

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.01.010

低温密封法制备玉米秸秆不同部位生物炭及特性比较

王宁¹, 张春燕^{1,2*}, 乔印虎¹, 朱凤君¹

(1.安徽科技学院机械工程学院,安徽凤阳 233100;2.安徽云龙粮机有限公司,安徽阜阳 236500)

摘要:针对玉米秸秆利用困难问题,探索玉米秸秆制备生物炭工艺及其理化性能,采用密封限氧法,以玉米秸秆皮、瓤、根为研究对象,分别在 300 °C/45 min、500 °C/30 min、700 °C/15 min 热解条件下制备生物炭并分析其特性,包括炭产率、pH 值、灰分含量、红外光谱和扫描电镜分析。结果表明:在 300~700 °C 时,随温度升高,炭产率降低,热解失重速率先增后减,pH 值均升高;相同条件下,生物炭特征吸收峰基本相同,表现为表面官能团总量减少,酸性官能团降低,碱性官能团增加。综合分析,秸秆根生物炭与秸秆瓤、秸秆皮生物炭材料功能性相近,研究结果可为玉米秸秆根部的资源化利用提供理论依据和技术支持。

关键词:玉米秸秆;生物炭;特性;热解温度

中图分类号:TQ127.11 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)01-0072-08

Comparative Study on Properties of Biochar from Different Parts of Maize Straw Prepared by Low-temperature Sealing Method

WANG Ning¹, ZHANG Chunyan^{1,2*}, QIAO Yinhu¹, ZHU Fengjun¹

(1.School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China; 2.Anhui Yunlong Grain Machinery Co., Ltd., Fuyang 236500, Anhui, China)

Abstract: To solve the difficulty with utilization of maize straw root, the technology of biochar preparation from maize straw root and the biochar properties are analyzed. First, biochar was prepared with the husk, flesh and root of maize straw separately at 300 °C/45 min, 500 °C/30 min and 700 °C/15 min through the sealed oxygen-limiting method. Then, the biochar properties were analyzed, including analyses of the char yield, pH, ash content, infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy. The results showed that the carbon yield decreases with temperature, the loss rate of pyrolysis weight increases first and then decreases, and the pH value increases in the range from 300 °C to 700 °C; in addition, the characteristic absorption peaks of biochar are basically the same, represented as the total surface functional groups decrease, the acidic functional groups decrease, and the basic functional groups increase. In a word, straw root biochar is similar in functionality to straw pith and straw bark biochar materials. Therefore, the results of this study can be used as theoretical basis and technical support for the resource utilization of maize straw.

Keywords: maize straw; biochar; property; pyrolysis temperature

收稿日期:2024-01-09

基金项目:安徽省教育厅自然科学重大项目(2022AH040238);安徽省粮食机械乡村振兴协同技术服务中心项目(GXXT-2022-077);安徽省科技厅项目(20230628KTRD1007);安徽省自然科学基金面上项目(2308085ME178);滁州市科技局项目(2022ZN014)。

作者简介:王宁(1999—),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向:生物炭热解工艺及装备,e-mail:1542638878@qq.com。

*通信作者:张春燕(1983—),女,陕西榆林人,副教授,博士,研究方向:农业废弃物制备及应用,e-mail:xiangyutianji@163.com。

0 引言

近年来,玉米秸秆已成为中国三大高产作物秸秆之一,2021年我国玉米秸秆产量达到3.21亿t,约占全国秸秆产量的37%^[1]。除去饲喂牛羊,剩余的大量玉米秸秆被焚烧或堆砌田间带来环境压力^[2-3],因此,处理大量玉米秸秆成为亟待解决的问题。此外,化肥等在提高农作物产量的同时带来了土壤的贫瘠化等问题,而玉米秸秆含有土壤需要的C、H、O、N、S、P等丰富的营养元素,将其制成生物炭还田是实现农业绿色可持续发展的重要举措^[4]。有研究发现,生物质以黑炭的方式回归土壤后能提高土壤肥力^[5]。梁桓等^[6]研究了生物炭性质的影响因素及其对土壤的理化性能的影响。

目前针对同一种秸秆不同部位特别是其根茬制备生物炭方面的研究较少。本文以玉米秸秆根、皮、瓢为原料,在限氧环境下通过热解制备生物炭^[7],比较了玉米秸秆不同部位在不同工艺条件下制备的生物炭的基本理化性能,为优化秸秆生物炭制备工艺和有效利用废弃秸秆资源特别是其根茬提供了理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料、主要仪器

试验材料:来自安徽科技学院种植科技园的玉米秸秆,玉米品种为夏兴168,收获于2022年10月上旬。将玉米秸秆分成3组,分别为秸秆皮组、秸秆瓢组和秸秆根组。清洗杂质后晾干至含水量5%~10%,选出最佳处理结果的一组,处理成1~2 cm小段,得到样品,然后装入密封袋备用。

主要仪器:一体式马弗炉(SX2-4-10A,绍兴市上虞道墟科析仪器厂);傅里叶红外光谱仪(FTIR-850,天津港东科技);扫描电镜(EVO-18, Carl Zeiss AG)、pH计(FE22, Switzerland Mettler Toledo)、热重分析仪(TGA/DSC3+, Switzerland Mettler Toledo)、比

表面积及孔径分布仪(3Flex, America Micromeritics)。

1.2 方法

1.2.1 生物炭的制备

采用低温密封限氧法^[7],用马弗炉制备玉米秸秆不同部位的生物炭。具体步骤为:称量坩埚和坩埚盖子的质量并记录,依次放入预处理的玉米秸秆,再称重并密封严实,随后送入炉腔中,分别升温至设定温度和时间(300 °C/45 min(处理1)、500 °C/30 min(处理2)、700 °C/15 min(处理3)),共3个热解条件(3个处理),冷却后取出并称重;然后取出生物炭装入密封袋备用。重复3次以获得最佳效果。3个热解条件下制得的秸秆皮生物炭分别编号为P300、P500和P700,秸秆瓢生物炭分别编号为R300、R500和R700,秸秆根生物炭分别编号为G300、G500和G700。

1.2.2 玉米秸秆不同部位生物炭的理化特性分析

在制备秸秆生物炭过程中,主要需要调节的参数是炭化温度和保温时间。通过在不同炭化温度和时间下处理玉米秸秆的不同部位,分析其产率、pH值、灰分含量、FTIR图谱和表现形貌等参数,研究玉米秸秆不同部位生物炭的理化特性。

1) 炭产率。

秸秆生物炭的产率计算,如式(1)所示:

$$Q = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:Q为秸秆生物炭产率,%; m_3 为炭化后生物炭、坩埚及坩埚盖的质量,g; m_1 为坩埚及盖子的质量,g; m_2 为坩埚、盖子和物料的总质量,g。

2) 生物炭pH值。

参照GB/T 12496.7—1999《木质活性炭试验方法 pH值的测定》,在15 mL试管中加入5 mL蒸馏水,然后加入0.1 g生物炭样品,充分搅拌后静置24 h,测定pH值。

3) 生物炭灰分质量分数。

参照GB/T 17664—1999《木炭和木炭试验方法》,使用马弗炉将坩埚在650 °C下烧至恒重,然后冷却

至常温称质量。将生物炭放入坩埚中,称量后送入马弗炉,设定温度为800℃,保温4h,灰化结束后冷却称量。

如公式(2)得灰分质量分数:

$$A = \frac{G_3 - G_2}{G_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:A为生物炭的灰分质量分数,%;G₃为灰分及坩埚的总质量,g;G₂为坩埚的质量,g;G₁为秸秆生物炭的质量。

4)生物炭表面官能团的检测。

将待测样品与溴化钾按1:100比例混合,研磨后平铺于模具中,压制成片,并在傅里叶红外光谱仪中对生物炭的表面官能团进行检测,扫描范围4000~400 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,次数32次。

5)生物炭表面形态扫描电镜测试。

将样品放入烘箱烘干后,使用导电胶固定在样品台上,喷金处理后放入扫描电子显微镜下观察。以500倍和800倍放大观察生物炭的表面形貌和孔隙结构,并记录扫描电镜分析图像,扫描电子显微镜工作电压为20 kV。

6)生物炭比表面积及孔径分布。

将待测品在200℃真空脱气6h后,在77 K下进行吸附脱附试验。使用比表面积及孔径分布仪,在相对压力0.05~1条件下进行测试,通过吸附比表面测试法(Brunauer-Em-mett-Tellermethod, BET method)获得样品比表面积,并利用BET方程得出孔径分布。

7)秸秆原材料的热重分析。

称取样品3~10 mg,放入热重分析仪中,在50 mL/min的高纯氮气(99.99%)气氛下进行试验,以10℃/min的升温速率将温度升至1000℃。

2 结果与分析

2.1 秸秆不同部位的炭产率分析

炭产率反映了原材料转化为生物炭的效率,炭化温度不同对产率的影响较大。随着温度升高,3种材料的炭产率逐渐降低^[8],这可能是由于更高温度下有机物质转化为气体和挥发性化合物,降低了

固体残留物质量。

热解温度300~500℃时,秸秆皮与秸秆根的炭产率明显降低,可能是在这个温度区间内,秸秆材料未完全炭化,纤维素和半纤维素间的氢键大量断裂形成挥发成分,造成炭产率骤降。而秸秆瓢中的纤维素和半纤维素含量可能比前2种材料低,所以炭产率变化相对平缓;热解温度为500~700℃时,玉米秸秆3个部位的炭产率下降趋势全部变缓,当温度达到700℃时逐渐趋于稳定(图1),说明材料完全炭化。

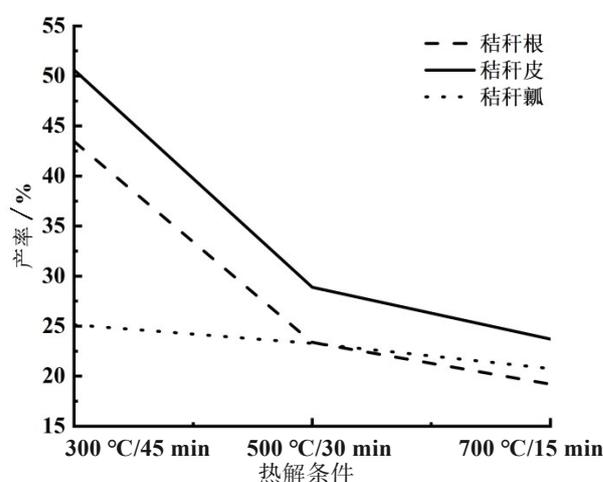


图1 玉米秸秆3个部位不同温度炭产率变化

综合分析,尽管炭化温度不同,但秸秆皮的炭产率始终最高。有研究指出,生物质炭主要由木质素在热解过程中形成,炭产率受材料中木质素和金属元素含量的影响^[9],可能秸秆皮中木质素和金属元素含量较高导致其炭产率较高。

2.2 秸秆生物炭的pH值

生物炭的酸碱性对土壤改良至关重要。如表1所示,随着温度升高,秸秆生物炭值pH逐渐递增。闫郑方等^[10]分析发现,这可能是由于高温热解生成了气体和炭质产物,中和了酸性物质,提高了pH值。在300℃时,材料的pH值变化不大,呈弱酸性;而当温度升至500℃时,pH值急剧变化,从酸性转为碱性甚至强碱性。温度升至700℃时,pH值达到最高点。叶协锋等^[11]研究发现,碱性含氧官能团的变化与pH值呈正相关,与酸性官能团呈负相关。

在300 °C时,可能是酸性含氧官能团较高导致pH值偏低;随着温度升至500~700 °C,碱性含氧官能团含量增加,导致pH值增大。

表1 玉米秸秆热解条件下制得生物炭的pH值

处理(热解条件)	pH值		
	秸秆皮生物炭	秸秆瓢生物炭	秸秆根生物炭
处理1	6.51±0.04	6.82±0.03	6.75±0.03
处理2	10.31±0.04	10.51±0.02	10.42±0.03
处理3	10.44±0.05	10.57±0.01	10.45±0.05

这说明秸秆生物炭的碱性含氧官能团含量与pH值变化密切相关,高含量会导致pH值增加。与秸秆皮和秸秆根相比,秸秆瓢的pH值始终偏高,说明其碱性含氧官能团含量可能更高,因此在改善酸性土壤方面可能效果更好。

2.3 秸秆生物炭的灰分质量分数

热解温度是影响灰分含量的重要参数之一。何逸婷等^[12]研究发现秸秆生物炭的灰分质量分数会随热解温度的升高而升高。Yuan等^[13]研究发现随着热解温度升高,材料中碳酸盐含量增加,从而导致灰分质量分数上升。

由表2可知,随着热解温度升高,3种材料的生物炭灰分质量分数也随之增加。这与前人研究成果类似。热解温度相同时,3种材料的灰分质量分数各不相同,这可能与原材料组成成分的差异有关。杨艺等^[14]研究发现,农作物秸秆中含有大量粗纤维成分,不同种类的农作物秸秆中纤维素含量约为40%。对比分析发现,热解温度一定时,秸秆根灰分质量分数最高,秸秆皮最低。可能秸秆根含有更多纤维素和半纤维素,所以随着温度的增加,它们会快速分解导致灰分含量升高。但总体趋势是:随着温度升高,3种材料的灰分质量分数都会增加。因为高温会导致无机物质转变为固态灰分,从而提升了灰分质量分数。灰分质量分数也反映了生物炭中矿物质的含量,这对评估其作为肥料的潜力十分重要。

表2 玉米秸秆不同热解条件下生物炭灰分质量分数 %

处理(热解条件)	秸秆皮生物炭	秸秆瓢生物炭	秸秆根生物炭
处理1	8±2.50	7±1.80	20±2.29
处理2	10±1.32	13±3.04	24±3.04
处理3	12±3.04	20±1.50	26±4.19

2.4 秸秆生物炭的傅里叶红外光谱分析

FTIR 图谱反映了样品的化学键和官能团信息,有助于推断化合物结构及其稳定性。根据吸收峰位置和形状可确定其中存在的化学键和官能团,如C-H键、O-H键、C=O键等。特征性吸收峰如图2所示,主要位于3 453、2 926、1 737、1 638、1 075、890 cm^{-1} 处。波数3 453 cm^{-1} 的特征峰主要是醇、酚中的-OH吸收峰^[15]。玉米秸秆皮、秸秆瓢和秸秆根3种材料的原材料(分别编号为P原,R原和G原)以及不同温度下制备的生物炭中均含有羟基。热解温度增加,羟基振动强度会逐渐减弱,尤其在300~500 °C,脱羟反应更为显著。波数2 926 cm^{-1} 处的吸收峰为脂肪性烷基链-CH₂的振动。随着热解温度升高,峰的吸收强度逐渐减小,说明生物炭中的烷基团在逐渐减少,生物炭的芳香性逐渐增加^[16]。波数1 737 cm^{-1} 是C=O双键和芳环的骨架特征峰。由图2可知,随着热解温度增加,C=O振动强度逐渐衰减,可能是温度升高使得C=O键容易发生断裂,析出CO和CO₂所致。1 638 cm^{-1} 处的波数对应C=C吸收峰,说明3个部位原材料和生物炭中都含有C=C双键。1 052 cm^{-1} 处的波数对应C-O-C振动,表明材料中含有纤维素等成分。随着炭化温度上升,该特征峰的振动幅度减弱,秸秆中的纤维素等发生分解反应,不同部位及生物炭的C-O-C伸缩振动强度随着热解温度增加而减弱,在300~500 °C变化最为显著,表明该温度区间内秸秆中的纤维素、半纤维素及木质素等组分迅速降解,成分损失较大,芳香族成分得以保留^[17]。波数890 cm^{-1} 处的振动峰表示含有芳香族C-H键^[18]。

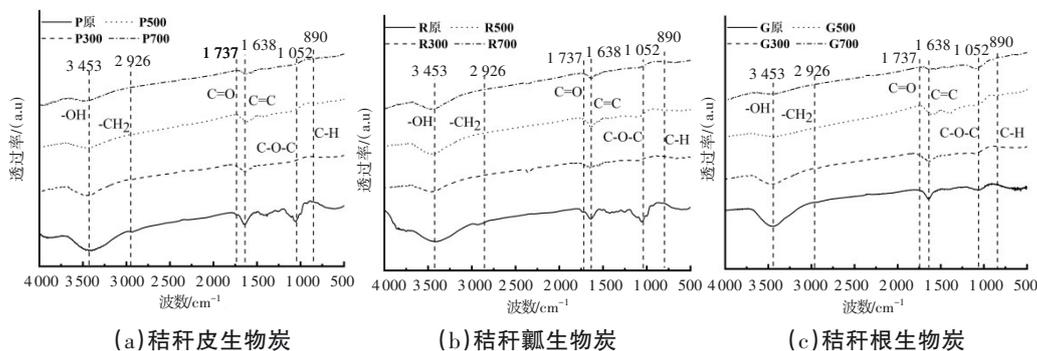


图 2 玉米秸秆不同部位及其生物炭的 FTIR 谱图

FTIR 分析结果表明,3 种材料生物炭吸收振动峰基本一致,官能团类型也大致相同。随着热解温度升高,表面官能团振动强度减弱,官能团数量减少,生物炭性质由软变硬,逐渐完全炭化,芳香性加强。在 300 °C 热解温度下制备的生物炭含有更多的表面官能团,而 700 °C 时芳香性最高。尽管吸收峰强度会随热解温度变化而变化,但随着温度的升高,生物炭会向着更稳定的碳质化方向发展。

2.5 秸秆生物炭的扫描电镜分析

生物炭的扫描电镜分析提供了其颗粒表面形貌和结构等信息,有助于理解其结构稳定性。图 3 为玉米秸秆 3 个部位原料及其生物炭的扫描电镜结

果。如图 3 所示,3 个部位的原材料结构表面明显平滑、紧致、有序。在 300 °C 时,由于秸秆未完全炭化,3 个部位的秸秆生物炭表面仅细微变化,孔隙较少但整体结构仍紧实,孔径未有显著变化。500 °C 时,秸秆炭化程度加剧,根部变细且出现断裂,表面附着的细绒状物质,可能为残留杂质。秸秆皮呈现不规则长条状,结构明显破碎。秸秆瓢呈竹节状,结构不均匀且有孔洞。700 °C 时,秸秆炭化完全,秸秆根仍呈细长条状但出现大面积断裂坍塌,结构松散;秸秆皮呈蜂窝状结构且破碎;秸秆瓢呈正方形结构,但表面出现不一致大小的孔隙。

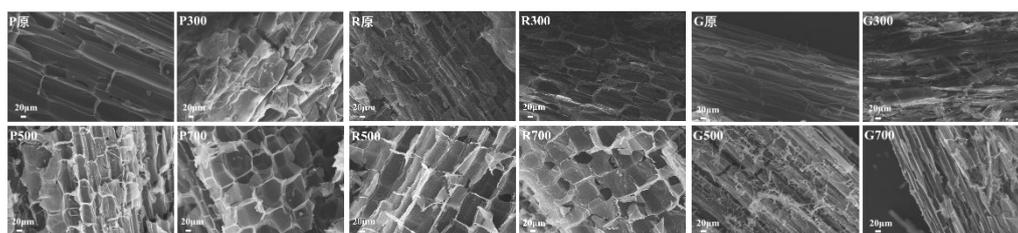


图 3 玉米秸秆不同部位及其生物炭扫描电镜图像

出现破损和崩塌可能是由于热解温度提高引起的。在炭化过程中,材料持续受热,导致内部应力释放产生大量能量,导致孔道开裂。因此材料表面孔道分布变得混乱,孔壁破损,增加了表面粗糙度。

2.6 秸秆生物炭的吸附特性及孔隙结构的影响

孔隙结构是衡量生物炭吸附性能的重要指标。

生物炭的孔隙结构受到秸秆不同部位和炭化温度的影响。随着热解温度升高,生物炭的比表面积会增加,在高温条件下,生物炭炭化程度增强,木质纤维素分解会释放大量挥发性气体并产生孔隙结构,从而增大比表面积^[19]。生物炭比表面积有随炭化温度升高呈现先升高后降低变化趋势^[20]。当炭化温度过高时,孔隙内部结构可能被破坏,导致比表

面积减少。

由表 3 可知,秸秆瓢比表面积最高值出现在 700 °C,可能是随着炭化温度升高,秸秆瓢逐渐炭化完全所致。秸秆皮的比表面积最大值出现在 500 °C,在 700 °C 时反而最小。秸秆根的比表面积与炭化温度呈负相关,温度越高比表面积越小。3 种材料生物炭主要为介孔结构,少量微孔,平均孔径为 2~50 nm,随热解温度升高孔径逐渐减小。而总孔容随炭化温度逐渐增加,700 °C 时到达最大值,说明此时孔隙结构最丰富,这可能与玉米秸秆本身的 C 元素含量有关。

表 3 玉米秸秆不同热解条件下制得生物炭的孔隙参数

生物炭	处理(热解条件)	BET 比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
秸秆皮生物炭	处理 1	14.56	0.0011	1.48
	处理 2	20.84	0.0024	2.26
	处理 3	4.51	0.0045	1.98
秸秆瓢生物炭	处理 1	18.45	0.0023	2.46
	处理 2	18.57	0.0033	3.57
	处理 3	71.45	0.0085	2.37
秸秆根生物炭	处理 1	28.09	0.0019	2.35
	处理 2	11.35	0.0023	4.98
	处理 3	10.08	0.0028	4.61

图 4 是用 Origin2018 软件处理的 3 种材料的生物炭对氮气的吸脱附曲线。300 °C 制备的秸秆瓢生物炭表现为吸附量逐渐增加,但吸附作用较弱。相

同温度下制备的秸秆皮生物炭在低压力下吸附量逐渐增加,相对压力值达到 0.6 以后变得逐渐平缓,可能是孔隙内单分子层吸附接近饱和所致。与前者相比,秸秆根生物炭表现更为激烈,曲线偏向 Y 轴的幅度较大。500 °C 时,秸秆根与秸秆瓢的生物炭氮气吸附量与 300 °C 时变化相似。秸秆皮生物炭在相对压力为 0.5 左右时,吸附曲线急剧上升,相对压力达到 1 时吸附量最高,说明在这个阶段增加了孔隙和微裂缝,导致吸附量显著增加。当温度达到 700 °C,秸秆根生物炭的吸附曲线与 500 °C 时相比变化不大,表明吸附量变化微小。而秸秆瓢和皮生物炭在相同条件下产生明显差异。秸秆瓢在 700 °C 时,吸附曲线在低相对压力下快速上升,表明吸附效果强,而中等压力区域呈缓慢上升趋势,说明存在丰富的微孔和介孔混合结构^[21]。相反,秸秆皮生物炭在同一条件下的吸附曲线几乎呈直线状,吸附能力变化不大,可能是高温导致孔隙结构减少。

对比发现,低温时制备的秸秆皮与秸秆根生物炭具有良好的吸附性能,而在 700 °C 时制备的秸秆瓢生物炭孔径结构更加丰富,微孔介孔较多,因此在吸附效果上表现最佳。这对于土壤和污水等杂质吸附具有重要意义。

2.7 秸秆原材料的热重分析

热重分析可用于研究秸秆在加热过程中的质量损失,揭示其化学反应和热降解过程。由图 5 可知,在 200 °C 时,秸秆皮和秸秆瓢的热重微分(DTG)曲线出现了小高峰,这表明其中的水分、纤维素等

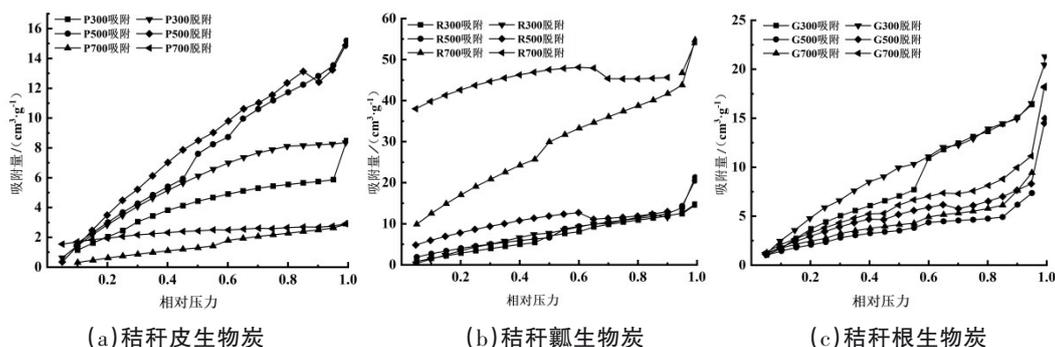


图 4 玉米秸秆不同部位生物炭的吸附-脱附等温曲线

物质能在较低温度分解。可能是因为它们的水分、纤维素含量较高,导致分解速度加快^[22]。而相同温度下的秸秆根的热重(TG)曲线保持平缓,表明秸秆

根在低温热处理时性质更加稳定。350 °C时,3种材料的DTG曲线达到最高值,此时材料失重反应最强烈,失重速率最快。

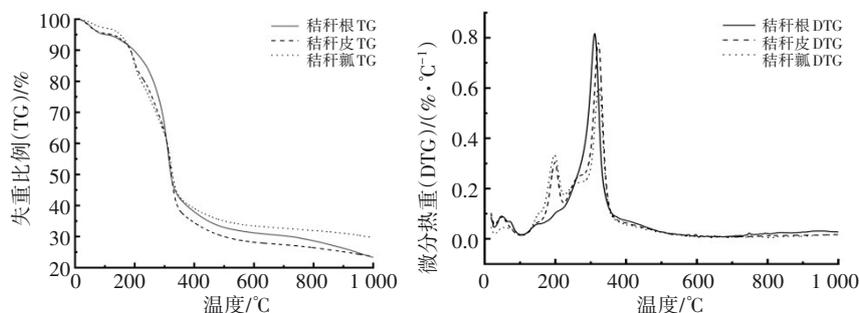


图5 玉米秸秆不同部位生物炭TG-DTG曲线

随着温度升高,3种材料的热解过程可分为3个阶段。室温到200 °C为脱水阶段,主要是材料中的水分蒸发和少量挥发性物质挥发的过程。这些水分主要来自大气湿度和材料本身的湿度^[23],导致轻微失重现象发生。

从200 °C到350 °C,这是快速热解阶段,3种材料的反应都很强烈。在这个阶段,材料中纤维素、半纤维素和木质素会产生气体和挥发性物质,导致材料质量急剧减少,TG曲线急速下降,DTG曲线急速上升,失重效果显著。400 °C后为炭化阶段,主要是木质素的分解,TG和DTG曲线逐渐平缓,反应减弱。温度超过600 °C则主要生成炭和灰分,热解结束,曲线也基本平稳。

3 结论

本文以玉米秸秆的皮、瓢、根为原料,采用低温密封限氧法分别在300 °C/45 min、500 °C/30 min、700 °C/15 min工艺条件下制备生物炭并对其进行特性研究,结果如下。

1) 不同部位的玉米秸秆经相同炭化工艺处理后,其炭产率、pH值、红外光谱、扫描电镜、比表面积及孔径等相同或相近,300 °C时其根和皮的炭产率

相差0.07,且随着温度升高呈现相同变化趋势,其皮、瓢和根3种材料生物炭pH值基本接近,300 °C差值最大为0.31,700 °C差值最小仅为0.01;但玉米秸秆根生物炭的灰分明显高于其皮和瓢,可能是秸秆根中含有较多土壤中杂质、灰尘等所致。

2) 热解温度对玉米秸秆皮、瓢和根的生物炭的性质影响最大但变化趋势基本相同;生物炭的炭产率随温度的升高明显下降,而pH值和灰分含量则相应增加;皮、瓢和根3个部分生物炭的比表面积随着热解温度的升高而增加,但随着裂解温度升高到一定数值时,其比表面积会有所减小。300 °C时制备的根、皮、瓢生物炭比500 °C、700 °C制备的生物炭表面官能团含量丰富。随温度升高,根、皮、瓢生物炭的芳香性渐强,孔径结构更丰富,微孔、介孔数量增加。

综上所述,秸秆根生物炭与秸秆瓢、秸秆皮生物炭材料功能性相近。针对玉米秸秆根部利用困难问题,本研究为进一步探讨玉米秸秆根批量制备生物炭的可行性、优良性能以及降低污染的制备方法提供了一定的理论基础。未来可以进一步研究添加玉米秸秆根生物炭在改善土壤酸性、提升土壤肥力和杂质吸附等问题中的作用与效果。

参考文献:

[1] 毕于运,高春雨,王亚静,等.中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.

- [2] KAUR D, BHARDWAJ N K, LOHCHAB R K. Prospects of rice straw as a raw material for paper making[J]. Waste Management, 2016, 60: 127-139.
- [3] TIWARI S, DUMKA U C, HOPKE P K, et al. Atmospheric heating due to black carbon aerosol during the summer monsoon period over Ballia: a rural environment over Indo-Gangetic Plain[J]. Atmospheric research, 2016, 178: 393-400.
- [4] 陆一新,李滨伶,李晓媛,等.废弃秸秆生物炭的制备及其在污水处理中的应用研究进展[J].化工新型材料, 2023, 51(9): 259-265
- [5] SKJEMSTAD J O, REICOSKY D C, WILTS A R, et al. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils[J]. Soil, 2002, 66(4): 1249-1255.
- [6] 梁桓,索全义,侯建伟,等.不同炭化温度下玉米秸秆和沙蒿生物炭的结构特征及化学特性[J].土壤, 2015, 47(5): 886-891.
- [7] 张春燕.植物生物炭制备、性能及其对作物生长影响研究[D].南京:南京农业大学, 2018.
- [8] 王炯,张品,张舒晴,等.温度对秸秆生物炭理化特性和电化学特性的影响[J].太阳能学报, 2022, 43(5): 399-404.
- [9] HAYKIRI-ACMA H, YAMAN S, KUCUKBAYRAK S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(7): 759-764.
- [10] 闫郑方,张敬,余鑫,等.秸秆生物炭的特性及其在重金属污染农田中的应用[J].湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(1): 38-47.
- [11] 叶协锋,周涵君,于晓娜,等.热解温度对玉米秸秆炭产率及理化特性的影响[J].植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1268-1275.
- [12] 何逸婷, DROSOS M, 孙嘉,等.不同原料、热解温度对生物质炭化学性质及结构组成的影响[J].南京农业大学学报, 2023, 46(4): 718-726.
- [13] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresour Technol, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [14] 杨艺,彭华,邓凯,等.农作物秸秆纤维提取技术研究进展[J].农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2386-2397.
- [15] 肖欣.生物炭的多级结构特征、构效关系及其吸附作用研究[D].杭州:浙江大学, 2018.
- [16] 赵越,赵保卫,刘辉,等.热解温度对生物炭理化性质和吸湿性的影响[J].环境化学, 2020, 39(7): 2005-2012.
- [17] CHEN B, CHEN Z. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures[J]. Chemosphere, 2009, 76(1): 127-133.
- [18] 韦思业.不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2017.
- [19] 占长林,高越,詹佳伟,等.裂解温度对不同原材料生物炭理化特性的影响[J].湖北理工学院学报, 2020, 36(1): 10-15.
- [20] 徐亮,于晓娜,李雪利,等.不同热解温度制备的烟秆生物炭理化特征分析[J].土壤通报, 2021, 52(1): 75-81.
- [21] 周涵君,于晓娜,孟琦,等.热解温度对油菜秸秆炭理化特性及孔隙结构的影响[J].河南农业大学学报, 2018, 52(6): 983-990.
- [22] 黄娜,高岱巍,李建伟,等.生物质三组分热解反应及动力学的比较[J].北京化工大学学报(自然科学版), 2007(5): 462-466.
- [23] 乔印虎,张春燕,何春霞.预处理与低温热解对向日葵秸秆炭N₂的吸附性能研究[J].太阳能学报, 2019, 40(8): 2128-2134.