

环境放射化学

——国家核能健康可持续发展的卫士

刘春立¹, 朱 奕¹, 陈宗元², 郭治军², 吴王锁², 都 进^{1,3}

1. 北京分子科学国家研究中心, 放射化学与辐射化学基础学科实验室, 北京大学 化学与分子工程学院, 北京 100871;

2. 兰州大学 核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 西南科技大学 环境友好能源材料国家重点实验室, 材料与化学学院, 四川 绵阳 621010

摘要: 环境放射化学是放射化学与环境化学交叉融合而诞生的一门分支学科, 是从关注环境放射性而逐渐发展起来的一门应用基础学科。人们对环境放射性的关注始于 20 世纪 50 年代, 当时, 世界上主要核大国因研制核武器的需要而开展了大量的核活动, 包括大量的地下和大气核试验, 这些核活动向环境中释放了数量可观的放射性物质。放射性物质进入环境后, 与环境介质发生相互作用, 最终通过呼吸系统以及食物链等途径进入人体, 构成对人群健康的直接或潜在风险。本文简要介绍并讨论了环境放射化学及其在中国的发展、环境放射化学的主要研究内容及重要学术交流平台、当前环境放射化学的研究热点和中国环境放射化学的现状、中国的环境放射化学在核能健康可持续发展中的作用、国际环境放射化学研究的重要进展以及中国环境放射化学面临的问题和主要挑战。

关键词: 环境放射化学; 核能安全可持续发展; 卫士

中图分类号: X131

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2025)04-0434-10

doi: 10.7538/hhx.2025.47.04.0434

Environmental Radiochemistry

——Bodyguard for Healthy & Sustainable Development of Nuclear Energy in China

LIU Chun-li¹, ZHU Yi¹, CHEN Zong-yuan², GUO Zhi-jun², WU Wang-suo², DU Jin^{1,3}

1. Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, Fundamental Science Laboratory on Radiochemistry & Radiation Chemistry, College of Chemistry & Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Environment-Friendly Energy Materials, School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: Environmental radiochemistry is a basic and applicative science, which was born with the combination of radiochemistry and environmental sciences, and she was coming to be a branch of sciences with the human's concerns of the health effects of environmental radioactivity at around 1950th. At that time, the major nuclear weapon production countries conducted a large amount of weapon related experiments and tests, and a considerable amount of radioactive materials were released into the

environment. When these radioactive materials(radionuclides) coming into the environment, they will react with the environmental medium, and finally, through the channels of breath or food chain, coming into the human bodies, resulting in direct or potential health risks. This paper briefly introduces and discusses the concept and the source of environmental radiochemistry, she's development in China, the main research areas in environmental radiochemistry, the important communication platforms with which the research works in environmental radiochemistry are published, presented and discussed, the hot spots of environmental radiochemistry research work and it's up-to-data state in China, the role of environmental radiochemistry in the healthy and sustainable development of nuclear energy in China, the main developments in environmental radiochemistry, and finally, the major challenges for China's environmental radiochemistry.

Key words: environmental radiochemistry; safe & sustainable development of nuclear energy; body-guard

1 环境放射化学及其在中国的发展

环境放射化学(environmental radiochemistry)是放射化学与环境科学交叉融合而诞生的一门分支学科。环境放射化学是从关注环境放射性而逐渐发展起来的一门应用基础学科。人们对环境放射性(environmental radioactivity)的关注始于20世纪50年代,当时,世界上主要核大国因研制核武器的需要而开展了大量的核活动,包括大量的地下核试验和大气核试验。这些核活动向环境中释放了数量可观的放射性物质。放射性物质进入环境后,与环境介质发生相互作用,并伴随环境介质的变化而变化,最终通过呼吸系统以及食物链等途径进入人体,构成对人群健康的直接或潜在风险。最早有关环境放射性的公开报道是Chamberlain等^[1]于1961年发表的《Environmental monitoring after accidental deposition of radioactivity》一文。之后,人们开展了大量的有关环境放射性检测与评价工作。环境放射化学一词最早出现在Lieser^[2]于1972年在《Radiochimica Acta》上发表的论文。在过去的半个多世纪里,作为放射化学的一个重要分支,环境放射化学在世界范围内得到快速发展^[3]-42]。

环境放射化学在中国的发展始于20世纪80年代。首届中国环境放射化学专业委员会成立于1990年,是中国核学会核化学与放射化学分会下设的一个专业委员会。1957年毕业于北京大学放射化学专业、长期从事放射性废物管理、时任中国辐射防护研究院科技委委员的陈式先生任首届主任委员,1962年毕业于北京大学放射化学专业、长期从事核燃料循环化学研究、时任

北京大学原技术物理系教授高宏成先生任副主任委员。1991年10月在山西太原召开了首届全国环境放射化学学术研讨会。来自中国辐射防护研究院、中国原子能科学研究院、西北核技术研究所、北京大学等单位的26位代表参加了研讨会。此后分别在苏州、西安召开了第二届和第三届全国环境放射化学学术研讨会。2000年之后,中国的环境放射化学学术研究及学术研讨步入休眠期。2005年,时任北京大学化学与分子工程学院副教授的刘春立博士接任中国核学会核化学与放射化学分会第七届委员会环境放射化学(核环境化学)专业委员会主任委员,兰州大学吴王锁教授、中国原子能科学研究院张振涛研究员、西北核技术研究所党海军研究员任副主任委员。2009年、2012年和2015年,分别在西安、兰州和成都召开了第四、第五和第六届全国环境放射化学学术研讨会。2017年,根据中国科学技术协会有关规定,中国核学会核化学与放射化学分会常委会决定不再设立专业委员会。2018年8月,在江西南昌召开了第七届全国环境放射化学学术研讨会。2022年11月4日,挂靠北京大学的中国辐射防护学会环境放射化学分会成立,北京大学化学与分子工程学院刘春立教授任首届理事会理事长,四川大学刘宁教授、东华理工大学刘云海教授、中国生态与环境部核与辐射研究中心刘新华研究员、兰州大学郭治军教授、中国辐射防护研究院崔安熙研究员、中国工程物理研究院核物理与化学研究所谭昭怡研究员任副理事长,北京大学城市与环境学院王喜龙教授任秘书长。2023年11月,在湖南衡阳召开了中国辐射

防护学会环境放射化学分会 2023 年学术交流暨第八届环境放射化学学术研讨会,这是中国辐射防护学会环境放射化学分会成立后组织的首次全国学术性学术会议。

2 环境放射化学的主要研究内容

环境放射化学是研究放射性核素(物质)在大气、土壤、岩石、水体、动物、植物等环境介质中的吸附、扩散、迁移、转化、富集、载带以及在这些过程有关的热力学、动力学、氧化还原、结构变化、种态变化等行为规律的一门分支学科,是放射化学与环境科学交叉形成的应用基础学科。环境放射化学的主要研究内容包括环境放射性监测与评价、环境放射性样品的采集与分析、放射性污染区域的处理和治理方法以及技术等。20 世纪 80 年代以来,围绕核设施退役治理及放射性废物处理、处置开展了大量的实验室研究、现场研究和模型及理论研究,旨在为核能发展及核技术应用中的环境安全提供基础科学数据和技术。

2.1 环境放射性监测与评价

环境中普遍存在放射性物质。除地球形成初期由核反应生成、目前仍然存在于地球上的长寿命放射性核素外,环境中还有大量其他天然放射性物质。这些天然放射性物质主要是宇宙射线、宇宙射线与大气层和地球表层中的物质通过核反应生成的各种放射性核素以及三个主要原生放射性核素 ^{235}U 、 ^{238}U 和 ^{232}Th 的放射性衰变子体核素。

20 世纪 40 年代以来,人类的核活动及核事故向环境中释放了大约 10^{20} Bq 的放射性物质^[4]。人类活动释放到环境中的放射性核素以及环境中存在的天然放射性核素在环境中发生迁移、扩散、转移、转化、富集、载带等物化或生化过程^{[3]54-72, [5]},最终以不同的比活度或不同的种态直接或间接地进入人类的生存环境,对相关人群构成直接或潜在的辐射风险。

放射性物质在环境中的存在形式是多种多样的,其在环境中的分布并非是均匀的。评价环境中的放射性物质对相关人群辐射风险的首要任务是了解环境中放射性物质的比活度和分布情况,也就是环境放射性监测与分析。在 20 世纪 50、60 年代,人们开展了大量的环境放射性本底

调查工作^[6-12],以期得到天然放射性本底资料以及天然本底辐射与一些遗传疾病之间的关系;到了 20 世纪 80、90 年代,人们开始关注核爆炸产生的放射性污染问题^[13]。这时,人们不仅关注放射性核素在环境中的比活度和分布问题,同时关注放射性核素在大气、土壤中的运移以及在动物、植物中的富集等问题。也正是在这个时期,环境放射性一词频繁出现在公开发表的文献中。在这一时期,我国开展的有影响的工作是长江水系放射性水平调查^[14]。这是 1984—1985 年完成的一项区域性大规模调查工作,调查对象有水体、泥、鱼体和部分沿岸土壤;涉及的分析测量项目有总 α 、总 β 、U、Th、 ^{226}Ra 、 ^{210}Po 、 ^{40}K 、 ^3H 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 和 ^{239}Pu 等 11 项。在这一时期,国内研究人员还开展过多项环境放射性调查和评价工作^[15-19]。中国科学院地球环境研究所研究员、兰州大学核科学与技术学院教授侯小琳博士等组织开展的“我国环境放射性水平精细图谱建设”,也是一项很重要的环境放射性调查工作^{[3]94}。近年来,公开报道了一些特定场所环境放射性调查与评价方面的工作^[20-21]。这些环境放射性监测与评价工作大部分给出了环境放射性对相关人群的辐射剂量。

尽管已经开展了一些环境放射性监测与评价工作,但这些工作中很少涉及相关放射性核素在环境中的存在形式、扩散和迁移方式、人群摄入的主要方式以及这些关键核素进入人体后的主要存在种态等。日本福岛核事故后,日本环境放射化学工作者围绕核事故释放的主要放射性核素在环境介质中的吸附、扩散、富集、载带等开展了大量的研究工作^[22-27],这给我们很重要的启示:核事故后再开展关键核素在环境中的行为规律研究的投入是巨大的,亡羊补牢的结果与未雨绸缪的效果相差甚远。

根据我国的双碳目标^[28]以及我国核电发展态势,预计到 21 世纪中叶,中国的核电规模将超越美国,成为世界上规模最大的核电大国。核电健康、可持续发展的最关键因素之一是安全,其中环境安全是重要一环,没有安全的发展是很难保持其可持续性的。环境安全的重要指标是核电厂释放到周边环境中的关键放射性核素对相关人群的辐射风险要符合国家规定。这就要求我国的环境放射化学工作者开展关键放射性核素在核电厂周边环境中的扩散、沉降、吸附、迁

移等科研工作以及相应的评价工作。由于不同核电厂周边的环境是不同的,关键放射性核素在相应环境中的行为规律也不尽相同,因此这项工作的开展不是阶段性的,也不是局部性的,而应该是长期的和广泛的。

2.2 放射性核素在环境介质中的吸附、扩散等基本特性研究

环境放射性监测及评价是了解放射性核素在环境中的比活度和分布及其对人群健康影响的基础。人类活动释放到环境中的放射性核素以及环境中业已存在的放射性核素,它们在环境中的存在形式是随着环境条件的变化而变化的。有些核素在环境中的存在形式比较简单,有些核素则比较复杂。人们对放射性核素在环境中的存在形式及其环境行为规律的认识是逐步深入的。

环境放射化学学科建立初期,人们的研究工作主要集中在研究放射性核素在环境介质中的浓度分布及在土壤、岩石等水溶液体系中平衡时的吸附分配系数(K_d)及影响因素。随着研究工作的深入,人们逐渐开始研究放射性核素在水岩体系中形成的配合物的结构和性质,并构建了相应的模型,以便能够较好地理解并预测核素的吸附、扩散等行为随酸度、温度、离子强度等因素的变化。与此同时,随着高水平放射性废物地质处置地下实验室的建立,人们利用地下实验室的自然条件,开展了大量的现场核素扩散和迁移实验,并与实验室研究及模型预测结果进行比较和分析,总结出现场实验与实验室研究结果之间的异同。

放射性核素在环境介质中的吸附分配系数(K_d),是评价放射性核素在环境介质中吸附、扩散和迁移能力的最基础参数。它是指在确定的固液比、酸度、离子强度等条件下,处于平衡状态的水岩体系(水、岩石、土壤等体系)中,放射性核素在固相(以不同状态存在的土壤、岩石等环境介质)中的比活度(Bq/kg)与液相中核素的比活度(Bq/mL)的比值。其含义是在相应的吸附平衡条件下,单位质量固体物质包容放射性核素的量相当于多大体积液相中所含有的放射性核素的量。例如 $K_d=1.0\times 10^3$ mL/kg,意味着每 kg 固相物质包容的放射性核素的量相当于 1.0×10^3 mL 液相中含有的放射性核素的量。 K_d 值越大,说明固相物质的包容能力越强; K_d 值越小,则表明固相物质

的包容能力越弱。由于大部分固体物质表面带负电荷,因此,以阳离子形式存在的核素种态通常具有较大的 K_d 值,而以阴离子形式存在的核素种态通常具有较小的 K_d 值。 K_d 是一个平衡状态下的参量,它将随体系参数和条件的变化而变化,温度、pH、离子强度、胶体种类及浓度、氧浓度等的变化对核素的 K_d 值均可能有影响。由于环境中的固相介质对特定核素存在一个最大吸附容量,体系中若含有大量其它核素或元素的话,在确定的条件下,必然对相应核素的吸附产生影响。因此,常量浓度(大于 10^{-4} mol/L)条件下与低浓度(小于 10^{-6} mol/L)条件下获得的 K_d 值及其变化规律通常是不完全相同的。在环境放射化学领域,经常有人会问:“为什么一定要用放射性核素开展核素吸附实验,用稳定同位素开展实验不行吗?”。要回答这一问题,需要从环境介质的吸附容量谈起。在特定的条件(温度、酸度、离子浓度、离子种类等)下,不同的环境介质对不同核素的吸附容量是有限的,这主要是由介质表面的吸附位点所决定的,吸附位点多,吸附容量大,吸附位点少则吸附容量小。若用浓度比较大的稳定同位素开展吸附实验的话,很大的可能性是一些吸附位点很快就被占满了,甚至出现过饱和吸附现象。这时,若研究者仍然用测量液相中核素浓度变化来表征固相介质的吸附特性的话,其结果很可能是液相核素浓度变化很小,也就是 K_d 值很小。当然,若稳定同位素的浓度也小于 10^{-6} mol/L,毫无疑问也是可行的,但随之而来是测量误差问题。通常来讲,浓度越小,测量误差则越大。

随着研究工作的深入,人们逐渐认识到,核素的存在形式(核素种态)对其吸附性质的影响是不容忽视的。核素的种态指核素在特定条件下的具体存在形式,如 UO_2^{2+} 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 即为铀在某种条件下的2个种态。北京大学核环境化学课题组编写了我国首款具有完全著作权的化学种态分析软件 ChemSpec^[29]。这款软件经不断使用和补充完善,目前可计算不同场景下多个核素的种态及种态分布^[30-35]。

3 当前环境放射化学的研究热点和最新进展

目前环境放射化学的研究热点主要有:锕系及裂变核素与无机、有机配体的配位作用研究,

铜系及裂片核素的氧化还原反应及辐解效应研究,胶体对放射性核素扩散和迁移的影响研究,核素的生物效应研究,核素扩散和迁移模型研究,大尺度现场实验研究和理论计算研究等。

北京大学刘元方先生^[36]于1990年对核素迁移的若干问题作了全面的论述和展望,Wen等^[37]在20世纪90年代中期系统研究了裂片核素¹²⁵I、⁷⁵Se、¹³⁴Cs和^{85,90}Sr在花岗岩中的扩散并得到了相应的扩散系数,Liu等^[38]用改进的扩散池研究了⁹⁹TcO₄⁻和HTO在花岗岩中的扩散,并初步分析了表观扩散系数与物种分子量之间的关系^[39];兰州大学在核素的吸附规律方面开展了大量的工作^[40-50],中国原子能科学研究院在超铀核素的迁移和吸附方面开展了不少研究工作^[51-58];中国工程物理研究院^[59-62]、四川大学^[63-68]等也开展了大量研究工作;核工业北京地质研究院近年来针对甘肃北山花岗岩开展了不少地球化学方面的研究工作^[69-74]。国内其他高等院校和研究院所近年来也在核素的吸附、扩散、迁移、萃取等诸多方面开展了大量工作^[75-80]。目前,中国的环境放射化学工作者在有关放射性核素的吸附、扩散、转移、转化等研究方面均有很好的研究工作,有关工作均有综述报道,这里不再赘述。需要指出的是,在放射性核素在环境介质体系中的氧化、还原、结构变化和种态分布方面,中国科研人员的工作可能是处于世界前沿的。

4 环境放射化学学术交流平台

目前国际上尚没有具有重要影响力的环境放射化学专业期刊。相关的研究成果分散刊登在各类与环境与放射性有关的期刊中,如《Radiochimica Acta》、《Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry》、《Environmental Radioactivity》、《Environmental Science and Technology》、《Science》等。国内相关的出版物包括《核化学与放射化学》、《核技术》、《中国科学:化学》等。铜系及裂片核素在地圈中的化学与迁移行为(Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere)国际系列大会是目前世界范围内最主要的研讨环境放射化学前沿问题的平台。该国际系列会议由德国科学家发起,并于1987年在德国慕尼黑召开了首届大会。此后该系列国际会议分别在美国、西班牙等国家召开。2025年

9月,将在美国召开第19届大会。2011年9月在北京召开了第13届铜系及裂片核素在地圈中的化学与迁移行为大会,这是该国际会议首次在发展中国家举行。这次会议由北京大学、中国原子能科学研究院、中国核学会核化学与放射化学分会、中国辐射防护学会、北京核学会等单位和组织共同承办,国家自然科学基金委员会、北京分子科学国家实验室(筹)、中国工程物理研究院、中国科学院高能物理研究所、兰州大学、四川大学等单位协办。中国及世界各国环境放射化学相关领域的专家、学者260余人参加了此次大会,其中来自中国大陆之外的学者162人。这是一次中国放射化学,尤其是环境放射化学科研人员与世界各国专家、学者、同行充分面对面对交流与探讨环境放射化学前沿问题的盛会。此后,中国环境放射化学相关研究工作均取得显著进步。

5 中国环境放射化学研究在核能安全可持续发展中的作用

中国是世界上的人口大国,中国社会和经济的强劲发展对能源需求提出了更高的要求。核电可能是当前和今后相当长的时间跨度内,唯一的能量密度大、对生态环境影响小的化石能源补充形式。中国大陆的核电规模到21世纪中叶将超越美国而成为世界上核电规模最大者。核电健康可持续发展的重要制约因素之一是安全,包括核电厂的运行安全和环境友好。核电厂在日常运行和事故状态下,毫无疑问会向环境中释放放射性物质。核电厂在日常运行期间向环境中释放的放射性核素的种类和量都是有限的^[81-82]。在事故状况下,核电厂向环境中释放的放射性核素不仅种类多,而且数量大^[22-27]。正确评估核电厂及其他核设施在日常运行和事故状况下释放的放射性核素对周围生态环境和重点人群的辐射影响,不仅需要相应的环境监测数据,更需要了解关键放射性核素在相应环境介质中吸附、扩散、转移、转化、富集、载带等参数和规律。这正是环境放射化学研究者所担负的责任和任务。因此,环境放射化学在我国核能健康可持续发展中的作用类似于重要部门的卫士。环境放射化学相关研究工作为核设施的安全评估、环境污染治理技术的开发提供基础数据,为保护核设施周

围的环境安全和人群辐射安全提供科学保障。

6 环境放射化学研究的重要进展

6.1 国际环境放射化学最新进展

在世界范围内,环境放射化学的主要研究工作已经从研究 K_d 及 pH、Eh、离子强度、核素浓度等对 K_d 的影响这个阶段走向吸附、扩散和配位机理等方面的研究。Zhou 等^[83]研究了铀在黑云母上吸附的表观现象与光谱特性之间的关系,发现铀在黑云母上的吸附现象是离子交换和表面配位共同作用的结果,铀酰离子可以嵌入黑云母的层间空隙中。离子交换过程只在酸性条件下才能发生。Smith 等^[84]研究了在强碱性条件下微生物对⁹⁹Tc^m在砂岩中迁移的影响,发现在强碱性条件下,微生物种群通过将 Tc(VII)还原为 Tc(IV)的方式影响⁹⁹Tc^m在孔隙介质中的迁移。Tran 等^[85]研究了胶体对²³⁸Pu、²³³U 和¹³⁷Cs 在石灰石裂隙中迁移的影响,结果发现:铀在石灰石裂隙中主要以溶解态的形式迁移,蒙脱石胶体并不影响²³³U 在石灰石裂隙中的迁移行为;铯强烈地吸附在石灰石裂隙的表面矿物上,很难在石灰石裂隙中迁移;钡强烈地吸附在石灰石和蒙脱石胶体上,其迁移表现出胶体的迁移特性和溶解态钡的迁移特性。Pérez-Conesa 等^[86]采用分子动力学方法研究了铀酰离子在蒙脱石中的水合作用和扩散行为,结果表明,在黏土中存在三个八面体堆积构成的反应位点,这些位点大部分被铀酰离子占据。由于铀酰离子与这些位点间存在相互作用, $[UO_2(H_2O)_5]^{2+}$ 在黏土中的扩散是跳跃式的。若想观察到铀酰离子的扩散,必然需要让一些铀酰离子先占据部分黏土表面的位点。因此,铀酰离子在黏土中扩散需要跨越一个浓度阈值。

6.2 中国环境放射化学的里程碑事件

中国核学会核化学与放射化学分会环境放射化学专业委员会成立于1990年,这是中国环境放射化学正式诞生的标志性事件。陈式先生和高宏成先生是中国环境放射化学的创始人,中国科学院院士、北京大学教授刘元方先生对中国环境放射化学的发展做出了重要贡献,中国科学院院士、中国科学院高能物理研究所研究员柴之芳先生在中国环境放射化学的发展过程中起到了举足轻重的推动作用。1988—2003年,中国辐射防护研究院与原日本原子力研究所合作开展的

国际合作项目:“低水平放射性废物浅地层处置安全评价方法学研究”及“超铀核素近地表迁移行为及其处置安全评价方法学研究”,在中国和日本均开展了大量的放射性核素迁移实验室研究或现场试验研究^[87-100]。这项工作促进了中国中、低水平放射性废物近地表处置方法和技术的进步和成熟。有关放射性核素的吸附、扩散、迁移以及胶体作用等,国内近期已有数篇综述性文章^[101-104],这里不再赘述。

2011年9月,在北京召开的第13届铀系及裂变核素在地圈中的化学与迁移行为国际大会,让更多的中国同行与世界各国的知名和优秀环境放射化学学者面对面进行学术交流,极大地增强了国内同行的自信,促进了中国环境放射化学的蓬勃发展。2022年11月4日,中国辐射防护学会环境放射化学分会的成立,是我国环境放射化学进入新时代的重要里程碑事件。中国的环境放射化学科研和科普工作,在国家蓬勃发展大趋势的推动下,定能取得适应国家战略需求的新成就,做出环境放射化学工作者的贡献。

7 中国环境放射化学面临的主要挑战

中国环境放射化学已经走过了30多年的发展历程,目前在国际上已经具有一定的影响力。北京大学刘春立教授2009年以来一直担任铀系及裂变核素在地圈中的化学与迁移行为系列国际大会国际学术委员会委员,在即将召开的第19届大会国际学术委员会名单中增补了兰州大学吴王锁教授。中国同行在放射性核素的吸附、扩散、迁移以及放射性污染治理技术等诸多方面的研究已经接近、达到甚至引领国际相关工作^[105-108]。与此同时,我们也深刻地认识到,中国环境放射化学仍然面临着诸多挑战,主要表现在以下方面。

(1) 缺乏必要的放射化学实验室。环境放射化学研究最基本的条件之一是使用开放性丙级或乙级放射化学实验室。目前全国科研院所的开放性丙级或乙级放射化学实验室的数量非常有限。

(2) 人才匮乏。从事环境放射化学研究需要具备一定的放射化学实验基础。目前国内开设放射化学实验课程的学校也非常有限。尽管毕业于其他专业的学生经过系统训练,也可以开展环境放射化学相关研究工作,但他们与在本科阶

段做过放射化学实验的同类人员相比,还是存在差别。

(3) 缺乏创新的研究手段。环境放射性样品的准确分析需要特殊的样品处理和分析技术,受到人员评价和晋升机制的影响,从事核分析技术和方法研究的人员越来越少,新的分析方法和技术也鲜有报道。

(4) 研究手段受限。在过去的一段时间内,国内相关研究所使用的放射性核素大多数是进口的,国内原来可以生产放射性核素的单位基本已停产,尽管近年来有了一些变化,但对具体科研工作影响仍然非常明显。

(5) 缺乏有效的管理体制。近20年来,国家层面的大规模、多模态环境放射化学研究工作尚属空白。国家原子能机构在21世纪初系统性部署过一些核素迁移的研究工作。随着管理人员的更替,相关的科研工作也相应地受到影响。

上述问题的有效解决,将会极大地推动中国环境放射化学学科的蓬勃发展,为我国核能健康可持续发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] Chamberlain A C, Garner R J, Williams D. Environmental monitoring after accidental deposition of radioactivity[J]. *Journal Nuclear Energy Parts A/B Reactor Science and Technology*, 1961, 14(1-4): 155-167.
- [2] Lieser K H. Problems of nuclear chemistry and radiochemistry in field of environmental research and technology[J]. *Radiochim Acta*, 1972, 18(3): 115-120.
- [3] 刘春立,侯小琳,郭治军,等.环境放射化学前沿[M].上海:华东理工大学出版社,2023: 3-42,54-72,94.
- [4] Annie K. Advancing our understanding of Pu transport[C]//Presentation at the International Workshop on Radionuclide Migration and Waste Disposal, Oct. 12-16, 2008, Beijing, China.
- [5] 刘春立.环境放射化学[J].核化学与放射化学,2009,31(增刊 1):45-52.
- [6] Solon L R, Lowder W M, Zila A V, et al. Measurements of external environmental radiation in the United States[J]. *Science*, 1958, 127(3307): 1183-1184.
- [7] Solon L R, Lowder W M, Shambon A, et al. Investigations of natural environmental radiation[J]. *Science*, 1960, 131(3404): 903-906.
- [8] Nezu N, Asano M, Ouchi S. Cerium-144 in food[J]. *Science*, 1962, 135(3498): 102-103.
- [9] Hallden N A, Fisenne I M, Harley J H. Radium-226 in human diet and bone[J]. *Science*, 1963, 140(3573): 1327-1329.
- [10] Eisenbud M, Petrow H G. Radioactivity in the atmospheric effluents of power plants that use fossil fuels[J]. *Science*, 1964, 144(3616): 288-289.
- [11] Gustafson P F, Kastner J, Luetzelschwab J. Environmental radiation: measurements of dose rates[J]. *Science*, 1964, 145(3627): 44-47.
- [12] Machta L. Radioiodine fallout over the Midwest in May[J]. *Science*, 1968, 160(3823): 64-66.
- [13] Turco R P, Toon O B, Ackerman T P, et al. Nuclear winter: global consequences of multiple nuclear explosions[J]. *Science*, 1983, 222(4630): 1283-1292.
- [14] 李振平,王志波,孙维藩.长江水系放射性水平调查及评价[J].中国核科技报告,1988(增刊 2):44-45.
- [15] 尚兵,王作元,高平印,等.甘肃东部地区居民窑洞中的氡浓度调查[J].辐射防护,1995,15(6):461-463,474.
- [16] 李长兴,李钟伟,冯志国,等.大庆地区土壤环境放射性水平的调查[J].环境科学,1997,18(4):72-75.
- [17] 江山.安徽省石煤矿区天然放射性水平调查[J].辐射防护通讯,2000,20(1):24-27.
- [18] 张起虹,刘明,王凤英.田湾核电厂环境辐射本底初步调查[J].辐射防护通讯,2001,21(3):25-30.
- [19] 陈志东,邓飞,刘瑛,等.大亚湾核电站周围陆地环境放射性水平简介[J].辐射防护通讯,2003,23(1):26-30.
- [20] 储莹,全永志,徐伟兰,等.某铀矿作业环境放射性安全评价[J].中国矿业,2014,23(增刊 2):99-102,113.
- [21] 刘洪超,魏成斌.铀矿地质勘探坑道环境放射性测量与评价[J].环境生态学,2020,2(7):61-66.
- [22] Wada T, Nemoto Y, Shimamura S, et al. Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima[J]. *J Environ Radioact*, 2013, 124: 246-254.
- [23] Buesseler K O, Jayne S R, Fisher N S, et al. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2012, 109(16): 5984-5988.
- [24] Ramzaev V, Nikitin A, Sevastyanov A, et al. Shipboard determination of radiocesium in seawater after the Fukushima accident: results from the 2011-2012 Russian expeditions to the Sea of Japan and Western North Pacific Ocean[J]. *J Environ Radioact*, 2014, 135: 13-24.
- [25] Kinoshita N, Sueki K, Sasa K, et al. Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2011, 108(49): 19526-19529.
- [26] Endo S, Kimura S, Takatsuji T, et al. Measurement of soil contamination by radionuclides due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident and associated

- estimated cumulative external dose estimation[J]. *J Environ Radioact*, 2012, 111: 18-27.
- [27] Onda Y, Taniguchi K, Yoshimura K, et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems[J]. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1(12): 644-660.
- [28] Zhao X, Ma X, Chen B, et al. Challenges toward carbon neutrality in China: strategies and countermeasures[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2022, 176: 105959.
- [29] 王祥云,陈涛,刘春立.化学形态分析软件 CHEMSPEC 及其应用[J].*中国科学:化学*,2009,39(11):1551-1562.
- [30] 陈涛,王祥云,田文宇,等.镭在榆次地下水中的溶解度分析[J].*物理化学学报*,2010,26(4):811-816.
- [31] 孙茂,陈涛,田文宇,等.镭在北山五一井水中的溶解度计算分析[J].*核化学与放射化学*,2011,33(2):71-76.
- [32] 朱建波,王祥云,陈涛,等.化学种态分析软件 CHEMSPEC (C++) 及其应用[J].*中国科学:化学*,2012,42(6):856-864.
- [33] 蒋美玲,王祥云,刘春立,等.Am 在两种不同地下水中的种态分布及溶解度分析[J].*核化学与放射化学*,2014, 36(5):263-271.
- [34] 蒋京呈,王晓丽,蒋美玲,等.利用 CHEMSPEC 模拟计算 Np 和 Pu 在北山地下水中的种态分布及其在水合氧化铁上的吸附[J].*中国科学:化学*,2016,46(8):816-822.
- [35] 陈亚雯,周万强,刘正邦,等.利用 CHEMSPEC 软件计算某铀矿浸出液中铀和其他特征元素的种态分布[J].*核化学与放射化学*,2024,46(6):587-593.
- [36] 刘元方.当前核素迁移研究的若干进展[J].*核化学与放射化学*,1990,12(1):1-8.
- [37] Wen R, Gao H, Wang X, et al. Diffusion of fission fragment nuclides in granite[J]. *Ract*, 1997, 76(3): 137-142.
- [38] Liu C L, Wang X Y, Li S S, et al. Diffusion of Tc-99 in granite: a small scale laboratory simulation experiment[J]. *Radiochim Acta*, 2001, 89(10): 639-642.
- [39] 刘春立,王祥云,高宏成,等. $^{99}\text{TcO}_4^-$ HTO 在花岗岩中的扩散研究[J].*核化学与放射化学*,2003,25(4):204-209.
- [40] Tao Z, Wenming D. Additivity rule and its application to the sorption of radionuclides on soils[J]. *Radiochim Acta*, 2003, 91(5): 299-304.
- [41] 王卫宪,王耀芹,张瑞荣,等.真菌曲霉 F77 对水中 Cs^+ 的吸附[J].*核化学与放射化学*,2014,36(6):346-351.
- [42] 马锋,靳强,高鹏元,等.Np(V) 在漳州伊利石上吸附作用的实验及建模研究[J].*原子能科学技术*,2017,51(5):790-797.
- [43] 靳强,杨俊威,高超,等.Cs(I) 在桃花江水底沉积物上的吸附模型[J].*原子能科学技术*,2019,53(10):1788-1796.
- [44] 陈宗元,张瑞,杨兴龙,等.Co(II) 和 Ni(II) 在北山花岗岩上的吸附:表面配位模型及线性自由能关系[J].*物理化学学报*,2013,29(9):2019-2026.
- [45] 李琰,吴王锁.Eu(III) 在针铁矿及磷酸根改性针铁矿上的吸附[J].*原子能科学技术*,2013,47(1):14-20.
- [46] 牛智伟,范桥辉,潘多强,等.U(VI) 在 Na-凹凸棒石黏土上的吸附[J].*核化学与放射化学*,2012,34(5):297-304.
- [47] 范桥辉,牛智伟,许君政,等.放射性核素在氧化物、磷酸盐和黏土矿物表面吸附:热力学和微观结构认识[J].*核化学与放射化学*,2012,34(3):129-141.
- [48] 刘昇平,范桥辉,潘多强,等.离子强度、pH 和 HA 对 Eu(III) 在北山除碳酸盐土壤上吸附的影响[J].*核化学与放射化学*,2012,34(1):46-50.
- [49] Pan D, Zhao X, Wang P, et al. Insights into sorption speciation of uranium on phlogopite: evidence from TRLFS and DFT calculation[J]. *J Hazard Mater*, 2022, 427: 128164.
- [50] Xu Z, Niu Z, Tang Q, et al. Adsorption characteristics of Eu(III) on colloidal bentonite particles in aqueous solution: impact of colloid concentration, pH, foreign ions, and temperature[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2021, 330(3): 765-773.
- [51] 章英杰,范显华,苏锡光,等.Pu 在铁及铁氧化物上的吸附行为研究[J].*核化学与放射化学*,2005,27(4):193-197,224.
- [52] 周舵,龙浩骑,陈曦,等.Am(III) 在地下水中的溶解度[J].*原子能科学技术*,2015,49(5):775-779.
- [53] 张言,宋志鑫,包良进,等. ^{99}Tc 在膨润土中的吸附和迁移行为[J].*核化学与放射化学*,2011,33(2):124-128.
- [54] 许强伟,方升,刘晨,等.模拟高放废物深地质处置条件下 Se 在铁基材料上的氧化还原行为[J].*核化学与放射化学*,2022,44(6):627-634.
- [55] 龙浩骑,周舵,刘晨,等.模拟处置条件下钚在地下水-膨润土体系中的胶体行为研究[J].*原子能科学技术*,2025, 59(2):310-317.
- [56] 邵延江,王波,周舵,等.模拟高放废物地质处置条件下钨在去离子水体系中的胶体行为[J].*原子能科学技术*,2023,57(1):47-56.
- [57] 李遥,李睿豪,周舵,等.核素迁移软件 (MNS) 在核素近场扩散模拟中的应用[J].*核化学与放射化学*,2025,47(2): 175-180.
- [58] Zhou J, Chen Q, Li T, et al. Porous copper-loaded zeolites for high-efficiency capture of iodine from spent fuel reprocessing off-gas[J]. *Inorg Chem*, 2022, 61(20): 7746-7753.
- [59] Li S, Wang X, Huang Z, et al. Sorption and desorption of uranium(VI) on GMZ bentonite: effect of pH, ionic strength, foreign ions and humic substances[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2016, 308(3): 877-886.
- [60] Li S, Wang X, Huang Z, et al. Sorption-desorption hysteresis of uranium(VI) on/from GMZ bentonite[J]. *J*

- Radioanal Nucl Chem*, 2016, 310(2): 671-678.
- [61] 王萍,杜良,苏容波,等.两种有机酸对铀和 ^{241}Am 污染土壤植物修复影响的比较研究[J].安全与环境学报,2016,16(6):287-291.
- [62] 柏云,帅震清,朱晓红,等.铀在固体介质中的扩散行为研究[J].核技术,2011,34(11):842-844.
- [63] Liu Q, Liao J, Liu N, et al. Adsorption and migration of ^{241}Am in aerated zone soil[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2007, 274(3): 593-601.
- [64] Zeng Q, Zhu T, Wen Y, et al. The dynamic behavior and mechanism of uranium(VI) biomineralization in *Enterobacter* sp. X57[J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 134196.
- [65] 刘期凤,廖家莉,张东,等.包气带土壤对 Eu(III) 的吸附[J].核化学与放射化学,2005,27(4):210-215.
- [66] 李兵,朱海军,廖家莉,等.腐殖质与铀和超铀元素相互作用的研究进展[J].化学研究与应用,2007,19(12):1289-1295.
- [67] 杜良,王萍,李士诚,等.极低放废物填埋场防渗层对 ^{60}Co 和 ^{63}Ni 的阻滞性能[J].核技术,2017,40(3):43-49.
- [68] 康厚军,石正坤,张东,等. ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 在水泥固化体中的浸出研究[J].化学研究与应用,2006,18(3):252-256.
- [69] Yu Q J, Zhu Q Z, Chen L, et al. Experimental investigation and semi-analytical simulation of instantaneous and time-dependent damage behaviors of Beishan granite[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2022, 55(4): 2341-2352.
- [70] 田霄,王驹,李亚伟,等.北山花岗岩裂隙围岩蚀变矿物学及地球化学特征[J].世界核地质科学,2023,40(增刊1):497-503.
- [71] 李鹏飞,赵星光,郭政,等.北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7): 1599-1610.
- [72] 赵星光,马利科,苏锐,等.北山深部花岗岩在压缩条件下的破裂演化与强度特性[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3665-3675.
- [73] 王锡勇,李炜强.贯通单裂隙北山花岗岩水-力耦合特性研究[J].世界核地质科学,2024,41(5):988-996.
- [74] 陈伟明,王驹,罗辉,等.高放废物地质处置北山预选区算井子花岗岩体地质特征[J].世界核地质科学,2023,40(增刊1):491-496.
- [75] 李丽,庾先国,李哲,等. ^{239}Pu 在板岩和土壤中的吸附[J].核化学与放射化学,2012,34(1):60-64.
- [76] 岳萍,庾先国,宿吉龙,等. ^{239}Pu 在膨润土中的吸附和迁移实验研究[J].科学技术与工程,2014,14(8):168-171.
- [77] Liu P, Chen T, Zheng J G. Removal of iodate from aqueous solution using diatomite/nano titanium dioxide composite as adsorbent[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2020, 324(3): 1179-1188.
- [78] Yan D, Zuo R, Ding K, et al. Influencing factors of ^{90}Sr adsorption onto granite fracture filling material in a high-level radioactive waste disposal site[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2022, 331(6): 2679-2688.
- [79] 赵帅维,毛亮,白锦绣,等.辐照和热耦合作用对改性钠基膨润土铀吸附影响研究[J].辐射防护,2024,44(6):687-694.
- [80] 鲁国一,欧阳抒好,杨剑,等.岩洞处置库围岩矿物胶体对铀的吸附行为研究[J].核技术,2025,48(5):162-171.
- [81] 黄彦君,沙向东,祝兆文,等.压水堆核电厂流出物监测的关键核素研究[J].核安全,2020,19(5):27-34.
- [82] 张艳霞,李锦,李宏宇,等.核电厂流出物低水平放射性核素排放量统计方法实验研究[J].辐射防护,2015, 35(3):170-175.
- [83] Zhou W, Xian D, Su X, et al. Macroscopic and spectroscopic characterization of U(VI) sorption on biotite[J]. *Chemosphere*, 2020, 255: 126942.
- [84] Smith S L, Boothman C, Williams H A, et al. Microbial impacts on $^{99\text{m}}\text{Tc}$ migration through sandstone under highly alkaline conditions relevant to radioactive waste disposal[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 485-495.
- [85] Tran E, Zavrín M, Kersting A B, et al. Colloid-facilitated transport of ^{238}Pu , ^{233}U and ^{137}Cs through fractured chalk: laboratory experiments, modelling, and implications for nuclear waste disposal[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 757: 143818.
- [86] Pérez-Conesa S, Martínez J M, Sánchez Marcos E. Hydration and diffusion mechanism of uranyl in montmorillonite clay: molecular dynamics using an *ab initio* potential[J]. *J Phys Chem C*, 2017, 121(49): 27437-27444.
- [87] Liu C, Li S, Wang Z, et al. Migration of radionuclides ^{85}Sr , $^{134/137}\text{Cs}$ and ^{60}Co in unsaturated Chinese loess[J]. *Radiochim Acta*, 1997, 76(1-2): 91-96.
- [88] Liu C, Luo S, Zhang Y, et al. Migration of radionuclides ^{85}Sr , ^{137}Cs and ^{60}Co in unsaturated Chinese loess: a laboratory simulation experiment[J]. *Radiochim Acta*, 1999, 84(2): 101-106.
- [89] Liu C, Wang Z, Zhang Y, et al. Migration of radionuclides ^{85}Sr , ^{134}Cs and ^{60}Co in unsaturated Chinese loess: an *in situ* test program[J]. *Ract*, 1999, 85(3-4): 131-136.
- [90] Liu C, Wang X, Li S, et al. Migration of ^{85}Sr in unsaturated Chinese loess: an *in situ* test[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2001, 247(2): 429-434.
- [91] Liu C L, Yang Y, Wang Z M, et al. Influence of humic substances on the migration of ^{237}Np , ^{238}Pu and ^{241}Am in a weak loess aquifer[J]. *Radiochim Acta*, 2001, 89(6): 387-392.

- [92] Liu C L, Wang Z M, Li S S, et al. The migration of radionuclides ^{237}Np , ^{238}Pu and ^{241}Am in a weak loess aquifer: a field column experiment[J]. *Radiochim Acta*, 2001, 89(8): 519-522.
- [93] Liu C L, Li S S, Wang X Y, et al. Migration of ^{99}Tc in unsaturated Chinese loess under artificial rainfall condition: an *in situ* test[J]. *Radiochim Acta*, 2001, 89(10): 643-646.
- [94] Liu C L, Wang X Y, Wang Z M, et al. Migration of ^{99}Tc in a weak loess aquifer: a field column experiment[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2001, 250(3): 587-591.
- [95] Liu C L, Li S S, Wang Z M, et al. Field study of the migration of ^{90}Sr in a weak loess aquifer[J]. *Radiochim Acta*, 2003, 91(6): 357-360.
- [96] Liu C L, Wang X Y, Li S S, et al. Migration of ^{99}Tc in loess aquifer: a laboratory simulation experiment[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2003, 258(2): 411-413.
- [97] Tanaka T, Mukai M, Maeda T, et al. Migration mechanisms of ^{237}Np and ^{241}Am through loess media[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2003, 256(2): 205-211.
- [98] Liu C L, Li S S, Wang Z M, et al. Field study of the migration of Sr, Nd and Ce in a weak loess aquifer[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2004, 260(3): 509-522.
- [99] Liu C L, Wang Z M, Li S S, et al. Field study of the migration of ^{237}Np , ^{238}Pu and ^{241}Am in a weak loess aquifer[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2004, 260(1): 193-197.
- [100] Li S S, Liu C L, Zhao Y J, et al. Field study of the migration of ^{90}Sr and ^{241}Am in unsaturated Chinese loess under artificial rainfall condition[J]. *Radiochim Acta*, 2004, 92(2): 89-94.
- [101] 萧黎黎,王芝芬,花榕,等.放射性核素在地质材料中的迁移研究进展[J].环境科学与技术,2019,42(4):53-60.
- [102] 谢龙龙,李洪辉,赵帅维,等.放射性废物处置中核素迁移研究现状及展望[J].世界核地质科学,2021,38(1):125-133.
- [103] 陈永贵,蔡叶青,叶为民,等.处置库膨润土胶体吸附迁移性及核素共同迁移特性研究进展[J].岩土工程学报,2021,43(12):2149-2158.
- [104] 唐振平,杜聪,李南,等.高放废物地质处置中核素迁移研究进展[J].原子能科学技术,2024,58(8):1704-1715.
- [105] Shi Y, Zhou W, Wang J, et al. Effect of pH on the formation of U(VI) colloidal particles in a natural groundwater[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2021, 328(3): 785-794.
- [106] Li Y, He J, Zhou W, et al. Influence of colloids and colloids' coagulation on selenite sorption[J]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2021, 618: 126462.
- [107] Xian D, Zhou W, Wang J, et al. Multiple investigations of aqueous Eu(III): oxalate complexes: the reduction in coordination number and validation of spectral linear correlation[J]. *Dalton Trans*, 2021, 50(27): 9388-9398.
- [108] Xian D, Zhou W, Pan D, et al. Stability analysis of GMZ bentonite colloids: aggregation mechanism transition and the edge effect in strongly alkaline conditions[J]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2020, 601: 125020.