

# 田间陈化生物质炭提高稻田土壤团聚体稳定性和磷素利用率

宋燕凤, 张前前, 吴震, 段鹏鹏, 熊正琴\*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095)

**摘要:** 【目的】生物质炭因其巨大的比表面积和稳定的结构而被用作土壤改良剂。然而关于田间陈化生物质炭对土壤肥力和养分利用效率影响的研究相对缺乏。通过定位试验, 分析田间不同陈化年限的生物质炭对水稻产量和养分利用效率的影响。【方法】田间定位试验设在江苏南京, 供试土壤为粘质水稻土。共设置 5 个处理, 分别是不施磷肥对照 (CK)、施用磷肥 (P) 及磷肥配施新鲜生物质炭 (PB<sub>0y</sub>, 2017 年施入)、2 年陈化生物质炭 (PB<sub>2y</sub>, 2015 年施入) 和 5 年陈化生物质炭 (PB<sub>5y</sub>, 2012 年施入)。在水稻收获后采集土壤样品进行团聚体分级, 测定大团聚体 (250~2000 μm)、微团聚体 (53~250 μm)、粉粒 (2~53 μm)、粘粒 (< 2 μm) 含量以有效磷含量和基本理化性质, 同时测定水稻产量和磷素利用效率。【结果】与 P 处理相比, PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理显著提高 250~2000 μm 大团聚体的比例 (69.2%~107.8%), 降低 2~53 μm 粉粒 (13.1%~14.7%) 和 < 2 μm 粘粒 (6.9%~41.9%) 的比例, 而 PB<sub>0y</sub> 与 P 处理相比各粒级比例均无显著差异; PB<sub>0y</sub>、PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理土壤有机碳 (SOC) 提高了 18.5%~58.5%, 全磷含量提高了 5.7%~17.1%, 但 2~53 μm 粒级 SOC 含量无显著差异。与 P 处理相比, PB<sub>0y</sub> 处理对水稻产量和磷素利用效率影响不显著, PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理均可显著提高水稻产量 (13.7% 和 16.3%) 和磷素利用率 (35.4% 和 45.5%)。由结构方程模型可知, 陈化生物质炭 (PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub>) 通过改善土壤养分状况 (SOC、全磷含量、碳磷比等) 和土壤结构 (250~2000 μm 大团聚体比例增加), 保证了水稻产量和磷储量。【结论】与新鲜生物质炭相比, 陈化生物质炭可有效增加 250~2000 μm 大团聚体比例以及土壤有效磷和全磷的保护, 从而促进植物对磷的吸收利用, 达到增加产量和磷素利用效率的目的。5 年陈化生物质炭的改良效果好于 2 年陈化生物质炭。

**关键词:** 水稻; 陈化生物质炭; 土壤团聚体; 作物产量; 磷素利用效率

## Field-aged biochar improves soil aggregation stability and phosphorus use efficiency in paddy field

SONG Yan-feng, ZHANG Qian-qian, WU Zhen, DUAN Peng-peng, XIONG Zheng-qin\*

(College of Resources of Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Biochar has been widely used as soil amendment because of its large surface area and stable structures. However, the long-term effects of field-aged biochar on soil fertility and nutrient availability are relatively lacking. Therefore, we compared the effects of field-aged biochars at different years on rice crop yield and nutrient use efficiencies through in situ long-term field experiments. 【Methods】 The long-term field experiment was established in Nanjing, Jiangsu, which belongs to clayey paddy soil. Five treatments were carried out in triplicates as following: control without phosphate fertilizer (CK), phosphate fertilizer (P), P with fresh biochar amended in 2017 (PB<sub>0y</sub>), P with 2-year field-aged biochar amended in 2015 (PB<sub>2y</sub>) and with 5-year field-aged biochar amended in 2012 (PB<sub>5y</sub>). Soil samples were collected after rice harvest, and the contents of soil aggregate size classes of macro-aggregate (MacroA, 250–2000 μm), micro-aggregate (MicroA, 53–250 μm), silt fraction (SiltF, 2–53 μm) and clay fraction (ClayF, < 2 μm), available P content and basic physicochemical properties were measured. The rice yields and P uptake by rice were determined. 【Results】 The PB<sub>2y</sub> and PB<sub>5y</sub>

收稿日期: 2019-07-17 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 公益性行业农业科研专项 (201503106); 国家自然科学基金项目 (41977078)。

联系方式: 宋燕凤 E-mail: 2017103083@njau.edu.cn; \* 通信作者 熊正琴 E-mail: zqxiong@njau.edu.cn

treatments significantly increased the content of MacroA (250–2000  $\mu\text{m}$ ) by 69.2%–107.8%, decreased that of SiltF (2–53  $\mu\text{m}$ ) by 13.1%–14.7% and ClayF (<2  $\mu\text{m}$ ) by 6.9%–41.9%, while  $\text{PB}_{0\text{y}}$  did not, compared with the P treatment. The  $\text{PB}_{0\text{y}}$ ,  $\text{PB}_{2\text{y}}$  and  $\text{PB}_{5\text{y}}$  treatments significantly increased SOC by 18.5%–58.5% and total P by 5.7%–17.1%, but did not significantly increased in SOC content of 2–53  $\mu\text{m}$  fraction, compared to the P treatment. Similarly, both the  $\text{PB}_{2\text{y}}$  and  $\text{PB}_{5\text{y}}$  treatments significantly increased rice yield by 13.7% and 16.3% and phosphorus use efficiency by 35.4% and 45.5%, respectively, while  $\text{PB}_{0\text{y}}$  did not, compared to the P treatment. Based on the structural equation modeling, the field-aged biochar ( $\text{PB}_{2\text{y}}$  and  $\text{PB}_{5\text{y}}$ ) increased the rice yield and P storage by improving soil nutrient status (SOC, TP, SOC/TP, etc.) and structure (increasing the ratio of soil MacroA). **【 Conclusions 】** As compared to the fresh biochar amendment, the field-aged biochar at different years effectively increased the ratio of soil macro-aggregates of 250–2000  $\mu\text{m}$  and the protection of soil available phosphorus and total phosphorus, thus facilitating the absorption and utilization of phosphorus by plants and improving yield and phosphorus use efficiency. The improvement effects of field-aged biochar at 5-year is greater than field-aged biochar at 2-year.

**Key words:** rice; field-aged biochar; soil aggregate; crop yield; phosphorus use efficiency

生物质炭是指生物质在相对高温条件下, 经厌氧热解而形成的一类较稳定且含碳丰富的固体物质, 具有丰富的表面活性官能团、较多的孔隙和较大的比表面积, 是一种呈碱性且吸附能力强的多用途材料<sup>[1]</sup>。近 20 年来, 生物质炭施用到土壤中能改善土壤 pH 条件和养分状况, 改善土壤结构和保水能力<sup>[2-4]</sup>, 具有固碳减排和增产增效的潜力<sup>[5-6]</sup>。因此, 生物质炭在农业生产和污染修复领域广受关注和推广。

生物质炭含有较多的可溶性成分, 在短期内能够促进微生物生长, 或直接供植物吸收利用促进植物生长<sup>[7]</sup>。但是生物质炭在田间经过长期的干湿交替、风化、雨水侵蚀和微生物利用等作用被氧化破碎、颗粒变小, 比表面积、含氧官能团和吸附性能增加<sup>[8]</sup>, 因其性质不同于新施入的生物质炭而被称为陈化生物质炭。陈化生物质炭促进土壤矿物及根系和微生物的相互胶结, 改善土壤结构和保水保肥能力。米会珍等<sup>[9]</sup>研究表明, 生物质炭施入 2 年后显著增加大团聚体的形成, 且显著增加大、微团聚体有机碳的贡献率。Major 等<sup>[10]</sup>也发现生物质炭施加 1 年后, 对作物产量没有显著影响, 而施加 2 和 3 年后均提高了作物产量, 表明生物质炭效果受到陈化时间的影响<sup>[11-12]</sup>。然而目前生物质炭研究多集中在短期效应上, 缺乏大田生物质炭陈化的长期试验研究。例如, Jeffery 等<sup>[13]</sup>通过 meta 分析表明, 生物质炭应用的田间研究试验平均时间为 1.3 年 (范围 0.29~4 年), 盆栽试验小于 1 年 (通常仅 1~2 个月)。并且 Glaser 等<sup>[14]</sup>通过 meta 分析发现在农业土壤中, 生物质炭无论是短期或中长期施用均增加磷的可利用

性。磷在碱性土壤中的溶解度主要受磷与  $\text{Ca}^{2+}$  的相互作用调节, 而在酸性土壤中, 磷的植物有效性主要由  $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  通过形成 Al-和 Fe-磷酸盐来调节。生物质炭施用于酸性土壤会增加土壤 pH, 导致磷对 Fe 和 Al 氧化物的吸附降低<sup>[15]</sup>。此外, 生物质炭中高含量的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  以及钙质物质的存在可以形成磷酸钙和磷酸镁, 从而减少植物对磷的吸收<sup>[15]</sup>。鉴于我国目前磷矿稀缺, 磷素利用效率普遍偏低和生物质炭对磷营养影响的研究缺乏的实际<sup>[16]</sup>, 迫切需要探究生物质炭陈化过程对作物生长和磷素养分改善的机制。

本研究的目的是阐明生物质炭田间陈化不同年限对土壤团聚体粒级和养分 (碳和磷) 分布的影响, 以及对水稻产量和磷素利用效率的影响。本研究假设田间陈化生物质炭在长期水稻-小麦轮作系统下, 将显著增加大团聚体比例和大、微团聚体营养分布, 改善土壤结构, 促进根系生长及对水分和养分的吸收<sup>[17]</sup>, 从而提高磷素利用效率和水稻产量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况和供试生物质炭性质

试验地位于江苏省南京市江宁区秣陵镇 (31°48'N、118°50'E), 该地位于典型的亚热带季风气候区, 年平均气温 15.6℃, 年平均降水 117 天, 年均降水量 1106.5 mm, 年均日照时间为 1927.4 h, 试验观测期间日降水和气温见图 1。

试验地土壤类型为水稻土, 质地为粘壤土。供试生物质炭为在 400℃ 的高温限氧条件下炭化的小

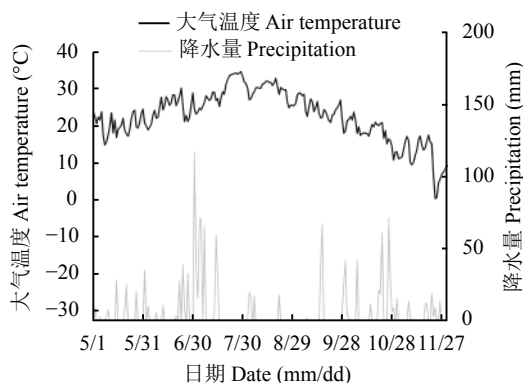


图 1 2017 年水稻生长季降水量和气温

Fig. 1 Daily precipitation and temperature during the rice growing season in 2017

麦秸秆, 购自河南三利新能源有限公司。其基本性质为: pH 9.2、总碳 437.0 g/kg、总氮 7.2 g/kg、阳离子交换量 24.3 cmol/kg、表面积 16.77 m<sup>2</sup>/g、灰分 21.4%。

## 1.2 试验设计与管理

田间定位试验开始于 2012 年, 生物质炭在田间陈化不同年限后于 2017 年 6 月至 2017 年 11 月开展对水稻-小麦轮作系统中土壤结构和水稻产量的影响试验。试验采用随机区组设计, 共设 5 个处理: CK (不施磷肥), P (施磷肥), PB<sub>0y</sub> (磷肥和新鲜生物质炭, 2017 年 6 月施入), PB<sub>2y</sub> (磷肥和 2 年陈化生物质炭, 2015 年 6 月施入), PB<sub>5y</sub> (磷肥和 5 年陈化生物质炭, 2012 年 6 月施入)。生物质炭均在小麦收获后、水稻移栽前施入, 翻耕混匀。为保证生物质炭田间施入时的均一性, 自 2012 年同一批购入后一部分保存在长 1 m × 宽 1 m 的密封 PVC 塑料袋 (天津麦福德包装制品有限公司) 中, 连续 3 次抽真空、充 N<sub>2</sub> 以保证 O<sub>2</sub> 含量低于 0.5%。其他田间管理措施均按当地农民每年水稻-小麦轮作体系常规管理进行。水稻季采用淹水-烤田-复水-落干模式; 小麦季自然落干, 无灌溉。水稻季、小麦季钙镁磷肥 (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计) 60 kg/hm<sup>2</sup> 和氯化钾 (以 K<sub>2</sub>O 计) 120 kg/hm<sup>2</sup> 均在基肥时一次性施入, 每一季作物尿素氮肥施用量为 N 250 kg/hm<sup>2</sup>, 以 4 : 3 : 3 (基肥 : 追肥 : 追肥) 的比例分 3 次施入。生物质炭用量均为 40 t/hm<sup>2</sup>, 施入后田间自然陈化。每个处理 3 次重复, 共计 15 个小区, 每个小区面积为 20 m<sup>2</sup> (5 m × 4 m), 各小区之间设有 20 cm 宽、40 cm 深的水泥隔板和独立的灌水排水系统。在该试验观测期内, 2017 年 6 月 17 日施入基肥同时移栽水稻, 7 月 29 日烤田阶段开始, 持续一周左右, 7 月 18 日和 8 月 28 日追肥, 10 月 25 日水稻收获。

## 1.3 样品的采集与测定

2017 年 10 月水稻收获后, 多点采集每个处理小区 0—20 cm 深度的土样后混合, 并将混合土样密封保存在塑料袋中运回实验室, 防止水分流失, 用于团聚体分级和基础理化性质测定。

1.3.1 土壤基础理化性质 依据鲍士旦<sup>[18]</sup>的测定方法, 土壤容重采用环刀法测定; 土壤充水孔隙度 (WFPS) 由土壤质量含水量和土壤容重计算而得; 土壤 pH 按水土比 5 : 1 浸提, 用 Mettler-Toledo pH 计 (FE28, 上海) 测定; 电导率按水土比 5 : 1 浸提, 用 Mettler-Toledo 电导率仪 (FE30-K, 上海) 测定; 土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化的方法测定; 全氮含量采用元素分析仪 (Vario MAX, 艾力蒙塔, 德国) 测定; 土壤全磷含量采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮、钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷含量采用 HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取、钼锑抗比色法测定; 速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 溶液浸提、火焰光度法测定。水稻收获后每个小区随机取 3 点 1 m × 1 m 区域计产, 测定水稻生物量。同时田间脱粒后将籽粒带回实验室, 风干计产。每个小区随机取 10 株水稻, 测定水稻籽粒的磷 (P) 含量, 计算磷素利用效率。

WFPS (%) 和磷素利用效率 (%) 计算公式如下:

$$\text{WFPS} = \text{质量含水量} \times \text{土壤容重} / \text{土壤孔隙度} \times 100\%$$

土壤孔隙度 = 1 - 土壤容重 / 土壤颗粒密度, 本研究采用土壤颗粒密度平均值为 2.65 g/cm<sup>3</sup>。

磷素利用效率 = (施磷区水稻籽粒总吸磷量 - 不施磷区水稻籽粒总吸磷量) / 磷肥施用量 × 100%。

1.3.2 团聚体分级和团聚体稳定性 团聚体分级采用经修改的 Six<sup>[19]</sup>的湿筛法。具体为: 将相当于 100 g 干土的鲜土放在 2 mm 筛上, 轻轻浸在去离子水中 10 min, 手动将筛子上下移动 3 cm, 2 min 内重复 50 次, 实现团聚体分离, 使所有土样通过 2 mm 筛, 将稳定的 > 2000 μm 的物质 (包括植物残渣和石砾等) 从筛网上洗出并收集, 将通过 2 mm 筛的样品过 0.25 mm 筛, 可得 250~2000 μm 的大团聚体 (Macro-aggregate, MacroA), 并将其转移到预先称重的烧杯中干燥。用相同的方法, 将通过 0.25 mm 筛的样品多次通过 0.053 mm 筛, 保留在筛网上的为 53~250 μm 的微团聚体 (Micro-aggregate, MicroA)。将通过 0.053 mm 筛的样品转移到离心瓶中, 逐步离心, 先 600 r/min 离心 4 min, 将上清液转移到其他离心瓶, 得 2~53 μm 的粉粒 (SiltF); 继续 4200 r/min 离心 36 min, 去除上清液, 得到 < 2

$\mu\text{m}$  的粘粒 (ClayF)。将筛分获得的 MacroA、MicroA、SiltF 和 ClayF 团聚体样品冷冻干燥、称重, 计算不同团聚体粒级比例。土壤团聚体稳定性用平均重量直径 (MWD,  $\mu\text{m}$ ) 表示, 计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  粒级团聚体质量所占的百分含量;  $\bar{R}_i$  为第  $i$  粒级团聚体的平均直径。

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析; 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ); 用 Origin Pro 2017 软件作图和相关性分析。利用 IBM SPSS Amos 22 软件构建结构方程模型检验 SOC、全磷含量、土壤团聚体平均重量直径、水稻产量和磷素利用效率之间的假设因果关系。为了简化模型, 在结构方程模型分析之前我们使用主成分分析压缩多变量数据, 其中选择包括全碳含量、全磷含量、碳氮比和碳磷比的主成分作为描述土壤理化性质的代表性参数 (可以解释总体变异的 81.7%)。结构方程模型构建过程中, 根据 Duan 等<sup>[20]</sup> 采用的拟合标准进行评估, 如卡方/自由度、概率水平、调整的拟合优度指数、近似均方根误差和赤池信息标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 田间陈化生物质炭对土壤理化性质的影响

如表 1 所示, 与 CK 处理相比, P 处理的 pH 和碳磷比显著降低, 全磷和有效磷显著提高。与 P 处理相比, PB<sub>0y</sub> 和 PB<sub>2y</sub> 处理 pH、EC、全氮、全磷、有效磷有增加趋势, 但差异不显著; 而 PB<sub>5y</sub> 处理分别显著提高 7.5%、15.5%、24.2%、17.1%、58.0%; PB<sub>0y</sub>、PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理的 SOC 和速效钾均显著提高, 其中 SOC 随着生物质炭陈化年限增加而增加, 分别提高 18.5%、46.4% 和 58.5%。同时, 与 P 处理相比, PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理的土壤容重分别显著降低 3.3% 和 4.2%, 碳磷比显著提高 30.0% 和 35.6%。由此表明, 陈化生物质炭仍具有改善土壤肥力的潜力。

### 2.2 田间陈化生物质炭对土壤团聚体粒级及其养分分布的影响

如图 2 所示, 各处理主要的团聚体粒级为粉粒。与 P 处理相比, PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理使大团聚体显著增加 69.2%~107.8%, 粉粒和粘粒减少 13.1%~14.7% 和 6.9%~41.9%, 而 PB<sub>0y</sub> 与 P 处理相比, 各粒级比例均无显著差异。SOC 和全磷含量主要分布在大团聚体和微团聚体中, 与 P 处理相比, PB<sub>0y</sub>、PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> 处理使 SOC 含量分别增加 96.7%~117.0% 和 10.7%~49.6%, 全磷含量分别增加 22.0%~38.6% 和 19.5%~68.6%, 同时也使粉粒

表 1 田间陈化生物质炭对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of field-aged biochar on soil physicochemical properties

土壤性质 Soil property	CK	P	PB <sub>0y</sub>	PB <sub>2y</sub>	PB <sub>5y</sub>
pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	6.08 ± 0.03 a	5.56 ± 0.05 c	5.70 ± 0.28 bc	5.85 ± 0.14 abc	5.98 ± 0.24 ab
EC (1:5 H <sub>2</sub> O, mS/m)	89.00 ± 4.01 c	97.00 ± 2.65 bc	98.55 ± 3.94 b	101.00 ± 6.47 b	112.00 ± 3.02 a
土壤容重 BD (g/cm <sup>3</sup> )	1.22 ± 0.01 a	1.20 ± 0.02 a	1.19 ± 0.04 ab	1.16 ± 0.01 b	1.15 ± 0.02 b
WFPS (%)	72.55 ± 5.55 a	72.14 ± 3.97 a	75.52 ± 7.55 a	76.02 ± 4.92 a	79.76 ± 5.54 a
有机碳 SOC (g/kg)	14.85 ± 0.57 c	15.22 ± 0.55 c	18.03 ± 0.88 b	22.28 ± 1.71 a	24.13 ± 1.72 a
全氮 Total N (g/kg)	1.18 ± 0.10 c	1.49 ± 0.36 bc	1.61 ± 0.05 ab	1.67 ± 0.05 ab	1.85 ± 0.11 a
全磷 Total P (g/kg)	0.72 ± 0.03 c	1.05 ± 0.10 b	1.11 ± 0.07 ab	1.17 ± 0.01 ab	1.23 ± 0.14 a
碳氮比 SOC/total N	12.64 ± 1.21 ab	10.63 ± 2.41 b	11.19 ± 0.28 ab	13.34 ± 0.78 a	13.11 ± 1.19 ab
碳磷比 SOC/total P	20.74 ± 0.80 a	14.65 ± 1.90 c	16.20 ± 0.71 bc	19.05 ± 1.23 ab	19.86 ± 3.59 ab
有效磷 Available P (mg/kg)	14.05 ± 0.98 c	18.25 ± 2.47 b	19.88 ± 2.27 b	22.22 ± 2.39 b	28.85 ± 2.46 a
速效钾 Available K (mg/kg)	72.15 ± 3.85 b	82.18 ± 8.85 b	96.57 ± 7.75 a	108.00 ± 5.36 a	105.14 ± 2.85 a

注 (Note): CK—不施磷肥对照 Without P fertilizer control; P—磷肥 Phosphate fertilizer; PB<sub>0y</sub>、PB<sub>2y</sub>、PB<sub>5y</sub> 分别表示磷肥配合新鲜生物质炭、2 年陈化生物质炭、5 年陈化生物质炭 PB<sub>0y</sub>、PB<sub>2y</sub> 和 PB<sub>5y</sub> are treatments of applying phosphate fertilizer with fresh biochar, and field-aged biochar at 2-year and 5-year, respectively; 数值为平均值 ± 标准差 Data refers to mean ± SD; 同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same row indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

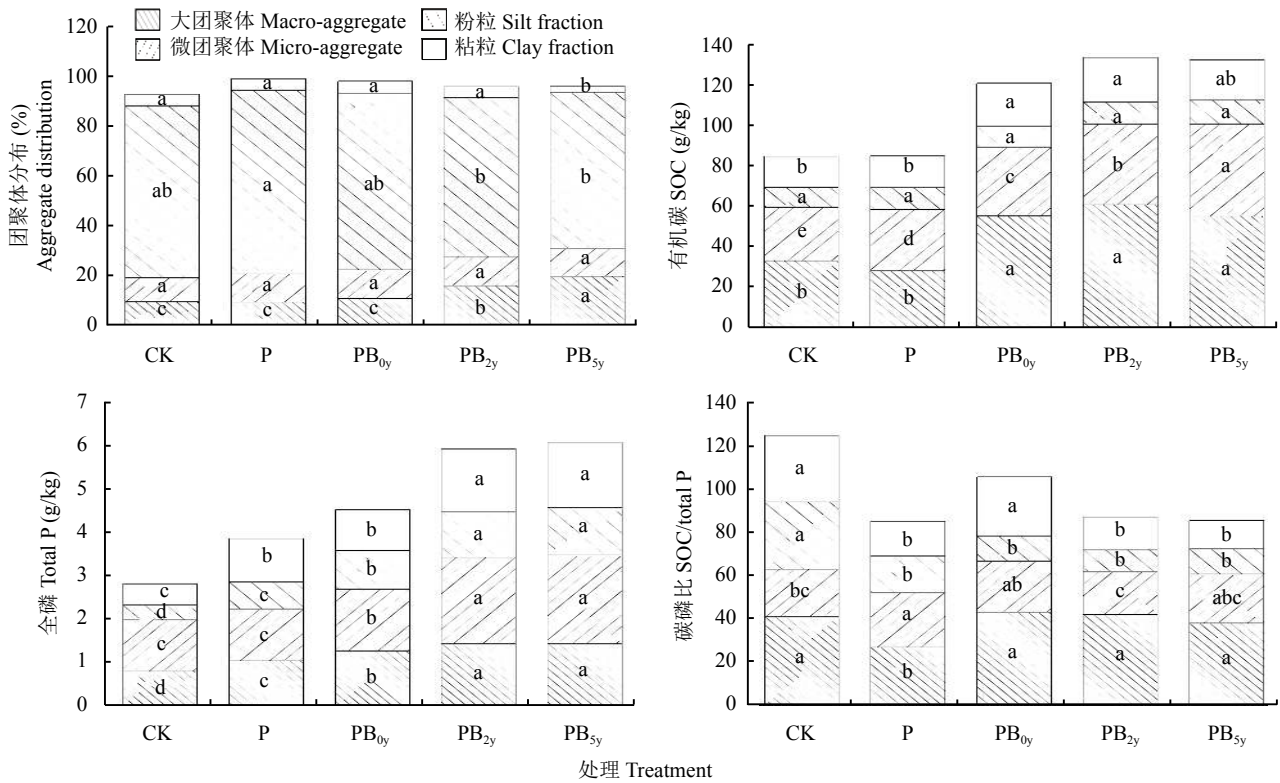


图 2 不同年限田间陈化生物质炭处理下土壤团聚体和颗粒组成及其有机碳、全磷含量和碳磷比变化

Fig. 2 Soil aggregate and particle composition, and its SOC, total P contents and SOC/total P with field-aged biochar at different years

[注 (Note): 柱子中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ )

和粘粒中的全磷含量增加 42.5%~74.8% 和 45.0%~49.8%; 且随着生物质炭陈化年限增加, SOC 和全磷含量增加, 碳磷比降低, 而粉粒中 SOC 含量无显著差异, 施磷肥处理各粒级碳磷比遵循以下顺序: 大团聚体 > 微团聚体 > 粘粒 > 粉粒。

### 2.3 田间陈化生物质炭对水稻产量和磷素利用效率的影响

如图 3 所示, 施用磷肥显著提高水稻产量和磷素利用效率。与 P 处理相比,  $PB_{0y}$  处理的水稻产量和磷素利用效率差异不显著;  $PB_{2y}$  和  $PB_{5y}$  处理产量分别显著提高 13.7% 和 16.3%, 磷素利用效率提高 35.4% 和 45.5%; 随着生物质炭陈化年限的增加, 增产增效更显著。

### 2.4 土壤理化性质和团聚体平均重量直径对水稻产量和磷素利用效率影响的结构方程模型

如图 4 所示, 结构方程模型分析表明, 模型可以解释水稻产量和磷素利用效率总变异的 90% 和 97%。其中, SOC 和全磷含量对土壤团聚体平均重量直径 (路径系数 = 0.71)、土壤团聚体平均重量直径

对土壤有效磷含量 (路径系数 = 0.81) 均具有极显著的影响, 土壤有效磷的增加显著提高植株含磷量 (路

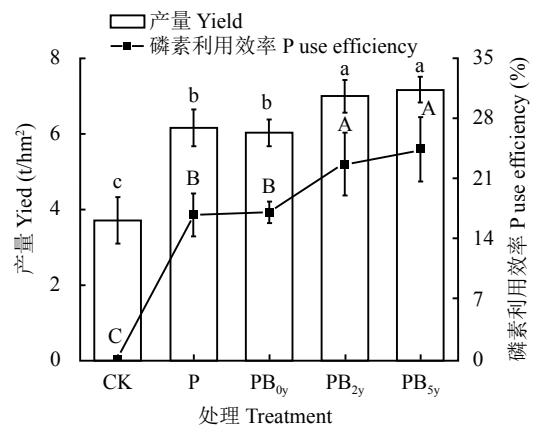


图 3 陈化生物质炭对水稻产量和磷素利用效率的影响  
Fig. 3 The crop yield and phosphorus use efficiency affected by field-aged biochar

[注 (Note): 不同小写字母表示处理间产量差异显著 Different lowercase letters indicate significant difference of yield among treatments ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示处理间磷素利用效率差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercase letters indicate significant difference of phosphorus use efficiency among treatments ( $P < 0.05$ ).]

径系数 = 0.97), 且水稻产量和磷素利用效率直接受植株含磷量 (路径系数为 0.73 和 0.63) 的极显著影响。因此土壤理化性质和土壤团聚体平均重量直径可通过直接影响土壤有效磷和植株含磷量间接影响作物产量和磷素利用效率。

### 2.5 土壤团聚体平均重量直径和团聚体组分、有机碳、水稻产量以及磷素利用效率的相关性分析

如图 5 所示, 土壤团聚体平均重量直径与大团聚体呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ ), 与 SOC 含量、水稻产量和磷素利用效率呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与微团聚体相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。增加大团聚体极显著增加土壤团聚体平均重量直径, 从而显著增加 SOC 含量、水稻产量和磷素利用效率。由此可见, 改善团聚体稳定性能有效提高作物产量和养分利用效率。

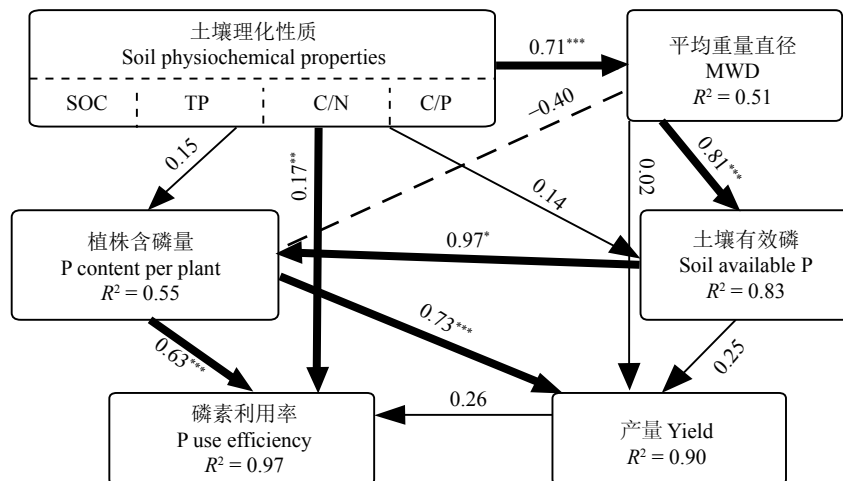
## 3 讨论

### 3.1 陈化生物质炭对土壤理化性质、团聚体粒级和营养分布的影响

有机质影响土壤结构和理化性质, 是团聚体形成和稳定的主要因素之一, 然而土壤营养和理化性质在粒级尺度上的变化受到的关注很少<sup>[21]</sup>。本研究中, 大团聚体与土壤团聚体平均重量直径有极显著正相关关系 (图 5A), 且  $PB_{0y}$ 、 $PB_{2y}$  和  $PB_{5y}$  处理都增

加了大团聚体比例 (图 2A), 表明生物质炭可以促进大团聚体的形成, 增强团聚体稳定性<sup>[22]</sup>。这主要因为生物质炭在陈化过程中可以与粘土矿物相结合, 促进大团聚体的形成<sup>[23]</sup>, 也影响微生物代谢及作物和根系的生长发育, 间接地提高土壤有机物质 (如根系及其分泌物) 含量, 进而提高土壤团聚体稳定性<sup>[5, 24]</sup>。此外, 本研究中陈化生物质炭降低土壤容重 (表 1), 也验证了其对于团聚体形成的影响。Muñoz 等<sup>[25]</sup>认为生物质炭降低土壤容重主要归因于生物质炭较低的容重和颗粒密度, 或生物质炭和土壤之间的相互作用。

相比 P 处理, 5 年陈化生物质炭可提高土壤 pH (表 1)。同时, 陈化生物质炭还增加 SOC 和全磷含量, 且大团聚体和微团聚体中 SOC 和全磷含量显著高于其他粒级 (图 2)。这是因为生物质炭富含 K、Ca、Mg 和 Na 等阳离子, 可以增加阳离子交换量<sup>[26]</sup>。团聚体分级理论也证实了这一点, 即较大的团聚体本身由较小的团聚体和将它们结合在一起的有机结合物 (即根和植物残留物等) 组成, 因此有机质含量随团聚体粒级的增加而增加<sup>[24]</sup>。Schmidt 等<sup>[27]</sup>研究也发现, 施用生物质炭后增加土壤阳离子交换量和持水能力, 进而增加土壤有机质。同时热解作用将生物质炭中的有机磷转化为无机磷, 导致磷的富集, 并且由于生物质炭具有与表面官能团相关的化学吸



卡方/自由度  $CHI/DF = 0.738$ ; 概率水平  $P = 0.529$ ; 调整的拟合优度指数  $AGFI = 0.670$ ;  
近似均方根误差  $RMSEA = 0.000$ ; 赤地信息标准  $AIC = 38.213$

图 4 土壤理化性质和土壤团聚体平均重量直径对水稻产量和磷素利用效率的结构方程模型

Fig. 4 The structural equation model of the effect of soil physiochemical properties and the mean weight diameter of aggregates (MWD) on rice yields and phosphorus use efficiency

[注 (Note): 框内的字显示预测变量被解释的方差百分比 The numbers within boxes show the explained percentage of the variance by the predictor variable; 箭头上方的数字表示标准化路径系数 The numbers above the arrows denote the standardized path coefficients; 箭头宽度与数字相邻的路径系数的强度成比例 The width of the arrows is proportionate to the strength of the path coefficients adjacent with numbers; 实线和虚线分别代表正路径和负路径 Solid and dashed lines represent positive and negative paths, respectively; \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ ; \*\*\*— $P < 0.001$ ; 拟合优度统计数据显示在建模框架下方 Goodness-of-fit statistics are shown underneath the modeling frame.]

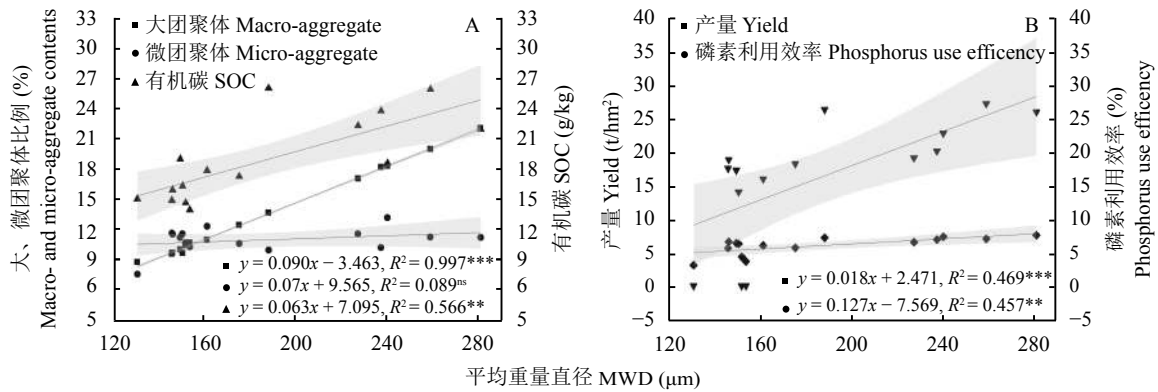


图5 土壤结构(即平均重量直径)和团聚体组分、有机碳含量、水稻产量以及磷素利用率的相关关系

Fig. 5 Linear regression relationship between soil structure (i.e. MWD) and aggregate components, SOC content, rice yields and phosphorus use efficiency

[注 (Note): 阴影部分表示 95% 置信区间 The shaded bands with different colors show 95% point-wise confidence intervals.]

附和离子交换能力,从而保留更多的磷<sup>[28]</sup>。DeLuca等<sup>[29]</sup>研究发现生物质炭通过增加土壤碱度提高土壤有效磷含量,这与本研究结果一致(表1)。这可能因为土壤pH的增加提高了 $PO_4^{3-}$ -P的溶解度,而作物主要摄取正磷酸盐阴离子( $PO_4^{3-}$ )形式的磷<sup>[30]</sup>,从而提高磷的可利用性。生物质炭也促进植物根系的生长,活化根系周围的磷,增加土壤磷的有效性<sup>[31]</sup>。

结构方程模型分析显示,SOC对土壤团聚体平均重量直径有极显著的积极影响(图4),同时相关性分析也显示,SOC与土壤团聚体平均重量直径呈显著正相关(图5),表明陈化生物质炭可以保持土壤有机质水平和团聚体稳定性<sup>[32]</sup>。这主要与生物质炭陈化后氧化官能团增加以及土壤中保留了较高的碳有关<sup>[23]</sup>,有助于土壤颗粒和生物质炭两者结合、促进团聚体形成。此外,生物质炭作为核心增加团聚作用,并且通过增加根系和微生物粘液的分泌增加有机质,进而增加土壤团聚体<sup>[33]</sup>。

### 3.2 陈化生物质炭对水稻产量和磷素利用率的影响

徐敏等<sup>[34]</sup>研究表明,生物质炭能改善土壤物理性质,提高土壤养分含量,促进作物生长,提高作物产量。与P处理相比, $PB_{0y}$ 处理的水稻产量提高不显著,而 $PB_{2y}$ 和 $PB_{5y}$ 处理产量均显著提高(图3)。Jones等<sup>[31]</sup>研究也发现生物质炭在施用后第1季对玉米产量或养分含量没有影响,但发现果园草生物量和质量在第2年和第3年增加。随着时间推移,生物质炭效应更强。产生这种正向效应的原因主要有以下两个方面:一是生物质炭自身含有一定数量的对作物生长发育有益的元素(如C、N、P、K等),

可为作物生长发育提供良好的养分供应<sup>[35]</sup>;二是生物质炭有助于改善土壤理化性状,如pH、容重、孔隙度、持水性等<sup>[36]</sup>,使土壤团聚体增加,土壤结构更稳定,从而作物能够更有效地捕获营养物质<sup>[37]</sup>,促进作物增产。正如本研究表明,陈化生物质炭处理降低土壤容重,增加土壤团聚体和养分,改善土壤质量,为作物生长提供良好的土壤环境。

本研究表明,陈化生物质炭也提高磷素利用率(图3)。生物质炭可以影响磷储量和其循环利用,包括:1)生物质炭表面的羟基和含氧阴离子的氢键可以吸附无机阴离子(如 $PO_4^{3-}$ )以提供营养<sup>[38]</sup>;2)生物质炭也可以是可溶性磷的直接来源,随着时间的推移,可以与磷的金属络合物( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ 和 $Ca^{2+}$ )相互作用,促进微生物活动和磷矿化,增加磷的有效性<sup>[7]</sup>;3)由于生物质炭的吸附作用和团聚体的物理保护,大微团聚体中有大量有机磷的积累<sup>[39]</sup>;4)生物质炭能够增加根际细菌丰度,将有机磷转化为生物可利用磷,进一步增加磷的可利用性<sup>[40]</sup>。Sukartono等<sup>[41]</sup>表明,生物质炭可提高土壤肥力、磷吸收和作物产量。这与本研究结构方程模型分析结果一致,即SOC、全磷含量和土壤团聚体平均重量直径可通过直接影响土壤有效磷含量和植株含磷量,从而影响作物产量和磷素利用率(图4)。同时相关性分析也显示,土壤团聚体平均重量直径与水稻产量和磷素利用率显著正相关(图5),这表明陈化生物质炭能够通过改善土壤养分和结构,在增加磷储量的同时,促进其循环利用,进而增加产量和磷素利用率。综上所述,陈化生物质炭可以改善土壤质量,稳定土壤结构,促进作物养分吸收,最终达到增产增效的目的。

## 4 结论

陈化生物质炭显著提高了大团聚体粒级 (250~2000  $\mu\text{m}$ ) 的比例以及大团聚体和微团聚体中有机碳和全磷含量, 改善了土壤结构和养分循环, 从而提高了水稻产量和磷素利用效率, 且随着陈化年限的增加效果更加显著。因此, 陈化生物质炭一方面可以改善土壤结构, 另一方面可以在增加土壤碳储存、减少磷损失的同时, 增加磷的循环利用, 提高作物产量, 促进可持续农业发展。

### 参考文献:

- [1] 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 962–966.  
Zheng Q F, Wang Y H, Sun Y G, *et al.* Study on structural properties of biochar under different materials and carbonized by FTIR[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(4): 962–966.
- [2] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An alfisol and an andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209–210: 188–197.
- [3] Basso A S, Miguez F E, Laird D A, *et al.* Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 132–143.
- [4] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143–144.
- [5] Liu Y X, Lu H H, Yang S M, Wang Y F. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy for two crop seasons[J]. *Field Crops Research*, 2016, 191: 161–167.
- [6] Liang B Q, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [7] Lehmann J, Silva J P D, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [8] 吴文卫, 周丹丹. 生物炭老化及其对重金属吸附的影响机制[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 13–19.  
Wu W W, Zhou D D. Influence of biochar aging on its physicochemical properties and adsorption of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 13–19.
- [9] 米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 李世清. 生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1550–1556.  
Mi H Z, Zhu L X, Shen Y F, Li S Q. Biochar effects on organic carbon and nitrogen in soil aggregates in semiarid farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1550–1556.
- [10] Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1–2): 117–128.
- [11] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, *et al.* Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113–124.
- [12] Gaskin J W, Speir R A, Harris K, *et al.* Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2): 623–633.
- [13] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M V D, Bastos A C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1): 175–187.
- [14] Glaser B, Lehr V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9338.
- [15] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, *et al.* Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2014, 42(5): 626–634.
- [16] Sandaña, P, Pinochet D. Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(4): 973–986.
- [17] Fang Y Y, Singh B P, Luo Y, *et al.* Biochar carbon dynamics in physically separated fractions and microbial use efficiency in contrasting soils under temperate pastures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 399–409.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [20] Duan P P, Wu Z, Zhang Q Q, *et al.* Thermodynamic responses of ammonia-oxidizing archaea and bacteria explain  $\text{N}_2\text{O}$  production from greenhouse vegetable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 37–47.
- [21] Zhang Q, Zhou W, Liang G Q, *et al.* Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 94: 59–71.
- [22] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2333–2342.  
He Y T, Wang C Q, Shen J, *et al.* Effects of two biochars on red soil aggregate stability and microbial community[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2333–2342.
- [23] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477–1488.
- [24] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [25] Muñoz C, Gongora S, Zagal E. Use of biochar as a soil amendment: a brief review[J]. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences, ex Agro-Ciencia*, 2016, 32(1): 37–47.
- [26] Yu H W, Zou W X, Chen J J, *et al.* Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 8–21.
- [27] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments:



- analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–793.
- [28] Ngatia L W, Hsieh Y P, Nemours D, *et al.* Potential phosphorus eutrophication mitigation strategy: Biochar carbon composition, thermal stability and pH influence phosphorus sorption[J]. *Chemosphere*, 2017, 180: 201–211.
- [29] Deluca T H, Gundale M J, Mackenzie M D, Jones D L. Biochar effects on soil nutrient transformations[A]. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[C]. London: Routledge, 2015.421–454.
- [30] Goldberg S, Sposito G. A chemical model of phosphate adsorption by soils: I. reference oxide minerals[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(4): 772–783.
- [31] Prendergast-Miller M, Duvall M, Sohi S. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 173–185.
- [32] Tejada M, Gonzalez J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 197–205.
- [33] Abiven S, Hund A, Martinsen V, Cornelissen G. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia[J]. *Plant and Soil*, 2015, 395(1–2): 45–55.
- [34] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 杨刚. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. *应用生态学报*, 2018, 38(2): 393–404.
- Xu M, Wu J, Zhang X H, Yang G. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 38(2): 393–404.
- [35] Zheng H, Wang Z, Deng X, *et al.* Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 130(2): 463–471.
- [36] Zheng H, Wang Z, Deng X, *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, 206(9): 32–39.
- [37] Fungo B, Lehmann J, Kalbitz K, *et al.* Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical ultisol under conventional hand-hoe tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 190–197.
- [38] Zhu X, Chen B, Zhu L, Xing B. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98–115.
- [39] Garland G, Bünemann E K, Oberson A, *et al.* Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: A conceptual model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 91–98.
- [40] Fox A, Kwapinski W, Griffiths B S, Schmalenberger A. The role of sulfur-and phosphorus-mobilizing bacteria in biochar-induced growth promotion of *Lolium perenne*[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 90(1): 78–91.
- [41] Sukartono, Utomo W H, Kusuma Z, Nugroho W H. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia[J]. *Journal of Tropical Agriculture*, 2011, 49: 47–52.