斥力有可能被克服,而使  $\alpha$  粒子接近和射入原子核。1919 年他设计了在一个盛气体的容器中,用  $\text{RaC}(^{214}\text{Bi})/\text{RaC}'(^{214}\text{Po})$  的  $\alpha$  粒子轰击氮气的实验。在当  $\alpha$  源离开 ZnS 的荧光屏远达 40 cm 时, ZnS 屏上仍能看到闪光,这表明产生闪光的粒子质量远比  $\alpha$  粒子小,进一步用磁场偏转的方法证明这是氢的原子核,被称为质子。

1931~1932 年相继建成了人工加速核粒子装置高压倍加器、静电加速器和回旋加速器,它们能将带电粒子加速到相当高的能量。1933 年 J. Cockcroft 等用能量为 0.1~0.7 MeV 的质子轰击锂,实现了不用天然放射源而完全用人工方法产生的核反应。

1934 年 1 月,法国的 F. Joliot Curie, J. Curie 夫妇在研究用 100 mCi 的 Po 的  $\alpha$  粒子对十几种轻元素作用时发现,当铝、硼、镁受  $\alpha$  粒子轰击时,除了发生  $(\alpha, p)$  和  $(\alpha, n)$  反应外,还观察到

正电子。他们开始并没有弄清正电子的真正来源,只认为它是在核转变过程中放出的。但后来的实验表明,即使在移去 $\alpha$ 粒子源后,靶子仍能不断地放出正电子,正电子的放射速率随时间逐渐降低,最后趋于零。如同天然放射性核素一样,衰减规律具有一个特征半衰期。当时,测得靶子铝硼正电子发射的半衰期分别为3.4min和10min。由此判断这些放射性是人工核反应的产物。

在这些发现中,除了直接测量靶子放射性以外,值得注意的是他们第一次用化学方法分离了人工放射性核素,这也是核反应化学工作的开端。人工放射性的发现,不但在理论上意义很大,而且在实际上为人工制造各种元素的放射性核素开拓了宽广的道路。

科学家们在1934~1937年使用加速器和较强的Ra-Be中子源,在短短的三年中制得了几十种元素的200多种人工放射性核素。到1995年1月,已经合成2673种放射性核素。

反应堆放射性核素的研究、试制、生产,是美国于1942年建成世界上第一座反应堆后最先开展起来的。当时正值第二次世界大战,这方面的科研、试制和生产也都服从于军事核计划的需要,直至战后才开始转向民用。世界上第一份“放射性同位素产品目录”是美国曼哈顿计划总部于1946年6月发表的;第一份反应堆放射性同位素商品是由美国橡树岭国家实验室发出的碳-14,其活度为 $3.7 \times 10^7 \text{Bq}$ 。从此开始了反应堆放射性核素的大量生产。中国在1958年由原子能研究所首次利用反应堆制备出钴-60等33种放射性核素,并于1959年起开始批

量生产。

反应堆放射性核素是将含有有关原子核的适当对象放入反应堆活性区,利用高注量中子来轰击(或叫辐照),使有关原子核发生核反应而产生的。被轰击的对象称为靶子,做靶子的材料叫做靶材料,靶材料的有关元素及其有关原子核称为靶元素和靶核。由于中子是电中性的,不受原子核库仑力的影响,它很容易进入被轰击的靶核而实现核反应,使该靶核转变为所需的放射性核素。

表 1-1 放射化学发展史中的重要事件  
(包括核科学技术发展史中的一些大事)

年代	事 件	发现人或发明人
1789	铀的发现	M.H.Klaproth
1828	钍的发现	J.J.Berzelius
1868	元素周期率	D.E.Mendeleev
1895	X 射线	W. Rontgen
1896	放射性的发现	A. H. Becquerel
1898	钍盐放射性的发现	M.Curie ,G.C.Schmidt
1898	钋的发现	M.Curie ,W.Marckwald
1898	创建放射化学方法	M.Curie ,P.Curie
1898	镭的发现	M.Curie ,P.Curie ,G.Bemont
1899	镭的发现	A.Debierne
1900	$\lambda$ 射线具有电磁辐射性质	P.Villard
1900	氦的发现	F.Dorn ,E.Rutherford
1901	发现水合镭盐释放气体的辐射化学效应	M.Curie ,A.Debierne

续表

年代	事 件	发现人或发明人
1902	分离 0.12 g 纯镭	M.Curie ,P.Curie ,A. Debierné
1902	电化学法分离放射性元素	W.Marckwald
1903	$\beta$ 射线被鉴定为电子	R.Strutt
1903	放射性衰变理论	E.Rutherford ,F.Soddy
1903	$\alpha$ 射线被鉴定为氦离子	E.Rutherford
1903	证明水合镭盐放出的气体是氢和氧	W.Ramsay ,F.Soddy
1905	衰变律( $N = N_0 e^{-\lambda t}$ )	E.Von Schweidler
1911	原子的核心模型	E.Rutherford
1912	放射性示踪原子方法	G.Hevesy ,F.Paneth
1913	放射性衰变位移定律	F.Soddy,K. Fajans
1913	同位素的概念	F.Soddy ,K Fajans ,J.J.Thomson
1913	分离氦的同位素	F.Aston
1913	放射性元素的吸附共沉淀规则	K.Fajans ,F.Paneth
1913	原子模型	N. Bohr
1919	人工核反应和质子的发现	E.Rutherford
1919	质谱仪	F.Aston
1920	放射性同位素交换反应	G.Hevesy ,L.Zechmeister
1921	同质异能素( $^{234}\text{Pa}$ , $^{234}\text{Pa}$ )	O.Hahn ,L.Meitner
1924	将放射性示踪元素(Po)用于生物学研究	A.Lacassagne ,C.M. Lattes
1928	GM 计数器	H.Geiger ,W. Mueller
1931	静电加速装置	R.J.Van de Graaff
1932	中子的发现	J.Chadwick
1932~	高压倍加器实现加速粒子的人	J.D.Cockcroft ,
1933	工核反应 ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$	E.T.S.Walton