

Opportunities and Challenges of Capacitive Deionization for Uranium Extraction from Seawater

Guoze Yan ¹, Bin Zuo ^{1,*}, Shaoqing Liu ¹, Tao Wang ¹, Ruoyu Wang ¹, Jinyang Bao ¹, Zhongzhou Zhao ¹, Feifei Chu ¹, Zhengtong Li ², Yusuke Yamauchi ^{3,4,5}, Saad Melhi ⁶, Xingtao Xu ^{1,*}

¹ Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang Province, China.

² State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai, University, Nanjing 210098, China.

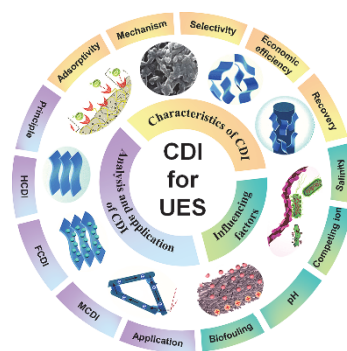
³ Department of Materials Process Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.

⁴ Australian Institute for Bioengineering and Nanotechnology (AIBN), The University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia.

⁵ Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, South Korea.

⁶ Department of Chemistry, College of Science, University of Bisha, Bisha, 61922, Saudi Arabia.

Abstract: Uranium is an indispensable resource for the nuclear industry, while land-based uranium mines are limited in content and unevenly distributed. Therefore, uranium extraction from seawater (UES) holds great potential for sustainable energy production. Capacitive deionization (CDI) technology, known for its low energy consumption, simple process, environmentally friendliness, and high adsorption efficiency, holds significant potential for UES. This paper reviews the development history, principles, classifications, and applications of CDI technology. In the section on development history, we provide a brief overview of the early development of CDI technology, emphasizing key milestones in its application to UES and recent optimization efforts. In the section on principle and categorization, we contextualize CDI technology within UES applications for a comprehensive introduction. Additionally, in the application section, we concentrate on current applications of CDI technology in UES. Furthermore, this paper elaborates on the current research status of CDI for UES and its advantages in terms of adsorptivity, selectivity, and economic benefits. In terms of adsorptivity, CDI technology demonstrates its efficiency in adsorbing uranium ions, achieved through meticulous optimization of electrode structure and material selection. With regard to selectivity, CDI technology selectively extracts uranium while mitigating interference from competing ions through adept modulation of electrode materials and operational parameters, thereby enhancing extraction efficiency. Economically, CDI technology stands out due to its hallmark features of low energy consumption and cost-effectiveness, facilitating high-efficiency uranium extraction and providing substantial economic advantages over alternative methods in the UES domain. Lastly, we discuss the challenge factors (competing ions, salinity, pH, and biofouling) of this technology in the uranium extraction process, aiming to explore the feasibility and economic benefits of UES by using the CDI technology and providing theoretical support for further optimization and promotion of CDI applications in UES. Additionally, we aim to address some of the current challenges of uranium extraction using CDI by incorporating materials informatics and providing an outlook on this matter. This paper provides practical insights into the development and industrial progress of CDI technology in UES, aiming to offer valuable references for the subsequent research on CDI seawater uranium extraction to contribute to the sustainable utilization of seawater resources.



Received: April 2, 2024; Revised: April 30, 2024; Accepted: May 7, 2024.

*Corresponding authors. Emails: zuobin@zjou.edu.cn (B.Z.); xingtao.xu@zjou.edu.cn (X.X.)

The project was supported by the Zhejiang Ocean University Talent Introduction Research Fund (JX6311101423, JX6311103723), the General Project of the Zhejiang Provincial Department of Education (Y202353930), the Fundamental Research Funds for Zhejiang Provincial Universities and Research Institutes (2024J006) and the National Undergraduate Innovation Training Program (202310340024).

浙江海洋大学人才引进研究基金(JX6311101423, JX6311103723), 浙江省教育厅一般项目(Y202353930), 浙江省高校基本科研业务费(2024J006)及国家级大学生创新训练项目(202310340024)

Key Words: Capacitive deionization; Uranium extraction from seawater; Economic benefit; Challenge factors; Materials informatics

电容去离子海水提铀的机遇与挑战

严国泽¹, 左彬^{1,*}, 刘少卿¹, 王桃¹, 王若愚¹, 包锦洋¹, 赵忠舟¹, 储菲菲¹, 李政通², Yusuke Yamauchi^{3,4,5}, Saad Melhi⁶, 徐兴涛^{1,*}

¹ 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022

² 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

³ 名古屋大学工程研究生院材料工艺工程系, 名古屋 464-8601, 日本

⁴ 澳大利亚昆士兰大学生物工程与纳米技术研究所, 昆士兰州布里斯班 4072, 澳大利亚

⁵ 延世大学化学与生物分子工程系, 首尔 03722, 韩国

⁶ 沙特阿拉伯比沙大学理学院化学系, 比沙 61922, 沙特阿拉伯

摘要: 铀是核工业不可或缺的资源, 而陆基铀矿资源含量有限且分布不均。因此, 海水提铀(UES)对可持续能源生产具有巨大潜力。电容去离子(CDI)技术以其低能耗、工艺简单、对环境友好和高吸附效率而闻名, 对UES具有重要潜力。本文回顾了CDI技术的发展历史、原理、分类和应用。在发展历史部分, 我们简要介绍了CDI技术的早期发展, 并强调了其在UES中的关键里程碑以及近期优化工作。在原理和分类部分, 我们将CDI技术置于UES应用的背景下, 进行了全面介绍。另外, 在应用部分, 我们重点介绍了CDI技术在UES中的当前应用。此外, 本文详细阐述了CDI技术在UES中的当前研究现状及其在吸附性、选择性和经济效益方面的优势。在吸附性方面, CDI技术通过精心优化电极结构和材料选择, 展现了其吸附铀离子的效率。在选择性方面, CDI技术通过灵活调控电极材料和操作参数, 有选择性地提取铀, 同时减轻了来自竞争离子的干扰, 从而提高了提取效率。在经济性方面, CDI技术因其低能耗和经济性脱颖而出, 促进了高效的铀提取, 且在UES领域具有与替代方法相比的实质经济优势。最后, 我们讨论了该技术在铀提取过程中的挑战因素(竞争离子、盐度、pH值和生物污损), 旨在探讨使用CDI技术进行UES的可行性和经济效益, 并为进一步优化和推广CDI技术在UES中的应用提供理论支持。此外, 我们还致力于通过引入材料信息学来解决CDI在提铀过程中存在的一些当前挑战, 并展望该问题的未来发展。本文为CDI技术在UES中的发展和工业进展提供了实用的见解, 旨在为后续CDI海水提铀研究提供宝贵的参考, 以促进海水资源的可持续利用。

关键词: 电容去离子; 海水提铀; 经济效益; 挑战因素; 材料信息学

中图分类号: O646

1 引言

核能是一种不可或缺的资源, 大约贡献全球电力发电量的13%。由于其零碳排放和显著的能量密度优势, 核能有潜力缓解全球能源匮乏问题^{1,2}。铀是核能工业的基础资源, 海洋中含有超过45亿吨铀, 约为陆地上发现的铀量的千倍, 从海水中获取铀被认为是满足铀需求潜力最大的战略之一^{3,4}。然而, 海水中溶解铀的浓度很低(约为 $3.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 加上海水包含大量共存离子和海洋生物的复杂成分, 这给从海水中提取铀带来了重大挑战。因此, 迫切需要开发一种能够最小化能耗和能量密度的高效铀回收方法, 以应对全球能源匮乏^{5,6}。

迄今为止, 吸附被广泛认为是最具可行性的方法之一⁷。然而, 由于吸附剂材料显示出的吸附

能力有限以及回收效果不理想, 人们越来越重视开发该领域的新兴技术^{8,9}。近年来, 电容去离子(CDI), 又称电吸附技术, 在海水淡化¹⁰⁻¹²、废水处理¹³⁻¹⁵、重金属离子去除¹⁶⁻¹⁸和工业水软化^{19,20}等水处理领域引起了研究人员的广泛关注。

CDI是一种新兴的水处理技术, 通过利用电位促进离子迁移, 并随后通过双电层从溶液中分离带电离子²¹⁻²³。与传统的反渗透和电渗析技术相比, CDI表现出显著的优势, 如低能耗、工艺简化、环境友好和高吸附效率²⁴⁻²⁶。因此, 它已成为未来实现碳达峰和碳中和的理想候选海水淡化技术。此外, CDI还为海水提铀(UES)提供了一种新方法^{27,28}。

本文对CDI提铀进行了全面概述, 首先对CDI进行了广泛的介绍。随后, 我们重点强调了CDI提

铀在吸附性能、选择性和经济效益方面的优越性。此外，我们深入探讨了CDI提铀所面临的挑战因素，包括海水中的竞争离子、pH条件、盐度和生物污损效应。本研究为CDI技术在UES方向上的发展和工业进程提供了新的见解，以促进其在海洋资源可持续利用中发挥关键作用。

2 CDI的分析与应用

自1960年代起，利用电化学原理在电极表面进行的CDI技术已经成为一种有前景的分离技术，用于从水中提取带电物种^{29,30}。本节提供了CDI技术的全面概述，包括其历史发展、基本原理、分类以及多样化应用。此外，第2.4.4节重点介绍了CDI技术在UES方面的出色应用。

2.1 CDI的历史研究背景

在20世纪60年代，Blair、Murphy及其同事进行了关于脱盐概念的开创性研究，当时称为“水的电化学脱盐”³¹。随后，Johnson等人提出了双电层(EDL)理论，法拉第反应不再被认为是驱动CDI过程的主要因素³²。此后，该技术的研 究经历了停滞期，直到1990年代，研究人员开始关注用于海水淡化的碳材料开发³³。基于碳气凝胶的CDI技术的成功应用展示了该技术巨大的潜力，引起了许多学者的关注，随后碘化石墨纳米材料³⁴、碳纳米材料^{35,36}和有序介孔碳材料^{37,38}相继应用于CDI，推动了CDI技术进入快速发展期。此后，在2000年，CDI技术首次应用于废水中的铀吸附³⁹。此外，由

于海水中铀库存量大以及CDI技术的性能优势，将CDI技术应用于UES的研究日益增多。近年来，由于原有的CDI技术未能满足当前能源开发需求，CDI技术进一步深化改革为三种新兴技术类型：膜式电容去离子(MCDI)⁴⁰、流动式电容去离子(FCDI)⁴¹和混合式电容去离子(HCDI)⁴²。

2.2 CDI的原理

根据电容式充电原理，通过施加极低的电压(通常低于1.2 V)去除带电离子和分子，从而促进吸收过程，因此称为CDI^{43,44}。CDI采用两个相对排列的多孔碳电极，通过施加电势差吸收和储存离子。这两个电极可以大量组合在一起，作为单元电池使用。离子被盐溶液吸入，在两个电极之间移动，并最终沉淀在作为电极的碳物质中⁴⁵⁻⁴⁷(见图1)。此外，EDL的形成成为CDI技术中电容式能量存储奠定了基础，并促进了从海水中选择性提取目标铀离子⁴⁸⁻⁵⁰。与以往的UES技术相比，该技术能够有效地将铀离子从海水中分离出来，同时最大程度地减少能量需求。

2.3 CDI的分类

传统的CDI技术包括吸附(充电)过程和解吸(放电)过程。通过解吸过程，电极上的离子可被完全解吸，从而使电极再生并恢复其吸附能力^{51,52}。然而，传统CDI存在吸附能力低和间歇性运行的问题。因此，研究人员一直致力于改进和创新CDI技术。目前，CDI技术通常可分为三种主要类型：MCDI、FCDI和HCDI。

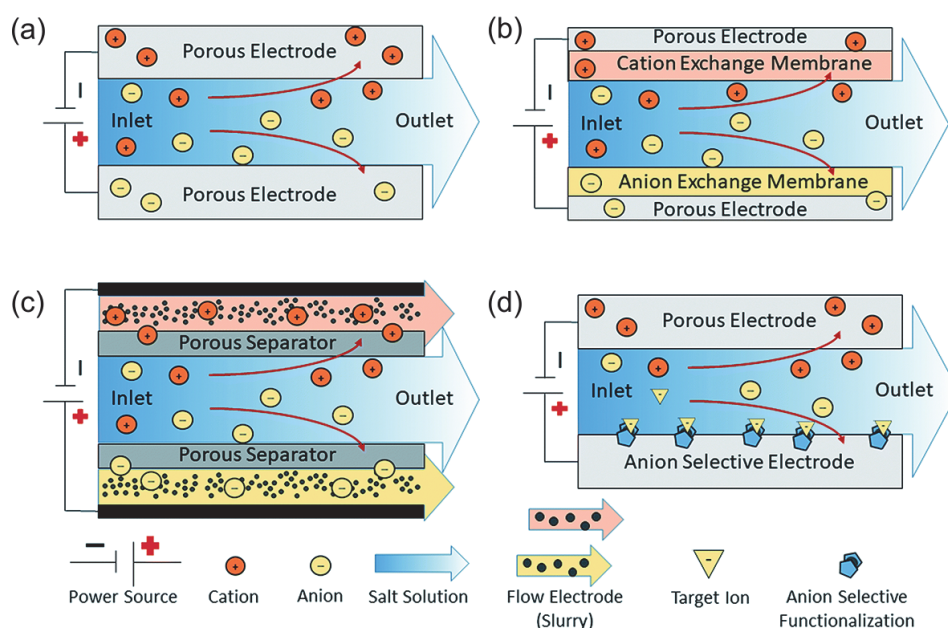


Fig. 1 Schematic diagram of CDI and their electrosorption processes. (a) A CDI cell with two porous electrodes. (b) The schematic of an MCDI cell. (c) The schematic of a FCDI cell. (d) A CDI cell used to selectively remove target ions⁴⁵. Adapted with permission from Ref. 45, Copyright 2020 Royal Society of Chemistry.

MCDI技术在水污染治理和资源提取中应用广泛⁵³⁻⁵⁷。特别是在UES方面, MCDI技术的表现十分出色, 并在环境保护和可持续发展中发挥着重要作用。将MCDI技术应用于铀资源获取可以带来良好的循环经济效益, 同时也兼顾了环保。此外, 由于每个电极均附有离子交换膜, MCDI技术还为从复杂的多离子体系中有效分离铀离子提供了可能^{40,58,59}。

基于固定电极的传统CDI技术通常面临吸附能力有限的问题。相比于传统CDI技术, FCDI可以利用其独特的流动特性来增加吸附能力, 从而实现更高效的传质过程⁶⁰。此外, 通过调整电场强度和流速, FCDI能够高效吸附溶液中的目标物质, 并且在吸附饱和后通过改变电场进行解吸, 以实现目标离子的再利用⁶¹。同时, FCDI能以更小的能耗实现更大的吸附量, 使其在UES中具有重要的应用潜力⁶²⁻⁶⁵。

与传统的CDI技术相比, HCDI具有更高的去离子能力、速率和充电效率, 这得益于加入了比碳电极容量更高的法拉第电极⁶⁶⁻⁶⁹。HCDI技术的应用为UES研究带来了新的前景和机遇。由于其在离子捕获能力和能耗效率方面的显著提升, 未来预计HCDI将继续向前发展, 并通过进一步深化改革为UES提供更可持续的解决方案。

2.4 CDI的应用

相较于反渗透等膜过滤工艺, CDI技术具有低能耗、低运行成本、能够去除多种带电污染物以及高回收率的优势, 具有一定的成本竞争力。随着材料学的发展和越来越多新型多孔材料的问世, 这种海水淡化方法的使用范围和技术水平得到了大幅提升⁷⁰⁻⁷³。本节简要介绍了CDI技术在海水淡化、水资源净化和资源回收方面的应用, 并在第四小节重点讨论了CDI技术在UES中的应用现状。

2.4.1 CDI在海水淡化中的应用

基于界面电化学原理的CDI技术是一种先进的海水淡化方法, 通过多孔电极有效吸附和捕捉盐溶液中的离子⁷⁴⁻⁷⁷。例如, Nguyen Anh Thu Tran等人在水溶液中采用简单的水热法合成了结晶MOF结构的NiCu-FA⁷⁸。这种新的NiCu-FA具有高达 $10.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的吸附量, 显著高于活性炭(AC)的 $5.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 并且具有出色的循环稳定性。

2.4.2 CDI在水资源净化中的应用

CDI可以有效去除多种污染物, 包括重金属、有机化合物和微生物^{79,80}。其经济效益和去除多种污染物的能力使得CDI成为全球大规模水资源净化项目的⁸¹⁻⁸³。例如, Sun等人利用CDI技术和海带

衍生的分层多孔碳(KHPC)电极及其相应的CDI装置, 在实验中实现了四环素和水硬度离子的同时去除。研究发现, 这种方法具有高回收率且不会引发二次污染, 适合大规模实际应用⁸⁴。

2.4.3 CDI在资源回收中的应用

CDI技术是一种既能回收稀有金属和宝贵资源, 又能去除有毒物质的高效废水处理办法⁸⁵⁻⁸⁷。其灵活性在于可以根据不同废水的特性进行调整和优化, 以达到最佳处理效果⁸⁸。例如, Wang等人提出了一种结合MCDI和离子交换(IE)工艺来回收低浓度废水中氮元素的方法(MCDI + IE工艺)。与单一离子交换工艺相比, MCDI + IE工艺在经历3次和5次MCDI充放电循环后, 水处理量分别是其2.48倍和3.89倍⁸⁹。

2.4.4 CDI技术在海水提铀中的应用

CDI技术在UES中的应用愈发被认为是一种有前景且可持续的方法⁹⁰。从海水中提取铀面临诸多挑战, 主要源于海水中铀的浓度相对较低。值得注意的是, CDI技术利用电场效应和选择性吸附原理, 在提铀过程中具有诸多优势。尽管目前处于实验阶段, 但CDI的固有优势使其有潜力在不久的将来成为一种可行的UES方案。随着技术的不断完善和进步, CDI有望被广泛应用, 成为应对海水提铀挑战以及满足核电设施铀需求的创新解决方案。

目前, CDI技术被广泛用于从水中提取元素, 已有研究将其应用在提铀方面。2014年, Xu等人使用CDI技术有效去除了水中的铀, 证明了相较于其他物质, AC电极对铀具有选择性电吸附特性, 既相较于二价离子, 其对包括四价铀(U(IV))在内的三价和四价离子具有优先吸附倾向⁹¹。试验研究结果显示, 在仅作用25 min的情况下, U(IV)浓度显著减少了 $98.9\% \pm 0.6\%$ 。

2019年, Ma等人成功应用FCDI技术去除铀, 展示了其在处理包括澳大利亚北部在内的各地区铀污染地下水资源方面的高效性⁹²。碱土金属、碳酸盐和六价铀(U(VI))之间的相互作用导致形成了如 $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3^0$ 等带中性电荷的稳定三元水合物。通过有效分离钙离子, FCDI促进了带负电荷的 $\text{Ca}(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3^{2-}$ 的生成, 从而加快了铀通过阴离子交换膜的速率, 并在带正电荷的流动电极(阳极)上进行封存。该过程体现了FCDI有效应对这一挑战的能力。

2023年, Yan等人提出了一种通过光催化还原与电吸附耦合(PEA)的高效方法⁹³。PEA法采用了由磷酸功能化石墨烯(GP)阴极和石墨烯/二氧化钛

纳米复合材料(GT)阳极组成的非对称电极配置,显著提高了U(VI)的提取率。非对称电极促进了铀酰离子向GP阴极的快速光电运输和定向迁移。该装置采用了具有络合、电吸附和光催化还原三种机制的合成机制来提取铀酰离子。PEA法的去除率高达91.3%,远高于传统光催化还原和电吸附法。PEA法的吸附速率分别比光催化还原和电吸附法快225%和50%。此外,PEA法在将U(VI)还原为U(IV)方面十分高效,同时还具有出色的选择性和循环利用性。研究结果表明,有目的地设计结合多种机理的不对称电极,可能是从海水中高效提取U(VI)的可行方法。

2024年, Hu等人开发了一种三维多孔碳化MOF-199@聚乙烯吡咯烷酮(PVP)/多壁碳纳米管(MWCNTs)复合材料(CMPC),显著增强了水中U(VI)的电吸附作用。研究结果表明,CMPC在水处理应用中对U(VI)的去除表现出卓越的性能和潜力⁹⁴。PVP的引入使得CMPC能够保持其独特的八面体多孔结构和丰富的N掺杂,从而降低了粒径并增加了活性位点。此外,MWCNTs的交错排列形成了局部导电网络,从而增强了其性能。CMPC电极在水溶液中去除 UO_2^{2+} 方面表现出了卓越的性能(1.2 V),去除率达到了95.2%,吸附量达到了惊人的 $410.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这是通过MOF-199、PVP和MWCNT的独特组装产生的EDL和拟电容效应协同作用实现的,从而实现了出色的去离子效率。总之,CMPC是一种很有潜力的CDI电极材料,可用于高效提取水中的铀。

硼磷化合物纳米片⁹⁵、纳米壳聚糖/氧化石墨烯(CS/GO)复合材料⁹⁶⁻⁹⁸、氧化石墨烯/氮掺杂碳复合材料⁹⁹和生物质来源的碳/聚吡咯复合材料¹⁰⁰都是可用于UES中的优秀CDI电极材料。高效吸附材料与CDI技术的结合将为这一领域的进一步研究带来了广阔的前景。

3 CDI技术应用于UES方向上的优势

近年来,铀资源已成为核能反应堆不可或缺的组成部分,因此引起了广大学者对铀资源获取方法的研究兴趣^{101,102}。如今,铀分离方法层出不穷,包括吸附¹⁰³、离子交换¹⁰⁴、萃取¹⁰⁵和膜分离¹⁰⁶等。然而,这些方法普遍存在能耗高、效率低、成本高、易产生二次污染等问题¹⁰⁷。CDI技术以其吸附能力强、选择性突出、能耗低、吸附速率良好等特点著称,在提铀领域具有明显优势¹⁰⁸⁻¹¹⁰。本节将阐述CDI技术在吸附性、选择性和经济效益三个方面的优势(见图2)。

3.1 吸附性

一般来说,CDI利用外加电场或外加电压促进离子向对电极移动,使离子从溶液中迁移到多孔电极,然后储存在EDL中,从而达到吸附效果¹¹¹。研究人员主要通过开发基于碳的复合电极材料,致力于优化和增强作为CDI电极关键组成部分的碳材料,以高效吸附铀^{112,113}(见表1)。例如,Wu等人利用氧化GO制备了具有层状孔隙结构、高比表面积和高比电容的三维石墨烯(3DG)电极材料¹¹⁴。实验结果显示,在模拟海水中,当最佳施加电压为1.8 V时,饱和吸附量可达 $113.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同样是对碳电极材料进行研究,Liu等人通过使用电导率优良、机械强度高的GO和亲水性好的CS,制备了具有介孔结构和高电导率的CS/GO复合材料。在模拟海水中,CS/GO-4在0.9 V时的吸附量为 $271.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ¹¹⁵。同时,Tang等人合成了以CS和生物衍生的多孔活性炭(BC)为电极材料的复合电极(CS/BC)。结果表明,在模拟海水中,CS/BC-2在电压为0.9 V、pH = 4.0的条件下对U(VI)具有较高的电吸附去除率($207.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)(见图3a)¹¹⁶。此外,继续之前的工作,Tang等人通过将聚乙烯醇(PVA)/GO与GO组合形成薄膜,制备了PVA/GO复合电极。实验表明,在模拟海水中,对U(VI)的吸附量在0.9 V时达到 $333.0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (见图3b),证明该材料具有良好的吸附能力和快速动力学特性¹¹⁷。

在实际的电吸附过程中,对离子(与电极带相反电荷的离子)的电吸附同时伴随着对同离子(与电极带相同电荷的离子)的排斥,导致了能耗浪费以及吸附能力和吸附速率的显著降低¹¹⁸。因此,需要新的方法来解决这个问题。例如,Liao等人在多孔还原石墨烯(RGH)电极的基础上开发了一种由黄原胶(XG)和CS构成的非对称结构。多糖粘合剂的引入削弱了阴极和阳极表面上相反电荷团之间的排斥作用,同时增强了表面的亲水性和电导率,

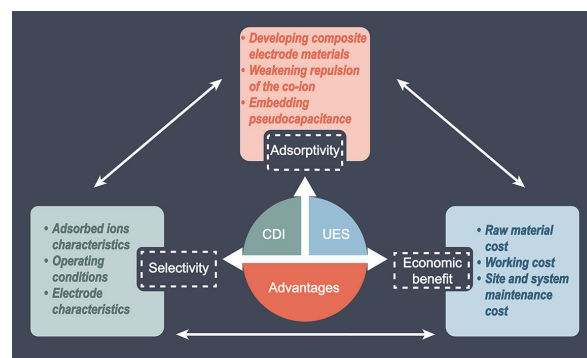


Fig. 2 Summary of the advantages of CDI for UES.

Table 1 Summary of CDI materials with different adsorbabilities derived from simulation experiments.

Electrode material/Type	Electrosorption mechanism	Adsorption performance		Ref.
		Uptake capacity	Removal ratio	
3DG	EDL formation	113.80 mg·g ⁻¹ (at 1.8 V)	N/A	111
CS/GO	EDL formation and complexation	271.2 mg·g ⁻¹ (at 0.9 V)	N/A	112
CS/BC	EDL formation, ion exchange and complexation	207.6 mg·g ⁻¹ (at 0.9 V and pH 4.0)	N/A	113
PVA/GO	EDL formation and complexation	333.0 mg·g ⁻¹ (at 0.9 V)	N/A	114
RGH	EDL, extra micro electric field and complexation	N/A	97.9% (at 1.2 V and 4 h)	116
HGNbP	Electro-adsorption, electro-reduction and coordination	1340 mg·g ⁻¹ (in 1000 mg·L ⁻¹ U(VI) solution)	99.9% (within 30 min in 50 mg·L ⁻¹ U(VI) solution)	117
WO ₃ /C	Synergistic effect of EDLs and pseudocapacitive from WO ₃ /C	449.9 mg·g ⁻¹ (at 1.2 V)	N/A	121
CMPC	EDLs and pseudocapacitive	410.33 mg·g ⁻¹ (at 1.2 V).	95.2%	91
CC/PANI	Hybrid capacitive adsorption and coordination	282.2 mg·g ⁻¹ (at 0.9 V and pH 4.0)	N/A	122
GO/PPy	EDL and pseudocapacitive adsorption and complexation	246.5 mg·g ⁻¹ (at pH 4.0 and 0.9 V)	N/A	123
FCDI	Electrosorption and electroreduction	The volume of uranium-containing water was reduced from 2400 mL to 40 mL	99%	126
MCDI	Electrosorption	N/A	98.9% (a groundwater source containing 50 µg·L ⁻¹ uranium)	127

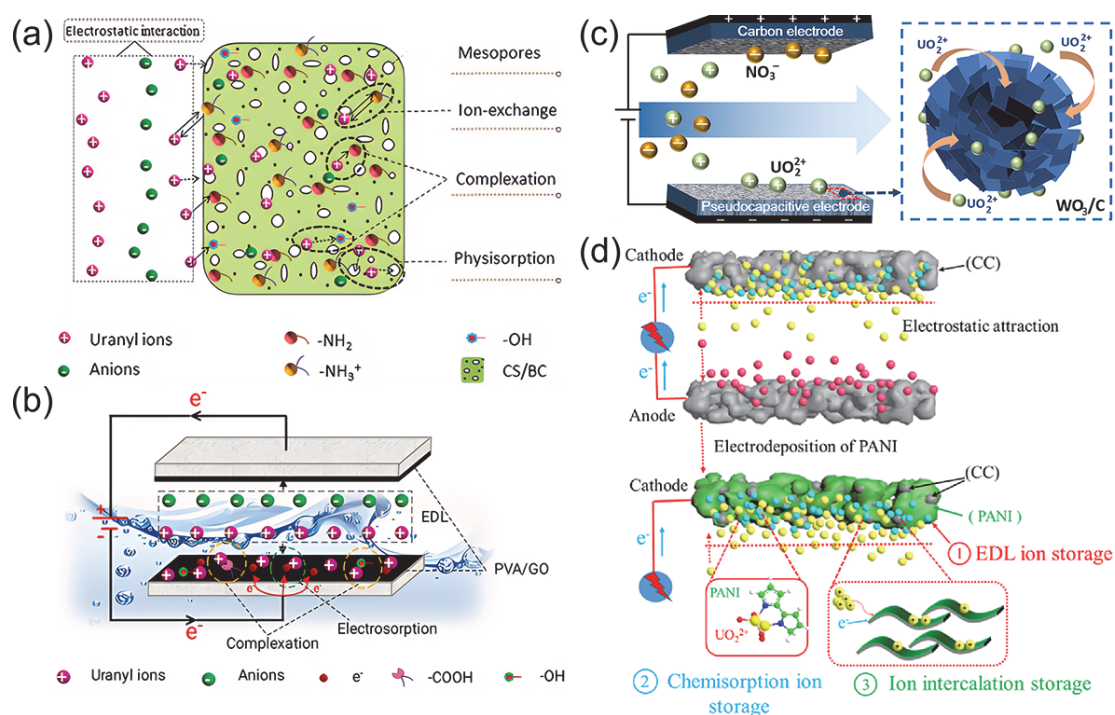


Fig. 3 (a) The electroadsorption mechanism for U(VI) removal by CS/BC-2 electrode ¹¹⁶. Adapted with permission from Ref. 116, Copyright 2021 Elsevier. (b) Possible mechanism for U(VI) electroadsorption on PVA/GO-4 ¹¹⁷. Adapted with permission from Ref. 117, Copyright 2022 Elsevier. (c) Schematic diagram of electroadsorption mechanism of WO₃/C electrode ¹²⁴. Adapted with permission from Ref. 124, Copyright 2020 Elsevier. (d) Possible mechanism for U(VI) electroadsorption on CC/PANI-2 ¹²⁵. Adapted with permission from Ref. 125, Copyright 2023 Elsevier.

从而促进了U(VI)的电吸附。结果显示, 该非对称多糖粘合剂电极在1.2 V下4 h内的去除率达到了97.9% ¹¹⁹。同时, Liao等人设计了一种层状2D/2D磷酸铌/孔状石墨烯(HGNbP)电极材料, 通过耦合

电吸附和电催化还原过程来吸附铀酰离子。实验结果显示, HGNbP表现出良好的吸附效率, 对50 mg·L⁻¹ U(VI)溶液的去除率在30 min内可达到99.9%, 在1000 mg·L⁻¹ U(VI)溶液中的吸附量可达

1340 mg·g⁻¹ 120。

然而,碳材料可能具有无序的孔隙结构,导致离子扩散受限。因此,离子插层拟电容过程(即扩散控制过程)作为一种替代方法备受关注。换句话说,电解质离子嵌入氧化还原活性材料层或隧道中,伴随着法拉第电荷转移,但不改变初始晶体结构¹²¹。基于这种机制,过渡金属氧化物逐渐成为极具潜力的CDI电极材料¹²²。不仅如此,拟电容材料与碳材料结合还能增强其电吸附能力¹²³。例如,Zhou等人制备了一种菊花状WO₃/C复合材料作为拟电容电极材料。实验结果显示,在模拟海水中,WO₃/C电极在电压为1.2 V时的U(VI)吸附量可达449.9 mg·g⁻¹(见图3c)¹²⁴。同样,Hu等人使用多孔碳化N掺杂MOF-199经MWCNTs修饰制备了CMPC电极。铀的高效去除归因于EDL和MOF-199、PVP和MWCNTs独特组合产生的拟电容效应的协同作用。实验表明,CMPC对U(VI)具有良好的吸附效果,去除率为95.2%。此外,在模拟海水中,1.2 V时的U(VI)吸附和去除率为410.33 mg·g⁻¹⁹⁴。除了上述方法外,Yu等人还通过在棉质碳(CC)上电沉积聚苯胺(PANI),制备了一种高性能复合电极(CC/PANI)。实验结果显示,在模拟海水中,该材料的U(VI)吸附量在pH = 4.0和0.9 V时达到最大值282.2 mg·g⁻¹。其中,CC/PANI-2中的PANI成分能够为离子储存提供较高的离子存储拟电容,并具有良好的导电性,可实现快速的法拉第电荷转移(见图3d)¹²⁵。此外,Shuang等人制备了一种新型复合电极(GO/PPy)。在GO/PPy中的拟电容PPy增加了其吸附容量。结果显示,在模拟海水中,U(VI)的最大吸附量在pH = 4.0和0.9 V时达到246.5 mg·g⁻¹¹²⁶。

除了优化和改进电极材料外,研究人员还利用不同的电容电极或电池电极组件对CDI的电池结构进行了研究,特别是FCDI和MCDI,已经投入实际应用¹²⁷。与通过静态电极实现的活性物质固定化相比,FCDI由于其独特的流动性表现出增强的吸附能力,从而以更高的效率完成了传质过程¹²⁸。在Zhou等人的研究中,进行了连续批次处理实验,每个循环对U(VI)的去除率均大于99%。值得注意的是,即使在48个循环后,对U(VI)的去除率仍然保持在99%以上,突出了FCDI在提铀方面的可行性¹²⁹。除了FCDI技术之外,MCDI技术的可行性也得到了证实。Bales等人研究了MCDI对地下水中铀的去除效果。实验结果显示,在含有50 µg·L⁻¹铀浓度的地下水中,MCDI去除了98.9%的铀,其中大部分(94.5%)被保留在阳极上¹³⁰。

3.2 选择性

在水溶液中,多种金属离子的存在会显著影响UO₂²⁺与吸附剂的结合效率。因此,研究人员对CDI技术的选择性吸附能力表现出了极大的兴趣(见表2)。研究发现CDI技术对吸附/去除的选择性主要取决于三个关键因素:(i) 吸附离子特征,包括离子电荷、离子浓度和水合半径;(ii) 操作条件,如施加电压、温度和pH值;和(iii) 电极特性,包括孔径结构、孔径分布和特定材料结构^{131–135}。

在当前的提铀应用中,由于电极材料的创新发展,电极特性的研究已成为研究人员的关注的焦点^{136,137}。例如,Liu等人采用双模板策略制备了具有层状孔隙结构的氮掺杂碳材料,增加了碳骨架的内部连接性并形成了更大的孔隙结构,从而促进了离子的大规模传输。实验表明,在含有11种

Table 2 Summary of CDI materials with different selectivities derived from simulation experiments.

Electrode material	Electrosorption mechanism	Performance		Ref.
		Uptake capacity	Comparison	
NHPC	UO ₂ ²⁺ and NHPC produce synergistic effects through coulomb interaction and reduction reaction	152.43 mg·g ⁻¹	K _d = 1620.84 mL·g ⁻¹	135
CMM	MXene provides a pseudocapacitance/intercalation effect and the conductive base	582.46 mg·g ⁻¹ (at 1.2 V)	92.3% multi-ionic solution	136
Amorphous BP nanosheets	The strong coordination between P and U	In aqueous solutions ranging from 0.05 to 130 mg·L ⁻¹ , the maximum adsorption capacity is 2584 mg·g ⁻¹ .	When nine kinds of ions coexist and the concentration is 100 times, the material maintains good selectivity for uranyl ions.	92
CSKN-15	The redox fixation of U(VI)	78.34 mg·g ⁻¹ in seawater	S _{U/M} is higher than 120.	137
HGP hydrogel	The physi-, chemi-, and electro-sorption simultaneously took effect	545.7 mg·g ⁻¹ (at 1.2 V and pH 5.0)	S _{U/M} values for each cation are far above 1.	140

共存金属离子的溶液中, NHPC对U(VI)的吸附能力最强, U(VI)的分配系数(K_d)为1620.84 mL·g⁻¹, 是其他金属离子的7–36倍¹³⁸。根据不同电极的特性, Zhang等人制备了碳化MIP-202/MXene (CMM) 复合材料, 并发现MXene的添加能有效提高U(VI)的吸附。实验结果显示, 多离子溶液中UO₂²⁺的选择性吸附效率达到了92.3% (见图4a)¹³⁹。同时, Chen等人制备了非晶BP纳米片⁹⁵。他们利用P和U之间的相互作用增强了电极材料对铀的选择性。天然海水中典型金属离子的竞争吸附结果显示, BP纳米片对U(VI)离子具有优异的选择性。此外, Wang等人制备了一系列富介孔生物碳(CSKN-15)¹⁴⁰。在含有相同浓度的U、Na、K、Mg和Ca离子的混合溶液中, U(VI)在CSKN-15上的吸附量仍高于Na、K、Ca和Mg离子。相应的分配系数大于120 (见图4b)。这可能是由于U(VI)的氧化还原固定化防止了电吸附铀被其他离子替换^{141,142}。此外, Liao等人设计并合成了一种具有层状孔隙结构的磷酸功能化石墨烯(HGP)水凝胶。在模拟海水中, 最大吸附量可达545.7 mg·g⁻¹, 在1.2 V和pH = 5.0时。HGP水凝胶丰富的磷酸基团使材料

表现出良好的选择性(见图4c)¹⁴³。

3.3 经济效益

海水中铀的低密度使得需要过滤大约30万吨海水才能提取1 kg铀, 这导致了与开采陆基铀矿相比更高的提取成本。因此, “海水核电”在商业领域的竞争力明显低于“陆基核电”。然而, 只要可以减轻UES所需的费用, 它就有望转变为主流资源, 逐渐取代日益枯竭的陆基铀矿, 成为核能的重要支柱^{144–147}。

目前主要的提铀技术有四种: 化学还原法、微生物还原法、光催化还原法和包括CDI技术在内的电化学法。其中, 化学还原法的吸附剂容易聚集, 从而影响提铀效率。而微生物还原法反应速率较慢, 长期效果不确定。传统电化学法的操作简单, 并且具有相对较高的提铀效率。然而, 传统电化学法所需的外加电压, 可能导致高成本、能耗浪费以及改变电极材料的结构。相比之下, 光催化还原法具有光能廉价易获取、效率高、操作简单和催化剂可重复使用等优点。然而, 通过光催化还原的铀倾向于附着在光催化剂表面, 从而阻碍了活性位点的可访问性和催化剂的使用寿命¹⁴⁸。此外, 自然海

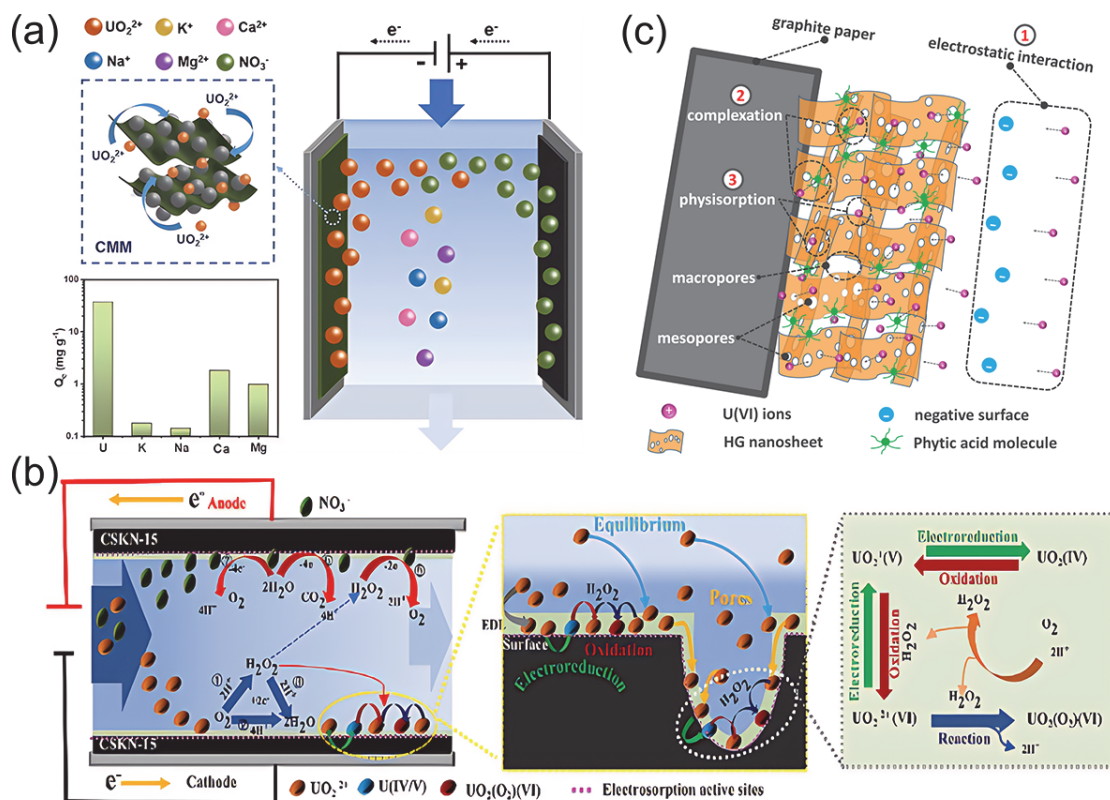


Fig. 4 (a) Schematic diagram of electroadsorption mechanism of CMM electrode¹³⁹. Adapted with permission from Ref. 139, Copyright 2022 Elsevier. (b) Diagram of faradic reaction and electroadsorption process occurring at CSKN-15 electrode¹⁴⁰. Adapted with permission from Ref. 140, Copyright 2023 Elsevier. (c) Illustration of electroadsorption mechanism of HGP electrode¹⁴³. Adapted with permission from Ref. 143, Copyright 2019 Elsevier.

Table 3 Basic cost analysis of four UES technologies derived from simulation experiments (US\$ per kg of uranium).

Technologies	Raw material cost	Working cost	Site and system maintenance cost	Total cost
Chemical reduction	\$20 to \$41	\$20 to \$100	\$40 to \$120	\$80 to \$261
Microbial reduction	\$20 to \$41	\$50 to \$130	\$30 to \$56	\$100 to \$227
Photocatalytic reduction	\$20 to \$41	\$23 to \$30	\$30 to \$60	\$73 to \$131
CDI	\$40 to \$80	\$0.74 to \$1.75	\$10 to \$80	\$50.74 to \$161.75

水中含有大量碳酸盐, 它容易与铀形成低电位铀-碳酸盐络合物, 对直接催化还原提出挑战¹⁴⁹。

与其他方法相比, CDI技术具有能耗低、生命周期成本低、能够全面去除各种离子污染物、回收率高等优点。因此, 其在UES中的应用能够带来了可观的经济效益。

本节展示了CDI在UES中的经济效益, 提供了CDI和其他三种主要提铀方法的成本估算, 以突显CDI的成本优势。此外, 本节还探讨了CDI的优化路径, 为未来旨在将CDI技术实际运用于UES的研究提供了宝贵的见解。

3.3.1 原材料成本

上述三种方法, 包括化学还原法、微生物还原法和光催化法还原的原材料成本相对较低, 范围在20美元到41美元之间。然而, CDI技术需要特定的电极材料和其他原材料, 导致其原材料成本相对较高, 约为40美元到80美元。

3.3.2 工作成本

(i) 为实施化学还原法, 需要将吸附剂装入尼龙袋或吸附柱中, 并使用洗脱剂, 其成本通常在20美元到100美元之间。

(ii) 对于微生物还原法, 需要适当的设备来培养和保存微生物或其他材料, 成本可能在50美元到130美元之间。

(iii) 光催化还原法通常采用氙灯和汞灯作为光源, 需要消耗电力并添加催化剂, 因此成本大约在23美元到30美元之间。

(iv) CDI技术只需要外部电压作为主要电源, 因此成本显著较低, 大约在0.74美元到1.75美元之间。

3.3.3 场地和系统维护成本

在天然海水中进行海上测试时, 必须考虑各种前期准备和后期维护的成本, 包括与UES相关物品的运输和设备、当地海况以及能源等。这个过程中涉及的费用包括租赁或购买工作船只、燃料支出、设备的电力消耗, 以及海上平台的建设成本。

提铀过程包括维护、管理和劳动力等运营成本。值得注意的是, 上述场地和系统的准备工作以及维护成本可能会有所不同, 这取决于所选择的

UES策略、不同的海域, 甚至是所选的工作人员。我们已经深入分析了所提出的基本成本(表3), 其中包括原材料、能源、洗脱、再生和耗材的补充。此外, 我们还准确估算了维护成本和每公斤铀所需的提取成本。

为了确定提铀成本, 必须考虑不同海域水质的变化。竞争离子、盐度和生物污损等因素将影响提取成本。通过将这些因素纳入我们的分析, 我们可以确保对成本进行更精确的估算。

根据以上估算结果, CDI技术可能是四种技术中最具优势的UES方法, 特别是在成本效益和维护方面。高维护成本主要源自生物污损引起的材料损耗以及提铀效率的降低。提高CDI电极材料的抗生物污损性是将CDI用于UES的经济效益最大化的关键。

4 UES CDI的挑战因素

海水因存在大量竞争性离子、高盐度、pH等因素而复杂多变¹⁵⁰。此外, 海水中寄生着大量微生物, 这些微生物的大规模生长和繁殖可能会降低CDI的吸附效率(见图5)。因此, 本节旨在评估和评价CDI技术在实际应用于UES过程中面临的挑战因素, 包括(i) 竞争性离子, (ii) pH和盐度, 以及(iii) 生物污损。

4.1 竞争离子的影响

一般来说, 各种离子在电极上会表现出独特的化学亲和性, 并以不同的速率发生反应, 它们的

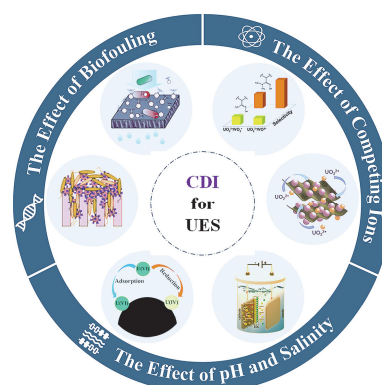


Fig. 5 Summary diagram of challenge factors of CDI for UES.

电荷和离子半径也影响着它们的选择性。在电解过程中,铀离子在电极表面发生化学反应。然而,具有较高化学亲和力的离子更容易发生反应,因此与铀离子竞争^{151–153}。反应速率较快的离子容易占据电极表面,从而限制铀离子进入电极,并导致竞争效应。此外,具有较大电荷或较小尺寸的离子可能表现出更高的选择性,并更有可能在电极上发生反应,从而加剧提铀效率的降低^{154–158}。考虑到天然海水的复杂组成,竞争离子会对UES产生很大的影响。特别是钒,作为最具竞争力的离子之一,海水中钒浓度的增加会导致提铀速度大幅降低,成为铀提取的一大障碍。因此,研究人员必须坚持不懈地探索和开发定制化的CDI电极材料^{159,160}。

2019年, Wu等人开发了3DG作为CDI电极材料,实现了 UO_2^{2+} 离子的电化学吸附(见图6a),在1.8 V下吸附条件下吸附150 min,饱和容量为 $113.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ¹¹⁴。与此同时, Liao等人探索了多孔磷酸功能化石墨烯水凝胶对铀(VI)的电吸附(见图6b)¹⁴³。实验结果显示,在1.2 V下,吸附时间为21 min的吸附条件下,其吸附量为 $545.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。然而,这些材料受限于吸附容量,阻碍了它们从海水中选

择性提取铀离子,特别是面对钒离子的竞争。因此,迫切需要开发专门设计用于从海水中高效选择性提取铀的新型CDI电极材料。

为了应对这一挑战, Chen等人通过在离子液体中使用等离子体来促进 B_2H_6 和 PCl_3 直接化学反应合成了磷化硼纳米片⁹⁵。该材料具有出色的比容量($179.3 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$)和显著的比表面积($221.7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$),平均厚度为8.422 nm。该材料适合作为CDI电极材料,从浓度范围为 $0.05\text{--}130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水溶液中提取U(VI),其最大吸附量为 $2584 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这些磷化硼纳米片的优异吸附性能主要归因于其特殊的结构特征和与铀离子的强配位亲和力。此外,与其他竞争性金属离子相比,该材料对U(VI)离子表现出显著的选择性吸附性能(见图6c)。

4.2 pH和盐度的影响

值得注意的是, pH在重金属离子的电吸附过程中起着至关重要的作用,影响着活性物质的表面特征和化学性质以及海水中铀存在的形态。在 $\text{pH} = 4$ 以下,主导物种是 UO_2^{2+} ,在 $\text{pH} = 4.5$ 时转变为 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$,其占比在 $\text{pH} = 6$ 时达到顶峰。在 pH 为6.5至7.5的范围内,铀的主要存在形式是多核络合物 $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$,而在 pH 为7.5至10之间,

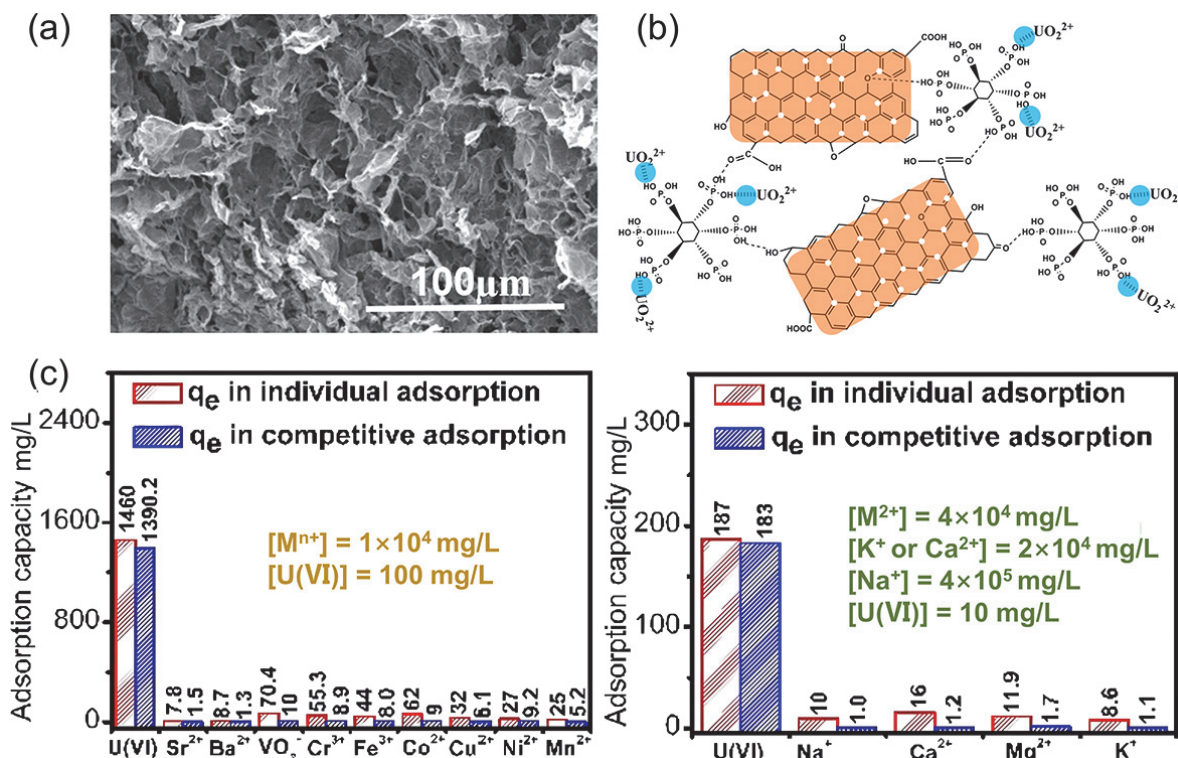


Fig. 6 (a) SEM image of 3DG electrode material¹¹⁴. Adapted with permission from Ref. 114, Copyright 2019 Springer International Publishing. (b) Structure legend of HGP hydrogel electrode¹⁴³. Adapted with permission from Ref. 143, Copyright 2019 Elsevier. (c) Comparison of equilibrium adsorption capacity (q_e) in the environment of a single competitive metal ion solution and multiple competitive metal ion solutions⁹⁵.

Adapted with permission from Ref. 95, Copyright 2020 Elsevier.

$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 占主导地位。与上述结果密切相关的,在CDI工艺用于UES时,铀的形态与其吸附效果密切相关。因此,所选择的CDI电极材料必须根据不同环境中不同的pH条件进行定制。

Liu等人使用氮掺杂多级多孔碳(NHPC)作为CDI电极,研究了不同pH值对铀吸附的影响(见图7),结果显示在pH值为1到6的范围内,电极的吸附能力显著增加,而在pH值为6到9的范围内则显著下降。在吸附过程中,铀的吸附是通过电驱动和 $-\text{NH}$ 的络合完成的¹³⁸。当pH小于6时,铀通常以 UO_2^{2+} 、 $\text{UO}_2(\text{OH})$ 、 $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ 和 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 等阳离子的形式存在于溶液中。在极酸性环境中,电极表面的质子化会产生带正电的功能基团,这对于正电金属离子的吸附是不利的。以下是NHPC电极上铀吸附行为的总结:

(i) 当pH升高时,电极表面官能团的去质子化有利于 $-\text{COOH}$ 和 $-\text{OH}$ 与U的络合。

(ii) 在电场的影响下,电极表面带负电荷与带正电荷的铀离子之间发生静电吸引。然而,在pH大于6时,铀主要以碳酸盐络合物和羟基络合物的形式存在于溶液中,如 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $(\text{UO}_2)_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_3^-$ 和 $(\text{UO}_2)_4(\text{OH})_7^+$ 。这些较大的铀络合物太大,无法进入多孔碳中,导致高pH值下吸附能力下降。

除了pH值之外,盐度也是影响铀的化学形态和浓度的重要因素。它还会间接影响海水中CDI对铀的提取效率。另一方面,过高的盐度可能导致CDI电极污染,产生结垢并降低通量,从而造成提铀效率和材料回收效率的降低。

4.3 生物污损的影响

根据现有研究,生物污损可能导致吸附材料的提铀效率降低30%¹⁶¹⁻¹⁶³。此外,由于抗生物污损性的不足,一些具有高吸附速率和选择性的CDI电极材料在使用后可能会出现额外的能耗和吸附能力下降的情况¹⁶⁴⁻¹⁶⁷。与此同时,生物污损主要发生在含碳电极上,并且微生物的长期增殖也会影响材料的回收率。因此,研究人员需要设计出具有出色抗污损性能的电极材料。

目前,应对生物污损的方法主要有两种类型:(i) 主动防污是指使材料分泌或吸引杀菌物质,或引入特定基团。(ii) 被动防污是指通过修改材料表面性质或施加涂层来减轻微生物的附着^{168,169}。

为了应对生物污损的影响,研究人员利用优异的电极材料固有的特性,提出了有效的解决方案来减轻其影响。Lei等人使用MXene/碳纳米纤维薄膜(CNF)通过自支撑 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 电纺技术制备了一种多功能CDI电极(见图8a)。实验结果显示,该电极材料具有抗生物污损性能和抗菌性能(见图8b、c)¹⁷⁰。双层电容耦合机制赋予 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CNF}$ -14薄膜出色的去离子能力、快速的去离子速率和较长的循环寿命。因此,在性能方面,该材料超越其他基于碳和MXene的电极材料。此外,得益于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片的亲水性、优异的分散性能以及完全暴露的锐利边缘, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CNF}$ -14在大肠杆菌灭活实验中表现出优异性能,在4 h内实现99.89%的灭活率。

目前,其他提铀方法,如吸附和光催化还原法,已将抗生物污损性作为材料选择的重要评价标准。与其他提铀方法相比,对于UES中CDI技术的抗生物污损性缺乏研究¹⁷¹⁻¹⁷⁶。然而,解决CDI

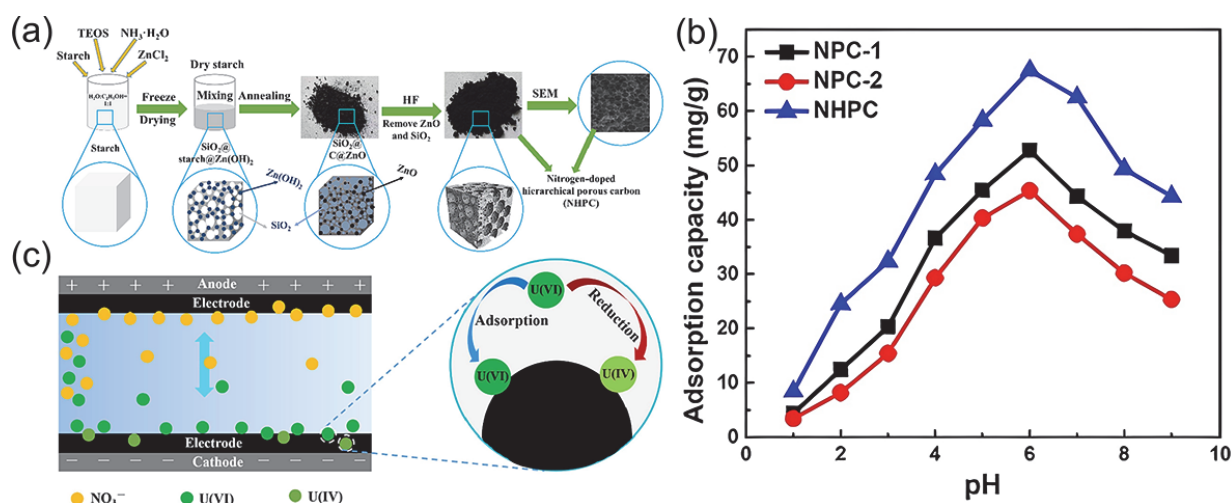


Fig. 7 (a) Synthesis principle of NHPC. (b) Adsorption of uranium at different pH values. (c) Schematic diagram of uranium migration process and valence state change in CDI process¹³⁸. Adapted with permission from Ref. 138, Copyright 2023 Elsevier.

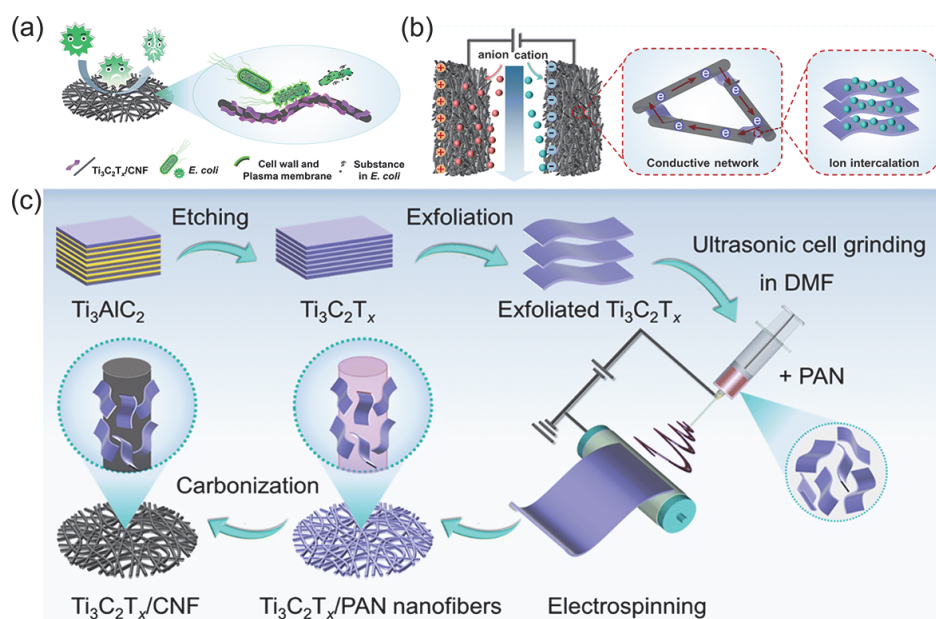


Fig. 8 (a) Schematic diagram of how $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CNF}$ -14 inactivates *E. coli*. (b) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CNF}$ -14 CDI structure diagram. (c) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CNF}$ -14 synthesis flow chart¹⁷⁰. Adapted with permission from Ref. 170, Copyright 2023 Royal Society of Chemistry.

在海水提铀过程中生物污损对于保证其经济可行性和长期可持续性至关重要。因此，开发具有抗生物污损性能的CDI电极材料至关重要。

5 总结与展望

作为核反应堆的关键元素之一，海洋中的铀引起了研究人员的广泛关注。近年来，CDI技术在资源回收和UES系统中的应用显示出巨大潜力。因此，CDI技术有望在UES中发挥重要作用。

本文全面审视了CDI技术的发展和原理，以及其在UES系统中的作用和挑战因素。值得注意的是，由于科学进步和新型多孔材料的问世，全球研究人员在增强CDI技术、扩展其应用和攻关其前沿方面取得了显著进展^{70,71}。虽然近几十年来在电极材料、电池结构和技术工艺方面取得了实质性进展，但仍有阻碍CDI技术实际运用的瓶颈需要克服：

(1) CDI技术的实际应用和持续性工作受到了副反应和较低的去离子能力的影响。主要的三种副反应包括：(i) 共离子效应：在CDI充电过程中，带有与电极相似电荷的离子从电极中释放。(ii) 阳极氧化反应：例如碳电极氧化和氯化物氧化。(iii) 阴极还原反应：例如氧还原和碳电极还原^{136,177–179}。这些反应通常在操作过程中发生，导致能耗增加和水质波动^{180,181}。CDI系统中存在的共离子效应会导致吸附带电离子被排斥，致使一些离子重新进入溶液，严重阻碍了CDI的吸附性能^{182,183}。电极

材料的电容相对较低以及副反应的不利影响是限制去离子能力的主要因素。

(2) 作为最常用的电极材料之一，碳材料可能会遇到诸如孔隙结构无序、电极电容低、亲水性差和离子传输速度缓慢等问题。此外，EDL微孔的双层重叠可能会降低材料的吸附能力致使传质速率降低。

(3) 传统的CDI系统采用固定离子容量有限的静态电极，大多数电极采用间歇吸附-解吸流程，导致CDI技术生产力显著下降，并阻碍其大规模推广。

面对CDI技术面临的挑战，全面认识其中的困难并采用更加合理可靠的理论作为基础支持至关重要。近年来，由于材料的不断创新和迭代，研究人员愈发认识到材料设计和产业转型的重要性。材料信息学(MI)的出现为此提供了一个绝佳的途径。MI将材料科学与信息学相结合，通过机器学习算法和人工智能，高效地捕获实验数据、提取优化模式和自动化解决复杂问题，从而推动新型预测模型的发展并加快材料创新的步伐¹⁸⁴。研究人员应该利用高效的计算技术、高通量实验和广泛的数据库，将MI整合到CDI技术的研究进展中¹⁸⁵。利用分层材料信息学，研究人员可以深入探索材料的内部结构，提高CDI技术的价值和效益¹⁸⁶。

CDI技术在生态友好型海水资源利用中扮演着至关重要的角色。本文详细介绍了CDI技术，总结了其在海水资源开发利用中的应用以及其优

势, 并讨论了目前的挑战。针对上述方面, 提出通过使用MI技术, 以创新为导向, 拓展CDI技术在水中的应用。因此, 未来CDI技术的发展可以利用数据分析和高通量筛选等新兴技术, 为CDI技术的更快、更高效的发展提供新思路和新方向。本综述旨在为CDI技术的进步提供实用见解, 并为未来海水资源的可持续利用提供有价值的参考。

Author Contribution: Conceptualization, Guoze Yan; Methodology, Bin Zuo; Software, Shaoqing Liu; Validation, Tao Wan, Ruoyu Wang, Jinyang Bao and Zhongzhou Zhao; Formal Analysis, Feifei Chu; Investigation, Zhengtong Li; Writing - Original Draft Preparation, Guoze Yan; Writing - Review & Editing, Bin Zuo; Supervision, Yusuke Yamauchi and Saad Melhi; Project Administration, Xingtao Xu.

References

- Yu, H. L.; Zhou, L. M.; Liu, Y. L.; Ao, X. Q.; Ouyang, J. B.; Liu, Z. R.; Adesina, A. A. *Desalination* **2023**, *564*, 116773. doi: 10.1016/j.desal.2023.116773
- Du, W. Q.; You, W.; Xu, Z. Q. *Energies* **2022**, *15*, 4310. doi: 10.3390/en15124310
- Cui, W. R.; Li, F. F.; Xu, R. H.; Zhang, C. R.; Chen, X. R.; Yan, R. H.; Liang, R. P.; Qiu, J. D. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2020**, *59*, 17684. doi: 10.1002/anie.202007895
- Wu, Y.; Xie, Y. H.; Liu, X. L.; Li, Y.; Wang, J. Y.; Chen, Z. S.; Yang, H.; Hu, B. W.; Shen, C.; Tang, Z. W.; *et al. Coordin. Chem. Rev.* **2023**, *483*, 215097. doi: 10.1016/j.ccr.2023.215097
- Yuan, Y. H.; Yu, Q. H.; Wen, J.; Li, C. Y.; Guo, Z. H.; Wang, X. L.; Wang, N. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2019**, *58*, 11785. doi: 10.1002/anie.201906191
- Li, Y.; Zheng, Y. J.; Ahamd, Z.; Zhu, L. X.; Yang, J. J.; Chen, J. P.; Zhang, Z. P. *Coordin. Chem. Rev.* **2023**, *491*, 215234. doi: 10.1016/j.ccr.2023.215234
- Li, N.; Yang, L.; Wang, D.; Tang, C. Y.; Deng, W. Q.; Wang, Z. N. *Environ. Sci. Technol.* **2021**, *55*, 9181. doi: 10.1021/acs.est.0c08743
- Zhang, D.; Lin, F.; Liu, L. J.; Zhao, B.; Hu, B. W.; Yu, S. J.; Wang, X. K. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *320*, 124204. doi: 10.1016/j.seppur.2023.124204
- Li, N.; Wu, J. K.; Su, R. D.; Zhang, N.; Zhao, J.; Wang, Z. N. *Desalination* **2022**, *545*, 116153. doi: 10.1016/j.desal.2022.116153
- Wang, K.; Liu, Y.; Ding, Z.; Chen, Z.; Xu, X.; Wang, M.; Lu, T.; Pan, L. *Chem. Eng. J.* **2022**, *433*, 133578. doi: 10.1016/j.cej.2021.133578
- Kim, M.; Xu, X.; Xin, R.; Earnshaw, J.; Ashok, A.; Kim, J.; Park, T.; Nanjundan, A. K.; El-Said, W. A.; Yi, J. W.; *et al. ACS Appl. Mater. Inter.* **2021**, *13*, 52034. doi: 10.1021/acsami.1c09107
- Chen, L.; Xu, X.; Wan, L.; Zhu, G.; Li, Y.; Lu, T.; Albaqami, M. D.; Pan, L.; Yamauchi, Y. *Mater. Chem. Front.* **2021**, *5*, 3480. doi: 10.1039/d0qm00946f
- Dahiya, S.; Singh, A.; Mishra, B. K. *Chem. Eng. J.* **2020**, *417*, 128129. doi: 10.1016/j.cej.2020.128129
- Sayed, E. T.; Olabi, A. G.; Shehata, N.; Muaz Al, R.; Majdy, O. M.; Rodriguez, C.; Atieh, M. A.; Abdelkareem M. A. *Ain Shams Eng. J.* **2022**, *14*, 102030. doi: 10.1016/j.asej.2022.102030
- Kalfa, A.; Shapira, B.; Shopin, A.; Cohen, I.; Avraham, E.; Aurbach, D. *Chemosphere* **2019**, *241*, 125003. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125003
- Huang, X.; Guo, X.; Dong, Q.; Liu, L.; Tallon, R.; Chen, J. *Environ. Sci.-Nano* **2019**, *6*, 3225. doi: 10.1039/c9en00730j
- Wang, Y. H.; Zhang, Y. J.; Cai, N.; Xue, J. Q. *J. Environ. Chem. Eng.* **2022**, *10*, 109028. doi: 10.1016/j.jece.2022.109028
- Zhao, C.; Zhang, L.; Ge, R.; Zhang, A.; Zhang, C.; Chen, X. *Chemosphere* **2018**, *217*, 763. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.071
- He, C.; Ma, J.; Zhang, C.; Song, J.; Waite, T. D. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *16*, 9350. doi: 10.1021/acs.est.8b02807
- Kim, C.; Lee, J.; Kim, S.; Yoon, J. *Desalin. Water Treat.* **2016**, *57*, 24682. doi: 10.1080/19443994.2016.1152638
- Yu, H. L.; Zhou, L. M.; Li, Z. Y.; Liu, Y. L.; Ao, X. Q.; Ouyang, J. B.; Le, Z. G.; Liu, Z. R.; Adesina, A. A. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *302*, 122169. doi: 10.1016/j.seppur.2022.122169
- Yan, C.; Liao, Y.; Shen, C. J.; Weng, X. F.; Lei, R. L.; Liao, C. L.; Zhou, Y. X.; Wang, M. *Chem. Eng. J.* **2023**, *461*, 142012. doi: 10.1016/j.cej.2023.142012
- Zeng, J. J.; Wang, T.; Wang, Y.; Gao, L.; Sun, D. D.; Ge, C.; Deng, D. F.; Zhu, H. D.; Bando, Y.; Li, R. Q.; *et al. J. Mater. Chem. A* **2023**, *11*, 23430. doi: 10.1039/d3ta04476a
- Lu, M.; Liu, J. Y.; Cheng, J.; Wang, S. P.; Yang, J. M. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2014**, *30*, 2263. [卢森, 刘建允, 程健, 王世平, 杨健茂. 物理化学学报, **2014**, *30*, 2263.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201410141
- Wang, L.; Yu, F.; Ma, J. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2017**, *33*, 1338. [王雷, 于飞, 马杰. 物理化学学报, **2017**, *33*, 1338.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201704113
- Xiong, Y. C.; Yu, F.; Ma, J. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38*, 2006037. [熊岳城, 于飞, 马杰. 物理化学学报, **2022**, *38*, 2006037.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202006037
- Zhou, J.; Zhang, X. Y.; Zhang, Y. Z.; Wang, D.; Zhou, H. J.; Li, J. X. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *283*, 120172. doi: 10.1016/j.seppur.2021.120172
- Alkhadra, M. A.; Su, X.; Suss, M. E.; Tian, H. H.; Guyes, E. N.; Shocron, A. N.; Conforti, K. M.; De Souza, J. P.; Kim, N.; Tedesco, M.; *et al. Chem. Rev.* **2022**, *122*, 13547.

- doi: 10.1021/acs.chemrev.1c00396
- (29) Taha, M. M.; Ramadan, M.; Abdelhafiz, A.; Nassar, M. Y.; Ahmed, S. S.; Khalil, M. M. H.; Allam, N. K. *Desalination* **2023**, *546*, 116219. doi: 10.1016/j.desal.2022.116219
- (30) Porada, S.; Zhao, R.; van der Wal, A.; Presser, V.; Biesheuvel, P. M. *Prog. Mater. Sci.* **2013**, *58*, 1388. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.03.005
- (31) Arnold, B. B.; Murphy, G. W. *J. Phys. Chem.* **1961**, *65*, 135. doi: 10.1021/j100819a038
- (32) Johnson, A. M.; Newman, J. *J. Electrochem. Soc.* **1971**, *118*, 510. doi: 10.1149/1.2408094
- (33) Farmer, J. C.; Fix, D. V.; Mack, G. V.; Pekala, R. W.; Poco, J. F. *J. Electrochem. Soc.* **1996**, *143*, 159. doi: 10.1149/1.1836402
- (34) Jia, B.; Zou, L. *Chem. Phys. Lett.* **2012**, *548*, 23. doi: 10.1016/j.cplett.2012.06.016
- (35) Wang, X. Z.; Li, M. G.; Chen, Y. W.; Cheng, R. M.; Huang, S. M.; Pan, L. K.; Sun, Z. *Electrochem. Solid. St.* **2006**, *9*, E23. doi: 10.1149/1.2213354
- (36) Li, H.; Pan, L.; Lu, T.; Zhan, Y.; Nie, C.; Sun, Z. *J. Electroanal. Chem.* **2011**, *653*, 40. doi: 10.1016/j.jelechem.2011.01.012
- (37) Li, L.; Zou, L.; Song, H.; Morris, G. *Carbon* **2009**, *47*, 775. doi: 10.1016/j.carbon.2008.11.012
- (38) Xu, X. T.; Tan, H. B.; Wang, Z. M.; Wang, C.; Pan, L. K.; Kaneti, Y. V.; Yang, T.; Yamauchi, Y. *Environ. Sci.-Nano* **2019**, *6*, 981. doi: 10.1039/c9en00017h
- (39) Xu, Y.; Zondlo, J. W.; Finklea, H. O.; Brennstainer, A. *Fuel Process. Technol.* **2000**, *68*, 189. doi: 10.1016/s0378-3820(00)00114-4
- (40) Lee, J.-B.; Park, K.-K.; Eum, H.-M.; Lee, C.-W. *Desalination* **2006**, *196*, 125. doi: 10.1016/j.desal.2006.01.011
- (41) Jeon, S.-I.; Park, H.-R.; Yeo, J.-G.; Yang, S.; Cho, C. H.; Han, M. H.; Kim, D. K. *Energy Environ. Sci.* **2013**, *6*, 1471. doi: 10.1039/c3ee24443a
- (42) Lee, J.; Kim, S.; Kim, C.; Yoon, J. *Energy Environ. Sci.* **2014**, *7*, 3683. doi: 10.1039/c4ee02378a
- (43) Choi, J.; Dorji, P.; Shon, H. K.; Hong, S. *Desalination* **2019**, *449*, 118. doi: 10.1016/j.desal.2018.10.013
- (44) Zhang, C. Y.; He, D.; Ma, J. X.; Tang, W. W.; Waite, T. D. *Water Res.* **2018**, *128*, 314. doi: 10.1016/j.watres.2017.10.024
- (45) Chen, R.; Sheehan, T.; Ng, J. L.; Brucks, M.; Su, X. *Environ. Sci.-Wat. Res.* **2020**, *6*, 258. doi: 10.1039/c9ew00945k
- (46) Salari, K.; Zarafshan, P.; Khashehchi, M.; Chegini, G.; Etezadi, H.; Karami, H.; Szulzyk-Cieplak, J.; Lagod, G. *Membranes-Basel* **2022**, *12*, 459. doi: 10.3390/membranes12050459
- (47) Tang, W. W.; Kovalsky, P.; He, D.; Waite, T. D. *Water Res.* **2015**, *84*, 342. doi: 10.1016/j.watres.2015.08.012
- (48) Srimuk, P.; Su, X.; Yoon, J.; Aurbach, D.; Presser, V. *Nat. Rev. Mater.* **2020**, *5*, 517. doi: 10.1038/s41578-020-0193-1
- (49) Shocron, A. N.; Atlas, I.; Suss, M. E. *Curr. Opin. Colloid In.* **2022**, *60*, 101602. doi: 10.1016/j.cocis.2022.101602
- (50) Sun, K. G.; Tebyetekerwa, M.; Wang, C.; Wang, X. F.; Zhang, X. W.; Zhao, X. S. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *33*, 2213578. doi: 10.1002/adfm.202213578
- (51) Samejo, B.; Gul, S.; Samejo, S.; Abro, N. Q.; Yenil, N.; Memon, N. *Pak. J. Anal. Env. Chem.* **2021**, *22*, 210. doi: 10.21743/pjaec/2021.12.02
- (52) Zhao, X. Y.; Wei, H. X.; Zhao, H. C.; Wang, Y. F.; Tang, N. *J. Electroanal. Chem.* **2020**, *873*, 114416. doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114416
- (53) Biesheuvel, P. M.; van der Wal, A. *J. Membrane Sci.* **2010**, *346*, 256. doi: 10.1016/j.memsci.2009.09.043
- (54) Elewa, M. M.; El Batouti, M.; Al-Harby, N. F. *Materials* **2023**, *16*, 4872. doi: 10.3390/ma16134872
- (55) Fritz, P. A.; Zisopoulos, F. K.; Verheggen, S.; Schroën, K.; Boom, R. *M. Desalination* **2018**, *444*, 162. doi: 10.1016/j.desal.2018.01.026
- (56) Hassanvand, A.; Chen, G. Q.; Webley, P. A.; Kentish, S. E. *Desalination* **2019**, *457*, 96. doi: 10.1016/j.desal.2019.01.031
- (57) Jain, A.; Kim, J.; Owoseni, O. M.; Weathers, C.; Caña, D.; Zuo, K. C.; Walker, W. S.; Li, Q. L.; Verdusco, R. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 5859. doi: 10.1021/acs.est.7b05874
- (58) Kim, Y.-J.; Choi, J.-H. *Water Res.* **2012**, *46*, 6033. doi: 10.1016/j.watres.2012.08.031
- (59) Yeo, J.-H.; Choi, J.-H. *Desalination* **2013**, *320*, 10. doi: 10.1016/j.desal.2013.04.013
- (60) Dryfe, R. A. W.; Griffin, J. M. *Curr. Opin. Electrochem.* **2022**, *35*, 101084. doi: 10.1016/j.coelec.2022.101084
- (61) Xu, L. Q.; Tang, L.; Peng, S.; Mao, Y. F.; Wu, D. L. *Chem. Eng. J.* **2022**, *446*, 137415. doi: 10.1016/j.cej.2022.137415
- (62) Köller, N.; Mankertz, L.; Finger, S.; Linnartz, C. J.; Wessling, M. *Desalination* **2024**, *572*, 117096. doi: 10.1016/j.desal.2023.117096
- (63) Rommerskirchen, A.; Ohs, B.; Hepp, K. A.; Femmer, R.; Wessling, M. *J. Membrane Sci.* **2018**, *546*, 188. doi: 10.1016/j.memsci.2017.10.026
- (64) Tang, K. X.; Yiacoumi, S.; Li, Y. P.; Gabitto, J.; Tsouris, C. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *240*, 116626. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116626
- (65) Wang, M.; Hou, S. J.; Liu, Y.; Xu, X. T.; Lu, T.; Zhao, R.; Pan, L. K. *Electrochim. Acta* **2016**, *216*, 211. doi: 10.1016/j.electacta.2016.09.026
- (66) Siekierka, A. *Desalination* **2022**, *527*, 115569. doi: 10.1016/j.desal.2022.115569
- (67) Siekierka, A.; Bryjak, M. *Desalination* **2019**, *452*, 279. doi: 10.1016/j.desal.2018.10.009
- (68) Jin, J.; Li, M.; Tang, M.; Li, Y.; Liu, Y.; Cao, H.; Li, F. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2020**, *8*, 11424. doi: 10.1021/acssuschemeng.0c04101

- (69) Ding, Z.; Xu, X.; Li, Y.; Wang, K.; Lu, T.; Pan, L. *Desalination* **2019**, *468*, 114078. doi: 10.1016/j.desal.2019.114078
- (70) Gao, M.; Yang, Z.; Liang, W.; Ao, T.; Chen, W. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *324*, 124577. doi: 10.1016/j.seppur.2023.124577
- (71) Inagaki, M.; Huang, Z.-H. *New Carbon Mater.* **2023**, *38*, 405. doi: 10.1016/S1872-5805(23)60736-X
- (72) Kim, M.; Xu, X. T.; Xin, R. J.; Earnshaw, J.; Ashok, A.; Kim, J.; Park, T.; Nanjundan, A. K.; El-Said, W. A.; Yi, J. W.; *et al.* *ACS. Appl. Mater. Inter.* **2021**, *13*, 52034. doi: 10.1021/acsami.1c09107
- (73) Ding, Z. B.; Xu, X. T.; Li, J. B.; Li, Y. Q.; Wang, K.; Lu, T.; Hossain, M. S. A.; Amin, M. A.; Zhang, S. H.; Pan, L. K.; *et al.* *Chem. Eng. J.* **2022**, *430*, 133161. doi: 10.1016/j.cej.2021.133161
- (74) Bao, S.; Xin, C.; Zhang, Y.; Chen, B.; Ding, W.; Luo, Y. *Energies* **2023**, *16*, 1136. doi: 10.3390/en16031136
- (75) Zhang, S. H.; Xu, X. T.; Liu, X. H.; Yang, Q.; Shang, N. Z.; Zhao, X. X.; Zang, X. H.; Wang, C.; Wang, Z.; Shapter, J. G.; *et al.* *Mater. Horiz.* **2022**, *9*, 1708. doi: 10.1039/d1mh01882e
- (76) Xu, X. T.; Yang, T.; Zhang, Q. W.; Xia, W.; Ding, Z. B.; Eid, K.; Abdullah, A. M.; Hossain, M. S. A.; Zhang, S. H.; Tang, J.; *et al.* *Chem. Eng. J.* **2020**, *390*, 124493. doi: 10.1016/j.cej.2020.124493
- (77) Xu, X. T.; Allah, A. E.; Wang, C.; Tan, H. B.; Farghali, A. A.; Khedr, M. H.; Malgras, V.; Yang, T.; Yamauchi, Y. *Chem. Eng. J.* **2019**, *362*, 887. doi: 10.1016/j.cej.2019.01.098
- (78) Tran, N. A. T.; Moon, J.; Kim, J. H.; Park, J. T.; Cho, Y. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *324*, 124519. doi: 10.1016/j.seppur.2023.124519
- (79) Shreerang, D. D.; Rupali, S. M.; Nitish, K.; Vrushali, S.; Shweta, M.; Neetu, J. *Desalination* **2023**, *558*, 116619. doi: 10.1016/j.desal.2023.116619
- (80) Shuqian, C.; Jiarui, X.; Ling, C.; Wei, H.; Junjie, S.; Hui, G. *Processes* **2022**, *10*, 1075. doi: 10.3390/pr10061075
- (81) Li, G.-X.; Hou, P.-X.; Zhao, S.-Y.; Liu, C.; Cheng, H.-M. *Carbon* **2016**, *101*, 1. doi: 10.1016/j.carbon.2015.12.095
- (82) Wang, H. Y.; You, H. H.; Wu, G. Q.; Huang, L.; Yan, J.; Liu, X. J.; Ma, Y. K.; Wu, M. J.; Zeng, Y. L.; Yu, J. X.; *et al.* *Chem. Eng. J.* **2023**, *460*, 141621. doi: 10.1016/j.cej.2023.141621
- (83) Guyes, E. N.; Shocron, A. N.; Chen, Y.; Diesendruck, C. E.; Suss, M. E. *NPJ Clean Water* **2021**, *4*, 22. doi: 10.1038/s41545-021-00109-2
- (84) Na, S.; Hongjian, Z.; Haimin, Z.; Yunxia, Z.; Huijun, Z.; Guozhong, W. *J. Clean. Prod.* **2021**, *316*, 128251. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128251
- (85) Wang, L.; Dykstra, J. E.; Lin, S. H. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, *53*, 3366. doi: 10.1021/acs.est.8b04858
- (86) Datar, S. D.; Mane, R.; Jha, N. *Water Environ. Res.* **2022**, *94*, e10696. doi: 10.1002/wer.10696
- (87) Al Radi, M.; Sayed, E. T.; Alawadhi, H.; Abdelkareem, M. A. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.* **2021**, *52*, 3080. doi: 10.1080/10643389.2021.1902698
- (88) Liu, E.; Lee, L. Y.; Ong, S. L.; Ng, H. Y. *Water Res.* **2020**, *183*, 116059. doi: 10.1016/j.watres.2020.116059
- (89) Wang, Z.; Gong, H.; Zhang, Y.; Liang, P.; Wang, K. *Chem. Eng. J.* **2017**, *316*, 1. doi: 10.1016/j.cej.2017.01.082
- (90) Tauk, M.; Bechelany, M.; Sistat, P.; Habchi, R.; Cretin, M.; Zaviska, F. *Desalination* **2024**, *572*, 117146. doi: 10.1016/j.desal.2023.117146
- (91) Xu, P.; Elson, B.; E Drewes, J. Electrosorption of Heavy Metals with Capacitive Deionization: Water Reuse, Desalination and Resources Recovery. In *Desalination*; 2019; pp 497–523.
- (92) Ma, J.; Zhang, Y.; Collins, R. N.; Tsarev, S.; Aoyagi, N.; Kinsela, A. S.; Jones, A. M.; Waite, T. D. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, *53*, 2739. doi: 10.1021/acs.est.8b07157
- (93) Yan, C.; Liao, Y.; Shen, C.; Weng, X.; Lei, R.; Liao, C.; Zhou, Y.; Wang, M. *Chem. Eng. J.* **2023**, *461*, 142012. doi: 10.1016/j.cej.2023.142012
- (94) Hu, Q.; Wang, D.; Liang, J.; Liu, Z.; Li, J. *Sep. Purif. Technol.* **2024**, *330*, 125494. doi: 10.1016/j.seppur.2023.125494
- (95) Chen, L.; Tong, D. G. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *250*, 117175. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117175
- (96) Huang, Z. W.; Li, Z. J.; Zheng, L. R.; Zhou, L. M.; Chai, Z. F.; Wang, X. L.; Shi, W. Q. *Chem. Eng. J.* **2017**, *328*, 1066. doi: 10.1016/j.cej.2017.07.067
- (97) Liu, N. J.; Liang, H.; Wei, T.; Li, C. C.; Gao, Q. Q.; Wang, N. N.; Guo, R. B.; Mo, Z. L. *Colloid Surface A* **2022**, *649*, 129367. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129367
- (98) Qi, R.; Hongtao, X.; Yang, W.; Jianqi, L.; Dingzhong, Y.; Yan, L.; Limin, Z.; Yang, L.; Yun, W. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *330*, 125292. doi: 10.1016/j.seppur.2023.125292
- (99) Cao, M.; Chen, L.; Xu, W.; Gao, J.; Gui, Y.; Ma, F.; Liu, P.; Xue, Y.; Yan, Y. *J. Water. Process. Eng.* **2022**, *48*, 102930. doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102930
- (100) Yu, H.; Zhou, L.; Li, Z.; Liu, Y.; Ao, X.; Ouyang, J.; Le, Z.; Liu, Z.; Adesina, A. A. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *302*, 122169. doi: 10.1016/j.seppur.2022.122169
- (101) Xue, Y.; Cao, M.; Gao, J.; Gui, Y.; Chen, J.; Liu, P.; Ma, F.; Yan, Y.; Qiu, M. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, *255*, 117753. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117753
- (102) Dalla Valle, A.; Furlan, C. *Technol. Forecast. Soc.* **2014**, *81*, 143. doi: 10.1016/j.techfore.2013.04.019
- (103) Zhu, K.; Lu, S.; Gao, Y.; Zhang, R.; Tan, X.; Chen, C. *Appl. Surf. Sci.* **2017**, *396*, 1726. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.11.230
- (104) Kabay, N.; Demircioglu, M.; Yayli, S.; Gunay, E.; Yuksel, M.;

- Saglam, M.; Streat, M. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1998**, *37*, 1983. doi: 10.1021/ie970518k
- (105) Beltrami, D.; Cote, G.; Mokhtari, H.; Courtaud, B.; Moyer, B. A.; Chagnest, A. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 12002. doi: 10.1021/cr5001546
- (106) Zhou, C.; Ontiveros-Valencia, A.; de Saint Cyr, L. C.; Zevin, A. S.; Carey, S. E.; Krajmalnik-Brown, R.; Rittmann, B. E. *Water Res.* **2014**, *64*, 255. doi: 10.1016/j.watres.2014.07.013
- (107) Liu, P.; Yan, T.; Zhang, J.; Shi, L.; Zhang, D. *J. Mater. Chem. A* **2017**, *5*, 14748. doi: 10.1039/c7ta03515b
- (108) Li, J.; Wang, X.; Wang, H.; Wang, S.; Hayat, T.; Alsaedi, A.; Wang, X. *Environ. Sci.-Nano* **2017**, *4*, 1114. doi: 10.1039/c7en00019g
- (109) Anderson, M. A.; Cudero, A. L.; Palma, J. *Electrochim. Acta* **2010**, *55*, 3845. doi: 10.1016/j.electacta.2010.02.012
- (110) Jung, J.-C.; Jang, S.; Oh, S.; Park, O.-S. *J. Chem. Sci.* **2010**, *122*, 833. doi: 10.1007/s12039-010-0071-2
- (111) Ma, C.-Y.; Huang, S.-C.; Chou, P.-H.; Den, W.; Hou, C.-H. *Chemosphere* **2016**, *146*, 113. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.012
- (112) Patel, S. K.; Ritt, C. L.; Deshmukh, A.; Wang, Z.; Qin, M.; Epsztein, R.; Elimelech, M. *Energy Environ. Sci.* **2020**, *13*, 1694. doi: 10.1039/d0ee00341g
- (113) Thamilselvan, A.; Nesaraj, A. S.; Noel, M. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2016**, *13*, 2961. doi: 10.1007/s13762-016-1061-9
- (114) Wu, X.; Li, K.; Ying, S.; Liu, L.; Wang, M.; Liao, Y. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2019**, *321*, 977. doi: 10.1007/s10967-019-06650-2
- (115) Liu, Y.; Tang, X.; Zhou, L.; Liu, Z.; Ouyang, J.; Dai, Y.; Le, Z.; Adesina, A. A. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *290*, 120827. doi: 10.1016/j.seppur.2022.120827
- (116) Tang, X.; Zhou, L.; Xi, J.; Ouyang, J.; Liu, Z.; Chen, Z.; Adesina, A. A. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, *274*, 119005. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119005
- (117) Tang, X.; Zhou, L.; Yu, H.; Dai, Y.; Ouyang, J.; Liu, Z.; Wang, Y.; Le, Z.; Adesina, A. A. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *278*, 119604. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119604
- (118) Gao, X.; Omosebi, A.; Landon, J.; Liu, K. *Energy Environ. Sci.* **2015**, *8*, 897. doi: 10.1039/c4ee03172e
- (119) Liao, Y.; Yan, C.; Zeng, K.; Liao, C.; Wang, M. *Chem. Eng. J.* **2021**, *424*, 130351. doi: 10.1016/j.cej.2021.130351
- (120) Liao, Y.; Lei, R.; Weng, X.; Yan, C.; Fu, J.; Wei, G.; Zhang, C.; Wang, M.; Wang, H. *J. Hazard. Mater.* **2023**, *442*, 130054. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130054
- (121) Tian, S.; Zhang, X.; Zhang, Z. *Chem. Eng. J.* **2021**, *409*, 128200. doi: 10.1016/j.cej.2020.128200
- (122) Hussain, T.; Wang, Y.; Xiong, Z.; Yang, J.; Xie, Z.; Liu, J. *J. Colloid Interface Sci.* **2018**, *532*, 343. doi: 10.1016/j.jcis.2018.07.129
- (123) Yan, C.; Kanaththage, Y. W.; Short, R.; Gibson, C. T.; Zou, L. *Desalination* **2014**, *344*, 274. doi: 10.1016/j.desal.2014.03.041
- (124) Zhou, J.; Zhou, H.; Zhang, Y.; Wu, J.; Zhang, H.; Wang, G.; Li, J. *Chem. Eng. J.* **2020**, *398*, 125460. doi: 10.1016/j.cej.2020.125460
- (125) Yu, H.; Zhou, L.; Liu, Y.; Ao, X.; Ouyang, J.; Liu, Z.; Adesina, A. A. *Desalination* **2023**, *564*, 116773. doi: 10.1016/j.desal.2023.116773
- (126) Shuang, M.; Zhou, L.; Liu, Y.; Yu, H.; Ao, X.; Ouyang, J.; Liu, Z.; Shehzad, H.; Adesina, A. A. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 111498. doi: 10.1016/j.jece.2023.111498
- (127) Tang, W.; Liang, J.; He, D.; Gong, J.; Tang, L.; Liu, Z.; Wang, D.; Zeng, G. *Water Res.* **2019**, *150*, 225. doi: 10.1016/j.watres.2018.11.064
- (128) Hatzell, K. B.; Hatzell, M. C.; Cook, K. M.; Boota, M.; Housel, G. M.; McBride, A.; Kumbur, E. C.; Gogotsi, Y. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 3040. doi: 10.1021/es5055989
- (129) Zhou, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Wang, D.; Zhou, H.; Li, J. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *283*, 120172. doi: 10.1016/j.seppur.2021.120172
- (130) Bales, C.; Kinsela, A. S. S.; Miller, C.; Wang, Y.; Zhu, Y.; Lian, B.; Waite, T. D. *Environ. Sci. Technol.* **2023**, *57*, 11345. doi: 10.1021/acs.est.3c03477
- (131) Gamaethiralalage, J. G.; Singh, K.; Sahin, S.; Yoon, J.; Elimelech, M.; Suss, M. E.; Liang, P.; Biesheuvel, P. M.; Zornitta, R. L.; de Smet, L. C. P. M. *Energy Environ. Sci.* **2021**, *14*, 1095. doi: 10.1039/d0ee03145c
- (132) Rana-Madaria, P.; Nagarajan, M.; Rajagopal, C.; Garg, B. S. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2005**, *44*, 6549. doi: 10.1021/ie050321p
- (133) Hou, C.-H.; Huang, C.-Y. *Desalination* **2013**, *314*, 124. doi: 10.1016/j.desal.2012.12.029
- (134) Avraham, E.; Yaniv, B.; Soffer, A.; Aurbach, D. *J. Phys. Chem. C* **2008**, *112*, 7385. doi: 10.1021/jp711706z
- (135) Huang, Z.; Lu, L.; Cai, Z.; Ren, Z. J. *J. Hazard. Mater.* **2016**, *302*, 323. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.064
- (136) Kumar, S.; Aldaqqa, N. M.; Alhseinat, E.; Shetty, D. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2023**, *62*, e202302180. doi: 10.1002/anie.202302180
- (137) Han, B.; Cheng, G.; Wang, Y.; Wang, X. *Chem. Eng. J.* **2018**, *360*, 364. doi: 10.1016/j.cej.2018.11.236
- (138) Liu, Q.; Wang, N.; Xie, B.; Xiao, D. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *308*, 122866. doi: 10.1016/j.seppur.2022.122866
- (139) Zhang, Y.; Zhou, J.; Wang, D.; Cao, R.; Li, J. *Chem. Eng. J.* **2022**, *430*, 132702. doi: 10.1016/j.cej.2021.132702
- (140) Wang, D.; Zhou, J.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Liang, J.; Zhang, J.; Li, J. *Chem. Eng. J.* **2023**, *463*, 142413. doi: 10.1016/j.cej.2023.142413
- (141) Xiang, S.; Mao, H.; Geng, W.; Xu, Y.; Zhou, H. *J. Hazard. Mater.* **2022**, *431*, 128591. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128591
- (142) Liu, C.; Hsu, P.-C.; Xie, J.; Zhao, J.; Wu, T.; Wang, H.; Liu, W.; Zhang, J.; Chu, S.; Cui, Y. *Nat. Energy* **2017**, *2*, 17007.

- doi: 10.1038/nenergy.2017.7
- (143) Liao, Y.; Wang, M.; Chen, D. *Appl. Surf. Sci.* **2019**, *484*, 83.
doi: 10.1016/j.apsusc.2019.04.103
- (144) Yuan, Y.; Yu, Q.; Cao, M.; Feng, L.; Feng, S.; Liu, T.; Feng, T.; Yan, B.; Guo, Z.; Wang, N. *Nat. Sustain.* **2021**, *4*, 708.
doi: 10.1038/s41893-021-00709-3
- (145) Wongsawaeng, D.; Wongjaikham, W.; Hosemann, P.; Swantomo, D.; Basuki, K. T. *Int. J. Energy Res.* **2020**, *45*, 1748.
doi: 10.1002/er.5845
- (146) Ma, C.; Gao, J.; Wang, D.; Yuan, Y.; Wen, J.; Yan, B.; Zhao, S.; Zhao, X.; Sun, Y.; Wang, X.; *et al.* *Adv. Sci.* **2019**, *6*, 1900085.
doi: 10.1002/advs.201900085
- (147) Lindner, H.; Schneider, E. *Energy Econ.* **2015**, *49*, 9.
doi: 10.1016/j.eneco.2015.01.016
- (148) Zhu, W.; Li, X.; Wang, D.; Fu, F.; Liang, Y. *Nanomaterials* **2023**, *13*, 2005. doi: 10.3390/nano13132005
- (149) Li, P.; Wang, Y.; Wang, J.; Dong, L.; Zhang, W.; Lu, Z.; Liang, J.; Pan, D.; Fan, Q. *Chem. Eng. J.* **2021**, *414*, 128810.
doi: 10.1016/j.ccej.2021.128810
- (150) Feng, L.; Wang, H.; Feng, T.; Yan, B.; Yu, Q.; Zhang, J.; Guo, Z.; Yuan, Y.; Ma, C.; Liu, T.; *et al.* *Angew. Chem. Int. Edit.* **2022**, *61*, e202101015. doi: 10.1002/anie.202101015
- (151) Gan, J. L.; Zhang, L. Y.; Wang, Q. L.; Xin, Q.; Hu, E.; Lei, Z. W.; Wang, H. Q. *Desalination* **2023**, *545*, 116154.
doi: 10.1016/j.desal.2022.116154
- (152) Qin, X. D.; Yang, W. T.; Yang, W. K.; Ma, Y.; Li, M. L.; Chen, C.; Pan, Q. H. *Micropor. Mesopor. Mat.* **2021**, *323*, 111231.
doi: 10.1016/j.micromeso.2021.111231
- (153) Xu, H. B.; Bai, Z. Y.; Zhang, M. L.; Wang, J.; Yan, Y. D.; Qiu, M.; Chen, J. M. *Dalton Trans.* **2020**, *49*, 7535. doi: 10.1039/d0dt00618a
- (154) Chen, T.; Yu, K. F.; Dong, C. X.; Yuan, X.; Gong, X.; Lian, J.; Cao, X.; Li, M. Z.; Zhou, L.; Hu, B. W.; *et al.* *Coordin. Chem. Rev.* **2022**, *467*, 214615. doi: 10.1016/j.ccr.2022.214615
- (155) Liu, X. L.; Xie, Y. H.; Hao, M. J.; Chen, Z. S.; Yang, H.; Waterhouse, G. I. N.; Ma, S. Q.; Wang, X. K. *Adv. Sci.* **2022**, *9*, 2201735. doi: 10.1002/advs.202201735
- (156) Pu, Y. D.; Qiang, T. T.; Ren, L. F. *Int. J. Biol. Macromol.* **2022**, *206*, 699. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.03.019
- (157) Wu, R. Z.; Han, Z.; Chen, H. Y.; Cao, G.; Shen, T. T.; Cheng, X.; Tang, Y. Y. *ACS ES&T Water* **2021**, *1*, 980.
doi: 10.1021/acsestwater.0c00262
- (158) Zhang, Y. F.; Gao, J.; Deng, Z. Q.; Li, Z. M.; Wang, F. J.; Chen, S. S.; Deng, P. Y. *Adv. Sustain. Syst.* **2023**, *7*, 2300393.
doi: 10.1002/advs.202300393
- (159) Das, A.; Gupta, J.; Gupta, N.; Banerjee, R. H.; Anitha, M.; Singh, D. K. *Inorg. Chem. Commun.* **2023**, *156*, 111284.
doi: 10.1016/j.inoche.2023.111284
- (160) Zhao, Z. W.; Lei, R. C.; Zhang, Y. Z.; Cai, T. T.; Han, B. J. *Mol. Liq.* **2022**, *367*, 120514. doi: 10.1016/j.molliq.2022.120514
- (161) Yu, K.; Pan, H. Y.; Jiang, Y. F.; Zhang, T. R.; Zhang, H. G.; Ma, F.; Song, H.; Yang, Y.; Pan, J. M. *Desalination* **2023**, *566*, 116893.
doi: 10.1016/j.desal.2023.116893
- (162) Lin, K.; Su, W. Y.; Feng, L. J.; Wang, H.; Feng, T. T.; Zhang, J. C.; Cao, M.; Zhao, S. L.; Yuan, Y. H.; Wang, N. *Chem. Eng. J.* **2021**, *430*, 133121. doi: 10.1016/j.ccej.2021.133121
- (163) Chen, S. P.; Luo, Q.; Wang, W.; Li, L. Q.; Li, Y. L.; Wang, N. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *336*, 126170.
doi: 10.1016/j.seppur.2023.126170
- (164) Liu, X.; Yang, J.-L.; Rittschof, D.; Maki, J. S.; Gu, J.-D. *Trends. Ecol. Evol.* **2022**, *37*, 469. doi: 10.1016/j.tree.2022.02.009
- (165) Pu, Y.; Qiang, T.; Ren, L. *Desalination* **2022**, *531*, 115721.
doi: 10.1016/j.desal.2022.115721
- (166) Shi, S.; Wu, R.; Meng, S.; Xiao, G.; Ma, C.; Yang, G.; Wang, N. *J. Hazard. Mater.* **2022**, *436*, 128983.
doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128983
- (167) Sun, Y.; Liu, R.; Wen, S.; Wang, J.; Chen, L.; Yan, B.; Peng, S.; Ma, C.; Cao, X.; Ma, C.; *et al.* *Acs. Appl. Mater. Inter.* **2021**, *13*, 21272. doi: 10.1021/acsami.1c02882
- (168) Qi, L.; Hu, Y.; Liu, Z.; An, X.; Bar-Zeev, E. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 9684. doi: 10.1021/acs.est.7b06382
- (169) Wei, Q.; Wu, C.; Zhang, J.; Cui, Z.; Jiang, T.; Li, J. *React. Funct. Polym.* **2021**, *169*, 105068.
doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105068
- (170) Lei, J.; Yu, F.; Xie, H.; Ma, J. *Chem. Sci.* **2023**, *14*, 3610.
doi: 10.1039/d2sc06946f
- (171) Jin, D. H.; Wang, Y.; Song, D. L.; Zhu, J. H.; Yu, J.; Liu, Q.; Liu, J. R.; Li, R. M.; Liu, P. L.; Wang, J. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *330*, 125186. doi: 10.1016/j.seppur.2023.125186
- (172) Jiao, G. J.; Ma, J. L.; Zhang, J. Q.; Li, Y. C.; Liu, K. N.; Sun, R. C. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *287*, 120571.
doi: 10.1016/j.seppur.2022.120571
- (173) Mei, D.; Liu, L.; Li, H.; Wang, Y.; Ma, F.; Zhang, C.; Dong, H. *J. Hazard. Mater.* **2021**, *422*, 126872.
doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126872
- (174) Herzberg, M.; Pandit, S.; Mauter, M. S.; Oren, Y. *J. Membrane Sci.* **2020**, *596*, 117564. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117564
- (175) Liu, P.; An, M. Y.; He, T.; Li, P.; Ma, F. Q. *Materials* **2023**, *16*, 6451. doi: 10.3390/ma16196451
- (176) Pandit, S.; Shanbhag, S.; Mauter, M.; Oren, Y.; Herzberg, M. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 10022.
doi: 10.1021/acs.est.6b06339
- (177) Jiang, Y.; Jin, L.; Wei, D.; Alhassan, S. I.; Wang, H.; Chai, L. *Int. J.*

- Env. Res. Pub. He.* **2022**, *19*, 10599. doi: 10.3390/ijerph191710599
- (178) Liu, M.; He, M.; Han, J.; Sun, Y.; Jiang, H.; Li, Z.; Li, Y.; Zhang, H. *Sustainability* **2022**, *14*, 14429. doi: 10.3390/su142114429
- (179) Liu, Y.; Gao, X.; Zhang, L.; Du, X.; Dou, X.; Shen, X.; Zhu, H.; Yuan, X. *Curr. Nanosci.* **2022**, *18*, 2. doi: 10.2174/1573413716666210101120710
- (180) Xu, Y.; Zhong, Z.; Zeng, X.; Zhao, Y.; Deng, W.; Chen, Y. *Appl. Sci.-Basel.* **2023**, *13*, 5635. doi: 10.3390/app13095635
- (181) Zhang, B.; Boretti, A.; Castelletto, S. *Chem. Eng. J.* **2022**, *435*, 134959. doi: 10.1016/j.cej.2022.134959
- (182) Suss, M. E.; Presser, V. *Joule* **2018**, *2*, 10. doi: 10.1016/j.joule.2017.12.010
- (183) Suss, M. E.; Porada, S.; Sun, X.; Biesheuvel, P. M.; Yoon, J.; Presser, V. *Energy Environ. Sci.* **2015**, *8*, 2296. doi: 10.1039/c5ee00519a
- (184) Mahmood, A.; Wang, J.-L. *Energy Environ. Sci.* **2021**, *14*, 90. doi: 10.1039/d0ee02838j
- (185) Ramakrishna, S.; Zhang, T.-Y.; Lu, W.-C.; Qian, Q.; Low, J. S. C.; Yune, J. H. R.; Tan, D. Z. L.; Bressan, S.; Sanvito, S.; Kalidindi, S. *R. J. Intell. Manuf.* **2019**, *30*, 2307. doi: 10.1007/s10845-018-1392-0
- (186) Chaikittisilp, W.; Yamauchi, Y.; Ariga, K. *Adv. Mater.* **2022**, *34*, 2107212. doi: 10.1002/adma.202107212