

碳质材料吸附土壤沉积物中有机污染物的研究进展

吕慧茹

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年11月20日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2026年1月6日

摘要

为解决土壤和沉积物有机污染治理问题, 本文系统阐述了生物炭、活性炭、碳纳米材料等典型碳质材料在其有机污染物吸附中的研究进展。通过分析材料制备与改性对吸附性能的规律, 揭示物理吸附、化学吸附等多种吸附机制, 探讨碳质材料性质、污染物性质等因素的影响, 并结合实际应用案例评估技术有效性。结果表明: 生物炭性价比高、兼具土壤改良与碳封存功能, 适合农田轻度污染修复, 活性炭适合高浓度污染应急处理, 碳纳米材料对低浓度难降解污染物去除优势显著。未来需重点突破规模化制备成本控制、长期稳定性优化及二次污染防控技术, 为土壤沉积物有机污染高效修复提供可靠技术支撑, 切实保障生态系统安全。

关键词

碳质材料, 土壤沉积物, 有机污染物, 吸附机制

Research Progress on the Adsorption of Organic Pollutants in Soil Sediments by Carbonaceous Materials

Huiru Lv

School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: November 20, 2025; accepted: December 24, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

To address the remediation of organic pollutants in soil and sediments, this paper systematically

文章引用: 吕慧茹. 碳质材料吸附土壤沉积物中有机污染物的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(1): 18-25.
DOI: 10.12677/aep.2026.161003

reviews research progress on the adsorption of organic contaminants using typical carbon-based materials such as biochar, activated carbon, and carbon nanomaterials. By analyzing the patterns of adsorption performance influenced by material preparation and modification, it reveals multiple adsorption mechanisms including physical and chemical adsorption. The study explores the effects of factors such as material properties and pollutant characteristics, and evaluates the effectiveness of these technologies through practical application cases. Results indicate that biochar offers high cost-effectiveness while simultaneously improving soil quality and sequestering carbon, making it suitable for remediating lightly contaminated farmland. Activated carbon is ideal for emergency treatment of high-concentration contamination, while carbon nanomaterials demonstrate significant advantages in removing low-concentration, refractory pollutants. Future research should focus on breakthroughs in controlling large-scale production costs, optimizing long-term stability, and developing secondary pollution prevention technologies. These efforts will provide reliable technical support for efficient remediation of organic pollutants in soil and sediments, effectively safeguarding ecosystem security.

Keywords

Carbonaceous Materials, Soil Sediments, Organic Pollutants, Adsorption Mechanisms

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤与沉积物是有机污染物在环境中的重要“汇”，在农药滥用、工业排放等人为活动影响下，多环芳烃、抗生素和农药等有机污染物在其持续累积。调查数据显示，我国 1.1% 的耕地土壤有机污染物超标，部分工业区周边土壤多环芳烃含量超标的 5~10 倍，沉积物中有机污染物污染问题更为严峻，例如长江口沉积物中多环芳烃平均含量已达 125.6 ng/g [1]。这些污染物具有生物累积性与慢性毒性，可通过食物链传递威胁人体健康，如长期暴露于多环芳烃污染环境会增加肺癌发病风险。传统土壤沉积物修复技术如疏浚、化学淋洗等存在成本高、破坏生态结构、易引发二次污染等局限，而碳质材料因具有高比表面积、丰富孔隙结构及表面化学性质，能通过物理吸附、化学作用等高效固定有机污染物，且部分材料可实现农业废弃物资源化利用与碳封存，是目前环境修复领域的研究热点[2]。

当前碳质材料吸附研究已取得显著进展，在材料研发方面，通过优化热解温度、采用 KOH 活化等技术，材料的吸附性能显著提高，在吸附机制方面，借助 X 射线光电子能谱等手段，明确 π - π 相互作用、氢键结合等在有机污染物吸附中的主导作用，在应用实践方面，挪威特隆赫姆港采用活性炭薄层覆盖技术，使沉积物中石油烃释放量降低 90% [3]。但该领域仍存在关键瓶颈：一是材料性能一致性差，不同原料与制备工艺导致碳质材料吸附容量差异可达 2~3 个数量级，二是复杂环境适应性弱，土壤中天然有机质会与有机污染物竞争吸附位点，导致实际修复效果比实验室条件下降 30%~50%，三是环境应用成本高，规模化应用受限。

本文旨在阐述碳质材料吸附有机污染物的核心研究成果，重点梳理了材料类型、制备工艺与改性技术的协同作用，吸附性能影响因素，作用机制及实际应用效果，提出未来研究方向，为碳质材料吸附技术的优化与修复土壤和沉积物有机污染应用提供理论支撑。研究范围涵盖农田土壤、工业区土壤及河流/海洋沉积物等典型污染场景，聚焦农药类、抗生素类等重点有机污染物。

2. 碳质材料制备及改性

2.1. 生物炭

生物炭是由生物质前驱体(如木材、动物粪便等)通过热化学转化制得的富碳材料。其具备吸附能力强、环境相容性好、成本低廉与应用广泛等特点，是一类具有潜力的多功能材料[4]。生物炭的吸附性能主要受原料类型、热解条件及改性工艺等多种因素影响。由于不同生物质自身组成与结构存在差异，制备过程中参数的影响，最终生物炭在孔隙结构与表面性质上往往呈现较大区别[5]。见下列表 1，热解是生物炭制备的核心方法，根据升温速率等参数，主要分为慢速热解与快速热解两种方法。近年来发展的微波辅助热解技术能够将传统数小时的过程压缩至 30 分钟以内，并可使生物炭比表面积提高 30%~50%。此外，原料特性对生物炭性能具有决定性作用，例如木质生物炭因石墨化程度较高，对多环芳烃的吸附能力通常达到生物炭的几倍。

2.2. 活性炭

活性炭是通过炭化与活化工艺制得的多孔碳材料，其孔隙结构发达，比表面积通常介于 1000~3000 m²/g，且微孔容积占比超过 60%，因而对有机污染物的吸附能力普遍优于常规生物炭[6]。该材料的制备主要包括炭化与活化两个阶段，炭化阶段使原料在 400℃~600℃的缺氧条件下热解，去除挥发分并形成碳前驱体，活化阶段则进一步通过物理或化学方法扩孔造孔。物理活化常以水蒸气或 CO₂ 为活化剂，在 800℃~1000℃下蚀刻碳骨架，化学活化则使用 KOH、H₃PO₄ 等试剂，在较低温度下通过化学反应形成孔隙结构。

2.3. 碳纳米材料

Table 1. The different adsorption properties and application characteristics of carbonaceous materials
表 1. 碳质材料的不同吸附性能及应用特性

对比维度	生物炭	活性炭	碳纳米材料	参考文献
制备方法	热解法、气化法、水热炭化法和微波热解法，微波辅助热解 30 分钟内完成，比表面积提升 30%~50%	炭化加活化两阶段，炭化为 400℃~600℃缺氧热解，活化分物理与化学方式。物理活化用水蒸气或 CO ₂ ，温度 800℃~1000℃；化学活化用 KOH 或 H ₃ PO ₄ ，温度较低	碳纳米管采用化学气相沉积法；石墨烯多用植物提取物还原工艺，无需强酸强碱，环境友好性好	[4]
物化性质	富碳，孔隙与表面性质受原料、热解条件影响大	多孔结构发达，比表面积 1000~3000 m ² /g，微孔容积占比超 60	纳米尺度结构，表面活性超高	[6]
吸附性能	吸附力强，木质生物炭对多环芳烃吸附效果优于普通生物炭	有机污染物吸附性能优于常规生物炭	表面活性高，有机污染物吸附潜力大	[5]
应用成本	低，原料易获取且制备工艺简单	中，需额外活化步骤，能耗高于生物炭	高，工艺复杂成本规模化生产难度大	[5]
环境风险	低，环境相容性好，无明显生物毒性	低，环境影响小，无明确风险报道	中，存在潜在生物毒性，可能抑制土壤微生物多样性	[4]
技术成熟度	高，制备技术成熟，田间应用广泛	高，工艺标准化，工业规模化应用体系完善	中，实验室技术成熟，大规模田间应用受限	[7]

碳纳米材料包括碳纳米管、石墨烯、碳量子点等，具有纳米尺度结构与超高表面活性。碳纳米管的制备以化学气相沉积法为主，通过优化 Ni-Fe 合金催化剂与乙烯碳源比例，石墨烯多采用绿色制备技术，

如植物提取物还原氧化石墨烯,避免强酸强碱使用,环境友好性显著提升[7]。但碳纳米材料存在潜在生物毒性,可能对土壤微生物群落多样性产生抑制作用,且制备成本高昂,限制了其大规模田间应用。

2.4. 改性增强技术

化学改性是提高碳质材料吸附性能的主要方法。酸洗改性可使生物炭表面含氧官能团数量增加 2~3 倍,对极性有机污染物的吸附容量提升 50%以上[8]。Martins 等[9]选用澳洲坚果壳经 NaOH 改性制备的活性炭呈现出高表面积(1524 m²/g),由扫描电镜图可观察到坚果壳改性前表面没有明显的多孔结构,而改性后表面出现了大量的孔道。其材料对四环素的最大吸附容量为 455.33 mg/g,所以经过改性的材料可提高吸附容量。氮掺杂改性可在碳材料表面引入吡啶氮、吡咯氮等活性位点,增强与有机污染物的 π - π 相互作用,氮掺杂石墨烯对萘的吸附容量比未改性样品高 60%。物理改性可有效影响碳材料的表面性质,等离子体处理能在数分钟内在材料表面产生纳米刻蚀,使其比表面积增加 15%~25%,而高温热处理能降低生物炭表面的挥发性有机物,增强材料的稳定性和对有机污染物的吸附选择性[10]。

3. 吸附影响因素与作用机制

3.1. 吸附影响因素

3.1.1. 碳质材料的理化性质

碳质材料的比表面积和孔隙结构是影响其吸附有机污染物能力的重要因素。材料比表面积越大、微孔比例越高,吸附位点越丰富,例如比表面积为 2000 m²/g 的活性炭对苯的吸附容量是 500 m²/g 样品的 3~4 倍[11]。但孔隙结构需与污染物分子尺寸匹配,小分子污染物更易被微孔吸附,大分子污染物则依赖中孔扩散,如高温竹炭因微孔与中孔发育均衡,对不同分子尺寸的有机污染物均表现出优异吸附性能。表面化学性质直接影响吸附机制,富含含氧官能团的碳材料通过氢键与静电作用吸附极性污染物,而高石墨化程度的碳材料通过 π - π 相互作用吸附有机污染物。羧基化碳纳米管对磺胺甲恶唑的吸附容量比未改性样品高 80%,主要源于羧基与磺胺基团的氢键结合,氮掺杂碳材料表面的吡啶氮可与硝基苯形成配位键,化学吸附贡献占总吸附量的 60% [12]。

3.1.2. 有机污染物性质

有机污染物的理化性质也会影响碳质材料对有机污染物的吸附。其中,污染物的疏水性,常以辛醇-水分配系数(K_{ow})衡量,扮演着核心角色。 $\log K_{ow}$ 值越高,表明污染物的疏水性越强,越倾向于通过疏水分配作用被吸附到碳材料疏水表面。例如,强疏水性污染物芘在生物炭上的吸附量,可达到弱疏水性苯酚的 5 至 6 倍[13]。此外,污染物的分子极性及其解离状态也显著影响其吸附机制,非极性污染物主要依靠疏水作用与 π - π 相互作用,而极性污染物的吸附则更依赖于氢键、静电作用等极性相互作用。

3.1.3. 吸附环境

吸附环境会对碳质材料吸附有机污染物产生一定影响,pH 通过改变碳材料表面电荷与污染物解离状态发挥作用,当环境 pH 高于材料的零电荷点(pH_{pzc})时,其表面带负电,通过静电作用吸附阳离子污染物,当 pH 低于 pH_{pzc} 时,表面带正电,更容易吸附阴离子污染物。生物炭的 pH_{pzc} 通常为 6.5~8.0,在酸性土壤(pH=4.5)中对带正电的抗生素吸附容量比中性土壤高 40%,而氧化石墨烯的 pH_{pzc} 约为 3.0,在碱性土壤中更易吸附阳离子型污染物[14]。碳材料对有机污染物的吸附受温度影响,由于多数吸附过程为放热性质,升温通常会引起吸附容量降低。如 25℃时活性炭对甲苯的吸附容量比 45℃高 25%,但化学吸附为主的过程可能为吸热反应,温度升高反而促进吸附,35℃时氮掺杂生物炭对硝基苯的吸附容量比 25℃高 18% [15]。

3.2. 吸附作用机制

3.2.1. 表面相互作用

表面作用是污染物与碳质材料的关键机制，主要是依靠材料表面结构与官能团的活性。分配作用是低分子量、高浓度有机污染物的重要吸附路径，污染物分子会溶解并分散到碳质材料的无定形碳基质中，呈现非竞争性吸附特征，低温生物炭因含较多无定形碳，所以其机制贡献会更加明显[16]。在该过程中，具备石墨化共轭结构的碳材料可作为电子供体，与作为电子受体的污染物芳香环发生电子转移，从而形成稳定吸附。通常，高温制备的生物炭因其石墨化程度更高，共轭结构更为发达，对多环芳烃类污染物的吸附作用也显著增强[17]。此外，表面官能团还会通过氢键、静电引力等作用增强吸附选择性，含氧官能团可与极性污染物形成氢键，含氮官能团则通过电荷调节强化与离子型污染物的静电结合。

3.2.2. 孔隙截留作用

碳质材料的多孔结构为吸附提供物理空间，其作用机制核心是孔径匹配与截留效应。微孔(孔径 < 2 nm)通过“微孔填充”效应高效截留小分子污染物。对于苯、甲苯等挥发性有机物，其吸附容量与吸附剂的比表面积和微孔比例均呈正相关，表明孔结构是决定其吸附性能的关键参数。介孔(2~50 nm)则作为污染物分子的扩散通道，解决大分子污染物在微孔中扩散受阻的问题，高温制备的碳材料因介孔发育均衡，对不同分子尺寸的污染物均表现出稳定吸附性能。大孔(> 50 nm)虽吸附位点较少，但能改善材料在土壤中的分散性，同时为微生物附着提供空间，间接促进吸附和降解作用[18]。在分子模拟中分别计算库仑(电荷)力和范德华(VDW)力的能量贡献，结果显示：在孔径较大的活性炭中，VDW 力占总吸附能的约 70%，库仑力约 30%；引入羰基/羧基官能团后，库仑力提升至约 45%，导致吸附平衡压力下降、吸附效率提升[19]。

3.2.3. 协同作用

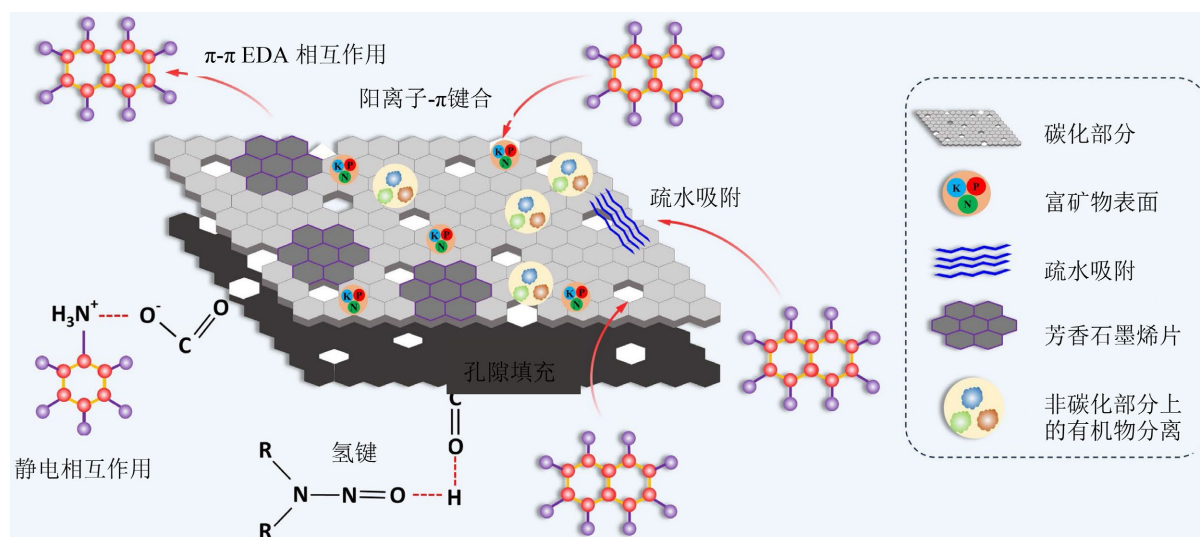


Figure 1. Mechanism of soil pollutant remediation mediated by biochar [21]

图 1. 生物炭介导的土壤污染物修复机制[21]

在复杂土壤环境中，单一机制很难完成高效吸附，多机制协同作用是实际修复中的主导模式(如图 1)。对于非极性污染物，通常先通过疏水作用聚集于碳材料疏水表面，再经 π - π EDA 作用强化结合，最后通过微孔填充实现稳定截留，三种作用机制可使吸附容量比单一机制提升 20%~40%。对于极性污染物，则

以表面官能团的氢键、静电引力为核心,随后是介孔扩散与孔隙截留,形成吸附和固定的作用机制。复合碳质材料的协同效应更显著,如磁性生物炭可同时通过表面吸附、孔隙截留与磁分离回收功能的相互作用[20]。

4. 碳质材料修复土壤沉积物有机物污染案例

某南方稻田土壤受邻苯二甲酸酯污染,采用花生壳生物炭投加 2%进行修复,生物炭通过微波辅助热解制备,比表面积达 320 m²/g,表面羧基含量为 1.8 mmol/g。6 个月后土壤中邻苯二甲酸酯含量降至 0.3 mg/kg 以下,水稻籽粒中污染物累积量减少 60%,同时生物炭的添加使土壤有机质含量提升 18%,水稻产量增加 12%,实现了污染治理与土壤改良的目标[22]。针对华北某农田的阿特拉津污染,研究采用 HNO₃ 改性秸秆生物炭进行修复。改性使生物炭表面含氧官能团增至原样的 2.3 倍,对阿特拉津的吸附容量提升至 72 mg/g。修复后,土壤中阿特拉津的半衰期由 45 天显著缩短至 22 天,同时脲酶活性提高了 25%,微生物群落多样性也恢复至清洁土壤水平[23]。

某化工园区周边土壤多环芳烃含量达 15~30 mg/kg,采用活性炭和生物炭复合修复技术,其中活性炭为 KOH 活化椰壳炭,生物炭为秸秆共热解炭。修复后土壤多环芳烃去除率达 72%,其中苯并芘含量从 5.8 mg/kg 降至 0.8 mg/kg,复合材料的优势在于活性炭快速吸附高浓度污染物,生物炭通过缓释作用控制污染物二次释放,且成本比纯活性炭降低 40% [24]。某电子废弃物拆解区土壤受卤代烃与多环芳烃复合污染,采用磁性碳纳米管进行原位修复,碳纳米管通过化学气相沉积法制备,负载 10% Fe₃O₄ 纳米颗粒,对卤代烃的吸附容量达 120 mg/g。通过磁分离实现材料回收,修复后材料可重复使用 5 次以上,降低了环境应用成本[25]。

挪威特隆赫姆港海洋沉积物受石油烃污染,采用活性炭薄层覆盖技术,活性炭为蒸汽活化煤基炭。1 年后沉积物中石油烃释放量降低 90%,周边水体中石油烃浓度维持在 0.05 μg/L 以下,该技术通过活性炭的物理吸附作用,可以有效阻止污染物向水体迁移,同时底栖生物多样性在 3 年内恢复至污染前的 85% [26]。此外,有研究通过秸秆与 FeCl₃ 共热解制备了 Fe₃O₄ 负载改性生物炭,并将其用于修复江口某支流的多环芳烃污染沉积物。该材料对多环芳烃表现出优异的吸附性能,吸附容量达 88 mg/g,6 个月后沉积物多环芳烃去除率达 65%,且材料可通过磁分离回收,避免二次污染,为河流沉积物修复提供了可行方案[27]。

5. 结论与展望

碳质材料在土壤沉积物有机污染修复中展现出显著优势,不同类型材料具有不同的特点。生物炭性价比高、兼具土壤改良与碳封存功能,适合农田轻度污染修复,其制备工艺以热解为主,改性后吸附容量可显著提升,活性炭吸附容量大、吸附速率快,适合高浓度污染应急处理,但需关注再生成本问题,碳纳米材料对低浓度难降解污染物去除优势显著,绿色制备技术与复合改性可降低其环境风险与成本。吸附性能受材料特性、污染物性质及环境因素共同影响,比表面积、孔隙结构、表面官能团是材料的关键参数,污染物疏水性决定吸附亲和力,土壤 pH、有机质含量通过改变材料电荷与污染物形态间接影响吸附效果,实际过程中物理吸附、化学吸附及界面相互作用协同作用,共同决定吸附效率。应用实践表明,碳质材料能有效吸附固定土壤与沉积物中的有机污染物,降低其环境含量与生物有效性。然而,该技术的长期稳定性与潜在次生风险仍是应用过程中需要审慎评估的关键问题。

未来研究可围绕碳质原料、吸附机制、应用实践与风险防控四个方面展开。材料方面应该开发低成本规模化制备技术,如利用污泥、煤矸石等工业废弃物制备碳质材料,降低原料成本;机制方面需结合原位表征技术与分子模拟,揭示复杂土壤环境中多污染物竞争吸附机制;应用方面需建立碳质材料吸附

技术的环境应用规范。风险防控层面, 应系统评估碳质材料的环境风险, 如碳纳米材料的生物毒性、生物炭中残留污染物的释放规律, 并降低二次污染风险与应用成本, 为土壤沉积物有机污染治理提供安全可持续的解决方案。

参考文献

- [1] 宋静, 骆永明, 夏家淇. 我国农用地土壤环境基准与标准制定研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4): 29-35.
- [2] Janeiro-Tato, I., Rodríguez, E., Lopez-Anton, M.A., Baragaño, D., Arrojo, L., Parra-Benito, P., *et al.* (2024) Bio-based Carbon Foams Assembled with Fe Nanoparticles for Simultaneous Remediation of As, Hg and PAHs in Co-Contaminated Industrial Soils. *Environmental Science: Nano*, **11**, 2683-2692. <https://doi.org/10.1039/d3en00927k>
- [3] Long, J., He, P., Przystupa, K., Wang, Y. and Kochan, O. (2024) Preparation of Oily Sludge-Derived Activated Carbon and Its Adsorption Performance for Tetracycline Hydrochloride. *Molecules*, **29**, Article 769. <https://doi.org/10.3390/molecules29040769>
- [4] Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., *et al.* (2014) Biochar as a Sorbent for Contaminant Management in Soil and Water: A Review. *Chemosphere*, **99**, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- [5] Zhou, Y., Qin, S., Verma, S., Sar, T., Sarsaiya, S., Ravindran, B., *et al.* (2021) Production and Beneficial Impact of Biochar for Environmental Application: A Comprehensive Review. *Bioresource Technology*, **337**, Article ID: 125451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451>
- [6] 蒋剑春, 孙康. 活性炭制备技术及应用研究综述[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(1): 1-13.
- [7] Sridharan, R., Monisha, B., Kumar, P.S. and Gayathri, K.V. (2022) Carbon Nanomaterials and Its Applications in Pharmaceuticals: A Brief Review. *Chemosphere*, **294**, Article ID: 133731. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133731>
- [8] 孙建财, 周丹丹, 王薇, 等. 生物炭改性及其对污染物吸附与降解行为的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1503-1513.
- [9] Martins, A.C., Pezoti, O., Cazetta, A.L., Bedin, K.C., Yamazaki, D.A.S., Bandoch, G.F.G., *et al.* (2015) Removal of Tetracycline by NaOH-Activated Carbon Produced from Macadamia Nut Shells: Kinetic and Equilibrium Studies. *Chemical Engineering Journal*, **260**, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.017>
- [10] Wang, H., Maiyalagan, T. and Wang, X. (2012) Review on Recent Progress in Nitrogen-Doped Graphene: Synthesis, Characterization, and Its Potential Applications. *ACS Catalysis*, **2**, 781-794. <https://doi.org/10.1021/cs200652y>
- [11] Asenjo, N.G., Álvarez, P., Granda, M., Blanco, C., Santamaría, R. and Menéndez, R. (2011) High Performance Activated Carbon for Benzene/Toluene Adsorption from Industrial Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **192**, 1525-1532. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.072>
- [12] Zhang, D., Pan, B., Zhang, H., Ning, P. and Xing, B. (2010) Contribution of Different Sulfamethoxazole Species to Their Overall Adsorption on Functionalized Carbon Nanotubes. *Environmental Science & Technology*, **44**, 3806-3811. <https://doi.org/10.1021/es903851q>
- [13] Weidemann, E., Niinipuu, M., Fick, J. and Jansson, S. (2018) Using Carbonized Low-Cost Materials for Removal of Chemicals of Environmental Concern from Water. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 15793-15801. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1781-0>
- [14] Cara, I.G., Topa, D., Puiu, I., *et al.* (2022) Biochar a Promising Strategy for Pesticide-Contaminated Soils. *Agriculture*, **12**, 1579. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101579>
- [15] 周烈兴, 彭金辉, 钱天才, 等. 活性炭对甲苯的吸附平衡及热力学研究[J]. 功能材料, 2011, 42(4): 753-756, 759.
- [16] Tong, Y., McNamara, P.J. and Mayer, B.K. (2019) Adsorption of Organic Micropollutants onto Biochar: A Review of Relevant Kinetics, Mechanisms and Equilibrium. *Environmental Science: Water Research & Technology*, **5**, 821-838. <https://doi.org/10.1039/c8ew00938d>
- [17] 吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 农林废弃物生物炭的制备及其吸附性能[J]. 生物质化学工程, 2023, 57(4): 27-33.
- [18] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., *et al.* (2015) Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, **87**, 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- [19] 刘安琪. 石化企业 VOCs 排放管控及特征组分的模拟吸附研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [20] 于长江. 生物炭复合材料的制备及其对重金属离子的吸附行为和机制研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工

大学, 2018.

- [21] Hou, R., Zhang, J., Fu, Q., Li, T., Gao, S., Wang, R., *et al.* (2024) The Boom Era of Emerging Contaminants: A Review of Remediating Agricultural Soils by Biochar. *Science of the Total Environment*, **931**, Article ID: 172899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172899>
- [22] 周震峰, 徐良. 生物炭对土壤吸附邻苯二甲酸二乙酯的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5267-5274.
- [23] Liang, Y., Zhao, B. and Yuan, C. (2022) Adsorption of Atrazine by Fe-Mn-Modified Biochar: The Dominant Mechanism of π - π Interaction and Pore Structure. *Agronomy*, **12**, Article 3097. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123097>
- [24] Koltowski, M., Hilber, I., Bucheli, T.D. and Oleszczuk, P. (2016) Effect of Activated Carbon and Biochars on the Bioavailability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Industrially Contaminated Soils. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 11058-11068. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6196-1>
- [25] FAN, X. and LI, X. (2012) Preparation and Magnetic Property of Multiwalled Carbon Nanotubes Decorated by Fe₃O₄ Nanoparticles. *New Carbon Materials*, **27**, 111-116. [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(12\)60007-9](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(12)60007-9)
- [26] Lofrano, G., Libralato, G., Minetto, D., De Gisi, S., Todaro, F., Conte, B., *et al.* (2016) *In Situ* Remediation of Contaminated Marinediment: An Overview. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 5189-5206. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8281-x>
- [27] Tu, Y., Premachandra, G.S., Boyd, S.A., Sallach, J.B., Li, H., Teppen, B.J., *et al.* (2021) Synthesis and Evaluation of Fe₃O₄-Impregnated Activated Carbon for Dioxin Removal. *Chemosphere*, **263**, Article ID: 128263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128263>