

黄焜, 郑一泓, 贾大庆. 放射性废水处理新工艺综述[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 33-43.

Huang K, Zheng Y H, Jia D Q. Review of novel processes for radioactive wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 33-43.

放射性废水处理新工艺综述

黄焜¹, 郑一泓², 贾大庆^{2,*}

(1. 厦门大学化学化工学院, 福建厦门 361005; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要 【目的】 本文旨在系统综述放射性水污染的现状, 并深入探讨吸附法、膜分离法、光催化法、电化学法及生物富集法等主流新兴处理方法, 以期开发高效、经济的放射性废水处理技术提供理论参考与实践指导。【方法】 本文通过系统梳理现有研究, 重点分析了多种主流处理技术的原理、材料特性与应用特点; 详细阐述了吸附法中碳基材料、硅基材料、金属氧化物/硫化物和高分子聚合物等吸附剂的性能及其吸附模型, 并评估了纳滤、反渗透、正渗透等膜分离技术的效能与规模化应用潜力; 还探讨了多种技术联用的协同效应与系统优化策略。【结果】 吸附法与膜分离法作为成熟技术, 在核电站等场景已实现广泛应用, 其中新型吸附剂对特定核素展现出大吸附容量, 膜分离技术则具备高效分离与可重复使用的优势。目前, 全球大多数饮用水放射性指标符合安全标准。然而, 现有技术对³H、¹⁴C等稳定同位素及²¹⁰Pb、²²⁶Ra等高生物毒性核素的去除仍存在困难; 吸附法产生的废吸附剂后续处理问题突出; 光催化与生物富集等绿色技术大多仍处于实验室或中试阶段。【结论】 各类技术在处理放射性废水方面均显示出独特价值, 但均面临特定挑战。未来技术发展应聚焦于提升对难处理核素的靶向去除效率、减少二次废物产量, 并推动光催化、生物富集等绿色技术的工程化与规模化应用, 以实现放射性水污染治理的可持续发展。

关键词 放射性废水 放射性核素 吸附法 膜分离法 组合工艺

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0033-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.004

Review of Novel Processes for Radioactive Wastewater Treatment

Huang Kun¹, Zheng Yihong², Jia Daqing^{2,*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract [Objective] This paper aims to systematically review the current status of radioactive water pollution and provides an in-depth discussion of mainstream treatment methods, including adsorption, membrane separation, photocatalysis, electrochemical processes, and bio-enrichment. The goal is to offer theoretical reference and practical guidance for developing efficient and economical radioactive wastewater treatment technologies. [Methods] By systematically analyzing existing research, this paper focuses on the principles, materials, and application characteristics of various mainstream treatment technologies. It elaborates on the performance of adsorbents used in adsorption method—such as carbon-based materials, silica-based materials, metal oxides/sulfides, and polymers—and their adsorption models. The efficiency and potential for large-scale application of membrane separation technologies, including nanofiltration, reverse osmosis, and forward osmosis, are evaluated. Furthermore, the synergistic effects and system optimization strategies of combined technologies are explored. [Results] Adsorption method and membrane separation method, as mature technologies, have been widely applied in scenarios such as nuclear power plants. Novel adsorbents exhibit high adsorption capacities for specific radionuclides, while membrane separation offers advantages such as high separation efficiency and reusability. Currently, the majority of radioactive indices in drinking water worldwide meet safety standards. However, existing technologies still face challenges in removing stable isotopes like ³H and ¹⁴C, as well as highly biotoxic nuclides such as ²¹⁰Pb and ²²⁶Ra. The post-treatment of spent adsorbents from the adsorption method remains a significant issue, and green technologies like photocatalysis and bio-

[收稿日期] 2025-10-14

[作者简介] 黄焜(2004—), 男, 研究方向为放射性废水处理, E-mail: 37420222204341@stu.xmu.edu.cn。

[通信作者] 贾大庆(1991—), 男, 讲师, 研究方向为工业废水深度处理与资源化, E-mail: jiadaqing@ecust.edu.cn。

enrichment are mostly still in the laboratory or pilot stages. [**Conclusion**] While various technologies demonstrate unique value in treating radioactive wastewater, each faces specific challenges. Future technological development should focus on enhancing the targeted removal efficiency of recalcitrant nuclides, reducing secondary waste generation, and promoting the engineering and large-scale application of green technologies such as photocatalysis and bio-enrichment to achieve sustainable development in radioactive water pollution management.

Keywords radioactive wastewater radionuclide adsorption method membrane separation method combined processes

放射性核素在工业、医疗等诸多领域具有重要应用。除了在传统放射学领域,如武器研发、发电与癌症治疗等方面的应用日益成熟外,近年来,其应用已拓展至工业故障诊断与示踪、无损检测及辐射加工等领域^[1-2]。然而,在工业生产及核电站运行过程中,常需要使用大量冷却水,或利用水作为中子慢化剂以调节核反应速率,从而导致放射性废水的大量产生^[3-4]。由于放射性核素衰变过程具有连续性,实际产生的废水中通常含有多种放射性核素及其他非放射性核素,使得后续处理难度较高^[5]。在实现高效去除放射性组分的同时,还需兼顾水资源回用与净化能耗的降低,这对放射性废水处理技术提出了更高的要求。常见的放射性同位素包括¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、²³⁵U、¹³¹I、⁵⁷Co、³H、¹⁴C等。而被称为“工业味精”的稀土元素,其天然矿石也常与放射性核素共生。例如,从氟碳铈矿、磷铈镧矿中提取Ce、La,或自硅铍钇矿中提取Nd、Y时,矿石中常伴生以Th为代表的多类放射性核素。因此,在后续稀土提炼过程中同样会产生放射性废水^[6]。

随着国家“双碳”目标的日益推进,对清洁能源的需求逐渐上涨。核电站作为一种可控的清洁能源逐步在各国家或地区得到推广^[7-8]。而随之而来的核废水成为新的水污染来源。如图1所示,近10年来(2015年—2024年),关于放射性废水处理的研究逐渐成为热点,相关主题文章的发表数量由2015年的119篇逐渐增加到2024年的371篇。近年来,放射性废水的处理技术也得到进一步发展,而与之相关的综述文献较少。此外,自2023年福岛第一核电站开始排放处理过的核废水后,尽管排放的核废水经过了国际原子能机构(IAEA)的审查认定,但处理核废水的方法仍存在一定程度的不足。同时,福岛第一核电站用于处理核废水的耗材同样将成为核废料,也仍需后续无害化处理。这些问题引起了研究人员^[9-10]对于选择何种办法来处理现有含放射性核素废水的讨论与争议,亟需一份全面比较各种处

理方法在动力学、热力学、能耗及成本等方面的表现并力求在高效性与可行性之间实现平衡的综述。因此,本文重点综述近年来新报道的多种放射性废水处理技术,为后续开发更可行、更高效的方法提供理论基础。

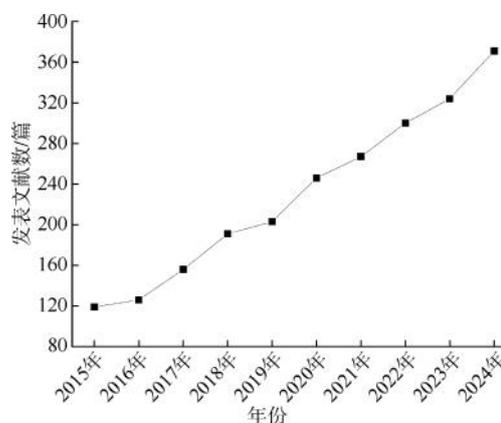


图1 2015年—2024年“Web of Science”数据库上检索“Radioactive Water Treatment”为主题词文献发表量

Fig. 1 Number of Publications Searched in “Web of Science” Database from 2015 to 2024 Using Keywords “Radioactive Water Treatment”

1 放射性水污染现状

多项研究通过对我国水体放射性的调查,揭示了其地理分布特征、健康风险以及人为排放的影响。Sang等^[11]分析了来自我国24个主要城市的水厂,依地域分为7个地区:东北地区、西北地区、华北地区、华中地区、华东地区、华南地区和西南地区,分析了669个样本。依照《生活饮用水标准检验方法第13部分:放射性指标》(GB/T 5750.13—2023)发现,华北地区与华中地区平均总 α 放射性活度和平均总 β 放射性活度比我国其他地区要高,这可能与当地大规模采矿活动所导致的放射性矿石污染有关。其中,所有的水源总 α 放射性活度浓度均符合参考标准要求(≤ 0.5 Bq/L),但有一处水源总 β 放射性活度浓度达到1.26 Bq/L,高于1.0 Bq/L的要求。此外,若不仅考虑放射性活度,而同时考虑其对

人体辐射影响大小和承诺有效剂量,则全国范围内因饮用水摄入导致的承诺有效剂量为 $8.15 \times 10^{-3} \sim 3.81 \times 10^{-2}$ mSv/a, 平均值为 1.41×10^{-2} mSv/a。世界卫生组织(WHO)允许的参考剂量为 0.1 mSv/a, 说明目前我国直接饮用水而导致的放射性健康危险基本不显著。然而,目前部分核废料的处理方法仍采用暂存的临时处理方法,开发出有效的处理办法仍具有紧迫性。不同核素对人体的危害有差异。高飞等^[12]介绍不同核素对人体的毒性,²¹⁰Po 和²²⁶Ra 毒性都极大,⁹⁰Sr 由于参与人体钙循环对骨组织有长期且较大毒性,¹³¹I 和¹³⁷Cs 分别会在甲状腺和肌肉中富集进而危害人体健康。目前,自然界的大多数水源均符合健康标准,且存在的放射性大部分来自天然放射源。但不容忽视的是核电站和采矿业等行业核废水的排放量也在逐年增加,进一步对自然生态和人体健康产生潜在的危害。如图 2^[13]所示,Smith 等^[13]通过计算太平洋海水的放射性来源,进一步揭示了人为活动对自然水体放射性的影响。

不同行业在生产过程中产生的放射性废水在水

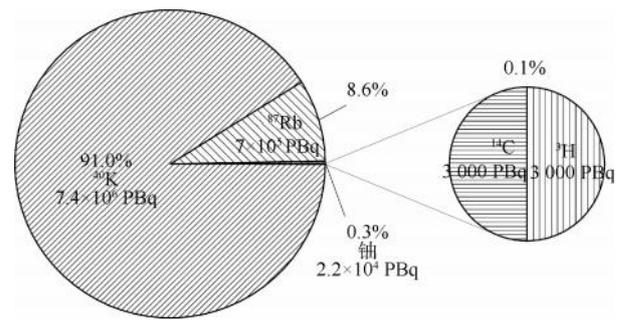


图 2 不同核素对太平洋总核素放射性的贡献^[13]

Fig. 2 Contribution of Isotopes to Total Nuclides in the Pacific Ocean^[13]

质特征上存在显著差异,这对处理技术的选择提出了特定要求。表 1 总结了几个主要产污行业的典型放射性废水特征。核电站废水的处理需重点关注³H 和化学添加剂;核燃料后处理废水代表对处理技术极限的挑战;而稀土冶炼废水则突出在复杂化学背景下进行放射性污染控制的难度。理解这些行业特异性,是开发和选择高效、经济、可行的放射性废水处理技术的前提。

表 1 不同行业放射性废水特征与治理挑战

Tab. 1 Characteristics and Challenges of Radioactive Wastewater Treatment in Different Industries

来源	典型核素	水质与工艺特征	主要治理挑战
核电站	³ H、 ¹³⁷ Cs、 ¹³⁴ Cs、 ⁶⁰ Co、 ⁵⁸ Co	水量大,常含有硼酸(中子慢化剂)、可溶性硅,活度浓度范围宽	³ H 的深度去除难度大;硼和硅的分离影响系统效率;废物体积庞大
核燃料后处理	多种裂变产物(如 ¹³⁷ Cs、 ⁹⁰ Sr)、超铀元素(如 Pu、Am)	成分极其复杂,放射毒性极高,酸度高,热释放率显著	需要极高去污因子和废物减容;技术复杂,成本高昂
稀土冶炼	²³² Th、 ²³⁸ U 等天然放射性核素	化学背景复杂,酸度高,含有大量非放射性重金属及化学试剂	放射性核素与化学污染物的协同处理;强酸性环境要求材料稳定性高
医疗机构	¹³¹ I、 ¹²⁵ I、 ^{99m} Tc、 ³² P 等	核素种类多,半衰期短,单个源项活度可能不高,可能含有有机溶剂	核素种类繁多,需要灵活的处理方案;有机物的存在干扰处理过程
油气开采	²²⁶ Ra、 ²²⁸ Ra	产生大量富含天然放射性物质的污泥,总活度可能很高	废物体积大,处理处置成本高;需要经济高效的富集与固化技术

2 放射性废水处理技术

2.1 吸附法

吸附法是一种常用的去除放射性核素的办法,该方法利用如高分子化合物、天然硅酸盐等材料,制备出多孔蓬松的吸附剂,其原理依赖于吸附剂的大比表面积和丰富官能团,通过离子交换、表面络合、静电吸引等物理化学作用,选择性富集并固定水中的放射性核素。吸附法可选取的材料种类繁多,其中不乏成本低或在自然界储量丰富的原料。原料可直接使用或经过改性后使用,且部分吸附剂可以通过后续处理,去除吸附的放射性核素实现吸附剂的环保再生。近

年来的研究对吸附法的反应热力学与反应动力学研究已较为深入,常见的反应热力学拟合等温线包括 Langmuir 等温线、Freundlich 等温线和 Dubinin-Radushkevich 等温线等,常见的反应类型为准一级反应或准二级反应^[14]。根据吸附剂材料本身化学性质(如等电点等),通过对吸附机理的探讨,可以较好地解释其在特定 pH 下展现出良好的性能的原因。表 2^[15-25]为多种新型放射性核素吸附剂及其性能比较。新型吸附剂可大致分为共价有机骨架材料(COF)、碳基材料、硅基材料、金属氧化物材料和高分子聚合物材料。下面将对多种新型吸附剂的性能进行综述。

表 2 新型放射性核素吸附剂及其性能比较^[15-25]

Tab. 2 Parameters of Several New Types of Adsorbents for Radionuclides Removal^[15-25]

吸附剂	最大吸附量	吸附等温线	反应动力学	适宜 pH 值	参考文献
纳米银负载活性炭纤维	372 mg/g	Langmuir	—	2	[15]
银掺杂磁铁矿-二氧化硅	0.82 mmol/g	Langmuir	准二级反应	9.5	[16]
Cu ₂ O/Cu 改性石墨烯	10.99 mg/g	Langmuir	准二级反应	—	[17]
钛-亚铁氰化物/壳聚糖/三聚氰胺	48.82 mg/g	Langmuir	准二级反应	3~11	[18]
使用过的生物活性炭	30.98 mg/g	Langmuir	—	4~11	[19]
新型金属硫化物	88.9 mg/g	Langmuir	准二级反应	3~11	[20]
天然火山浮石	—	Freundlich	准二级反应	7	[21]
磷酸酯功能化 COF	203 mg/g	Langmuir	准二级反应	(高酸度)	[22]
[NH ₄ ⁺][COF-SO ₃ ⁻]	851 mg/g	Langmuir	准二级反应	1~7	[23]
δ-Bi ₂ O ₃ @ 聚醚砜 (PES) 复合珠	170.6 mg/g	Langmuir	准二级反应	3~7	[24]
强碱性阴离子交换纤维 (N-AF)	347.0 mg/g	Langmuir	准二级反应	7.0	[25]

2.1.1 COF

COF 是一类由轻质有机单体通过强共价键连接而形成的新型多孔高分子材料。近年来其发展迅速^[26],其可调的骨架结构与多样的孔道特性,使 COF 在吸附剂领域展现出良好的应用潜力。与金属有机框架(MOF)相比,COF 通常具有更高的结合能和更稳定的结构,即使在强酸等苛刻条件下仍能维持吸附性能^[22]。然而,为充分发挥 COF 在水相环境中的应用价值,对其进行适当改性显得尤为重要。Xiong 等^[23]以对苯二胺和均苯三酚为原料,合成 COF 后经磺化修饰并引入铵离子,制备出 [NH₄⁺][COF-SO₃⁻] 材料,该材料在水相中对铀表现出极高的吸附容量,最高质量分数可达 851 mg/g。即使在 pH 值为 1 的强酸性条件,或铀浓度极低且共存干扰离子较多的复杂水体中,该 COF 仍能有效吸附铀,并展现出优异的选择性。其吸附行为符合准二级动力学模型,吸附等温线可通过 Langmuir 模型良好拟合(相关系数均大于 0.99)。Yu 等^[22]则采用三[(1-苄基-1H-1,2,3-三唑-4-基)甲基]胺(TBTA)为结构单元,通过调控有机磷酸酯反应物浓度,合成了一系列可在高酸浓度(2 mol/L)下稳定存在的 COF 吸附剂,用于去除水体中的锶系元素。该类材料依靠侧链高密度磷酸酯基团有效捕获 U(VI),其吸附等温线与反应动力学行为与 [NH₄⁺][COF-SO₃⁻] 相近,最优吸附容量达 203 mg/g,并具备处理其他锶系元素的潜力。与传统的有机相中 I⁻ 处理方式不同, Ma 等^[27]开发了适用于水相中去除放射性 I⁻ 的

COF 材料,利用 1,10-菲罗啉-2,9-二甲醛(phen)与其他含氮芳香化合物进行缩合反应,所得 phen-TPA 材料表现出优异的吸附性能;对 I₂ 的吸附动力学常数高达 14.64 g/(g·min),符合准二级动力学模型;对 I₃⁻ 的吸附容量为 11.9 g/g,并能在高盐度水环境中去除 99.5% 的 I₂ 和 I₃⁻。研究表明:其优异性能可能源于三苯环相连的高电荷密度氮原子与碘原子之间的电荷转移作用。Zhu 等^[28]以 ReO₄⁻ 模拟 ⁹⁹TcO₄⁻(因两者离子半径和化学性质相近),采用自合成 COF-bis-PC2 材料作为吸附剂,实现了 388 mg/g 的吸附容量,5 min 内对 ReO₄⁻ 的去除率达 94%,10 min 即达到吸附平衡,最终去除率高达 97%。即使在 SO₄²⁻ 浓度千倍于 ReO₄⁻ 或 pH 值为 0 的强酸环境中,其去除率仍可保持在 90% 以上。值得注意的是,该材料在合成过程中使用了含咪唑鎓离子的液体,可能导致其热稳定性略低于其他 COF 材料。

2.1.2 碳基材料

碳基材料,如活性炭、石墨烯等,因其具有稳定的物理化学性质、多样的结构形态、丰富的改性方法以及较大的比表面积等优势,被广泛应用于水处理领域^[29]。Dong 等^[19]直接回收利用净水厂中已使用 5~7 年的生物活性炭(SBAC)用于去除放射性 Sr²⁺,结果显示:在最优条件下该材料对 Sr²⁺ 的去除率可达 85%,在模拟河水环境中仍可去除约 40% 的 Sr²⁺。该方法利用净水厂废弃炭材,成本低廉、操作简便,3 min 内即可达到吸附平衡,平衡解离率低于 6.16%,且在连续 3 次吸附-脱附循环后性能基本无衰减。

Chen 等^[15]采用真空高温还原结合水热法合成了纳米银负载的活性炭纤维(Ag@ACF),显著提升了对放射性 I^- 及非放射性 I^- 的吸附能力。该材料通过单层均匀化学吸附机制,倾向于在水相中形成稳定且难以脱附的碘化银,从而大幅提高了对放射性 I^- 的最大吸附容量。Kitada 等^[30]将活性炭吸附剂应用于福岛第一核电站经普通净水厂处理后的核污染水。研究使用 15~30 mg/L 的粉末活性炭处理经预氯化(氯质量浓度为 0.5~1.0 mg/L)的核废水,实现了约 60%的 I^- 去除率。该研究指出:放射性 ^{137}Cs 在常规水厂的絮凝沉淀过程中已被有效去除,其去除效果可通过监测沉淀后出水的浑浊度进行初步评估。Zhan 等^[31]通过湿法化学合成路线制备了空心多壳层三维石墨烯(GDY-HoMS),增强了碳原子与金属之间的轨道相互作用,并结合蒸发法将多种重金属元素有效固定。该材料还能高效将吸收的光能转化为热能,促使非放射性水相均匀蒸发从而实现分离。处理后水样中 Sr^{2+} 、 Cs^+ 浓度降至初始值的 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ 水平, $U(VI)$ 含量则达到可饮用标准。Tang 等^[17]则通过简便高效的水热法制备了 Cu_2O/Cu 修饰的石墨烯吸附剂($Cu_2O/Cu-ShC$),在 60 min 内可去除约 96%的 I^- 。由于 Cu^+ 与 I^- 之间具有高度亲和性,该方法即使在高浓度干扰离子存在下仍表现出良好的选择性,石墨烯表面对 I^- 的络合作用也共同促进了吸附性能的提升。

2.1.3 硅基材料

二氧化硅及硅酸盐类材料具有结构多样、地球储量丰富、获取容易等特点。许多硅酸盐类材料内部孔隙发达、电荷相互作用强,适合作为吸附容量大、稳定性高且脱附不易的高效吸附剂。郑佳豪等^[32]采用商业化的介孔二氧化硅 MCM-41 作为基体材料,利用其孔径可控的特性,在其表面修饰一层膜状二氧化锰(MnO_2)。当 MCM-41 与 MnO_2 质量比为 1:4 时,该材料对 Sr^{2+} 的最大吸附容量达到 85.46 mg/g,在 5 次循环吸附-脱附后仍能保持 85% 的去除率,吸附行为符合准二级动力学模型这表明其以化学吸附为主,并且对 Na^+ 、 K^+ 等常见阳离子具有较强的抗干扰能力。Jo 等^[16]通过在 333 K 下热处理 12 h,制备出银掺杂的磁铁矿-二氧化硅复合材料(mag@silica-Ag)。该材料具备磁性,便于使用后的分离回收。在实际废水环境中,即使存在高浓

度 Cl^- 和 NO_3^- 等干扰离子,该吸附剂仍能在 45 min 内去除 80% 的放射性 I^- ,表现出优异的抗干扰性能,显示出在工业废水处理中的应用潜力。Muslim 等^[33]选用中东地区常见的天然矿物凹凸棒石作为吸附剂。凹凸棒石是一种具有丰富针状孔隙、结构稳定且形变不易的水合硅酸镁铝盐,在极端条件下可吸水膨胀至其粉末质量的 3 倍。试验表明:该材料可在 2 h 内去除 97% 的 ^{137}Cs ,吸附过程符合准二级动力学模型。天然火山浮石作为另一类广泛存在的硅酸盐矿物,凭借其强吸附能力和稳定的物理性质,也被用于放射性核素的去除。Gatea^[21]的研究表明:将 3 g/L 的火山浮石投加至总 β 初始活度浓度和总 γ 初始活度浓度分别为 29 766 Bq/L 和 4 623 Bq/L 的复杂放射性液体中,以 100 r/min 的转速搅拌 5 min,即可去除 65.77% 的总 β 活度和 61.73% 的总 γ 活度。该方法成本低、操作简便,在常见核废水 pH 值为 5 的条件下,其去除效果与最适 pH 值为 7 时差异不大,因此无需进行 pH 预处理。

2.1.4 金属氧化物材料

金属氧化物因其多样性结构、易于改性以及稳定的物理化学性质,在吸附剂领域展现出良好的应用潜力。其内部较强的相互作用以及可调控的多孔结构,进一步提升了其在放射性核素吸附方面的应用前景。Zhao 等^[24]开发了一种稳定的毫米级铋基聚合物复合珠($\delta-Bi_2O_3@PES$)。该材料通过相转化法制备,将 $\delta-Bi_2O_3$ 粉末与 PES 混合凝固后,经强酸溶解处理得到。与多数因电性作用难以有效吸附阴离子的无机吸附剂不同,该金属氧化物可直接吸附 IO_3^- ,无需预先将其还原为 I^- 。此外,该材料对硝酸根和 SO_4^{2-} 表现出极强的抗干扰能力,对 I^- 和 IO_3^- 的最大吸附容量分别达到 95.4 mg/g 和 170.6 mg/g。该吸附剂颗粒均匀、结构稳定, Bi^{3+} 不易浸出, I^- 的解吸率低于 1.2%。Zia 等^[34]报道了一种银/铁氧化物纳米复合材料(Ag/Fe_3O_4),其对 I^- 的吸附容量高达 847 mg/g,并表现出良好的特异性。该材料具备顺磁性,可通过外加磁场实现快速分离。制备过程中,通过在 Fe_3O_4 纳米颗粒表面修饰(3-氨基丙基)三甲氧基硅烷(APTMS),进一步提升了吸附剂的热稳定性。

2.1.5 高分子聚合物材料

高分子聚合物在吸附剂领域受到广泛关注,这

主要得益于其成熟的工业化大规模生产技术(如苯乙烯和丙烯的聚合)、部分聚合物或前体可从自然界廉价获得(如壳聚糖),以及对其内部结构序列生长的有效控制手段。通过调节反应条件或进行特定修饰,可赋予这类材料良好的吸附性能。Mahmoud等^[35]直接采用商业化壳聚糖作为吸附剂进行研究。在pH值约6.5的条件下,使用0.5g壳聚糖,144h内即可去除94%以上的⁶⁰Co和93%以上的¹³⁷Cs。模拟废水试验表明:对这2种放射性核素的吸附主要依靠壳聚糖分子中的氨基(—NH₂)完成,这为后续通过改性提升壳聚糖的放射性吸附能力提供了明确方向。Liao等^[25]则采用强碱性阴离子交换纤维(N-AF)处理真实医疗机构废水,该纤维通过自由基交联反应将苯乙烯和二乙烯基苯接枝共聚到聚丙烯纤维上,再经氯甲醚氯甲基化和三甲胺氨基化处理制得。试验结果表明:N-AF对I⁻的最大吸附容量达347.0mg/g,能将水样总放射性活度浓度从563.50Bq/L显著降至0.29Bq/L,处理后的废水符合《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466—2005)要求,吸附过程符合准二级动力学模型。N-AF在pH值为7.0时对I⁻的去除效率最高(96.39%),即使在pH值为3.0和pH值为11.0的条件下,对I⁻的去除率仍分别保持在87.64%和83.09%,且表现出较强的抗离子干扰能力。需要注意的是,使用前需用10%氯化钠溶液对N-AF预处理2h,使其中的OH⁻完全转化为Cl⁻形式。Tang等^[18]通过钛掺杂修饰壳聚糖,构建三维骨架结构并整体负载于三聚氰胺海绵上,制备出钛-亚铁氰化物/壳聚糖三聚氰胺海绵复合材料(TFCM)。该材料能在高盐度溶液中选择性吸附Cs⁺,将其质量浓度从20mg/L降至10μg/L,去除率高达99.95%,且在5次吸附-脱附循环后仍保持78.1%的去除效率。

2.1.6 吸附剂的不足与后处理

吸附剂虽在放射性废水处理中大规模应用,但仍存在一定局限性,如难以有效去除³H、¹⁴C等核素,且部分吸附剂失效后易形成泥状残留物,或因其物理化学性质不稳定产生大量需进一步处置的二次废物。以日本福岛核废水处理为例,其核心工艺“先进液体处理系统”主要依赖多种吸附剂(如高分子树脂、铁氰化物、活性炭和钛酸盐)实现净化,而目前这些饱和吸附剂仅能经完整封装后暂存于福岛核电站内^[36]。为缓解废吸附剂带来的核废料问题,

研究者已提出多种后处理方案。Kim等^[37]开发了一种基于草酸的吸附剂后处理工艺,可显著减小废物体积并防止泄漏,造成环境污染。试验表明:0.15mol/L的草酸能有效去除水生云母黏土中90%以上的Cs⁺。然而,草酸处理后的产物多为溶液或泥状,不易直接贮存。为此,研究进一步采用“先加0.025g/mL Ca(OH)₂,再加2mg/mL四苯基硼酸钠(NaTPB)”的两步后处理法:Ca(OH)₂促使草酸及其他放射性核素或重金属沉淀,而NaTPB则与Cs⁺生成沉淀物,从而使溶液中Cs⁺质量浓度降至0.1mg/L以下。该方法大幅减少了放射性废物的体积与后续处置成本。Tokunaga等^[38]则提出了重晶石共沉淀去除放射性IO₃⁻的新策略,有望用于固定先进液体处理系统中已吸附IO₃⁻的有机吸附剂,使其转化为更安全稳定的无机形态。其机制在于IO₃⁻取代重晶石晶格中的SO₄²⁻,同时通过钠离子置换部分钡离子以维持电荷平衡,表观分配系数高于10000L/kg,显示出优异的固定效果。

2.2 膜分离法

膜分离法利用正渗透膜、反渗透(RO)膜、纳滤膜等功能材料,依靠膜两侧的渗透压差、外加压力或膜孔选择性筛分作用,并结合电荷相互作用,实现对放射性核素的高效分离。该方法具备能耗较低、集成度高等优势。近年来,新型膜材料通过精准调控膜孔结构和表面性质,显著提升了其对特定核素的分离效率与抗污染性能。

以纳滤为代表的新型膜技术,兼具商业化成熟度高与通量大的特点,已在放射性水净化领域得到广泛应用。吴梦雅等^[39]采用共沉淀法制备了ZnFe₂O₄纳米颗粒,并将其均匀分散插入商业化的Ti₃C₂T_x载体中,随后通过水相界面制备法使其与铺展的聚砜(PSF)膜充分复合,形成水通量更高、表面负电性更强的ZnFe₂O₄@Ti₃C₂T_x掺杂复合纳滤膜。该膜在处理以高铈酸根(ReO₄⁻)模拟放射性高铈酸根(TeO₄⁻)的废水中,水通量超过25L/(m²·h),对ReO₄⁻的截留率高于73%,对氯化钠亦具有29%的截留率,展现出新型复合膜材料在提升分离性能方面的显著优势。

纳滤膜作为预处理手段已被应用于核电站放射性废水处理。例如,江苏省某核电站的废水中含有高浓度可溶性硅和硼酸,需有效分离以避免影响传

热过程。由于硅酸与硼酸性质相似,其高效分离高度依赖于精细的膜过程调控。福建某公司推出的商业化聚酰胺纳滤膜 NF6,可有效去除放射性硼酸体系中的硅元素,作为核废水处理的预处理单元。该系统采用串联的一级与二级纳滤配置,对可溶性硅的截留率超过 95%,硼酸透过率约 70%^[40],体现了新型纳滤膜在复杂体系中选择性分离的实际工程价值。

在 RO 膜方面,Wang 等^[41]针对传统 RO 膜在放射性核素去除率和水通量方面的局限,通过在膜表面引入冠醚(15-冠-5 与 18-冠-6)并采用界面聚合法,制备了 MPD@15C5-TMC 与 MPD@18C6-TMC 功能化 RO 膜。其纯水通量分别达到 21.6 L/(m²·h·MPa) 和 29.1 L/(m²·h·MPa),冠醚的特殊空腔结构显著增强了聚酰胺膜的分离活性。该膜对 CsCl、SrCl₂ 和 CoCl₂ 的截留率分别为 91.6%、97.5% 和 97.6%,并表现出良好的抗污染性能和运行稳定性,彰显了功能化修饰在提升 RO 膜综合性能方面的前沿进展。

RO 膜作为传统成熟的分离材料,在实际水源处理中也已被广泛应用。Lee 等^[42]采用成套商业化闭环循环式 RO 系统(CCRO)处理韩国京畿道某村庄的地下水。该系统整合了通气装置与 RO 膜组件,其中 RO 膜由聚酰胺材质构成,8 个进水装置采用环氧树脂-玻璃纤维制成,并两两串联运行。系统通过以 1.65 m³/min 的速率通气 2 h,可去除 86% 的放射性氡气(Rn);随后经 RO 处理 30 min 并冲洗 1 min,可进一步去除 98.9% 的铀、85.5% 的硝酸盐氮、82.8% 的氟化物以及超过 80% 的其他离子。根据实际污染特征通过调节通气与膜处理的时间比例,还可进一步优化系统能耗,显示 RO 膜技术在实际应用中的灵活性与集成潜力。

2.3 生物富集法

生物富集法利用微生物、植物或其衍生物,通过生物吸附(细胞表面结合)、生物积累(胞内富集)及生物矿化等过程,将放射性核素固定于生物相中。该方法因其潜在的高特异性和环境友好性,被视为未来放射性废水处理的理想方向之一。然而,如何筛选或改造出能够高效且特异性富集或去除放射性核素的生物体系,仍是当前面临的重要挑战。Hilpmann 等^[43]发现一株铁还原细菌脱亚硫酸菌属 G1-2(*Desulfitobacterium* sp. G1-2),可与海洋科贝特

氏菌 DSM 50416(*Cobetia marina* DSM 50416)细胞构建人工多物种生物聚集体,该体系被首次报道具备生物富集铀的能力。在碳酸氢盐缓冲液中,U(VI)主要以铀酰-碳酸盐复合物形式存在,该细菌能快速去除上清液中的铀;48 h 内可去除约 60% 的初始铀,168 h 后去除率提高至近 90%,而使用灭活细菌的对照组仅去除约 10%。有氧环境下该细菌的去除效果更佳,可能与铀在细胞表面功能基团上的生物吸附机制有关。不过,该体系目前仅适用于铀的富集,尚局限于作为生物预处理手段使用。总体而言,生物法处理放射性废水目前仍主要处于材料与机制探索阶段。

2.4 电化学法

电化学法依托于电迁移、电吸附和界面电化学反应/氧化等原理。在电场作用下,带电离子定向迁移至电极并被捕获或发生价态转变,从而实现放射性核素的选择性分离与浓缩。该方法在处理放射性废水方面具备操作简便、易于实现自动化及规模化应用等优势。其分离效果主要取决于离子的电荷大小与体积差异。Alkhadra 等^[44]报道了一种冲击电渗析(SED)技术,可用于选择性、连续高效地去除锂、钴、铍和硼酸混合溶液中的 Co²⁺ 与 Cs⁺,该体系模拟了轻水反应堆及其他核工艺中常见的放射性废水。由于该方法仅针对带电离子进行处理,系统能耗较低,为 1.76~4.8 kW·h/m³,而对溶液中含最高硼酸几乎不产生能量消耗。研究还表明,该工艺需在水回收率与放射性核素去除率之间进行平衡:当钴去除率为 99.5% 时,水回收率为 43%;而将钴去除率降至 98.3% 时,水回收率可提升至 66%。

2.5 共沉淀法

共沉淀法通过引入沉淀剂,使目标核素通过同晶置换、吸附、包裹或形成新相等多种机制共沉淀析出。共沉淀法不仅能够将化学性质不稳定的放射性吸附剂转化为稳定沉淀物,还可直接用于放射性废水中核素的沉淀分离。层状双氢氧化物(LDHs)作为一类结构可调、性能优异的新型无机沉淀材料,展现出显著优势。Huang 等^[45]开发了一种 Zn/Al 基 LDH,可高效去除 Co²⁺,去除率超过 99.99%,并使其以 Co_{4.8}Zn_{1.2}Al₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O 的结晶形式沉淀析出。该材料的最佳合成配比为 $c(\text{Zn}^{2+}) + c(\text{Al}^{3+}) = 0.5 \text{ mol/L}$,且 $c(\text{Zn}^{2+})/c(\text{Al}^{3+}) = 2$ 。在 pH 值为 10、反应温度为 40 °C、反应时间为 0.5 h 的优

化条件下,能够将 Co^{2+} 质量浓度从初始的 10 mg/L 降至 $1 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$ 以下,展现出优异的深度净化能力。该研究体现了通过精确调控 LDHs 的组成与结构,可实现放射性核素的高效固定与稳定化,显著超越了传统共沉淀方法仅依赖非特异性沉淀的局限性,为放射性废水的精准治理提供了新材料路径。

2.6 光催化法

光催化法利用半导体材料在光激发下产生电子 (e^-)-空穴 (h^+) 对,通过光生载流子驱动的氧化还原反应,改变放射性核素的价态与存在形态,或降解其有机络合剂,从而实现其从水相中的分离与固定。光催化氧化还原反应作为当前催化研究的前沿方向,具备条件可控、环境友好及易于规模化等优势。尽管以光子为驱动力的催化过程尚不能直接实现放射性核素的物理分离,但已有研究将其作为放射性废水预处理的有效手段。Wu 等^[46]利用光催化技术将可溶性 U(VI) 还原为不溶性 U(IV) 沉淀,为后续分离创造有利条件。研究采用由 5,10,15,20-四[4-(2,4-二氨基三嗪)苯基]卟啉(DAT-卟啉)通过分子间氢键自组装形成的多孔氢键有机框架(HOF)材料 UPC-H4a 作为催化剂。该材料具有高结晶度、稳定的孔道结构、良好的化学稳定性及优异的催化性能。试验表明:在 120 min 光照后,该体系对 U(VI) 的去除率可达 98.18%,即使在氧化性竞争离子存在条件下,去除率仍保持在 66.14%,表现出良好的特异性与可重复使用性。催化剂的制备过程较为简便:将 DAT-卟啉溶于体积比为 1:1 的 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)与四氢呋喃(THF)混合溶液中,经前处理即可生长出 UPC-H4a 单晶。Sugita 等^[47]也采用光催化技术对放射性有机碘进行预处理,将其不同形态转化为单一无机形态。研究发现: Pt-TiO_2 催化剂的晶相和溶液 pH 对碘的形态转化具有显著影响。在碱性条件下,不同晶相的 Pt-TiO_2 均能将邻碘苯甲酸(IBA)中的碘转化为 I^- 。具体而言,当使用金红石晶相的 Pt-TiO_2 且 pH 值 ≥ 12 时,IBA、 I^- 和 IO_3^- 的混合物最终均被转化为 IO_3^- ;而在金红石/锐钛矿混相 Pt-TiO_2 催化下,pH 值为 9~10 时,溶液中所有碘形态均被统一转化为 I^- 。上述光催化反应在不同条件下均遵循准一级反应动力学。

2.7 多种复合协同处理放射性废水

在吸附法、膜分离法及沉淀法等常规放射性废

水处理技术之外,研究者还开发了多种复合处理策略,通过将不同机制整合于单一材料或同一处理系统中,实现更高效、多功能的净化效果。Wang 等^[48]通过原位共沉淀法制备了一种磷酸盐功能化磁性钙藻酸盐水凝胶。该材料可去除泥浆水中 83.9% 的铀和 99.8% 的镭,即使在土壤浸出液中也能实现 92.9% 的铀去除率。其作用机制较为复杂,除磁性增强带来的吸附作用(最大吸附容量达 525.11 mg/g)外,还包括 Ca^{2+} 与 U(VI) 之间的离子交换、 Fe(II) 与 U(VI) 之间的氧化还原反应,以及羧基氧和磷酸根氧与 U(VI) 形成的表面络合反应。Miskiewicz 等^[49]将海藻酸与海藻酸钠分别与陶瓷管式膜耦合用于放射性废液处理。在 pH 值为 5~8 的适宜条件下处理 1 h,对 ^{60}Co 、 $^{85}\text{Sr}^{2+}$ 和 $^{137}\text{Cs}^+$ 的去除率分别达到约 85%、98% 和 86%,其中海藻酸钠表现更优。该策略结合了生物吸附与膜超滤工艺,兼具原料易得与多核素同步处理的优势。Zhang 等^[50]开发了一种集正渗透与吸附工艺于一体的除铯系统。该工艺利用正渗透膜两侧的渗透压差驱动,先对低放射性废水进行预浓缩以减小处理体积,降低能耗成本;随后采用纳米结构层状钠钒硅酸盐吸附剂进行深度处理,其对 Sr^{2+} 的吸附容量高达 174.3 mg/g 。系统浓缩倍数可达 1 000 倍,浓缩后 96.8%~99.9% 的可溶性 Sr^{2+} 可在数秒内被吸附去除。该方法具备持续高速去污能力,且耐盐性强,可在 0.5 mol/L 氯化钠溶液中稳定运行。

2.8 不同处理技术的比较与展望

综上所述,如表 3 所示,吸附法与膜分离法作为成熟技术,适用于规模化工程处理。电化学法在选择性分离与废物减量方面独具优势;而生物法与光催化法等绿色技术虽潜力巨大,但大多仍处于实验室研发阶段,其经济性与工程可行性有待进一步验证。技术选择需综合考虑废水特性、处理目标、成本预算与环境影响。

3 结论和展望

(1) 吸附法与膜分离法因其技术成熟度高、处理效能稳定,在实际工程中占据主导地位。吸附剂如碳材料、硅基材料、金属氧化物及高分子聚合物等,对多种核素展现出高吸附容量和可调的吸附机理。膜技术如纳滤、RO 等则凭借其高效的分离性能与可规模化优势,已成为核电站废水处理与回用

表 3 放射性废水处理技术对比
Tab. 3 Comparison of Radioactive Wastewater Treatment Technologies

处理技术	技术成熟度	主要靶向核素	优点	局限性/挑战	估算相对成本	适用场景
吸附法	高	Cs ⁺ 、Sr ²⁺	容量高、可选性强	废吸附剂后续处理难	中	中低放射性浓度废水深度净化
膜分离法	高	多种离子	高效、可集成化	浓液处理、膜污染、能耗较高	中/高	大流量预处理、浓缩
生物富集法	实验室	U(VI)等	环境友好、低成本	速度慢、稳定性差	低	低放射性浓度废水、生态修复
电化学法	中试	Co ²⁺ 、Cs ⁺	选择性好、废物减容	能耗、电极材料成本	中/高	特定核素选择性去除
共沉淀法	中/高	Ra ²⁺ 、Co ²⁺ 、Sr ²⁺	工艺简单、处理量大、成本较低	选择性较低、污泥产量大	低/中	高放射性浓度废水预处理、矿冶废水
光催化法	实验室	U(VI)	绿色、利用太阳能	效率、催化剂回收	未知	预处理

的核心工艺。然而,这些方法仍存在局限性:吸附法在失效后会产生大量放射性废吸附剂,废吸附剂安全处置是巨大挑战;膜分离法则面临膜污染、高浓度浓缩液处理以及高能耗等问题。未来需开发可再生次数更多、稳定性更高的新型吸附剂,如磁性吸附剂,并研发抗污染、低能耗的膜材料,以期减少二次废物的体积并降低整体运行成本。

(2)电化学法、光催化法及生物富集法等新兴技术在实验室研究中展现出良好应用前景。例如,冲击电渗析可实现 Co、Cs 的选择性分离;光催化 HOF 材料可实现铀的高效还原固定;人工构建的多物种生物聚集体可实现铀的定向富集。这些方法更符合绿色环保的理念。然而,由于成本较高、能耗较大或处理周期较长等因素,它们目前仍难以适用于核电厂等场景下大规模、连续性的废水处理需求。未来的研究应致力于通过工艺优化和反应器设计,解决其工程放大过程中的稳定性与经济性问题,推动其从实验室走向示范应用。

(3)针对³H、¹⁴C 等特殊核素的深度去除仍是当前技术体系的薄弱环节。由于它们存在稳定的同位素且化学行为相似,传统吸附、膜分离等方法难以实现有效分离,目前主要依赖环境稀释或蒸发浓缩。未来应探索基于同位素效应的尖端分离技术(如精密精馏、热循环吸附),或开发催化交换、分子筛等新途径,并评估诸如地质封存、高级氧化降解等长远解决方案的可行性。

(4)为了实现放射性核素的闭环管理,放射性固体废弃物的安全处置也是必须解决的核心问题。目前填埋法仍是常用手段,但在潮湿地区存在长期浸出污染地下水的风险。除了改进固化、稳定化技术外,一个前瞻性的研究方向是开发一种经济的

“屏障型”处理剂。这种处理剂可与固体废弃物共同填埋,有效阻滞并吸附可能浸出的放射性核素,从未端阻断污染物向环境的迁移,从而提升填埋场的长久安全性,完善了放射性废水治理体系。

展望未来,放射性废水处理技术的研究将呈现出多元化、集成化与精准化的发展趋势。一方面,需继续深化传统工艺的革新,提升其效能与经济性;另一方面,应大力推动新兴绿色技术的工程转化,并前瞻性布局针对难处理核素的尖端分离技术。最终,通过优化工艺组合、构建从液体净化到固体废物安全处置的全链条技术体系,有望实现放射性水污染治理的绿色、高效与可持续发展,为核能的安全利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] Pant H J, Bhardwaj Y K, Kumar U, et al. Applications of radioisotopes and radiation technology in industry: Current status and prospects[J]. *Current Science*, 2022, 123(3): 377.
- [2] Limoli C L, Vozenin M C. Reinventing radiobiology in the light of FLASH radiotherapy[J]. *Annual Review of Cancer Biology*, 2023, 7: 1–21. DOI: 10.1146/annurev-cancerbio-061421-022217.
- [3] Wang P, Yu S F, Zou H, et al. Levels, sources, variations, and human health risk assessment of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in water and food around Sanmen Nuclear Power Plant (China) from 2011 to 2020[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1136623. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1136623.
- [4] Sharma S, Sharma V, Mittal A, et al. Radioactive elements in wastewater and potable water: Sources, effects, and methods of analysis and removal[J]. *Water Environment Research*, 2024, 96(8): e11106.
- [5] Ma H L, Shen M H, Tong Y, et al. Radioactive wastewater treatment technologies: A review[J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1935.

- [6] 田宇, 许延辉, 郑淇元, 等. 微波氯化分解氟碳铈矿的研究 [J]. 中国稀土学报, 2023, 41(4): 830–838.
Tian Y, Xu Y H, Zheng Q Y, et al. Decomposition process of bastnaesite concentrate by microwave chlorination [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2023, 41(4): 830–838.
- [7] Liu B J, Peng B B, Lu F, et al. Critical review of nuclear power plant carbon emissions [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1147016. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1147016.
- [8] Kim J H, Im J H, Yoo S H. The public perspective on renewable energy versus nuclear power for carbon neutrality in South Korea [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(1): 1356–1367.
- [9] Chen X D, Xu Q. The implementation of the environmental impact assessment in Fukushima contaminated water discharge: An analysis of the international legal framework [J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 11: 1343710. DOI: 10.3389/fmars.2024.1343710.
- [10] Ferreira M F, Turner A, Jha A N. Controlled release of radioactive water from the Fukushima Daiichi nuclear power plant: Should we be concerned? [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(11): 4840–4843.
- [11] Sang C H, An W, Sørensen P B, et al. Gross alpha and beta measurements in drinkable water from seven major geographical regions of China and the associated cancer risks [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111728. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111728.
- [12] 高飞, 杨敏莉, 张峰. 我国食品中放射性污染监测调查情况概述 [J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4877–4884.
Gao F, Yang M L, Zhang F. Research progress on monitoring of food radioactive contamination [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(12): 4877–4884.
- [13] Smith J, Marks N, Irwin T. The risks of radioactive wastewater release [J]. Science, 2023, 382(6666): 31–33.
- [14] Musah M, Azeh Y, Mathew J, et al. Adsorption kinetics and isotherm models: A review [J]. Caliphate Journal of Science and Technology, 2022, 4(1): 20–26.
- [15] Chen X J, Wang L L, Ding C C, et al. Highly efficient removal of radioactive iodine anions by nano silver modified activated carbon fiber [J]. Applied Surface Science, 2024, 643: 158644. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.158644.
- [16] Jo S E, Choi J W, Choi S J. Synthesis of silver-impregnated magnetite mesoporous silica composites for removing iodide in aqueous solution [J]. Toxics, 2021, 9(8): 175.
- [17] Tang H M, Zhang M Z, Ran F Y, et al. Efficient immobilization of iodide from aqueous solution by Cu₂O/Cu modified shungite [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024, 333(1): 545–556.
- [18] Tang X T, Yang F, Zhang W Q, et al. Highly-selective and well-effective removal of cesium ions by segregative titanium-ferrocyanide/chitosan melamine sponge composite [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282 (Pt 6): 137440. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137440.
- [19] Dong L H, Wu C L, Han Y J, et al. Research on the application potential of spent biological activated carbon from BAC process to remove radionuclides Sr²⁺ from water [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2021, 327(3): 1179–1190.
- [20] Guo J N, Wang Z X, Zhang G H, et al. Rapid and effective removal of strontium ions from aqueous solutions by a novel layered metal sulfide NaTS-2 [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2023, 332(6): 2367–2378.
- [21] Gate M A. Pumice adsorption of radionuclides from liquids: Optimization and modeling [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2025, 236(3): 193.
- [22] Yu J P, Lan J H, 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 [J]. Dalton Transactions, 2021, 50(11): 3792–3796.
- [23] Xiong X H, Yu Z W, Gong L L, et al. Ammoniating covalent organic framework (COF) for high-performance and selective extraction of toxic and radioactive uranium ions [J]. Advanced Science, 2019, 6(16): 1900547.
- [24] Zhao Q, Chen G Y, Wang Z R, et al. Efficient removal and immobilization of radioactive iodide and iodate from aqueous solutions by bismuth-based composite beads [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131629. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131629.
- [25] Liao Z H, Pan N, Liu J L, et al. Highly efficient iodide adsorption from medical radioactive wastewater by strong alkaline anion exchange fiber [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(1): 111783.
- [26] Wang H, Yang Y, Yuan X Z, et al. Structure-performance correlation guided applications of covalent organic frameworks [J]. Materials Today, 2022, 53: 106–133. DOI: 10.1016/j.mattod.2022.02.001.
- [27] Ma Y, Pan J J, Rong H Z, et al. Local charge density enhancement strategy in nitrogen-rich covalent organic framework for boosted iodine removal from water [J]. Advanced Science, 2025, 12(30): e00697.
- [28] Zhu L, Li H R, Liu Z F, et al. Post-modification of a robust covalent organic framework for efficient sequestration of ⁹⁹TcO₄⁻/ReO₄⁻ [J]. Chemistry – A European Journal, 2023, 29(60): e202302168.
- [29] Lazarenko N S, Golovakhin V V, Shestakov A A, et al. Recent advances on membranes for water purification based on carbon nanomaterials [J]. Membranes, 2022, 12(10): 915.
- [30] Kitada S, Oikawa T, Watanabe S, et al. Removal of radioactive

- iodine and cesium in water purification [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(13): 3494–3501.
- [31] Zhan S H, Chen X B, Wang L, et al. Hollow multishelled structured graphdiyne realized radioactive water safe-discharging [J]. *Nano Today*, 2022, 47: 101626. DOI: 10.1016/j.nantod.2022.101626.
- [32] 郑佳豪, 江惟, 陈思莉, 等. 复合材料 $\text{MnO}_2/\text{MCM-41}$ 对放射性废水中 Sr^{2+} 的去除 [J]. *工业水处理*, 2024, 44(2): 105–111.
Zheng J H, Jiang W, Chen S L, et al. Removal of Sr^{2+} from radioactive wastewater by the composite $\text{MnO}_2/\text{MCM-41}$ [J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 44(2): 105–111.
- [33] Muslim W A, Al-nasri S A, Albayati T M, et al. Attapulgite as an eco-friendly adsorbent in the treatment of real radioactive wastewater [J]. *Water Practice & Technology*, 2023, 18(9): 2068–2079.
- [34] Zia M R, Raza M A, Park S H, et al. Removal of radioactive iodine using silver/iron oxide composite nanoadsorbents [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(3): 588.
- [35] Mahmoud H, Eskander S, Saleh H. Biosorption capability of chitosan for removal of Cs-137 and/or Co-60 from radioactive waste solution simulates [J]. *Sustainability*, 2024, 16(3): 1104.
- [36] Ripon R I, Begum Z A, Takata H, et al. Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant's radioactive water: A decade of treatment and the road ahead? [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2025, 233: 112683. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.112683.
- [37] Kim S-M, Yoon I-H, Kim I, et al. Hydrothermal desorption of Cs with oxalic acid from hydrobiotite and wastewater treatment by chemical precipitation [J]. *Energies*, 2020, 13(12): 3284.
- [38] Tokunaga K, Takahashi Y, Tanaka K, et al. Effective removal of iodate by coprecipitation with barite: Behavior and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2021, 266: 129104. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129104.
- [39] 吴梦雅, 刘哈翀, 周平, 等. $\text{ZnFe}_2\text{O}_4 @ \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 掺杂复合纳滤膜及其水体中模拟放射性核素 ReO_4^- 去除研究 [J]. *环境科学学报*, 2025, 45(3): 185–194.
Wu M Y, Liu H C, Zhou P, et al. Composite nanofiltration membrane doped $\text{ZnFe}_2\text{O}_4 @ \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ for removal of ReO_4^- simulated radionuclide from water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(3): 185–194.
- [40] 高响, 李锋, 孔亮, 等. 核电站含硼水中溶硅去除工艺的研究 [J]. *核科学与工程*, 2023, 43(1): 118–123.
Gao Y, Li F, Kong L, et al. The removal technology of the soluble silicon in boron-containing water in nuclear power plant [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, 43(1): 118–123.
- [41] Wang Y, Wang J L, Hou L A A. Reverse osmosis membrane with crown ethers decoration for enhanced radionuclides sieving [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 48: 104222. DOI: 10.1016/j.surf.2024.104222.
- [42] Lee Y, Kim S S, Seo I, et al. Study on retrofitting of small-scale water supply facility using aeration and closed-circuit reverse osmosis [J]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 2022, 44(11): 436–443.
- [43] Hilpmann S, Jeschke I, Hübner R, et al. Uranium (VI) reduction by an iron-reducing *Desulfitobacterium* species as single cells and in artificial multispecies bio-aggregates [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 955: 177210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177210.
- [44] Alkhadra M A, Conforti k M, Gao T, et al. Continuous separation of radionuclides from contaminated water by shock electro dialysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(1): 527–536.
- [45] Huang G T, Shao L F, He X H, et al. Treatment of simulated liquid radioactive waste containing cobalt by *in-situ* co-precipitation of Zn/Al layered double hydroxides [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, 319(3): 847–854.
- [46] Wu Peng, Yin Xiaoyu, Zhao Yufan, et al. Porphyrin-based hydrogen-bonded organic framework for visible light driven photocatalytic removal of U(VI) from real low-level radioactive wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132179. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132179.
- [47] Sugita T, Mori M, Kozai N. Photocatalytic unification of iodine species using platinum-loaded titanium dioxide [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2023, 438: 114548. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2023.114548.
- [48] Wang D, Zhang J F, Li J X. Phosphate-functionalized magnetic calcium alginate for the engineering remediation of uranium-contaminated water and soil [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 145910. DOI: 10.1016/j.cej.2023.145910.
- [49] Miskiewicz A, Zakrzewska-Kołodziej G. Application of biosorbents in hybrid ultrafiltration/sorption processes to remove radionuclides from low-level radioactive waste [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 242: 47–55. DOI: 10.1007/s13762-017-1541-6.
- [50] Zhang X Y, Liu Y. Integrated forward osmosis-adsorption process for strontium-containing water treatment: Pre-concentration and solidification [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125518. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125518.