

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.012

王昆艳, 官会林, 卢俊, 等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响. 土壤, 2020, 52(3): 503–509.

## 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响<sup>①</sup>

王昆艳, 官会林, 卢俊, 徐武美\*

(云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500)

**摘要:** 我国南方旱地酸性红壤区, 土壤酸化与干旱等问题突出。近几年生物质炭在土壤改良方面的研究应用已有较多的文献报道, 但针对南方旱地酸性红壤区土壤改良方面的研究与应用相对较少。对此, 本研究设置了生物质炭施加量分别为 1%、2%、3%、4% 及对照 CK 共 5 个处理, 每个处理 5 次重复的室内盆栽试验; 每盆一次性均匀浇洒 1 L 蒸馏水后在温室内自然放置, 模拟干旱 30 d, 随后测定土壤含水量、pH、电导率与氮、磷含量。结果表明: 土壤 pH、电导率、有效磷含量随生物质炭施加量的增加而显著提高,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量降低, 而  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  含量无显著影响; 模拟干旱后的土壤含水量与生物质炭施加量呈二次函数曲线关系, 施加低量生物质炭(1%)显著降低了土壤含水量, 而高量生物质炭(4%)的施加则使土壤含水量显著提高。本研究为生物质炭在我国南方旱地酸性红壤区土壤改良方面的应用提供了试验依据。

**关键词:** 生物质炭; 酸性红壤; 理化性质; 土壤改良

中图分类号: S156.92 文献标志码: A

### Effects of Biochar on Physicochemical Properties of Dry Land Acid Red Soil

WANG Kunyan, GUAN Huilin, LU Jun, XU Wumei\*

(School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The acid red soil is widespread in south China which characterized as low pH and water holding capacity. Biochar, a cheap and widely used carbon-rich material, has shown the potential to ameliorate the degraded soil, but its effects on the dry land acid red soil are still unclear. Hence, a pot experiment of aridity simulation was conducted with different application content of biochar (0, 1%, 2%, 3%, 4%) added in the acid red soil and watered with 1 L distilled water equally, then soil water content, pH, electric conductivity,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  and available phosphorus were measured after one month of aridity simulation. Results showed that soil pH, electric conductivity and available phosphorus increased and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  decreased significantly with the increase of biochar application, while  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  changed insignificantly. A quadratic relation was observed between soil water content and the content of biochar application, soil water content was decreased significantly under low application content (1%) but increase significantly under high content of application (4%). This study provides a basis for the biochar application in ameliorating the acid red soil in south China.

**Key words:** Biochar; Acid red soil; Physicochemical properties; Soil amelioration

生物质炭(Biochar)是生物质材料在缺氧条件下高温(小于 700 °C)裂解制备的高碳含量物质<sup>[1]</sup>, 其在农业中的应用最早可追溯到两千多年前, 然而直到近十多年才引起广泛关注<sup>[2]</sup>。大量研究表明, 生物质炭可有效改善土壤理化性质<sup>[3]</sup>、修复土壤污染<sup>[1, 4]</sup>、调节微生物群落结构并缓解作物土传病害等<sup>[5-6]</sup>; 此外, 由于生物质炭性质稳定, 不易分解, 将其施入土壤并用于农业生产被认为是应对由于大气  $\text{CO}_2$  浓度增加所

导致的全球变暖问题的良好途径, 因而也备受关注<sup>[7]</sup>。

土壤干旱、酸化、盐渍化与肥力下降等已成为制约现代农业发展的主要因素<sup>[8-11]</sup>。大量研究表明, 向土壤中施加生物质炭可有效改善上述问题, 主要因为: ①生物质炭密度较小, 且有巨大的比表面积, 能降低土壤容重并对土壤水分起到吸附作用, 从而提高土壤持水能力, 缓解干旱气候对作物的影响<sup>[2, 12]</sup>; ②大多数类型的生物质炭呈天然碱性, 可有效中和酸性土

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31901126, 41661069)和云南省应用基础研究计划项目(2019FD112)资助。

\* 通讯作者(xuwumei@ynnu.edu.cn)

作者简介: 王昆艳(1995—), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面研究。E-mail: wkunyan@163.com

壤, 缓解土壤酸害<sup>[13]</sup>; ③生物质炭可对土壤盐分起到吸附作用, 减少土壤中溶解性盐分含量以及植物对盐分的吸收<sup>[14]</sup>; ④生物质炭本身含有大量养分元素, 且在制作过程中会产生一定含量的速效养分, 从而提高土壤养分可利用性与肥力<sup>[1]</sup>。然而, 也有研究表明, 由于生物质炭本身可能含有一定量的盐分, 短期内可能导致土壤含盐量增加; 此外, 生物质炭的施加也可能导致土壤孔隙度增加, 水分蒸发加强, 从而导致土壤含水量降低<sup>[14]</sup>。

我国南方广泛分布着酸性红壤, 酸度高、肥力低<sup>[15]</sup>; 一些地区由于常年使用化学肥料, 导致土壤表层盐分聚集, 严重影响作物生长<sup>[16]</sup>。此外, 随着全球变化加剧, 降水不均与耕地供水不足等也常导致土壤短期或长期干旱, 对农业产生具有严重威胁<sup>[17]</sup>。本研究利用室内盆栽试验, 通过探讨不同生物质炭施加量对旱地酸性红壤理化性质(土壤含水量、pH、电导率与氮磷含量)的影响, 以期为其科学应用提供试验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

本研究供试土壤于 2018 年 3 月 17 日采挖自云南师范大学研究生实践实习基地, 为旱地酸性红壤区, 冬春季干旱少雨。土壤 pH 为 5.07, 含水量为 9.00%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量为 3.02 mg/kg,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量为 43.40 mg/kg, 有效磷含量为 2.98 mg/kg。供试生物质炭为稻壳生物质炭, 由云南威鑫农业科技股份有限公司提供, 生物质炭 pH 为 9.95、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量为 0.69 mg/kg、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量为 17.08 mg/kg、有效磷含量为 347.87 mg/kg。

### 1.2 研究方法

本研究设置了生物质炭/土壤比例分别为 1%、2%、3%、4% 及对照 CK 共 5 个处理, 每个处理 5 次重复的室内盆栽试验。按不同比例生物质炭与 5 kg 土壤(干重)混匀后装入花盆编号, 每盆一次性均匀浇洒 1 L 蒸馏水后模拟干旱(温室内自然放置) 30 d, 随后测定土壤含水量、pH、电导率与氮磷含量。土壤含水量根据标准 HJ 613—2011 进行测定, 土壤 pH 根据标准 NY/T 1377—2007 进行测定, 土壤电导率用土壤 EC 计(YN-EC100)测定, 土壤有效磷(Olsen P)含量参照《土壤农业分析方法》<sup>[18]</sup>进行测定,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量根据标准 LY/T 1228—2015, 用流动分析仪(AA3, Seal Analytical, ltd. Germany)进行测定。本研究用电导率反映土壤含盐量的相对水平<sup>[18-19]</sup>。

## 1.3 数据分析

用 Shapiro-Wilk 检验探讨各变量的正态性, 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量不服从正态分布( $P < 0.05$ ), 故用对数转换后再进行后续分析。用单因素方差分析与 Duncan 多重比较检验不同生物质炭施加量对土壤含水量、pH、电导率及氮磷含量的影响, 用线性回归与曲线模拟研究其随生物质炭施加量的变化规律。用结构方程模型探讨土壤生物质炭含量、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、有效磷的因果关系, 模型接受标准为:  $P > 0.05$ , RMSEA (渐进残差均方和平方根)  $< 0.08$ <sup>[20-21]</sup>。结构方程模型分析用 AMOS 22.0 进行(IBM Ltd, Chicago, IL), 其他统计分析均用 SPSS16.0 进行(SPSS Inc., Chicago, IL)。

## 2 结果

### 2.1 生物质炭对土壤含水量、pH 与电导率的影响

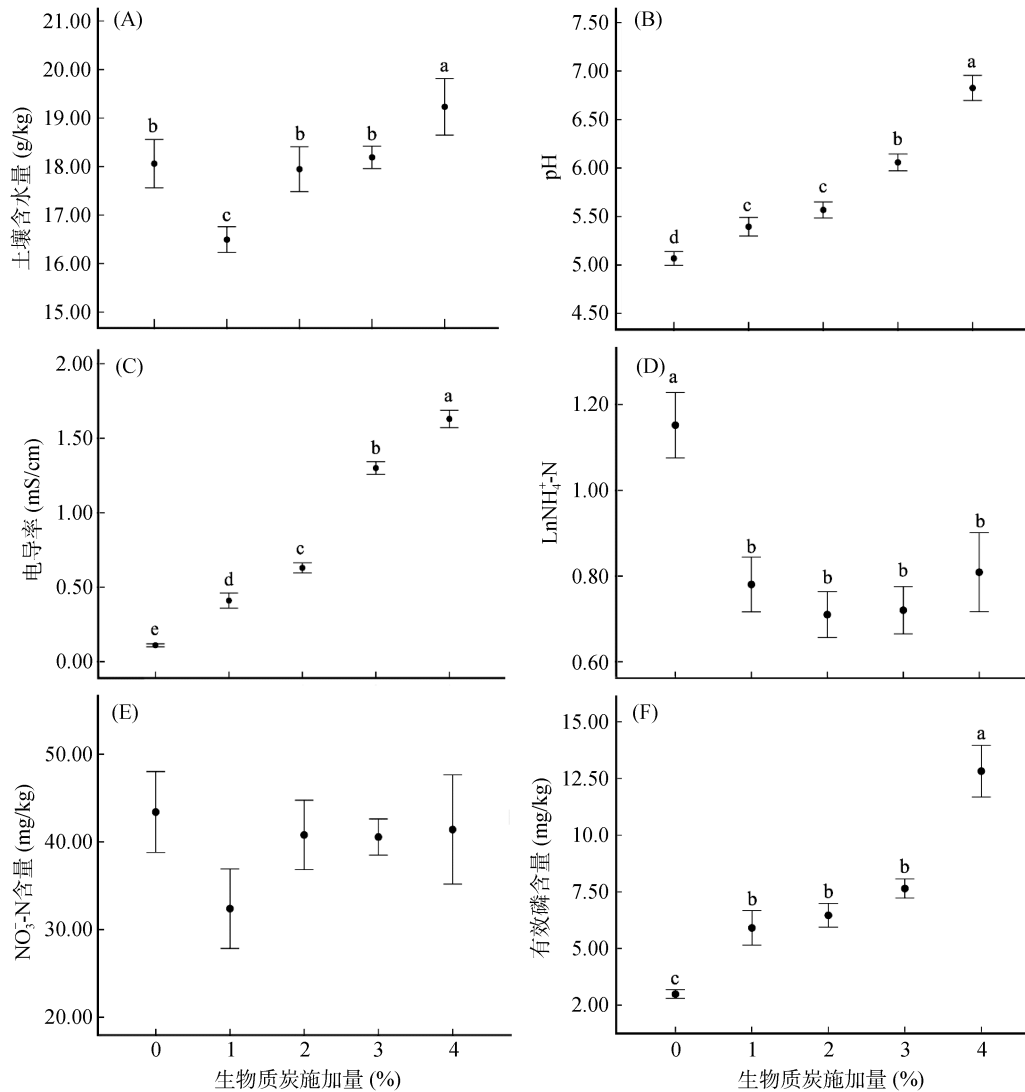
方差分析表明, 不同生物质炭施加量对土壤含水量、pH 与电导率均具有显著影响(土壤含水量:  $F = 8.059$ ,  $P < 0.001$ ; pH:  $F = 51.487$ ,  $P < 0.001$ ; 电导率:  $F = 221.489$ ,  $P < 0.001$ ) (表 1)。Duncan 多重比较分析表明(图 1), 与对照相比较, 施加 1% 的生物质炭显著减少了土壤含水量(16.49%), 而 4% 的生物质炭施加量则显著提高了土壤含水量(19.54%); 不同生物质炭施加量均显著提高了土壤 pH, 当施加量为 4% 时, 土壤 pH 达 6.826, 较对照提高了 1.758; 不同生物质炭施加量均显著影响了土壤电导率, 当施加量为 4% 时达 1.630 mS/cm。线性回归与曲线模拟分析表明, 生物质炭施加量与含水量的关系更趋向于二次函数曲线关系( $R^2 = 0.488$ ,  $P < 0.001$ ) = ; 生物质炭与土壤 pH 及电导率呈线性关系, 土壤生物质炭含量解释了 85.1% 的土壤 pH 变化及 94.7% 的电导率变化, 表明施加生物质炭对上述两个土壤因子的重要影响(图 2)。

### 2.2 生物质炭对土壤氮磷养分可利用性的影响

方差分析表明, 不同生物质炭施加量对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与有效磷具有显著影响( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ :  $F = 6.840$ ,  $P = 0.001$ ; 有效磷:  $F = 27.574$ ,  $P < 0.001$ , 表 1)。Duncan 多重比较分析表明(图 1), 与对照相比较, 施加生物质炭显著降低了土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量, 而土壤有效磷含量则显著提高; 施加生物质炭对土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量无显著影响。线性回归与曲线模拟分析表明(图 2), 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量随生物质炭施加量显著降低( $R^2 = 0.242$ ,  $P = 0.012$ ), 而有效磷与生物质炭施加量的关系趋向于三次函数曲线关系( $R^2 = 0.846$ ,  $P < 0.001$ ), 即一定量的生物质炭施加(1% ~ 3%)虽然提高了土壤有效磷含量, 但幅度不大, 当提高到 4% 时, 土壤有

表 1 不同生物质炭施用量对土壤理化性质影响的单因素方差分析  
Table 1 One-way ANOVA for effects of biochar on soil properties

土壤性质	变异来源	df	SS	$s^2$	$F$	$P$
土壤含水量	处理间	4	23.394	5.848	8.059	<0.001
	处理内	20	14.514	0.726		
pH	处理间	4	9.361	2.340	51.487	<0.001
	处理内	20	0.909	0.045		
电导率	处理间	4	7.974	1.993	221.489	<0.001
	处理内	20	0.180	0.009		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	处理间	4	0.665	0.166	6.840	0.001
	处理内	20	0.486	0.024		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	处理间	4	360.096	90.024	0.896	0.485
	处理内	20	2 009.445	100.472		
有效磷	处理间	4	258.899	64.725	27.574	<0.001
	处理内	20	46.947	2.347		



(图中小写字母不同表示处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平(Duncan 多重比较))

图 1 不同生物质炭施用量对土壤理化性质的影响  
Fig. 1 Effects of biochar on soil physicochemical properties

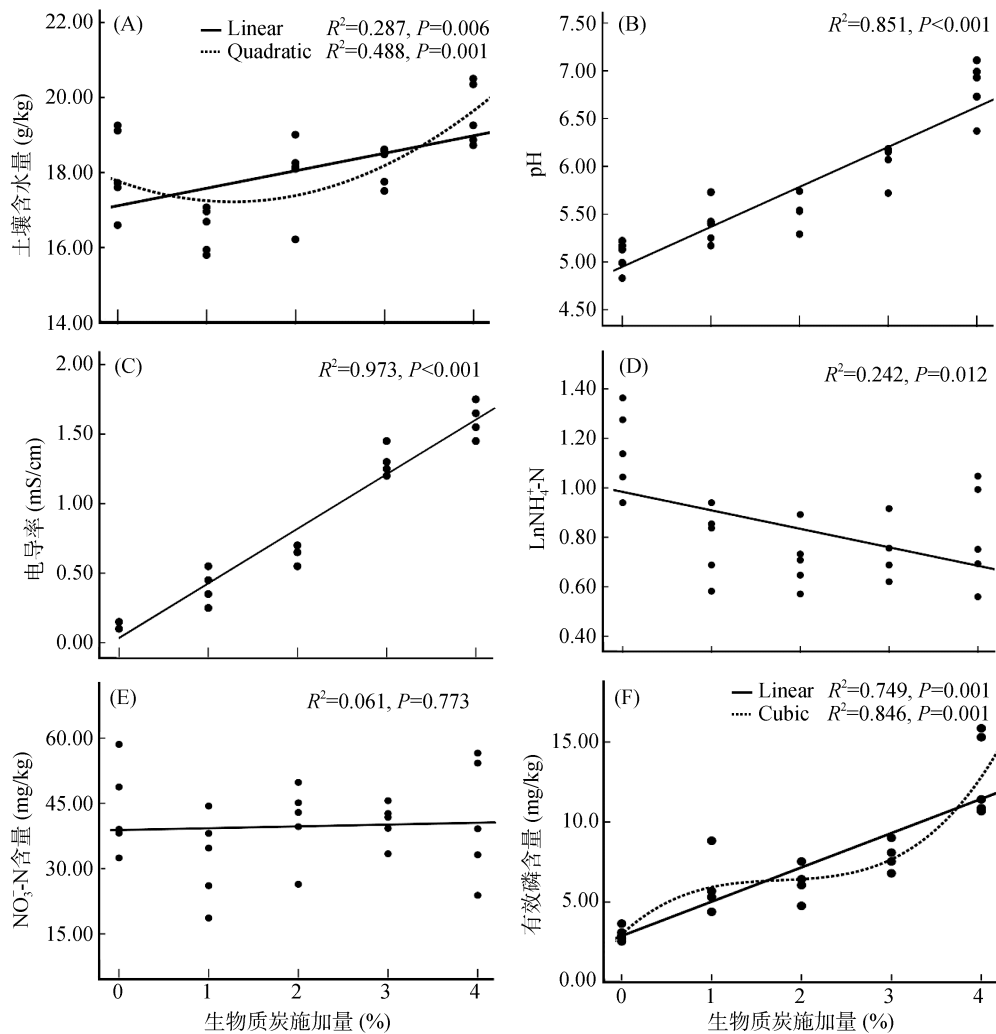


图 2 土壤理化性质随生物质炭施加量的变化趋势

Fig. 2 Changes of soil physicochemical properties with different application content of biochar

效磷含量迅速提高, 达 12.82 mg/kg; 土壤生物质炭施加量与  $\text{NO}_3^-$ -N 含量无显著因果关系。

## 2.2 基于结构方程模型的土壤生物质炭施加量、pH、 $\text{NH}_4^+$ -N 与有效磷因果关系

施加生物质炭显著影响土壤 pH、 $\text{NH}_4^+$ -N 与有效

磷含量(图 2), 而土壤 pH 又与  $\text{NH}_4^+$ -N、有效磷含量显著相关(图 3)。结构方程模型分析表明(图 4), pH 是生物质炭影响土壤有效磷含量的关键中间因素( $P = 0.349$ ;  $\text{RMSEA} < 0.001$ ), 然而, 其并非影响  $\text{NH}_4^+$ -N 含量的中间因素( $P = 0.081$ ,  $\text{RMSEA} = 0.292$ )。

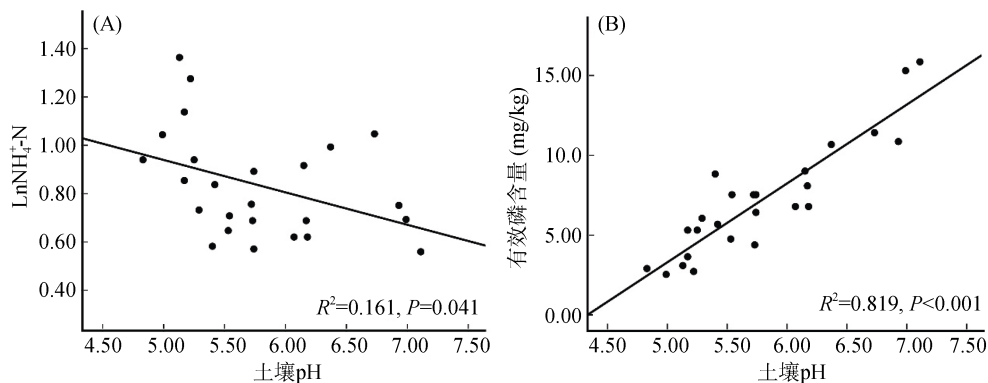
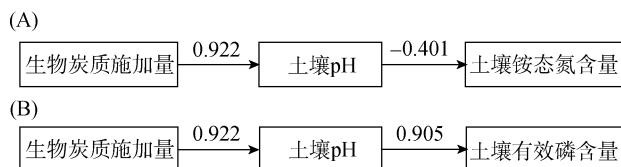


图 3 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N、有效磷含量随 pH 的变化

Fig. 3 Changes of soil ammonium nitrogen and available phosphorus with pH



(箭头表示作用方向, 数值为标准化直接效应,  $P < 0.05$ 。模型 A:  $N = 25$ ,  $\chi^2 = 3.051$ ,  $df = 1$ ,  $P = 0.081$ , RMSEA (渐进残差均方和平方根) = 0.292, 表明该模型不能接受; 模型 B:  $N = 25$ ,  $\chi^2 = 0.875$ ,  $df = 1$ ,  $P = 0.349$ ; RMSEA < 0.001, 表明该模型被数据支持, 可以接受)

图4 基于结构方程模型的土壤生物质炭施用量、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与有效磷含量因果关系

Fig. 4 Structural equation modeling showed the causal effects of soil biochar, pH, ammonium nitrogen and available phosphorus

### 3 讨论

#### 3.1 生物质炭对土壤含水量、pH 与电导率的影响

**3.1.1 施加生物质炭与土壤含水量** 由于生物质炭密度较小, 且具有吸附水分的能力, 施入土壤后可有效降低土壤容重, 提高持水能力, 缓解干旱气候对作物的影响<sup>[12, 14]</sup>。如代快等<sup>[22]</sup>研究了生物质炭对云南典型植烟土壤持水性的影响, 发现施加生物质炭显著提高了土壤持水能力与烤烟产量; 潘金华等<sup>[23]</sup>研究了生物质炭添加对皖南旱地土壤水分特征的影响, 发现生物质炭在一定程度上减少了水分蒸发, 提高了土壤的保水保湿能力。然而, 也有研究报道生物质炭施用量与土壤保水保湿能力的非线性关系; 如曾爱等<sup>[24]</sup>研究了生物质炭对壤土土壤含水量的影响, 发现土壤含水量随生物质炭施用量提高呈先降低后升高趋势。本研究发现, 经过一个月模拟干旱后, 土壤含水量随生物质炭施加量的变化呈二次函数曲线关系, 即高量生物质炭(4%)的添加提高了土壤含水量, 而低量生物质炭(2%)的施加反倒使土壤含水量降低(图2A), 与曾爱等<sup>[24]</sup>的研究结果类似。可能是由于生物质炭的添加在一定程度上提高了土壤持水能力, 但这也可能导致土壤孔隙度增大, 水分蒸发加强, 从而使其含水量降低。

**3.1.2 施加生物质炭与土壤 pH** 生物质炭由于其组成特征, 往往呈碱性。Yuan 等<sup>[13]</sup>研究发现, 生物质炭表面的  $-\text{COO}^-$  和  $-\text{O}^-$  等有机官能团和生物质炭中的碳酸盐是碱的主要存在形态, 碳酸盐对生物质炭碱的贡献随制备温度的升高而增加, 而有机官能团的贡献呈相反的趋势。大量研究证实了生物质炭对酸性土壤的改良作用, 如张祥等<sup>[25]</sup>研究了生物质炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响, 发现施加生物质炭能明显提高土壤 pH, 当施加量为 2.0% 时,

红壤 pH 平均增加了 0.61, 黄棕壤 pH 增加 0.55。应介官等<sup>[26]</sup>研究发现, 生物质炭能显著提高土壤 pH, 并有效缓解铝富集酸性土壤的毒性。本研究表明, 不同生物质炭施加量(1% ~ 4%)均显著提高了酸性红壤 pH(图2B), 当施加量为 4% 时, 土壤 pH 较对照提高了 1.76, 达到 6.83(图1)。根据鲁如坤<sup>[18]</sup>总结, 土壤 pH 在 6.5 ~ 7.0 时, 对磷素及其他养分元素的固定最少, 有利于植物吸收养分, 促进植物生长。因此, 向酸性土壤中施加生物质炭可有效调节土壤酸性, 并有望改善土壤养分可利用性及缓解铝毒等危害<sup>[18, 26]</sup>。

**3.1.3 施加生物质炭与土壤含盐量** 研究表明, 由于生物质炭具有巨大的比表面积, 能吸附土壤中的水溶性盐分<sup>[14]</sup>, 改善植物对盐分特别是钠离子的吸收<sup>[12]</sup>, 从而缓解由于土壤盐渍化给作物带来的危害。农明英等<sup>[27]</sup>研究发现, 施加生物质炭对改良大棚次生盐渍化土壤有显著影响, 其不仅降低了土壤全盐量和电导率, 还提高了作物产量; 孙运朋等<sup>[28]</sup>研究发现, 向土壤中施加生物质炭促进了土壤盐分淋洗; 然而, 生物质炭本身也含有一定量的可溶性盐分<sup>[14]</sup>, 施入土壤后, 短期内可能导致土壤含盐量增加。如吴萍萍等<sup>[29]</sup>研究发现, 施加普通与载铁生物质炭均显著提高了土壤电导率, 周丽平等<sup>[30]</sup>研究发现, 施加秸秆生物质炭提高了冻融期棕壤的电导率。本研究表明, 向土壤中施加生物质炭显著提高了土壤电导率(图2C), 且随施加量的增加而不断提高, 可能是由于生物质炭本身含有一定量的水溶性盐分, 施入土壤后短期内使土壤含盐量增加, 电导率提高, 这也说明施加生物质炭短期内可能并不能改善土壤盐渍化, 降低植物盐害。

#### 3.2 生物质炭对土壤氮、磷养分可利用性的影响

**3.2.1 施加生物质炭与土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量**  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  是作物能直接利用的两种氮素形式, 不同研究揭示生物质炭对土壤氮可利用性的影响存在差异。如陈心想等<sup>[31]</sup>研究发现施加生物质炭明显提高了土壤中的矿质态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  之和)含量, 张祥等<sup>[25]</sup>研究发现生物质炭施加量为 2.0% 时, 红壤碱解氮含量提高了约 30%; 而张瑞等<sup>[32]</sup>研究发现, 施加生物竹炭显著降低了土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量。pH 是土壤最重要的属性之一, 对土壤氮素循环和植物生长发育产生重要影响<sup>[33]</sup>。本研究表明, 施加生物质炭显著提高了土壤 pH 并使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量降低, 可能是由于随着生物质炭施加量的提高, 土壤 pH 升高, 促进了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的挥发; 然而, 结构方程模

型分析并不支持这一假设,说明还有其他因素与更为复杂的机制导致土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  降低,有待进一步研究。土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量与生物质炭施加量无显著关联性,可能是由于本研究所用生物质炭本身  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较低,且其在土壤中短期内相对稳定,从而导致其对土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量影响较小。

**3.2.2 施加生物质炭与土壤有效磷含量** 研究表明,施加生物质炭可有效提高土壤磷可利用性,如高利华与屈忠义<sup>[34]</sup>研究发现,土壤有效磷含量随施炭量增加而显著增加;郑慧芬等<sup>[35]</sup>研究发现,向土壤中添加生物质炭显著提高了茶园溶磷细菌的数量,土壤 pH 与碱性磷酸酶活性,有利于土壤磷素的活化与利用。本研究发现,施加生物质炭显著提高了土壤有效磷含量,由于研究中使用的生物质炭具有较高的有效磷含量,施入后可能会直接导致土壤磷可利用性提高;此外,施加生物质炭提高了土壤 pH,而土壤 pH 是影响磷可利用性的关键因素<sup>[18]</sup>。本研究发现,土壤 pH 与磷可利用性具有极高的关联性( $R^2=0.819$ ,  $P<0.001$ , 图 3B),结构方程模型分析表明,土壤 pH 是生物质炭影响土壤磷可利用性的关键中间因素(图 4B)。这说明,除生物质炭施加对有效磷的直接影响外,随着土壤生物质炭含量的增加,pH 随之提高,土壤对磷素的固定减少,从而使磷可利用性水平提高。

## 4 结论

本研究发现,施加生物质炭显著影响了酸性红壤土壤含水量、pH、电导率、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与有效磷含量。需要注意的是,生物质炭对这些土壤因子的影响有时并非线性的,如生物质炭与土壤含水量的关系更趋向于二次函数关系,与有效磷的关系更趋向于三次函数关系。土壤 pH、电导率与生物质炭施加量呈线性关系,随生物质炭含量的增加而提高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  随生物质炭施加量的提高而显著减少,而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量与生物质炭的施加无显著关系。在改良酸性红壤时,还可以进一步提高生物质炭的施加量,以改善土壤酸碱度并提高养分可利用性。本研究表明,当生物质炭施加量为 4% 时,土壤 pH 近中性(6.83),且土壤含水量、有效磷含量最高;然而,施加生物质炭也可能带来一些不良影响,且不同原材料与生产工艺得到的生物质炭理化特征也会有所不同<sup>[5]</sup>。因此,在大规模应用过程中,建议先进行试验研究,针对不同土壤特点与生物质炭的理化特征,制定合理的施用方案。

## 参考文献:

- [1] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management[M]. 2nd Edition. London: Earthscan, 2015.
- [2] Adeyemi T A, Idowu O D. Biochar: Promoting crop yield, improving soil fertility, mitigating climate change and restoring polluted soils[J]. World News of Natural Sciences, 2017, 8: 27–36.
- [3] Ahmed A, Kurian J, Raghavan V. Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review[J]. Environmental Reviews, 2016, 24(4): 495–502.
- [4] O'Connor D, Peng T Y, Zhang J L, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 815–826.
- [5] Ladygina N, Rineau F. Biochar and soil biota[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] 牟苗, 吴风云, 徐武美, 等. 土壤熏蒸与施加生物炭对三七苗期存活率的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 35–39.
- [7] Ippolito J A, Laird D A, Busscher W J. Environmental benefits of biochar[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 967–972.
- [8] 潘占兵, 张龙, 杨瑞, 等. 黄土高原土壤旱化研究综述[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 287–291.
- [9] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160–167.
- [10] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233–1245.
- [11] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459–467.
- [12] Ali S, Rizwan M, Qayyum M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14): 12700–12712.
- [13] 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.
- [14] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320–335.
- [15] 李庆远, 张效年. 中国红壤的化学性质[J]. 土壤学报, 1957, 5(1): 78–96.
- [16] 张绪美, 沈文忠, 胡青青. 太仓市郊大棚菜地土壤盐分累积与分布特征研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 987–991.
- [17] Sherwood S, Fu Q. A drier future?[J]. Science, 2014, 343(6172): 737–739.
- [18] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] 官会林, 孙世中, 郭云周, 等. 香石竹设施栽培土壤可溶性盐分主成分分析[J]. 土壤, 2011, 43(5): 817–821.

- [20] Grace J B, Anderson M T, Olf H, et al. On the specification of structural equation models for ecological systems[J]. *Ecological Monographs*, 2010, 80(1): 67–87.
- [21] Hooper D, Coughlan J, Mullen M. Structural equation modelling: Guidelines for determining model fit[J]. *Electronic Journal of Business Research Methods*, 2008, 6(1): 53–60.
- [22] 代快, 计思贵, 张立猛, 等. 生物炭对云南典型植烟土壤持水性及烤烟产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 44–51.
- [23] 潘金华, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 生物炭添加对皖南旱地土壤物理性质及水分特征的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 320–326.
- [24] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1009–1015.
- [25] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 979–984.
- [26] 应介官, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对铝富集酸性土壤的毒性缓解效应及潜在机制[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4576–4583.
- [27] 农明英, 张乃明, 史静, 等. 外源有机物料对次生盐渍化大棚土壤的改良效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(6): 6–10.
- [28] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和无机肥对盐碱滩涂围垦农田土壤性状的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 454–459.
- [29] 吴萍萍, 李录久, 李敏. 生物炭负载铁前后对复合污染土壤中 Cd、Cu、As 淋失和形态转化的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3959–3967.
- [30] 周丽丽, 李婧楠, 米彩虹, 等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 171–179.
- [31] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [32] 张瑞, 杨昊, 张芙蓉, 等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2404–2411.
- [33] 杨红, 徐唱唱, 曹丽花, 等. 米林县不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 和无机氮变化特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2397–2404.
- [34] 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.
- [35] 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.