

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.019

董颖, 邵捷, 徐仁扣, 等. 不同地区油菜秸秆制备的生物质炭对酸性红壤的改良效果. 土壤, 2020, 52(1): 134–138

不同地区油菜秸秆制备的生物质炭对酸性红壤的改良效果^①

董颖^{1,2}, 邵捷³, 徐仁扣², 王辉¹, 赵震杰^{2,4}, 姜军^{2*}

(1 河南科技大学环境工程系, 河南洛阳 471023; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 4 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 从江西鹰潭、安徽宣城、江苏南京和淮阴等 4 个地区收集油菜秸秆, 在 500 °C 下厌氧热解制备生物质炭, 比较生物质炭的 pH、盐基离子和碳酸盐含量的差异, 并在 20 g/kg 加入量下考察其对安徽宣城 pH 4.1 的酸性红壤改良效果。结果表明, 江西鹰潭油菜秸秆炭 pH、盐基离子和碳酸盐含量最低, 安徽宣城油菜秸秆炭次之, 江苏淮阴和南京油菜秸秆炭的相应参数值最高。当用这 4 种油菜秸秆炭改良土壤酸度时, 改良效果表现为江苏淮阴>江苏南京>安徽宣城>江西鹰潭, 与生物质炭 pH、盐基离子和碳酸盐含量一致。因此, 利用秸秆生物质炭改良土壤酸度时, 不仅需要考虑炭化条件和秸秆类型, 作物的产地差异也需要进行考量。

关键词: 油菜秸秆生物质炭; 不同地区; 盐基离子; 土壤酸度改良

中图分类号: S153.2 文献标志码: A

Amelioration of Ultisol Acidity by Biochars Derived from Canola Straws from Different Areas

DONG Ying^{1,2}, SHAO Jie³, XU Renkou², WANG Hui¹, ZHAO Zhenjie^{2,4}, JIANG Jun^{2*}

(1 Department of Environment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The biochars were prepared from canola straws collected from Yingtan in Jiangxi Province, Xuancheng in Anhui Province, Nanjing and Huaiying in Jiangsu Province, respectively, at 500 °C under anaerobic condition. The pH values, contents of base cations and carbonates in these biochars were measured. The amelioration effects of biochars on an acid Ultisol collected from Xuancheng, Anhui Province were examined with incubation experiments at 20 g/kg addition level of the biochars. Results showed the biochar of canola straw from Yingtan had the lowest pH value, contents of base cations and carbonate, followed by the biochar of canola straw from Xuancheng, and the biochars of canola straw from Huaiying and Nanjing had the highest pH and the contents of base cations and carbonate. The amelioration effects of these biochars on soil acidity of the Ultisol followed the order: Huaiying > Nanjing > Xuancheng > Yingtan, consistent with pH, the contents of base cations and carbonate in these biochars. Therefore, the amelioration effects of crop straw biochars on acid soils depended not only on the pyrolysis condition and crop residue types, but also on the sites of crop straw collected.

Key words: Canola straw biochar; Different areas; Base cations; Soil acidity amelioration

酸性红壤约占我国国土面积的 22.7%, 由于酸沉降和化肥的不合理施用等使得该类土壤酸化程度不断加剧, 土壤更加贫瘠, 进而影响作物生长, 同时又会对农业生态环境造成破坏^[1-3]。改良酸性土壤的常用方法是施用石灰等碱性物质, 石灰的施用可有效中和土壤酸度, 提高土壤 pH。但石灰的长期使用也会

对土壤性质造成许多负面影响, 如导致土壤板结, Ca、Mg 和 K 等养分失衡^[4-5]。

我国农业生产中每年产生大量农业废弃物, 其中农作物秸秆的年产量达 7 亿多吨^[5]。近年来的研究表明, 作物秸秆在厌氧条件下低温热解制备的生物质炭具有较高的 pH, 通常呈碱性^[7], 可用于改良酸

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371245, 41771275)和国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441003)资助。

* 通讯作者(jjiang@issas.ac.cn)

作者简介: 董颖(1991—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事土壤酸化研究。E-mail: 942812534@qq.com

性土壤^[8-9]。一般认为, 生物质炭的性质受原料、热解温度和时间等影响, 而原料和热解温度是主要影响因素^[10-12]。植物吸收盐基离子因土而异, 植物体内积累的碱性物质也应不同, 因此不同地区的作物秸秆在相同炭化条件下制备得到的生物质炭, 其中所含的盐基离子和碱性物质及对土壤酸度改良效果应有所差异, 但目前还未有这方面的报道。本文选取江苏南京和淮阴、安徽宣城以及江西鹰潭 4 个地区的油菜秸秆, 在 500 °C 下制备生物质炭, 测定不同地区油菜秸秆制备的生物质炭的 pH、交换性盐基及碳酸盐含量, 研究这些生物质炭对酸性红壤的改良效果, 探讨农作物秸秆生长环境条件对生物质炭性质的影响, 进一步揭示秸秆生物质炭改良红壤酸度的机理。

1 材料与方法

1.1 油菜秸秆产地土壤和生物质炭性质

本文选取的油菜秸秆分别采自江苏南京(31°55'N, 118°51'E)、江苏淮阴(33°37'N, 119°02'E)、安徽宣城(31°07'N, 119°10'E)及江西鹰潭(28°12'N, 116°56'E)。同步采集油菜生长地的土壤样品, 1:2.5(*m:V*)土水比下测定土壤 pH, 乙酸铵取代法提取土壤交换性盐基, 提取液中交换性 K⁺、Na⁺ 用火焰光度法测定(M410, Sherwood Scientific, 英国), Ca²⁺、Mg²⁺ 用原子吸收分光光度法测定(novAA350, 耶拿, 德国)。将油菜秸秆洗净风干后粉碎过 10 目筛, 在 500 °C 下焖烧 2 h, 冷却后取出, 生物质炭称重磨细后过 60 目筛备用^[7,13]。油菜秸秆炭按 1:10 (*m:V*)的固液比与除 CO₂ 的去离子水混合, 60 r/min 旋转振荡 30 min, 用电位法测定生物质炭 pH。称取 0.2 g 生物质炭, 用 1 mol/L 乙酸铵(pH = 7.0)淋洗 5 次, 定容收集得到滤液测定生物质炭中交换性盐基离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量^[7]。气量法测定生物质炭中碳酸盐含量^[7]。

1.2 土壤改良试验

采自安徽宣城的红壤用于土壤改良试验, 土壤经自然风干, 研磨过 60 目筛备用。土壤 pH(*m:V* = 1:5)、有机质、阳离子交换量(CEC)分别用电位法、水合热重铬酸钾氧化-比色法和乙酸铵法测定, 结果列于表 1 中。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested acid soil from Xuancheng of Anhui Province

土壤类型	取样深度(cm)	pH	有机质(g/kg)	阳离子交换量(mmol/kg)
红壤	0~20	4.10	15.46	98.87

称取 117.6 g 过 2 mm 筛的土壤样品, 加入 2.4 g 生物质炭, 充分混匀后放入 240 ml 聚丙烯塑料杯中。将土壤含水量调至田间持水量的 70%, 用保鲜膜封口且在其中间位置扎一直径 5 mm 小孔, 以便土壤进行气体交换, 聚丙烯杯置于 25 °C 恒温培养箱中培养 56 d, 在培养过程中每隔 3~4 d 补充一次水分, 保持土壤含水量基本恒定。培养结束后, 将样品取出风干、研磨过 60 目筛备用。

用与前述相同的方法测定改良后土壤的 pH(*m:V*=1:2.5)和交换性盐基离子含量^[14]。用 1 mol/L KCl 提取土壤交换性酸, 然后采用碱滴定法测定土壤交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺^[15]。以上试验均重复 2 次。

1.3 数据处理

利用 Duncan 多重比较进行多组样本间差异显著性分析, 通过 Pearson 相关分析进行多组样本间相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 油菜秸秆产地土壤对生物质炭性质的影响

油菜秸秆产地土壤和生物质炭性质分别如表 2 和表 3 所示。4 种油菜秸秆产地土壤的 pH 和交换性盐基离子总量均表现为: 江西鹰潭<安徽宣城<江苏南京<江苏淮阴。4 种盐基阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)中, Ca²⁺ 含量最高, 因为它是土壤溶液中最主要的阳离子^[16], 二价 Ca²⁺ 对土壤颗粒的亲和能力要高于单价的 K⁺ 和 Na⁺。江西鹰潭和安徽宣城红壤发育于第四纪红黏土, 江苏南京黄棕壤和淮阴潮土分别发育于下蜀黄土和湖相沉积物, 母质差异导致江苏淮阴土壤盐基离子含量最高, 江苏南京次之。另外江西鹰潭和安徽宣城纬度略低, 风化淋溶作用增强, 导致其盐基离子含量显著低于江苏两地土壤。

表 2 油菜秸秆产地土壤 pH 和交换性盐基离子含量

Table 2 pH values and contents of exchangeable base cations in soils of canola straws-producing areas

秸秆产地	pH	交换性盐基 (mmol/kg)				总量
		K ⁺	Na ⁺	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺	
江西鹰潭	5.10 d	5.11 a	1.93 a	6.03 c	4.51 c	17.57 c
安徽宣城	5.54 c	3.83 b	3.28 a	17.11 c	3.98 d	28.20 c
江苏南京	6.79 b	2.57 c	2.33 a	116.91 b	29.45 a	151.26 b
江苏淮阴	8.13 a	1.61 d	4.48 a	428.19 a	10.38 b	444.65 a

注: 同列数据小写字母不同表示不同秸秆产地间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

一般认为, 植物吸收的阳离子与溶液中阳离子种类和含量关系密切^[17], 作物在生长过程中会通过其根系从土壤中吸收水分和矿质养分以供其自身生长^[5],

表 3 不同地区油菜秸秆生物质炭基本性质
Table 3 Basic properties of biochars of canola straws from different regions

秸秆产地	产率(%)	pH	交换性盐基(mol/kg)					碳酸盐(%)
			K ⁺	Na ⁺	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺	总量	
江西鹰潭	18.74 b	7.35 c	0.04 d	0.01 d	0.11 b	0.01 c	0.17 d	1.63 d
安徽宣城	24.55 a	9.30 b	0.75 b	0.10 c	0.08 b	0.03 b	0.95 c	2.19 c
江苏南京	25.92 a	9.61 a	0.80 a	0.74 a	0.20 a	0.04 a	1.78 a	4.14 b
江苏淮阴	26.16 a	9.31 b	0.36 c	0.45 b	0.23 a	0.03 b	1.07 b	5.13 a

因此,作物秸秆含有的盐基离子的数量和种类与作物生长的土壤密切相关。如表 3 所示,不同地区秸秆生物质炭中交换性盐基离子含量表现出明显的地区差异,总盐基含量顺序为江苏南京>江苏淮阴>安徽宣城>江西鹰潭,基本与油菜秸秆产地土壤盐基离子含量顺序一致(表 2)。两者间呈正相关关系,绝对系数

R^2 为 0.121,未达到显著水平(图 1A, $P=0.396$),这可能与统计数据量不足,以及影响植物生长代谢活动因素复杂有关。在作物秸秆制备成生物质炭过程中,秸秆中存在的盐基离子大量富集,使得生物质炭中盐基离子含量增加,因此相比于作物秸秆,生物质炭用于改良酸性土壤效果更佳^[18]。

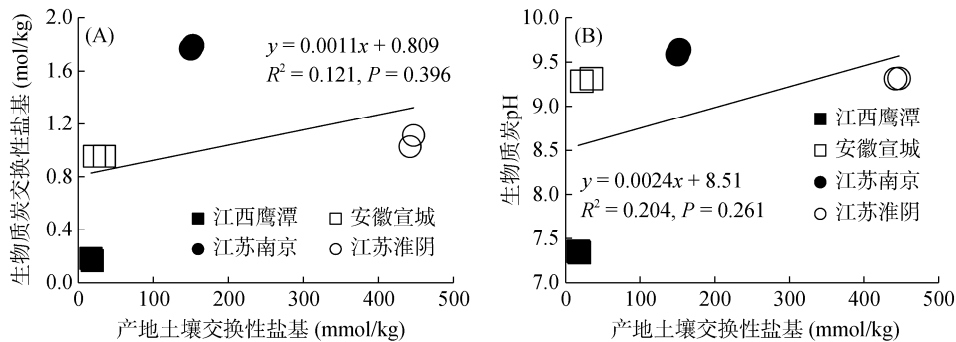


图 1 油菜秸秆产地土壤交换性盐基与生物质炭交换性盐基(A)和生物质炭 pH(B)之间的相关性
Fig. 1 Correlation of exchangeable base cations in soils with exchangeable base cations (A) and pH value (B) of biochars

生物质炭在烧制过程中还产生了新的碱性物质碳酸盐,它主要存在于生物质炭制备过程中形成的灰分中^[5],碳酸盐对生物质炭总碱含量的贡献在 20%~73%^[19]。本研究中气量法得到的不同地区油菜秸秆炭碳酸盐含量存在显著差异(表 3, $P<0.05$),顺序为江苏淮阴>江苏南京>安徽宣城>江西鹰潭。

此外,植物主要通过主动运输吸收土壤溶液中盐基阳离子,植株体内阳离子需要与有机和无机阴离子形成离子对维持植物体内电荷平衡,秸秆中的羧基和酚羟基等弱酸性阴离子是其碱性物质的重要来源,可以直接与酸性土壤中的 H^+ 反应,达到改良酸性土壤的目的^[5, 20-21]。作物秸秆在厌氧条件下热解制备成生物质炭过程中,秸秆中的弱酸性官能团转移并富集到生物质炭中,红外光谱(FTIR)和 Boehm 滴定结果都表明,生物质炭中含有丰富的羧基和酚羟基等含氧官能团^[22],这些弱酸性官能团是秸秆生物质炭呈碱性,并可用于酸性土壤改良的另一个重要原因^[7, 23-24]。

表 3 结果还表明,鹰潭油菜秸秆生物质炭所含盐

基阳离子和碳酸盐含量最低,因此制备得到的生物质炭 pH 仅为 7.35,显著低于安徽宣城和江苏淮阴油菜秸秆炭(pH 分别为 9.30 和 9.31),更低于江苏南京油菜秸秆炭(pH=9.61)。因此,江西鹰潭油菜秸秆炭的 pH、交换性盐基以及碳酸盐含量在所研究的 4 种生物质炭中都最低。产地土壤交换性盐基与生物质炭 pH 之间存在正相关关系,但没有达到显著水平(图 1B, $P=0.261$),原因可能也与统计数据量不足和植物生长的影响因素复杂有关。

2.2 不同地区油菜秸秆生物质炭对安徽红壤交换性盐基离子的影响

由于不同地区油菜秸秆生物质炭中所含盐基离子含量不同,将其添加到酸性红壤中时,生物质炭所含盐基离子释放,并与土壤交换性酸发生反应,导致土壤交换性盐基离子含量增加。改良后红壤盐基离子含量结果如表 4 所示,添加江苏淮阴和南京油菜秸秆生物质炭的红壤盐基离子含量最高,安徽宣城次之,江西鹰潭最低,这一顺序与油菜秸秆生物质炭中交换性盐基离子含量

一致(表 2)。相关分析结果表明, 油菜秸秆生物质炭与改良红壤中交换性盐基离子含量存在极显著正相关关

系(图 2, $P=0.000$), 证明生物质炭中盐基离子释放是导致改良土壤交换性盐基含量增加的主要原因。

表 4 添加生物质炭对安徽宣城红壤交换性盐基、pH 和交换性酸的影响
Table 4 Effects of biochar on pH value, exchangeable base cations and exchangeable acid of Ultisol

秸秆产地	交换性盐基(mol/kg)				pH	交换性 H	交换性 Al	交换性酸	
	K ⁺	Na ⁺	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺					盐基总量
对照	4.86 e	1.21 d	7.98 e	3.72 d	17.78 e	4.05 e	4.14 a	55.97 a	60.11 a
江西鹰潭	5.89 d	1.54 d	18.36 d	4.69 c	30.49 d	4.42 d	3.85 ab	35.86 b	39.71 b
安徽宣城	18.88 b	6.54 c	24.24 c	8.13 a	57.79 c	4.58 c	3.26 ab	21.33 c	24.59 c
江苏南京	20.95 a	18.99 a	31.23 b	7.05 b	78.22 a	4.66 b	2.67 ab	17.48 cd	20.15 cd
江苏淮阴	11.85 c	14.20 b	38.75 a	6.99 b	71.79 b	4.86 a	1.18 b	11.85 d	13.03 d

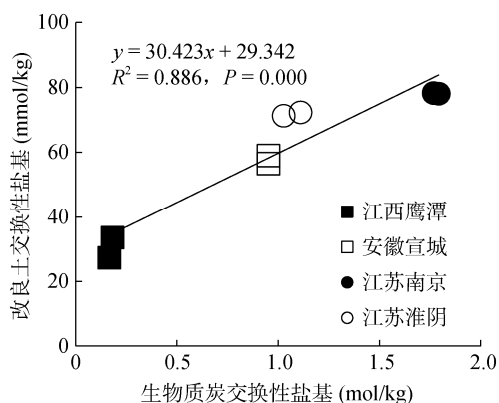


图 2 生物质炭交换性盐基与改良土交换性盐基离子含量间的相关性

Fig. 2 Correlation between exchangeable base cations in biochars and amended Ultisol

同时, Ca、Mg 和 K 是植物必需大量营养元素, 而酸性红壤由于遭受强烈风化淋溶作用导致这些元素广泛缺乏^[5]。4 种油菜秸秆制备的生物质炭中含有大量的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 等离子, 因此, 4 种油菜秸秆生物质炭加入土壤后都提高了土壤 Ca、Mg、K 含量, 从而提高土壤的肥力^[10]。另外, 生物质炭由于表面带有净负电荷, 可以提高改良土壤阳离子交换量 (CEC), 从而提高了土壤吸持阳离子 (如 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 NH₄⁺) 的能力, 能够阻止它们从酸性土壤中淋失^[25]。因此, 生物质炭改良酸性土壤可以提高土壤肥力水平^[7]。

2.3 不同地区油菜秸秆生物质炭对安徽红壤酸度的改良效果

4 个地区油菜秸秆生物质炭对红壤 pH 和交换性酸的影响如表 4 所示, 生物质炭的添加显著提高了酸性红壤 pH。江苏淮阴和南京油菜秸秆炭提高土壤 pH 的效果最好, 安徽宣城的油菜秸秆炭次之, 江西鹰潭的油菜秸秆炭效果最差。淮阴和南京油菜秸秆炭改良后土壤 pH 分别较对照提高了 0.81 和 0.61, 宣城油菜秸秆炭处理 pH 提高了 0.53, 而鹰潭油菜秸秆炭处理

pH 仅提高了 0.37, 这与油菜秸秆生物质炭本身的 pH 和碳酸盐含量的大小顺序一致(表 2)。

将油菜秸秆生物质炭添加到土壤后, 生物质炭中含有的碱性物质得以释放并与土壤中的部分酸性物质发生酸碱中和反应, 降低土壤酸度并提高土壤 pH。生物质炭中含有大量的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 等盐基离子^[26], 当添加生物质炭到酸性土壤后, 这些盐基离子可与土壤表面交换位上的 H⁺、Al³⁺ 发生交换反应, 促进交换性 Al 释放并进入土壤溶液。土壤溶液中的 Al³⁺ 发生水解并形成 Al(OH)₃ 沉淀, 从而降低铝毒的危害。

图 3 相关分析结果表明, 秸秆生物质炭交换性盐基与改良酸性土壤 pH 呈正相关关系, 与交换性酸存在负相关关系, 绝对系数分别为 0.366 和 0.547, 且后者达到了显著水平 ($P = 0.036$), 证明添加油菜秸秆生物质炭可显著降低改良红壤交换性酸 (交换性 H 和交换性 Al) 含量。从表 4 可以发现, 土壤中交换性酸主要为交换性 Al, 交换性 H 含量仅占交换性酸的 6.89% ~ 13.26%。添加油菜秸秆生物质炭后, 江西鹰潭, 安徽宣城, 江苏南京和淮阴油菜秸秆生物质炭处理红壤交换性酸含量分别较对照降低了 33.94%, 59.09%, 66.48% 和 78.32%, 交换性 Al 含量分别降低了 35.93%, 61.89%, 68.77% 和 78.83%。添加油菜秸秆生物质炭后红壤 pH 的提高幅度与其交换性 Al 的降低幅度一致, 说明生物质炭中的碱性物质在这一过程中起中和作用, 促进交换性 Al 的水解和羟基铝化合物沉淀的形成, 进而使得改良土壤中交换性 Al 的含量降低, Al 的活性也随之降低, 土壤 Al 毒得以缓解。

3 结论

- 1) 母质原因造成江苏淮阴和江苏南京两地土壤盐基离子含量较高, 强烈的风化淋溶作用使得江西鹰潭土壤中盐基阳离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 大量流失。
- 2) 与另外 3 个地区土壤相比, 江西鹰潭土壤中盐

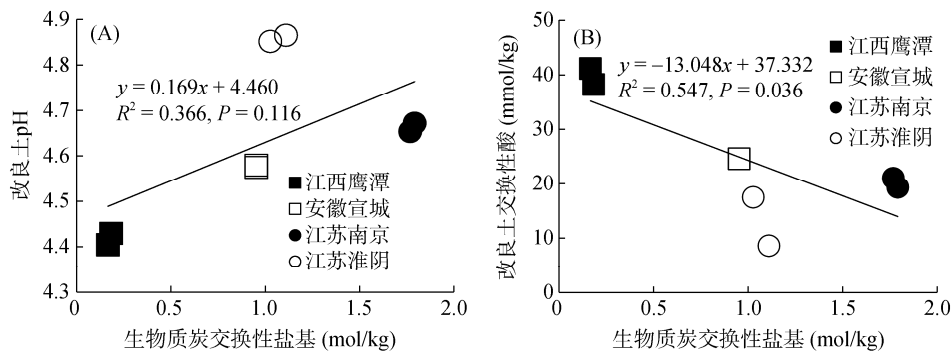


图 3 油菜秸秆生物质炭交换性盐基离子含量与改良红壤 pH 和交换性酸相关性分析

Fig.3 Correlation of exchangeable base cations in biochars with pH value and exchangeable acid of amended Ultisol

基阳离子含量最低,油菜在生长过程中可吸收利用的盐基离子较少,使得以鹰潭油菜秸秆为原料制备的生物质炭中盐基离子含量也相对较少。

3)添加 4 种油菜秸秆生物质炭均提高了采自安徽宣城红壤的 pH 和交换性盐基阳离子含量,降低土壤的交换性酸,江苏淮阴和江苏南京油菜秸秆生物质炭改良红壤酸度的效果最好,安徽宣城油菜秸秆生物质炭效果次之,而江西鹰潭油菜秸秆生物质炭的改良效果最差。

参考文献:

- [1] 张桃林. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [2] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- [4] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48-51.
- [5] 徐仁扣. 秸秆生物质炭对红壤酸度的改良作用: 回顾与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 303-309.
- [6] 靳璇, 李赢, 李新, 等. 秸秆预处理工艺对秸秆基人造板性能的影响[J]. 应用化学, 2016, 33(4): 430-435.
- [7] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [8] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(1): 110-115.
- [9] 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.
- [10] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- [11] Enders A, Hanley K, Whitman T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. Bioresource Technology, 2012, 114(3): 644-653.
- [12] Zhao L, Cao X D, Masek O, et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 256(1): 1-9.
- [13] Jiang J, Yuan M, Xu R K, et al. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 139-147.
- [14] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Plette A C C, Benedetti M F, vanRiemsdijk W H. Competitive binding of protons, calcium, cadmium, and zinc to isolated cell walls of a gram-positive soil bacterium[J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30(6): 1902-1910.
- [17] Tyler G, Olsson T. Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming[J]. Plant and Soil, 2001, 230(2): 307-321.
- [18] Yuan J H, Xu R K, Qian W, et al. Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(5): 741-750.
- [19] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China[J]. Soil Research, 2012, 50(7): 570-578.
- [20] 姜军, 徐仁扣, 李九玉, 等. 两种植物物料改良酸化茶园土壤的初步研究[J]. 土壤, 2007, 39(2): 322-324.
- [21] Mao J, Xu R K, Li J Y, et al. Dicyandiamide enhances liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1632-1635.
- [22] 索龙, 潘凤娥, 胡俊鹏, 等. 秸秆及生物质炭对砖红壤酸度及交换性能的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1157-1162.
- [23] Jiang J, Peng Y, Yuan M, et al. Rice straw-derived biochar properties and functions as Cu(II) and cyromazine sorbents as influenced by pyrolysis temperature[J]. Pedosphere, 2015, 25(5): 781-789.
- [24] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic Ultisol by crop residue-derived biochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(37): 8111-8119.
- [25] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 47-82.
- [26] 时仁勇, 李九玉, 徐仁扣, 等. 生物质炭对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1088-1095.