

高等学校试用教材

放射化学

张寿华 强亦忠 主编

高等学校试用教材

放射化学

张寿华 强亦忠 主编

郭景儒 江林根 审校

原子能出版社

内 容 简 介

本书介绍了微量放射性核素的行为、状态和分离方法，以及在核工业和环境监测中常见的放射性核素的化学和分析方法。此外，还简述了放射性核素的制备和应用。

本书是高等院校放射医学、放射卫生专业的试用教材，亦可供从事放射医学、放射卫生、核辐射防护、核医学和环境监测等工作的科技人员和有关专业的师生参考。

高等学校试用教材

放 射 化 学

张寿华 强亦忠 主编

郭景儒 江林根 审校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 $1/32$ ·印张 11.25·字数 251 千字

1983年6月第一版·1983年6月第一次印刷

印数001—3900·统一书号：15175·479

定价：1.15 元

前 言

本书是根据 1978 年放射医学、放射卫生专业教材会议的有关决定而编写的，可作为高等院校这两个专业的试用教材。

在本书的编写过程中，我们力求本书适合于放射医学、放射卫生专业的教学需要，尽量做到重点突出、简明易懂，同时也适当注意保持本学科的完整性，使学生通过本书的学习，能系统地掌握放射化学的基础理论。

本书共分九章。第一章为绪论。第二、三章介绍了放射性核素在低浓时的行为和状态，以及分离微量放射性核素的常用方法。第四至第八章介绍了在核工业和环境监测中常见的放射性核素的化学和分析方法。第九章简述了放射性核素的制备和应用。

本书由张寿华、强亦忠主编。参加本书编写的有张寿华（第一章，第二章第一、三节，第三章第一节，第五、六、八、九章）、沈维明（第二章第二节，第三

章第二、三、四节)、沈大全(第三章第五、六节,第七章)、符荣初(第四章)。强亦忠参加了全书稿件的统稿工作,并对书稿进行了改写和充实。

本书承蒙郭景儒和江林根同志认真审阅;白求恩医科大学、中国科学院原子能研究所、北京大学、清华大学和天津大学等单位的有关同志对本书的编写大纲提出了宝贵意见;陶祖贻、王孟才、吴瑞森同志对本书稿提出了修改意见,我们特此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,恳望读者批评指正。

编 者

一九八二年六月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 放射化学发展简史	(1)
第二节 放射化学的内容	(3)
第三节 放射化学的特点	(5)
第二章 放射性核素在低浓时的行为和状态	(10)
第一节 放射性核素的吸附现象	(10)
一、概述	(10)
二、放射性核素在玻璃上的吸附	(12)
三、放射性核素在滤纸上的吸附	(16)
四、放射性气体在固体物质上的吸附	(17)
第二节 放射性核素的共沉淀现象	(20)
一、概述	(20)
二、共结晶共沉淀	(20)
三、吸附共沉淀	(25)
第三节 放射性胶体	(33)
一、放射性胶体的概念和特性	(34)
二、放射性胶体的形成及其影响因素	(36)
三、放射性胶体的消除和应用	(38)
四、放射性气溶胶	(39)
第三章 放射性物质的分离方法	(42)
第一节 放射化学中常用的分离效率指标	(42)
一、分离系数	(42)
二、净化系数	(44)

三、化学回收率	(46)
第二节 共沉淀法	(47)
一、基本原理	(48)
二、载体及其选择	(50)
三、载体与被载带核素间的同位素交换	(54)
四、减少共沉淀沾污的方法	(55)
五、共沉淀法的应用	(57)
第三节 溶剂萃取法	(60)
一、基本原理	(61)
二、萃取剂的种类和萃取机理	(67)
三、萃取条件的选择	(74)
四、溶剂萃取法的应用	(88)
第四节 离子交换法	(90)
一、基本原理	(91)
二、离子交换剂	(100)
三、离子交换分离技术和操作	(110)
四、离子交换的影响因素和条件选择	(117)
五、高压离子交换法	(131)
六、离子交换法的应用	(132)
第五节 色层法	(136)
一、概述	(136)
二、吸附柱色层法	(138)
三、萃取柱色层法	(147)
四、纸色层法	(155)
五、薄层色层法	(161)
第六节 电化学分离法和蒸馏法	(164)
一、电化学分离法	(164)
二、蒸馏法	(170)
第四章 核燃料化学	(172)

第一节 铀化学	(173)
一、概况	(173)
二、金属铀的性质	(176)
三、铀的水溶液化学	(177)
四、铀的化合物	(179)
五、铀的络合物	(186)
六、铀的分析测定	(188)
第二节 钍化学	(194)
一、概况	(194)
二、金属钍的性质	(197)
三、钍的水溶液化学	(197)
四、钍的化合物	(198)
五、钍的络合物	(200)
六、钍的分析测定	(202)
第三节 钷化学	(206)
一、概况	(206)
二、金属钷的性质	(208)
三、钷的水溶液化学	(209)
四、钷的化合物	(215)
五、钷的络合物	(217)
六、钷的分析测定	(218)
第五章 镭、氡、钋的化学	(221)
第一节 镭化学	(221)
一、概况	(221)
二、镭及其化合物的性质	(224)
三、镭的分析测定	(226)
第二节 氡	(232)
一、概况	(232)
二、氡的性质	(234)
三、氡的分析测定	(235)

第三节	钋化学	(236)
一、	概况	(236)
二、	钋及其主要化合物的性质	(238)
三、	钋-210 的分析测定	(240)
第六章	超铀元素化学	(243)
第一节	锕系理论	(243)
一、	概述	(243)
二、	锕系元素的电子构型	(246)
三、	锕系元素的价态和离子半径	(248)
第二节	镧化学	(250)
一、	概况	(250)
二、	镧的水溶液化学	(252)
三、	镧的化合物	(256)
四、	镧的络合物	(257)
五、	镧的分析测定	(258)
第三节	铈化学	(259)
一、	概况	(259)
二、	铈的水溶液化学	(261)
三、	铈的化合物	(262)
四、	铈的络合物	(264)
五、	铈的分析测定	(264)
第四节	钍化学	(266)
第五节	镤化学	(268)
第六节	铀化学	(270)
第七章	裂变元素化学	(273)
第一节	概述	(273)
第二节	放射性铯的化学	(277)
一、	概况	(277)
二、	铯的化学性质	(279)
三、	铯-137 的分析测定	(281)

第三节	放射性铯的化学	(283)
一、	概况	(283)
二、	铯的化学性质	(285)
三、	铯-90 的分析测定	(287)
第四节	放射性铈和钷的化学	(289)
一、	稀土元素简述	(289)
二、	铈化学	(290)
三、	钷化学	(292)
第五节	铈化学	(294)
一、	概况	(294)
二、	铈的化学性质	(296)
三、	铈的分析测定	(297)
第六节	放射性钷的化学	(298)
一、	概况	(298)
二、	钷的化学性质	(299)
三、	钷-106 的分析测定	(300)
第七节	放射性碘的化学	(301)
一、	概况	(301)
二、	碘的化学性质	(303)
三、	碘的化合物及其性质	(305)
四、	碘-131 的分析测定	(306)
第八节	放射性氙和氙	(307)
一、	概况	(307)
二、	氙、氙的性质及其化合物	(308)
三、	氙-85 的环境监测方法	(310)
第八章	氡和放射性碳的化学	(311)
第一节	氡化学	(311)
一、	概况	(311)
二、	氡的性质	(314)
三、	氡的分析测定	(316)

第二节	放射性碳的化学	(318)
一、	概况	(318)
二、	碳的化学性质	(321)
三、	放射性碳的分析测定	(322)
第九章	放射性核素及其标记化合物的制备和 应用	(324)
第一节	放射性核素及其标记化合物的制备	(324)
一、	放射性核素的来源	(324)
二、	医用放射性同位素发生器	(329)
三、	放射性标记化合物及其制备	(333)
第二节	放射性核素的应用	(338)
一、	概述	(338)
二、	放射性核素在医学方面的应用	(339)
三、	放射性核素在放射分析方面的应用	(341)
附录 I	放射化学发展史中的重要事件	(347)
附录 II	一些放射性核素的限制浓度和最大容许浓度	(350)

第一章 绪 论

第一节 放射化学发展简史

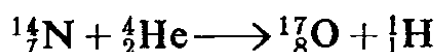
放射化学是在二十世纪初出现的一门新学科。它和其它学科一样，是在人类生产斗争和科学实验的基础上产生和发展起来的。

1895年，伦琴(W. K. Roentgen)在研究高真空放电管时发现了X射线。次年，贝可勒尔(A. H. Becquerel)在进一步研究X射线时发现了铀的化合物具有放射性。1898年，居里夫人(M. S. Curie)等又发现了钍的化合物具有放射性。同年，居里夫人和她的丈夫居里(P. Curie)首先采用放射化学分离及放射性测量的方法相继发现了新的天然放射性元素钋和镭，经过4年的努力，于1902年成功地从数吨沥青铀矿渣中分离提取了100毫克氯化镭。居里夫妇运用放射化学方法所开创的这一研究作为放射化学成为一门新学科奠定了基础。此后，人们致力于发现新的天然放射性元素和核素，并研究它们的性质和在周期表中的位置。在短短的十几年里就接连发现了钋、镭、锕、氡、钷5种新的天然放射性元素和40余种放射性核素。

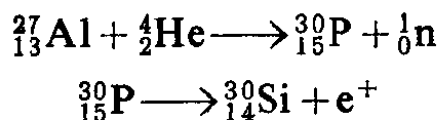
1903年，卢瑟福(E. Rutherford)和索迪(F. Soddy)发现了放射性衰变规律。1910年索迪提出了同位素的概念。次年，索迪和法扬斯(K. Fajans)同时独立地发现了放射性

位移规律。人们在这些理论和已发现的大量放射性核素的基础上，建立了三个天然放射系，这对放射化学的发展具有十分重要的意义。1912年，赫维西(G. Hevesy)等创立了示踪原子法，这是应用放射化学的开端。在这期间，人们还开展了对放射性核素在低浓时的行为和状态的研究。1913年，法扬斯和潘聂特(F. Paneth)建立了放射性核素共沉淀的经验规律。此后，许多科学家对共沉淀规律、放射性胶体和同位素交换过程等开展了广泛的研究。

1919年，卢瑟福在用钋作 α 射线源轰击轻元素时，首次实现了人工核转变，其核反应为



1934年，约里奥·居里夫妇(I. Curie和F. J. Curie)用 α 粒子轰击铝等轻元素时，第一次获得了人工放射性核素，其核反应为



同年，齐拉(L. Szilard)和查尔默斯(T. Chalmers)发现原子核俘获中子时产生独特的化学效应，这导致了热原子化学的建立。

1939年，哈恩(O. Hahn)等在用中子照射铀的研究中发现了原子核裂变现象，这是放射化学发展史中的又一重要事件。1940年，西博格(G. T. Seaborg)等发现了超铀元素镅和钚。1942年，世界上第一座核反应堆在费米(E. Fermi)的领导下在美国建成。这是人类第一次实现了受控链式核裂变反应，它标志着人类进入了原子能时代。此后，核工业得到了迅速发展。其中，核燃料的生产、回收以及核裂变产物的分离等大大促进了放射化学分离方法的迅速发展和对放射性

核素性质的深入研究。随后，放射性核素在工农业、国防和医学等领域中的广泛应用，也促进了放射化学的发展。所有这些都极大地丰富了放射化学的内容，使它逐步成为一门具有独特研究内容和研究方法的新学科。近一二十年来，随着高能加速器的出现、人工制造超铀元素及超重元素的研究和探索，放射化学除研究放射性核素在低浓时的行为和状态、放射性核素化学以及放射性核素的应用外，还研究诸如高能核化学、奇异原子化学等新的内容。

自新中国成立以来，我国原子能科学技术获得了迅速发展。放射化学作为原子能科学的一门基础学科，也取得了很大进展。近 30 余年来，我国的放射化学工作者在核燃料的生产和回收、放射性核素的分离和应用、锕系元素化学、核化学、放射性废物的处理和综合利用、放射化学分析等方面都取得了丰硕的成果，有些方面还赶上了世界先进水平，为我国原子能事业的发展作出了巨大贡献。

附录 I 列出了放射化学发展史中的一些重要事件。

第二节 放射化学的内容

放射化学主要是研究放射性物质和核转变过程的化学，其内容大致包括以下几个方面：

1. 放射性物质的物理化学行为和状态。主要是研究放射性核素在低浓时的共沉淀、吸附、电化学以及胶体等行为和状态。
2. 放射性物质的制备、分离、纯化和鉴定。
3. 放射性核素化学。
4. 核转变过程所引起的化学变化及所生成的产物，即核

化学。

5. 放射性核素在工农业、国防、医学等各个领域中的应用，即应用放射化学。

放射化学是原子能科学技术的重要理论基础之一。它与核物理一起，对人类掌握和运用原子能技术、探索原子能的奥秘起着重要作用。从原子能科学技术的发展来看，放射化学与核物理有着密切的联系，它们在整个发展过程中是相辅相成、互相渗透、不可分割的。自放射性现象被发现以来，放射化学与核物理的许多重大发现都是由化学家和物理学家共同完成的。放射化学的研究离不开核物理的理论、方法、设备和仪器，而核物理的许多发现又往往是从放射化学中得到启示、验证和引伸的。

放射化学是近代化学的一个分支，是在普通化学的基础上产生并发展起来的。放射化学与普通化学都是研究物质的性质和变化的。因此，它们在基本理论和实验方法上有着密切的联系，但它们之间又有区别。放射化学研究的对象主要是放射性物质(放射性元素、核素及其化合物等)。放射性物质与非放射性物质相比，具有不同的特点，这就使放射化学具有许多与普通化学不同的理论和实验方法。

放射化学与放射医学有着密切的关系。例如，放射医学工作者在放射卫生评价和放射性疾病的防治工作中，经常需要调查放射性天然本底，监测核工业企业环境的放射性污染，分析人体排出物中放射性物质以及研究药物对放射性物质的促排作用和效果等；在放射医学研究工作中，还经常涉及到放射性标记化合物的制备、分离、纯化、鉴定以及这些化合物在机体内的转移、变化等，这些都与放射化学的基础知识和实验技术有着密切的联系。此外，在一旦发生核事故

灾害时，放射医学工作者无论是在抢救伤员，还是在去污和净化环境、各类用具以及生活饮水等方面，都需要放射化学的有关知识和实验技术。

根据放射医学、放射卫生专业的特点和要求，本书主要介绍放射性核素在低浓时的物理化学行为和状态，放射性物质的制备、分离、纯化和鉴定以及放射性核素化学三个内容。

第三节 放射化学的特点

放射化学的研究对象主要是放射性物质，它有三个重要特点。

1. 放射性

放射化学的研究对象具有放射性，这是放射化学不同于普通化学的最重要、最根本的特点。它带来了普通化学研究所不具备的优点，但也带来一些弊病。

放射性带来的第一个优点是研究方法的灵敏度大大提高了。这是因为对放射性物质的性质和化学过程的研究、观察，可以通过测量放射性来进行的缘故。通常，放射性测量方法的灵敏度是很高的，远远超过化学方法的灵敏度。例如，在普通的化学分析中，重量法和容量法的灵敏度仅为 10^{-5} — 10^{-4} 克，光谱法的为 10^{-9} — 10^{-8} 克，即使荧光法灵敏度很高，也只能达到 10^{-10} — 10^{-9} 克，而在放射化学中，用放射性测量的方法，可以鉴定出几千个或几百个原子。目前，借助最新的放射性测量技术，甚至能探测到几个原子。人工合成的极微量的101—107号元素就是应用了放射性测量技术而发现的。放射性带来的第二个优点是通过对放射性

射线进行“跟踪”，可以对整个化学过程中的每个阶段进行研究和观察，这在普通化学研究中是难以办到的。

但另一方面，放射性射线会对工作人员产生辐射损伤，因此在放射化学操作中，必须考虑防护问题。工作人员要根据射线的种类、能量和活度等，在不同防护级别的放射化学实验室中进行操作。同时，还必须严格遵守有关的防护规定，确保人身安全，尽量减少因放射性物质的散失而造成对环境的污染。此外，放射性物质还会对所研究的体系产生一系列特殊的物理化学效应，如辐射分解、辐射自氧化-还原、辐射催化、发热效应等，这是在强放射性物质研究工作中必须考虑的问题。

2. 不稳定性

在普通化学中，研究的对象都是稳定元素及其化合物。只要外界条件不变，它们的组成和总量总是恒定的。而在放射化学中，研究的对象则是放射性核素及其化合物，即使在外界条件不变的情况下，它们亦总是不断地放出射线而转变成新的核素(衰变子体)。因而，其组成和总量是不恒定的。例如，医用放射性核素碘-131，它总是在不断地衰变，成为稳定的核素氙-131，经过一个半衰期(8.04天)，其含量就减少一半。所以，在临床应用碘-131的标记化合物时，必须随时测量其实际含量。由于放射性核素不断衰变成新的核素，因此在研究过程中，有时还必须考虑衰变子体带来的影响。

研究对象的不稳定性，给放射化学研究工作带来了不少困难，使放射性核素的制备、分离、纯化和鉴定工作复杂化。尤其是在处理短寿命的放射性核素时，必须考虑时间因素。否则，时机一过，放射性物质的量就会大大减少，甚至