

玉米秸秆生物炭掺杂Pebax 1657混合基质膜分离CO₂性能

邵音子, 庄鑫恒, 费希同, 黄雅玲, 喻 婕, 张学杨*

徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年1月21日; 录用日期: 2025年3月7日; 发布日期: 2025年3月14日

摘要

随着人类社会发展, CO₂的过量排放造成了温室效应的加剧。我国作为农业大国, 稼秆产量巨大但资源化利用水平不高。本文以玉米稼秆为原材料制备了生物炭, 掺入Pebax 1657中制成混合基质膜(MMMs)用于CO₂分离纯化和玉米稼秆高价值利用。结果表明, 与纯Pebax 1657膜相比, 生物炭填料的掺入提升了MMMs的性能, 且随着掺杂比的提升气体分离性能呈现上升趋势。在掺杂比为4 wt%时性能最佳。玉米稼秆生物炭最佳CO₂渗透系数和选择性分别为125.7 Barrer和81.78, 相比纯Pebax 1657膜提升了69%和34%。生物炭掺杂Pebax 1657混合基质膜具有良好的分离CO₂性能。

关键词

CO₂分离, 生物炭, Pebax 1657, 混合基质膜

CO₂ Separation Performance of Corn Stalk Biochar-Doped Pebax 1657 Mixed Matrix Membranes

Yinzi Shao, Xinheng Zhuang, Xitong Fei, Yaling Huang, Jie Yu, Xueyang Zhang*

College of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Jan. 21st, 2025; accepted: Mar. 7th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

Abstract

With the development of human society, the excessive emission of CO₂ has exacerbated the

*通讯作者。

greenhouse effect. As a large agricultural country, straw production of China is huge, but its resource utilization level remains low. In this study, biochar was prepared from corn stalk, and then doped into Pebax 1657 to produce mixed matrix membranes (MMMs), the obtained MMMs was used for CO₂ separation from gas mixture. The results show that, compared to pure Pebax 1657 membranes, the doping of biochar enhanced the CO₂ separation performance of MMMs. Additionally, the CO₂ separation performance increased with elevating the doping rate, the best performance was achieved at a doping ratio of 4 wt%. The optimal CO₂ permeability and selectivity of MMMs were 125.7 Barrer and 81.78, respectively, which separately improved 69% and 34% compared to pure Pebax 1657 membranes. Biochar-doped Pebax 1657 mixed matrix membranes exhibit excellent CO₂ separation performance.

Keywords

CO₂ Separation, Biochar, Pebax 1657, Mixed Matrix Membrane

Copyright © 2025 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

随着人类社会的快速发展，化石燃料消耗日益增长，燃烧产生的二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等有害气体造成了环境污染[1]，大量排放的二氧化碳(CO₂)加剧了温室效应[2]。为解决日益严重的气候问题，各国于2015年签订了《巴黎协定》，提出了控制气温上升在2℃以内的目标[3]。目前二氧化碳捕集利用与封存技术(CCUS)是解决全球变暖的关键技术之一[4]。CCUS技术旨在将CO₂从工业或者能源设施排放源中分离出来，进行利用或封存以降低CO₂向大气中排放[5]。CCUS技术的关键是CO₂的捕集，目前主流的CO₂捕集技术可以分为燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集[6]。目前，燃烧后捕集在工业中应用最为广泛，并主要存在四个技术方向，分别为化学吸收法、物理吸收法、低温法和膜分离技术[7]。其中，膜分离技术是通过设计特殊的膜材料，使得CO₂在膜两侧形成浓度差，从而实现CO₂的分离纯化[8]。膜分离技术因其具有能耗低、效率高等特点，被公认为最具潜力的CO₂捕集技术之一[9]。

CO₂分离膜类型多样，按膜材料主要可分为无机膜、聚合物膜和混合基质膜等[10]。无机膜具有较高的透气性和较强的稳定性，但其规模化发展受到制造成本高、成膜性能差等因素的限制[11]。聚合物膜是由聚合物材料聚合而成的致密膜，虽然其制备成本低，但其渗透性和选择性受到Trade-off效应的限制[12]。而混合基质膜(MMMs)是以填料为分散相，聚合物为连续相的膜材料，可以同时结合填料和聚合物膜的优点，从而突破Trade-off效应的限制[13]。MMMs的连续相主要有聚酰亚胺[14]、微孔聚合物[15]和聚醚聚酰胺嵌段共聚物(Pebax)[16]等。其中Pebax是由刚性链段PA和柔性链段PEO组成聚合物，通过调控PA和PEO的比例可以得到不同的Pebax。其中具有40 wt% PA段和60 wt%的PEO段的Pebax 1657是目前主流的MMMs连续相之一[17]。

MMMs的填料主要有MXene[18]、石墨烯[19]、金属有机骨架MOFs[20]、碳纳米管[21]、沸石[22]等。Dai等人[23]研究了一种半氧化MXene修饰g-C₃N₄纳米片掺入Pebax 1657制备成MMMs用于CO₂分离，研究发现MMMs对CO₂的渗透系数可达1673.69 Barrer，而CO₂/N₂选择性为45.13。Chen等人[24]研究了一种氨基酸功能化氧化石墨烯纳米片掺入Pebax 1657的MMMs，研究发现掺入0.4 wt% arg@GO

纳米片的 MMMs 具有 169 Barrer 的 CO₂ 透过率和 70 的 CO₂/N₂ 选择性。Ding 等人[25]研究了一种 ZIF-93 金属有机框架掺入 Pebax 1657 中分离 CO₂/N₂，研究发现引入 10 wt% ZIF-93 负载量的 MMMs 在 0.4 MPa 时 CO₂ 渗透率为 84.85 Barrer，CO₂/N₂ 选择性为 65.76，分别比纯 Pebax 膜高 51.57% 和 65.50%。生物炭作为一种新型碳材料，由于其具有官能团丰富、孔隙结构发达、芳香结构完备、造价低廉等优点，目前已在环境污染治理中得到了广泛应用[26] [27]。我国作为农业大国，玉米作为我国重要的粮食作物，玉米秸秆产量巨大，将玉米秸秆制成生物炭再利用是目前研究的热点话题之一[28]。鉴于此，本研究以 Pebax 1657 为连续相，玉米秸秆生物炭为填料制备了不同质量分数的 MMMs 用于分离纯化 CO₂。

2. 材料和方法

2.1. 材料与试剂

玉米秸秆，产自徐州市某处农田；Pebax 1657，商品级，由法国 Arkema 公司提供；无水乙醇，分析纯，由西陇科学股份有限公司提供；溴化钾，≥99.5%，光谱纯，由上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供；高纯氩气、高纯氮气、高纯二氧化碳，均由徐州市特种气体厂提供；去离子水，实验室自制。

2.2. 生物炭/PEBAX 1657 混合基质膜的制备

2.2.1. 生物炭的制备

玉米秸秆经干燥、破碎后移入管式炉，在 600℃下热解 3 h 得到玉米秸秆生物炭。将上述生物炭使用研钵研磨，过 200 目筛得到实验用生物炭，记为 CB。

2.2.2. 混合基质膜的制备

MMMs 的制备采用溶液浇筑法。取 0.4 g Pebax 1657 加入乙醇和去离子水质量比为 7.3 的溶液中，在 80℃水浴锅中搅拌 2 h 得到混合溶液。在混合溶液中加入 CB，加入量分别为 Pebax 1657 质量的 2% 和 4%，继续加热搅拌 1 h 后将其倒入聚四氟乙烯环形模具中。在室温中冷却定型 12 h 后移入 25℃恒温鼓风烘干箱中 12 h，而后移入 35℃真空烘干箱，继续干燥 24 h 进一步去除水分。最后从聚四氟乙烯模具中脱模得到 MMMs。

2.3. 材料表征及性能测试方法

CB 在 150℃真空条件下脱气 2 h 后使用孔径与比表面积分析仪(kuboX1000，北京彼奥德)测试样品 N₂ 吸附脱附曲线，并使用 Brunauer-Emmett-Teller 理论(BET)与 Density-Functional-Theory 理论(DFT)计算生物炭的比表面积和孔径分布。使用元素分析仪(Elementar Vario Macro cube，德国元素)测定原材料中 C、H、N 和 S 元素的含量。使用热重分析仪(TGA/DSC 3+，梅特勒托利多)测定了样品灰分。使用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪(Litesizer 500，安东帕)测量样品在水溶液中的 Zeta 电位；利用傅里叶变换红外光谱仪(Spotlight 400，铂金埃尔默)以 KBr 压片法和 ATR 法分别测试了原材料和 MMMs 在 650~4000 cm⁻¹ 波段的傅里叶红外光谱。使用全自动显微镜共焦拉曼光谱仪(HORIBA Xplora Plus，堀场)测试了原材料的拉曼光谱。使用压差法气体透过率测试仪(SMT-275，济南思克)在 25℃恒温条件下以高纯氦气为动力气源测试了 MMMs 的 CO₂ 和 N₂ 渗透系数，以理想选择性方程(1)计算 CO₂/N₂ 选择性(P)

$$P = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{N}_2}} \quad (1)$$

式(1)中： P_{CO₂} 为 CO₂ 的渗透系数， P_{N₂} 为 N₂ 的渗透系数。

3. 结果与讨论

3.1. 生物炭表征

生物炭理化表征如表 1 所示, CB 的比表面积(SSA)为 $5.06 \text{ m}^2/\text{g}$, 总孔体积(PV)为 $0.052 \text{ cm}^3/\text{g}$, 微孔体积(MPV)为 $0.002 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。氮气吸附脱附曲线与生物炭孔径分布(图 1(A))表明, CB 是一种多孔材料, 主要以微孔($\leq 2.0 \text{ nm}$)和介孔($2\sim 50 \text{ nm}$)为主。

Table 1. Physicochemical properties of biochar

表 1. 生物炭理化性质

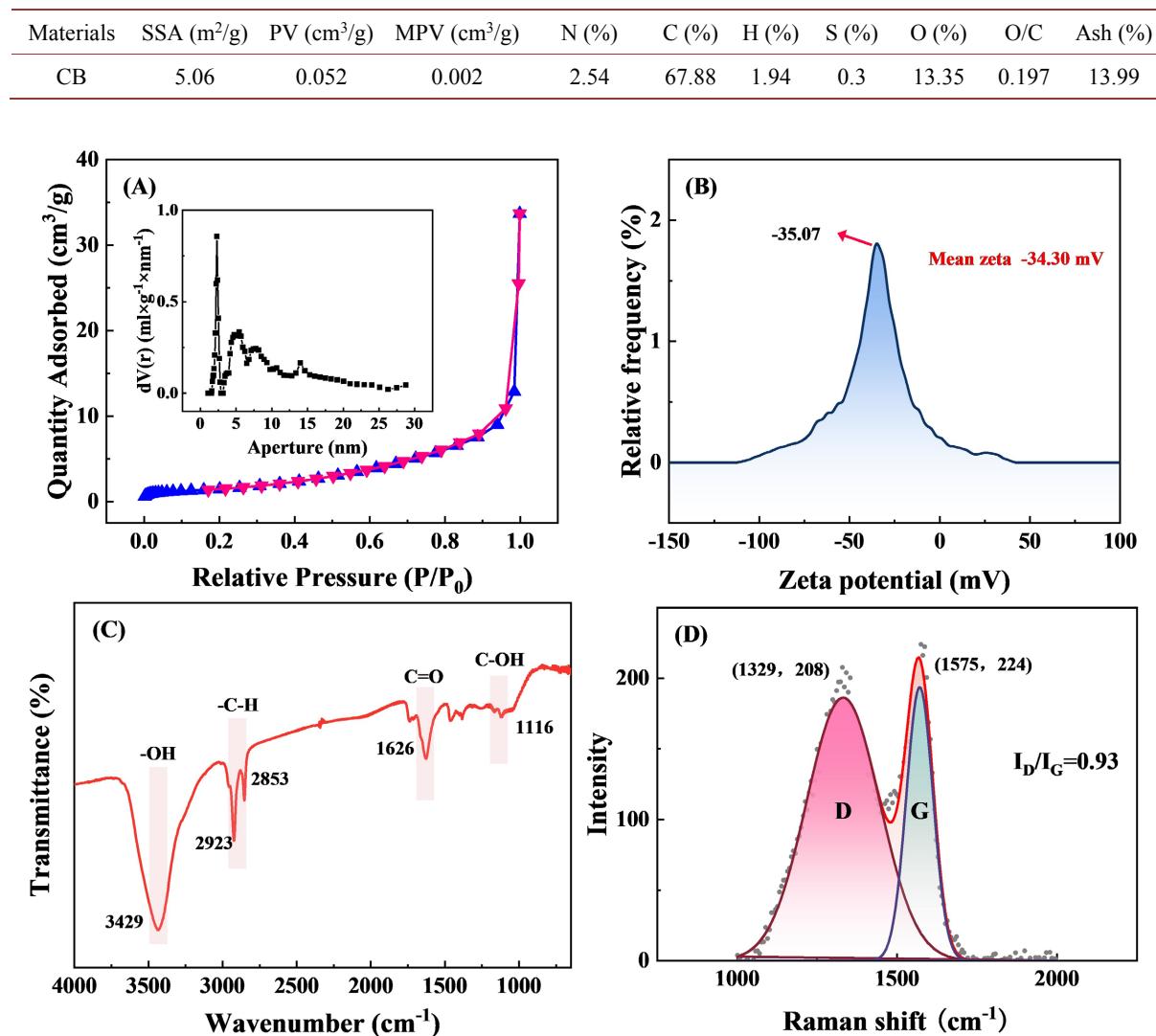


Figure 1. (A) Isothermal adsorption and desorption curve and pore size distribution of biochar; (B) Zeta potential distribution; (C) Fourier infrared spectroscopy; (D) Raman spectrum

图 1. (A) 等温吸脱附曲线与生物炭孔径分布; (B) Zeta 电位分布; (C) 傅里叶红外光谱; (D) 拉曼光谱

CB 的 N 元素含量为 2.54%, 高于不少生物炭的 N 元素含量, 这表明 CB 内部有较多的含氮基团[29]。有文献指出, MMMs 中的含氨基基团更有利 CO_2 溶解, 从而提高 MMMs 的 CO_2 渗透系数[30]。Wang 等人[31]研究了一种氨基功能化 CPL-1 增强 MMMs 分离, 研究发现在 25°C 、 0.4 MPa 条件下, $\text{NH}_2\text{-CPL-}$

1 wt% 浓度的 MMMs 具有最佳的 CO_2 分离性能, CO_2/N_2 选择性为 85, CO_2 渗透率为 104 Barrer, 与 CPL-1/Pebax-10 wt.% MMMs 相比, 分别提高了 9.5% 和 13.3%。CB 的 O/C 比为 0.197, 高于大多数常见生物炭, 这表明 CB 具有较强亲水性[29]。Zhang 等人[32]研究了化学活化生物炭吸附 VOC, 发现碳材料的 O/C 比可以反映其极性和亲水性, O/C 比较高的生物炭吸附丙酮的能力更强。对于 MMMs, 掺杂亲水性高的填料可以改善膜的亲水性, 从而增强对 CO_2 的溶解, 提高 MMMs 气体分离能力[33]。Zeta 电位分布(图 1(B))表明, CB 在水溶液中 Zeta 电位绝对值大于 30 mV, 该分散体系稳定[34]。有文献指出, 生物炭表面含氧官能团越高则 Zeta 电位绝对值越高[35], 而低的 Zeta 电位绝对值会使颗粒间相互作用减弱, 导致颗粒间发生团聚[36]。本研究中, CB 在溶液中稳定性强, 表明 CB 在 MMMs 中的分散性好, 提升了 MMMs 的铸膜质量。

CB 的傅里叶红外光谱见图 1(C)。CB 有-OH (3429 cm^{-1})、-C-H (2923 cm^{-1} 、 2853 cm^{-1})、C=O (1626 cm^{-1})、C-OH (1116 cm^{-1}) 等官能团。拉曼光谱(图 1(D))表明, CB 具有碳材料典型的 D 峰(1329 cm^{-1})和 G 峰(1575 cm^{-1})。D 峰由碳微晶的缺陷产生, 在无定形碳中, D 带代表生物炭的 x 晶格缺陷, 这是由无序石墨的平面终端中带有悬空键的 C 原子的振动引起的, 而 G 峰则由碳网平面的对称结构产生, G 带对应于石墨的 E2g 模式, 与 C sp^2 键原子的振动有关, 代表碳的石墨化程度[37]。CB 的 I_D/I_G 值为 0.93, 其表面存在较多无定形碳[38]。

3.2. 混合基质膜样品表征

傅里叶红外光谱(图 2)表明, 在纯 Pebax 1657 中 1098 cm^{-1} 处观察到醚基 C-O-C 的对称振动, 这对应了 Pebax 1657 中的 PEO 软段, 硬段 PA 中的 H-N-C=O 和 O-C=O 基团分别对应 1637 cm^{-1} 和 1728 cm^{-1} 的两个振动峰[39]。脂肪链 C-H 基团的对称和反对称伸缩振动对应图中在 2857 cm^{-1} 附近的两个振动峰, 在 3297 cm^{-1} 对应的是酰胺段 N-H 伸缩振动峰[25]。随着 CB 的填充量不断升高, MMMs 中几乎没有产生新的官能团, 这表明填料成功混入 MMMs 中, 且没有与 Pebax 1657 发生反应, 二者仅为物理共混[40]。

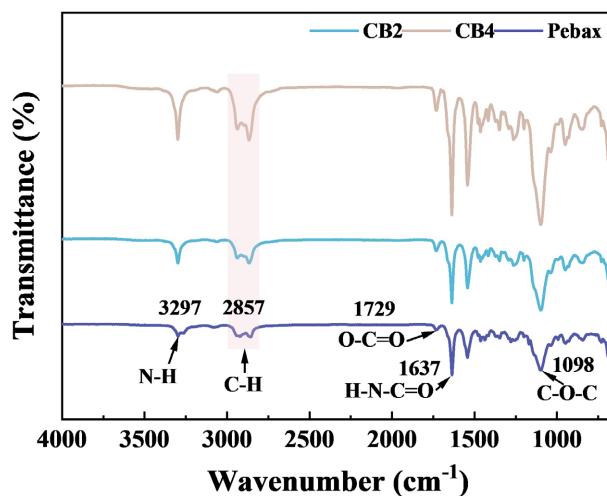


Figure 2. Fourier infrared spectrum of MMMs
图 2. MMMs 的傅里叶红外光谱

3.3. 混合基质膜性能评价

不同填料浓度对二氧化碳渗透系数的影响(图 3(A))表明, 填料浓度与二氧化碳渗透系数呈线性正相关。CB 的掺入提高了 MMMs 的二氧化碳渗透系数, 在 4 wt% 达到最大(125.7 Barrer), 与纯 Pebax 1657

相比提高了 69%。这可能与 CB 表面的含氮和含氧基团有关，CB 掺入后提高了 MMMs 的含氮和含氧基团的数量，增强了 MMMs 对 CO₂ 的亲和力，从而渗透了更多的 CO₂。

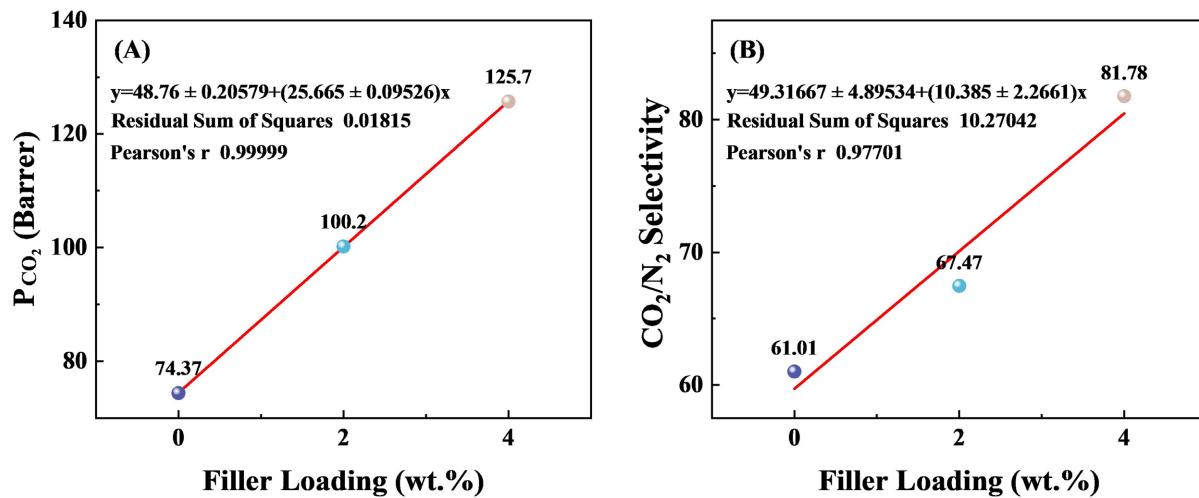


Figure 3. (A) CO₂ permeability coefficient of MMMs; (B) Selectivity of MMMs
图 3. (A) MMMs 的 CO₂ 渗透系数；(B) MMMs 的选择性

不同填料浓度对选择性的影响(图 3(B))表明，填料浓度与选择性呈线性正相关。MMMs 在 4 wt% 达到了最大选择性(81.78)，比纯 Pebax 1657 膜提高了 34%。这可能与 MMMs 的二氧化碳渗透系数随着填料浓度的上升而增大，而氮气的渗透系数受填料浓度影响不大有关。本研究制备的掺杂 4 wt% CB 的 MMMs 与其他文献相比，具有明显的竞争优势。例如，Du 等人[41]研究了一种双金属 CeZr-MOF 的 Pebax 混合基质膜分离 CO₂，该混合基质膜具有 100.7 Barrer 的 CO₂ 渗透性和 76.4 的选择性。Zhao 等人[42]研究了一种 Pebax/GO MMMs 分离 CO₂，在 0.7 MPa, 25°C 条件下 MMMs 的二氧化碳渗透系数为 108 Barrer，选择性为 48.5。Feng 等人[43]使用石墨烯氧化物改性的金属-有机框架嵌入混合基质膜进行 CO₂/N₂ 分离，研究发现 10 wt% 掺量的 Pebax 1657-MOF-74(Ni)@GO 膜的 CO₂/N₂ 选择性为 76.96。由此可见，本研究制备的 MMMs 要优于大多数文献报道的 MMMs 气体分离性能。此外，生物炭低廉的价格使其与其他材料相比，在制备混合基质膜并用于 CO₂ 分离方面，具有更高的工程应用潜力。

4. 结论

本研究使用玉米秸秆生物炭掺入 Pebax 1657 中制备了 MMMs，研究了该膜对 CO₂ 的分离性能。研究发现，掺杂生物炭可以有效的改善 Pebax 1657 的 CO₂ 分离性能，且分离性能随着添加量的提升而升高。生物炭掺入比例为 4 wt% 时，MMMs 分离 CO₂ 的渗透系数达到 125.7 Barrer 选择性达到 81.78，与 Pebax 1657 膜相比分别提升了的 69% 和 34%。生物炭掺入 Pebax 1657 制备的 MMMs，具有良好的 CO₂ 分离性能。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(xcx2024117)。

参考文献

- [1] Wang, J. and Azam, W. (2024) Natural Resource Scarcity, Fossil Fuel Energy Consumption, and Total Greenhouse Gas Emissions in Top Emitting Countries. *Geoscience Frontiers*, **15**, Article 101757.

- <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- [2] Abbasi, K.R., Shahbaz, M., Zhang, J., Irfan, M. and Alvarado, R. (2022) Analyze the Environmental Sustainability Factors of China: The Role of Fossil Fuel Energy and Renewable Energy. *Renewable Energy*, **187**, 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.066>
- [3] Schleussner, C., Ganti, G., Rogelj, J. and Gidden, M.J. (2022) An Emission Pathway Classification Reflecting the Paris Agreement Climate Objectives. *Communications Earth & Environment*, **3**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00467-w>
- [4] Krogh, A., Junginger, M., Shen, L., Grue, J. and Pedersen, T.H. (2024) Climate Change Impacts of Bioenergy Technologies: A Comparative Consequential LCA of Sustainable Fuels Production with CCUS. *Science of the Total Environment*, **940**, Article 173660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173660>
- [5] Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S. and Bardow, A. (2019) Climate Change Mitigation Potential of Carbon Capture and Utilization in the Chemical Industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 11187-11194. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>
- [6] Desport, L. and Selosse, S. (2022) An Overview of CO₂ Capture and Utilization in Energy Models. *Resources, Conservation and Recycling*, **180**, Article 106150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106150>
- [7] Hou, R., Fong, C., Freeman, B.D., Hill, M.R. and Xie, Z. (2022) Current Status and Advances in Membrane Technology for Carbon Capture. *Separation and Purification Technology*, **300**, Article 121863. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121863>
- [8] Jiang, L., Liu, W., Wang, R.Q., Gonzalez-Diaz, A., Rojas-Michaga, M.F., Michailos, S., et al. (2023) Sorption Direct Air Capture with CO₂ Utilization. *Progress in Energy and Combustion Science*, **95**, Article 101069. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101069>
- [9] Dong, Y., Wu, H., Yang, F. and Gray, S. (2022) Cost and Efficiency Perspectives of Ceramic Membranes for Water Treatment. *Water Research*, **220**, Article 118629. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118629>
- [10] Imtiaz, A., Othman, M.H.D., Jilani, A., Khan, I.U., Kamaludin, R. and Samuel, O. (2022) ZIF-Filler Incorporated Mixed Matrix Membranes (MMMs) for Efficient Gas Separation: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, Article 108541. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108541>
- [11] Dai, Y., Niu, Z., Luo, W., Wang, Y., Mu, P. and Li, J. (2023) A Review on the Recent Advances in Composite Membranes for CO₂ Capture Processes. *Separation and Purification Technology*, **307**, Article 122752. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122752>
- [12] Ding, R., Wang, Q., Ruan, X., Dai, Y., Li, X., Zheng, W., et al. (2022) Novel and Versatile PEI Modified ZIF-8 Hollow Nanotubes to Construct CO₂ Facilitated Transport Pathway in MMMs. *Separation and Purification Technology*, **289**, Article 120768. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120768>
- [13] Shah Buddin, M.M.H. and Ahmad, A.L. (2021) A Review on Metal-Organic Frameworks as Filler in Mixed Matrix Membrane: Recent Strategies to Surpass Upper Bound for CO₂ Separation. *Journal of CO₂ Utilization*, **51**, Article 101616. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101616>
- [14] Ahmad, M.Z., Martin-Gil, V., Supinkova, T., Lambert, P., Castro-Muñoz, R., Hrabanek, P., et al. (2021) Novel MMM Using CO₂ Selective SSZ-16 and High-Performance 6FDA-Polyimide for CO₂/CH₄ Separation. *Separation and Purification Technology*, **254**, Article 117582. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117582>
- [15] Torres, A., Soto, C., Carmona, F.J., Simorte, M.T., Sanz, I., Muñoz, R., et al. (2024) Enhancing Permeability: Unraveling the Potential of Microporous Organic Polymers in Mixed Matrix Membranes. *ACS Applied Polymer Materials*, **6**, 9088-9098. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c01379>
- [16] Zheng, W., Ding, R., Dai, Y., Ruan, X., Li, X., Jiang, X., et al. (2023) Regulating the Pore Engineering of MOFs by the Confined Dissolving of PSA Template to Improve CO₂ Capture. *Journal of Membrane Science*, **670**, Article 121373. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121373>
- [17] Shin, J.E., Lee, S.K., Cho, Y.H. and Park, H.B. (2019) Effect of PEG-MEA and Graphene Oxide Additives on the Performance of Pebax 1657 Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Journal of Membrane Science*, **572**, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.025>
- [18] Karahan, H.E., Goh, K., Zhang, C., Yang, E., Yildirim, C., Chuah, C.Y., et al. (2020) MXene Materials for Designing Advanced Separation Membranes. *Advanced Materials*, **32**, Article 1906697. <https://doi.org/10.1002/adma.201906697>
- [19] Pazani, F., Salehi Maleh, M., Shariatifar, M., Jalaly, M., Sadrzadeh, M. and Rezakazemi, M. (2022) Engineered Graphene-Based Mixed Matrix Membranes to Boost CO₂ Separation Performance: Latest Developments and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **160**, Article 112294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112294>
- [20] Liang, Y., Yu, C., Yang, X. and Qiao, Z. (2024) Preparation of Ultrathin and Highly Loaded MOF Mixed Matrix Membranes with Honeycomb-Like Structure via Ordered Array Self-assembly. *Chemical Engineering Journal*, **485**, Article 149749. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149749>

- [21] He, X., Huang, Y., An, M., Fu, J., Wu, D., Qi, S., et al. (2024) Electric-Field-Assisted Arrangement of Carbon Nanotube Inside PDMS Membrane Matrix for Efficient Bio-Ethanol Recovery via Pervaporation. *Separation and Purification Technology*, **334**, Article 125952. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125952>
- [22] Hassan, N.S., Jalil, A.A., Bahari, M.B., Khusnun, N.F., Aldeen, E.M.S., Mim, R.S., et al. (2023) A Comprehensive Review on Zeolite-Based Mixed Matrix Membranes for CO₂/CH₄ Separation. *Chemosphere*, **314**, Article 137709. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137709>
- [23] Dai, Y., Fang, T., Li, S., Wang, Y., Zhong, S., Su, W., et al. (2024) Mixed-Matrix Membranes Based on Semi-Oxidation MXene Modified G-C₃N₄ Nanosheet for Enhanced CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **348**, Article 127776. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127776>
- [24] Chen, Z., Zhang, P., Wu, H., Sun, S., You, X., Yuan, B., et al. (2022) Incorporating Amino Acids Functionalized Graphene Oxide Nanosheets into Pebax Membranes for CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **288**, Article 120682. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120682>
- [25] Ding, Y., Dai, Y., Wang, H., Yang, X., Yu, M., Zheng, W., et al. (2024) Synergistic Improvement in Gas Separation Performance of MMMs by Porogenic Action and Strong Molecular Forces of ZIF-93. *Separation and Purification Technology*, **345**, Article 127214. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127214>
- [26] 戴欢涛, 游新秀, 徐浩亮, 等. 铁浸渍竹子生物炭吸附CO₂特性研究[J]. 能源化工, 2023, 44(5): 10-15.
- [27] 张学杨, 徐浩亮, 戴欢涛, 等. 微波辐照木质素浸渍生物炭吸附CO₂性能[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4427-4436.
- [28] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 近30年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J]. 中国农业科学, 2023, 56(16): 3140-3155.
- [29] Cao, L., Zhang, X., Xu, Y., Xiang, W., Wang, R., Ding, F., et al. (2022) Straw and Wood Based Biochar for CO₂ Capture: Adsorption Performance and Governing Mechanisms. *Separation and Purification Technology*, **287**, Article 120592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120592>
- [30] Ding, R., Li, Z., Dai, Y., Li, X., Ruan, X., Gao, J., et al. (2022) Boosting the CO₂/N₂ Selectivity of MMMs by Vesicle Shaped ZIF-8 with High Amino Content. *Separation and Purification Technology*, **298**, Article 121594. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121594>
- [31] Wang, H., Ding, Y., Ning, M., Yu, M., Zheng, W., Ruan, X., et al. (2023) Amino-functional CPL-1 with Abundant CO₂-Philic Groups to Enhance MMM-Based CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **322**, Article 124227. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124227>
- [32] Zhang, X., Gao, B., Fang, J., Zou, W., Dong, L., Cao, C., et al. (2019) Chemically Activated Hydrochar as an Effective Adsorbent for Volatile Organic Compounds (VOCs). *Chemosphere*, **218**, 680-686. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.144>
- [33] Luo, W., Hou, D., Guan, P., Li, F., Wang, C., Li, H., et al. (2024) Pebax Membranes-Based on Different Two-Dimensional Materials for CO₂ Capture: A Review. *Separation and Purification Technology*, **340**, Article 126744. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126744>
- [34] Lin, D., Xiao, L., Qin, W., Loy, D.A., Wu, Z., Chen, H., et al. (2022) Preparation, Characterization and Antioxidant Properties of Curcumin Encapsulated Chitosan/Lignosulfonate Micelles. *Carbohydrate Polymers*, **281**, Article 119080. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119080>
- [35] 谢丽梅, 韩欣妍, 刘亦嘉, 等. 纳米铁复合生物炭与砷在土壤中的共迁移行为[J]. 中国环境科学, 2025: 1-11. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250109.006>, 2025-03-08.
- [36] Serrano-Lotina, A., Portela, R., Baeza, P., Alcolea-Rodriguez, V., Villarroel, M. and Ávila, P. (2023) Zeta Potential as a Tool for Functional Materials Development. *Catalysis Today*, **423**, Article 113862. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.08.004>
- [37] 曾子弱, 李凯, 李晓康, 等. 竹基生物炭制备方法及其对苯吸附的影响研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024: 1-13. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2024.112>, 2025-03-08.
- [38] 孙晓, 石林, 张凰, 等. 不同温度玉米秸秆生物炭对eDNA的吸附机制[J]. 环境化学, 2024: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20241212.1012.002.html>, 2025-03-08.
- [39] 宁梦佳, 代岩, 郜元, 等. Cu(Qc)₂强化Pebax混合基质膜分离CO₂[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5652-5659.
- [40] 赵烨, 丘晓琳, 王杰, 等. 胺化木质素磺酸钠插层水滑石/Pebax混合基质膜的制备及气体分离性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(3): 102-108.
- [41] Du, X., Feng, S., Luo, J., Zhuang, Y., Song, W., Li, X., et al. (2023) Pebax Mixed Matrix Membrane with Bimetallic CeZr-MOFs to Enhance CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **322**, Article 124251. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124251>

-
- [42] Zhao, D., Ren, J., Qiu, Y., Li, H., Hua, K., Li, X., *et al.* (2015) Effect of Graphene Oxide on the Behavior of Poly(Amide-6-b-ethylene Oxide)/Graphene Oxide Mixed-Matrix Membranes in the Permeation Process. *Journal of Applied Polymer Science*, **132**. <https://doi.org/10.1002/app.42624>
 - [43] Feng, L., Zhang, Q., Su, J., Ma, B., Wan, Y., Zhong, R., *et al.* (2023) Graphene-Oxide-Modified Metal-Organic Frameworks Embedded in Mixed-Matrix Membranes for Highly Efficient CO₂/N₂ Separation. *Nanomaterials*, **14**, Article 24. <https://doi.org/10.3390/nano14010024>