

· 联合基金总述及改革举措 ·

核技术创新联合基金化学领域资助情况和成果综述

云 洋^{1,2} 王芑凹³ 石伟群⁴ 黄 艳¹ 庄乾坤^{1*}

1. 国家自然科学基金委员会 化学科学部, 北京 100085
2. 山西大学, 太原 030006
3. 苏州大学, 苏州 215123
4. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049

[摘要] 国家自然科学基金委员会与中国核工业集团有限公司在 2018 年共同设立了核技术创新联合基金, 旨在推动面向国家核技术战略需求的前沿应用基础研究并加强核技术行业的自主创新能力。本文基于自然科学基金资助与管理的角度, 对该联合基金化学领域近 3 年(2018—2020 年)的资助情况进行了简要总结, 系统梳理了资助项目 3 年来取得的初步成果, 并对未来该领域的资助工作进行了展望。

[关键词] 核技术创新联合基金; 放射化学; 资助情况; 资助成果; 展望

2018 年, 为了发挥国家自然科学基金的导向作用, 促进协同创新, 吸引和汇聚全国核技术研究领域的优秀人才, 加强面向国家核技术战略需求的基础前沿技术研究, 推动核技术行业可持续发展和自主创新能力不断提升, 围绕我国核工业发展面临的重大技术攻关和关键瓶颈问题, 国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)和中国核工业集团有限公司(以下简称“中核集团”)共同出资设立了核技术创新联合基金^[1]。该联合基金自设立以来, 通过自然科学基金委平台, 促进了中核集团与我国高校和科研机构之间的合作与交流, 已初步形成一批具有引领带动作用的优秀成果, 加速推动了核技术行业由跟踪研发向领跑者和行业领军者的转变。本文简要介绍了核技术创新联合基金化学领域资助情况和成果, 供相关学者参考。

1 核技术创新联合基金化学领域受理、评审及资助概况

1.1 项目申请情况

(1) 申请情况

核技术创新联合基金化学领域, 2018 年度, 11 个研究方向共接收重点支持项目申请 22 项, 占本联



云洋 山西大学教授、博士生导师。山西省 1331 工程重点创新团队(培育)学术带头人和山西省高等学校优秀青年学术带头人, “三晋英才”支持计划青年优秀人才。主要研究方向为区域性环境污染物的健康效应及其毒性通路调控机制, 承担国家自然科学基金项目和省部级项目等 7 项。



庄乾坤 国家自然科学基金委员会化学科学部四处处长, 兼环境化学项目主任。国家七五、八五重大研究项目及九五重点研究项目的主要参加者, 曾主持国家自然科学基金项目、教育部博士点基金及回国人员启动基金项目等。

合基金申请总数的 26.83%; 2019 年度, 10 个研究方向共接收重点支持项目申请 44 项, 占本联合基金申请总数的 40.57%; 2020 年度, 9 个研究方向共接收重点支持项目申请 28 项, 占本联合基金申请总数的 26.70%。与 2018 年度相比, 2019 年度核技术创新联合基金化学领域申请量增幅为 100%; 2020 年度申请量较 2019 年度有所下降, 但仍高于 2018 年度。

(2) 研究方向分布情况

从申请项目研究方向分布上(研究方向申请量/化学领域总申请量)来看, 2018 年度, “高盐份条件

下低放废水深度净化机理与方法”研究方向项目申请量最高,占比 36.36%;2019 年度,“用于肿瘤等重大疾病诊断或治疗的放射性药物的基础研究”和“碘、铯、钡、锶吸附新材料与机理研究”,这两个研究方向项目申请量位居前两位,分别占比 29.54%和 20.45%;2020 年度,“新型固相分离材料分离铯系及裂变气体性能与机理”和“长期低剂量辐射健康影响及生物学机制”研究方向项目申请量较高,申请量占比均高达 25%。从申请热度(申请量/指南方向数)来看,2018、2019 和 2020 年度核技术创新联合基金化学领域申请热度分别为 2.00、4.40 和 3.11(表 1)。

(3) 项目依托单位分布情况

2018 年度,共 13 个依托单位申报化学领域核技术创新联合基金,其中中国原子能科学研究院申请 8 项,苏州大学申请 3 项,其余 11 个单位均有 1 项申请,涉及清华大学、吉林大学、天津大学、西南科技大学、武汉理工大学、华北电力大学、兰州大学、北京科技大学、中国辐射防护研究院、福州大学、中国医学科学院。2019 年度,申报本联合基金化学领域的依托单位增至 35 个,其中苏州大学有 5 项申请,哈尔滨工程大学有 3 项申请,北京师范大学、四川大学、中国辐射防护研究院各有 2 项申请;其余 30 个单位均有 1 项申请,涉及北京大学、浙江大学、中国科学技术大学、天津大学、吉林大学、四川大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学等高校及科研院所。2020 年度,18 个依托单位申报了本联合基金,

表 1 核技术创新联合基金化学领域项目申请情况

| | 年度 | | |
|-------------|-------|-------|-------|
| | 2018 | 2019 | 2020 |
| 申请项目数(项) | 22 | 44 | 28 |
| 指南方向数(个) | 11 | 10 | 9 |
| 化学领域申请占比(%) | 26.83 | 40.57 | 26.70 |
| 化学领域申请热度 | 2.00 | 4.40 | 3.11 |

清华大学、苏州大学各有 3 项申请,中国科学技术大学、四川大学、西南科技大学、中科院高能物理研究所、中科院地球化学研究所、中国原子能研究院各有 2 项申请;其余 10 个单位均有 1 项申请,涉及北京大学、南京大学、兰州大学、北京工业大学、南京工业大学、军事医学科学院等高校及科研院所。

隶属于教育部的依托单位申请量:2018 年占比 31.82%,2019 年占比 30.23%,2020 年占比 32.14%;隶属于核工业集团公司的依托单位申请量:2018 年占比 40.91%,2019 年占比 11.63%,2020 年占比 17.86%;隶属于中国科学院的依托单位申请量:2018 年占比 0%,2019 年占比 11.63%,2020 年占比 17.86%;隶属于各省(自治区、直辖市)的依托单位申请量:2018 年占比 22.73%,2019 年占比 23.26%,2020 年占比 25.00%;隶属于工业和信息化部的依托单位申请量:2018 年占比 0%,2019 年占比 13.95%,2020 年占比 0%;隶属于其他部门的依托单位申请量:2018 年占比 4.55%,2019 年占比 9.30%,2020 年占比 7.14%(表 2)。

1.2 项目资助情况

经评审,2018 年度资助 5 个研究方向共 6 项重点支持项目,占本联合基金资助总项数的 27.27%,资助经费总额 1 608 万元,平均直接费用资助强度 268 万元,资助率 27.27%;2019 年度资助 6 个研究方向共 8 项,占本联合基金重点支持项目资助总项数的 36.36%,资助经费总额 2 142 万元,平均直接费用资助强度 267.75 万元,资助率 18.18%;2020 年度资助 5 个研究方向共 5 项,占本联合基金重点支持项目资助总项数的 22.73%,资助经费总额 1 400 万元,平均直接费用资助强度 280 万元,资助率 17.86%。与 2018 年度相比,2019 年度资助经费总额增幅为 33.21%,但 2020 年度有所下降。2020 年度与 2019 年度资助率基本持平,均低于 2018 年度资助率水平(表 3)。

表 2 核技术创新联合基金化学领域项目按隶属关系申请分布情况

| 年度 | 科目 | 部门 | | | | | |
|------|-------|-------|-------|---------|-------------|---------|------|
| | | 教育部 | 中国科学院 | 核工业集团公司 | 各省(自治区、直辖市) | 工业和信息化部 | 其他 |
| 2018 | 项数(项) | 7 | 0 | 9 | 5 | 0 | 1 |
| | 比例(%) | 31.82 | 0 | 40.91 | 22.73 | 0 | 4.55 |
| 2019 | 项数(项) | 13 | 5 | 5 | 10 | 6 | 4 |
| | 比例(%) | 30.23 | 11.63 | 11.63 | 23.26 | 13.95 | 9.30 |
| 2020 | 项数(项) | 9 | 5 | 5 | 7 | 0 | 2 |
| | 比例(%) | 32.14 | 17.86 | 17.86 | 25.00 | 0 | 7.14 |

表 3 核技术创新联合基金化学领域项目资助情况

| 年度 | 资助项目数 (项) | 直接费用 (万元) | 资助强度 (万元) | 资助率 |
|------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 2018 | 6 | 1 608 | 268.00 | 27.27% |
| 2019 | 8 | 2 142 | 267.75 | 18.18% |
| 2020 | 5 | 1 400 | 280.00 | 17.86% |

2 核技术创新联合基金化学领域资助成果

2.1 助力解决核燃料后处理工程难题

苏州大学周如鸿团队(项目批准号:U1967217)针对碱性核废液中⁹⁹TcO₄⁻去除难题,设计了具有快速交换动力学的二维阳离子金属有机骨架材料,实现了真实碱性核废液中⁹⁹TcO₄⁻的高效去除。利用分子动力学模拟研究了吸附过程动力学过程及进行能量分析,以及离子交换过程中自由能剖面的构建,在原子、分子层面揭示了该材料如何解决碱性核废液中⁹⁹TcO₄⁻的去除(图1)。该工作是首次报道的阳离子金属有机框架应用于治理真实放射性废液体系,显示了该类材料在放射性阴离子污染去除方面潜在的应用前景,也为理性设计更高效的⁹⁹TcO₄⁻捕获剂提供了理论基础^[2]。

中科院高能物理研究所石伟群团队(项目批准号:U2067212)设计了能在酸性条件下稳定存在的共价金属有机骨架材料,该材料具备高的酸稳定性和辐射稳定性,在强酸性条件下能够对铀和钚保持高的吸附效率和吸附选择性(图2),为解决乏燃料后处理固相分离技术中的瓶颈问题提供了有价值的参考^[3]。

清华大学徐超团队(项目批准号:U2067213)提出基于软硬酸碱、苯环效应、预组织效应等理论的新型非对称型软硬结合配体设计合成新策略,发展的

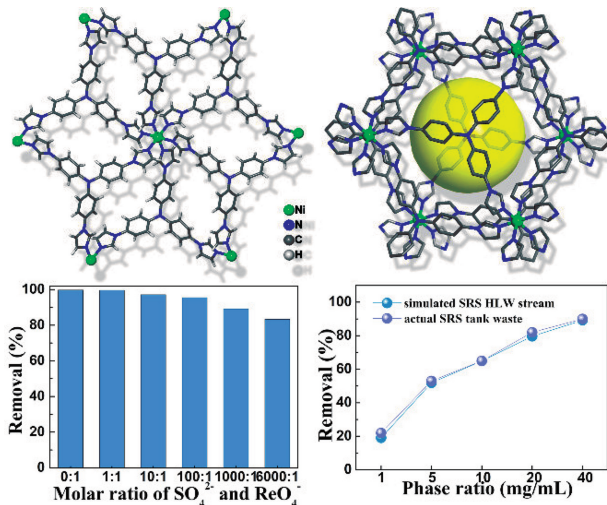


图 1 碱性核废液中⁹⁹TcO₄⁻的去除

二苯基氧磷基团配体在很宽的酸度范围内(0.5—4 M)对三价次锕系镧和镧系离子均表现出了极强的萃取能力(分配比>100)(图3),有望用于后处理中f-元素的共萃取提取^[4, 5]。

广西大学韦悦周团队(项目批准号:U1967218)开发了多种高效含N软配体,制备了多孔SiO₂担载的高效吸附材料,可极大减少后处理分离过程中二次废物的产生量,特别适用于放射性废水处理(图4)。实现了镧钪的高效分离及从高酸度复杂模拟高放中一步直接分离次锕系 Am-241^[6-13]。相关研究成果得到了行业同仁的关注,国际后处理领域著名专家 Andreas Geist 将其作为固相吸附成果的代表进行点评和引用^[14]。

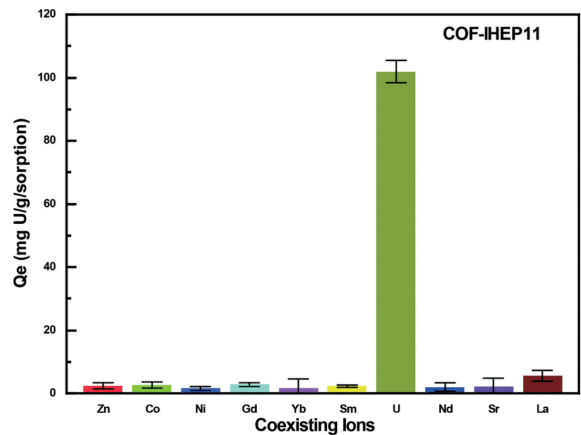


图 2 强酸性条件下对 U(VI) 的选择性吸附

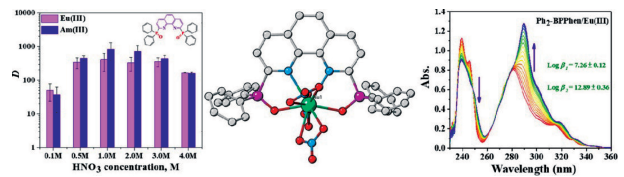


图 3 二苯基氧磷基团配体对三价 Am 和镧系的萃取与络合研究

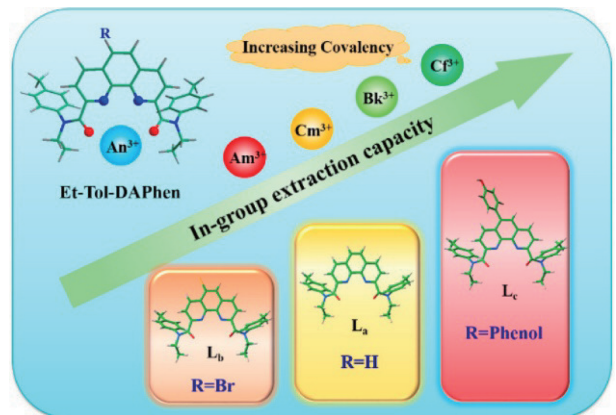


图 4 含 N 配体用于镧钪的高效分离

中国原子能科学研究院唐洪彬团队(项目批准号:U1867203)研制了高放废液蒸发浓缩模拟反应设备,具备搅拌、加热、压力温度监测及调节、泄压、冷凝液及气体收集等功能,为乏燃料后处理示范厂的红油事故设计基准及安全运行限制提供数据及理论支持^[15]。

2.2 推动核技术应用领域的基础研究

苏州大学华道本团队(项目批准号:U1867206)针对高盐度放射性废水中低浓度放射性核素的去除难题,制备了具有选择性的双离子印迹介孔二氧化硅吸附剂,能够快速、高选择性分离废液中铀酰离子和铯离子,同时材料兼具耐盐特性和再生能力(图5)。该方法将离子印迹技术与多种作用机制相结合,可以同时两种核素离子从高盐低放溶液中选择性分离出来,从时间和空间上为放射性废液处理工艺设计提供了新思路^[16-18]。另外,项目组开发了基于电化学发光的痕量铀酰实时精确监控新技术,设计了新型便携式电化学发光检测器与样机,实现了环境水体铀酰离子的快速检测,为高盐低放废水中痕量铀的化学形态及含量实时精确分析提供了新的思路和技术^[19, 20]。

吉林大学闫文付团队(项目批准号:U1967215)设计了一种新型的层状阳离子骨架羟基氧化铝JU-111,该材料在 pH=1~11 的水体里能稳定存在,在吸附速度和吸附容量上均优于传统的阴离子交换树脂、水滑石和绝大多数阳离子金属有机框架(图6),能够实现水体中多种含氧酸根阴离子污染物的脱除,被认为是“重金属含氧阴离子吸附剂的新标杆”^[21]。同时,研发了工程规模放射性惰性气体活性炭滞留装置,为我国后处理气体处理提供了有力的技术保障,在项目执行期内获得了山西省科技进步奖一等奖、中国辐射防护学会科学技术奖一等

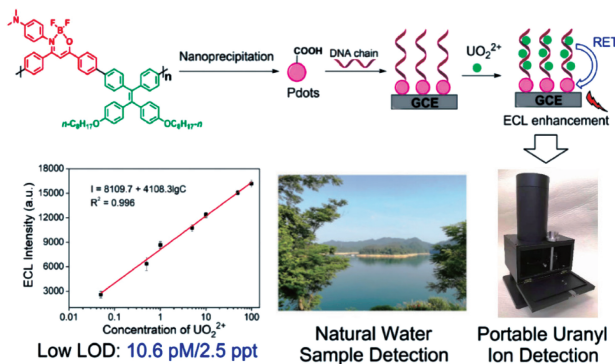


图5 基于电化学发光技术的便携式检测器用于痕量铀酰的实时精确监控

奖等重要奖项。

北京师范大学崔孟超团队(项目批准号:U1967221)开展了用于AD早期诊断的¹⁸F标记氟硼二吡咯和吩嗪类Tau蛋白显像剂研究,发展了六个含有共轭七元环的BODIPY类化合物的化学合成与生物评价,大多数化合物表现出良好的光学性质、对合成的Tau聚集体和脑内神经纤维缠结的高亲和性和特异性(图7),这些探针有望成为靶向Tau的近红外荧光探针^[22-26]。

2.3 回答公众关心的核辐射安全问题

苏州大学曹建平团队(项目批准号:U1967220)依托苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室,与核工业总医院(苏州大学附属第二医院)联合成立了放射医学与辐射防护国家重点实验室临床中心。中心面向放射损伤病人,开展治疗救治工作,为我国核事故应急、公众核安全提供了必要基础。利用代谢组学和脂质组学技术,开展从实验动物到临

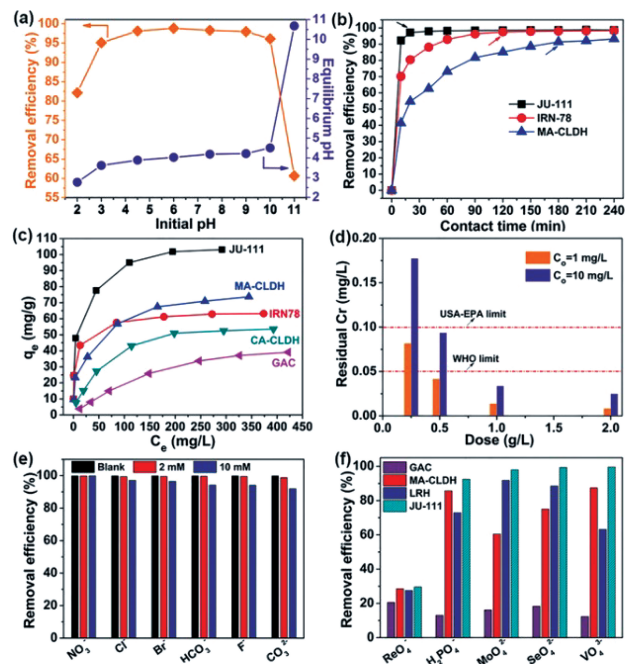


图6 层状阳离子骨架羟基氧化铝JU-111实现水体中多种含氧酸根阴离子污染物的脱除

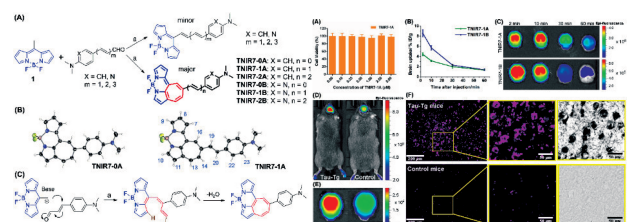


图7 用于AD早期诊断的¹⁸F标记氟硼二吡咯和吩嗪类Tau蛋白显像剂研究

床放疗病人,通过全身照射(TBI)和局部照射(PBI)两种模式下血浆(或尿液)和重要组织代谢组和脂质组辐射生物标志物响应规律的研究,实现对辐射损伤标志物的快速高灵敏检测。为发展快速、灵敏、准确、高通量的辐射生物剂量检测平台和机体重要组织辐射损伤评估模型提供实验依据和理论指导^[27-29]。

苏州大学涂彧团队(项目批准号:U1867204)研究了核电流出物中放射性核素对敏感水生动物的辐射影响,确定了核电流态流出物中常见的核素(^3H 、 ^{14}C 、 ^{90}Sr 、 ^{60}Co 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I)在斑马鱼不同发育阶段(成鱼、幼鱼和胚胎)的内外照射剂量系数,结合斑马鱼早期发育氚毒性实验,初步探究了氚水对斑马鱼的剂量—效应关系^[30]。该工作补充了斑马鱼吸收分数和剂量系数数据库,填补了非人类物种辐射剂量估算中的空白,对确定模式生物器官剂量系数、外推水环境中非人类物种辐射剂量—效应关系至人体以及评估非人类物种辐射影响有促进和提高的作用。该工作有助于科学评价我国大陆核电站建设中氚排放对水生生物可能产生的影响,为我国核电发展政策提供实验依据。

2.4 加速核医疗研究平台建设

厦门大学张现忠团队(项目批准号:U1967222)在核技术创新联合基金的资助下,完善了厦门大学分子影像中心放射性药物研发平台,形成了常用放射性核素生产能力、放射性药物 GMP 制备条件以及临床前药理学、药效学 and 安全性评价研究平台,为我国建立自主化的放射性药物设计、研发、临床转化提供了重要基础。基于此,项目组还提出了基于生物正交反应的肿瘤预定位靶向与信号放大诊疗一体化放射性药物设计策略,以期解决诊断放射性药物与治疗放射性药物之间存在的药代动力学、药效学属性要求不一致的矛盾和改善治疗放射性药物肿瘤摄取,目前正在加快自主研发一种新型的诊疗一体化放射性药物^[31]。

2.5 促进领军人才培养和青年人才成长

在该联合基金支持下,核技术创新联合基金的承担项目组里共有 10 人次担任核领域重要国际期刊编委或客座编辑;1 人任国际期刊主编;1 人任亚洲核合作论坛放射肿瘤项目中国负责人;1 人在世界知名大学担任客座教授;1 人入选“科技部创新人才推进计划中青年科技创新领军人才”;1 人入选“中组部国家高层次人才特殊支持计划”;1 人获批国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金项目;1

人获批江苏省优秀青年基金项目;培养博士后创新人才计划 1 名,同时获评优秀成果;培养从事核相关研究的研究生共计 70 余人。

3 核技术创新联合基金化学领域资助工作展望

我国核工业虽然起步早,但长期存在基础研究薄弱、研究队伍匮乏、源头创新能力不足、发展速度迟缓等问题。核技术创新联合基金化学领域研究工作与核能强国、国家安全和健康中国密切相关,面向国家核能重大需求、瞄准国际核技术科学前沿,针对核技术行业中亟待突破的关键放射化学科学问题,开展了基础性、前瞻性、创新型研究。该联合基金自 2018 年设立至今,在核技术及其应用、核放射化学、核燃料循环、放射性药物等学科方向持续资助全国范围内的科研人员从事基础研究工作,充分发挥了对该领域基础研究的“导向、稳定、激励”作用,取得了一系列重要研究成果,解决了乏燃料后处理、核技术应用及核辐射安全相关领域中部分亟待突破的关键放射化学问题,培养了核技术领域高端人才,为核燃料循环相关的新材料、新技术开发的基础研究工作提供了重要思路,为推进我国核电事业发展、提高核科技工业的整体水平和国际竞争力做出了重要的贡献。

核技术创新联合基金化学领域将紧密结合国家重大需求,进一步凝练核技术领域学科前沿方向和关键科学问题。在核燃料循环领域,进一步推动分离机理,分离材料等方面的研究,将机器学习大数据分析 with 量化计算、分子动力学模拟结合起来,建立一套行之有效的基于原子、分子水平机理的大数据分析筛选方法,研发高精度理论模拟设计和优化捕获材料的计算方法体系;在核技术应用领域,加强放射性核素尤其是医用核素的制备方法学研究和功能应用探索,加速弥补我国在该领域内的发展短板,同时瞄准下一代新型的放射性核素和药物,深入优化肿瘤诊断和治疗放射性药物的结构设计,完善制备工艺,力争实现原创性放射性药物成果的临床转化;针对公众普遍关心的辐射问题,进一步推动辐射安全评估以及公众关心的关键核素(尤其是氚)的毒理研究,建立标准化的数据库系统。以此为基础,提升指南的前沿性和针对性,进一步加强统筹协调,努力推动基金项目科技创新成果精准对接、惠及更多国家和人民之需,努力造就一批具有世界影响力的顶尖科技人才,集聚一支高水平的科研队伍,促进放射化学学科高质量发展,助力我国早日成为核技术强国。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金 2018 年项目指南. 北京:科学出版社, 2018.
- [2] Shen N, Yang Z, Liu S, et al. $^{99}\text{TcO}_4$ removal from legacy defense nuclear waste by an alkaline-stable 2D cationic metal organic framework. *Nature Communications*, 2020, 11: 5571.
- [3] Yu J, Lan J, Wang S, et al. Robust covalent organic frameworks with tailor-made chelating sites for synergistic capture of U(VI) ions from highly acidic radioactive waste. *Dalton Transactions*, 2021, 50: 3792—3796.
- [4] Xu L, Yang X, Wang ZP, et al. Unfolding the extraction and complexation behaviors of trivalent f-block elements by a tetradentate N, O-hybrid phenanthroline derived phosphine oxide ligand. *Inorganic Chemistry*, 2021, 60(4): 2805—2815.
- [5] Xu L, Hao Y, Yang X, et al. Comparative investigation into the complexation and extraction properties of tetradentate and tridentate phosphine oxide functionalized 1, 10-Phenanthroline ligands toward lanthanides and actinides. *Chemistry—A European Journal*, 2021. doi.org/10.1002/chem.202101224.
- [6] Zhang S, Ning S, Liu H, et al. Highly-efficient separation and recovery of ruthenium from electroplating wastewater by a mesoporous silica-polymer based adsorbent. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 303: 110293.
- [7] Zhang S, Ning S, Liu H, et al. Preparation of ion-exchange resin via in-situ polymerization for highly selective separation and continuous removal of palladium from electroplating wastewater. *Separation and Purification Technology*, 2020, 258: 117670.
- [8] Wei Y, Salih KAM, Rabie K, et al. Development of phosphoryl-functionalized algal-PEI beads for the sorption of Nd(III) and Mo(VI) from aqueous solutions—Application for rare earth recovery from acid leachates. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 412: 127399.
- [9] Wei Y, Rakhatkyz M, Salih KAM, et al. Controlled bi-functionalization of silica microbeads through grafting of amidoxime/methacrylic acid for Sr(II) enhanced sorption. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402: 125220.
- [10] Wang SY, Wang L, Li ZJ, et al. Highly efficient adsorption and immobilization of U(VI) from aqueous solution by alkalized MXene-supported nanoscale zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124949.
- [11] Liu Y, Wang CZ, Wu QY, et al. Theoretical prediction of the potential applications of phenanthroline derivatives in separation of transplutonium elements. *Inorganic Chemistry*, 2020, 59(16): 11469—11480.
- [12] Hamza MF, Salih KAM, Abdel-Rahman AAH, et al. Sulfonic-functionalized algal/PEI beads for scandium, cerium and holmium sorption from aqueous solutions (synthetic and industrial samples). *Chemical Engineering Journal*, 2021, 403: 126399.
- [13] Hamza MF, Lu S, Salih KAM, et al. As(V) sorption from aqueous solutions using quaternized algal/polyethyleneimine composite beads. *Science of The Total Environment*, 2020, 719: 137396.
- [14] Geist A, Panak PJ. Recent progress in trivalent actinide and lanthanide solvent extraction and coordination chemistry with triazinylpyridine N donor ligands. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2021, 39(2): 128—151.
- [15] 周春俐, 王墨, 唐洪彬, 等. 正己烷与正十二烷在硝酸体系中的化学行为. *核化学与放射化学*, 2021, 43: 122—128.
- [16] Zhou L, Xu M, Yin J, et al. Dual Ion-imprinted mesoporous silica for selective adsorption of U(VI) and Cs(I) through multiple interactions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 6322—6330.
- [17] Yang S, Xu M, Yin J, et al. Thermal-responsive on-imprinted magnetic microspheres for selective separation and controllable release of uranium from highly saline radioactive effluents. *Separation and Purification Technology*, 2020, 246: 116917.
- [18] Yin J, Yang S, He W, et al. Biogene-derived aerogels for simultaneously selective adsorption of uranium (VI) and strontium (II) by co-imprinting method. *Separation and Purification Technology*, 2021, 271: 118849.
- [19] Wang Z, Pan J, Li Q, et al. Improved AIE-Active probe with high sensitivity for accurate uranyl ion monitoring in the wild using portable electrochemiluminescence system for environmental applications. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30: 2000220.
- [20] Xu MY, Wang T, Zhou L, et al. Fluorescent conjugated mesoporous polymers with N, N-diethylpropylamine for the efficient capture and real-time detection of volatile iodine. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(4): 1966—1974.
- [21] Bai P, Dong ZY, Wang S, et al. A layered cationic aluminum oxyhydroxide as a highly efficient and selective trap for heavy metal oxyanions. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2020, 59(44): 19539—19544.
- [22] Chen YM, Yuan C, Xie TX, et al. N, O-Benzamide difluoroboron complexes as near-infrared probes for the detection of β -amyloid and tau fibrils. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2020, 56(53): 7269—7272.
- [23] Jia JH, Zhang LF, Song J, et al. Discovery of diphenoxy derivatives with flexible linkers as ligands for β -amyloid plaques. *Molecular Pharmaceutics*, 2020, 17(11): 4089—4100.

- [24] Li YY, Zhou KX, Guo WT, et al. ^{18}F -labeled 2-phenylbenzoheterocycles with chiral dihydroxyl side chains as β -amyloid imaging probes. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2021, 29: 115884.
- [25] Zhang LF, Gong X, Tian C, et al. Near-infrared fluorescent probes with rotatable polyacetylene chains for the detection of amyloid- β plaques. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2021, 125(2): 497—506.
- [26] Zhang X, Wu Y, Zeng Q, et al. Synthesis, preclinical evaluation, and first-in-human PET study of quinoline-containing PSMA tracers with decreased renal excretion. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2021, 64: 4179—4195.
- [27] Cao JP. To minimize radiation therapy toxicity to the skin. *Radiation Medicine and Protection*, 2020, 1: 55.
- [28] Cao JM, Zhong L, Feng Y, et al. Jianping, activated Beta-catenin signaling ameliorates radiation-induced skin injury by suppressing marvel D3 expression. *Radiation Research*, 2020, 195: 173—190.
- [29] Song Q, Pifferi S, Shi L, et al. Textured nanofibrils drive microglial phenotype. *Biomaterials*, 2020, 257: 120177.
- [30] 薛惠元, 张世翔, 刘坤, 等. 斑马鱼计算模型构建与相关剂量系数的计算. *中华放射医学与防护杂志*, 2021, 41(5): 374—379.
- [31] Zhuang HL, Guo ZD, Zhuang RQ, et al. Synthesis of ^{18}F -radiolabeled organophosphine fluorides for thiol-chemoselective peptide conjugation. *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 2020, 63(14): 597—607.

The Funding and Achievements of Joint Fund for Nuclear Technology Innovation in the Field of Chemistry: An Overview

Yun Yang^{1,2} Wang Shuao³ Shi Weiqun⁴ Huang Yan¹ Zhuang Qiankun^{1*}

1. *Department of Chemical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

2. *Shanxi University, Taiyuan 030006*

3. *Soochow University, Suzhou 215123*

4. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049*

Abstract Joint Research Fund of Innovative Nuclear Technology was established by the National Natural Science Foundation of China and China National Nuclear Corporation in 2018, aiming at facilitating the cutting-edge application-oriented fundamental researches and strengthening the innovation capabilities in the area of nuclear technology in China. In this article, we briefly summarize the funding support of this Joint Research Fund (in the area of Chemistry) in past three years (2018—2020), systematically overview the preliminary achievements obtained by the funded teams, and provide a perspective of this fund in the near future.

Keywords Joint Research Fund of Innovative Nuclear Technology; radiochemistry; funding support; achievements; perspective

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: zhuangqk@nsfc.gov.cn