

农业废弃生物质制备的生物炭在水净化应用的研究进展

米合日班·麦麦提^{1,2}, 李雪玲¹, 金前^{1,2*}

¹伊犁师范大学微生物资源保护与开发利用重点实验室, 新疆 伊宁

²伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁

收稿日期: 2024年2月7日; 录用日期: 2024年3月1日; 发布日期: 2024年4月8日

摘要

将可再生的农业废弃生物质制备成化学性质稳定的生物炭已经成为农业废弃物资源化的重要手段之一。生物炭是一种碳含量高的材料, 具有离子交换能力强、比表面积大和结构稳定等优异特征。本文综述了生物炭的制备及改性方法, 并对其在水净化领域中的应用进行总结和讨论。生物炭主要有水热、热解和焙烧三种制备法, 常见的改性方法有物理法、化学法和生物法, 可以通过设置制备和改性过程, 为特定的生态环境应用进行定向的生物炭设计。生物炭已经在水净化方面有广泛的实际应用, 同时也面临着各种各样的限制。综上所述, 生物炭在生态环境中具有广阔的应用前景, 其应用机理有待更深入的研究。

关键词

农业废弃物, 生物炭, 水净化, 修复应用

Agricultural Waste Biomass-Derived Biochar for Water Purification Application: A Review

Miheliban McMattie^{1,2}, Xueling Li¹, Qian Jin^{1,2*}

¹Key Laboratory of Microbial Resources Protection, Development and Utilization, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²College of Bioscience and Technology, Yili Normal University, Yining Xinjiang

Received: Feb. 7th, 2024; accepted: Mar. 1st, 2024; published: Apr. 8th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 米合日班·麦麦提, 李雪玲, 金前. 农业废弃生物质制备的生物炭在水净化应用的研究进展[J]. 土壤科学, 2024, 12(2): 37-45. DOI: 10.12677/hjss.2024.122005

Abstract

Converting renewable agricultural waste biomass into chemically stable biochar has become an important strategy for the reclamation of agricultural waste biomass. Biochar is a carbon material with high-level of carbon, has several excellent features such as high ion exchange capacity, large specific surface area and stable structure. This review summarized and discussed the preparation and modification methods, and its water purification application. The production of biochar included hydrothermal carbonization, pyrolysis and torrefaction; and the normal modification of biochar involved physical activation, chemical activation and biological method. The properties of biochar for special ecological environment application could be directedly designed to obtain the desired biochar. The utilization fields of agricultural waste-derived biochar included water purification, however, which is still a challenge. In summary, biochar has wide application prospect in ecological environment application, and the mechanism of biochar in ecological environment application should be further investigated.

Keywords

Agricultural Waste, Biochar, Water Purification, Remediation Application

Copyright © 2024 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

农业废弃生物质是一种可再生的资源，含有大量的木质纤维素，是许多化学制品和炭材料制备的原料，主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，是重要的碳源物质，在生态环境方面有广泛的实际应用[1]。目前农业废弃生物质资源化利用面临着诸多阻碍，例如生物质自然分解速率慢、热值低、直接应用可行性低，并且制备成生物炭、生物燃料、化学制剂方面的规模化工业应用还不成熟[2]，但是生物炭制备及应用也是一种碳中和过程，对生态环境有着重要的意义。生物炭在生态环境方面具有广泛的应用，因此，将农业废弃生物质制备成生物炭不仅可以带来生态效益也增加了农业收益[3]。目前关于生物炭的工业生产及科学研究一直是一个生物环境领域的一个热点。

农业生物质来源丰富，例如甘蔗渣、稻壳、麦秆、玉米秸秆及椰壳等，都可以用作生物炭制备原料[4]。如图 1 所示，将生物质制备成化学制品和能源物质一直是重要的碳中和途径[5]。然而，将农业生物质制备成生物炭是碳减过程，有利于地球温室效应的改善[6]。生物炭具有其他各种优异的特征，例如丰富的表面官能团、大的比表面积、高孔隙度、超级稳定性、高离子交换能力，使生物炭在各种生态环境中被广泛地应用。土壤中添加生物炭可以提高土壤的耕种质量，并降低农业生产中的二氧化碳的排放。生物炭循环可以作为生态系统中的一个碳的蓄存池(图 1)，有报道发现生物炭可以每年有效降低全球 12%的温室气体排放[7]。目前关于生物炭的研究主要集中于优化生物炭制备方法，以期满足更高要求的生态环境的应用需求。该文章综述了利用农业生物质制备生物炭材料的研究进展,介绍了生物炭的制备方法、水净化性能，进一步展望了农业生物质生物炭在水体中污染物去除领域存在的问题和未来可研究领域。

2. 生物炭制备

2.1. 生物炭的直接制备

热化学方法是最常用的生物炭制备方法，具体制备方法如表 1 所示。生物炭的直接制备有水热炭化法和热解法，其中水热法是在水介质中低温条件下(180℃~300℃)进行水热生物炭制备，其能源消耗较低及原料无需干燥的优点，被广泛地应用于生物炭低成本生产[8]。在水热过程中，生物油含量会随着水热的温度增加而增加，这个过程也被称为水热液化，当水热温度继续上升到 450℃ 以上就会水热产生各种合成气体，这个过程也被称为水热气化。在实际生产中，高温热解才是生物炭制备最常用的方法，在无氧或低氧条件下，250℃~900℃ 的高温会热解大量有机质，生产产生如生物炭、生物油及各种气体成分，其中的气体成分主要包括 CO₂、CO、CH₄ 和 H₂ 等[9]。同时，低的热解温度下的生物炭产量也越高，生物油和气体成分也越少[10]。如表 1 所示，依据温度、加热速率、热解时间将热解分为缓慢热解和快速热解两种方式。

除了以上两种传统的生物炭生产方式，焙烧作为一种新技术被用于生物炭合成中。如表 1 所示，焙烧有干焙烧和湿焙烧之分，干焙烧包含有氧焙烧和无氧焙烧，而湿焙烧有蒸汽焙烧和液体焙烧。干焙烧由于其低温特点被认为是一种温和的热解方式，在干焙烧过程中，生物质在气相质中处理，更适合工厂化的生产。有氧条件下的焙烧制备的生物炭含有更高的氧/碳(O/C)和氢/碳(H/C)比，随着有氧焙烧的进行，生物炭产量和热值也会下降。相反，无氧焙烧制备的生物炭含有更高的热值和更低的氧/碳(O/C)和氢/碳(H/C)比[11]。总而言之，生物炭的物理化学特性和元素组成因生物炭合成条件、合成方法类型和生物质原料种类而异。

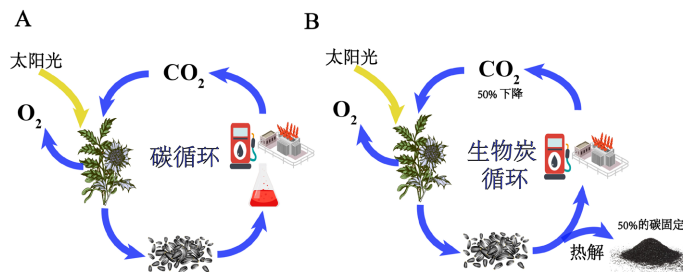


Figure 1. Carbon cycle and carbon reduction biochar cycle in agricultural biomass production
图 1. 农业生物质生产过程中的碳循环和碳减的生物炭循环

Table 1. Normal preparation methods for biochar and their special physiochemical properties
表 1. 生物炭常见制备方法及其生物炭的特定物理化学性质汇总

热力学处理方法	处理温度(℃)	热处理时间	生物炭产量(%)	生物炭物理化学性质	参考文献
水热	180~300	0.5~16 h	36~72	中等 SSA, 高极性, 高芳香性	[12]
快速热解	300~1000	<2 s	10~20	中等 SSA, 低极性, 低芳香性	[13]
中速热解	~500	10~20 s	20~30	中等 SSA, 中等芳香性	[14]
缓慢热解	150~700	不定	20~80	中等 SSA, 中等极性, 高芳香性	[15]
气化	700~1500	10~20 s	5~10	高孔隙度, 高 SSA, 中等芳香性	[16]
快速蒸发炭化	300~600	5~20	5~35	高挥发物, 无液体产物	[12]
干燥焙烧	200~300	不定	40~60	非氧化焙烧生物炭, HHV, 较低的 O/C 和 H/C 比率	[11]
氧化焙烧	200~300	不定	40~80	HHV 和生物炭产量随氧化严重程度的增加而降低	[12]
湿焙烧	150~260	5~240 m	40~80	热解效率高, 能耗低	[17]
蒸汽焙烧	<290	5~120 m	>60	HHV, 疏水性好, 含碳量高	[4]

注：“SSA”比表面积，“HHV”高热值。

2.2. 生物炭的改性制备

2.2.1. 物理法改性

为了满足更高要求的实际应用需求,常利用物理和化学方法对农业生物质进行活化制备生物炭,这些活化或改性修饰方法通常在制备过程中或者在生物炭制备完成后进行。最近许多生物炭的研究都集中于其物理化学特征的改进,以满足特定领域的应用,例如通过蒸汽/气体活化和球磨活化来进行生物炭改性,可以降低生物炭在环境应用的环境负面影响[18]。球磨后的生物炭在水体中的分散性增加,生物炭颗粒大小更细,比表面积也越大[19]。Lyu *et al.*利用球磨方式在 450℃ 下制备了一种竹生物炭,该生物炭具有更高含量的表面酸性官能团,显著增加了对重金属的络合和静电吸附去除[20]。与高温热解法制备的生物炭相比,通过蒸汽活化制备的生物炭具有更高的比表面积和表面活性,因而具有更高的吸附能力[21]。由于生物质在 CO₂ 气体氛围下的高温稳定性,进而对生物炭的多孔结构的形成有明显定向控制作用[3]。总体而言,通过物理方式的活化可以通过增加生物炭的比表面积和孔隙的可控性来增加生物炭对重金属、有机污染物和营养元素的吸附,与此同时,物理法活化相比于化学活化在制备生物炭过程中具有安全性高、更清洁、杂质少优点。

2.2.2. 化学法改性

利用合适的化学氧化剂对生物炭进行活化可以增加生物炭对重金属吸附的能力,在化学活化过程中,经常利用强酸(H₂SO₄, HCl H₃PO₄)、强碱(NaOH 和 KOH)和一些氧化剂(Fe(III)和 KMnO₄)对生物炭进行改性[22]。例如,利用强酸活化生物炭,其含氧官能团含量增加,从而增加了对铅,铜,锌,镉和磺胺嘧啶的吸附去除[23];利用强碱活化的生物炭有更高含量的芳香环、 π - π 化学键、更高的静电作用、更强的表面沉淀或表面络合的能力[24];利用氧化剂活化制备的生物炭有更丰富的孔隙分布和更高的比表面积,增加微孔系所占的比例[3]。

2.2.3. 生物法改性

生物学改性的生物炭在其多孔结构上会形成生物膜,可以应用于工业污水中残留药物的吸附去除[25]。一些微生物可以定值于生物炭孔洞中并有利于废水中某些溶解的有毒元素的去除,含有生物膜的生物炭可以去除水体中 75% 的 Mn²⁺ 离子[3]。总体而言,生物法改性生物炭目前还处于探索阶段,还需要更多的研究来进行探讨。

3. 生物炭物理化学特征

生物炭是一种含碳元素的多孔碳材料,含有各种无机成分,例如碱金属及碱土金属元素。和水热炭相比,热解生成的生物炭含有更高的炭含量和结构稳定性,在高温(350℃~950℃)制备的生物炭通常含有 10%~45% 的氧含量[4]。生物质中的纤维素、半纤维素和木质素在高温下结构被破坏生成生物炭、生物油及气体成分,并在这过程中生成大量的介孔、微孔和大孔结构,但是这些孔洞结构主要依赖于生物炭的制备方法和条件[26]。生物炭的形貌结构主要随热解温度变化而改变,更高的热解温度产生更高含量的芳香族炭,具有更高的比表面积并产生更多的微孔结构,因此,高温热解制备的生物炭具有更高的吸附特性,此外,热解温度和生物炭的 pH 的大小有一个正相关性[27]。但是,低温热解制备的生物炭产量更高,电导率更强以及离子交换量更大等优异特征[28]。总之,在制备过程中的各种参数例如温度、升温速率、热解时间、环境压强、热传导率以及气相和固相之间互作都会改变生物炭的物理化学性质。

生物炭的各种物理化学特性如图 2 所示,这些特征主要受制备过程中的原料、热解温度和升温速率影响。一般而言,升温速率仅仅轻微影响生物炭的特征和产量,研究发现以 5℃/min~15℃/min 的升温速率制备方法生产的生物炭产量更低[27]。热解温度是影响生物炭物理化学性质的最主要因素,更高的热解

温度会降低 H 和 O 元素的含量并增加 C 元素的含量, 这表明随着热解温度的增加生物质会发生更明显的脱氧和脱水反应, 同时含 H 和 O 的官能团含量也会随之降低[27]。此外, 生物炭的比表面积会随热解温度上升而增加, 但是当热解温度上升到 700℃ 以上时生物炭的比表面积反而有一个下降的趋势[29], 由农业生物质制备的生物炭的比表面积明显高于动物排泄物制备的生物炭[30]。随着热解温度的增加, BET 的表面积也会随之增加, 这主要是由于生物炭中微孔的产生, 同时也会减低生物炭的平均孔径大小, 热解温度的上升也会增加生物炭的 pH、芳香性和灰分[2]。

生物炭中的主要元素为 C、H 和 O, 也会含有其他元素例如 N、S、P、K、Na、Mg、Ca、Zn 和 Cu, 木质素含量高的生物质制备的生物炭的产量更高[30]。生物质类型会影响制备的生物炭中 N 组分, 可以通过增加生物炭中含 O 和 S 的官能团含量来增加生物炭对氨(NH₃)的截留率, 同时增加生物炭中 N 组分含量及影响生物炭对 CO₂ 的吸附[31]。总而言之, 生物炭表面的官能团种类和含量对生物炭在生态环境应用具有重要的影响。

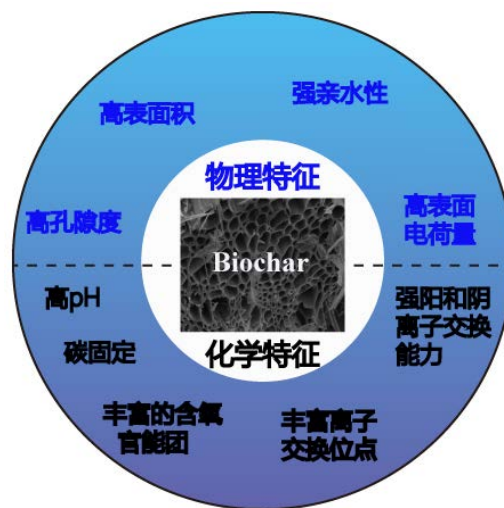


Figure 2. Physicochemical characteristics of biochar
图 2. 生物炭的物理化学特征

4. 生物炭水净化应用

生物炭各种优异的物理化学特征在废水净化方面有广泛的应用, 已经成为研究热点。传统废水处理方法主要包括膜过滤、离子交换以及共沉淀等[32], 这些处理方法费用昂贵, 有次生废弃物产生, 造成二次污染。相比之下, 农业废弃生物质及其他生物质原料制备的生物炭进行废水处理是一种经济合适的水净化方法, 并且变废为宝降低这些农业废弃物管理费用。此外, 生物炭是许多生物质热解过程中的副产品之一, 其制备过程也是环保的。最近, 生物炭已经被应用于废水中的各种污染物的吸附去除, 例如重金属、染料、农药、抗生素、无机离子、苯酚、多环芳烃和挥发性有机化合物等[33]。我们前期研究也发现利用农业废弃物制备成的生物炭可以应用于水体中砷的吸附去除, 在中性水环境下高效吸附去除水体中的砷[34]。生物炭在水体和土壤环境下对有机污染物的去除也表现出很高的修复能力, 生物炭的高比表面积、丰富的微孔孔隙度和强的疏水性增加了生物炭对水中有机污染物的吸附[14]。高温热解制备的生物炭由于亲水官能团的热解丢失, 导致生物炭的极性和疏水性增加, 生物炭对有机物的吸附去除受溶液表面极性、离子强度、pH、生物炭表面积和芳香性的影响。例如, 非极性化合物(三氯乙烯)可以通过疏水位点吸附在生物炭上[35], 相比之下, 极性的 1-萘酚化合物在生物炭上的吸附要比非极性萘化合物的吸

附量高[36]。

农业中农药和除草剂的过量使用已经给农业生态系统的稳定、农业生产和人类健康都带来了严重的负面影响[37]。生物炭作为一种性能优良的吸附材料，可以通过疏水作用，孔隙填充，和 π - π 化学键作用对农药进行吸附固定[38]。水体中的过量的抗生素等污染物已经被广泛地研究报道，但是，土壤中多污染物复合污染却被忽视，其修复方法是亟需的。生物炭可以有效地去除抗生素，700℃热解松木屑制备的生物炭比玉米芯制备的生物炭有更高的芳香性，对土壤中的磺胺甲恶唑有很高的吸附能力[39]。Liu 等报道了豆秆制备的生物炭比其他农业废弃物制备的生物炭有更高的莠去津去除率，其吸附主要受溶液 pH 和生物炭孔隙度影响[40]。

重金属和有机污染物在生物炭上的吸附去除机制主要受生物炭的物理化学特性影响。如图 3(A)所示，生物质制备的生物炭中会含有各种各样的金属离子如 Na、K、Mg 和 Ca 等，这些离子可以和重金属离子进行离子交换，从而吸附去除重金属，同时生物炭中的矿物成分也可以为重金属离子提供吸附位点，增加生物炭对重金属的吸附能力[41]。生物炭对无机污染物吸附去除有 4 个吸附机制，包括离子交换、金属离子吸引、沉淀和金属阳离子吸引。如图 3(B)所示，而生物炭对有机污染物吸附去除主要的机制包括氢键、疏水作用、静电作用和孔隙填充[12]，有机污染物类型和生物炭的物理化学特征也是决定去除机制的关键因素。

生物炭的再生对其重复利用和生态环境应用有着至关重要的作用，主要有 2 个方法对生物炭进行再生应用，包括被吸附物质的分解和解吸附[37]。在工业应用中，生物炭的吸附和解吸附循环特征也是生物炭可应用性的重要特征之一，因此，当前许多研究都关注用不同方法对生物炭再生进行循环利用，主要的方法包括热解再生、溶剂处理、无机酸或碱处理、微波辐照和超临界流体再生等方法[42]。热解再生和溶剂处理法是生物炭再生常用的方法，运行成本较低，超临界流体再生法尚处于初步实验阶段。

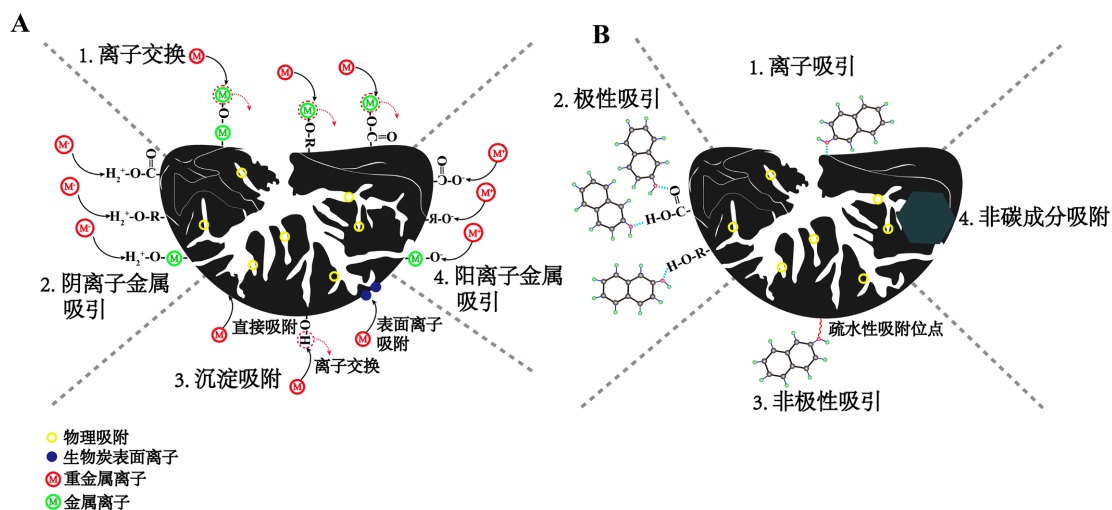


Figure 3. Common adsorption mechanisms of inorganic matter (A) and organic matter (B) on biochar
图 3. 无机物(A)和有机物(B)在生物炭上的常见的吸附机制

5. 结论

本综述主要展现了农业废弃生物质制备的生物炭在水净化领域应用的研究进展。生物炭的物理化学性质在吸附和水净化方面的影响被详细地描述和讨论。农业废弃物制备的生物炭是一种可再生和可持续的绿色资源，可以应用于各种生态环境领域，生产成本低，和工业上的活性炭相比，生物炭拥有更高的

吸附能力。生物炭不仅降低了农业废弃物处理的成本，也变废为宝提高经济收益。我们可以依据应用领域类型进行针对性的生物炭特性设计，主要是改变热解温度和原料种类，通过生物炭特性的定制设计将有利于生物炭在生态环境中更广泛的应用。

生物炭对有机和无机污染的吸附去除表现出极高的效率，凭借着低成本和几乎不产生次生污染物，广泛应用于水体中污染物修复去除。生物炭的微孔孔隙度、比表面积、疏水性和芳香性特征和有机污染物去除有着明显的正相关性。同样，生物炭通过改性可以在生物炭表面集成多种活性官能团，增加对无机污染物的吸附去除，在重金属修复领域有广泛的应用。此外，生物炭的再生重复利用对其在生态环境中应用也具有重要的意义。

6. 展望

生物炭未来研究方向趋向于生物炭在生态环境中的长期效应机制研究，例如生态系统中的土壤修复，通过外源添加生物炭对土壤改善的长期效应机制。生物炭在生态系统中碳固定方面的机制也是一个重要的研究方向。此外，将生物炭技术与农业废弃物管理进行结合，开发综合管理方法，促进循环经济效益。

基金项目

2022 年伊犁师范大学校级大学生创新计划(X2022110764021)。

参考文献

- [1] Matsagar, B.M. and Dhepe, P.L. (2017) Effects of Cations, Anions and H⁺ Concentration of Acidic Ionic Liquids on the Valorization of Polysaccharides into Furfural. *New Journal of Chemistry*, **41**, 6137-6144. <https://doi.org/10.1039/C7NJ00342K>
- [2] Matsagar, B.M. and Wu, K.C.W. (2022) Chapter 1. Agricultural Waste-Derived Biochar for Environmental Management. In: Tsang, D.C.W. and Ok, Y.S., Eds., *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*, Academic Press, Cambridge, 3-13. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85343-9.00026-4>
- [3] Cuong, D.V., Matsagar, B.M., Lee, M., et al. (2021) A Critical Review on Biochar-Based Engineered Hierarchical Porous Carbon for Capacitive Charge Storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **145**, Article ID: 111029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111029>
- [4] Wang, J. and Wang, S. (2019) Preparation, Modification and Environmental Application of Biochar: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **227**, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- [5] Winters, D., Boakye, K. and Simske, S. (2022) Toward Carbon-Neutral Concrete through Biochar-Cement-Calcium Carbonate Composites: A Critical Review. *Sustainability*, **14**, Article No. 4633. <https://doi.org/10.3390/su14084633>
- [6] Mona, S., Malyan, S.K., Saini, N., et al. (2021) Towards Sustainable Agriculture with Carbon Sequestration, and Greenhouse Gas Mitigation Using Algal Biochar. *Chemosphere*, **275**, Article ID: 129856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>
- [7] Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., et al. (2010) Sustainable Biochar to Mitigate Global Climate Change. *Nature Communications*, **1**, Article No. 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- [8] Pauline, A.L. and Joseph, K. (2020) Hydrothermal Carbonization of Organic Wastes to Carbonaceous Solid Fuel—A Review of Mechanisms and Process Parameters. *Fuel*, **279**, Article ID: 118472. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118472>
- [9] Leng, L. and Huang, H. (2018) An Overview of the Effect of Pyrolysis Process Parameters on Biochar Stability. *Bioresource Technology*, **270**, 627-642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>
- [10] Brindhadevi, K., Anto, S., Rene, E.R., et al. (2021) Effect of Reaction Temperature on the Conversion of Algal Biomass to Bio-Oil and Biochar through Pyrolysis and Hydrothermal Liquefaction. *Fuel*, **285**, Article ID: 119106. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119106>
- [11] Yek, P.N.Y., Cheng, Y.W., Liew, R.K., et al. (2021) Progress in the Torrefaction Technology for Upgrading Oil Palm Wastes to Energy-Dense Biochar: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **151**, Article ID: 111645. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111645>
- [12] Yaashikaa, P.R., Kumar, P.S., Varjani, S., et al. (2020) A Critical Review on the Biochar Production Techniques, Cha-

- racterization, Stability and Applications for Circular Bioeconomy. *Biotechnology Reports*, **28**, E00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- [13] Rasaq, W.A., Golonka, M., Scholz, M., *et al.* (2021) Opportunities and Challenges of High-Pressure Fast Pyrolysis of Biomass: A Review. *Energies*, **14**, Article No. 5426. <https://doi.org/10.3390/en14175426>
- [14] Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., *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>
- [15] Lu, J.-S., Chang, Y., Poon, C.-S., *et al.* (2020) Slow Pyrolysis of Municipal Solid Waste (MSW): A Review. *Biore-source Technology*, **312**, Article ID: 123615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
- [16] Matsagar, B.M., Yang, R.-X., Dutta, S., *et al.* (2021) Recent Progress in the Development of Biomass-Derived Nitro-gen-Doped Porous Carbon. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 3703-3728. <https://doi.org/10.1039/D0TA09706C>
- [17] Choo, M.-Y., Oi, L.E., Ling, T.C., *et al.* (2020) Chapter 10. Conversion of Microalgae Biomass to Biofuels. In: Yousuf, A., Ed., *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, Academic Press, Cambridge, 149-161. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00010-2>
- [18] Amusat, S.O., Kebede, T.G., Dube, S., *et al.* (2021) Ball-Milling Synthesis of Biochar and Biochar-Based Nanocomposites and Prospects for Removal of Emerging Contaminants: A Review. *Journal of Water Process Engineering*, **41**, Article ID: 101993. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101993>
- [19] Kumar, M., Xiong, X., Wan, Z., *et al.* (2020) Ball Milling as a Mechanochemical Technology for Fabrication of Novel Biochar Nanomaterials. *Bioresource Technology*, **312**, Article ID: 123613. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123613>
- [20] Lyu, H., Gao, B., He, F., *et al.* (2018) Effects of Ball Milling on the Physicochemical and Sorptive Properties of Bio-char: Experimental Observations and Governing Mechanisms. *Environmental Pollution*, **233**, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.037>
- [21] Rajapaksha, A.U., Vithanage, M., Ahmad, M., *et al.* (2015) Enhanced Sulfamethazine Removal by Steam-Activated Invasive Plant-Derived Biochar. *Journal of Hazardous Materials*, **290**, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.046>
- [22] Sajjadi, B., Zubatiuk, T., Leszczynska, D., *et al.* (2019) Chemical Activation of Biochar for Energy and Environmental Applications: A Comprehensive Review. *Reviews in Chemical Engineering*, **35**, 777-815. <https://doi.org/10.1515/revce-2018-0003>
- [23] Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Ok, Y.S., *et al.* (2020) A Comprehensive Review of Engineered Biochar: Production, Characteristics, and Environmental Applications. *Journal of Cleaner Production*, **270**, Article ID: 122462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122462>
- [24] Wang, L., Bolan, N.S., Tsang, D.C., *et al.* (2020) Green Immobilization of Toxic Metals Using Alkaline Enhanced Rice Husk Biochar: Effects of Pyrolysis Temperature and KOH Concentration. *Science of the Total Environment*, **720**, Article ID: 137584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137584>
- [25] Fang, Z., Gao, Y., Bolan, N., *et al.* (2020) Conversion of Biological Solid Waste to Graphene-Containing Biochar for Water Remediation: A Critical Review. *Chemical Engineering Journal*, **390**, Article ID: 124611. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124611>
- [26] Nanda, S., Dalai, A.K., Berruti, F., *et al.* (2016) Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization*, **7**, 201-235. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>
- [27] Zhao, B., O'connor, D., Zhang, J., *et al.* (2018) Effect of Pyrolysis Temperature, Heating Rate, and Residence Time on Rapeseed Stem Derived Biochar. *Journal of Cleaner Production*, **174**, 977-987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013>
- [28] Al-Wabel, M.I., Al-Omran, A., El-Naggar, A.H., *et al.* (2013) Pyrolysis Temperature Induced Changes in Characteristics and Chemical Composition of Biochar Produced from Conocarpus Wastes. *Bioresource Technology*, **131**, 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165>
- [29] Trigo, C., Cox, L. and Spokas, K. (2016) Influence of Pyrolysis Temperature and Hardwood Species on Resulting Bio-char Properties and Their Effect on Azimsulfuron Sorption as Compared to Other Sorbents. *Science of the Total En-vironment*, **566**, 1454-1464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.027>
- [30] Tomczyk, A., Sokołowska, Z. and Boguta, P. (2020) Biochar Physicochemical Properties: Pyrolysis Temperature and Feedstock Kind Effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **19**, 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- [31] Ippolito, J.A., Cui, L., Kammann, C., *et al.* (2020) Feedstock Choice, Pyrolysis Temperature and Type Influence Bio-char Characteristics: A Comprehensive Meta-Data Analysis Review. *Biochar*, **2**, 421-438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>

- [32] Fu, F. and Wang, Q. (2011) Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. *Journal of Environmental Management*, **92**, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- [33] Wang, X., Li, X., Liu, G., *et al.* (2019) Mixed Heavy Metal Removal from Wastewater by Using Discarded Mushroom-Stick Biochar: Adsorption Properties and Mechanisms. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **21**, 584-592. <https://doi.org/10.1039/C8EM00457A>
- [34] Jin, Q. and Cui, J. (2023) Fungi-Enabled Hierarchical Porous Magnetic Carbon Derived from Biomass for Efficient Remediation of as (III)-Contaminated Water and Soil: Performance and Mechanism. *Environmental Science: Nano*, **10**, 1297-1312. <https://doi.org/10.1039/D2EN01027E>
- [35] Ahmad, M., Lee, S.S., Dou, X., *et al.* (2012) Effects of Pyrolysis Temperature on Soybean Stover- and Peanut Shell-Derived Biochar Properties and TCE Adsorption in Water. *Bioresource Technology*, **118**, 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>
- [36] Chen, B. and Chen, Z. (2009) Sorption of Naphthalene and 1-Naphthol by Biochars of Orange Peels with Different Pyrolytic Temperatures. *Chemosphere*, **76**, 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.02.004>
- [37] Dai, Y., Zhang, N., Xing, C., *et al.* (2019) the Adsorption, Regeneration and Engineering Applications of Biochar for Removal Organic Pollutants: A Review. *Chemosphere*, **223**, 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.161>
- [38] Jin, J., Kang, M., Sun, K., *et al.* (2016) Properties of Biochar-Amended Soils and Their Sorption of Imidacloprid, Isoproturon, and Atrazine. *Science of the Total Environment*, **550**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.117>
- [39] Srinivasan, P. and Sarmah, A.K. (2015) Characterisation of Agricultural Waste-Derived Biochars and Their Sorption Potential for Sulfamethoxazole in Pasture Soil: A Spectroscopic Investigation. *Science of the Total Environment*, **502**, 471-480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.048>
- [40] Liu, N., Charrua, A.B., Weng, C.-H., *et al.* (2015) Characterization of Biochars Derived from Agriculture Wastes and Their Adsorptive Removal of Atrazine from Aqueous Solution: A Comparative Study. *Bioresource Technology*, **198**, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.129>
- [41] Wang, X., Guo, Z., Hu, Z., *et al.* (2020) Recent Advances in Biochar Application for Water and Wastewater Treatment: A Review. *PeerJ*, **8**, E9164. <https://doi.org/10.7717/peerj.9164>
- [42] Sun, Y., Zhang, B., Zheng, T., *et al.* (2017) Regeneration of Activated Carbon Saturated with Chloramphenicol by Microwave and Ultraviolet Irradiation. *Chemical Engineering Journal*, **320**, 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.007>