

陈斐杰,夏会娟,刘福德,等.生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J].环境工程技术学报,2022,12(1):161-172.

CHEN F J,XIA H J,LIU F D,et al.Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(1):161-172.

生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制

陈斐杰^{1,2},夏会娟¹,刘福德²,孔维静^{1*},卢少勇¹

1.中国环境科学研究院

2.天津理工大学环境科学与安全工程学院

摘要 生物质炭(biochar)是一种碳含量高、比表面积大、孔隙度高且吸附能力强的土壤改良与修复材料,可通过物理、化学和生物方式作用于土壤,但其影响和作用机制随土壤性质和生物质炭类型不同而异。从生物质炭组成、比表面积和孔隙度、酸碱度及表面官能团等特性与原料和制备工艺关系入手,结合土壤和生物质炭类型,综合阐述了生物质炭添加在改善土壤结构、提高土壤肥力、调节土壤酸碱度、修复污染土壤、增强生物活性和促进养分转化等方面的作用。发现生物质炭通过填充扩容、孔隙截留、胶结凝聚、物理吸附、化学吸附、离子交换、配位络合、共沉淀、微生物介导等方式作用于土壤,实现土壤改良和修复。从物理、化学和生物3方面分类阐述了生物质炭对土壤的影响和作用机制,同时提出未来可重点关注生物质炭改性与制备工艺、不同生物质炭混施比例及施用后的环境风险评估等方面。

关键词 生物质炭;土壤性质;影响机制;修复

中图分类号:X53 文章编号:1674-991X(2022)01-0161-12 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210067

Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties

CHEN Feijie^{1,2}, XIA Huijuan¹, LIU Fude², KONG Weijing^{1*}, LU Shaoyong¹

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology

Abstract Biochar is a kind of soil improvement and remediation material with high carbon content, specific surface area, porosity and adsorption properties. It can influence the soil through physical, chemical and biological ways, but the influence and mechanism vary with soil properties and biochar types. The composition, specific surface area and porosity, pH and surface functional groups of biochar and the raw materials and charring technology of the biochar were summarized. Effects of biochar addition on soil structure improvement, soil fertility improvement, soil pH regulation, contaminated soil repairment, biological activity enhancement and nutrient transformation promotion were comprehensively generalized. It was found that the soil was remediated or improved by biochar mainly through filling and expansion, pore interception, cementation and coagulation, physical adsorption, chemical adsorption, ion exchange, coordination and complexation, coprecipitation, microbial mediation and so on. The effects and mechanism of biochar on soil were clarified from physical, chemical and biological aspects, respectively. The modification and charring technology of biochar, the proportion of mixed application of biochar and the environmental risk assessment after biochar application in the future should be the key research contents.

Key words biochar; soil properties; influence mechanism; remediation

生物质炭(biochar)是由农林废物、畜禽粪便和部分城市垃圾等生物质原料在限氧或无氧条件下经高温裂解生成的富碳固体物质^[1-3],具有碳含量高、比表面积大、孔隙度高、吸附能力强等特点^[4-6],可为

退化土壤的修复和改良提供条件。因此,生物质炭被广泛用作土壤调理剂,其在酸化、盐碱化和污染土壤等退化土壤改良与修复中的应用受到关注^[7-10]。近年来,围绕生物质炭制备工艺、改性工艺、联合施

收稿日期:2021-03-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505905)

作者简介:陈斐杰(1996—),男,硕士研究生,主要从事湿地生态恢复研究,710824334@qq.com

* 责任作者:孔维静(1978—),男,研究员,博士,主要从事恢复生态学和植物资源化利用研究,kongwj@craes.org.cn

用及生物质炭作用机理等方面的研究受到重视,生物质炭在废物处理、材料制备、环境和农业等领域得以广泛应用^[5,11]。生物质炭对退化土壤的应用效果因土壤和生物质炭类型而异,全面了解生物质炭对土壤性质的影响机制,对因地制宜实现土壤高效修复意义重大。但关于生物质炭对土壤性质影响的综述多不区分土壤和生物质炭类型,忽略了其影响效果和机制多变性。因此,笔者总结了生物质炭的特性及其对土壤性质的影响,结合土壤和生物质炭类型,从物理、化学和微生物 3 方面分类阐述生物质炭对土壤性质的影响机制,提出了其应用于土壤改良时存在的问题,并对未来的研究进行了展望。

1 生物质炭的特性

生物质炭多以植物纤维废物(如竹、稻秆、玉米秸秆、花生壳等)为原料制备,其主要组分为灰分、固定碳和挥发分,主要组成元素包括碳、氢、氧、氮等,碳含量为 23.6%~88.0%,灰分中含磷、钾、钙、硫、镁等营养元素^[12]。

生物质炭的理化性质因原料类型和热解条件的

不同而存在差异,且具有一定的变化规律^[13]。与动物源生物质炭相比,植物源生物质炭具有较低的灰分含量、较高的碳含量、较大的比表面积和孔隙度以及较强的碱性^[13]。热解条件,尤其是热解温度,对生物质炭的性质具有显著的影响。一般而言,随热解温度升高,生物质炭的灰分和固定碳含量增加,挥发分含量降低,比表面积和孔隙度增加,碱性增强,总基团和酸性基团含量降低^[14-18]。

1.1 灰分、挥发分、固定碳含量

生物质炭的灰分、挥发分和固定碳含量主要受原料类型和热解条件影响^[2,19]。Enders 等^[20]对木本植物、草本植物、畜禽粪便、污泥和厨余垃圾等 94 种原料制成的生物质炭基本性质的研究显示,生物质炭的灰分含量为 0.4%~88.2%,挥发分含量为 13.2%~70.0%,固定碳含量为 0~77.4%。原料类型是灰分含量的决定因素,表现为畜禽粪便>草本植物>木本植物^[4],而生物质炭的碳含量为木本植物>草本植物>畜禽粪便^[21]。与热解时间相比,热解温度对生物质炭性质的影响更为显著。随热解温度升高,生物质炭灰分和固定碳含量渐增,而挥发分含量降低(图 1)。

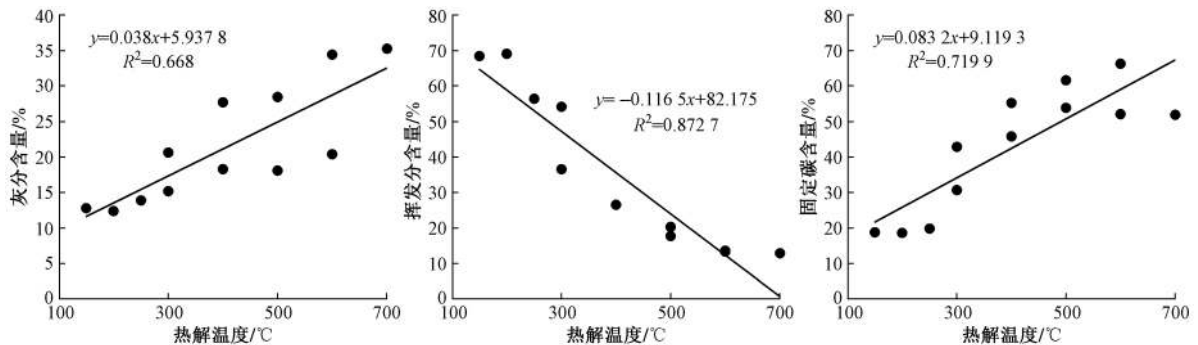


图 1 水稻秸秆生物质炭灰分、挥发分和固定碳含量随热解温度的变化^[22-23]

Fig.1 Changes in ash, volatile and fixed carbon contents of rice strawbiochar with pyrolysis temperature

1.2 比表面积和孔隙度

生物质材料尤其植物纤维材料本身具备了一定的孔隙结构,这些结构随纤维素、半纤维素、木质素等有机成分在热解中扩大,并伴随更多微孔形成,使生物质炭形成了低密度多孔结构(图 2)^[19,24]。生物质炭比表面积大小差异主要归因于其孔隙度,一般按孔径大小将孔隙分为小(微)孔(<2 nm)、中(介)孔(2~5 nm)和大孔(>5 nm)^[19,25]。生物质炭施于土壤中时,大孔结构主要影响土壤的通气性和保水能力,以及微生物生境形成,而小孔结构主要影响土壤中矿质养分及污染物的吸附和转移,且比表面积常与小孔含量正相关。不同原料、不同热解条件下制备的生物质炭比表面积差异较大,变化范围为 0.1~

520 m²/g,且壳类>粪污>秸秆>木质>污泥生物质

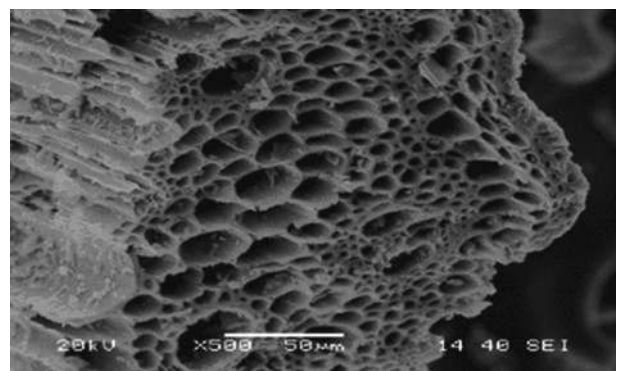


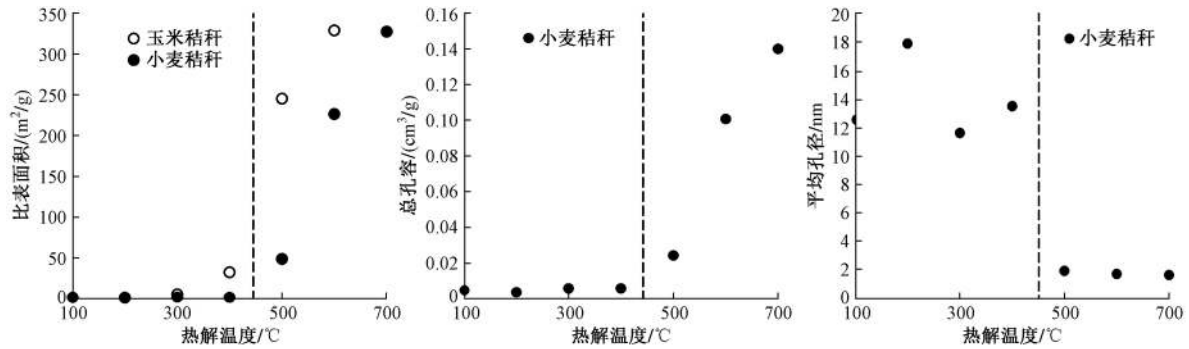
图 2 500 °C 芦苇生物质炭扫描电镜^[19,24]

Fig.2 Scanning electron microscope images of *Phragmites australis* biochar at 500 °C

炭^[2]。

影响生物质炭比表面积和孔隙度的因素除原料类型外, 还包括热解温度和时间, 尤其是热解温度^[22,26-27]。通常, 生物质炭的比表面积和孔隙度随热解温度升高而渐增^[14], 但当热解温度过高时, 孔隙结构会被破坏而引起比表面积和孔隙度下降^[28]。在热

解温度低于 500 °C (100~400 °C) 时, 生物质炭的比表面积和总孔容较低, 平均孔径较大^[29]; 而当热解温度升至 500~700 °C, 生物质炭比表面积和总孔容随温度升高呈直线增加趋势, 平均孔径剧降(图 3)。因此, 400~500 °C 可能是生物质炭热解过程的临界温度范围, 具体阈值因材料而异。



注: 虚线位置为生物质炭热解过程的临界温度。

图 3 生物质炭比表面积和孔隙度随热解温度的变化^[29-30]

Fig.3 Changes in specific surface area and porosity of biochar with pyrolysis temperature

1.3 酸碱度

不同原料和热解条件下制备的生物质炭的酸碱度有别。常见生物质炭 pH 为 5~12, 大多数生物质炭呈碱性, 这由其所含碳酸盐和碱基阳离子决定^[31]。碱性生物质炭可降低酸化土壤中的交换性氢离子或铝离子含量, 改良酸化土壤。通常生物质炭的碱性会随热解温度升高而增强(表 1), 这是由于热

解过程中碳酸盐和结晶碳酸盐的不断积累所致^[32-33]。在相同制备条件下, 不同类型原料制备的生物质炭 pH 呈秸秆>污泥>粪便>木质生物质炭的变化规律^[2,19]。

1.4 表面官能团

生物质炭表面具有丰富的含氧官能团, 羧基、羰基、酚羟基等极性官能团使其吸附性能良好^[22,34]。生物质炭官能团的种类和数量是决定其理化性质的重要因素^[1,28]。同一热解条件下, 不同类型原料制备的生物质炭官能团含量差异较小(表 2); 随热解温度升高, 生物质炭的总基团和酸性基团含量渐减, 而碱性基团含量增加, 但变幅均较小(图 4)。生物质原料在 500 °C 热解 3 h 制备的生物质炭官能团含量明显高于其他热解条件(表 2), 可见热解时间比温度对生物质炭官能团的影响更大。

表 1 不同生物质炭 pH

Table 1 pH values of different biochar

| 原料 | 热解温度/°C | 热解时间/h | pH | 数据来源 |
|------|---------|--------|-------|--------|
| 玉米秸秆 | 350 | 0.5 | 9.96 | 文献[33] |
| | 550 | 0.5 | 10.13 | |
| | 750 | 0.5 | 10.23 | |
| 小麦秸秆 | 100 | 2 | 6.41 | 文献[29] |
| | 200 | 2 | 7.12 | |
| | 300 | 2 | 8.98 | |
| | 400 | 2 | 8.31 | |
| | 500 | 2 | 8.54 | |
| | 600 | 2 | 8.78 | |
| | 700 | 2 | 9.12 | |
| 水稻秸秆 | 300 | 3 | 8.45 | 文献[22] |
| | 400 | 3 | 9.59 | |
| | 500 | 3 | 10.30 | |
| | 600 | 3 | 10.43 | |
| | 700 | 3 | 10.68 | |

2 生物质炭添加对土壤性质的影响

不同类型生物质炭对土壤的影响各异, 总体上, 生物质炭对土壤的影响主要包括改善土壤结构、提高土壤肥力、调节土壤酸碱度、修复污染土壤、增强生物活性和调节养分转化等^[36], 可概括为对土壤物理结构、化学性质、微生物和污染物 4 方面的影响。

2.1 对土壤物理结构的影响

基于其疏松多孔结构, 生物质炭主要通过改变土壤孔隙结构、水分特征和团聚体结构影响土壤物理结构, 进而影响土壤的水、气、热条件和结构稳定性。

表 2 不同类型生物质炭的官能团含量

Table 2 Functional group amounts of different types of biochar

| 原料 | 热解温度/°C | 热解时间/h | 含量/(mmol/g) | | | 数据来源 |
|------|---------|--------|-------------|------|-------|--------|
| | | | 酸性基团 | 碱性基团 | 总基团 | |
| 稻壳 | | | 18.27 | 8.07 | 26.34 | |
| 果壳 | | | 19.02 | 8.64 | 27.66 | |
| 花生壳 | 500 | 3 | 19.56 | 8.53 | 28.09 | 文献[1] |
| 玉米秸秆 | | | 19.07 | 9.04 | 28.11 | |
| 竹 | | | 16.04 | 9.27 | 25.31 | |
| 小麦秸秆 | | | 0.15 | 0.60 | 0.75 | |
| 玉米秸秆 | | | 0.19 | 0.89 | 1.08 | |
| 稻秸秆 | | | 0.28 | 1.49 | 1.77 | |
| 玉米芯 | | | 0.24 | 0.34 | 0.58 | |
| 稻壳 | 450 | 1 | 0.21 | 0.45 | 0.66 | 文献[35] |
| 木屑 | | | 0.19 | 1.83 | 2.02 | |
| 药渣 | | | 0.48 | 3.19 | 3.67 | |
| 污泥 | | | 0.24 | 2.32 | 2.56 | |
| 酒糟 | | | 0.20 | 1.22 | 1.42 | |

生物质炭的疏松多孔结构可有效降低土壤容重,提高土壤孔隙度,从而增加土壤对小分子物质的吸附和保持^[5,37-38]。另外,生物质炭的多孔结构通过存储氧气和水分提高土壤通气性和持水性,使其与外部环境构成良好的物质交换与流通^[6,39]。增加生物质炭的施用量对增加土壤含水量、田间持水量和毛管孔隙度具有显著促进作用^[21,40]。

此外,生物质炭施加与土壤各级团聚体分布有显著相关关系,且在一定范围内,团聚体稳定性随生物质炭添加量的增加而增强^[41]。良好土壤团聚体结构能为土壤提供稳定的水土交换条件,为微生物提供有利生存环境,减少有机碳损失,提高水土保持能力,增强土壤生产能力^[42]。

2.2 对土壤化学性质的影响

生物质炭添加对土壤化学性质的影响方式主要包括:1)通过养分直接输入或固持保肥改变土壤养分状况;2)通过土壤和生物质炭的酸碱差及生物质炭的高阳离子交换量,改善土壤酸碱状态及缓冲保

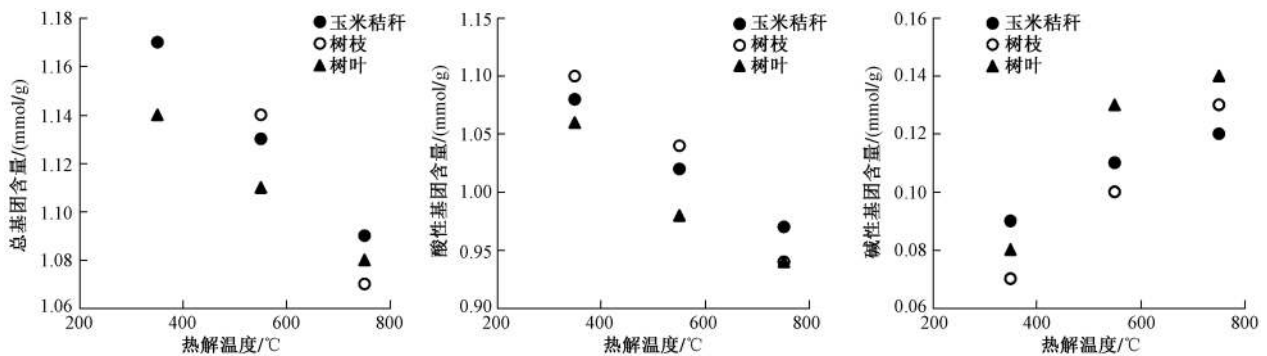
图 4 生物质炭官能团含量随热解温度的变化^[33]

Fig.4 Changes in functional group contents of biochar with pyrolysis temperature

肥能力^[43-44]。

生物质炭多呈碱性,添加后会显著升高酸性土壤的 pH^[32,45],但其对碱性土壤 pH 的升高效应并不明显^[46],甚至造成 pH 下降^[47]。生物质炭对土壤 pH 的影响与土壤和生物质炭自身酸碱性及生物质炭添加量有关,当生物质炭与受体土壤的酸碱度相差越大,添加量越大,对土壤 pH 的改变越明显^[38,48-49]。

生物质炭常具较高阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC),施加后可提高土壤 CEC,增强土壤缓冲和保肥能力,增幅受生物质炭和土壤的本底 CEC 影响。生物质炭施加显著提高酸性土壤的 CEC,但对碱性土壤 CEC 的提高作用不明显^[50]。

生物质炭中的高碳组分会为土壤输入大量有机碳,以及一定量的钾、钙、钠、镁、硅等营养元素,对

营养缺乏的贫瘠土壤的改良效果十分显著^[51]。高度芳香化及疏水性的脂肪族、氧化态碳等有机碳成分使生物质炭具有较强稳定性^[11],能在土壤中存留较长时间,在外部结构氧化后,内部结构仍可在土壤中稳定长达几百年^[52]。相较于有机质中的碳,生物质炭中的碳不易被氧化,施加后可增加土壤中稳定性碳含量,减少碳向大气的释放,因此生物质炭具促进土壤碳截获、增加碳汇和缓解温室效应的作用^[8,53-54]。

生物质炭具有高度稳定性并对土壤中的营养元素有较强吸附性能,能固持养分,减少淋溶和挥发,提高利用效率,发挥“缓释肥”的功效。生物质炭能有效增加土壤对氮的吸收和保持能力,调节硝化和反硝化过程,减少土壤中氮流失,增加有效氮含量^[55-56]。碱性生物质炭通过吸附磷改善磷流失严重的土

壤^[51]。尹俊慧等^[57]通过生物质炭混施的土柱模拟试验发现, pH 的提高能有效抑制土壤中磷的淋失, 且可通过不同类型生物质炭混施提高抑制率。

2.3 对土壤微生物及酶活性的影响

生物质炭为土壤微生物生长提供丰富的碳源、适宜环境和更多生存空间, 对微生物物种组成、群落结构及群落功能等产生影响。土壤微生物参与或承担了土壤中氧化、硝化、氨化、固氮、硫化等生化反应过程, 尤其是土壤养分的吸收、转化和循环^[58]。生物质炭的施加直接或间接影响土壤微生物活动: 1) 生物质炭可为土壤微生物生长繁殖提供适宜的水、气、热等环境条件, 增强微生物附着, 降低淋洗, 且可提高部分微生物活性, 增强有益微生物生长和代谢能力, 间接增强土壤肥力^[59]。土壤微生物数量和种类的增加改善了土壤中菌落的组成和多样性, 进一步改善土壤微生态^[60]。2) 生物质炭中的高碳成分及钾、钙、钠、磷等成分为微生物提供额外碳源和其他必要元素, 促进土壤中各类参与养分循环的功能微生物生长繁殖^[59,61], 有助于改善土壤养分状态。

施加生物质炭可影响土壤中微生物组成及其酶活性, 减少土壤中养分流失, 促进氮、磷等向有效态转化, 利于植物吸收^[62-63]。Irfan 等^[64]研究表明, 以甘蔗渣为原料的生物质炭除了增加土壤中的微生物碳、氮含量外, 脲酶和脱氢酶活性也显著提高, 促进了土壤中尿素分解成氨和脱氢反应进行。尚艺婕等^[65]使用秸秆生物质炭以 0、2.5%、5% 的 3 种不同质量比添加到镉污染土壤中, 发现生物质炭的添加显著增强了土壤中碳循环酶、脲酶、磷酸酶、氧化还原酶的活性; 在外加镉时, 生物质炭添加量为 2.5% 比添加量为 0 和 5% 时的土壤综合酶指数分别高出 16.26% 及 28.57%; 但是各类酶的敏感度存在差异, 在镉污染土壤中对生物质炭的施加最敏感的是荧光素二乙酸酯水解酶(FDA 水解酶)及蛋白酶, 而对生物质炭添加量反应最显著的为磷酸酶。

2.4 对土壤中污染物的影响

除了改善土壤的酸碱平衡和水肥状态外, 生物质炭还可用于受农药、多环芳烃 (PAHs) 等有机污染物及氮、磷、重金属等无机污染物污染土壤的修复^[9,13,66]。生物质炭对土壤中污染物的影响方式主要包括吸附和转化 2 种途径, 通过降解或转化形式降低污染物有效态含量或抑制污染物转移和扩散^[13,67-68]。生物质炭疏松的多孔结构和大量含氧、含氮、含硫官能团使土壤 CEC 大大增强, 利于吸附土壤中多种污染物并固定在生物质炭内部, 减少污染物淋洗, 抑制污染物在土壤中的转移, 降低污染物的化学活性

和生理毒性^[69-70]。同时, 生物质炭能促进土壤中重金属离子生成可沉淀的盐, 降低土壤中有效态重金属含量, 抑制重金属从土壤进入植物体, 进而在环境中扩散、转移和富集^[9], 降低污染物对环境的危害。

3 生物质炭对土壤性质的影响机制

生物质炭加入土壤后, 通过物理(图 5)、化学(图 6)和生物机制(图 7)影响土壤结构和功能。

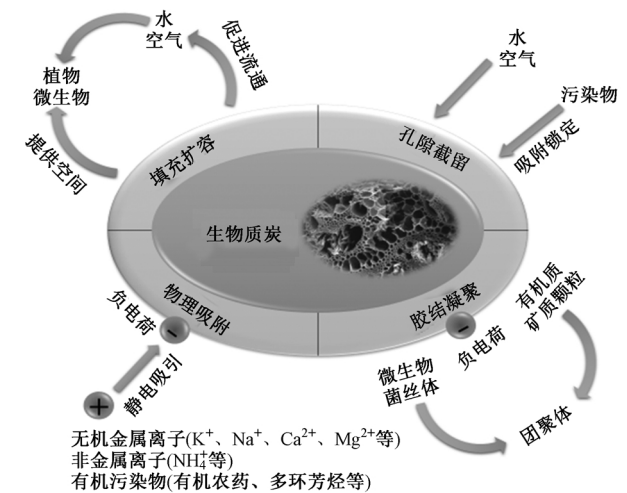


图 5 生物质炭对土壤性质的物理作用机制

Fig.5 Physical effect mechanism of biochar on soil properties

3.1 物理机制

3.1.1 填充扩容

土壤孔隙度低是物理结构不良的土壤的通病之一, 常会导致土壤通气性、排水性能及养分释放和移动能力变弱。生物质炭疏松多孔结构使其容重明显低于土壤, 且能在孔隙中留存大量空气和水分, 因此生物质炭能显著增加土壤水气容量^[25]。多孔结构生物质炭使土壤容积增加, 土质疏松, 水气供给和生长空间充足, 更利于植物尤其根系的生长发育和稳固。此外, 土壤孔隙度增加利于降水时土壤盐分的淋溶, 降低含盐量, 改良盐碱土^[7]。

3.1.2 物理吸附

生物质炭比表面积较大, 且表面分布有大量负电荷, 通过静电作用吸引土壤中含正电荷的无机金属离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等), 非金属离子 (NH_4^+ 等), 有机污染物 (有机农药、PAHs 等)。生物质炭与呈正电性的有机物之间的静电吸附作用力会随生物质炭氧化程度的增加而增强。由于有机污染物莠去津在酸性环境中发生质子化作用, 导致生物质炭对莠去津的吸附作用增强^[71]。

3.1.3 孔隙截留

生物质原料尤其是植物原料中含较多的氢、氧

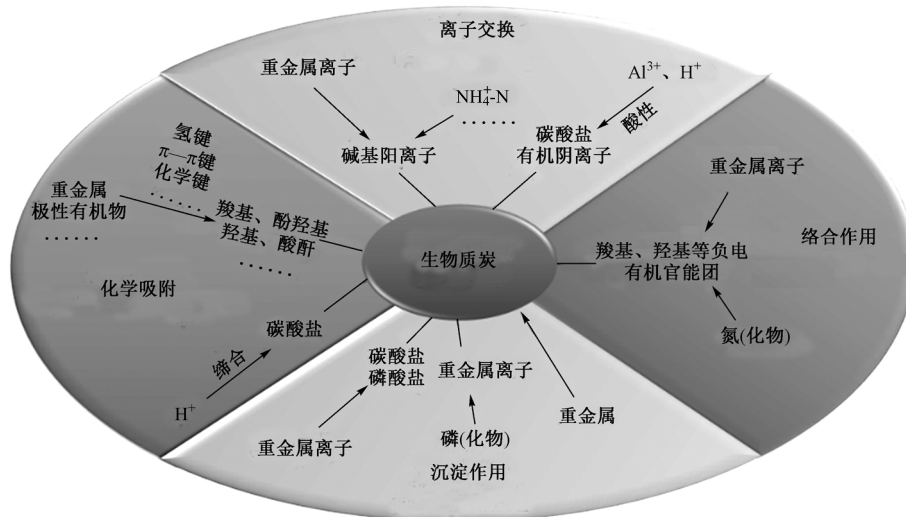


图 6 生物质炭对土壤性质的化学作用机制^[66]

Fig.6 Chemical effect mechanism of biochar on soil properties

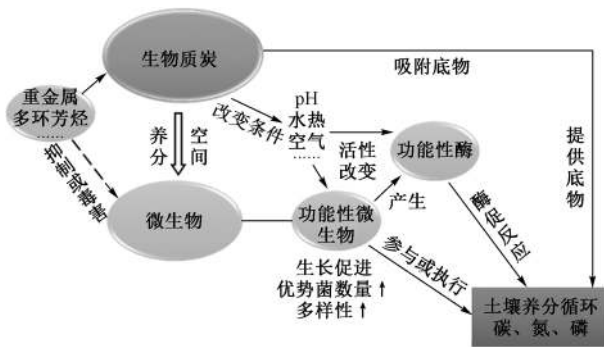


图 7 生物质炭对土壤性质的生物作用机制

Fig.7 Biological effect mechanism of biochar on soil properties

元素,在原料热解炭化中,氢、氧元素脱去使残留碳元素炭化,形成孔结构^[26-27]。另外,生物质材料原有结构消失和脱水裂解反应导致水分和挥发分逸出,形成多孔碳架结构^[14]。除了空气和水分,生物质炭不同孔径孔隙结构还可拦截和固持土壤中的污染物,降低土壤污染风险。当小于孔径的成分扩散或在其他外力作用下进入微孔内部,就会被锁定在生物质炭内^[13,33],结合离子交换等其他作用机制产生不可逆的吸附固定,有机污染物被长期稳定于土壤中,大大降低其生物有效性。

3.1.4 胶结凝聚

土壤颗粒主要通过有机质和矿物质的凝聚胶结作用形成土壤团聚体,而生物质炭具有吸附养分和腐殖质的功能,能为团聚体形成提供必要的有机胶结物质^[72],且吸附聚集矿质颗粒也利于形成维持生物质炭稳定性的团聚体。

凝聚作用是土粒通过反荷离子等作用而紧固的过程。带负电荷的土壤胶粒相互排斥呈溶胶状态,

但在异性电子 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等阳离子作用下,胶粒相互靠近凝聚而形成复粒,是形成团聚体的基础^[73]。生物质炭表面附着的大量负电荷及孔隙中附着的微生物、菌丝体等对土粒的缠绕都为团聚体成型提供了团聚作用力。

3.2 化学机制

3.2.1 化学吸附

生物质炭表面含丰富的羧基、酚羟基、羰基等官能团,官能团间形成的氢键、 $\pi-\pi$ 键、离子偶极键等化学键或强烈的分子间相互作用力,使生物质炭具有较强化学吸附性能。如碱性条件下磺胺甲噁啉 (sulfamerazine, SMT) 会发生去质子化,而后通过与生物质炭表面的羧酸盐官能团形成氢键发生化学吸附^[74]。当生物质炭经酸化处理后,羟基、羧基等酸性的含氧官能团与极性有机物之间的离子键作用力随之增强。Zhu 等^[34] 对木质生物质炭加氢和再氧化技术处理的试验证明,高度芳香性的生物质炭与萘、菲、芘等苯环有机物之间通过 $\pi-\pi$ 电子供受体 ($\pi-\pi$ EDA) 作用力实现化学吸附。此外,生物质炭中丰富的碳酸盐和有机官能团,在酸性土壤中,会与 H^+ 发生缩合反应^[32],降低土壤中 H^+ 浓度,减轻土壤酸化^[75]。

3.2.2 离子交换

生物质炭中碱性物质的主要成分是碳酸盐和有机阴离子。酸性土壤中的活性酸 H^+ 、 Al^{3+} 和 CO_2 等易与这些碱性物质反应生成碳酸氢盐,而后与酸进一步反应生成 CO_2 ,在反应中产生的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基阳离子与土壤中的 H^+ 和交换性 Al^{3+} 发生交换,降低其含量,从而提高土壤 pH^[10]。另外,生物

质炭具有较高 CEC, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱基阳离子为土壤中带正电荷的重金属离子和铵离子提供交换位点, 土壤对金属阳离子的交换作用与生物质炭的阳离子交换量呈正相关^[68]。

3.2.3 配位络合

生物质炭的羧基、羟基等负电荷有机官能团会与重金属离子发生配位络合反应, 生成金属络合物^[68]。殷西婷^[67]通过分析松木生物质炭吸附土壤中砷污染物后官能团吸收峰的变化, 发现对 As(V) 吸附起主要作用的是生物质炭表面的羟基和改性生物质炭负载的铁氧化物介导的配位反应。Chen 等^[3] 研究发现, 荷花生物质炭表面的酸性官能团与镉离子生成络合物, 进而去除水中的镉。Dong 等^[76] 的研究也发现, 稻秆生物质炭对 Ni(II) 吸附作用机制主要是表面离子交换和内部络合作用。

3.2.4 共沉淀

生物质炭的矿物组分会与土壤中的重金属发生共沉淀作用。如磷在一定条件下会与生物质炭中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 发生共沉淀, 生成难溶的化合物, 如 $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)(\text{OH})_3$ 等^[66,77-78]。生物质炭对 Pb^{2+} 的吸附过程中, 其矿物盐成分在酸性环境中会溶解, 并释放出 Cl^- 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-} 等阴离子, 与土壤中的 Pb^{2+} 发生共沉淀^[79]。此外, Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 等重金属离子也易与生物质炭发生共沉淀, 从土壤的液相中转移至生物质炭固相中^[77]。

3.3 生物机制

3.3.1 微生物酶介导

土壤中物质和能量的吸收、转化和利用主要通过微生物介导的系列生物化学反应完成。土壤酶是由动植物活体和微生物分泌或残体分解而来, 参与土壤中各种生化反应, 如土壤腐殖质组分的合成与分解, 有机物、动植物和微生物残体的水解与转化以及土壤中氧化还原反应^[80]。土壤酶活性反映了土壤中生化反应的活跃程度及土壤质量和养分循环状态^[81]。

生物质炭可显著影响土壤中参与碳、氮、磷等养分循环的多种酶和微生物活性。张功臣等^[82] 研究表明, 生物质炭添加显著提高了土壤中的脲酶和过氧化氢酶活性, 前者的酶促反应影响了土壤有机态氮向有效态氮转化, 后者影响过氧化氢分解, 降低生物毒性, 促进微生物代谢活动, 进而增加了土壤中速效养分含量, 提高土壤肥力。贺超卉等^[83] 研究发现, 在褐土中施加生物质炭可增强还原氧化亚氮的细菌活性, 促进完全反硝化。郑慧芬等^[62] 研究发现, 施用

生物质炭增加了土壤 pH, 提高了碱性磷酸酶和溶磷细菌活性, 抑制了酸性磷酸酶活性, 进而促进土壤中磷素的转换和利用, 使土壤中有机碳、总氮、总磷、有效磷等含量显著提高。一方面, 因生物质炭具备水保热功能^[36,84], 能为生化反应提供更有利的水热条件; 孔隙中的空气为好氧反应提供了充足的氧气, 一定程度上抑制了厌氧反应的进行。另一方面, 生物质炭对反应底物的吸附便于酶结合, 利于酶促反应进行, 提高了酶活性^[65]。

此外, 生物质炭通过改变土壤 pH 影响酶和微生物的活性, 如王涵等^[31] 在黄土土壤中按 0、1%、3% 和 5% 的比例施加 300 和 600 °C 下制得的油菜秸秆生物质炭, 发现生物炭脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脱氢酶、多酚氧化酶和蛋白酶的活性受土壤 pH 影响较明显, 呈酸化抑制、碱化激活规律。然而, 如果生物质原料含过量重金属, 重金属会富集在热解制备的生物质炭中, 引起土壤 PAHs 含量增加^[85]。当施加的生物质炭中引入过多的重金属或 PAHs 等物质时, 反而会对土壤中的酶和微生物产生一定毒害, 抑制养分循环^[61]。

3.3.2 微生物群落结构作用

碳含量高、孔隙丰富的生物质炭为微生物生长发育和繁殖提供了充足空间, 减少了生存竞争压力, 增加了微生物多样性。大量研究表明, 添加生物质炭会影响土壤中微生物数量、种类和群落结构, 驱动养分(如碳、氮、磷等)循环, 更利于作物对土壤养分的吸收利用^[12,58]。

添加的生物质炭通过改变土壤氨氧化类细菌群落结构影响氮循环。如在酸性土壤中, 施加碱性水稻秸秆生物质炭后, 土壤中氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)丰度显著增加, 氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)生长受抑制^[63]。氨氧化类细菌是硝化反应中氨氧化环节(NH_3 到 NO_2^-)的重要执行者, 氨氧化作用是硝化反应的限速环节, 其进程决定了硝化程度乃至整个氮循环^[86]。生物质炭对氨氧化细菌和氨氧化古菌的影响, 促进了硝化反应中将铵氧化为亚硝酸盐的环节(亚硝化作用), 直接或间接促进了土壤中氮循环。Xu 等^[87] 研究表明, 生物质炭添加影响土壤中支撑碳和氮循环的微生物的相对丰度, 可调节土壤氮循环, 减少了 N_2O 排放。

同样, 添加的生物质炭通过改变土壤微生物群落的结构影响碳、磷循环。Anderson 等^[88] 研究表明, 生物质炭可促进溶磷细菌生长, 利于土壤中难溶性磷向可溶性磷转化, 增加土壤中可利用磷含量; 通

过增加能作用于难降解碳化合物的细菌种群数量调节土壤碳通量,如热单孢菌科、鞘氨醇单孢菌科、酸热菌科、地衣菌科、链孢素囊科和纤维单孢菌科的微生物的增加能促进多种碳化合物分解为土壤微生物的碳源;生物质炭对孢子囊内科和杆菌科微生物生长的促进影响无机磷的生物利用度。因此,改变土壤中不同功能微生物的数量和群落结构是生物质炭影响土壤碳、氮、磷循环的重要作用机制之一。

4 存在问题与展望

生物质炭作为极具潜力的土壤改良物质,具有功能性强、原料廉价易得、污染风险相对低、持续时间长等优点,目前主要通过改善土壤结构、提高土壤肥力、增强土壤生物活性等途径实现土壤改良和修复^[89-90]。如今关于生物质炭的研究已取得了一定成果,但将生物质炭广泛用于土壤改良和修复尚存在较多未解决的问题。

(1)目前对生物质炭的试验多基于室内模拟,大规模尤其是长时间田间试验开展较少,数据欠缺。生物质炭制备工艺和原料来源会影响其性质,但其具体影响机制不明,欠缺通过精准控制制备条件来获取特定性质的生物质炭的工艺。

(2)单一生物质炭难以有效针对特定土壤问题快速起效,需配合其他措施如有机肥料共施等。不同类型、比例、用量的生物质炭组合配施及生物质炭改性使用尚未形成完整的系统理论,缺乏生物质炭应用的相关参考标准。很多试验中生物质炭对土壤的作用效果有别,甚至相反。此外,因高温热解制备工艺导致生物质炭的表面和孔隙中附着一定的PAHs^[91]、二噁英或呋喃等有害物质。但因目前提取和检测尚无统一的标准化方法,且制备工艺条件和原料来源对生物质炭成分影响较大,很难准确评估生物质炭潜在的环境风险程度,这是阻碍生物质炭推广应用的关键问题。

(3)尚需进一步探究生物质炭对土壤微生物活性的影响机理及其对土壤理化性质的回馈联用,从而为生物质炭应用于土壤改良提供科学依据。

(4)相较于常用土壤改良材料,如石灰石、粉煤灰、畜禽粪便和秸秆等,生物质炭的生产需要相对复杂的工艺,因而其价格略高;生物质炭作为一种惰性碳源,应用于土壤改良时,效能的发挥需要相对较长的时间。但生物质炭热裂解过程中产生的油、气以及液体产物可作为能源或资源被广泛利用,如发电、取暖以及用作植物生长调节剂等,这也弥补了生物质炭产品价格高的不足。同时,与常用土壤改良材

料相比,生物质炭的效果具有长效性,且能发挥降碳的作用。

因此,未来应广泛开展大规模生物质炭长期田间应用试验,进一步阐述生物质炭对土壤改良的作用机制,推进生物质炭开发应用深度与广度,促进生物质炭在土壤改良和污染修复领域的应用。

参考文献

- [1] 富丽,徐先英,付贵全,等.五种生物质炭的特性分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(9):202-208.
FU L, XU X Y, FU G Q, et al. Characteristic analysis of five biochars[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 202-208.
- [2] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1402-1417.
YUAN S, ZHAO L X, MENG H B, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [3] CHEN Z, LIU T, TANG J J, et al. Characteristics and mechanisms of cadmium adsorption from aqueous solution using lotus seedpod-derived biochar at two pyrolytic temperatures[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(12): 11854-11866.
- [4] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 516.
- [5] 戴静,刘阳生.生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J].土壤通报,2013,44(6):1520-1525.
DAI J, LIU Y S. Review of research on the properties of biochar and its applications in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1520-1525.
- [6] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [7] LASHARI M S, LIU Y M, LI L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyrolygneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [8] SCHEER C, GRACE P R, ROWLINGS D W, et al. Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia[J]. Plant and Soil, 2011, 345(1/2): 47-58.
- [9] 郭彦蓉,曾辉,刘阳生,等.生物炭修复有机物污染土壤的研究进展[J].土壤,2015,47(1):8-13.
GUO Y R, ZENG H, LIU Y S, et al. The application of biochar in organic polluted soil[J]. Soils, 2015, 47(1): 8-13.
- [10] DAI Z M, ZHANG X J, TANG C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification: a critical review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 581/582: 601-611.

- [11] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
LIU Y X, LIU W, WU W X, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982.
- [12] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [13] 李晓娜, 宋洋, 贾明云, 等. 生物质炭对有机污染物的吸附及机理研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1313-1325.
LI X N, SONG Y, JIA M Y, et al. A review of researches on biochar adsorbing organic contaminants and its mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1313-1325.
- [14] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 208-217.
LUO Y, ZHAO L X, MENG H B, et al. Physico-chemical characterization of biochars pyrolyzed from *Miscanthus* under two different temperatures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 208-217.
- [15] MÉNDEZ A, TERRADILLOS M, GASCÓG. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 102: 124-130.
- [16] YUAN H R, LU T, WANG Y Z, et al. Influence of pyrolysis temperature and holding time on properties of biochar derived from medicinal herb (*Radix isatidis*) residue and its effect on soil CO₂ emission[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 110: 277-284.
- [17] ZHANG J, LIU J, LIU R L. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 176: 288-291.
- [18] 杨兴, 黄化刚, 王玲, 等. 烟秆生物质炭热解温度优化及理化性质分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(2): 245-255.
YANG X, HUANG H G, WANG L, et al. Pyrolysis temperature optimization of biochar from tobacco stalk and its physicochemical characterization[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2016, 42(2): 245-255.
- [19] 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.
- [20] ENDERS A, HANLEY K, WHITMAN T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 644-653.
- [21] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [22] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 246-254.
JIAN M F, GAO K F, YU H P. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 246-254.
- [23] 王英惠, 杨旻, 胡林潮, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1585-1591.
WANG Y H, YANG M, HU L C, et al. Effects of biochar amendments synthesized at varying temperatures on soil organic carbon mineralization and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1585-1591.
- [24] O'LAUGHLIN J, MCELLIGOTT K. Joseph biochar for environmental management: science and technology[J]. *Forest Policy and Economics*, 2009, 11(7): 535-536.
- [25] 刘小宁, 蔡立群, 黄益宗, 等. 生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 112-117.
LIU X N, CAI L Q, HUANG Y Z, et al. Effect of biochar on soil retention ability in dry farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 112-117.
- [26] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 223-228.
- [27] 叶协锋, 于晓娜, 周涵君, 等. 不同秸秆生物炭的孔隙结构及其差异[J]. 生物质化学工程, 2019, 53(2): 41-46.
YE X F, YU X N, ZHOU H J, et al. Pore structure and fractal characteristics of biochars from different straw[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2019, 53(2): 41-46.
- [28] 梁桓, 索本义, 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.
LIANG H, SUO Q Y, HOU J W, et al. The structure characteristics and chemical properties of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures[J]. *Soils*, 2015, 47(5): 886-891.
- [29] 肖凯丽. 不同热解温度小麦秸秆生物炭对土壤中多环芳烃环境行为的影响[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [30] 张桂香, 郭文帝, 何秋生, 等. 离子强度、Cd²⁺和pH对生物炭吸附西玛津的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 733-739.
ZHANG G X, GUO W D, HE Q S, et al. Effects of ionic strength, Cd²⁺ and pH on sorption of simazine to biochars[J]. *Soils*, 2015, 47(4): 733-739.
- [31] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2401-2406.
WANG H, WANG G, HUANG Y Y, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2401-2406.
- [32] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 541-547.
YUAN J H, XU R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4): 541-547.
- [33] 郭平, 王观竹, 许梦, 等. 不同热解温度下生物质废弃物制备的生物质炭组成及结构特征[J]. 吉林大学学报(理学版), 2014, 52(4): 855-860.
GUO P, WANG G Z, XU M, et al. Structure and composition

- characteristics of biochars derived from biomass wastes at different pyrolysis temperatures[J]. *Journal of Jilin University(Science Edition)*, 2014, 52(4): 855-860.
- [34] ZHU D Q, KWON S, PIGNATELLO J J. Adsorption of single-ring organic compounds to wood charcoals prepared under different thermochemical conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 3990-3998.
- [35] 王维锦. 原料和温度对生物质炭性质的影响及便捷式生物质炭化机的试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [36] ZHAO J K, REN T S, ZHANG Q Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China plain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1157-1166.
- [37] ESMAEELNEJAD L, SHORAF A M, GORJI M, et al. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: an incubation study[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(14): 1710-1718.
- [38] 王瑞峰, 赵立欣, 沈玉君, 等. 生物炭制备及其对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(2): 126-133.
- WANG R F, ZHAO L X, SHEN Y J, et al. Research progress on preparing biochar and its effect on soil physio-chemical properties[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(2): 126-133.
- [39] MUKHERJEE A, LAL R, ZIMMERMAN A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 26-36.
- [40] MARSHALL J, MUHLACK R, MORTON B J, et al. Pyrolysis temperature effects on biochar-water interactions and application for improved water holding capacity in vineyard soils[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(2): 27.
- [41] MA N N, ZHANG L L, ZHANG Y L, et al. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application[J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154091.
- [42] YU X, WU C, FU Y, et al. Three-dimensional pore structure and carbon distribution of macroaggregates in biochar-amended soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 109-120.
- [43] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.
- YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 779-785.
- [44] GONDEK K, MIERZWA-HERSZTEK M, KOPEĆM, et al. Influence of biochar application on reduced acidification of sandy soil, increased cation exchange capacity, and the content of available forms of K, Mg, and P[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 28(1): 103-111.
- [45] FERNÁNDEZ-UGALDE O, GARTZIA-BENGOETXEA N, AROSTEGI J, et al. Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 587/588: 204-213.
- [46] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同pH值土壤矿质氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 166-173.
- LUO Y, ZHAO X R, LI G T, et al. Effect of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 166-173.
- [47] CHAGANTI V N, CROHN D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260: 45-55.
- [48] HAILEGNAW N S, MERCL F, PRAČKE K, et al. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2405-2416.
- [49] WANG G J, XU Z W. The effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline-alkali soil[J]. *Asian Agricultural Research*, 2013, 5(11): 116-119.
- [50] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 16-25.
- HE X S, ZHANG S Q, SHE D, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25.
- [51] 王悦满, 高倩, 薛利红, 等. 生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(1): 58-65.
- WANG Y M, GAO Q, XUE L H, et al. Effects of different biochar application patterns on rice growth and yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 58-65.
- [52] LEHMANN J, LIANG B Q, SOLOMON D, et al. Near-edge X-ray absorption fine structure(NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: application to black carbon particles[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1). doi:10.1029/2004gb002435.
- [53] 马秀枝, 李长生, 任乐, 等. 生物质炭对土壤性质及温室气体排放的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1395-1403.
- MA X Z, LI C S, REN L, et al. Effects of biochar application on soil properties and greenhouse gas emission[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1395-1403.
- [54] MUÑOZ C, GINEBRA M, ZAGAL E. Variation of greenhouse gases fluxes and soil properties with addition of biochar from farm-wastes in volcanic and non-volcanic soils[J]. *Sustainability*, 2019, 11(7): 1831.
- [55] 潘逸凡, 杨敏, 董达, 等. 生物质炭对土壤氮素循环的影响及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2666-2673.
- PAN Y F, YANG M, DONG D, et al. Effects of biochar on soil nitrogen cycle and related mechanisms: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2666-2673.
- [56] 吴蔚君, 徐云连, 邢素林, 等. 生物炭对土壤氮磷转化和流失的

- 影响[J]. *农学学报*, 2018, 8(9): 20-26.
- WU W J, XU Y L, XING S L, et al. Effect of biochar on soil nitrogen and phosphorus transformation and loss[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(9): 20-26.
- [57] 尹俊慧, 李小英. 不同类型生物炭混施对土壤磷素淋失的影响试验研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(6): 32-36.
- YIN J H, LI X Y. Different types of biochar mixed additions affect soil phosphorus leaching loss: experimental research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(6): 32-36.
- [58] 沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6584-6591.
- SHEN R F, ZHAO X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6584-6591.
- [59] 饶霜, 卢阳, 黄飞, 等. 生物炭对土壤微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(1): 53-59.
- RAO S, LU Y, HUANG F, et al. A review of researches on effects of biochars on soil microorganisms[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(1): 53-59.
- [60] 张玉洁, 吴婷, 赵娟, 等. 生物炭添加对秸秆还田土壤细菌群落结构和多样性影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 712-720.
- ZHANG Y J, WU T, ZHAO J, et al. Effect of biochar amendment on bacterial community structure and diversity in straw-amended soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 712-720.
- [61] 周之栋, 卜晓莉, 吴永波, 等. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6): 1-8.
- ZHOU Z D, BU X L, WU Y B, et al. Research advances in biochar effects on soil microbial properties[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2016, 40(6): 1-8.
- [62] 郑慧芬, 曾玉荣, 王成己, 等. 生物炭对红壤茶园溶磷细菌数量和土壤有效磷含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(18): 114-118.
- ZHENG H F, ZENG Y R, WANG C J, et al. Effects of biochar on phosphate solubilizing bacteria number and soil available P content in red soil tea plantation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(18): 114-118.
- [63] 潘逸凡. 生物质炭对稻田土壤氨氧化微生物的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [64] IRFAN M, HUSSAIN Q, KHAN K S, et al. Response of soil microbial biomass and enzymatic activity to biochar amendment in the organic carbon deficient arid soil: a 2-year field study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(3): 1-9.
- [65] 尚艺婕, 王海波, 史静. 外加辐处理下秸秆生物质炭对土壤酶活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(1): 20-25.
- SHANG Y J, WANG H B, SHI J. Effects of straw biomass charcoal on enzyme activity in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1): 20-25.
- [66] 张栋, 刘兴元, 赵红挺. 生物质炭对土壤无机污染物迁移行为影响研究进展[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(4): 451-459.
- ZHANG D, LIU X Y, ZHAO H T. Research progress in effects of biochar on transport of inorganic pollutants in soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2016, 42(4): 451-459.
- [67] 殷西婷. 添加改性生物炭对砷污染土壤中砷形态及土壤酶活性的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [68] 张建云, 高才慧, 朱晖, 等. 生物质炭对土壤中重金属形态和迁移性的影响及作用机制[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(3): 543-551.
- ZHANG J Y, GAO C H, ZHU H, et al. Mechanism and effects of biochar application on morphology and migration of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2017, 34(3): 543-551.
- [69] WATSON C, BAHADUR K, BRIESS L, et al. Mitigating negative microbial effects of p-nitrophenol, phenol, copper and cadmium in a sandy loam soil using biochar[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(2): 1-10.
- [70] 王道涵, 山峰, 汤家喜, 等. 生物炭修复有机污染土壤的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 460-466.
- WANG D H, SHAN F, TANG J X, et al. Research progresses on remediation of organic contaminated soil by biochar[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 460-466.
- [71] ZHENG W, GUO M X, CHOW T, et al. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1/2/3): 121-126.
- [72] 白小艳, 窦森. 施玉米秸秆生物质炭对土壤腐殖质组成和结构特征的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2019, 41(3): 330-335.
- BAI X Y, DOU S. Effects of applying corn straw biochar on composition and structural characteristics of soil humus[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(3): 330-335.
- [73] 赵京考, 刘作新, 韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6): 163-166.
- ZHAO J K, LIU Z X, HAN Y J. Review on formation and dispersion of aggregates and their application in agriculture[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(6): 163-166.
- [74] TEIXIDÓM, PIGNATELLO J J, BELTRÁN J L, et al. Speciation of the ionizable antibiotic sulfamethazine on black carbon(biochar)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(23): 10020-10027.
- [75] MACHADO S, AWALE R, PRITCHETT L, et al. Alkaline biochar amendment increased soil pH, carbon, and crop yield[J]. *Crops & Soils*, 2018, 51(6): 38-39.
- [76] DONG L J, LINGHU W S, ZHAO D L, et al. Performance of biochar derived from rice straw for removal of Ni(II) in batch experiments[J]. *Water Science and Technology*, 2018, 2017(3): 824-834.
- [77] WAGNER A, KAUPENJOHANN M, HU Y F, et al. Biochar-induced formation of Zn-P-phases in former sewage field soils studied by P K-edge XANES spectroscopy[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(4): 582-585.
- [78] HMID A, AL CHAMI Z, SILLEN W, et al. Olive mill waste biochar: a promising soil amendment for metal immobilization in contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution*

- Research, 2015, 22(2): 1444-1456.
- [79] 刘国成. 生物炭对水体和土壤环境中重金属铅的固持[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [80] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
LIU S J, XIA X, CHEN G M, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 1-7.
- [81] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [82] 张功臣, 陈建美, 赵征宇, 等. 生物质炭对设施连作土壤性质及黄瓜生长和产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 659-666.
ZHANG G C, CHEN J M, ZHAO Z Y, et al. Effects of biochar application on soil characteristics, growth and yield of cucumber under continuous cropping[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 659-666.
- [83] 贺超卉, 董文旭, 胡春胜, 等. 生物质炭对土壤 N_2O 消耗的影响及其微生物影响机理[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1301-1308.
HE C H, DONG W X, HU C S, et al. Biochar's effect on soil N_2O consumption and the microbial mechanism[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1301-1308.
- [84] 高利华, 屈忠义. 膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 614-620.
GAO L H, QU Z Y. Effects of biochar on soil water-heat-fertility behavior effect under mulched drip irrigation[J]. Soils, 2017, 49(3): 614-620.
- [85] 仓龙, 朱向东, 汪玉, 等. 生物质炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 163-167.
CANG L, ZHU X D, WANG Y, et al. Pollutant contents in biochar and their potential environmental risks for field application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 163-167.
- [86] YAO H, GAO Y, NICOL G W, et al. Links between ammonia oxidizer community structure, abundance, and nitrification potential in acidic soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(13): 4618-4625.
- [87] XU H J, WANG X H, LI H, et al. Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(16): 9391-9399.
- [88] ANDERSON C R, CONDRON L M, CLOUGH T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Pedobiologia, 2011, 54(5/6): 309-320.
- [89] 王丽渊, 丁松爽, 刘国顺. 生物质炭土壤改良效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3): 1-6.
WANG L Y, DING S S, LIU G S. Progress of the research on biochars'influence on soil reclaimarion[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(3): 1-6.
- [90] SHAABAN M, van ZWIETEN L, BASHIR S, et al. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 228: 429-440.
- [91] DE LA ROSA J M, SÁNCHEZ-MARTÍNÁM, CAMPOS P, et al. Effect of pyrolysis conditions on the total contents of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochars produced from organic residues: Assessment of their hazard potential[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667: 578-585. □