



郑小东, 徐建明, 魏岚, 林启美, 刘忠珍. 典型生物炭的亲水和疏水性特征及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(04): 73-82.

ZHENG Xiaodong, XU Jianming, WEI Lan, LIN Qimei, LIU Zhongzhen. Hydrophilicity and hydrophobicity characteristics of typical biochar and their influencing factors[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 73-82.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.06

典型生物炭的亲水和疏水性特征及其影响因素

郑小东 徐建明 魏岚 林启美 刘忠珍*

(广东省农业科学院 农业资源与环境研究所/农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室/
广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要 为探究生物炭的亲水和疏水特性及其影响因素,以6种不同典型原材料、3种不同热解温度制备的生物炭为研究对象,通过酸碱洗涤和水洗涤方法洗涤生物炭后,采用静滴法和随机森林方法分析不同类型原材料、热解温度和洗涤方法对生物炭接触角的影响及其与生物炭性质的关系。结果表明:1)300℃热解的生物炭接触角 $>120^\circ$,表现为疏水性;700℃热解的生物炭接触角 $<60^\circ$,表现为亲水性;500℃热解的生物炭接触角大小随原材料类型有所差异,其中木屑、稻壳和鸡粪的生物炭接触角 $>120^\circ$,而来自玉米秸秆、牛粪和猪粪的生物炭接触角 $<60^\circ$ 。2)随机森林分析结果显示,孔体积、溶解性有机碳、比表面积和氢含量与生物炭接触角显著相关。3)随着热解温度的升高,生物炭溶解性有机碳、氢含量降低,孔体积和比表面积增加,导致生物炭从疏水性转变为亲水性。4)酸碱洗涤和水洗涤处理均能降低生物炭的疏水性。综上,低温与高温热解的生物炭分别表现为疏水性与亲水性,水洗涤处理在降低生物炭疏水性方面具有较好的应用潜力。

关键词 生物炭; 洗涤处理; 亲水性; 疏水性

中图分类号 S-3

文章编号 1007-4333(2026)04-0073-10

文献标志码 A

Hydrophilicity and hydrophobicity characteristics of typical biochar and their influencing factors

ZHENG Xiaodong, XU Jianming, WEI Lan, LIN Qimei, LIU Zhongzhen*

(Institute of Agricultural Resources and Environment/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract To explore the hydrophilicity and hydrophobicity characteristics of biochar and their determining factors, biochars were obtained from six typical feedstocks under three pyrolysis temperatures and washed using two methods including acid-alkali washing and water washing. The contact angles of different biochars and their relation to biochar properties were analyzed by using sessile drop method and random forest analysis. The results showed that: 1) The biochar pyrolyzed at 300 °C was hydrophobic with contact angles greater than 120°, whereas the biochar at 700 °C was hydrophilic with contact angles less than 60°. The contact angles of biochar pyrolyzed at 500 °C varied with feedstock type: Those from sawdust, rice husk, and chicken manure were greater than 120° while those from maize straw, cow dung, and pig manure were less than 60°. 2) The results of random forest analysis revealed that the pore volume, dissolved organic carbon, specific surface area, and H content were significantly related to biochar contact angle. 3) As the pyrolysis temperature increased, dissolved organic

收稿日期: 2025-06-20; 接受日期: 2025-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207316); 广东省农业科学院低碳农业与碳中和研究中心项目(XTXM202204)

第一作者: 郑小东(ORCID: 0009-0003-1007-760X), 博士, 助理研究员, 主要从事土壤碳循环研究, E-mail: zxdmrh@foxmail.com

通讯作者: 刘忠珍(ORCID: 0000-0002-6435-345X), 研究员, 主要从事土壤固碳与污染物治理研究, E-mail: lzzgz2001@163.com

carbon and H decreased while the pore volume and specific surface area increased, leading to the conversion of biochar from hydrophobic to hydrophilic. 4) Acid-alkali washing and water washing both decreased the biochar hydrophobicity. In conclusion, the low-temperature and high-temperature pyrolyzed biochars exhibit distinct hydrophobicity and hydrophilicity, respectively, and water washing has application potential in reducing biochar hydrophobicity.

Keywords biochar; washing treatment; hydrophilicity; hydrophobicity

生物炭与水的亲和力决定生物炭在土壤中的物理化学过程,包括吸附、渗透和移动等^[1-2],这些过程会调控生物炭与土壤养分或污染物的结合能力及去向,进而影响生物炭对土壤养分的富集作用以及对土壤污染物的治理效果^[3-4],从而决定生物炭在土壤中的功能及应用潜力。Acharya等^[5]和Bagheri等^[6]研究表明稻田施用生物炭时,由于生物炭相对密度低、疏水性强,生物炭通常漂浮于水面,在土壤中分布不均,导致局部养分富集,进而影响作物生长;Kinney等^[7]将强疏水性生物炭施用于土壤,发现其会降低旱地土壤的保水性能,导致土壤缺水。显然,阐明生物炭的亲水与疏水性特征及其影响因素,对指导生物炭在农业生产中的合理应用具有重要意义。

生物炭芳构化程度是决定生物炭亲水和疏水性的关键要素,生物炭原材料结构越复杂,热解温度越高,其芳构化程度越强,疏水性也越高^[8]。然而,已有研究发现,生物炭亲水和疏水特性由孔性(如孔径、孔数量、孔体积和孔隙连通性)^[9]、孔隙表面化学性质(如化学成分和官能团)^[10]等多种因素共同决定。Faloye等^[11]研究指出孔径与生物炭亲水性表现为正相关关系,而孔径通常决定孔体积和比表面积^[12],该2个指标可评估生物炭的亲水性或疏水性。此外,生物炭孔隙表面的化合物类型,决定孔隙是否发生堵塞或者表现出疏水性,进而影响水进入生物炭孔隙^[13];由生物炭中的脂肪烃形成的焦油,会导致孔隙堵塞并阻止水进入生物炭孔隙^[14]。

生物炭主要由化学稳定性高的碳骨架、灰分以及少部分溶解性有机物组成,其中溶解性有机物是生物炭官能团的主要来源,主要包括疏水性的脂肪族和芳香化合物,以及少部分含氧官能团化合物^[15-16]。Zheng等^[17]对生物炭进行化学试剂溶液或水浸提处理来去除或检测生物炭衍生的可溶性有机物及无机盐组分。说明可以通过洗涤处理去除生物炭衍生的不稳定成分来降低生物炭疏水性,对

于改善生物炭在农田中的施用效果具有重要意义。

尽管亲水和疏水性直接影响生物炭在土壤中的物理化学过程,但目前对生物炭亲水和疏水性特征仍缺乏认识,尤其在调控生物炭亲水和疏水性方面尚无研究报道。因此,本研究为了解不同原材料及不同热解温度制备的生物炭亲水与疏水性特征及差异,拟以6种典型广州周边原材料为研究对象,其中,3种植物源材料为玉米秸秆、木屑和水稻壳,3种动物源材料为牛粪、鸡粪和猪粪,分别在300、500、700℃下热解制备生物炭,并经过不同方法洗涤,采用静滴法和随机森林方法比较生物炭接触角差异,探究其与生物炭特性之间的关系、影响因素及调控措施,以期生物炭在农田土壤中的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 生物炭制备

选择典型的3种植物源材料(玉米秸秆、木屑和水稻壳,来自广州周边农田)和3种动物源材料(牛粪、鸡粪和猪粪,来自广州周边农户养殖场)作为生物炭原材料。首先将原材料65℃下干燥72h,研磨并过0.15mm筛;然后将过筛颗粒置于马弗炉中,在缺氧条件下分别在3种不同温度(300、500、700℃)下热解2h,从而获得不同热解温度的生物炭;最后将生物炭过0.15mm筛,用于生物炭性质测定。

1.2 洗涤处理

采用2种方法洗涤生物炭。一是酸碱洗涤,按照 $m(\text{生物炭}):V(\text{溶液})=1:20$ 的比例,首先将一定量生物炭与0.1mol/L HCl溶液混匀,磁力搅拌2h后过滤;再用0.1mol/L NaOH溶液按相同比例磁力搅拌2h后过滤;最后用蒸馏水洗涤一次并过滤。二是仅用蒸馏水以相同步骤洗涤3次。洗涤后的生物炭均经干燥后,过0.15mm筛备用。

1.3 理化性质测定

灰分在750℃下干烧6h测定^[18]。元素分析仪

EA 1108(Carlo Erba,意大利)测定碳、氮、氧、硫和氢元素质量分数,并计算氢与碳、氧与碳、碳与氮、(碳和氢)与(氮+氧)等元素质量分数比^[19]。采用 Quantachrome BET 比表面积分析仪(Brunauer, Emmett, Teller,美国),在 140 °C(5 °C/min)下脱气 14 h,通过 N₂吸附-解吸等温线,计算比表面积和孔隙特性^[20]。按照 $m(\text{生物炭}):V(\text{蒸馏水})=1:10$ 的比例加入到聚丙烯瓶中,充分震荡 1 h,悬浊液静置 30 min 后,上清液过 0.45 μm 滤膜,滤液中的可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量用总有机碳分析仪(Teledyne Tekmar Phoenix 8000, Mason,美国)测定。

采用静滴法测定生物炭接触角^[21-22]。静滴法为测定固液界面的接触角,将一定量生物炭样品均匀放置在载玻片上并压紧,滴加 5 μL 蒸馏水,立即用张力计(LAUDA Scientific LSA100, Lauda-Königshofen,德国)测定接触角。0~90°表明生物炭为亲水性,>90°则说明生物炭为疏水性^[23]。

1.4 统计分析

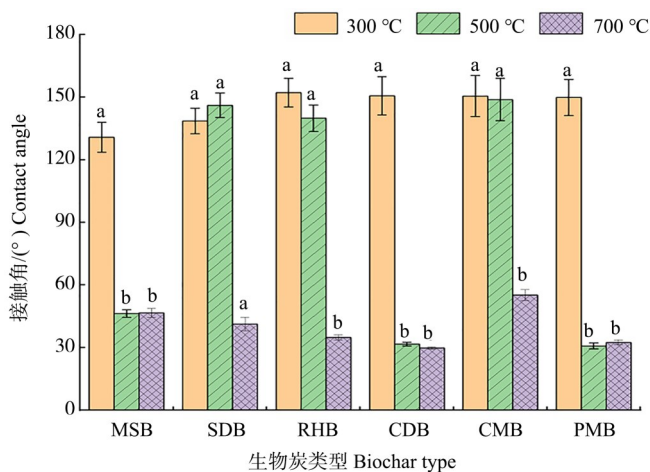
本研究数据以3次重复的平均值±标准误差来表示。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)评价不同原材料、热解温度以及洗涤处理制备的生物炭接触角差异,采用独立样本t检验评价未洗涤与酸碱洗涤制备的生物炭接触角差异。使用R软件随机森林分析方法探明生物炭亲水和疏水性的关

键影响因素。数据整理和统计分析分别使用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 27 软件进行,采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同原材料及不同热解温度制备的生物炭接触角差异

不同原材料及不同热解温度制备的生物炭接触角及其张力计检测状态下的实物图见图1和图2。可见:300 °C热解条件下不同原材料制备的生物炭接触角>120°;700 °C热解的生物炭接触角<60°;500 °C热解的生物炭接触角大小随原材料类型有所变化,其中木屑、稻壳和鸡粪的生物炭接触角>120°,而来自玉米秸秆、牛粪和猪粪的生物炭接触角<60°。此外:在木屑、稻壳和鸡粪等原材料中,300 和 500 °C热解的生物炭接触角差异不显著($P>0.05$),700 °C热解的生物炭接触角显著低于500 °C热解的生物炭($P<0.05$),表现为热解温度升高 100 °C,生物炭接触角降低 46.9~52.5°;在玉米秸秆、牛粪和猪粪等原材料中,500 °C热解的生物炭接触角显著低于300 °C热解的生物炭($P<0.05$),热解温度升高 100 °C,接触角降低 42.3~59.5°,500 和 700 °C热解的生物炭接触角则无显著性差异($P>0.05$)。上述结果表明,热解温度及原材料类型是决定生物炭接触角的关键因素。



MSB:玉米秸秆炭;SDB:木屑炭;RHB:稻壳炭;CDB:牛粪炭;CMB:鸡粪炭;PMB:猪粪炭(下同)。不同小写字母表示相同原材料不同热解温度的生物炭接触角差异显著($P<0.05$),相同字母则表示差异不显著($P>0.05$)。

MSB: maize straw biochar; SDB: sawdust biochar; RHB: rice husk biochar; CDB: cow dung biochar; CMB: chicken manure biochar; PMB: pig manure biochar (the same below). Different letters represent significant differences of contact angle for different temperature pyrolyzed biochar under the same feedstock ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$).

图1 不同原材料及不同热解温度制备的生物炭接触角对比

Fig. 1 Comparison of contact angles of biochar with various feedstocks and pyrolysis temperatures

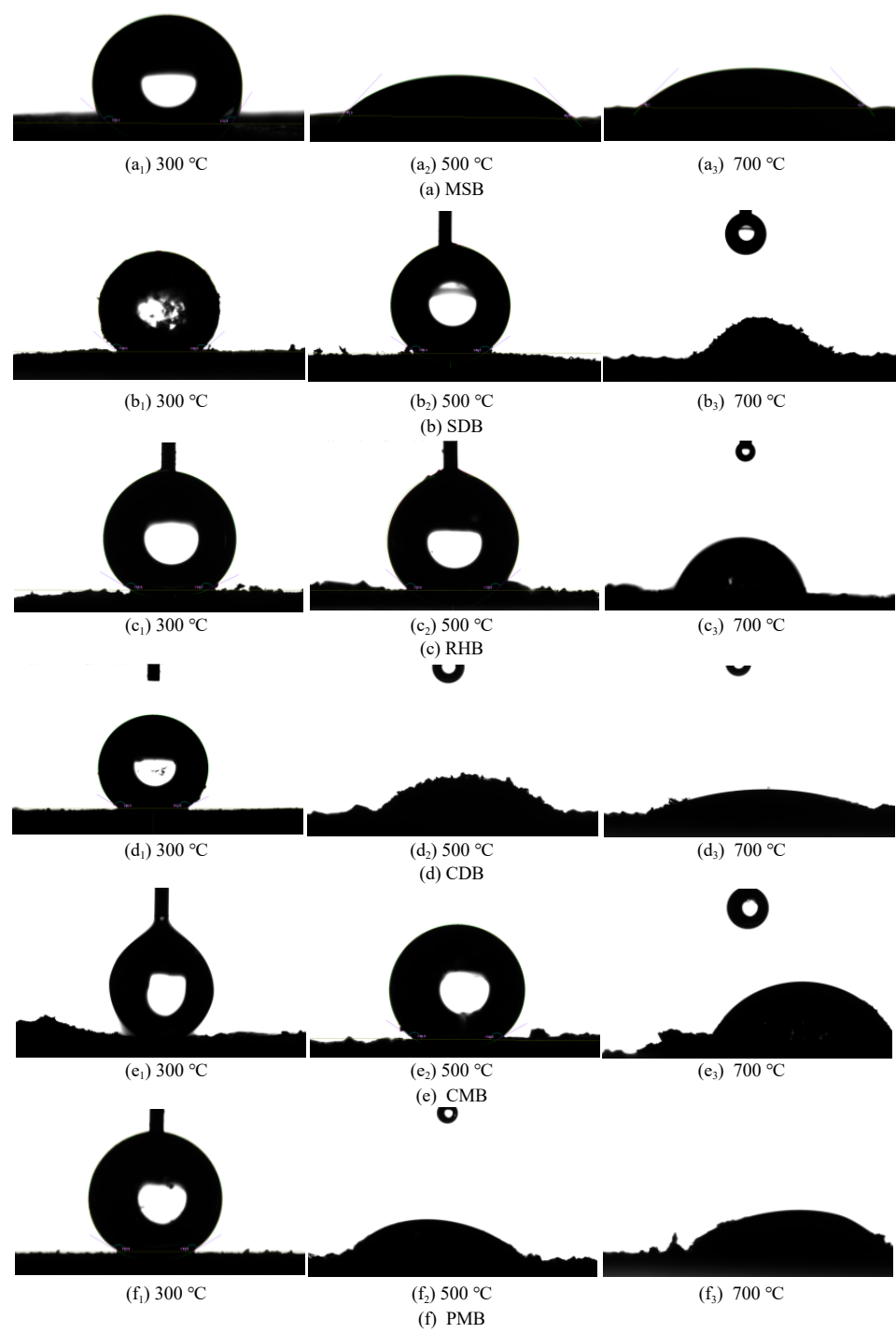


图 2 不同原材料及不同热解温度制备的生物炭接触角实物图

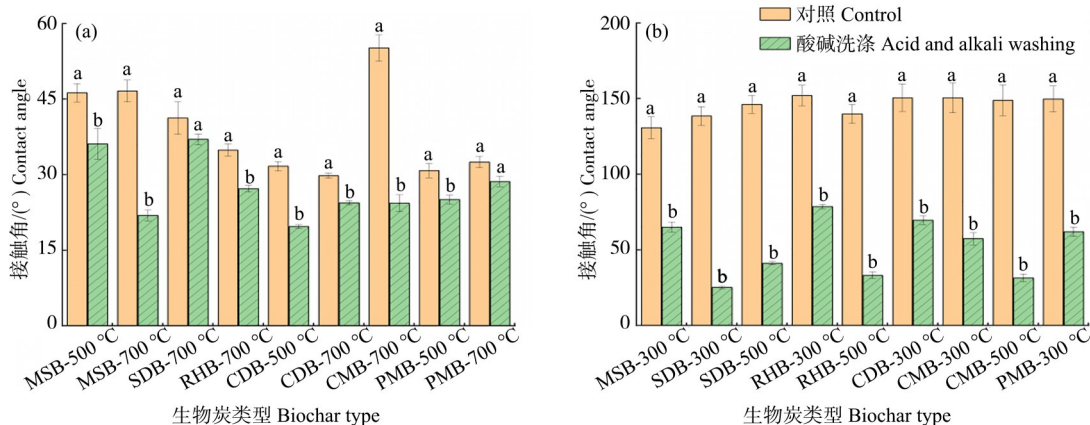
Fig. 2 Images of contact angle of biochar with various feedstocks and pyrolysis temperatures

2.2 洗涤处理对生物炭接触角的影响

2.2.1 酸碱洗涤对生物炭接触角的影响

酸碱洗涤下生物炭接触角的测定结果见图 3。可见:与未洗涤相比,酸碱洗涤处理的亲水性生物炭接触角下降幅度较小,其中 700 °C 热解的木屑、猪粪

生物炭接触角变化不显著,其他生物炭接触角下降 18.1%~55.8% ($P<0.05$) (图 3(a));与未洗涤相比,酸碱洗涤处理的疏水性生物炭接触角均显著下降,下降幅度为 48.3%~81.8% (图 3(b))。上述结果说明,酸碱洗涤可不同程度降低生物炭的疏水性。



不同小写字母表示不同洗涤处理下的生物炭接触角差异显著($P < 0.05$);相同字母则表示差异不显著($P > 0.05$)。下同。

Different letters represent significant differences of contact angle for biochar with different washing treatments ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

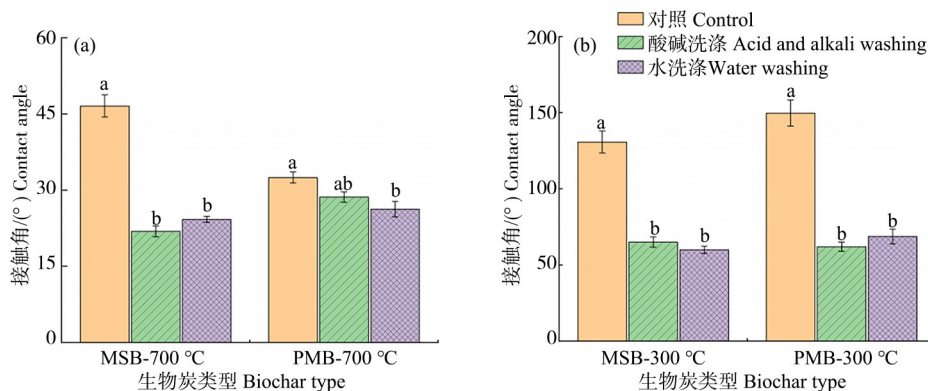
图3 酸碱洗涤处理对亲水性(a)和疏水性(b)生物炭接触角的影响

Fig. 3 Effect of acid and alkali washing on contact angles of hydrophilic (a) and hydrophobic (b) biochar

2.2.2 水洗涤对生物炭接触角的影响

以植物源(玉米秸秆)和动物源(猪粪)材料中典型的亲水和疏水性生物炭为例,分析不同洗涤处理对生物炭接触角的影响及其实物图,结果分别见图4和5。由图4(a)和图5可见:与未洗涤相比,水洗涤的亲水性生物炭接触角降低了19.2%~48.0%($P < 0.05$),酸碱洗涤和水洗涤处理的亲水

性生物炭接触角差异不显著($P > 0.05$)。由图4(b)和图5可见:与未洗涤相比,水洗涤的疏水性生物炭接触角降低了54.1%~54.3%($P < 0.05$),酸碱洗涤和水洗涤处理的疏水性生物炭接触角无显著性差异($P > 0.05$)。上述结果表明,水洗涤降低生物炭疏水性的效果与酸碱洗涤类似,能够大幅度降低疏水性生物炭的接触角。



对照为不洗涤;酸碱洗涤为分别用酸、碱和蒸馏水各洗涤1次;水洗涤为用蒸馏水洗涤3次。下同。

Control: no washing. Acid and alkali washing: washing with acid, alkali and distilled water separately. Water washing: washing with distilled water three times. The same below.

图4 不同洗涤处理对亲水性(a)和疏水性(b)生物炭接触角的影响

Fig. 4 Effect of various washing treatments on contact angles of hydrophilic (a) and hydrophobic (b) biochar

2.3 接触角与生物炭特性相关性分析

生物炭接触角与理化性质相关性的随机森林分析结果见表1和图6(根据表1结果,图6中仅列出生物炭的关键理化性质数据)。由表1可见:生物炭孔体积、DOC含量、比表面积和氢含量与生

物炭接触角显著相关,其均方差增加分别为7.00%、5.88%、5.40%和3.55%;生物炭孔径、灰分含量、元素组成及比值与生物炭接触角无显著相关性。由图6可见:每种原材料中,随着热解温度升高,生物炭DOC和氢含量降低,而孔体积和

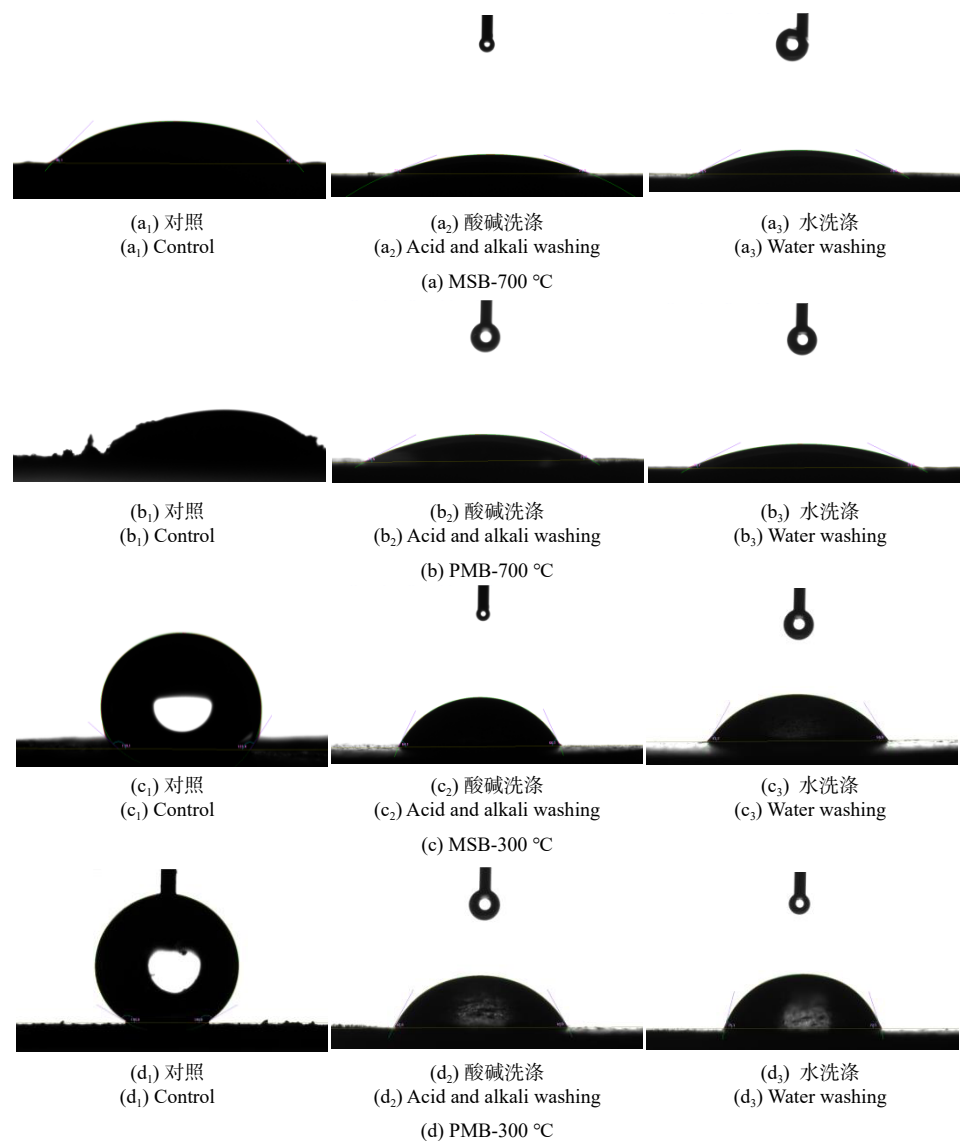


图5 不同洗涤处理下生物炭接触角实物图

Fig. 5 Images of contact angle of biochar with various washing treatments

比表面积增加,导致生物炭从疏水性转变为亲水性。上述结果表明,生物炭孔性特征增加以及DOC含量降低是导致生物炭由疏水性转变为亲水性的关键原因。

3 讨 论

3.1 生物炭亲水及疏水性的影响因素

早期研究观点认为,由于生物炭主要成分为高度芳构化的稳定性碳组分,生物炭表现为疏水性特征^[24]。生物炭的芳香性(以氢与碳比率表征)可指示其疏水性程度,且疏水性随芳香性增加而增强^[25]。与以往研究不同,本研究结果表明,生物炭

氢与碳比率与其接触角无显著相关性,而生物炭的孔体积、比表面积和DOC含量与生物炭接触角极显著相关,这与生物炭的热解温度密切相关。低温(300℃)热解的生物炭表现为疏水性,主要由于其DOC含量高,且疏水性DOC占比较高(最高可达90%)^[26]。尤其是生物炭DOC中的脂肪族化合物具有强疏水性,是决定生物炭疏水性的关键组分,这些组分主要来源于生物炭热解过程中产生的焦油状物质^[27]。此外,低温热解生物炭中的焦油会降低生物炭孔隙的连通性,而且孔体积、比表面积相对较小,使水难以进入孔隙^[28]。随着热解温度升高,焦油状物质逐渐挥发,高温(700℃)热解的生物

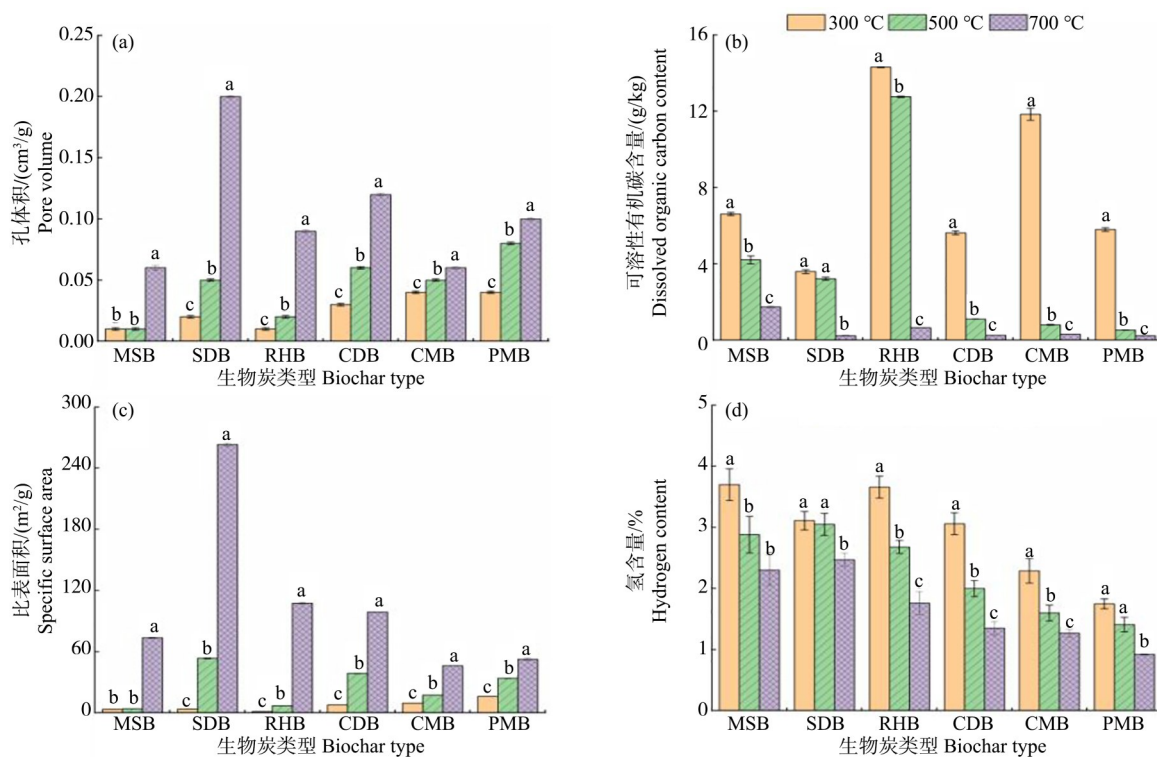
表 1 生物炭接触角与理化性质的关系

Table 1 Relationship between contact angles and physicochemical properties of biochar

生物炭理化性质 Physicochemical properties of biochar	均方差增加/% Increase of mean square error	生物炭理化性质 Physicochemical properties of biochar	均方差增加/% Increase of mean square error
孔体积 Pore volume	7.00 **	(碳+氢)/(氮+氧) (Carbon+Hydrogen)/(Nitrogen+Oxygen)	0.04
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	5.88 **	灰分 Ash	0.01
比表面积 Specific surface area	5.40 **	氮+氧 Nitrogen+Oxygen	-0.28
氢 Hydrogen	3.55 *	氢/碳 Hydrogen/Carbon	-0.37
氮 Nitrogen	0.85	碳/氮 Carbon/Nitrogen	-0.42
硫 Sulphur	0.71	碳+氢 Carbon+Hydrogen	-0.51
氧 Oxygen	0.64	碳 Carbon	-0.53
氧/碳 Oxygen/Carbon	0.27	孔直径 Pore diameter	-0.55

注：*和**分别表示对应指标在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上是生物炭接触角的显著影响因素。

Note: * and ** represent the significant influencing factors of corresponding index determining biochar contact angle at the level of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.



不同小写字母表示相同原材料不同热解温度的生物炭理化性质差异显著($P < 0.05$), 相同字母则表示差异不显著($P > 0.05$)。

Different letters represent significant differences of physicochemical property for biochar pyrolyzed at different temperatures under the same feedstock ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$).

图 6 不同原材料及不同热解温度制备的生物炭理化性质

Fig. 6 Physicochemical properties of biochar with various feedstocks and pyrolysis temperatures

炭DOC及脂肪族化合物含量相应减少^[29-30],而孔体积和比表面积增加,因此水进入生物炭孔隙的阻力减小,生物炭逐渐表现出亲水性^[31]。尽管本研究中灰分与生物炭接触角无显著相关性,但灰分中含有的微量金属阳离子和无机盐阴离子也可能影响生物炭的亲水和疏水性,未来可进一步开展研究。

与Yi等^[32]研究结果一致,本研究结果表明,原材料类型也是决定生物炭亲水和疏水性的重要因素,主要表现为不同原材料500℃热解的生物炭亲水和疏水性存在差异,其中来自木屑、稻壳和鸡粪的生物炭表现为疏水性,而玉米秸秆、牛粪和猪粪制成的生物炭表现为亲水性。这可能与原材料组成的复杂性有关^[33-34]。高亮等^[35]研究指出,木屑主要由木质素组成,其化学复杂性比玉米秸秆更大,化学稳定性更高。稻壳中硅含量丰富,在热解过程中,硅键断裂比其他键断裂需要更多能量^[36]。由于鸡的特殊饮食习惯(吃石粒以研磨食物),鸡粪中含有岩石物质,这可能导致其化学复杂性比其他动物粪便更高^[37]。需要指出的是,本研究所用生物炭在马弗炉中制备,与企业负压式炭化过程生产的生物炭性质存在差异,未来可探明不同生产设备及不同工艺条件下生物炭亲水和疏水性差异。

3.2 洗涤处理对生物炭亲水及疏水性的影响

本研究结果表明,洗涤处理能够降低生物炭疏水性,这主要由于洗涤能够去除生物炭中的DOC,并增加生物炭孔体积和比表面积^[38]。生物炭有利于提高水田土壤的保水能力^[39],而在旱地土壤中可能具有负面作用,如水荒现象。Jeffery等^[40]研究指出施用疏水性生物炭会降低旱地土壤的水分有效性,导致土壤缺水从而阻碍植物正常生长。这说明土壤淹水具有与生物炭洗涤处理相似的效果,即降低生物炭疏水性,增强生物炭在土壤中的保水效果。尽管生物炭疏水性随着自然老化而降低,但其储存及时间成本相对较高^[41]。因此,对疏水性生物炭进行洗涤处理是一种有效且低成本的方法。鉴于酸碱洗涤的生物炭可能将酸或碱带入土壤,因此水洗涤是降低生物炭疏水性的可行措施。

本研究从土壤保水角度探明了生物炭亲水和疏水性特征及其影响因素,并揭示了洗涤处理在改善生物炭疏水性方面的作用。而疏水性生物炭(低温热解生物炭)在污染物治理、养分供应方面具有较好的效果,如降低重金属有效性、提高土壤DOC

及其他养分。相对来讲,亲水性生物炭(高温热解生物炭)在土壤保水、固碳减排方面具有较好效果,但在养分补给、维持微生物活性方面并无优势^[42-43]。郑健等^[44]研究指出,400~500℃制备的生物炭在土壤中的综合应用效果较好,主要是兼具了低温和高温生物炭的优点,同时也补短了其缺点。因此,在实际农业生产应用中,建议综合考虑生物炭对土壤的多重效果,如养分供应、污染物治理、固碳减排等方面,从而因地制宜选择施用生物炭。

4 结 论

本研究为促进生物炭在农田土壤中的合理应用,以生物炭为研究对象并进行不同洗涤方法处理,探究不同原材料及不同热解温度制备的生物炭亲水和疏水性特征、影响因素及其调控措施。主要结论如下:

1)低温(300℃)热解生物炭表现为疏水性,高温(700℃)热解生物炭表现为亲水性,中等温度(500℃)热解生物炭亲水和疏水性随原材料类型存在差异;

2)生物炭DOC、氢含量降低以及孔体积、比表面积增加是生物炭由疏水性向亲水性转变的主要原因;

3)酸碱洗涤、水洗涤均可降低生物炭疏水性且效果类似。

综上,水洗涤在降低生物炭疏水性方面具有较好的推广潜力,未来可进一步探索洗涤后的生物炭对土壤保水特性、养分供应、污染物治理及固碳减排等方面的综合效果,为农田土壤生物炭合理应用提供依据。

参考文献 References

- [1] Clurman A M, Rodríguez-Narvaez O M, Jayarathne A, De Silva G, Ranasinghe M I, Goonetilleke A, Bandala E R. Influence of surface hydrophobicity/hydrophilicity of biochar on the removal of emerging contaminants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402: 126277
- [2] Lan W J, Zhao X X, Wang Y X, Jin X, Ji J T, Cheng Z J, Yang G X, Li H, Chen G Y. Research progress of biochar modification technology and its application in environmental remediation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 184: 107178
- [3] Karim A A, Kumar M, Singh E, Kumar A, Kumar S, Ray A, Dhal N K. Enrichment of primary macronutrients in biochar for sustainable agriculture: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(9): 1449-1490
- [4] 张丽,李如霞,何玉垒,姚彦坡,林大松.生物炭与氮肥复施对镉污染水稻

- 土修复效应及机制[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4479-4488
- Zhang L, Li R X, He Y L, Yao Y P, Lin D S. Remediation effect and mechanism of biochar in combination with nitrogen fertilizer on Cd-contaminated paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4479-4488 (in Chinese)
- [5] Acharya B S, Dodla S, Wang J J, Pavuluri K, Darapuneni M, Dattamudi S, Maharjan B, Kharel G. Biochar impacts on soil water dynamics: Knowns, unknowns, and research directions[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 34
- [6] Bagheri Novair S, Cheraghi M, Faramarzi F, Asgari Lajayer B, Senapathi V, Astatkie T, Price G W. Reviewing the role of biochar in paddy soils: An agricultural and environmental perspective [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 263: 115228
- [7] Kinney T J, Masiello C A, Dugan B, Hockaday W C, Dean M R, Zygourakis K, Barnes R T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 41: 34-43
- [8] Li L D, Long A, Fossum B, Kaiser M. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: A meta-analysis[J]. *Soil Use and Management*, 2023, 39(1): 43-52
- [9] Edeh I G, Mašek O. The role of biochar particle size and hydrophobicity in improving soil hydraulic properties[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13138
- [10] Lehmann J, Cowie A, Masiello C A, Kammann C, Woolf D, Amonette J E, Cayuela M L, Camps-Arbestain M, Whitman T. Biochar in climate change mitigation[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(12): 883-892
- [11] Faloye O, Ajayi E, Rostek J, Babalola T, Fashina A, Horn R. Water hydraulics, retention and repellency; response to soil texture, biochar pyrolysis conditions and wetting/drying[J]. *International Agrophysics*, 2022, 36(3): 155-163
- [12] Li H L, Ai Z J, Yang L H, Zhang W J, Yang Z Q, Peng H Y, Leng L J. Machine learning assisted predicting and engineering specific surface area and total pore volume of biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 369: 128417
- [13] Akhil D, Lakshmi D, Kartik A, Vo D N, Arun J, Gopinath K P. Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(3): 2261-2297
- [14] Wang Q H, Chu D M, Luo C M, Lai Z Y, Shang S Y, Rahimi S, Mu J. Transformation mechanism from cork into honeycomb-like biochar with rich hierarchical pore structure during slow pyrolysis[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 181: 114827
- [15] 伏肖, 徐强, 黄晓玮, 李芷薇, 谭天骥, 易自力, 薛帅. 热裂解温度和原料类型对生物炭品质影响的评价: 基于修复重金属污染的应用潜力[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 147-157
- Fu X, Xu Q, Huang X W, Li Z W, Tan T S, Yi Z L, Xue S. Effects of different pyrolysis temperatures and feedstock types on biochar quality based on the application scenario for heavy metal contamination control[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 147-157 (in Chinese)
- [16] 徐整雪, 聂明华, 晏彩霞, 汪王宇, 邓思维, 丁明军. 基于PARAFAC及SOM的鄱阳湖湿地植物生物炭不同分子量DOM光谱特征分析[J]. 环境科学学报, 2024, 44(8): 393-404
- Xu A X, Nie M H, Yan C X, Wang W Y, Deng S W, Ding M J. Spectral characteristics of different molecular weights of biochar derived DOM from wetland plant in Poyang Lake using PARAFAC and SOM[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(8): 393-404 (in Chinese)
- [17] Zheng X D, Li X, Pal Singh B, Wei L, Huang L X, Huang Y F, Huang Q, Chen X B, Su Y R, Liu Z Z, Wang H L. Biochar protects hydrophilic dissolved organic matter against mineralization and enhances its microbial carbon use efficiency. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148793
- [18] 张沛祯, 罗娟, 姚宗路, 畅芳玲, 霍丽丽, 赵立欣. 改性秸秆生物炭与有机肥混施对黄土丘陵旱区土壤持水保肥的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 322-332, 342
- Zhang P Z, Luo J, Yao Z L, Chang F L, Huo L L, Zhao L X. The impact of mixed application of modified straw biochar and organic fertilizer on soil water retention and fertility maintenance in the loess hilly dry area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 322-332, 342 (in Chinese)
- [19] Fang Q L, Chen B L, Lin Y J, Guan Y T. Aromatic and hydrophobic surfaces of wood-derived biochar enhance perchlorate adsorption via hydrogen bonding to oxygen-containing organic groups[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(1): 279-288
- [20] 刘壮壮, 郭怡欣, 吕建, 贾明云, 滕孝名, 周瑞荣, 于金平. 3种生物炭的理化性质及其对水中铵态氮和磷的吸附作用[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 1-10
- Liu Z Z, Guo Y X, Lyu J, Jia M Y, Teng X M, Zhou R R, Yu J P. Analysis on physical and chemical properties of three biochars and their adsorption effects on ammonium nitrogen and phosphorus in water[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2025, 34(5): 1-10 (in Chinese)
- [21] Tunega D, Šolc R, Grančič P, Gerzabek M H, Goebel M O, Guggenberger G, Bachmann J, Woche S K. Wettability of siloxane surfaces assessed by molecular dynamics, contact angle determination, and X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 611: 155680
- [22] Wessel A T. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13(6): 555-561
- [23] Das O, Sarmah A K. The love-hate relationship of pyrolysis biochar and water: A perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 682-685
- [24] Wang T, Camps-Arbestain M, Hedley M. Predicting C aromaticity of biochars based on their elemental composition[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 62: 1-6
- [25] Han L, Qian L B, Yan J C, Chen M F. Effects of the biochar aromaticity and molecular structures of the chlorinated organic compounds on the adsorption characteristics[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6): 5554-5565
- [26] 郑小东, 李翔, 魏岚, 黄连喜, 陈伟盛, 黄玉芬, 黄庆, 刘忠珍. 不同方法提取的生物质炭可溶性有机物质研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(12): 61-68
- Zheng X D, Li X, Wei L, Huang L X, Chen W S, Huang Y F, Huang Q, Liu Z Z. Biochar-derived dissolved organic matter extracted by different methods: Property study[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(12): 61-68 (in Chinese)
- [27] Song Y, Zhao Y J, Hu X, Zhang L, Sun S Z, Li C Z. Destruction of tar during volatile-char interactions at low temperature[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 171: 215-222
- [28] Ngambia A, Mašek O, Erastova V. Development of biochar molecular models with controlled porosity[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 184: 107199
- [29] McKenna A M, Chacón-Patiño M L, Chen H, Blakney G T, Mentink-Vigier F, Young R B, Ippolito J A, Borch T. Expanding the analytical window for biochar speciation: Molecular comparison of solvent extraction and water-soluble fractions of biochar by FT-ICR mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(46): 15365-15372
- [30] Vijayaraghavan K. Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2019, 8(1): 47-64

- [31] Barr M R, Forster L, D'Agostino C, Volpe R. Alkaline pretreatment of walnut shells increases pore surface hydrophilicity of derived biochars[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 571: 151253
- [32] Yi S S, Witt B, Chiu P, Guo M X, Imhoff P. The origin and reversible nature of poultry litter biochar hydrophobicity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(3): 963-971
- [33] Mukome F N D, Zhang X M, Silva L C R, Six J, Parikh S J. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(9): 2196-2204
- [34] Wiersma W, van der Ploeg M J, Sauren I J M H, Stoof C R. No effect of pyrolysis temperature and feedstock type on hydraulic properties of biochar and amended sandy soil[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114209
- [35] 高亮,李志合,王芳,邓敏,陈雪,赵峰. 生物炭在土壤改良中的应用进展与风险分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(19): 19-31
Gao L, Li Z H, Wang F, Deng M, Chen X, Zhao F. Application progress and risk analysis of biochar in soil amelioration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(19): 19-31 (in Chinese)
- [36] 周丹丹,马芷萱,贺环,李芳芳,秦珊珊,豆思娴,陶欢,杨万鑫. 硅对生物炭稳定及其吸附/降解污染物的影响机制[J]. 环境化学, 2025, 44(9): 1-8
Zhou D D, Ma Z X, He H, Li F F, Qin S S, Dou S X, Tao H, Yang W X. Mechanisms of silicon effects on biochar stability and its adsorption/degradation of pollutants[J]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44(9): 1-8 (in Chinese)
- [37] Lin Y, Munroe P, Joseph S, Ziolkowski A, van Zwieten L, Kimber S, Rust J. Chemical and structural analysis of enhanced biochars: Thermally treated mixtures of biochar, chicken litter, clay and minerals[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(1): 35-40
- [38] 单保臻,谢海洋,李蕾,张昊,严姗姗,高雯然,张书. 酸洗处理对生物炭性质及其吸附生物油的影响[J]. 林业工程学报, 2023, 8(3): 99-104
Shan B Z, Xie H Y, Li Q, Zhang H, Yan S S, Gao W R, Zhang S. Effect of acid washing treatment on the properties of biochar and its adsorption performance on bio-oil[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2023, 8(3): 99-104 (in Chinese)
- [39] Yang C D, Lu S G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104798
- [40] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, Bezemer T M, van de Voorde T F J, Mommer L, van Groenigen J W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil[J]. *Geoderma*, 2015, 251-252: 47-54
- [41] 任艺,张益兴,侯赛赛,乜兰春,李青云,王鑫鑫. 生物炭的制备方法及其在设施蔬菜中的应用研究进展[J]. 园艺学报, 2025, 52(3): 792-812
Ren Y, Zhang Y X, Hou S S, Nie L C, Li Q Y, Wang X X. Research progress on the preparation method of biochar and its application effect on returning to field in facility vegetable fields[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2025, 52(3): 792-812 (in Chinese)
- [42] 骆晓声,寇长林,张济世,吕金岭,李太魁. 炭基肥对麦-玉米轮作农田土壤酶活性和真菌群落及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3965-3974
Luo X S, Kou C L, Zhang J S, Lv J L, Li T K. Effect of biochar-based fertilizer application on soil enzyme activity, fungal community, and crop yield in winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3965-3974 (in Chinese)
- [43] 袁楚齐,梁媛,韩爽,董泽兴,魏晋元. 等碳量添加秸秆、秸秆生物炭对土壤碳稳定及碳转化的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(8): 2096-2105
Yuan C Q, Liang Y, Han S, Dong Z X, Wei J Y. Effects of straw and straw-derived biochar with equal carbon incorporation on soil stability and conversion of carbon[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(8): 2096-2105 (in Chinese)
- [44] 郑健,撒青林,王燕. 中国施用生物炭对番茄产量和品质效应的Meta分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 63-73
Zheng J, Sa Q L, Wang Y. Meta-analysis of the effect of biochar application on the yield and quality of tomatoes in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(22): 63-73 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 郑小东,博士,广东省农业科学院农业资源与环境研究所助理研究员。主要从事土壤碳循环研究,长期开展各类秸秆及其生物炭等 ^{13}C 、 ^{15}N 标记材料制备。在硕士和博士研究生期间分别获得2012年硕士研究生国家奖学金荣誉证书、中国科学院大学2014—2015学年“三好学生”荣誉称号。主持国家自然科学基金项目1项,以第一或通讯作者在*Biology and Fertility of Soils*、*Carbon Research*、*Science of the Total Environment*、《农业环境科学学报》等期刊发表论文10余篇,获农业农村部科学技术司“优秀论文三等奖”荣誉证书1项,授权发明专利1项。



通讯作者简介: 刘忠珍,广东省农业科学院农业资源与环境研究所研究员。主要从事土壤固碳与污染物治理研究。主持国家自然科学基金项目2项,发表论文70多篇。