

活性炭驱动去除PFAS的结构-吸附关系与新型吸附机理

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40819.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

活性炭驱动去除PFAS的结构-吸附关系与新型吸附机理。全氟和多氟烷基物质（PFAS）是一类高度持久的人造化学品。数十年的制造和广泛使用已导致其在环境中积累，并且如今在人体中也被广泛检出。有证据表明，近一半的美国自来水中至少含有一种PFAS。同时，毒理学研究证实，PFAS暴露具有致癌性、免疫毒性和内分泌干扰效应。因此，从水中紧急去除PFAS已成为全球研究优先事项。

PFAS的典型处理策略是先通过吸附进行富集，然后将其降解。活性炭（AC）因其低成本、可再生性以及能够同时去除多种微污染物，成为PFAS富集中最广泛使用的吸附剂。然而，尽管有这些优势，传统活性炭仍存在关键缺陷：整体吸附性能较低、对短链PFAS去除效果差、在复杂环境基质中缺乏选择性，以及长期运行的经济可持续性面临挑战。活性炭研究的最新进展为解决这些瓶颈提供了新的方法。本综述系统剖析了这些新一代吸附剂，并深入探讨了结构-吸附关系。此外，还讨论了显著提升传统吸附剂吸附容量的创新辅助技术。

传统活性炭主要通过疏水相互作用吸附PFAS，其中微孔表面积起着关键作用。具有高微孔表面积和疏水性的吸附剂通常表现出最佳性能，因此对长链PFAS具有更好的去除能力。活性炭的疏水性可以通过优化加热条件、涂覆疏水聚合物或在表面掺杂氟基团来增强。此外，活性炭还可以通过引入含氮官能团来增加正电荷位点，以及通过去除表面氧基团来增加 π 电子碱性，从而在疏水相互作用之外促进静电吸附。常见的氮接枝策略包括掺杂季铵基团、胺基团或金属。在氢气气氛下热解可以稳定碳原子，实现去官能团化，并产生最少的CO₂和CO，以避免冷却过程中增加氧掺杂。去官能团化的活性炭增强了阴离子交换能力，并避免了大分子天然有机物的阻碍。

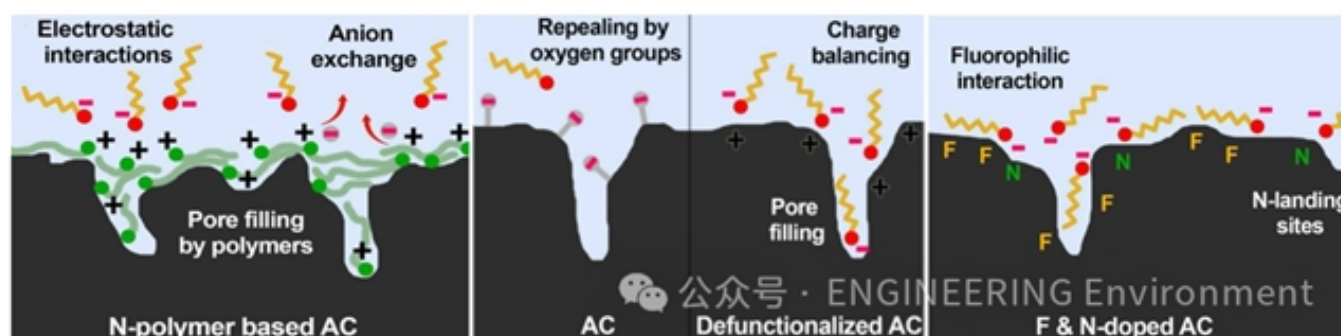


图1.含N聚合物接枝活性炭、去官能团化活性炭以及N、F共接枝活性炭上的PFAS吸附机制

在创新辅助技术中，引入纳米气泡是一种提升吸附性能的有效技术，其形成的空气-水界面吸附PFAS时具有比水相主体更低的能量，有利于长链PFAS的积累。然而，该技术对短链PFAS效率较低，因为短链PFAS的平均中心距离较短，并且吉布斯自由能较低，可以轻易克服能垒重新进入水相。与微米气泡不同，纳米气泡高度稳定，在合适的表面条件下，可以显著提高PFAS吸附量，例如PFOS去除容量可达15mmol/g。此外，该技术还通过脱气实现高效脱附。

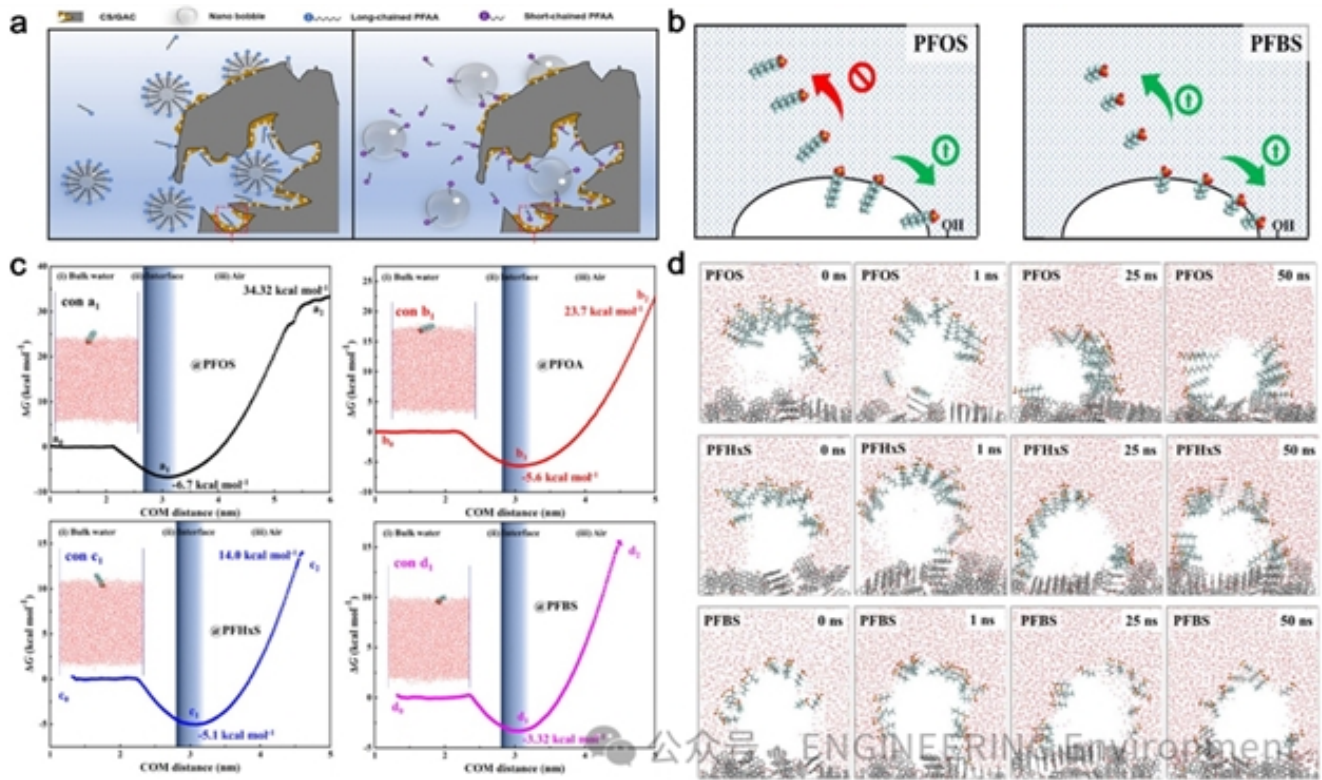


图2.长链和短链PFAS在纳米气泡界面上的吸附行为

针对短链PFAS的一项高效技术是将水限制在水相主体和PFAS通常无法进入的疏水性超微孔中。在高湿条件下进行蒸汽处理可有效地将水引入这些孔隙，水在其中形成限域结构，并在吸附过程中保持稳定。这种限域水降低了短链PFAS吸附的能垒，为PFAS头基提供氢键位点，并促进直接辅助转移效应。这些进展的协同作用降低了吸附能垒，实现了短链PFAS的高效吸附。重要的是，该技术更倾向于亲水性短链PFAS而非长链PFAS。

图3.不同活性炭去除PFAS的性能比较

尽管已有研究取得了诸多进展，但依然存在重大挑战。目前，去除短链和超短链PFAS的可行技术仍然缺乏。虽然氮改性吸附剂对长链PFAS表现良好，但它们对短链同系物的效果仍然有限。水限域纳米孔和纳米气泡辅助吸附等创新辅助技术虽然在实验室规模上取得了优异的效果，但仍然需要开展中试规模的工程应用，以验证其实际可行性。此外，经济可持续性也是一个重要问题，生命周期评估表明现有的颗粒活性炭系统相较于其他替代方案成本较高、环境影响较大。因此，未来的研究需要聚焦于开发具高效实用的短链PFAS去除技术、推进新兴方法的中试规模验证、提高活性炭性能和再生能力，并尝试采用低成本合成方法和废弃生物质原料进行活性炭制备，以实现PFAS的高效、经济、安全去除。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fese/EN/10.1007/s11783-025-1998-3>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：邓述波等 来源：《工程·环境》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发