

引用格式:孙烈,李昕,潘菁.中国原子能突破与稀土开发的互动(1955—1987年).中国科学院院刊,2025,40(Z2):119-129,doi:10.3724/j.issn.1000-3045.20241009001.
Sun L, Li X, Pan J. Interaction between China's atomic energy breakthrough and rare earth R&D (1955–1987). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(Z2): 119-129, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20241009001. (in Chinese)

中国原子能突破与稀土开发的互动 (1955—1987年)

孙烈^{1*} 李昕^{1,2} 潘菁³

1 中国科学院自然科学史研究所 北京 100190

2 中国科学院大学 北京 100049

3 中国科学院长春应用化学研究所 稀土资源利用国家重点实验室 长春 130022

摘要 中国原子能与稀土两大领域的互动,直接保障了核燃料等研制任务的完成,也强力带动了稀土分离与提取优势的形成,其影响深远却鲜有专题论述。本文通过大量翔实的一手史料论证其互动及其影响。中国启动原子能开发计划后,《十二年科技规划》的相关任务带动了稀土化学建制化发展的开端。20世纪50年代末开始,以中国科学院为主的研究力量突破离子交换法分离稀土的关键核心技术并启动溶剂萃取法研究,既确保了核燃料“铀—钚分离”技术路线的形成,也为稀土基础研究与新材料应用奠定了重要基础。中国科技事业在原子能与稀土领域的相互促进,是一次国家重大需求与世界科技前沿的双向驱动,其蕴含的历史经验至今仍具现实意义。

关键词 原子能,核燃料,稀土,分离提取,中国科学院

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20241009001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20241009001

20世纪50—60年代,中国成功研制原子弹,离不开稀土^①分离技术的自主创新。相关核心技术的掌握,奠定了中国稀土开发实力不断增强的重要基础。进入21世纪,中国已成为首屈一指的稀土科技强国。溯源

*通信作者

资助项目:中国科学院战略研究与决策支持系统自然科学史专门项目(E4291J06ZY)

修改稿收到日期:2024年12月21日

① 稀土是元素周期表中镧系元素(镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu))和钪(Sc)、钇(Y)的总称,按照离子半径和矿物共生情况可分为轻、中、重稀土。其中钷(Pm)半衰期短,天然物中不存在。

这一历程，需要关注国家任务与前沿探索、尖端技术的突破与特色资源的利用之间的关联。

为此，本文聚焦中国原子弹研制与稀土开发的互动，分析核燃料研究的稀土技术来源，以及中国早期稀土科研体系的核研究背景。在案例分析的基础上，文章也尝试探讨学科交叉、任务带动、资源导向等更具共性的历史经验。

1 原子时代的稀土工业

美国拥有武器级纯度的铀与钚，离不开稀土研究在其中发挥的关键作用。原子弹是以铀或钚等重元素的原子核发生链式反应而瞬间释放巨大能量为原理制造的武器，研制难度极大。在第二次世界大战期间，美国主导的“曼哈顿计划”（Manhattan Project）获得突破，随后对日本先后投放了绰号为“小男孩”的铀枪式弹和“胖子”的钚内爆弹。铀、钚等元素与稀土元素有相似性质，而铀矿伴生稀土元素或稀土矿伴生钍元素也是常见现象。美国一方面以稀土矿作铀矿的代用品加快研制进度，另一方面重视稀土性质的研究，既发挥其在核燃料提纯、熔铸和控制方面的应用价值，也寻找去除铀、钍中的稀土元素的方法。

1.1 美苏的核计划均涉及稀土研究

美国原子能委员会（AEC）艾姆斯实验室（Ames Laboratory）的斯佩丁（Frank Harold Spedding）团队及橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Laboratory）通过离子交换法实现了稀土的分离^[1]，这是世界稀土研究与产业开发获得突破的重要标志。其主要目的是，将稀土作为载体，从铀及其裂变产物中分离出钚，以解决铀—钚分离的难题^[2,3]。

美国的稀土研究与原子弹研制的紧密联系还体现在其他多个方面。譬如：铈（Ce）硫化物用于制备镨铸钚的坩埚材料^[4]，美国为1945年的核试验与投放原

子弹做准备，在1年时间内提取了近100千克铈^[5]；钆（Gd）可用于制造核反应堆的控制棒；钇（Y）可提高反应堆结构材料的性能，即便在二战后，美国原子能委员会依然重视钇的生产。

稀土工业诞生于20世纪的原子时代^[6]。20世纪40年代，因为钍、铀等核燃料元素多与稀土矿物伴生，国际上出现了对稀土矿物的争夺。二战后，美国原子能委员会继续把含钍的稀土矿归为重要的“原子能原料”^[7]。苏联早期核工业的发展同样伴随着稀土研究的身影。1946年，苏联专门为钚分离工厂——Б工厂建了一个生产镧（La）的配套工厂^[8]，3年后成功爆炸首颗使用钚装料原子弹。

可以说，无论是制造原子弹还是发展核工业，都需要建立配套的稀土研究能力，这早已不是科技界的秘密，而相关化学元素分离与提取的关键核心技术，至今仍是跨入拥核国家大门的一道“门槛”^②。

1.2 原子弹研制是中国稀土开发的重要源头

中国的原子弹研制与稀土开发存在明确的互动关系。从中国原子弹的研制历程来看，铀—钚分离与核燃料技术路线的选择，在很大程度上得益于离子交换法在稀土分离技术上的关键突破。在原子弹研制期间，中国建立了铀-235和钚-239两条生产线，标志自主核化工体系的建立。

从中国稀土科研早期的布局来看，同样能够追溯到原子弹与稀土这两个重要领域发展的历史交汇点上。20世纪50年代初，中国科学院以稀土、钍和铀矿联合开发为重点，开展核燃料矿物分析研究^[9]。《1956—1967年科学技术发展远景规划》（以下简称《十二年科技规划》）将“稀有元素和分散元素的开采、提取和利用”列为第25项任务，“研究稀土元素化学并探索它的新用途；掌握并改进各种超纯元素的制备方法”是相关的中心问题。在此规划指导下，中国科学

② 除了美、苏、英、法和中国，当前核问题热点国家——朝鲜和伊朗，它们自20世纪80年代末起也积极发展稀土。

院下属的长春应用化学研究所（以下简称“长春应化所”）、冶金陶瓷研究所、矿冶研究所、金属研究所、上海有机化学研究（以下简称“上海有机所”），以及北京有色金属研究院、包头冶金研究所、北京大学、复旦大学、华东化工学院和武汉大学等布局的相关稀土研究，明显指向原子能事业特殊而急迫的需求。相关科研人员如倪嘉缙、徐光宪、李德谦等，在50年代末都投身于核燃料化学研究，此后主要从事稀土研究，这也反映出中国核研究与稀土研究的紧密关联。

美国学者克林格（Julie Michelle Klinger）基于对地缘政治和资源竞争的判断，给出了一种模棱两可的表述，即在第二次世界大战和冷战时期“化学和概念上的共生”推动了中美两国“稀土和核研究的进步”^[6]。尽管克林格的相关分析还缺乏坚实的史实依据，但相比国内学界对此无人问津的情形，还是先行了一步。

本文将进一步阐明中国原子弹研制与稀土开发之间的互动过程，揭示中国在原子弹工程中解决稀土问题的基本思路——自力更生开发独特技术。虽然20世纪50年代中苏之间存在密切的科技合作，以及美国“曼哈顿计划”和苏联原子能开发产生了巨大的影响力^[10]，但中国并未直接引进或照搬国外的稀土分离与提取技术，这主要有两个原因：①核心技术处于“封锁”的状态；②中国只有掌握独特的技术，才能有效开发和利用其丰富而特色鲜明的稀土矿藏。

总之，中国的原子弹研制与稀土开发的早期关系非常值得关注。如果说，美国斯佩丁通过离子交换法分离稀土为美国制造原子弹作出了贡献，并使得人类的稀土开发与利用进入“启蒙时代”^[11]，那么今天中国稀土科技是否受到原子弹研制任务的直接带动，以及如何促进研制任务的完成，则是学术史上一个不容忽视的问题。

2 中国研制原子弹需要开发稀土资源

富藏的稀土资源和自主的科研能力为中国发展核

工业提供了有利条件。

2.1 中国核燃料资源伴生矿藏的发现

日本侵略者最先觊觎中国的稀土资源。他们先后在1938年和1944年对辽宁海城和包头白云鄂博地区的放射性矿物进行了调查，并发现了有核价值的含稀土矿物^[12,13]。日本在辽宁海城地区破坏性地开采了约5000吨含稀土褐帘石等的矿物^[14]，白云鄂博矿因日本战败而未被掠夺。国民政府随后接手了部分日本在华核与稀土开发的资料，使中国地质矿产专家了解到更多日本在华调查研究的信息^[15]。国民政府曾试图以资源换取美国支持中国研制原子弹，包括建立原子能研究实验室或派遣科学家到美国实验室参与原子能研究，但美国无意对华援助核技术，此事最终不了了之，但是中美双方都知晓中国稀土资源的核战略价值^[16]。

中苏合作期间，苏联对中国稀土资源的状况很关心。1950年3月，中苏两国在新疆成立了中苏有色及稀有金属股份公司，其中“有色”在当时通常指代铀、钍等核战略资源^[17]。然而，合营企业成立后，中苏间的矛盾重重，原因之一是苏方常常对中方隐瞒地质勘探等方面的工作成果^[18]。

此后，中苏将稀土合作的焦点集中在白云鄂博矿区。1956年，两国签订了科学技术合作协议，其中第4204项要求“共同进行白云鄂博铁矿的研究”。据此，双方拟定了《苏联科学院和中国科学院关于共同进行白云鄂博铁矿研究的工作计划（草案）》（以下简称《草案》）^[19]。《草案》将白云鄂博矿研究分为3个部分：“矿床、矿物成分、矿床成因及地质构造研究”“选矿研究和提取稀土方法”“稀土金属性质及其利用研究”^[20]，其中第1部分被赋予优先权^[19]。

1958年起，两国科学院组织成立中苏合作地质队，对白云鄂博矿进行首次系统性的稀土地质研究。至1959年，合作地质队得出研究结论：白云鄂博矿床中稀土总储量达到“巨大数字——百万吨”，其中铈

(Ce)的储量约占稀土总储量的50%，镧(La)和钕(Nd)的储量次之，其他稀土族元素储量小于5%^[21]。这次合作研究明确认识到了中国稀土资源具有潜在的世界级科技和经济价值，为白云鄂博矿稀土的采矿、选矿和分解分离研究奠定了基础。

2.2 稀土分离自主创新保障原子弹研制任务

中国稀土开发的一个关键动因是原子弹的研制任务，而《十二年科技规划》对此起到了重要的导向作用，直接促成中国实现稀土分离的产业化。

2.2.1 稀土元素分离问题成为中心问题

中国的稀土“综合研究”始于1955年。1955年5月，中央决定研制原子弹4个月后，重工业部^[22]向国务院报告应重视稀土矿物的开发和利用，建议国家研究确定对白云鄂博矿中稀土元素的利用计划，特别是对矿区围岩中的稀土元素进行地质研究。7月，国家计划委员会复电，建议中国科学院加强相关研究。9月中旬，中国科学院两矿加工小组^③牵头召开会议，首次^④对白云鄂博矿中稀土研究进行专门讨论，标志着中国稀土研究的正式启动。

《十二年科技规划》确定了中国稀土科研的基本方向。这份中国首个科技规划，为中国原子弹与导弹研制计划提供了蓝图^[23]。其中，稀有和分散元素的开采、提取和利用的中心问题指向了稀土元素的分析、分离及其化学新用途的探索^[24]。稀土研究任务若要发挥出价值，关键在于3—4年内研制出半工厂性的装置，以解决急需的单一稀土元素分离问题。正因如此，该任务预期成果安排了设计完成生产混合稀土的半中间工厂，由长春应化所负责完成^[25]。

2.2.2 跟踪前沿初见成效

中国的稀土分离研究在一开始先尝试采用美国同行的方法。美国最初用柠檬酸作淋洗剂分离铈、钇、

锆和钕，并进行了中试；1954年又改进地以铜离子作延缓剂，EDTA（乙二胺四乙酸）作淋洗剂^[26]，提高了生产效率。离子交换法在当时已成为前沿的稀土分离方案及研究方向之一^[27]，中国学者不仅注意到，甚至将其称作稀土分离上“最为有效”的方法^[28]。

1958年长春应化所根据《十二年科技规划》和此前关于“钍及稀土族元素的色谱法分离”课题的初步研究，确定李有谟^[29]负责“离子交换法分离稀土元素”课题。由于当时国家的基础工业与仪器设备自给能力不足，课题组不得不在所需设备和试剂的配套措施上投入大量努力。搭建的离子交换柱实验平台虽然较为简陋，但性能与规模已接近当时美国同行的水平（图1）。此外，课题组还利用所内合成橡胶中间工厂的酒精合成路线，成功自行合成了离子交换剂所需的苯乙烯^[30]。

2.2.3 自主创新解决关键问题

研究人员面临了国外同行尚未解决的难题。离子交换法中EDTA易在离子交换柱上生成沉淀，导致分离效率降低甚至中止。1956年，斯佩丁等^[31]人已经发现该问题，但没有提出可行的解决方案。李有谟在学习了斯佩丁1954年提出的以EDTA作淋洗剂的方案之后，也意识到了该问题，并着手开始解决。

改进美式离子交换法仍不理想。最初考虑降低淋洗剂中EDTA的浓度。实验发现，当浓度从1%降低至0.5%时，虽能消除沉淀，但会显著延长分离时间。尤其在冬季，实验中的沉淀更严重，而继续降低EDTA的浓度并延长分离时间，不利于未来扩大生产规模。

借鉴苏联方案也未能解决问题。在尝试美国方案遇到瓶颈之后，李有谟等人转而分析苏联的方案，即加乙酸铵，可“大大地降低”用EDTA（苏联称之为“特里隆B”）分离稀土时的沉淀物的生成作用^[32]。但该方案局限在低pH值的状态下应用EDTA，不利于铜

③ 1954年2月，中国科学院为组织大冶矿和白云鄂博矿的研究工作，成立了两矿资源委员会加工小组，简称“两矿加工小组”。

④ 1954年4月中国科学院两矿资源委员会加工小组第六次会议认为稀土研究应在人力可能的条件下再进行，然而在1955年9月会议之后，稀土研究被列为一项急迫的重点问题。前后观念转变的主因是研制原子弹的需要。

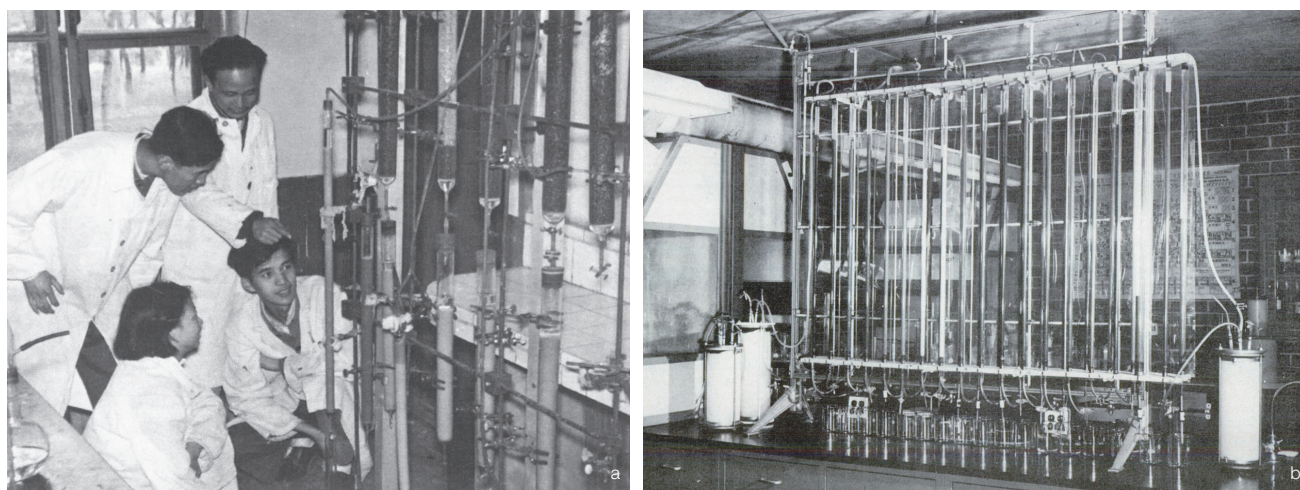


图1 20世纪50年代末中美两国离子交换法分离稀土研究装置

Figure 1 Research equipment for ion exchange separation of rare earth in China and the United States in late 1950s

(a) 中国科学院长春应用化学研究所；(b) 美国内政部矿业局某实验室

(a) Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences; (b) Laboratory of US Bureau of Mines, Department of the Interior

离子发挥延缓剂效用。李有谟又尝试按照美国学者斯佩丁的工艺条件添加乙酸铵，虽然能防止沉淀生成但稀土分离效果却非常不理想。

根据自主实验的探索，中国科研人员不再模仿苏联或美国的方案。他们通过条件试验，发现乙酸铵加入量与淋洗剂pH值的相互作用对稀土分离的影响，确认了合适的分离条件，最终形成了独特的解决方案。

2.3 稀土分离技术的长远影响

(1) 稀土分离创新成果初步满足了“原子能工业及一系列新技术”对单一稀土元素的需求^[33]。1958年末，长春应化所建成国内首座稀土分离中间工厂，实现了除钷（Pm）元素以外的天然稀土元素的分离^[34]。该分离厂日处理稀土碳酸钠复盐最高约100千克，日产总稀土氧化物可达约20千克^[35]，供给中国科学院原子能研究所等单位使用^[36]。

(2) 自主研发的离子交换法长期用于裂变产物的分析。此项分析技术的突破源于《十二年科技规划》中的一项稀土研究任务。当时，一般的化学分析只能分析混合稀土的总量，而分光光度法和光谱分析法等方法需进口贵重仪器。离子交换法很好地弥补了两者

之间的缺陷，适用于反应堆所需单一稀土元素的含量分析。随着离子交换法研究在国内科研机构的深入，这方面逐步从“准备中”^[37]转变为一项特色研究。长春应化所提出用乳酸、乙酸铵、氨三乙酸及磺基水杨酸作为淋洗剂，通过多种离子交换法测定镅的方法，成功将镅的测定误差限制在 $\pm(1\%—2\%)$ 的范围，成为中国长期使用的一项关键核心技术。

(3) 稀土分离的创新技术促进中国稀土分离产业化。1959年，李有谟开创性地提出了仅以乙酸铵为淋洗剂用离子交换法分离稀土钪，其效果强于国外以EDTA为淋洗剂的方法；1970年，在国家急需高纯氧化钪的情况下，长春应化所在江西603厂将该方法进行了中型试验，效果达到预期^[34]。核工业部七一三矿综合利用核工业基础和长春应化所在重稀土分离研究方面的新进展，于1987年兴建了江西昌隆稀土冶炼厂，该厂当时被称为“全国最大的处理重稀土分离厂”^[38]。

3 中国原子弹研制带动稀土化学的建制化发展

原子弹研制与稀土研究的原料矿物的共生性和分

离技术的共通性,形成了学科交叉的局面,这一局面促进了中国稀土化学的建制化和人才培养。特别是在原子弹相关任务的直接带动下,以长春应化所为代表的机构,曾长时间、持续性地开展核化学与稀土两方面的科研工作。

3.1 稀土化学重点研究的开展

原子弹研制初期,稀土化学的重点研究随之启动。1959年,根据主管核工业的二机部^⑤副部长钱三强的指示,长春应化所开始全面承担核燃料化学研究,随之启动了“独居石中钍盐的提取和纯制”^⑥和“钍铀化学”等核燃料前处理相关课题。该研究计划包括利用溶剂萃取等方法制备核燃料纯氧化钍,开展溶剂萃取法与离子交换法分离钍、铀的研究,以及在“制备核子纯的钍”课题中,计划用溶剂萃取法提纯钍等。上海跃龙化工厂在20世纪60年代中期建成的一条从独居石分离纯化钍、铀和稀土的生产线,采用的就是中国自主研制的溶剂萃取法^[39]。

原子弹研制期间,一些稀土分离研究机构参与溶剂萃取法应用于核燃料后处理的研究。中国首颗原子弹爆炸后,为弥补钚弹技术路线的缺口,取得有别于铀的另一种核燃料——钚,1964年底,二机部决定“已动工的按沉淀法设计的中间试验工厂停建,加速萃取工艺研究设计工作”^[40]。参与此任务的,除了长春应化所,还有中国科学院下属的化学研究所、上海有机所等单位,先后合作承担了用磷酸三丁酯(TBP)萃取分离钚—铀的三循环验证研究、二循环方案和单循环方案研究。

核燃料萃取剂的开发直接影响稀土的开发利用。在核燃料后处理的研究中,长春应化所的任玉芳和上海有机所的袁承业等研究人员,从中国自行设计合成的17种磷类和9种胺类萃取剂中筛选出了铀—钚分离

效果显著的品类。1965年,上海有机所成功研制了适用于从磷矿中提取铀的酸性磷型萃取剂P204^[9]。随后,长春应化所实现了P204的应用开发,并于1966年在包头钢铁公司完成萃取分离钼扩大试验,创制了中国第一个用萃取法处理包头矿的工业流程。

3.2 稀土化学骨干队伍与典型成就的形成

20世纪50—60年代,原子能事业为核研究与稀土研究的交叉人才成长提供了平台。20世纪70年代之后,随着中国稀土产业快速发展,长春应化所的倪嘉缱和李德谦、上海有机所的袁承业、北京大学的徐光宪等研究人员逐渐从核燃料研究转向稀土化学。他们瞄准新目标,巩固和发展了稀土分离提取新技术,成长为中国和世界稀土化学发展的领军人物。

(1) 实施中国首个大规模分离高纯单一稀土元素的技术方案。此项研究始于20世纪70年代初期稀土发光材料对钇的需求,彭安、戴桢容和倪嘉缱担任课题负责人^[34]。1976年,该研究成果应用于南昌硬质合金厂,建成了3吨/年的氧化钇生产线,生产成本由1 000多元/千克降低到300元/千克以下^[38],标志着中国稀土萃取化学研究的成熟。长春应化所提出的用环烷酸萃取分离钇的技术,有力推动了离子型稀土矿的开发,为中国加入国际稀土产业竞争打下了基础。

(2) 攻克中国第二代稀土分离流程。长春应化所利用上海有机所合成的新型萃取剂P507,萃取分离低钇混合稀土。袁承业等于1970年提出了工业合成P507的方法,李德谦等人^[34]随后用P507萃取分离低钇混合稀土,于1985年提出了含有18套工艺的低钇混合稀土全分离流程,成功应用于南方离子型稀土矿中重稀土元素的分离。

(3) 提出了著名的稀土串级萃取理论。此理论目的在于提高稀土萃取分离工艺研究中串级模拟试验的

^⑤ 第二机械工业部,主管原子能事业,1982年更名为核工业部。

^⑥ 独居石是一种含有钍和铀的磷酸盐矿物,一般与钍钍伴生。

效率。1976年10月，徐光宪在包头召开的第一次全国稀土萃取会议上首次报告了串级萃取理论；次年6月，上海跃龙化工厂举办了全国稀土萃取串级理论讨论班，进一步推广该理论。串级萃取理论中的新概念和新假设得到了国内外稀土专家的认可，被称为“中国冲击”^[41]。

核燃料化学和稀土研究领域的交叉，不仅完成了重大科研任务，而且培育了稀土无机化学、稀土分析化学等一批新学科的成长。中国在分离、纯制等应用研究领域，以及稀土光谱学、水盐体系相图等基础研究领域^[42]，涌现出一大批拔尖人才与创新成果。

4 思考与启示

原子弹任务与稀土研究之间协同共进的关系，反映了任务与学科之间形成的互动与平衡：任务带动学科交叉，交叉融合促进重大任务。

自主创新与稀土资源优势的充分发挥，构成了中国成功实施核计划的重要基石。同时，原子弹研制的使命深刻塑造了中国稀土研究与开发利用的轨迹。中国原子弹研制与稀土开发的相互促进，是国家重大需求与世界科技前沿的双向驱动的生动实例，其蕴含的历史经验仍具有现实意义，也是“大力协同、勇于攀登”“两弹一星”精神的体现。

（1）以国家需求为前提、以学科发展为支撑的重大科研任务，有利于“集中力量办大事”，也有助于学科力量在特定时段“有所为有所不为”。原子弹的研制是新中国的重要战略需求，《十二年科技规划》促进资源的集中高效利用，也促使学科体系在特定时期实现精准定位与合理布局。通过聚焦核燃料的铀—钚分离技术瓶颈，中国迅速掌握并改进了超纯元素的制备方法，为原子弹的成功研制奠定了坚实基础。自

1955年中国正式启动原子弹研制项目至1964年首颗原子弹试验成功，这10年间，中国稀土研究紧密围绕国家需求，实现了研究体系的快速构建与科研成果的显著突破。

（2）在应对国家需求与世界科技前沿等多重科研挑战时，自主研发关键核心技术成为了一条不可动摇的原则。与纯理论研究不同，原子弹的研制与稀土的开发利用均具有强烈的实践导向性，关键核心技术的突破成为了衡量科研实力的重要标尺。新中国成立以来，科技体制始终强调自力更生的精神，特别是在“两弹一星”等重大项目攻关中，更是倡导发挥创造性和实事求是的科学态度。从改进的离子交换法、自主研发的溶剂萃取法到引领世界的串级萃取法，再到稀土尖端材料在经济领域的广泛应用，中国稀土领域的实力不仅源自其得天独厚的自然资源，更得益于自主创新的持续推动，从而确保了关键核心技术不受制于人。

（3）保持任务与学科之间的平衡与协调，对于推动中国科技事业的快速而稳健发展具有重要意义。长期以来，中国科技在落后—追赶、封锁—突破的大环境之中积累了丰富的经验。以《十二年科技规划》等为代表的战略规划，形成了“以任务为经，以学科为纬，任务带学科”的发展模式，有效满足了国家重大需求。然而，在面向世界科技前沿时，原始创新时常源自对学科基础问题的自主探索，而不是单纯依靠任务驱动的被动牵引。原子弹研制与稀土开发的互动过程表明，学科实力增强的关键在于是否能够在任务导向的基础上，充分重视相关基础研究与人才成长的投入与积累。20世纪60年代，中国科学院党组提出的“三大抓”策略^⑦，正是为了改进“任务带学科”模式的不足而采取的重要举措，并取得了显著成效。稀土

^⑦ 中国科学院提出要抓紧三大重点任务：一抓尖端科学技术；二抓国民经济的重大科学技术问题；三抓基础研究，简化为“抓尖端、重大与基本”。

化学领域的基础前沿研究、共性技术及底层原理等得到了长期的重视,吸引了大量优秀人才与研究资源的汇聚。学科体系的不断壮大与自主性的持续提升,不仅为完成国家任务提供了有力支撑,也促使中国稀土化学在国际前沿实现了从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”的跨越。

21世纪以来,稀土的应用更加广泛,在全球高技术竞争中占据显著的战略地位。中国稀土行业自20世纪50年代之后,持续依靠科技进步与自主创新,打造了一条世界级的完整、高效和开放的稀土产业链与研发体系,以23%的稀土资源供应了全球90%以上的市场,维护了全球相关贸易与产业的稳定。当前,中国稀土尚未完全走出资源过度开发、产能低效利用、生态环境退化、稀土材料及器件研发滞后的困境,更需具有责任意识与超前眼光,有效保护和利用资源,以高水平科技自立自强,实现中国稀土的技术进步和产业升级。

参考文献

- Gschneidner K A, Eyring L. Two-Hundred-Year Impact of Rare Earths on Science. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988.
- Payne C S. The Ames Project: Administering classified research as a part of the Manhattan Project at Iowa State College, 1942-1945. Ames: Iowa State University, 1992.
- Cunningham B B, Werner L B. The first isolation of Plutonium. *Journal of the American Chemical Society*, 1949, 71(5): 1521-1528.
- Martz J C, Freibert F J, Clark D L. The taming of Plutonium: Plutonium metallurgy and the Manhattan Project. *Nuclear Technology*, 2021, 207(sup1): S266-S285.
- Vasudeva Rao P R. Materials for nuclear industry: Some historical perspectives. *Journal of Chemical Sciences*, 2019, 131(9): 97.
- Klinger J M. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age. *The Extractive Industries and Society*, 2015, 2(3): 572-580.
- Goldman J A. The U.S. rare earth industry: Its growth and decline. *Journal of Policy History*, 2014, 26(2): 139-166.
- Gladyshev M. Plutonium for bombs. (2022-01-21)[2024-03-09]. c. <https://www.libozersk.ru/pbd/Mayak60/link/225.htm>. (in Russian)
- 樊洪业. 中国科学院编年史 1949—1999. 上海: 上海科技教育出版社, 1999.
Fan H Y. Chronicle of Chinese Academy of Sciences 1949-1999. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1999. (in Chinese)
- 沈志华. 援助与限制: 苏联与中国的核武器研制(1949—1960). *历史研究*, 2004, (3): 110-131.
Shen Z H. Aid and restriction: The USSR and the development of atomic weapons in China (1949—1960). *Historical Research*, 2004, (3): 110-131. (in Chinese)
- Gschneidner K A. Past, present and future of rare earth metallurgy. *Journal of the Less Common Metals*, 1984, 100: 1-13.
- 矢島道子. 資料: 戦時中のウラン探鉱. *科学史研究*, 2006, 45(238): 96-98.
Yajima M. Compilation of historical materials: Uranium exploration during wartime. *Journal of History of Science, Japan*, 2006, 45(238): 96-98. (in Japanese)
- 京城帝国大学. 【綏远省】蒙疆之稀元素矿物及其产地, 3633. 北京: 全国地质资料馆, 1944.
Keijo Imperial University. Rare element minerals and their origin in Mengjiang, 3633. Beijing: National Geological Archives of China, 1944. (in Japanese)
- 乔林生. 二战期间日本研制核武器计划与对华铀矿的调查和开采. *外国问题研究*, 2018, (4): 17-26.
Qiao L S. Nuclear weapons development program of Japan as well as investigation and exploitation of uranium ores towards China during World War II. *Journal of Foreign Studies*, 2018, (4): 17-26. (in Chinese)
- 佚名. 【华北】蒙疆所产之稀有元素矿物及其应用, 4783. 北京: 全国地质资料馆, 1946.
Anon. Rare element minerals produced in Mengjiang and their applications, 4783. Beijing: National Geological Archives of China, 1946. (in Chinese)
- Stuart J L. [640] the ambassador in China (Stuart) to the

- secretary of state, 893.6359/11—2648: Telegram. Washington: Office of the Historian, Foreign Service Institute, 1948.
- 17 约翰·W·刘易斯, 薛理泰. 中国原子弹的制造(修订本). 李丁, 陈旭舟, 傅家祯, 等, 译. 北京: 原子能出版社, 1991.
Lewis J W, Xue L T. China builds the bomb (Revised edition). Translated by Li D, Chen X Z, Fu J Z, et al. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1991. (in Chinese)
 - 18 吴文琬. 中苏合资企业终结之原因分析——基于中苏有色及稀有金属股份公司的考察. 党史研究与教学, 2013, (1): 37-45.
Wu W L. Analysis of the reasons for the termination of Sino-Soviet joint ventures: Based on the investigation of Sino-Soviet Nonferrous and Rare Metals Co., Ltd. CPC History Research and Teaching, 2013, (1): 37-45. (in Chinese)
 - 19 郭沫若. 中国科学院院长郭沫若致苏联科学院副院长巴尔金的信(1957年6月17日)//包钢志编委会. 内蒙古自治区志 包钢志(1954—1990). 呼和浩特: 远方出版社, 2016: 911.
Guo M R. Letter from Guo Moruo, president of the Chinese Academy of Sciences, to Badin, vice president of the Soviet Academy of Sciences (June 17, 1957)// Editorial Committee of Baotou Steel Chronicle. Inner Mongolia Autonomous Region chronicle: Baotou Steel chronicle (1954—1990). Hohhot: Yuanfang Publishing House, 2016: 911. (in Chinese)
 - 20 中国科学院. 通知有关白云鄂博铁矿研究工作的几项问题, 21-1957-02. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1957.
Chinese Academy of Sciences. Notification of several issues related to the research work on the Bayan-Obo iron ore mine, 21-1957-02. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1957. (in Chinese)
 - 21 中国科学院地质研究所, 冶金部包头钢铁公司, 苏联科学院. 内蒙古自治区白云鄂博铁-氟-稀土和稀有元素矿床 1958—1959 年中苏科学院合作地质队研究总结报告, 27922. 北京: 全国地质资料馆, 1959.
Institute of Geology, CAS, Baotou Steel Company of the Ministry of Metallurgy, Soviet Academy of Sciences. A summary report on the research of iron, fluorine, rare earth, and rare element deposits in Bayan-Obo, Inner Mongolia Autonomous Region, completed by the cooperative geological team of Sino-Soviet Academy of Sciences from 1958 to 1959, 27922. Beijing: National Geological Archives of China, 1959. (in Chinese)
 - 22 重工业部. 请及早研究确定对稀土金属之利用计划(1955年5月10日)//包钢志编委会. 内蒙古自治区志 包钢志(1954—1990). 呼和浩特: 远方出版社, 2016: 903-904.
Ministry of Heavy Industry. Please study and determine the development plan for rare earth metals as soon as possible (May 10, 1955)// Editorial Committee of Baotou Steel Chronicle. Inner Mongolia Autonomous Region chronicle: Baotou Steel chronicle (1954—1990). Hohhot: Yuanfang Publishing House, 2016: 903-904. (in Chinese)
 - 23 Wang Z Y. The Chinese developmental state during the Cold War: The making of the 1956 twelve-year science and technology plan. History and Technology, 2015, 31(3): 180-205.
 - 24 科学规划委员会. 1956—1967 年国家重要科学技术任务和中心问题名称一览表, 1956-03-015-02. 北京: 中国科学院办公厅档案馆, 1956.
Committee for Science and Technology Planning. List of tasks and central issues names in the long-term plan for the development of science and technology for 1956techn, 1956-03-015-02. Beijing: Archives of CAS, Department of General Administration, 1956. (in Chinese)
 - 25 中国科学院计划局. 1956—1967 年国家重要科学技术任务规划中有关中科院各研究单位中心问题汇编(数学、物理、化学部分), 1956-03-026-02. 北京: 中国科学院办公厅档案馆, 1957.
Planning Bureau of the CAS. Compilation of central issues related to the research units of the CAS in the long-term plan for the development of science and technology for 1956n sea (mathematics, physics, and chemistry sections), 1956-03-026-02. Beijing: Archives of CAS, Department of General Administration, 1957. (in Chinese)
 - 26 Spedding F H, Powell J E, Wheelwright E J. The use of copper as the retaining ion in the elution of rare earths with ammonium ethylenediamine tetraacetate solutions. Journal of the American Chemical Society, 1954, 76(9): 2557-2560.
 - 27 Spedding F H. The rare-earth metals. Metallurgical Reviews, 1960, 5(1): 297-348.
 - 28 邹元熾. 关于制定科学工作远景计划的意见 对化学冶金研究方向的一些意见. 科学通报, 1956, (1): 58-65.

- Zou Y X. Opinions on formulating a long-term plan for the development of science and technology: Some opinions on the research direction of chemical metallurgy. Chinese Science Bulletin, 1956, (1): 58-65. (in Chinese)
- 29 李有谟. 归档说明书——离子交换法分离稀土元素, 21-1958-08. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1985.
- Li Y M. Archive instruction manual: Separation of rare earths by ion exchange, 21-1958-08. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1985. (in Chinese)
- 30 中国科学院应用化学研究所. 为请求立即设法解决分离稀土元素所需的离子交换剂与淋洗剂的原料与器材问题由, 21-1957-02. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1958.
- Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences. Letter requesting an immediate solution to the issue of raw materials and equipment for ion exchangers and eluting agent for the separation of rare earths, 21-1957-02. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1958. (in Chinese)
- 31 Spedding F H, Powell J E. The isolation in quantity of individual rare earths of high purity by ion exchange. Ion Exchange Technology. Amsterdam: Elsevier, 1956: 359-390.
- 32 Андреева З Ф, Космыгов А С. ХАРАКТЕРИСТИКА ТРИЛОНАА И ТРИЛОНА Б В ИОННО-ОБМЕННОМ РАЗДЕЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕРИЕВОЙ ПОДГРУППЫ// РЯБЧИКОВ Д И, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ПОЛУЧЕНИЕ, АНАЛИЗ, ПРИМЕНЕНИЕ). Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1958: 108-111.
- Andreeva Z F, Kosmygov A S. Characteristics of the Distribution of Elements of the Rare Earth Subgroup, Ryabchikov D I. Rare Earth Elements (Extraction, Analysis, Application). Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1958: 108-111. (in Russian)
- 33 中国科学院应用化学研究所. 自稀土碳酸钠复盐分离铈、镧、镨、钕及富集其他稀土的中间工厂试验阶段总结, 21-1955-02. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1959.
- Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences. Summary of stage work of the intermediate factory experiments for separating cerium, lanthanum, praseodymium, neodymium, and enriching other rare earths from rare earth sodium carbonate complex salts, 21-1955-02. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1959. (in Chinese)
- 34 倪嘉缙, 洪广言. 中国科学院稀土研究五十年. 北京: 科学出版社, 2005.
- Ni J Z, Hong G Y. Fifty years of rare earth research in the Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- 35 中国科学院. 科学院稀有金属有关工作的基本情况及1959年科学研究任务, 21-1957-02. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1959.
- Chinese Academy of Sciences. Basic information on the work related to rare metals of the Chinese Academy of Sciences and its research plan in 1959, 21-1957-02. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1959. (in Chinese)
- 36 中国科学院应用化学研究所. 稀土中间工厂建成后的几点收获, 21-1957-02. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所档案室, 1959.
- Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences. Review of the completion of the rare earth intermediate factory, 21-1957-02. Changchun: Archives of CIAC, CAS, 1959. (in Chinese)
- 37 中国科学院数学物理学化学部. 中国科学院学部委员会第二次全体会议 数学物理学化学部工作报告(摘要). 科学通报, 1957, 2(14): 417-420.
- Department of Mathematics, Physics and Chemistry. Chinese Academy of Sciences. The work report of the Department of Mathematical Physics and Chemistry at the Second Plenary Meeting of the Academic Committee of the CAS (abstract). Chinese Science Bulletin, 1957, 2(14): 417-420. (in Chinese)
- 38 《江西省冶金工业志》编纂委员会. 江西省冶金工业志. 北京: 方志出版社, 1999.
- Editorial Committee of Jiangxi metallurgical industry chronicle. Jiangxi metallurgical industry chronicle. Beijing: China Local Records Publishing, 1999. (in Chinese)
- 39 《上海有色金属工业志》编纂委员会. 上海有色金属工业志. 上海: 上海社会科学院出版社, 1999.
- Editorial Committee of Shanghai nonferrous metals industry chronicle. Shanghai nonferrous metals industry chronicle. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press,

1999. (in Chinese)
- 40 当代中国的核工业编辑委员会. 当代中国的核工业. 北京: 当代中国出版社, 2009.
- Editorial Committee of Contemporary China: Nuclear industry. Contemporary China: Nuclear industry. Beijing: Contemporary China Publishing House, 2009. (in Chinese)
- 41 廖春生, 程福祥, 吴声, 等. 串级萃取理论和稀土分离技术的发展趋势及相关进展. 中国科学: 化学, 2020, 50(11): 1730-1736.
- Liao C S, Cheng F X, Wu S, et al. Trends and progress of the theory of countercurrent extraction and rare earth separation technology. Scientia Sinica Chimica, 2020, 50(11): 1730-1736. (in Chinese)
- 42 裴蔼丽, 沈联芳, 程建华, 等. 混合稀土元素光谱图. 北京: 科学出版社, 1964.
- Pei A L, Shen L F, Cheng J H, et al. Spectrogram of mixed rare earth elements. Beijing: Science Press, 1964. (in Chinese)

Interaction between China's atomic energy breakthrough and rare earth R&D (1955 – 1987)

SUN Lie^{1*} LI Xin^{1,2} PAN Jing³

(1 Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 State Key Laboratory of Rare Earth Resource Utilization, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract The interaction between China's atomic bomb project and rare earth R&D has directly ensured the breakthrough of nuclear fuel and other related scientific research tasks, meanwhile, it has significantly forced to achieve preeminence in rare earth separation. The impact is profound yet rarely investigated. This study investigates the interaction and its impact through a wealth of detailed primary historical materials. After China launched the atomic bomb project, the tasks of the 1956 "Twelve-Year Science and Technology Plan" promoted the institutionalization of rare earth chemistry. Since the late 1950s, the research forces led by the Chinese Academy of Sciences (CAS) achieved a pivotal breakthrough in separating rare earths by ion exchange method and initiated research on solvent extraction method. Such achievements were not only critical for the technical route for "uranium-plutonium separation" of nuclear fuel, but also laid a robust foundation for the basic research and application of rare earth. The mutual promotion between the development of China's atomic bomb project and the rare earth R&D truly represents a two-way drive between the country's significant needs and the forefront of global science and technology, and the historical experience contained within still holds practical significance.

Keywords atomic bomb, nuclear fuel, rare earth, separation and extraction, Chinese Academy of Sciences

孙 烈 中国科学院自然科学史研究所研究员。主要研究领域: 现当代科学技术史、高技术发展战略。
E-mail: sunlie@ihns.ac.cn

SUN Lie Professor of Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on the history of modern and contemporary science and technology, and high tech development strategy. E-mail: sunlie@ihns.ac.cn

■责任编辑: 文彦杰

*Corresponding author