

咖啡渣基碳材料的研究进展

陈人杰^{1,2*}, 李治宇^{1,2}, 周丽^{1,2}, 秦耀康^{1,2}, 汤宏伟^{1,2}, 李俊³, 潘飞^{3*}

¹昆明学院化学化工学院 云南昆明

²塑料薄膜工程中心 云南昆明

³云南锡铟实验室有限公司 云南昆明

【摘要】本文综述了咖啡渣基碳材料在水体净化、光催化降解、超级电容器以及检测探针等多个领域的研究进展。咖啡渣作为一种农业副产品，因其丰富的碳含量和多孔结构，成为制备特殊用途碳材料的优质来源。研究表明，咖啡渣基生物碳和活性炭在水体净化方面表现出良好的吸附性能，碳化咖啡渣在光催化降解、超级电容器及检测探针等领域也展现出优异的性能。这些发现为咖啡渣的进一步开发和利用提供了重要参考。

【关键词】咖啡渣；碳化；活性炭；研究进展

【基金项目】昆明学院人才引进项目(YJL2214);云南省科技厅项目(202301AT070050)和(202101AO070050);云南省研究生教学案例库项目建设《高等分离工程》教学案例库建设资助项目(2022)

【收稿日期】2024 年 11 月 6 日 **【出刊日期】**2024 年 12 月 22 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20240008

Research progress of coffee grounds-based carbon materials

Renjie Chen^{1,2*}, Zhiyu Li^{1,2}, Li Zhou^{1,2}, Yaokang Qin^{1,2}, Hongwei Tang^{1,2}, Jun Li³, Fei Pan^{3*}

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan

²Plastic Film Engineering Center, Kunming, Yunnan

³Yunnan Tin & Indium Laboratory Co., Ltd, Kunming, Yunnan

【Abstract】 This article reviews the research progress of coffee grounds-based carbon materials in various fields such as water purification, photocatalytic degradation, supercapacitors, and detection probes. Coffee grounds, as an important agricultural byproduct, have rich carbon content and porous structure, which can provide high-quality sources for the preparation of various carbon materials with special purposes. Research has shown that coffee grounds-based biochar and activated carbon have good water purification performance. Through their rich pores and functional groups, they can effectively adsorb pollutants in water. In addition, the material of carbonized coffee grounds has also demonstrated excellent performance in applications such as photocatalytic degradation, supercapacitors, and detection probes. These research findings provide important references for further development and utilization of coffee grounds.

【Keywords】 Coffee grounds; Carbonization; Activated carbon; Research progress

1 前言

咖啡是一样重要的农产品，全球约 50% 的咖啡用于饮用。咖啡渣是生产咖啡饮品过程中残留的固体废渣^[1]，在图 1 中展示了咖啡渣的样品及其成分含量。结构上，咖啡渣粒径小、孔隙丰富、表面粗糙疏松^[2]。化学成分上，咖啡渣主要由半纤维素、纤维素、木质素、蛋白质等组成^[3]。由于咖啡渣的碳含量高(大于 58%)，灰分含量低(少于 1.3%)^[4]，并具有多孔结构，是制备一系列特殊用途碳材料优质来源^[5]。

本文分类综述了咖啡渣基生物碳、活性炭和碳点在水体净化、光催化降解、超级电容器以及检测探针的应用进展，为相关的研究提供了参考和借鉴。

2 国内外研究进展

2.1 水体净化

由咖啡渣制备的生物碳与活性炭具有多孔结构，其比表面高，因此它们的物理吸附能力较强，同时它们表面丰富的官能团可以通过静电作用、 π - π 相互作用能有效地吸附一些特定污染物(染料、抗生素、重金属

*通讯作者: 陈人杰(1982-)男, 博士, 助理研究员, 从事生物质复合材料; 潘飞(1989-)男, 本科, 工程师, 从事复合材料改性研究工作。

离子等), 达到净化水体的目的^[6]。

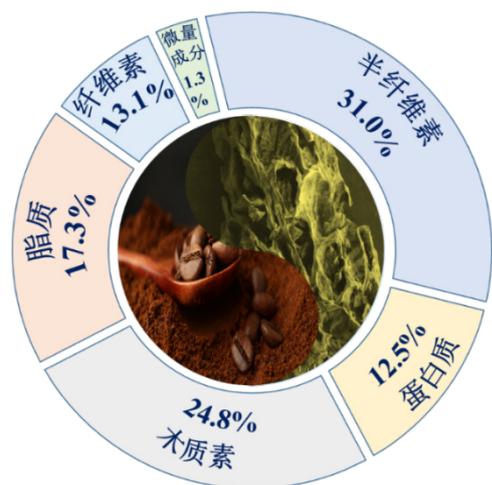


图1 咖啡渣微观结构与组成成分示意图

梁波等^[7]采用 $ZnCl_2$ 对咖啡渣预处理后, 进行无氧碳化, 得到咖啡渣活性炭。取 0.2 g 活性炭加入到 100 mL 亚甲基蓝溶液 (500 mg/L) 中吸附水体的染料。经测算, 其对亚甲基蓝的吸附量可达 223.57 mg/g, 高于国家活性炭一级的吸附标准。Chiang 等^[8]在管式炉中分别采用氮气和二氧化碳对咖啡渣进行热解来制备活性炭。在相同的实验条件下, 咖啡渣基活性炭对甲基橙的吸附量为 612 mg/g, 而商用活性炭的吸附量为 181 mg/g, 显示出咖啡渣基活性炭吸附能力是商用活性炭的 3.38 倍。Aouay 等^[9]采用磷酸咖啡渣活化后, 在恒温中对其进行碳化处理。在 100 mL 的酸性橙 7 溶液 (20 mg/L) 中加入 0.285 g 咖啡渣活性炭, 其吸附量可达 119.51 mg/g。Pagalan 等^[10]利用废咖啡渣制备活性炭, 处理被苯胺黄燃料污染的水, 初始苯胺黄燃料浓度为 35 ppm, 吸附剂用量为 0.6g, 接触时间为 2.5h, 实现了苯胺黄燃料的去除。Nguyen^[11]等使用咖啡渣基生物碳来除去水体中的诺氟沙星。在诺氟沙星初始浓度范围为 10-50 mg/L, 生物碳投加量为 1 g/L 时, 同条件实验下, 咖啡渣基生物碳对诺氟沙星的吸附量最高可达 69.8 mg/g, 是柚子皮基生物碳的 17.81 倍。Zhang^[12]发现咖啡渣基生物碳对水体中的磺胺甲噁唑吸附量为 130.1 $\mu\text{g/g}$ 。田青柏等^[13]制备了铁掺杂的磁性咖啡渣基生物碳, 对水溶液中金霉素的吸附能力可达 223.63 mg/g。Shin 等^[14]在氮气保护下热解咖啡渣得到生物碳, 它对水溶液中镉离子的最大吸附量为 51.81 mg/g。这个结果是基于在 5 mg/L 的镉离子溶液中, 温度为 25°C 的实验条件下得到的。张洋等^[15]在马弗炉中制备载镁咖啡渣基生物碳, 在相同吸附实验下发现, 载镁咖啡渣生

物碳对磷离子的吸附量为 48.47 mg/g, 咖啡渣生物碳对磷离子的吸附量为 3.24 mg/g。得出载镁咖啡渣生物碳吸附能力是咖啡渣生物碳的 14.95 倍。Park 等^[16]通过无氧碳化得到咖啡渣生物碳, 其对锌离子的最大吸附容量达到了 26.6 mg/g。

2.2 光催化降解

咖啡渣经碳化后, 可以与其它材料形成光催化剂, 用于降解抗生素、染料等。由于咖啡渣的多孔结构, 有利于光的吸收。碳化后增强的电导率, 有助于电子和空穴的快速分离和传输^[17]。同时, 碳化咖啡渣表面丰富的官能团, 能促进光催化反应中的物质传输^[18]。

Changotra 等^[18]通过溶胶-凝胶法将咖啡渣生物碳和 TiO_2 复合制备光催化剂。由于生物碳比表面积高、孔隙率大、以及其表面大量含量基团, 可大幅增强催化剂对五氯苯酚吸附性。在一小时内, 五氯苯酚的降解效率可达 97%, 是纯 TiO_2 的两倍。Jin 等^[19]在咖啡渣碳上原位生长了纳米 TiO_2 和纳米 Ag, 用于降解亚甲基蓝。在 30 分钟内, 其光催化降解率可达 96.2%, 远高于 Ag/ TiO_2 光催化剂的降解效率 (59.4%)。Lazarotto 等^[20]在氮气下将咖啡渣和 TiO_2 的混合物进行热解, 得到生物碳光催化剂, 用于降解水溶液中的双氯芬酸。经 2 小时的光照, 此种光催化剂降解效率为 90%, 是 TiO_2 的 2.25 倍。光催化性能的大幅提升, 是因为生物碳表面大量的酚基, 有助于电子的转移, 并且限制电子/空穴对的重组。Long 等^[21]将碳化镍负载于碳化咖啡渣上, 得到一种新型光催化剂。其对氧氟沙星的降解率为 87%, 高于氯化氧铋光催化剂的降解率 (70%)。

2.3 超级电容器

咖啡渣含有的一些天然元素如 N, P, S, Mg, Fe 等能为制备的活性炭提供一部赝电容。咖啡渣活性炭具有丰富的孔隙结构, 能提供较大的比表面积, 有助于电荷存储。其具有较好的导电率, 能够提高电极的导电性能, 从而提高电容器的放电速度。

Adan-Mas 等^[22]采用氢氧化钾活化的咖啡渣活性炭作为超级电容器的工作电极, 并在 1 M 的 Na_2SO_4 电解液中研究其电化学性质。当在 1 A/g 的电流密度和 1.9 V 电压窗口下, 样品的工作电极电容为 84 F/g。在电流密度增至 10 A/g 时, 电极材料工作电容仍可达 58.8 F/g, 在 5000 次充放电循环后电容保持率为 85%。Biegun 等^[23]采用咖啡渣基活性炭作为超级电容器的电极, 在 0.1 A/g 的电流密度下电极材料的比电容为 180.1 F/g。在电流密度增至 50 A/g 时电极材料的比电容为 178 F/g。电极材料的能量密度和功率密度分别为 84

Wh/kg 和 202 kW/kg。李滨等^[24]使用钴和镍掺杂的咖啡渣活性炭, 用为超级电容器的电极。在 1 A/g 的电流密度下, 电极的比电容为 242.17 F/g, 充放电 5000 次循环后, 电容保持率为 92.2 %。它的能量密度和功率密度分别为 6.2 Wh/kg 和 500 W/kg。Hsieh 等^[25]使用二氧化碳活化的咖啡渣活性炭用为超级电容器的电极, 并在 1.5 M LiClO₄/PC 电解液中研究其电化学性质。在 0.5 A/g 的电流密度下电极的比电容为 222.4 F/g。在电流密度增至 3 A/g 时电极的比电容为 156.35 F/g。

2.4 检测探针

咖啡渣基碳点通常具有较高的荧光强度, 这使得它们在检测过程中能够提供清晰的信号, 提高检测的灵敏度。这些碳点可以被修饰以提高其特异性和灵敏度, 适用于检测生物分子、重金属离子、药物等多种目标。由于其来源于天然材料, 咖啡渣基碳点通常具备良好的生物相容性, 适合用于生物医学领域的探针应用, 减少对生物体的毒性。这些特性使得咖啡渣基碳点成为理想的检测探针。

Costa 等^[26]采用水热碳化法制备了咖啡渣基碳量子点, 将其用于检测硝基苯胺的间、邻、对位同分异构体。当硝基苯胺浓度为 4.47×10^{-7} - 2.31×10^{-5} M 的线性范围内, 在 1 mL 的硝基苯胺溶液中加入 0.01 mg 的碳量子点进行检测。结果显示, 它对硝基苯胺检测极限达 68 ppb, 是其它构型的 0.19-0.53 倍。Nazar 等^[27]通过微波辅助法, 将 ZnCl₂ 活化的咖啡炭转化成碳量子点。这些碳量子点对铁离子的检测限可以达到 0.27 uM。Zhu 等^[28]以水热法制备了掺铁咖啡渣基碳量子点, 用于检测抗坏血酸。通过结合比色分析法和荧光分光光度法进行检测, 实现了对抗坏血酸的高灵敏度检测, 其检出限分别低至 1.56 uM 和 0.133 uM。鲁立等^[29]以无氧碳化后得到咖啡渣生物碳为原料, 通过超声辅助法制备出了咖啡渣碳量子点。实验结果显示, 该碳量子点在血清中维生素 B₁₂ 的检出限达到了 0.61 ng/mL。

3 总结与展望

本文对咖啡渣基生物碳、活性炭和碳点在水体净化、光催化降解、超级电容器及检测探针等方面的研究进展进行了总结。研究表明, 咖啡渣基生物碳和活性炭对多种污染物具有高效的吸附能力; 咖啡渣碳化后形成的碳材料与其他材料复合, 可显著提升光催化降解效率; 咖啡渣基活性炭丰富的孔隙结构、高比表面积成为超级电容器电极材料的优选; 咖啡渣基碳点因其高荧光强度和良好的生物相容性在生物分子、重金属离子和药物检测中展现出潜力。

未来研究可进一步探索不同预处理和后处理方法对咖啡渣基碳材料性能的影响, 以优化其孔隙结构、比表面积和表面官能团, 从而提高其吸附、催化和电化学性能。结合咖啡渣基碳材料与其他功能材料, 开发具有协同效应的新型复合材料, 以拓宽其应用领域并提高性能。通过进一步的研究与开发, 咖啡渣将不仅成为一种废弃物, 更可转化为高价值的绿色材料, 为可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] Pagett M, Teng K S, Sullivan G, et al. Reusing waste coffee grounds as electrode materials: recent advances and future opportunities[J]. *Global Challenges*, 2023, 7(1): 2200093.
- [2] 路昌.咖啡渣高温好氧堆肥工艺优化及所堆肥特异应用研究[D].烟台大学,2020.
- [3] 宋文敏.咖啡渣/聚丙烯木塑复合材料的制备及性能研究[D].浙江理工大学,2023.
- [4] 任杰.咖啡渣活性炭的制备、表征及吸附性能研究[D].广东工业大学,2017.
- [5] Mussatto S I, Carneiro L M, Silva J P A, et al. A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds[J]. *Carbohydrate polymers*, 2011, 83(2): 368-374.
- [6] Jin Y, Tang W, Wang J, et al. Construction of biomass derived carbon quantum dots modified TiO₂ photocatalysts with superior photocatalytic activity for methylene blue degradation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 932: 167627.
- [7] 梁波,王清华,朱凯,等.咖啡渣活性炭对亚甲基蓝吸附特性研究[J].工业用水与废水,2023,54(03):16-20.
- [8] Chiang C H, Chen J, Lin J H. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(4): 103929.
- [9] Aouay F, Attia A, Dammak L, et al. Activated Carbon Prepared from Waste Coffee Grounds: Characterization and Adsorption Properties of Dyes[J]. *Materials*, 2024, 17(13): 3078.
- [10] Pagalan Jr E, Sebron M, Gomez S, et al. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of

- water contaminated by aniline yellow dye[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 145: 111953.
- [11] Nguyen V T, Nguyen T B, Dat N D, et al. Adsorption of norfloxacin from aqueous solution on biochar derived from spent coffee ground: Master variables and response surface method optimized adsorption process[J]. *Chemosphere*, 2022, 288: 132577.
- [12] Zhang X, Zhang Y, Ngo H H, et al. Characterization and sulfonamide antibiotics adsorption capacity of spent coffee grounds based biochar and hydrochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137015.
- [13] 田青柏,杨关运,李晓强,等.磁性咖啡渣生物炭制备及其对金霉素的吸附特性研究[J]. *中国资源综合利用*,2021,39(08):33-36.
- [14] Shin J, Lee S H, Kim S, et al. Effects of physicochemical properties of biochar derived from spent coffee grounds and commercial activated carbon on adsorption behavior and mechanisms of strontium ions (Sr²⁺) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 40623-40632.
- [15] 张洋,于佳卉,冯长江,等.载镁咖啡渣生物炭对水体中磷的吸附性能研究[J].*化工新型材料*,2023,51(S2):443-448+454.
- [16] Park J H, Kim H C, Kim S H, et al. Zinc adsorption characteristics by biochar derived from spent coffee grounds[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2019, 52(1): 29-39.
- [17] 高昕.生物质碳/二氧化钛复合材料的制备及光催化性能研究[D].西安理工大学,2021.
- [18] Changotra R, Rajput H, Yang J, et al. Spent-coffee grounds-derived biochar-supported heterogeneous photocatalyst: a performance evaluation and mechanistic approach for the degradation of pentachlorophenol[J]. *RSC Sustainability*, 2023, 1(6): 1484-1496.
- [19] Jin Y, Tang W, Wang J, et al. High photocatalytic activity of spent coffee grounds derived activated carbon-supported Ag/TiO₂ catalyst for degradation of organic dyes and antibiotics[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 655: 130316.
- [20] Lazarotto J S, de Lima Brombilla V, Silvestri S, et al. Conversion of spent coffee grounds to biochar as promising TiO₂ support for effective degradation of diclofenac in water[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2020, 34(12): e6001.
- [21] Long A, Yu Y, Ge X, et al. Carbonized Nickel - Loaded Spent Coffee Grounds Modified BiOCl Photocatalysts for Enhanced Degradation of Ofloxacin[J]. *Crystal Research and Technology*, 2023, 58(7): 2300039.
- [22] Adan-Mas A, Alcaraz L, Arévalo-Cid P, et al. Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications[J]. *Waste Management*, 2021, 120: 280-289.
- [23] Biegun M, Dymerska A, Chen X, et al. Study of the active carbon from used coffee grounds as the active material for a high-temperature stable supercapacitor with ionic-liquid electrolyte[J]. *Materials*, 2020, 13(18): 3919.
- [24] 李滨.超级电容器用生物质基电极材料的制备及其电化学性能的研究[D].东北林业大学,2022.
- [25] Hsieh T H, Wang H L, Yu G T, et al. Meso-pore dominant activated carbon from spent coffee grounds for high-performance electrochemical capacitors in organic electrolyte[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(6): 106418.
- [26] Costa A I, Barata P D, Moraes B, et al. Carbon dots from coffee grounds: synthesis, characterization, and detection of noxious nitroanilines[J]. *Chemosensors*, 2022, 10(3): 113.
- [27] Nazar M, Hasan M, Wirjosentono B, et al. Microwave Synthesis of Carbon Quantum Dots from Arabica Coffee Ground for Fluorescence Detection of Fe³⁺, Pb²⁺, and Cr³⁺[J]. *ACS omega*, 2024, 9(18): 20571-20581.
- [28] Zhu Y, Deng X, Chen J, et al. Coffee grounds-derived carbon quantum dots as peroxidase mimetics for colorimetric and fluorometric detection of ascorbic acid[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136957.
- [29] 鲁立. 咖啡渣碳量子点荧光探针的制备及其在血清VB12快速检测中的应用研究[D].兰州大学,2022.
- 版权声明:** ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS