



扫二维码 看科学报

主办:中国科学院 中国工程院 国家自然科学基金委员会 中国科学技术协会

总第 8251 期 2023 年 4 月 26 日 星期三 今日 4 版

新浪微博 <http://weibo.com/kexuebao>

科学网 www.sciencecn.net

稳定六价镅，让核废料变废为宝

■本报记者 潘才妃 通讯员 尹喆

在科学家眼中，核废料并不是完全意义上的废物，其中有许多可以利用的资源。比如，钚-238是非常好的热源，可用于核电池燃料；钚-99m衰变发射光子、碘-131衰变发射电子，可用于医学影像检查和治疗；碳-14能用来测定古生物化石年代等。

特别是，“我国是一个贫铀国家，乏燃料的后处理和循环利用对我国核电发展具有重大意义”。苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室教授王殳凹说。

近日，王殳凹团队联合清华大学、美国科罗拉多矿业大学、德国于利希研究中心、上海科技大学等机构的研究人员，以《六价镅的金属杂多酸化合物与镧系间的超滤分离》为题，将相关成果发表于《自然》。这一成果将为乏核燃料后处理、核废物处置中的关键核素分离过程提供一种全新的思路。

从核废料中精准提取镅

“乏燃料中的铀和钚可以通过后处理工艺提取出来，再作为核燃料重新投入核电站中使用，而经过铀、钚分离后残存的次锕系元素，则很难再处理。”王殳凹介绍，这些次锕系元素具有强放射性，且相关同位素的半衰期在几百年到几百万年间不等，目前只能采取固化后深度掩埋方式处理。而这些核废料在地底就像一颗颗定时炸弹，一旦发生泄漏，将对自然环境造成不可估量的危害。

王殳凹解释，镅是次锕系元素之一，如果将镅分离出来进行嬗变处理，只需要 200 年，其放射性就可以衰变到天然铀矿水平。“镅的化学性质与核废料中共生的三价镧系元素十分相似，因此其提取和分离成为放射化学领域最具挑战性的科学难题之一。”

“如果将三价镅氧化到六价，利用六价镅与三价镧系间配位构型的差异实现分离，有望从根本上解决镧锕分离难题。”论文共同通讯作者、苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室教授张海龙表示。

进入镅的提取阶段，团队最早的战略是让高价镧系元素结晶，低价镧系元素不结晶以实现分离。而在这一方案具体实施时，他们发现，

分离过程中仅能存在数秒，极易被还原为三价，从而造成分离困难。

通过实验，研究团队设计了一例可精准匹配六价镅配位构型的无机缺位多酸簇合物。它不仅可与六价镅发生极强的络合作用，而且对六价镅来说是一种具有“化学惰性”和“位阻效应”的保护性基团，能将酸性溶液中的六价镅稳定超过 24 小时，而这正是后续分离过程的前提。

“利用我们的分离方法，可从化学组成极为复杂的核废料中精准提取出镅，单次回收率高达 91%。”王殳凹说，掌握这项技术可以大幅降低核废料的长期放射性毒性，使我国摆脱对进口镅的依赖。从日常生活中的测厚仪、烟雾报警器到未来发展的太空核电池，稀有元素镅有着广阔的应用前景，是国家重要的战略资源。

《自然》审稿人评价：“这一实验设计极其实妙，有望改变全球核废物处理的基本范式。”

几经“闯关”终获最好分离效果

这一科研攻关远没有预想那般顺利。

团队首先面对的是镅的氧化问题。通过反复实验，他们发现，传统方法只适用于低浓度镅的氧化，浓度一旦提高到真实核废液水平，实验数据和结果就非常不理想。改进后，他们采用电化学方法进行氧化，虽然实验取得了部分成功，但遇到了新问题——由于镅的氧化不彻底，造成分离上的困难。

正在大家一筹莫展的时候，王殳凹联系到了清华大学放射化学团队副教授徐超。在他的协助下，团队选用了徐超推荐的厂家生产的化学氧化剂，解决了这一难题。

“不同厂家生产的同一种氧化剂也会造成实验结果的巨大偏差。”论文共同第一作者、苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室副研究员张海龙表示。

进入镅的提取阶段，团队最早的战略是让高价镧系元素结晶，低价镧系元素不结晶以实现分离。而在这一方案具体实施时，他们发现，

结晶过程不仅会夹带过多杂质，而且受到结晶率的影响，分离效果远未达到预期。

这时，课题组的其他工作给了他们启发，为什么不能尝试一下生物学领域广泛应用的超滤方法？结果收到了“奇效”。利用镅多酸纳米复合物与水合镧系离子之间的显著尺寸差异，结合商用超滤技术，团队最终获得了基于六价镅的最好分离效果。

“车轮战术”分担辐射剂量

在苏州大学放射医学与防护学院深处的超铀实验室，3 位身穿厚重铅衣的实验员正紧张地忙碌着。

主操作员低头专注于实验平台上放射性物质的操作，辅助人员根据主操作员的指令进行配合，第三人则手持一个用于探测辐射强度的盖革计数仪器，实时监测是否有放射性物质泄漏。他们胸口上佩戴着辐射计量器，一旦主操作员身上的计量器报警，三人分工就会轮换一次。

“辐射会随放射源变远而衰减。”论文共同第一作者、苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室科研助理李霁介绍，由于镅的相关同位素在衰变过程中会伴生高能伽马射线，在做一些辐射剂量较大的实验时，研究人员一方面会做好防护，另一方面会采取这种“车轮战术”互相分担，最大限度保障实验人员的健康。

不断试错给课题组带来了焦虑情绪，对此王殳凹有自己的“诀窍”——即使再忙，他也会见缝插针带领团队打一场篮球。“体育运动不仅能够缓解沉重的科研压力，还让组内师生有了良好的交流，增强了团队的凝聚力。”王殳凹表示，科研之余约一场球已成为约定俗成的惯例。

“每次大家在球场上挥汗如雨后回到实验室，都能以良好的精神状态迎接富有挑战性的工作。”李霁说。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05840-z>

空地机器人 值守在雪域高原

近日，国家重点研发计划“高海拔环境科考站辅助值守机器人”项目通过综合绩效评价。项目由中国科学院沈阳自动化研究所牵头承担。

在该项目支持下，针对南极和青藏高原 4000 米以上的科考需求，科研团队研制出站内、站外两类 6 种科考机器人系统，在西藏、青海、南极等 5 地，开展了 12 次、20 项科考应用。其间，科研团队开展了适应高海拔气候、地形条件的科考机器人群体设计、适应典型科考任务的作业载荷设计与适配等研究，提升了机器人在高海拔极端气候/地形地貌条件下的特殊环境适应与生存能力。

本报记者沈春蕾报道

空地机器人系统在廓琼岗日冰川开展协同应用。

沈阳自动化所供图



DNA 柔性成就合格“抗体士兵”

本报讯 中国科学院分子细胞科学卓越创新中心（生物化学与细胞生物学研究所）研究员孟飞龙研究组和上海交通大学医学院上海市免疫学研究所研究员叶菱秀研究组合作，发现了抗体基因 DNA 的特殊力学性能，其柔性决定了抗体“亲和力成熟”过程中的基因突变效率。4 月 24 日，研究论文在线发表于《细胞》。

抗体是人体免疫系统对抗外界病原体入侵的“分子士兵”。当病原体入侵免疫系统时，淋巴细胞通过基因突变等方式，利用 DNA 编码多种多样的抗体分子，“以万变应万变”，针对性地产生能结合入侵病原体的抗体分子。这个过程被称为抗体“亲和力成熟”。

“从分子水平上看，抗体分子呈字母‘Y’形，像两臂举着武器的人。”孟飞龙介绍说，“其顶端的氨基酸是识别病原体的‘武器’，而下方‘身体’部分的氨基酸则负责维持抗体结构的稳定和信息传递。不同抗体分子拥有大致相同的‘身体’，但顶部的‘武器’却千差万别。”

该研究基于经典生化方法与高通量测序技术，建立了体外检测抗体基因超突变的一系

列新方法，从而揭示了抗体基因互补决定区（CDR）通过高度柔性特征引发超高突变的分子机理。

“在柔软的地方，‘魔鬼教练’（工具酶）更容易训练该处的基因，从而产生更多突变。”论文第一作者、中科院分子细胞科学卓越创新中心博士生王燕燕说，“这是‘魔鬼教练’和‘士兵材料’（底物 DNA）在漫长进化过程中‘双向奔赴’的结果。”

科学家还发现，相关机制在人类、猴子、小鼠、羊驼、兔子、狗甚至鸭嘴兽中普遍存在。

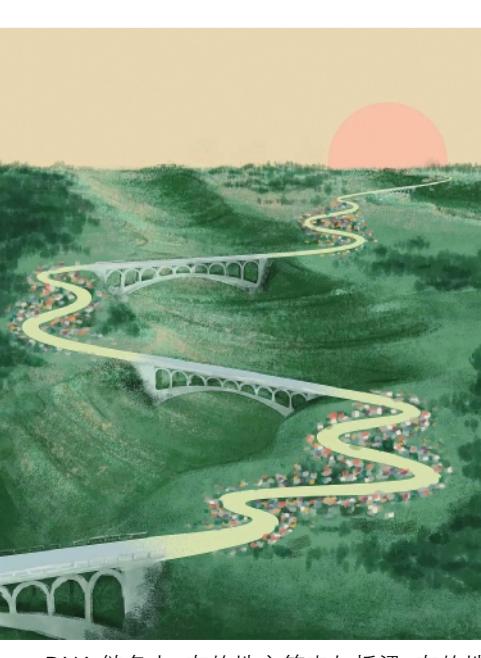
“在人体细胞内部总长两米的 DNA 链条上，有的地方笔直如桥梁，有的地方蜿蜒如乡间小路。”孟飞龙解释说，“‘魔鬼教练’在桥梁上飞驰而过，在乡间小路时则减速慢行。反映在抗体基因水平上，胞苷脱氨酶 AID 更倾向在柔软的 DNA 区域引入更高的基因突变。”

研究发现在“抗体士兵”制造过程中，DNA 的柔性发挥了重要作用。该工作为下一代抗体基因人源化动物模型的设计提供了底层理论。

（张双虎 黄辛）

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1016/j.cell.2023.03.030>



DNA 链条上，有的地方笔直如桥梁，有的地方蜿蜒如小路。
受访者供图

2024 年前后发射嫦娥六号、2026 年前后发射嫦娥七号、2028 年前后发射嫦娥八号，2030 年前后建成国际月球科研站基本型……

4 月 25 日，在 2023“中国航天日”系列主场活动之一——首届深空探测（天都）国际会议上，中国探月工程总设计师、深空探测实验室主任吴伟仁院士介绍了国际月球科研站建设方案，深空探测重大专项总设计师吴艳华深度解读了中国深空探测规划。

3 个阶段分步实施 建设国际月球科研站

国际月球科研站是在月球表面或月球轨道上建设可进行月球自身探索和利用、月基观测、基础科学实验和技术验证等多学科多目标科研活动，长期自主运行的综合性科学实验基地。2021 年 3 月 9 日，中俄两国签署合作建设国际月球科研站谅解备忘录。

吴伟仁介绍，国际月球科研站将按照 3 个阶段分步实施，计划 2030 年前后建成基本型，开展月球环境探测和资源利用试验验证；2040 年前后建成完善型，开展日地月空间环境探测及科学试验，并建成鹊桥通信综合星座，服务载人登月和火星、金星等深空探测；之后建设应用型月球科研站，由科研型试验站逐步升级到实用型、多功能的月球基地。

作为国际月球科研站基本型建设阶段的重要任务，嫦娥六号将于 2024 年前后发射，实施月背采样返回任务；嫦娥七号将于 2026 年前后发射，开展月球南极的环境与资源详查；嫦娥八号将于 2028 年前后发射，开展月球资源利用试验验证，构建月球科研站基本型。

据悉，国际月球科研站将成为在月球表面和月球轨道长期自主运行、短期有人参与、可扩展、可维护的综合性科学实验设施。科研站由地月运输系统、月面长期运行保障系统、月面运输与操作系统、月球科研设施系统、地面支持及应用系统五大基础设施构成。

增强国际合作 共绘深空探测发展蓝图

过去近 20 年间，我国月球探测工程实现“六战六捷”，圆满完成“绕落回”三步走战略目标；过去近 3 年间，我国成功实施天问一号火星探测任务，一步实现“绕、着、巡”战略目标。一系列科学研究成果不断刷新着人类对月球和火星的认知，并带动地面综合试验场、全球布局的深空测控网、文昌航天发射场等一大批先进基础设施建设。

吴艳华表示：“当前，月球是深空探测热点，火星是深空探测重点。发现未知是永恒主题，国际合作成为共识。中国将持续开展月球、行星探

测，为这一人类共同事业贡献中国智慧、中国力量。”

他介绍，在行星探测方面，我国计划在 2025 年前后发射天问二号探测器，实现近地小行星伴飞、取样和返回、主带彗星伴飞。

中国探月工程自 2004 年实施以来，与超过 19 个国家和地区开展合作，先后签署 23 份国际合作协议或谅解备忘录。吴艳华表示：“未来，我国将持续推进国际月球科研站、中海联合月球和深空探测中心、国际深空探测联合会等重点方面建设，深化深空探测领域国际合作。”

吴伟仁亦表示，国际月球科研站将联合多国共同建设。

法国天体物理学及行星研究所名誉教授米歇尔·布朗在大会报告中表示：“关于深空探测，我们还有很多重要任务未完成，并且这些任务非常具有挑战性。”他认为，深空探测需要克服重重挑战，因此必须推动国际间合作，共同探索人类太空梦想。

俄罗斯国家航天公司载人航天项目执行主任谢尔盖·康斯坦丁诺维奇·克里卡列夫认为：“未来我们一定会进行更加复杂、更具挑战性的深空探测活动，而这些探测活动一定要以国际合作方式进行。国际月球科研站就是其中之一。我们既可以试验设备，也可以试验人与人的合作、国家与机

构的合作。”

美国国家航空航天局退役航天员唐·托马斯建议：“如果在深空探测中有载人计划，我们必须考虑辐射防护、可靠的生

命支持技术、冰水和氧气生

产、栖息地建设等，还要尽可能创造人工重力，使航天员能长期在太空中生活和工作。同时，我们需要充分借助机器人和人工智能，及时了解航天员的身体状况。”

首个商业登月计划尝试登陆月球



图片来源：iSpace

本报讯 4 月 25 日，一艘日本制造的宇宙飞船将搭载阿拉伯联合酋长国的“拉希德”号月球车，尝试登陆月球。

如果成功，这个名为白兔-R M1 的月球着陆器将完成第一个商业登月任务。这也是首次由两个国家联合访问月球表面。

M1 着陆器由日本私营月球机器人探索公司 iSpace 制造，于今年 3 月 21 日进入月球轨道。M1 的最终目的地是阿特拉斯陨石坑，在一个以前未被探索过的地方研究月球土壤和地质。

“这是在月球上进行科学的研究的一种新方

式，也是在月球上开展业务的一种新方式。”欧洲空间资源创新中心地质学家、月球探测专家 Abigail Calzada Diaz 说。

iSpace 首席技术官 Ryo Ujii 表示，在启动着陆之前，空间任务控制小组需要完成一系列检查，包括外部温度和条件，以及着陆传感器和软件。为确保软着陆，M1 将启动其传感器调整高度和速度。“这存在不可避免的风险，因为这将是我们第一次也是唯一一次在月球环境中使用该传感器。”

如果检查表明 M1 不能按计划安全着陆，国际空间组织表示，它可能会在 4 月 26 日、5 月 1 日或 5 月 3 日作进一步尝试。

在着陆时，M1 需要给电池充电，然后才能部署由阿联酋穆罕默德·本·拉希德航天中心建造的“拉希德”号月球车和由日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）建造的两轮机器人。M1 上的多摄像头、人工智能、360 度成像系统将在着陆后继续捕获图像并监控探测器。

负责“拉希德”号月球车通信系统的工程师 Sara AlMaeei 说，月球车长约 50 厘米，仅重 10 公斤，将使用显微相机研究月壤中的颗粒，并使用热像仪扫描月球表面的地质特性。

而 JAXA 的棒球大小的机器人将收集月球表面数据，包括被称为风化层的月球尘埃。

AlMaeei 表示，月球尘埃边缘锋利，就像玻璃一样，会影响宇航员的设备和宇航服。“这个实验将帮助我们确定未来月球任务中合适的硬件材料。”

M1 着陆器将在登陆后 12 个至 14 个地球日，即月球夜幕降临后关闭。M1 着陆器和“拉希德”号月球车都无法在月球夜间低温下“生存”。如能顺利着陆，月球车将把收集到的数据发送至穆罕默德·本·拉希德航天中心。分析相关数据需要几个月甚至几年时间。

（辛雨）

高灵敏钙信号荧光蛋白探针“尼莫”问世

本报讯（记者陈彬 通讯员章晓辉）近日，北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室教授章晓辉团队、生命科学学院教授王友军团队与中科院生物化学与细胞生物学研究所教授唐爱辉团队合作，开发构建了一类检测钙信号的新型荧光蛋白探针“尼莫”（NEMO）。该探针具有更强、更精准的定量测定性能。相关成果在线发表于《自然—方法》。

生命的许多活动都离不开钙离子信号分子。在相关领域内被广泛应用的钙探针主要包括有机小分子类探针和遗传编码的（荧光）蛋白探针（GECI）。其中单荧光 GECI 工具为 GCaMPs 系列，由钙感知和荧光反应两大模块组装而成。钙感知模块包含钙结合蛋白（如钙调蛋白 CaM）及其靶蛋白（如 M13/R520），荧光反应模块为环化重排的绿色荧光蛋白 cGFP。