



移动扫码阅读

杨佳林, 孟仕浩, 韩博宇, 等. 烟草废弃物衍生炭材料的热化学制备与吸附机制研究进展 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(5): 79-92.

YANG Jialin, MENG Shihao, HAN Boyu, et al. Advances in Thermo-Chemical Preparation and Adsorption Mechanisms of Carbon Materials Derived from Tobacco Wastes [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(5): 79-92.

烟草废弃物衍生炭材料的热化学制备与 吸附机制研究进展

杨佳林, 孟仕浩, 韩博宇, 范轩祯, 李婉婉, 阿衣拍衣力·月提库尔,
孙佳友, 安 锵, 詹 昊*

(中南大学能源科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 烟草生产过程中产生的大量废弃物兼具废物与资源的双重属性。利用热化学技术将烟草废弃物转化为用于环境修复的生物基炭材料, 有助于实现其清洁高效利用。系统综述了烟草废弃物衍生炭材料的制备策略及其在气、水、土污染物吸附机制方面的研究进展。现有研究表明, 烟草废弃物衍生炭材料可分为原生生物炭、功能化改性生物炭和活化改性生物炭3类, 其结构特征与对应不同污染物的吸附机制存在显著差异。具体而言, 功能化和活化改性炭材料通过静电吸引、离子交换和表面络合等机制, 在气体捕集和废水处理领域展现出良好的应用前景; 而原生生物炭则因其独特的理化性质, 能够提升土壤肥力、增强微生物活性以及抑制污染物释放等, 可作为高效的土壤调理剂。进一步研究发现, 烟草废弃物衍生生物炭的吸附性能主要取决于其孔隙结构、表面官能团和芳香碳结构的协同作用。基于“制备-结构-效果”的构效关系, 未来研究应着重探索自上而下的热化学制炭策略, 以实现烟草废弃物向高效吸附炭材料的定向转化, 为环境修复领域提供参考。

关键词: 烟草废弃物; 热化学转化; 炭材料; 吸附机制; 环境修复

中图分类号: X705; X795 文献标识码: A 文章编号: 2097-4183(2025)05-0079-14

Advances in Thermo-Chemical Preparation and Adsorption Mechanisms of Carbon Materials Derived from Tobacco Wastes

YANG Jialin, MENG Shihao, HAN Boyu, FAN Xuanzhen, LI Wanwan,
AYIPAIYILI Yuetikuer, SUN Jiayou, AN Qiang, ZHAN Hao*

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The rapid growth of China's tobacco industry leads to a significant increase in tobacco production and processing, inevitably generating substantial tobacco waste. This waste poses both environmental challenges and opportunities for resource utilization. Developing clean and efficient methods to utilize these residues is essential for advancing environmental sustainability and enhancing the economic value of the tobacco industry. One promising approach is the thermochemical conversion

收稿日期: 2024-12-12

修回日期: 2025-02-08

接受日期: 2025-02-15

DOI: 10.20078/j.eep.20250309

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51906247); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30691); 大学生创新创业训练计划资助项目(CXPY2024450)

第一作者: 杨佳林(2004—), 男, 贵州贵阳人, 主要研究方向为烟草废弃物资源化利用。E-mail: 2659912270@qq.com

*通讯作者: 詹 昊(1986—), 男, 湖南益阳人, 讲师, 主要研究方向为轻工有机固废的清洁利用与高值循环、农林生物质热解气化技术及热气多联供工艺等。E-mail: hao.zhan@csu.edu.cn

of tobacco waste into biochar, which has gained considerable attention as a major strategy for environmental remediation. This review systematically examines the recycling of tobacco waste into biochar-based carbon materials, focusing on thermochemical preparation strategies and their adsorption mechanisms for environmental pollutants in water, air, and soil. Tobacco waste-derived biochars can be classified into three types: pristine, functionalized, and activated biochars, each with distinct physicochemical properties tailored for specific environmental applications. Functionalized and activated biochars demonstrate excellent adsorption performance for airborne contaminants and wastewater pollutants, attributed to mechanisms including electrostatic interactions, surface precipitation, cation- π interactions, ion exchange, and surface coordination. The introduction of functional groups and an increased surface area during activation or functionalization significantly enhances their adsorption capabilities. In contrast, pristine biochars primarily improve soil fertility by enhancing nutrient retention, stimulating microbial activity, and reducing the bioavailability of toxic pollutants, offering an eco-friendly solution for sustainable agriculture. The adsorption capacity of tobacco waste-derived biochars is closely linked to key physicochemical properties, including pore structure, surface functional groups, heteroatom doping, graphitization degree, and aromatic ring carbon structure. Understanding these structural characteristics allows researchers to tailor biochar properties for specific environmental applications. However, challenges remain. Precisely controlling biochar properties during thermochemical conversion and scaling up production methods are key areas needing further attention. Future studies should focus on deepening our understanding of the "preparation-structure-effect" relationship and elucidating fundamental adsorption mechanisms. A top-down strategic approach, incorporating innovative activation techniques, optimized process parameters, and hybrid biochar materials, could further enhance adsorption performance and expanding potential applications. Efficiently converting tobacco waste into high-performance adsorbents will contribute to sustainable waste management, environmental protection, and the circular economy.

Keywords: Tobacco wastes; Thermochemical conversion; Carbon material; Adsorption mechanism; Environmental remediation

0 引言

烟草作为一种典型的农业生物质,是我国最重要的经济作物之一。2023年,我国烟草财政收入达1.5万亿元,约占财政总收入的5%。此外,近十年来我国烟草年产量均超200万t^[1]。因长期受传统农业影响,目前烟草的种植与生产模式较为粗放,企业在清洁高效生产和废弃物利用方面的意识不足,致使烟草生产加工环节产生大量烟草废弃物且未得到有效利用,年累积量达数千万吨^[2-3]。传统烟草废弃物处置方式包括就地还田和露天焚烧。其中,就地还田易造成土壤板结和地下水污染,且废弃物中含有的烟碱对土壤微生物具有生态毒性^[4],而焚烧则会排放大量大气污染物NO_x^[5]。因此,如何清洁、高效处置烟草废弃物已成为烟草行业关注的焦点。从来源和成因看,烟草废弃物是一类潜在的木质纤维类生物质资源,

有机质含量高,具有资源化潜力^[6-8]。从保护环境与节约资源角度出发,将具有废物与资源双重属性的烟草废弃物进行清洁高效利用,对于烟草企业的节能降耗与行业的可持续发展均具有积极意义。

通过热化学转化方法,如热解、气化、水热碳化等,将烟草废弃物转化为高附加值材料具有技术可行性,也是当下的研究热点。其中,烟草废弃物经热化学转化制成的生物基炭材料,可应用于废气捕集、废水处理和土壤保育等环境修复领域,该工艺是目前烟草废弃物资源化利用的主流方向之一,受到了学者的广泛关注。本文围绕各类烟草废弃物的热化学转化,以多类型生物炭为目标产物,综述了烟草废弃物衍生生物炭材料的热化学制备策略与影响因素,以及应用在废气捕集、废水处理和土壤修复等方面的作用机理与规律特性等相关研究进展,通过进一步对比分析不同应用场景下生物炭吸附剂的构效关系和吸附机制,为

烟草废弃物清洁高效利用基础研究和工程应用提供理论依据和可行思路。

1 烟草废弃物成因与理化性质

如图 1 所示,烟草生产工艺流程主要包括收割与挑选、调制与烘烤、切丝与卷烟 3 个环节。

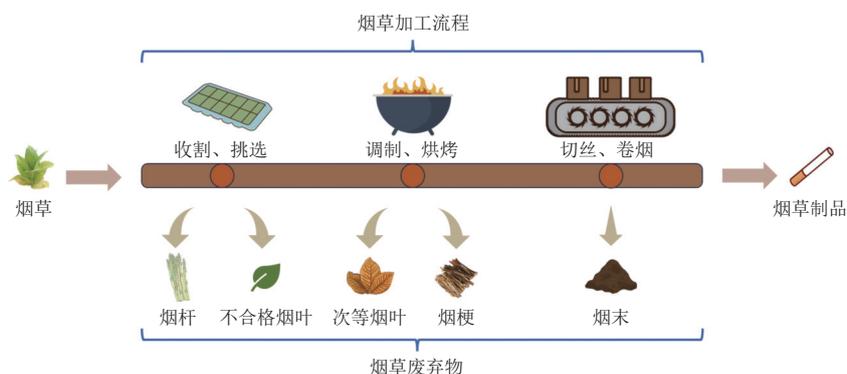


图 1 烟草生产工艺流程图

Fig. 1 Flowchart of tobacco production process

其中,第 1 环节会产生烟杆以及不合格烟叶;第 2 环节会生成次等烟叶和烟梗;第 3 环节则会出现大量烟末。以上各环节产生的剩余物或副产物均属于烟草废弃物,主要涵盖未被用于制烟的烟杆、不合格烟叶、次等烟叶、烟梗以及在制烟过程中积累的烟末等^[9]。

图 2 总结了烟草废弃物的基本理化性质。生化组成显示,烟草废弃物的纤维素、半纤维素和木质素总含量超过 68%,表明其为一种介于木本和草本类之间的生物质。此外,烟草废弃物富含碳氧元素,平均含量均超过 40%,氢含量 5%~6%,基本不含硫,且含有大量有机质(约 85%)。尽管烟草废弃物的来源各异,但其元素和工业组成差异较小,具有良好的资源属性,是适合借助热化学技术转化为炭材料的优质生物质资源。然而,烟草废弃物还含有一定氮元素(约 2.2%),主要以尼古丁等生物碱形式存在,对环境有潜在威胁。

综上所述,烟草废弃物富含木质纤维素等有

机质,同时含有一定含氮组分,属于富碳、富氧且高灰的典型生物质资源,这使得基于热化学转化策略实现其资源化利用成为可能。同时,以目标产物为导向制备应用于环境修复的碳基吸附剂,既符合废物高值化和以废治废的理念,也有助于促进资源循环、减少环境污染。

2 烟草废弃物衍生炭材料的热化学制备方法

碳基吸附剂是目前生物基炭材料的主要用途之一,可采用单一或耦合的热化学方法制备。常见的热化学制备途径及产物分为以下几类(图 3):

(1)直接碳化法:原料通过热解或水热碳化方式直

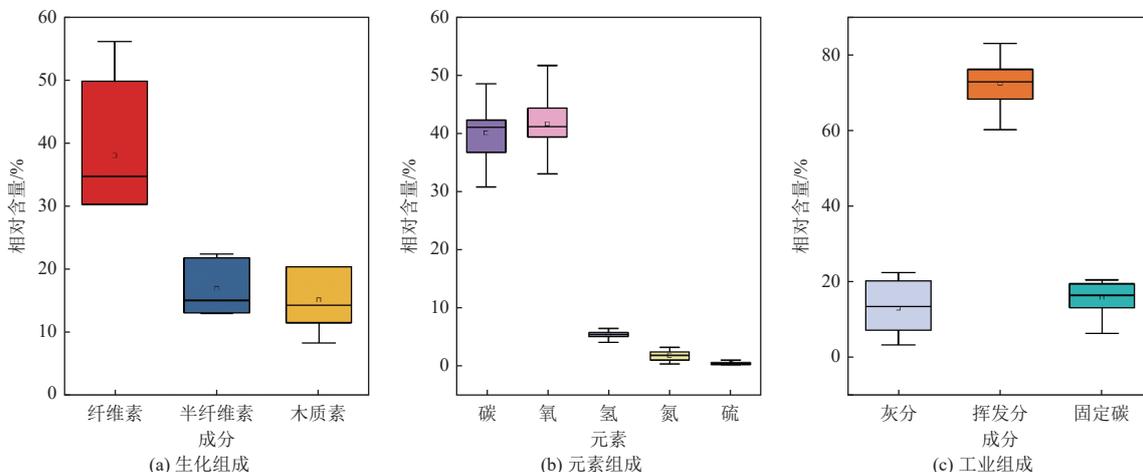


图 2 烟草废弃物基本理化性质^[6-8,10-34]

Fig. 2 Basic physicochemical properties of tobacco wastes^[6-8,10-34]

接获得原生生物炭; (2) 碳化耦合功能化改性法: 直接碳化基础上掺杂杂原子或负载金属等方式制

备功能化改性生物炭; (3) 碳化耦合活化改性法: 直接碳化基础上外加活化剂制备活化改性生物炭。

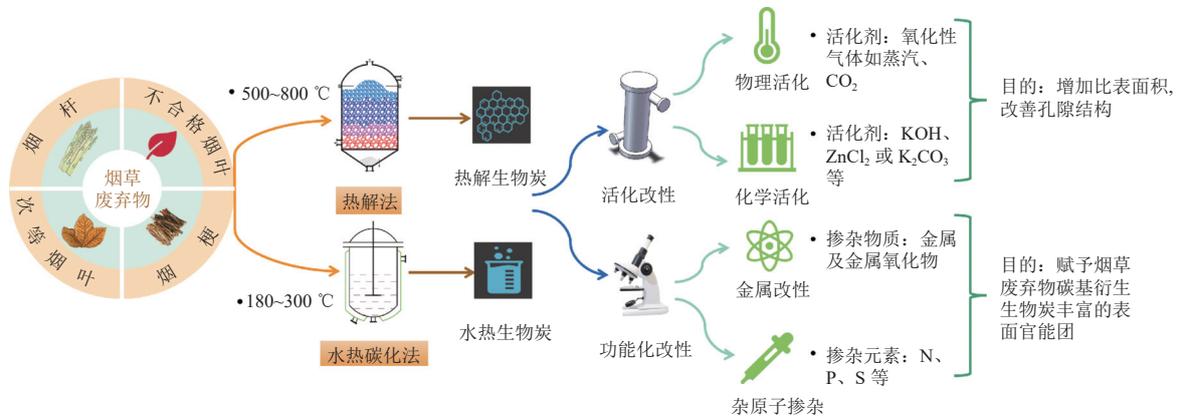


图 3 烟草废弃物衍生生物炭材料的热化学制备策略

Fig. 3 Thermochemical preparation strategy of biochar materials derived from tobacco wastes

2.1 直接碳化法

在无氧或缺氧环境下热解, 或水热碳化可将烟草废弃物直接转化为原生生物炭。热解是采用缓慢升温的方式, 将温度控制在 500~800 °C 并维持一段时间。热解过程中, 温度是决定生物炭产率与属性的关键因素。ZHANG 等^[11] 研究表明, 当热解温度从 300 °C 升至 700 °C 时, 废烟叶生物炭的产率由 53.7% 降至 33.3%, 这主要归因于不稳定有机官能团(—OH 和 C—H)的裂解挥发。此外, CAO 等^[35] 指出提高热解温度能够提升生物炭的 pH。

水热碳化法是在 180~300 °C 的温度区间以及自身压力下, 模拟自然界煤化过程制备生物炭的方法。相较于热解法, 水热碳化法的反应条件更为温和, 能耗更低, 且无需预处理原料。在水热碳化过程中, 温度、停留时间和固液比等因素对产物特性有重要影响。WU 等^[36] 在实验中发现, 烟草废弃物与废铁渣共水热时, 在 180 °C、24 h 的条件下制备的生物炭(铁基碳微球)对土壤中 Cd(II) 的去除效果最为理想。这是由于在 120~180 °C 的温度区间内升高热解温度, 同时将停留时间从 3 h 延长至 24 h, 不仅能够有效促进生物炭表面碳微球的生成, 还可使生物炭表面结构趋于更加规则与均匀, 进而显著提升其对土壤中 Cd(II) 的去除效果。此外, 延长停留时间会导致生物炭 pH 降低, 例如在 190 °C 下, 将停留时间由 0.5 h 延长至 1 h, 生物炭 pH 由 6.0 降至 5.3^[37]。升高固液比有助于增加生物炭中溶解有机碳总量, 但过高的固液比反而会导致生物炭碳化不完全, 使比表面积

和孔体积减少 61.8% 和 70.9%^[38]。

2.2 碳化耦合功能化改性法

功能化改性是在直接碳化法基础上, 通过掺杂非金属或负载金属元素, 赋予生物炭丰富的表面官能团, 从而提升其吸附能力的一种方法。此方法根据掺杂顺序的差异可分为 2 类: (1) 热解或水热碳化过程中直接掺杂的原位功能化改性; (2) 在直接碳化后进行的后掺杂功能化改性, 该方法也是金属负载的常用手段。

在非金属元素掺杂改性领域, 氮掺杂改性因其能显著增强生物炭表面极性而被广泛研究。以乙二醇为氮源运用水热碳化法可制备出具备丰富表面官能团(C=C、C—N、C—O 和 C=O/C—N)的生物炭, 由于氮掺杂强化了生物炭表面极性, 使其具有较高的丙酮吸附量(16.91 mmol/g)^[39]。尿素与废烟梗共水热碳化也可制得氮掺杂生物炭, 其中氮以吡啶氮、吡啶酮、季铵氮和氧化氮的形式赋存于碳骨架中, 对 CO₂ 具有良好的捕获能力(4.8~7.5 mmol/g)^[40]。LI 等^[41] 以烟杆为碳基载体, 选用富含氧官能团(OFGs)的聚丙烯酸与过渡金属(Fe 和 Co)进行改性, 借助水热碳化法制备了 OFGs 和 CoFe₂O₄ 双改性生物炭, 对二氯喹啉酸(QNC)的降解效率高达 80.7%, 其原因在于改性生物炭体系富含羟基自由基、超氧自由基和单重态氧, 有助于 QNC 的降解。此外, WU 等^[36] 研究了一种聚丙烯酸钠包覆的新型磁性铁基生物炭。聚丙烯酸钠为生物炭表面引入了大量羧基, 使其在 2 h 内能吸附 10 mg/L Cd(II) 溶液中 98.5% 的 Cd(II)。

2.3 碳化耦合活化改性法

碳化耦合活化改性法是通过活化剂的腐蚀作用增加生物炭的比表面积,并构建丰富孔隙结构,从而强化其物理吸附能力的有效方法,涵盖物理活化法与化学活化法。

物理活化法的核心在于氧化剂(如蒸汽或CO₂)参与烟草废弃物的碳化反应过程,促使所得生物炭内部形成大量孔隙结构。具体而言,以蒸汽为氧化剂时,其通过加速原料的脱挥发进程,能够显著提升生物炭的孔隙度^[42]。此外,蒸汽活化亦能有效增加生物炭比表面积(414.94 m²/g)和总孔体积(为257.00 mm³/g)^[43]。CO₂的活化机制则是借助非均相反应从生物炭中释放低分子量挥发物,以此改善内部孔隙堵塞状况,最终提升生物炭的多孔性^[44]。

化学活化法是通过化学试剂(例如KOH、ZnCl₂或K₂CO₃等)对生物炭活化处理,以改善生物炭比表面积与孔隙结构。例如,微波协同K₂CO₃活化可制备具有高比表面积(2557 m²/g)和大总孔体积(1.647 cm³/g)的活化生物炭,对亚甲蓝的吸附量可高达517.5 mg/g^[45]。CHEN等^[46]分别运用K₂CO₃、KOH和ZnCl₂对生物炭进行活化处理,制备了PC(K₂CO₃活化生物炭)、PH(KOH活化生物炭)和ZC(ZnCl₂活化生物炭)3种生物炭,并将其应用于丙酮吸附研究。研究结果表明,ZC具有更优异的孔隙度(0.67 mL/g)和最大的比表面积

(1347 m²/g),而PH和PC在孔隙度和比表面积方面较为相近,分别为0.30 mL/g、0.32 mL/g和501 m²/g、553 m²/g。

总体而言,烟草废弃物经由热化学转化能够制备出3类性质各异的生物炭材料。原生生物炭的产率及其表面性质受碳化过程中温度、停留时间等关键因素的调控。在直接碳化的基础上,功能化改性可制备出表面官能团更为丰富的功能化改性生物炭,而活化改性则能够制备出孔隙发达、比表面积大的活化改性生物炭。这2种改性方法赋予生物炭不同的吸附效果和作用机制,使其能够针对性地应用于不同环境污染物的修复场景,可为环境治理领域提供多元化的生物炭材料选择。

3 烟草废弃物衍生炭材料的性能与应用

3.1 废气处理与气体捕集

当前,化石燃料在燃煤电厂、垃圾焚烧以及冶金等工业供热供电领域的应用会产生大量废气,加剧空气污染与温室效应,严重威胁人类健康^[44]。在废气处理和气体捕集方面,烟草废弃物衍生生物炭作为吸附剂备受关注,其主要应用包括去除烟气中的元素汞^[47-50]、捕集烟气中的CO₂^[40,51-52]、吸附挥发性有机物(VOCs)^[39,46,53]以及硫磷污染物等^[54-55]。图4概括总结了不同种类的烟草废弃物衍生生物炭对污染物的吸附及其作用机制。

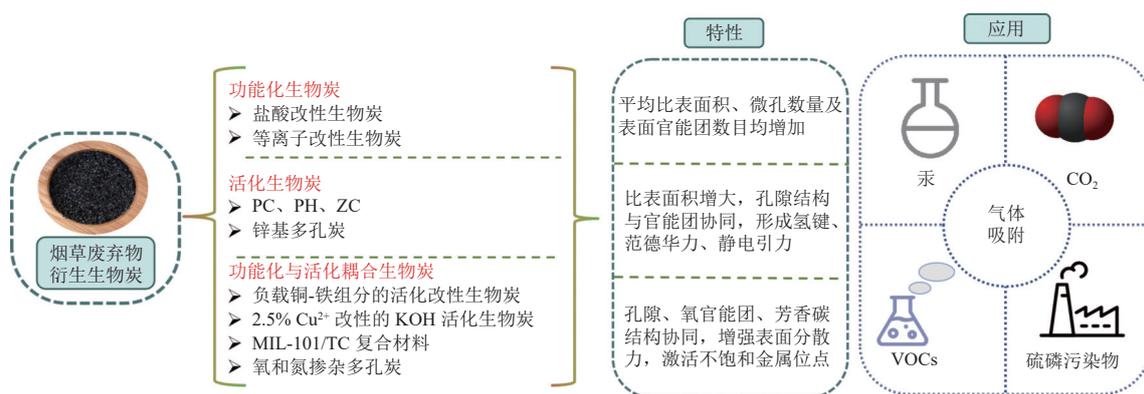


图4 基于废气捕集的烟草废弃物衍生生物炭分类和吸附机制图

Fig. 4 Classification and adsorption mechanism of tobacco waste-derived biochar for waste gas capture

3.1.1 烟气元素汞与CO₂的捕集效果与机制

烟气中的元素汞具有反应活性低、挥发性强、水溶性低及毒性强等特征。当前,改性生物炭因其成本低廉和产率较高等优势,被广泛应用于吸附此类污染物。WANG等^[47-50]对烟草废弃物

衍生生物炭经功能化(酸改性、等离子体改性)处理后吸附元素汞的潜能展开了研究。经盐酸改性后,生物炭的平均比表面积由29.9 m²/g提升至110.1 m²/g,微孔体积从0.002 m³/g增大至0.106 m³/g。这些微孔能够有效吸附氯原子,并与汞反

应生成氯化汞,使得汞吸附效率从 8.2% 跃升至 100.0%^[48]。此外,借助非热等离子体改性同样可增强生物炭对元素汞的吸附能力。经氯气^[47,50]和硫化氢^[49]耦合等离子体改性后,生物炭表面的 C—S、C—Cl 等官能团数目显著增多,这些基团作为活性位点与元素汞反应形成氯化汞和硫化汞等化合物,极大地提升了对元素汞的吸附能力。例如,氯气改性后对汞的吸附能力增大了 36 倍,硫化氢改性后对汞的吸附效率从 26.4% 提高至 95.5%。然而,此类改性生物炭在高温条件(150 ℃)下的汞去除效果会出现一定程度的下降^[49]。

在烟气 CO₂ 捕集领域,当前研究聚焦于水热碳化耦合活化改性的制备策略,深入探索了烟草废弃物衍生的杂原子(氮、氧)掺杂活性生物炭的可行性与潜力。HUANG 等^[40]采用含氮添加剂(三聚氰胺、乙醇二胺或尿素)与烟梗共水热碳化并结合 KOH 活化的方法,制备出氮掺杂活性炭。其中,尿素能够显著提升活性炭对 CO₂ 的捕集能力(4.83~7.35 mmol/g),且具备良好的可再生性。这是由于尿素的添加提高了活性炭的吡咯氮含量,催生更多窄微孔(孔径 < 1 nm),吡咯氮与窄微孔的协同效应增强了活性炭对 CO₂ 的吸附能力。MA 等^[51]将烟草废弃物与乙二胺进行水热处理,制备出表面积高达 2 940 mmol/g 的富氧和氮的多孔炭。在 0.1 MPa 条件下,该多孔炭对 CO₂ 的吸附能力为 4.33~6.54 mmol/g,其中孔隙结构的贡献率为 62%,表面官能团的贡献率为 38%。多孔炭较大的比表面积以及丰富的氧氮官能团,可强化了炭表面与 CO₂ 间的静电相互作用,显著提升 CO₂/N₂ 的选择性。此外,该课题组^[52]进一步提出通过水热手段使烟草废弃物中的—COOH 和 C—OH 基团与 Zn(II) 配合形成锌基多孔炭的新策略。相较于原生生物炭,锌基多孔炭中的 Zn(II) 额外提供了 144% 的超微孔体积。由于狭窄微孔(范德华力)和官能团(静电吸引)的存在,碳骨架与 CO₂ 之间存在显著的相互作用,在 0.1 MPa 和 25 ℃ 的条件下,展现出良好的 CO₂/N₂ 选择性(16.4~26.61)和 CO₂ 捕集能力(146~209 mmol/g)。

3.1.2 工业废气 VOCs 与硫磷污染物吸附效果与机制

烟草废弃物衍生的活性炭或其进一步的改性产物,已被证实能有效吸附处理 VOCs 及其他工业废气。MA 等^[39]的研究揭示,生物炭孔隙结构和表面官能团是影响丙酮吸附的核心要素,其最佳吸附量可达 16.91 mmol/g。在高压条件下,孔隙

体积与比表面积是影响吸附过程的主导因素;低压条件下,含氧及含氮官能团则成为关键影响因素。CHEN 等^[46]运用 K₂CO₃、KOH 和 ZnCl₂ 等活化剂对生物炭进行化学活化,并应用于丙酮吸附研究。研究发现,除多孔结构外,炭表面的含氧基团可借助氢键或范德华力,强化丙酮与炭表面之间的相互作用,进而提升对丙酮的吸附效能。此外,活化与功能化耦合策略制得的金属有机框架负载多孔炭(MIL-101/TC)能够高效吸附丙酮,达 1 120~1 130 mg/g。这是由于该多孔炭表面分散力的增强,以及 TC(烟茎多孔炭)对不饱和金属位点的有效激活^[53]。MA 等^[52]制备的锌基多孔炭在低浓度下展现出较大的苯吸附量(约 100~200 mg/g),得益于其较大的比表面积与孔隙体积。

此外,利用 Cu(II) 或 Fe(III) 等金属离子修饰的活化生物炭能够有效吸附硫磷污染物(如硫化氢、硫化羰和二硫化碳等)^[54]。研究表明,此类生物炭的吸附能力受微孔体积、表面积、反应温度、相对湿度及氧气浓度等条件影响。例如,采用 2.5% Cu 改性的 KOH 活化生物炭对磷化氢的吸附效果显著增强,其最大吸附容量可达 253 mg/g,该吸附效果取决于生物炭的孔隙结构、含氧官能团以及芳香族碳结构等特性的综合作用^[55]。

综上所述,烟草废弃物衍生生物炭通过功能化、活化或二者耦合的形式,在废气处理和气体捕集领域优势显著。通过对生物炭的孔隙结构、比表面积、表面官能团及芳香族碳结构等特性进行调控,可有效提升其对元素汞、CO₂、VOCs 及硫磷污染物的吸附能力。因此,基于对构效关系和吸附机制的深入理解,需要进一步探究新型改性方法,将烟草废弃物转化为具有高产率和高选择性的生物炭材料,以增强其在气体吸附方面的应用潜力。

3.2 废水处理与水体净化应用

随着我国城市化、工业化进程加快,水体污染日益严峻,废水处理及水体净化工作至关重要。烟草废弃物衍生生物炭在去除废水重金属、有机物以及氮磷污染物方面具有潜力,相关研究主要聚焦于优化生物炭制备方法、优化吸附能力以及分析吸附影响因素与机制。

3.2.1 废水重金属离子的吸附效果与机制

在废水重金属离子处理方面,研究主要集中于 Cr(VI) 和 Pb(II),生物炭吸附重金属的机制涵盖表面络合作用、阳离子- π 相互作用,以及沉淀

作用^[56]。ZHANG 等^[11]研究表明,烟草废弃物原生生物炭能够有效去除废水中 Cr (VI),最佳吸附量达 355.91 mg/g。原生生物炭进行改性后对重金属离子的吸附能力得到显著提升。例如,烟草废弃物铁功能化生物炭对 Cr (VI) 的吸附能力约为原生生物炭的 14 倍,这归因于 Cr (VI) 先与生物炭表面的羟基发生作用,被还原为 Cr (III) 后再与氨基进行螯合作用^[57]。MANFRIN 等^[58]通过三重活化(热活化-化学 H₃PO₄-物理 CO₂)制备的改性生物炭在更宽的 pH 范围(3.00~7.00)内对 Pb (II)

与 Cd (II) 展现出更优的吸附能力,其吸附机理主要为化学吸附,并遵循拟二级动力学和 Langmuir 模型。上述研究证实,活化改性有助于提高生物炭对重金属离子的吸附速率,而功能化改性能够强化其吸附能力。

3.2.2 废水有机污染物的吸附效果与规律

在去除废水有机污染物的研究方面,表 1 总结了烟草废弃物衍生生物炭的相关结果,涉及不同原料制备生物炭的方法,以及对各类有机污染物的吸附效果及其作用机制。

表 1 烟草废弃物衍生生物炭去除废水中有机污染物的研究进展总结

Table 1 Summary of organic pollutant removal from wastewater by tobacco waste-derived biochar

改性方法	改性剂	原料	有机污染物	吸附容量/(mg·g ⁻¹)	吸附机制	文献
一步化学活化	K ₂ CO ₃ 和KOH	烟草废弃物	苯酚	17.830(K ₂ CO ₃)和 45.490(KOH)	—	[59]
一步化学活化	浓硫酸	烟杆	刚果红	285.500	静电相互作用	[60]
一步化学活化	ZnCl ₂	烟茎	亚甲蓝	123.460	—	[61]
一步化学活化	K ₂ CO ₃	烟杆	亚甲蓝	849.910	π - π 共轭作用、氢键作用、 静电相互作用	[62]
两步化学活化	K ₂ C ₂ O ₄ ·H ₂ O 和CaCO ₃	烟杆	罗丹明B	588.700	静电相互、氢键作用、 π - π 共轭作用	[63]
一步化学活化	磷酸	烟杆	氯氰菊酯	2.162	共价键结合作用	[64]
两步化学活化	K ₂ CO ₃	烟杆	亚甲蓝	517.500	—	[45]
物理活化	—	烟茎	磺胺二甲嘧啶	99.370	π - π 共轭作用、氢键作用、 静电相互作用、表面络合作用	[65]

由表 1 可知,(1)化学活化改性是提升烟草衍生生物炭对有机污染物吸附能力和效率的关键途径。这主要归因于该改性方式可有效改善生物炭的孔隙结构,常用活化剂包含 K₂CO₃、ZnCl₂ 以及 KOH 等。(2)改性生物炭对有机污染物的吸附机制包括静电作用、氢键作用、 π - π 共轭作用、表面络合作用以及共价键结合作用。此外,pH 对炭表面电荷性质、有机物存在形态、初始浓度,以及炭的用量产生影响,并在一定程度上能够决定吸附位点的数量,而这些因素均会对吸附效果造成影响。

3.2.3 水体氮磷污染物的去除效果与规律

烟草废弃物衍生生物炭在水体氮磷污染物的吸附方面亦展现出有效性,相关研究主要聚焦于功能化改性生物炭。在金属改性生物炭对含磷污染物的去除方面,已有研究^[66-70]表明,(1)Ca/Mg 改性能显著提升生物炭吸附与再循环能力,历经 5 次循环后其吸附容量仍可超 50%;(2)Ca 负载可

拓宽生物炭适用的 pH 范围至 3.00~12.00;(3)吸附过程符合拟二级动力学,并遵循 Langmuir 和 Freundlich 等温模型;(4)吸附机理涵盖静电吸引、离子交换以及沉淀反应。对于废水中含氮污染物,其主要存在形式包括氨氮、硝酸盐和有机氮等。原生生物炭基于表面单分子层吸附机制去除水体中的氨氮,吸附容量处于 10.46~13.35 mg/g 范围^[71]。吡啶催化法改性的功能化生物炭主要通过表面叔胺基团的静电、离子交换吸附以及多孔结构材料的物理吸附实现硝酸盐的去除,吸附容量达 28.46 mg/g^[72]。上述研究充分证实了烟草废弃物衍生的改性生物炭用于处置水体多种污染物方面具有潜力。

总体而言,各种烟草废弃物衍生生物炭对废水污染物的吸附机理存在差异。活化生物炭主要用于去除有机污染物,其吸附过程依赖于化学与物理吸附,受生物炭表面官能团及孔隙结构影响;功能化(Ca、Mg、Al)生物炭则更倾向于处理重金

属和无机污染物, 主要依靠由表面官能团主导的化学吸附, 涉及络合、沉淀及离子交换等作用。未来研究应着重于实现孔隙结构和表面官能团选择性调控的热化学制备策略, 旨在开发具有针对性、低成本且高性能的碳基吸附剂以实现废水污染物的有效去除。

3.3 土壤修复应用

随着现代化与工业化快速发展, 大量污染物侵入土壤, 引发重金属富集^[73]、土壤侵蚀^[74], 以及土壤贫瘠^[75]等严峻问题, 对作物的生长产生不利影响。因此, 开发土壤污染修复技术已成为解决上述问题的关键。如图 5 所示^[74-77], 在土壤修复领域, 烟草废弃物衍生生物炭具有优势: (1) 固定土壤重金属, 控制气体排放; (2) 提升土壤的营养水平(涵盖氮、磷、钾和腐殖质等方面), 增加微生物的多样性与丰度, 进而提高土壤肥力。

3.3.1 土壤污染物的去除效果与机制

在土壤污染物去除领域, 原生生物炭备受关注。在通过 450~700 °C, 2~3 h 条件热解后制得的原生生物炭可直接或配合添加剂联合施用于土壤。相关研究主要集中在钝化重金属以及控制气体排放等方面。在农业土壤中, Pb(II) 和 Cd(II) 为最常见的重金属污染物。表 2 总结了原生生物

炭在土壤重金属钝化效果及其作用机制, 可概括为(1)表面吸附, 包括离子交换和沉淀; (2)表面含氧官能团产生的络合作用; (3)通过与土壤中的黏土矿物、氧化物等无机颗粒结合形成的胶体来吸附重金属; (4)微生物吸附和吸收作用。此外, 原生生物炭制备过程中的碳化温度与停留时间影响土壤 pH, 进而影响重金属的钝化效果。例如 WANG 等^[78]的研究发现, 在一定范围内, 较高的碳化温度以及较长的停留时间下制得的生物炭会促进土壤 pH 升高, 适宜改良酸性土壤。

在土壤气体排放控制方面, 研究主要聚焦于 NO_x 和 CO₂。TANG 等^[77]发现, 生物炭可促使土壤中反硝化细菌与真菌数量显著上升, 促进好氧反硝化作用, 致使土壤 NO_x 排放量增加 1.96~4.18 倍。同时, 原生生物炭也有利于土壤固碳, 提升累积 CO₂ 排放量(21.1%~49.1%)^[74]。依据碳平衡理论, 在烟草生长季节, 由于作物生物量与土壤碳储量增加, 原生生物炭通过影响光合作用来改变土壤碳输入, 促进土壤碳固存。

3.3.2 土壤肥力提升效果与规律

烟草废弃物衍生的原生生物炭作为土壤修复材料, 可有效改良土壤肥力。首先, 生物炭孔隙结构能够增加土壤孔隙度(幅度为 0.71%~15.11%),

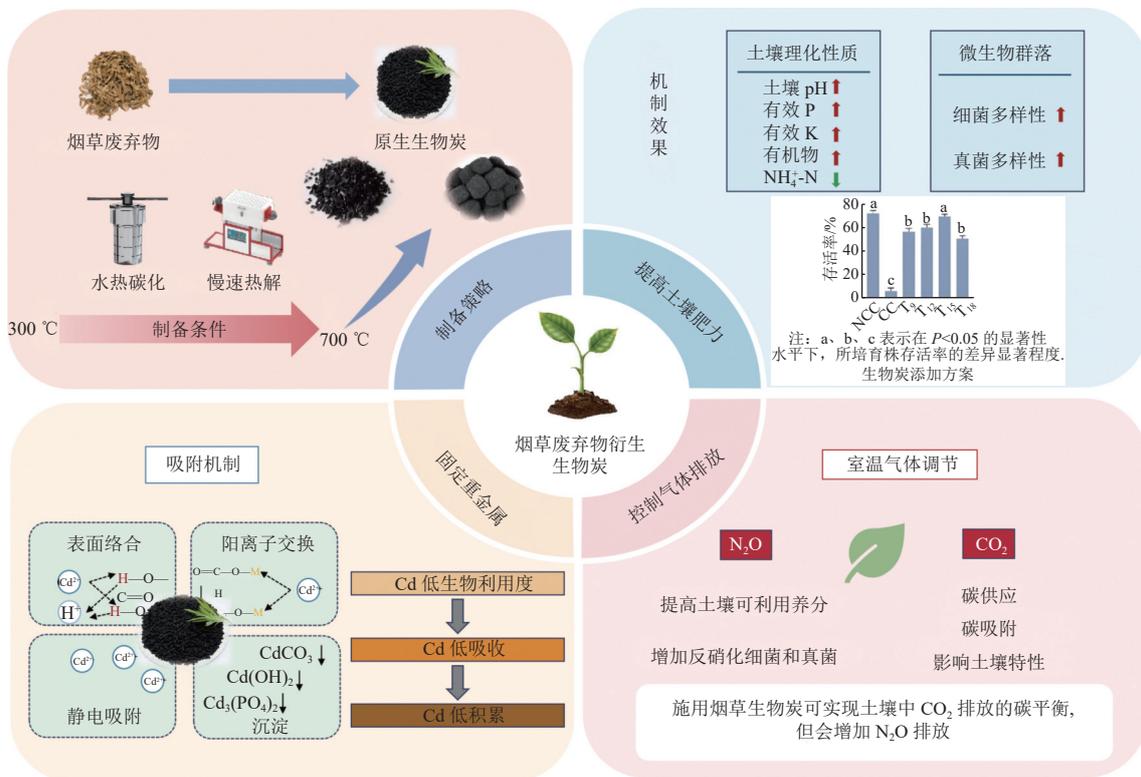


图 5 烟草废弃物衍生生物炭土壤修复机制图^[74-77]

Fig. 5 Mechanisms of soil remediation using biochar derived from tobacco wastes^[74-77]

表 2 烟草废弃物衍生原生生物炭对土壤重金属的钝化效果
Table 2 Passivation effect on soil heavy metals using tobacco waste-derived pristine biochar

原料	制备方法	重金属种类	去除效果	钝化机理	文献
烟杆	热解最终温度450 °C(2 °C/min), 保持2 h	Cd (II)	添加原生生物炭后, 土壤中Cd (II)减少了64.2%, 并转变为与碳酸盐和Fe-Mn氧化物结合形式	离子交换和沉淀	[73]
烟茎	热解温度700 °C, 保持3 h	Pb (II)和Cd (II)	对Pb (II)和Cd (II)的吸附率最高, 分别为44.5%和38.3%	离子交换和沉淀	[78]
烟茎	热解温度450 °C, 保持2 h	Cd (II)	将生物可利用的镉转化为低危害形态, 从而修复土壤	表面吸附和络合	[76]
烟杆	热解温度500 °C, 与矿物添加剂(钙膨润土和天然沸石等)联合使用	Pb (II)、Cd (II)和Cu (II)	沸石的加入显著降低了可提取重金属的含量, 其中Pb、Cd和Cu的去除率分别为82.53%、31.52%和75.0%	与无机颗粒结合形成胶体	[79]
烟杆	缺氧条件下热解	有效Cd (II)和Pb (II)	有效Cd和Pb的去除率分别为10.4%和13.6%	提高细菌多样性指数和丰富度, 并改变细菌群落组成	[80]

降低容重(幅度为7.41%~35.90%), 改善通气性^[81]; 其次, 生物炭表面富含含氧官能团, 具备较强的离子吸附与交换能力, 适合铵态氮、硝态氮等养分的吸收, 利于土壤养分的保持与提升。

生物炭能提高土壤pH, 增加有机质和氮磷钾含量, 有效改善土壤肥力。ZHAO等^[82]发现, 施用原生生物炭后, 可显著提高土壤的pH、电导率、速效氮磷钾含量($P < 0.05$)。ZHENG等^[81]研究表明, 原生生物炭使可利用磷和钾的含量分别提升6.52%~58.75%和109.07%~1789.70%, 并使土壤pH提高12.13%~48.48%。此外, 原生生物炭可吸附酚类化合物, 进而提高土壤硝酸根浓度^[83]。再者, 生物炭作为外源有机物, 能直接提升土壤有机质含量(15.98%~293.13%)^[81], 黄腐酸含量提高32.67%, 从而增强有机碳的疏水性和稳定性^[84-85]。

烟草废弃物生物炭对土壤肥力亦存在积极影响, 可促进植物生长。生物炭的施用可提升微生物真菌的多样性, 进而使植株存活率提高至69.5%^[75]。YANG等^[86]认为, 原生生物炭对植物生长的促进作用主要体现在植物生理变化和根际细菌群落变化方面, 植物根系中黄酮类化合物的高度合成以及易溶有机碳组分的存在是关键。ZHAO等^[82]发现, 生物炭可促进白芨生长, 具体表现为株高、平均叶宽和叶绿素含量的增加。同时, 联合施用生物炭和磷酸氢二铵可使小麦增产32%, 籽粒镉含量降低53%^[87]。然而, 生物炭的过度施用也会对土壤造成一定负面影响。LI等^[88]观察到, 生物炭用量在0.3~0.6 kg/m²时, 可线性提高土壤肥力和农艺性状, 而用量超过0.9 kg/m²时, 会阻碍植

物根系对水分和养分的吸收, 导致植物生长受到抑制。

综上所述, 原生生物炭掺入土壤能够吸附重金属离子、阻止污染物迁移、改善土壤环境、促进微生物的活动并提高土壤肥力, 进而促进作物生长。以往研究多采用原生生物炭, 因此, 有必要进一步探索特定应用场景下的烟草废弃物生物质活化和功能化等生物炭制备技术。

4 烟草废弃物衍生生物炭的吸附机制总结

借助直接碳化、直接碳化耦合功能化改性和活化改性等策略处理烟草废弃物, 可制得多种碳基吸附剂, 并应用于废气捕集、废水处理以及土壤修复, 实现烟草废弃物的资源化利用。图6概括了烟草废弃物衍生生物炭在上述3个应用方面的吸附特性与机制。

由图6可知, 相关吸附效果与机制如下: (1) 气体污染物捕集: 采用功能化、活化或二者组合策略, 选择性强化生物炭特性, 调整表面化学性质, 如增加表面官能团以及芳香环碳结构, 从而强化生物炭与气体分子间相互作用; 同时优化生物炭孔隙结构与比表面积, 为气体吸附提供更多位点, 实现对不同气体污染物的高效捕集。(2) 废水处理: 活化生物炭对去除有机污染物展现出良好性能, 其吸附机制为化学和物理吸附的叠加, 主要受表面官能团和孔隙结构影响; 功能化生物炭适用于处理重金属与无机污染物, 吸附机制主要为以表面官能团主导的化学吸附, 涉及络合、沉淀和离子交换等。(3) 土壤修复: 原生生物炭依凭独特的

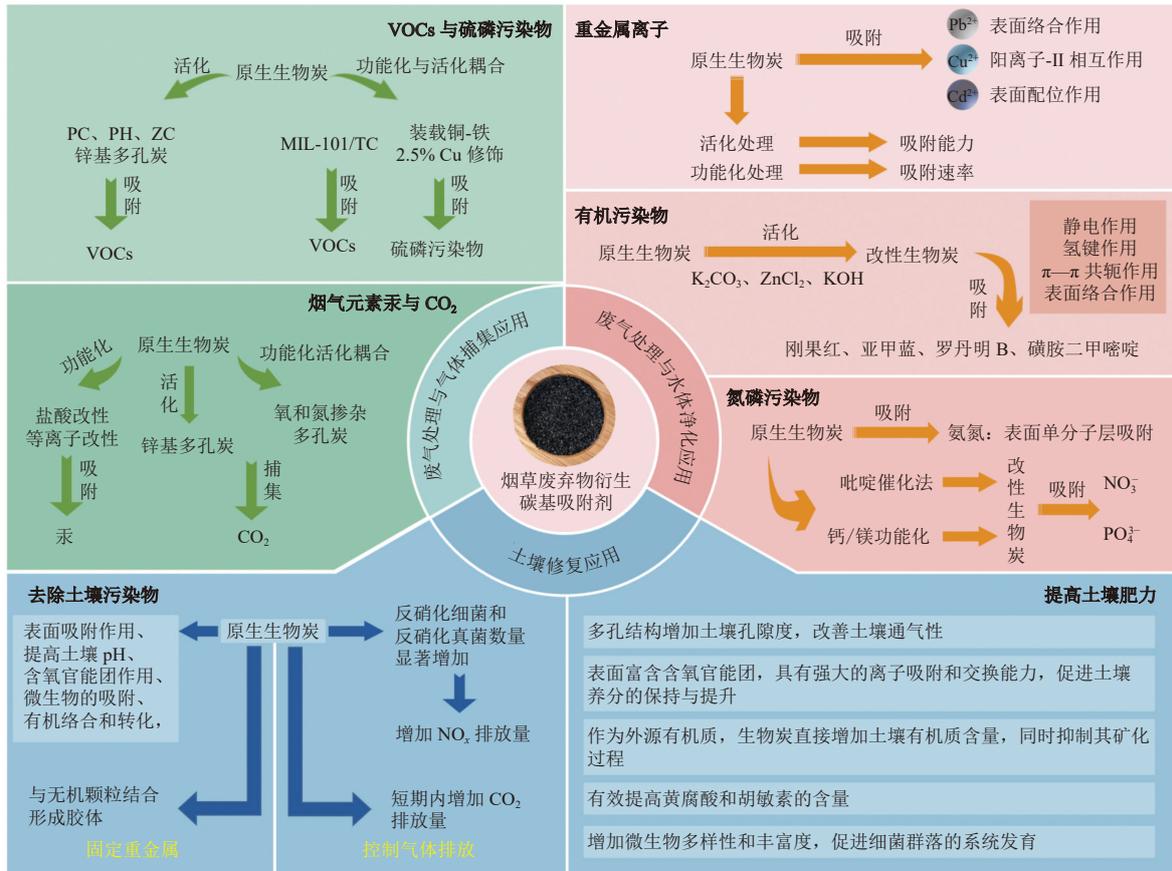


图 6 烟草废弃物衍生碳基吸附剂的吸附特性与机制

Fig. 6 Adsorption characteristics and mechanisms of tobacco waste-derived carbon-based adsorbents

吸附特性与表面含氧官能团, 不仅适合固定土壤重金属离子、控制气体排放, 还能够依靠固有养分及营养富集特性提升土壤肥力, 促进植物生长。

5 结论与展望

烟草废弃物富含碳、氧元素及木质纤维等成分, 是优质生物质碳源, 可通过热化学转化制备用于环境修复的生物基炭材料。本文聚焦烟草废弃物衍生生物炭, 对相关热化学制备策略及其对气、水、土壤污染物的吸附规律、效果与机制予以综述, 结论如下。

烟草废弃物经直接碳化法可制备原生生物炭, 适用于土壤修复, 能补充营养组分、提升微生物活性、钝化污染物, 有效增强肥力并促进植物生长。经碳化耦合改性法(功能化、活化)可制备改性生物炭, 基于表面络合作用、沉淀、阳离子- π 相互作用、离子交换和表面配位等作用机制, 可捕集或去除废气与废水中的污染物。烟草废弃物衍生生物炭的吸附能力取决于孔隙结构、表面官能团、杂原子掺杂、芳香环碳结构等关键特性。

未来研究可围绕“制备-结构-效果”关联和相应吸附机制展开, 着力开发新型可持续热化学制炭策略, 实现从烟草废弃物到碳基吸附剂的高效转化。具体技术路线可采用自上而下的逆向制炭策略: (1) 依据特定环境污染物确定生物炭应具备的目标性质; (2) 针对目标特性遴选适配的热化学制备策略; (3) 借助热化学策略调控元素迁移与结构演化, 优化相应生物炭产率和质量; (4) 将产物应用于特定场景, 根据作用效果反馈并调适制备策略。

参考文献 (References) :

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics of China. China statistical year-book 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[2] 彭国勋, 李平, 吴锡刚, 等. 烟草废弃物资源化利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(9): 4036-4038.
PENG Guoxun, LI Ping, WU Xigang, et al. Research progress on the comprehensive utilization of tobacco waste[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 4036-4038.

- [3] 勾华, 刘建程. 废弃烟叶的综合利用[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(2): 220–223.
GOU Hua, LIU Jiancheng. Comprehensive utilization of waste tobacco leaves[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(2): 220–223.
- [4] 娄晓平, 赵炯平, 张保全, 等. 烟草废弃物无害化研究与应用探讨[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(4): 90–97.
LOU Xiaoping, ZHAO Jiongping, ZHANG Baoquan, et al. Research and application of harmless in tobacco waste[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(4): 90–97.
- [5] 陈芊如, 孟娜, 马斯琦, 等. 烟草废弃物资源综合利用研究进展[J]. *江西农业学报*, 2024, 36(1): 146–153.
CHEN Qianru, MENG Na, MA Siqi, et al. Research progress in comprehensive utilization of tobacco waste resources[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2024, 36(1): 146–153.
- [6] MA Chaowei, ZHANG Fengxia, LIU Huili, et al. Comprehensive investigation on the slow pyrolysis product characteristics of waste tobacco stem: Pyrolysis reaction mechanism and conversion mechanism of N[J]. *Fuel*, 2023, 350: 128902.
- [7] MADENOĞLU T G, KURT S, SAĞLAM M, et al. Hydrogen production from some agricultural residues by catalytic subcritical and supercritical water gasification[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012, 67: 22–28.
- [8] CARDOSO C R, MIRANDA M R, SANTOS K G, et al. Determination of kinetic parameters and analytical pyrolysis of tobacco waste and sorghum bagasse[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 92(2): 392–400.
- [9] 李军, 李吉昌, 吴晓华, 等. 烟草废弃物利用研究[J]. *云南化工*, 2010, 37(2): 44–49.
LI Jun, LI Jichang, WU Xiaohua, et al. Progress in research on comprehensive utilization of tobacco waste[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2010, 37(2): 44–49.
- [10] WU Weixuan, MEI Yuanfei, ZHANG Le, et al. Kinetics and reaction chemistry of pyrolysis and combustion of tobacco waste[J]. *Fuel*, 2015, 156: 71–80.
- [11] ZHANG Xin, FU Weijing, YIN Yuanxue, et al. Adsorption-reduction removal of Cr(VI) by tobacco petiole pyrolytic biochar: Batch experiment, kinetic and mechanism studies[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 149–157.
- [12] CHEN Rongjie, ZHANG Jianhui, LUN Liyong, et al. Comparative study on synergistic effects in co-pyrolysis of tobacco stalk with polymer wastes: Thermal behavior, gas formation, and kinetics[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292: 121970.
- [13] CONG Kunlin, HAN Feng, ZHANG Yanguo, et al. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA[J]. *Fuel*, 2019, 237: 126–132.
- [14] CHEN Rongjie, LUN Liyong, CONG Kunlin, et al. Insights into pyrolysis and co-pyrolysis of tobacco stalk and scrap tire: Thermochemical behaviors, kinetics, and evolved gas analysis[J]. *Energy*, 2019, 183: 25–34.
- [15] CAO Yan, ZHOU Hongcang, FAN Junjie, et al. Mercury emissions during cofiring of sub-bituminous coal and biomass (chicken waste, wood, coffee residue, and tobacco stalk) in a laboratory-scale fluidized bed combustor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(24): 9378–9384.
- [16] LIU Yi, DONG Jianxin, LIU Gangjin, et al. Co-digestion of tobacco waste with different agricultural biomass feedstocks and the inhibition of tobacco viruses by anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 189: 210–216.
- [17] MA Chaowei, ZHANG Fengxia, LIU Huili, et al. Thermogravimetric pyrolysis kinetics study of tobacco stem via multicomponent kinetic modeling, Asym2sig deconvolution and combined kinetics[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127539.
- [18] BAI Jing, GAO Hang, XU Junhao, et al. Comprehensive study on the pyrolysis product characteristics of tobacco stems based on a novel nitrogen-enriched pyrolysis method[J]. *Energy*, 2022, 242: 122535.
- [19] WANG Tao, YANG Qin, WANG Yinghao, et al. Arsenic release and transformation in co-combustion of biomass and coal: Effect of mineral elements and volatile matter in biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122388.
- [20] GAO Wenhua, CHEN Kefu, XIANG Zhouyang, et al. Kinetic study on pyrolysis of tobacco residues from the cigarette industry[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 44: 152–157.
- [21] ZHANG Kaihua, ZHANG Kai, CAO Yan, et al. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 325–332.
- [22] YANG Zixu, ZHANG Shihong, LIU Lei, et al. Combustion behaviours of tobacco stem in a thermogravimetric analyser and a pilot-scale fluidized bed reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 595–602.
- [23] ARCHIN S, SHARIFI S H, ASADPOUR G. Optimization and modeling of simultaneous ultrasound-assisted adsorption of binary dyes using activated carbon from tobacco residues: Response surface methodology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118136.
- [24] ZHU Lingjun, XU Jian, DAI Yujie, et al. Mechanism study of tobacco pyrolysis based on the analysis of characteristic products and in situ identification of functional groups evolution on pyrolytic char[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 167: 105681.
- [25] MUZYKA R, CHRUBASIK M, DUDZIAK M, et al. Pyrolysis of tobacco waste: A comparative study between Py-GC/MS and fixed-bed reactors[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 167: 105702.

- [26] CHEN Zhenguo, LENG Erwei, ZHANG Yang, et al. Pyrolysis characteristics of tobacco stem after different solvent leaching treatments[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 130: 350–357.
- [27] LIU Haili, E Jiaqiang, DENG Yuanwang, et al. Experimental study on pyrolysis characteristics of the tobacco stem based on microwave heating method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 473–479.
- [28] MENG Aihong, ZHANG Yanguo, ZHUO Jiankun, et al. Investigation on pyrolysis and carbonization of *Eupatorium adenophorum* Spreng and tobacco stem[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2015, 88(4): 480–489.
- [29] CARDOSO C R, ATAÍDE C H. Analytical pyrolysis of tobacco residue: Effect of temperature and inorganic additives[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 99: 49–57.
- [30] VÁRHEGYI G, CZÉGÉNY Z, JAKAB E, et al. Tobacco pyrolysis. Kinetic evaluation of thermogravimetric-mass spectrometric experiments[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 86(2): 310–322.
- [31] TIAN Wenwen, XU Feng, XING Sijia, et al. Comprehensive study on the thermal decomposition process of waste tobacco leaves and stems to investigate their bioenergy potential: Kinetic, thermodynamic, and biochar analysis[J]. *Thermochimica Acta*, 2023, 723: 179473.
- [32] WANG Liang, FAN Yikuan, HE Fan, et al. Screening and testing of anti-slagging agents for tobacco-stalk-based biomass pellet fuel for tobacco curing[J]. *Processes*, 2022, 10(9): 1690.
- [33] YAN Yunfei, ZHAO Ting, GUO Hongliang, et al. Experimental investigation on mixed combustion characteristics of coal, tobacco straw, and cinder in an energy-saving bake process[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(2): 022301.
- [34] WANG Chunhao, LI Liqing, CHEN Ruofei, et al. Thermal conversion of tobacco stem into gaseous products[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 137(3): 811–823.
- [35] CAO Ting, CHEN Fuwen, MENG Jun. Influence of pyrolysis temperature and residence time on available nutrients for biochars derived from various biomass[J]. *Energy Sources*, 2018, 40(4): 413–419.
- [36] WU Qingchuan, WANG Dongfang, ZHANG Jia, et al. Synthesis of iron-based carbon microspheres with tobacco waste liquid and waste iron residue for Cd(II) removal from water and soil[J]. *Langmuir*, 2022, 38(18): 5557–5567.
- [37] MERZARI F, GOLDFARB J, ANDREOTTOLA G, et al. Hydrothermal carbonization as a strategy for sewage sludge management: Influence of process withdrawal point on hydrochar properties[J]. *Energies*, 2020, 13(11): 2890.
- [38] SI Hongyu, ZHAO Changkai, WANG Bing, et al. Liquid-solid ratio during hydrothermal carbonization affects hydrochar application potential in soil: Based on characteristics comparison and economic benefit analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 335: 117567.
- [39] MA Xiancheng, LI Liqing, CHEN Ruofei, et al. Porous carbon materials based on biomass for acetone adsorption: Effect of surface chemistry and porous structure[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 459: 657–664.
- [40] HUANG Feng, LI Dawei, WANG Le, et al. Rational introduction of nitridizing agent to hydrothermal carbonization for enhancing CO₂ capture performance of tobacco stalk-based porous carbons[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021.
- [41] LI Ruilian, WEN Yujiao, LIU Meng, et al. Simultaneous removal of organic inorganic composite contaminants by in situ double modified biochar: Performance and mechanisms[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 139: 104523.
- [42] GARGIULO V, GOMIS BERENGUER A, GIUDICIANNIP, et al. Assessing the potential of biochars prepared by steam-assisted slow pyrolysis for CO₂ adsorption and separation[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(10): 10218–10227.
- [43] SHU Tong, LU Ping, HE Nan. Mercury adsorption of modified mulberry twig chars in a simulated flue gas[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 182–187.
- [44] WEN Chang, LIU Tianyu, WANG Dapeng, et al. Biochar as the effective adsorbent to combustion gaseous pollutants: Preparation, activation, functionalization and the adsorption mechanisms[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, 99: 101098.
- [45] LI Wei, ZHANG Libo, PENG Jinhui, et al. Preparation of high surface area activated carbons from tobacco stems with K₂CO₃ activation using microwave radiation[J]. *Industrial Crops and Products*, 2008, 27(3): 341–347.
- [46] CHEN Ruofei, HAN Ning, LI Liqing, et al. Fundamental understanding of oxygen content in activated carbon on acetone adsorption desorption[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 508: 145211.
- [47] WANG Tao, LIU Jun, ZHANG Yongsheng, et al. Use of a non-thermal plasma technique to increase the number of chlorine active sites on biochar for improved mercury removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 331: 536–544.
- [48] WANG Tao, WU Jiawen, ZHANG Yongsheng, et al. Increasing the chlorine active sites in the micropores of biochar for improved mercury adsorption[J]. *Fuel*, 2018, 229: 60–67.
- [49] ZHANG Huicong, WANG Tao, SUI Zifeng, et al. Enhanced mercury removal by transplanting sulfur-containing functional groups to biochar through plasma[J]. *Fuel*, 2019, 253: 703–712.
- [50] ZHANG Huicong, WANG Tao, SUI Zifeng, et al. Plasma

- induced addition of active functional groups to biochar for elemental mercury removal[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2019, 39(6): 1449–1468.
- [51] MA Xiancheng, SU Changqing, LIU Baogen, et al. Heteroatom-doped porous carbons exhibit superior CO₂ capture and CO₂/N₂ selectivity: Understanding the contribution of functional groups and pore structure[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259: 118065.
- [52] MA Xiancheng, WU Yi, FANG M, et al. In-situ activated ultramicroporous carbon materials derived from waste biomass for CO₂ capture and benzene adsorption[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2022, 158: 106353.
- [53] LI Denghui, LI Liqing, CHEN Ruofei, et al. A MIL-101 composite doped with porous carbon from tobacco stem for enhanced acetone uptake at normal temperature[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(18): 6226–6235.
- [54] SUN Xin, RUAN Haotian, SONG Xin, et al. Research into the reaction process and the effect of reaction conditions on the simultaneous removal of H₂S, COS and CS₂ at low temperature[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(13): 6996–7004.
- [55] YI Honghong, DENG Hua, YANG Liping, et al. Preparation of activated carbons from tobacco stems by potassium hydroxide activation and phosphine adsorption[J]. *Separation Science and Technology*, 2013, 48(5): 813–819.
- [56] ZHOU Nan, ZU Juning, FENG Qiuju, et al. Effect of pyrolysis condition on the adsorption mechanism of heavy metals on tobacco stem biochar in competitive mode[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(26): 26947–26962.
- [57] CUI Baihui, CHEN Zhihua, WANG Feihua, et al. Facile synthesis of magnetic biochar derived from burley tobacco stems towards enhanced Cr(VI) removal: Performance and mechanism[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(4): 678.
- [58] MANFRIN J, GONÇALVES A C J, SCHWANTES D, et al. Development of biochar and activated carbon from cigarettes wastes and their applications in Pb²⁺ adsorption[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(2): 104980.
- [59] KILIC M, APAYDIN VAROL E, PÜTÜN A E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics and thermodynamics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(1–2): 397–403.
- [60] 郭勇, 冯艳文, 施泽涛, 等. 烟秆碳化材料对刚果红的吸附性能[J]. *烟草科技*, 2021, 54(5): 38–46.
- GUO Yong, FENG Yanwen, SHI Zetao, et al. Adsorption of Congo red by carbonized tobacco stalks[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2021, 54(5): 38–46.
- [61] MUDYAWABIKWA B, MUNGONDORI H H, TICHAGWA L, et al. Methylene blue removal using a low-cost activated carbon adsorbent from tobacco stems: Kinetic and equilibrium studies[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(10): 2390–2402.
- [62] ZHANG Tianliang, XIONG Wei, ZHANG Haiyan, et al. Activated carbon prepared by co-pyrolysis of waste tobacco straw and waste LDPE mulch film: Characterization and application for methylene blue removal[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(53): 34165–34175.
- [63] ZHANG Xinyu, ZHANG Tingwei, GUO Jiaqi, et al. Hierarchically porous tobacco midrib-based biochar prepared by a simple dual-templating approach for highly efficient Rhodamine B removal[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, 15(7): 103904.
- [64] CHIPEMBERE F, BISWICK T, VUNAIN E. Adsorptive removal of cypermethrin from aqueous solution on activated carbon derived from tobacco stem wastes: Equilibrium and kinetic studies[J]. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2024, 21(1): 179–191.
- [65] JU Mengcan, RAO Pinhua, YAN Lili, et al. Synergistic adsorption and degradation of sulfamethazine by tobacco stalk-derived activated biochar: Preparation, mechanism insight and application[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 110265.
- [66] YI Man, CHEN Yucheng. Enhanced phosphate adsorption on Ca-Mg-loaded biochar derived from tobacco stems[J]. *Water Science and Technology*, 2018, 78(11): 2427–2436.
- [67] HE Hui, ZHANG Nan, CHEN Nan, et al. Efficient phosphate removal from wastewater by MgAl-LDHs modified hydrochar derived from tobacco stalk[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 8: 100348.
- [68] HE Qiuping, LUO Yuan, FENG Yiyang, et al. Biochar produced from tobacco stalks, eggshells, and Mg for phosphate adsorption from a wide range of pH aqueous solutions[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(11): 115603.
- [69] HE Qiuping, ZHANG Keqiang, LUO Yanli, et al. Magnetic biochar particles prepared by ion cross-linking to remove phosphate from water[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(7): 076102.
- [70] FENG Menghan, LI Mengmeng, ZHANG Lisheng, et al. Oyster shell modified tobacco straw biochar: Efficient phosphate adsorption at wide range of pH values[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(12): 7227.
- [71] KONG Wenwen, ZHANG Meng, LIU Yanling, et al. Physico-chemical characteristics and the adsorption of ammonium of biochar pyrolyzed from distilled spirit lees, tobacco fine and Chinese medicine residues[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 156: 105148.
- [72] 康四军, 杨金辉, 杨斌, 等. 改性烟末生物质吸附剂对水中NO₃⁻的吸附特性与机理[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 2014–2020.

- KANG Sijun, YANG Jinhui, YANG Bin, et al. Adsorption characteristics and mechanism of modified tobacco powder biomass adsorbent for NO_3^- in water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2014–2020.
- [73] YANG Xing, LU Kouping, MCGROUTHER K, et al. Bioavailability of Cd and Zn in soils treated with biochars derived from tobacco stalk and dead pigs[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 751–762.
- [74] TANG Yuan, GAO Weichang, CAI Kai, et al. Effects of biochar amendment on soil carbon dioxide emission and carbon budget in the Karst region of southwest China[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114895.
- [75] ZHAO Linyan, XU Wumei, GUAN Huilin, et al. Biochar increases *Panax notoginseng*'s survival under continuous cropping by improving soil properties and microbial diversity[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157990.
- [76] YU Xiaona, ZHOU Hanjun, YE Xiefeng, et al. From hazardous agriculture waste to hazardous metal scavenger: Tobacco stalk biochar-mediated sequestration of Cd leads to enhanced tobacco productivity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 413: 125303.
- [77] TANG Yuan, GAO Weichang, CHEN Yi, et al. Effects of biochar amendment on nitrous oxide emission, bacterial and fungal community composition in a tobacco-planting soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(3): 3106–3119.
- [78] WANG Xiaopeng, IBRAHIM M M, TONG Chenxiao, et al. Influence of pyrolysis conditions on the properties and Pb^{2+} and Cd^{2+} adsorption potential of tobacco stem biochar[J]. *BioResources*, 2020, 15(2): 4026–4051.
- [79] LAHORI A H, ZHANG Zengqiang, GUO Zhanyu, et al. Beneficial effects of tobacco biochar combined with mineral additives on (im)mobilization and (bio)availability of Pb, Cd, Cu and Zn from Pb/Zn smelter contaminated soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145: 528–538.
- [80] CHENG Jianzhong, LI Yunlong, GAO Weichang, et al. Effects of biochar on Cd and Pb mobility and microbial community composition in a calcareous soil planted with tobacco[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(3): 373–383.
- [81] ZHENG Xuebo, SONG Wenjing, GUAN Enna, et al. Response in physicochemical properties of tobacco-growing soils and N/P/K accumulation in tobacco plant to tobacco straw biochar[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 293–305.
- [82] ZHAO Linyan, GUAN Huilin, WANG Rui, et al. Effects of tobacco stem-derived biochar on soil properties and bacterial community structure under continuous cropping of *bletilla striata*[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1318–1328.
- [83] DELUCA T H, MACKENZIE M D, GUNDALE M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 448–453.
- [84] JIN Shengai, MA Hongbin, JIA Long, et al. Organic material additions have stronger effects on humic substances and enzyme activities than soil types[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(15): 2783–2794.
- [85] WANG Qi, ZHU Yingxue, XU Lianzhou, et al. Responses of soil humus composition and humic acid structural characteristics to the addition of different types of biochar in phaeozems[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 1611–1618.
- [86] YANG Kun, JIANG Yuwen, WANG Jianning, et al. Tobacco straw biochar improved the growth of Chinese cherry (*Prunus pseudocerasus*) via altering plant physiology and shifting the rhizosphere bacterial community[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 303: 111244.
- [87] 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 等. 微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5769–5777.
- YANG Yanzheng, ZHANG Yingge, LI Chang, et al. Tobacco stem biochar and phosphate application decrease wheat grain cadmium accumulation in alkaline soils[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5769–5777.
- [88] LI Yan. Tobacco stalk biochar application improves soil fertility and flue-cured tobacco growth[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2021, 25(3): 632–638.