

秸秆生物炭对砂姜黑土有机磷组分含量的影响

张睿^{1,2,3}, 王童语^{1,2,3}, 王道中^{2,3}, 郭志彬^{2,3}, 朱林^{1*}, 花可可^{2,3*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230031; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 3. 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 研究秸秆生物炭对砂姜黑土有机磷组分及分配的影响, 对剖析土壤磷循环机制和农田磷管理有重要意义。依托砂姜黑土定位试验, 分析不施肥 (CK)、常规施肥 (NPK)、化肥与 6.0、12、36 和 48 t·hm⁻² 小麦秸秆生物炭一次性增施 (BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈) 6 个处理对作物产量、土壤理化性质及有机磷组分的影响。结果表明, 与 NPK 处理相比, 增施秸秆生物炭均可保障小麦和玉米产量, 并显著增加 ($P < 0.05$) 土壤有机碳、全氮和 pH, 提升土壤肥力和缓解土壤酸化; 砂姜黑土有机磷以中等活性有机磷为主 (37.4%~45.4%), 其分配比例因秸秆生物炭施用量的不同而呈现差异。BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤活性有机磷含量分别为 11.4、10.7、9.2 和 9.3 mg·kg⁻¹, 分别较 NPK 处理下降 8.8%、14.4%、26.4% 和 25.6%, 差异显著 ($P < 0.05$), 且土壤活性有机磷含量与生物炭施用量呈显著线性负相关 ($R^2 = 0.8816$, $P < 0.05$)。增施秸秆生物炭处理 (BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈) 土壤活性有机磷所占比例较 NPK 处理均显著降低 ($P < 0.05$), 这说明增施秸秆生物炭除了可有效提升土壤肥力水平、缓解土壤酸化之外, 还可有效降低土壤有机磷活性, 增强有机磷稳定性, 保障作物产量, 其中以一次性增施 36 t·hm⁻² 效果最好, 宜在砂姜黑土区广泛应用。

关键词: 秸秆炭化还田; 有机磷活性; 有机磷稳定性; 磷管理

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)03-0454-08

Effects of straw biochar application on organic phosphorus fractions and distribution in lime concretion black soil

ZHANG Rui^{1,2,3}, WANG Tongyu^{1,2,3}, WANG Daozhong^{2,3}, GUO Zhibin^{2,3}, ZHU Lin¹, HUA Keke^{2,3}

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Institute of Soil and Fertilizer Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031; 3. Anhui Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment, Hefei 230031)

Abstract: Understanding the effects of straw biochar on soil organic phosphorus fractions and distribution in lime concretion black soil is of great significance to analyze the soil phosphorus cycle mechanism and excavate the availability of soil phosphorus pool. In this study, the effects of no fertilization (CK), conventional fertilization (NPK), chemical fertilizer and one-time addition of wheat straw biochar (BC₆, BC₁₂, BC₃₆ and BC₄₈) on crop yield, soil physicochemical properties and organic phosphorus components were analyzed based on field experiments on lime concretion black soil. The results showed that, compared with NPK treatment, increased application of straw biochar could guarantee wheat and maize yields, significantly increase ($P < 0.05$) the soil organic carbon, total nitrogen and pH, and improve the soil fertility and alleviate the soil acidification. The proportion of organic phosphorus in lime concretion black soil was mainly medium labile organic phosphorus (37.4% - 45.4%). The proportion of organic phosphorus in lime concretion black soil was different with different application amount of straw biochar. The contents of labile soil organic phosphorus in BC₆, BC₁₂, BC₃₆ and BC₄₈ treatments were 11.4, 10.7, 9.2 and 9.3 mg·kg⁻¹, respectively, which were 8.8%, 14.4%, 26.4% and 25.6% lower than that in NPK treatment, respectively. The difference was striking ($P < 0.05$). There was a significant negative linear correlation between the soil labile organic phosphorus content and the application amount of biochar ($R^2 = 0.8816$, $P < 0.05$). Increasing straw biochar application processing (BC₆, BC₁₂, BC₃₆ and BC₄₈) and the proportion of soil labile organic phosphorus in NPK treatment were significantly decreased ($P < 0.05$), suggesting that increasing straw biochar could effectively enhance the level of the soil fertility, soil acidification

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目 (2008085MD108) 和安徽省科技重大专项项目 (201903a06020028) 共同资助。

作者简介: 张睿, 硕士研究生。E-mail: hjzcr@163.com

* 通信作者: 朱林, 博士, 教授。E-mail: zhulin@ahau.edu.cn 花可可, 博士, 副研究员。E-mail: huakeke1220@126.com

ease, effectively reduce the activity of the soil organic phosphorus, enhance the stability of organic phosphorus and guarantee crop yield. The effect of $36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ is the best, which can be widely used in the lime concretion black soil.

Key words: straw charred and returned to the field; organic phosphorus activity; organic phosphorus stability; phosphorus management

磷是一种植物生长所必须的大量元素, 其在植株生长发育的各个阶段都起着重要作用^[1-2]。我国农田土壤有机磷含量占土壤全磷的 25% ~ 56%, 在东北黑土中, 最高可以达到 70% 以上^[3]。相关研究表明, 对于有效磷含量较低的土壤, 有机磷可以通过矿化过程转化为无机磷后, 被植物所吸收利用。与无机磷相比, 有机磷化合物一般较为复杂, 种类较多, 电荷密度较高, 含有较多的官能团^[4-5], 大部分的溶解性有机磷属于具有高分子量的腐殖质^[6]。Bowman 等^[7]根据土壤有机磷对植物的有效性, 把土壤有机磷分为活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷和稳定性有机磷 4 种组分。其中, 活性和中活性有机磷均易矿化, 易被植物吸收, 而中稳性和高稳性有机磷组分则很难被矿化, 不易被植物吸收。因此, 研究农田土壤有机磷组分及其分配特性对深入探究土壤磷循环机制和挖掘土壤磷库有效性具有重要的理论和现实意义。

近十年, 国内外关于农田土壤有机磷组分的研究较为活跃, 并取得了丰富的研究成果。徐阳春等^[8]研究表明, 长期有机无机肥配施能显著提高土壤有机磷含量, 主要增加活性和中等活性有机磷组分。尹金来等^[9]发现施用猪粪后能显著增加土壤中活性有机磷和中稳性有机磷含量, 其中, 中活性有机磷增幅最明显。黄庆海等^[10]研究发现, 对土壤作耗磷处理时, 主要是中活性有机磷和活性有机磷下降, 对土壤作施磷处理时, 主要促进中稳定性有机磷和高稳定性有机磷的增加。Gaind 等^[11]研究发现, 施用有机磷后, 小麦种植区的活性有机磷与中等活性有机磷含量较高, 水稻种植区的中稳性有机磷和高稳性有机磷含量较高。Maranguit 等^[12]发现种植油棕和橡胶可以使土壤活性有机磷组分下降一半, 且土壤有机磷含量与土壤有机碳含量呈显著正相关。总体而言, 国内外学者对农田土壤有机磷组分含量、比例及分布特征进行了大量研究, 但目前的研究结论多局限于不同施肥方式或种植方式, 且普遍认为施肥可显著增加土壤活性有机磷的含量及比例。生物炭是植物或废弃的原料通过热裂解而产生的固体材料, 作为一种土壤改良剂, 具有疏松多孔和吸附能力强等特性, 被广泛用于农田土壤, 其对土壤物理、化学和生物性质具有显著影响^[13-14], 生物炭可

改变土壤磷的吸附-解吸和沉淀-溶解等关键过程, 从而影响土壤磷的有效性。王光飞等^[15]研究发现在保持土壤有效磷供应下长期大量施用生物炭在保持土壤有效磷供应下可提高土壤磷的吸附能力, 降低土壤磷素的流失风险。但迄今为止, 关于施用秸秆生物质炭施用对农田土壤有机磷组分影响的研究较为缺乏^[16], 这限制了人们对农田土壤有机磷周转及磷循环机制的全面认识。

砂姜黑土是我国黄淮海平原典型的中低产土壤之一, 全国砂姜黑土总面积约为 $4.0 \text{ km} \times 10^4 \text{ km}$, 其中安徽省面积最大, 约为 $1.65 \text{ km} \times 10^4 \text{ km}$, 所在区域也是安徽省的粮食主产区^[17-18]。本区域已有较多研究集中在长期施肥对土壤有机磷分布的影响, 如王道中等^[19]研究发现长期有机无机配施能够显著增加砂姜黑土有机磷的总量, 且长期施用有机肥可显著增加土壤中等活性有机磷含量, 微增加活性有机磷与中稳性有机磷的含量, 而高稳性有机磷含量几乎不发生改变。而关于秸秆生物炭施用对砂姜黑土有机磷组分的影响效应尚不清楚。本研究拟通过砂姜黑土不同用量秸秆生物炭田间定位试验, 分析作物产量、土壤化学性质及土壤有机磷组分的变化特征, 明确秸秆生物炭施用对土壤有机磷组分及分配的影响, 阐明秸秆生物炭施用对土壤有机磷的作用机制, 以期为剖析土壤有机磷循环机制和科学制定砂姜黑土磷管理策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验点位于农业部蒙城砂姜黑土生态环境重点野外观测站内 ($33^{\circ}13' \text{ N}$, $116^{\circ}37' \text{ E}$), 地处淮北平原中部, 属于暖温带季风气候, 常年平均气温 $16.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 近 20 年年平均降水量 872.4 mm 。作物种植方式为冬小麦-夏玉米轮作, 属黄淮海平原的典型种植制度。试验前 (2014 年 10 月) 土壤基本理化性质 ($0 \sim 20 \text{ cm}$): pH 为 5.5, 有机碳含量为 $8.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $58.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $13.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $113.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

供试小麦品种为“周麦 12 号”, 玉米品种为“中科玉 505”, 化肥为普通单质肥料, 氮肥为普通尿素, 磷

肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。供试秸秆生物炭材料为小麦秸秆生物炭(河南商丘三利新能源有限公司,热裂解炭化温度 350~450 °C),秸秆生物炭基本理化性质为: pH 10.3,有机碳含量为 510 g·kg⁻¹,全磷含量为 440 mg·kg⁻¹,有效磷含量为 162.1 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

试验共设 6 个处理,分别为不施肥(CK)、常规施肥(NPK)、化肥与 6.0 t·hm⁻² 秸秆生物炭配施(BC₆)、化肥与 12 t·hm⁻² 秸秆生物炭配施(BC₁₂)、化肥与 36 t·hm⁻² 秸秆生物炭配施(BC₃₆)、化肥与 48 t·hm⁻² 秸秆生物炭配施(BC₄₈)。秸秆生物炭于试验开始时,即 2014 年 10 月份种植冬小麦之前结合整地一次性施入,后期每年均不再追施,以观测生物炭还田后长期的肥力与生态环境效应。所有秸秆生物炭处理化肥(氮-尿素、磷-过磷酸钙、钾-氯化钾)的施用量、田间管理均与 NPK 处理完全一致。每个处理 4 次重复,共计 24 个小区,小区面积为 40 m² (4 m×10 m)。根据当地农民施肥习惯,NPK 代表常规施肥水平,小麦季施氮总量为 210 kg·hm⁻² (基肥和追肥分别为 126 和 84 kg t·hm⁻²),施磷(P₂O₅)总量为 90 kg·hm⁻²,施钾(K₂O)总量为 135 kg·hm⁻²。玉米季施氮总量为 225 kg·hm⁻² (基肥和追肥分别为 135 和 90 kg·hm⁻²),磷钾肥施用量同小麦季。

1.4 样品的采集与分析方法

样品采集:在试验开始前,以整个试验田块为采样单元,利用不锈钢土钻(直径 0.03 m),采用“S”形取样方法采集耕层(0~20 cm)土样,人工除去肉眼可见的根茬及秸秆碎屑,掰碎混匀风干过 2 mm 筛后,测定 pH,而后分别过 20 目和 100 目筛测定有机碳、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾等指标。2015 和 2019 年玉米收获后(10 月份),以各试验小区为采样单元,采用上述方法再次采集耕层(0~20 cm)土样,测定不同化学指标。

测定方法:土壤 pH 值通过电位法测定,水土比 2.5:1;土壤有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法;全氮含量采用开氏法;土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法;碱解氮含量采用碱解扩散法;有效磷含量采用碳酸氢钠法;速效钾采用乙酸铵提取法^[20];土壤有机磷分组测定采用 Bowman 和 Cole 法^[7],即测定不同酸碱溶液能够浸提出土壤中的总磷量和无机磷量,采用差减法计算出相应组分有机磷含量,并将土壤有机磷分为活性、中活性、中稳性和高稳定有机磷 4 个组分。活性有机磷指能溶于 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 而易矿化又易为植物吸收的组分;中活性有机磷指能溶于 1 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 而较易

矿化又较易为植物吸收的组分;中稳性有机磷指能溶于 0.5 mol·L⁻¹ NaOH,在 pH 1~1.5 条件下不发生沉淀而较难矿化又较难为植物吸收的组分;高稳性有机磷指能溶于 0.5 mol·L⁻¹ NaOH,在 pH 1~1.5 条件下产生沉淀而很难矿化又很难为植物吸收的组分。小麦和玉米产量采用全小区实打实收法(含水率按照 0.14 计)。

1.5 数据分析

所有的测定结果用 Excel 2019 进行数据的初步整理和汇总,用 SPSS 24.0 进行统计分析,使用 Excel 2019 进行作图。方差分析使用 LSD 与 Duncan 法进行检验。

2 结果与分析

2.1 秸秆生物炭对作物产量及土壤理化性质影响

不同用量秸秆生物炭处理年平均产量有所不同。小麦平均产量为 2.0~6.7 t·hm⁻²,其中 CK 处理小麦产量显著小于其他处理($P<0.05$),仅为 2.0 t·hm⁻²,其他处理产量均超过 6.0 t·hm⁻²,BC₃₆ 处理产量最高,为 6.7 t·hm⁻²,小麦产量随秸秆生物炭施用量的增加呈现先升后降的趋势,施用秸秆生物炭处理间差异性不显著。玉米平均产量为 4.1~7.4 t·hm⁻²,其中 CK 处理玉米产量显著小于其余处理,仅为 4.1 t·hm⁻²,其余处理产量均达到或超过 6.9 t·hm⁻²,BC₆ 处理产量最高,为 7.4 t·hm⁻²,玉米产量随秸秆生物炭施用量的增加也呈现先上升后下降趋势,但施用秸秆生物炭处理间未呈现显著差异性(表 1)。

各处理土壤 pH 平均为 4.9~6.1,土壤有机碳平均含量为 8.3~21.0 g·kg⁻¹,其中 BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理有机碳平均含量显著高于其余处理($P<0.05$),分别为 21.0 和 20.4 g·kg⁻¹。土壤全氮含量为 3.7~7.4 mg·kg⁻¹,其中 BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理全氮含量显著高于其余处理($P<0.05$),分别为 7.3 和 7.4 mg·kg⁻¹。土壤全磷平均含量为 388.3~585.7 mg·kg⁻¹;与 CK 相比,NPK 处理土壤全磷含量提高 33.8%。土壤全磷含量因秸秆生物炭施用量的不同而呈现差异,其中 BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理含量较高,分别为 585.7 和 584.8 mg·kg⁻¹,显著高于其余处理($P<0.05$)。总有机磷平均含量为 123.5 mg·kg⁻¹,其中,CK 处理的总有机磷含量最低,为 102.4 mg·kg⁻¹,BC₃₆ 处理的总有机磷含量最高,为 134.6 mg·kg⁻¹,显著高于 NPK ($P<0.05$)。有效磷平均含量为 22.7 mg·kg⁻¹,其中 CK 处理显著低于其余处理($P<0.05$),为 13.1 mg·kg⁻¹。总体说明,增施秸秆生物炭均可保障小麦和玉米产量,并显著提升土壤肥力和缓解土壤酸化。

表 1 秸秆生物炭施用后作物产量及土壤理化性质的变化
Table 1 Changes of crop yield and soil physical and chemical properties after straw biochar application

年份	处理	小麦产量/ (t·hm ⁻²)	玉米产量/ (t·hm ⁻²)	pH	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	总有机磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
2015	CK	2.0±0.8 ^b	3.9±1.6 ^b	5.5±0.2 ^b	8.4±0.4 ^c	3.6±0.0 ^c	404.3±48.3 ^b	122.8±1.6 ^a	13.6±1.3 ^b
	NPK	4.9±0.3 ^a	7.3±0.6 ^a	5.0±0.1 ^c	9.2±0.2 ^e	3.6±0.0 ^c	471.6±30.0 ^b	128.5±13.0 ^a	25.7±4.5 ^a
	BC ₆	5.2±0.4 ^a	7.3±0.5 ^a	5.1±0.3 ^b	10.9±0.5 ^d	4.2±0.1 ^c	445.6±11.6 ^b	132.2±8.3 ^a	25.6±2.2 ^a
	BC ₁₂	5.2±0.7 ^a	7.2±0.5 ^a	5.6±0.3 ^b	13.1±0.2 ^c	4.8±0.1 ^b	461.0±13.8 ^b	134.9±5.0 ^a	28.2±4.5 ^a
	BC ₃₆	5.2±0.3 ^a	7.1±0.8 ^a	5.5±0.4 ^b	20.1±0.2 ^a	6.6±0.1 ^a	488.1±31.7 ^a	130.8±11.5 ^a	26.6±4.1 ^a
	BC ₄₈	4.9±0.1 ^a	7.0±0.5 ^a	5.9±0.3 ^a	18.2±0.9 ^b	6.3±0.0 ^b	476.9±37.1 ^b	132.0±6.9 ^a	23.7±2.4 ^a
2019	CK	2.0±0.4 ^b	4.2±0.6 ^b	5.2±0.2 ^b	8.2±0.2 ^d	3.7±0.1 ^c	372.3±17.1 ^c	81.9±4.8 ^c	12.6±2.1 ^c
	NPK	7.7±0.2 ^a	7.4±0.7 ^a	4.8±0.3 ^c	10.0±0.5 ^c	4.2±0.5 ^c	567.3±37.2 ^b	98.4±6.2 ^b	28.9±0.8 ^a
	BC ₆	7.8±0.3 ^a	7.4±0.5 ^a	5.2±0.1 ^b	16.5±0.6 ^b	4.7±0.3 ^c	603.5±16.5 ^b	113.7±4.9 ^b	27.3±1.7 ^a
	BC ₁₂	7.8±0.2 ^a	6.8±0.6 ^a	5.7±0.2 ^b	18.4±1.1 ^b	6.2±0.2 ^b	610.5±10.8 ^b	133.3±11.5 ^a	24.5±2.4 ^a
	BC ₃₆	8.2±0.2 ^a	6.6±0.7 ^a	6.0±0.3 ^a	21.8±0.8 ^a	8.1±0.1 ^a	683.2±26.1 ^a	138.4±5.1 ^a	18.1±0.5 ^b
	BC ₄₈	7.7±0.2 ^a	6.9±0.3 ^a	6.2±0.2 ^a	22.6±0.6 ^a	8.4±0.3 ^a	692.7±20.4 ^a	134.6±3.3 ^a	17.4±2.4 ^b
平均	CK	2.0±0.6 ^b	4.1±1.1 ^b	5.4±0.2 ^b	8.3±0.3 ^c	3.7±0.1 ^b	388.3±32.7 ^c	102.4±1.6 ^c	13.1±1.7 ^b
	NPK	6.3±0.3 ^a	7.3±0.6 ^a	4.9±0.2 ^b	9.6±0.4 ^c	3.9±0.3 ^b	519.5±33.6 ^b	113.5±13.0 ^b	27.3±2.7 ^a
	BC ₆	6.5±0.3 ^a	7.4±0.5 ^a	5.2±0.2 ^b	13.7±0.6 ^b	4.5±0.2 ^b	524.5±14.1 ^b	123.0±8.3 ^b	26.5±2.3 ^a
	BC ₁₂	6.5±0.4 ^a	7.0±0.6 ^a	5.7±0.3 ^a	15.8±0.7 ^b	5.5±0.2 ^b	535.8±12.3 ^b	134.1±5.0 ^a	26.4±3.1 ^a
	BC ₃₆	6.7±0.2 ^a	6.9±0.7 ^a	5.8±0.4 ^a	21.0±0.5 ^a	7.3±0.1 ^a	585.7±28.9 ^a	134.6±11.5 ^a	22.4±3.3 ^a
	BC ₄₈	6.3±0.2 ^a	6.9±0.4 ^a	6.1±0.3 ^a	20.4±0.8 ^a	7.4±0.2 ^a	584.8±28.8 ^a	133.3±6.9 ^a	20.6±1.5 ^a

注: 每列不同小写字母表示在同一年份(或两个年份的平均值)内差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 2 秸秆生物炭施用对土壤有机磷含量组分的影响
Table 2 Effects of straw biochar application on soil organic phosphorus components (mg·kg⁻¹)

年份	处理	活性有机磷	中等活性有机磷	中稳性有机磷	高稳性有机磷
2015	CK	11.6±0.4 ^a	68.8±3.7 ^b	13.5±1.9 ^b	28.9±2.2 ^a
	NPK	13.5±0.4 ^a	68.0±1.6 ^b	13.9±2.4 ^b	33.2±8.8 ^a
	BC ₆	12.7±0.9 ^a	67.5±2.4 ^b	14.2±5.3 ^b	37.9±4.8 ^a
	BC ₁₂	12.2±0.9 ^a	73.9±1.6 ^a	18.8±5.1 ^a	30.0±7.2 ^a
	BC ₃₆	11.1±0.8 ^b	68.3±4.0 ^b	15.7±0.4 ^a	35.7±4.4 ^a
	BC ₄₈	11.3±2.0 ^b	69.2±1.7 ^b	22.3±5.5 ^a	29.3±5.6 ^a
2019	CK	14.2±1.7 ^a	24.1±3.9 ^b	12.7±0.7 ^d	31.0±3.7 ^d
	NPK	11.5±0.9 ^b	34.5±5.4 ^a	18.9±1.3 ^c	36.5±2.1 ^c
	BC ₆	10.1±1.1 ^b	28.6±6.2 ^a	32.0±4.6 ^b	42.9±3.2 ^b
	BC ₁₂	9.2±0.8 ^c	34.2±8.6 ^a	40.6±6.7 ^a	49.3±1.7 ^a
	BC ₃₆	7.2±1.3 ^d	33.5±3.4 ^a	45.0±4.8 ^a	52.8±4.0 ^a
	BC ₄₈	7.4±0.7 ^d	30.6±3.5 ^a	43.9±3.6 ^a	52.7±3.4 ^a
平均	CK	12.9±2.0 ^a	46.4±3.8 ^b	13.1±1.3 ^c	29.9±3.0 ^b
	NPK	12.5±2.0 ^a	49.8±3.5 ^b	16.4±1.8 ^c	34.9±5.4 ^b
	BC ₆	11.4±2.1 ^a	48.1±6.6 ^b	23.1±4.9 ^b	40.4±4.0 ^a
	BC ₁₂	10.7±0.8 ^a	54.1±7.7 ^a	29.7±5.9 ^a	39.6±4.4 ^a
	BC ₃₆	9.2±2.0 ^b	50.9±3.7 ^b	30.3±2.6 ^a	44.2±4.2 ^a
	BC ₄₈	9.3±1.4 ^b	49.9±4.5 ^b	33.1±4.6 ^a	41.0±4.5 ^a

2.2 秸秆生物炭对土壤活性有机磷的影响

NPK 处理土壤活性有机磷两个年份平均含量为 12.5 mg·kg⁻¹ (表 2), 较 CK 处理下降 3.1%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。在施用 NPK 基础上配施秸秆生物

炭 1 年后, BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤活性有机磷含量分别较 NPK 处理下降 8.8%、14.4%、26.4% 和 25.6%, 均低于 NPK 处理, 其中以 BC₃₆ 处理土壤活性有机磷含量最低, 差异显著 ($P < 0.05$)。

进一步研究发现, 土壤活性有机磷含量与秸秆生物炭施用量呈显著线性负相关 ($P < 0.05$)。且对于配施秸秆生物炭的处理, 2015 年土壤活性有机磷平均含量为 $12.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2019 年平均含量为 $9.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 2015 年下降了 18.2%, 说明施用秸秆生物炭可降低土壤中有有机磷的活性。

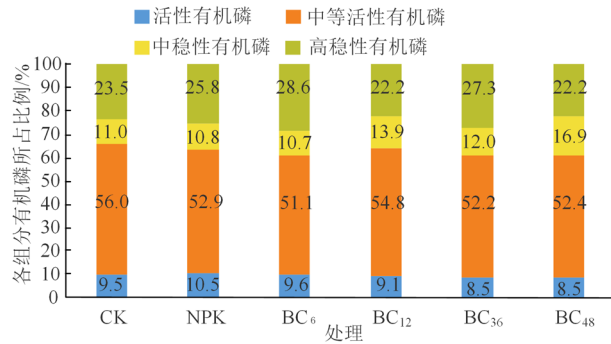


图 1 2015 年秸秆生物炭施用对土壤有机磷组分分配比例的影响

Figure 1 Effects of straw biochar application on soil organic phosphorus fraction distribution in 2015

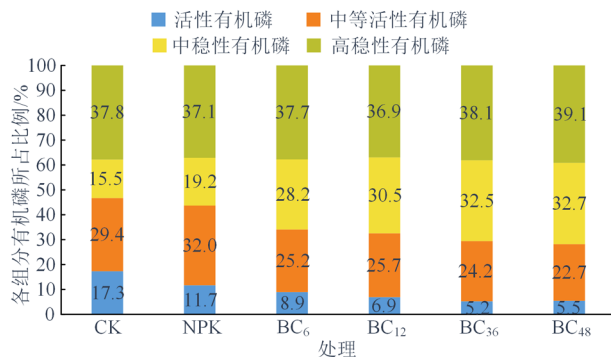


图 2 2019 年秸秆生物炭施用对土壤有机磷组分分配比例的影响

Figure 2 Effects of straw biochar application on soil organic phosphorus fraction distribution in 2019

2.3 秸秆生物炭对土壤中等活性有机磷的影响

NPK 处理土壤中等活性有机磷两个年份平均含量为 $49.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 处理增加了 7.3%, 无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2)。除 BC₆ 处理外, 其余生物炭处理土壤中等活性有机磷的含量都较 NPK 处理有所增加, 但总体变化幅度不大, 只有 BC₁₂ 处理土壤中等活性有机磷含量显著高于 NPK 处理 ($P < 0.05$), 为 $54.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2015 年土壤中等活性有机磷平均含量为 $69.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2019 年平均含量为 $30.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 2015 年下降 56.1%, 幅度较大, 说明在农田生态系统中, 由于长期耕作、施肥等农艺措施的影响, 土壤中等活性有机磷含量会出现明显下降, 而秸秆生物炭施用会加剧这一现象。

2.4 秸秆生物炭对土壤中稳性与高稳性有机磷的影响

CK 处理土壤中稳性有机磷两个年份平均含量为 $13.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。NPK 处理为 $16.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其较 CK 处理提升了 25.2% (表 2)。增施秸秆生物炭后, BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤中稳性有机磷含量分别为 23.1、29.7、30.3 和 $33.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别较 NPK 处理提升了 40.1%、81.1%、84.8% 和 101.8%, 其中 BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤中稳性活性有机磷含量均显著高于 NPK 处理 ($P < 0.05$)。2015 年土壤中稳性有机磷平均含量为 $16.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2019 年平均含量为 $32.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提升 96.3%, 结合 2.2, 这进一步说明秸秆生物炭施用可有效降低土壤中有有机磷的活性, 提高有机磷的稳定性。

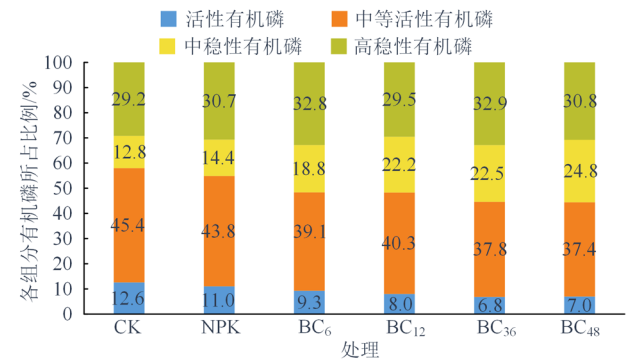


图 3 不同处理土壤有机磷组分分配比例 (2015 年和 2019 年平均)

Figure 3 Distribution proportion of organophosphorus components in soils under different treatments (2015 and 2019 average)

CK 处理土壤稳定性有机磷两个年份平均含量为 $29.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NPK 处理为 $34.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 处理提升了 16.7%, 无显著差异 ($P > 0.05$)。BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤中稳性有机磷含量分别为 40.4、39.6、44.2 和 $41.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别较 NPK 处理提升了 15.8%、13.5%、26.6% 和 17.5%。2015 年 CK 处理的土壤高稳性有机磷含量为 $28.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NPK、BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理土壤高稳性有机磷含量均较 CK 处理有所提升, 但各处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 土壤高稳性有机磷平均含量为 $32.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 2019 年土壤高稳性有机磷平均含量为 $44.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 2015 年提升 26.5%, 且 2019 年配施秸秆生物炭的土壤高稳性有机磷含量均显著高于 NPK 处理 ($P < 0.05$)。

2.5 秸秆生物炭对土壤有机磷组分分配的影响

如图 1 和图 2 所示, 施用秸秆生物炭 5 年后, 相较于 2015 年, BC₆、BC₁₂、BC₃₆ 和 BC₄₈ 处理中

高稳性、中稳性有机磷比例明显上升, 中活性有机磷比例明显下降, 对于配施秸秆生物炭的处理, 土壤中等活性有机磷已不再是各有机磷组分中占比最大的组分, 这说明增施秸秆生物炭后, 土壤活性有机磷占比呈下降趋势, 稳定性有机磷呈上升趋势, 土壤有机磷的活性降低, 稳定性增强。如图 3 所示, 施用秸秆生物炭后, 土壤有机磷组分平均分配比例发生明显变化。土壤有机磷各组分占总有机磷的比例按从大到小顺序为: 中等活性有机磷 (37.4%~45.4%) > 高稳性有机磷 (29.2%~32.9%) > 中稳性有机磷 (12.8%~24.8%) > 活性有机磷 (6.8%~12.6%)。在各处理中, 土壤活性有机磷平均占比为 9.1%, 其中 CK 处理最大, 为 12.6%。与 NPK 相比, 增施秸秆生物炭后, BC₆、BC₁₂、BC₃₆、BC₄₈ 处理土壤活性有机磷所占比例均显著下降, 而中稳定性有机磷组分显著上升 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 增施秸秆生物炭对砂姜黑土理化性质及作物产量的影响

增施秸秆生物炭对土壤理化性质具有显著影响, 且随秸秆生物炭施用量的不同而呈现差异。据徐茂林等^[21]的研究, 随着化肥的大量施用, 砂姜黑土地区农田土壤 pH 已由原来的偏碱性转变为现在的偏酸性, 且有着逐年下降的趋势。本试验不施肥处理的土壤 pH 为 5.5, 而常规施肥处理的土壤 pH 下降到了 5.0, 说明长期化肥的施用会导致土壤酸化。而在增施秸秆生物炭的处理中, 土壤 pH 均显著增加, 且土壤 pH 与秸秆生物炭施入量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 说明增施秸秆生物炭对砂姜黑土地区改善土壤酸化具有积极作用。

常规施肥与增施秸秆生物炭处理的土壤有机碳含量、全氮含量、速效钾含量对比不施肥处理均显著增加, 增施秸秆生物炭后这些营养元素含量要显著高于常规施肥, 表明施肥能够显著提升土壤有机碳、全氮、速效钾 3 种元素的含量, 且增施秸秆生物炭的效果要好于常规施肥, 可能是由于秸秆生物炭的施入增加了外源养分的供给并改善了土壤微生态环境, 加速了土壤微生物的分解有机物及养分循环过程等作用^[22], 这与杨旻等^[23]提出的有机肥对加速土壤有机碳、氮积累显著优于常规施肥的结论一致。在 6 种处理中土壤碱解氮含量并没有显著差别, 这可能与其性质不稳定, 极易被固化成有机磷或被植物吸收利用有关。

随着秸秆生物炭施入量的增加, 小麦和玉米的

产量均呈现先升高后降低的趋势。说明在砂姜黑土地区, 采用增施秸秆生物炭的方法可以显著增加土壤养分含量, 改提升土壤肥力, 改良土壤结构和保障作物产量。

3.2 增施秸秆生物炭对砂姜黑土有机磷组分影响

不同农田管理方式会对土壤有机磷含量及分配比例产生强烈影响。在本研究中, 常规施肥处理的土壤总有机磷含量略高于不施肥处理, 说明在单施化肥的情况下, 由于外源磷投入量的增加及其微生物活性的增加, 加速土壤磷循环过程, 土壤有机磷的合成速率要高于矿化速率, 土壤有机磷发生累积; 而增施秸秆生物炭的 4 种处理, 其土壤有机磷总量均都高于常规施肥处理, 这说明施肥可以增加土壤有机磷的含量, 且增施秸秆生物炭比常规施肥更能够明显提升土壤有机磷含量, 这与前人所提出的施肥可促进土壤中有机磷的积累相吻合^[24]。

对于土壤有机磷组分, 本研究发现, 所有处理的土壤有机磷组分占总有机磷比例由大到小为: 中等活性有机磷 > 高稳性有机磷 > 中等稳定性有机磷 > 活性有机磷, 这说明中等活性有机磷是砂姜黑土有机磷的主要赋存形态。在两个年份平均数据中, 土壤活性有机磷占总有机磷的比例较小, 平均为 9.1%, 增施秸秆生物炭处理中, 土壤活性有机磷含量及比例随秸秆生物炭施用量的增多而呈现减少的趋势, 甚至两年中 BC₃₆ 与 BC₄₈ 两处理的土壤活性有机磷含量低于 CK 处理。对比两个年份的有机磷组分含量, 可发现 2019 年度施用秸秆生物炭处理的土壤活性有机磷与中等活性有机磷含量均显著低于 2015 年, 这一现象说明增施秸秆生物炭可显著降低土壤活性有机磷的含量及比例, 降低土壤有机磷的活性, 这与前人将猪粪、牛粪、绿肥等有机肥料施入土壤后所得结果迥然不同^[25-27], 因为施用的有机肥本身含有大量的磷元素, 且施用有机肥料可以进一步激发土壤中微生物及磷酸酶的活性, 造成土壤活性有机磷含量及比例明显升高^[24]。而在本试验中, 增施秸秆生物炭以后, 土壤活性有机磷含量及比例呈下降的趋势, 这可能是由于秸秆生物炭中含有大量的碳原子, 没有像大多数有机肥那样有较高的磷元素含量, 也缺乏进一步激发土壤微生物与磷酸酶的活性的物质, 在施入土壤后, 其中大量的碳原子促使土壤有机磷向 C/P 比值更高的稳定形态转变, 故而活性有机磷的含量随着秸秆生物炭的施入而发生下降^[28], 即土壤有机磷的活性降低。此外, 中等活性有机磷含量两个年份平均占土壤总有机磷含量的比例为 40.6%, 是本研究中占比最高的有机

磷组分,这与前人的研究相一致^[29-30]。冯跃华等^[31]提出,在土壤有机磷的4种不同组分中,中等活性有机磷的生物有效性最高,在本研究中,土壤中中等活性有机磷含量与活性有机磷含量呈极显著正相关($P < 0.01$),且BC₁₂处理的中等活性有机磷含量与速效磷含量均为最高,故其玉米产量最高,也佐证了这一观点。对于中稳性有机磷和高稳性有机磷,增施秸秆生物炭处理这两种有机磷组分占比相比于不施肥与常规施肥处理均有所提升,且两个年份相比,可发现2019年度施用秸秆生物炭处理的土壤中稳性有机磷与高稳性含量均显著高于2015年,这也与前人有机肥试验中土壤稳定性有机磷比例下降的情况明显不同^[32],可能同样是因为有机碳中含有较多的碳原子,且秸秆生物炭无法像有机肥那样激发微生物与磷酸酶的活性,同时,由于秸秆生物质碳的施入造成了土壤pH的上升,据研究,在酸性土壤中磷的吸附量会随生物炭的添加而上升^[34],且生物炭巨大的比表面积与其含有的大量Ca、Fe、Al等元素进一步促进了土壤中磷元素的吸附与固定,降低土壤有机磷的活性,增强土壤有机磷的稳定性。

此外,2015年NPK与施用秸秆生物炭的处理土壤高稳性有机磷含量均较CK处理有所提升,但各处理间无显著差异($P > 0.05$);而2019年配施秸秆生物炭的土壤高稳性有机磷含量均显著高于NPK处理($P < 0.05$)。且2015年土壤高稳性有机磷平均含量为 $32.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而2019年土壤高稳性有机磷平均含量为 $44.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较2015年提升26.5%,这说明施入土壤的秸秆生物炭对土壤有机磷组分起着长期影响,秸秆生物炭起初主要通过影响中稳性有机磷来改变土壤有机磷的稳定性,但一段时间后配施秸秆生物炭对于土壤有机磷稳定性的影响逐渐在高稳性有机磷中表现出来。

3.3 秸秆生物炭与砂姜黑土磷管理

本研究表明,砂姜黑土农田土壤增施秸秆生物炭后,土壤活性有机磷含量及比例均有所下降,而土壤中稳性有机磷含量及比例显著提升,结合土壤有效磷含量随秸秆生物炭施用量增加而出现的先上升后下降的现象,说明在土壤中增施秸秆生物炭可以有效抑制土壤中磷元素的活性及有效性,同时促进稳定性较低的有机磷元素转化为稳定性较高的有机磷。在实际生产中,对于有效磷含量偏高($> 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤,可以考虑合理增施秸秆生物炭以抑制磷元素的活性,减弱活性有机磷向有效磷的转化过程,增强土壤对磷的吸附能力,从而减少磷元素通过地表径流和淋溶等途径向地下水、河流、湖

泊等水体中的扩散,降低非点源磷污染风险。对于磷元素活性偏低(有效磷 $< 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤,可以考虑采用合理配施有机肥的方式来增强土壤有机磷的活性,促进有机磷向有效磷的转化,解决磷元素在土壤中大量累积却难以为植物所吸收利用的问题。

砂姜黑土是我国黄淮海平原典型的中低产土壤类型之一,现阶段砂姜黑土物理性质不良(蒙脱石含量高,胀缩性强)仍然是制约本地区农田土壤生产潜力进一步发挥的关键。大量研究表明,秸秆生物炭可有效降低土壤容重,改良土壤质地,降低土壤胀缩性,增加土壤持水性,综合改善土壤物理性状^[35]。因此,通过增施秸秆生物炭不仅可以改善砂姜黑土不良的物理性状,还可以有效的降低土壤有机磷的活性,增强有机磷的稳定性,调节土壤有机磷的矿化过程,降低有机磷向土壤有效磷的转化能力,进而降低高磷含量农田土壤(例如有效磷 $> 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的磷素随径流流失风险。所以在磷流失风险较高的农田土壤可将秸秆碳化还田作为一种有效的防控磷面源污染的农艺措施,降低农田非电源磷污染的风险。但秸秆生物炭施用对农田磷流失过程(浓度和通量)的影响仍需要进行深入研究。

4 结论

施用秸秆生物炭可显著提升砂姜黑土肥力和有效缓解土壤酸化,保障作物产量;土壤有机磷以中等活性有机磷为主,其分配比例因秸秆生物炭施用量的不同而呈现差异,即随着秸秆生物炭施用量的增加,活性较强的有机磷组分比例下降,活性较弱的有机磷组分比例上升;随试验年限的增加,土壤活性有机磷比例下降而稳定性有机磷比例上升,年际变化明显,且这种演变效应在秸秆生物炭施用下更为突出;秸秆生物炭具有降低土壤有机磷活性和提高有机磷稳定性的效果。

参考文献:

- [1] 来璐,郝明德,彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 65-67.
- [2] 夏凤禹,魏胜利,周胜利. 土壤磷素形态及其有效化途径的研究进展[J]. 林业勘查设计, 2009(3): 65-67.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] GEORGE T S, GILES C D, MENEZES-BLACKBURN D, et al. Organic phosphorus in the terrestrial environment: a perspective on the state of the art and future priorities[J]. Plant Soil, 2018, 427(1/2): 191-208.

- [5] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 等. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1290-1299.
- [6] 李睿, 屈明. 土壤溶解性有机质的生态环境效应[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 271-275.
- [7] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Sci, 1978, 125(2): 95-101.
- [8] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 593-598.
- [9] 尹金来, 沈其荣, 周春霖, 等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤有机磷组分及有效性的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 295-300.
- [10] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 63-66, 97.
- [11] GAIND S, SINGH Y V. Soil organic phosphorus fractions in response to long-term fertilization with composted manures under rice-wheat cropping system[J]. J Plant Nutr, 2016, 39(9): 1336-1347.
- [12] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J]. CATENA, 2017, 149: 385-393.
- [13] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [14] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967.
- [15] 王光飞, 马艳, 郭德杰, 等. 秸秆生物炭对辣椒疫病的防控效果及机理研究[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1107-1114.
- [16] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [17] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4781-4789.
- [18] 花可可, 王道中, 郭志彬, 等. 施肥方式对砂姜黑土钾素利用及盈亏的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 978-988.
- [19] 王道中, 郭熙盛. 长期施肥对砂姜黑土有机磷组分及其有效性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(1): 79-83.
- [20] 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.
- [21] 徐茂林, 李明兵, 吴兰云, 等. 灵璧县砂姜黑土酸碱度和有机质变化趋势探讨[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(2): 60-62.
- [22] 刘津, 李春越, 邢亚薇, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 157-164.
- [23] 杨昉, 张树兰, 杨学云. 长期施肥对壤土冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 402-408.
- [24] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J]. 土壤, 2013, 45(4): 641-647.
- [25] 张为政, 陈魁卿. 有机肥对土壤有机磷组分及其有效性的影响[J]. 东北农学院学报, 1988, 19(2): 112-118.
- [26] 尹岩, 梁成华, 杜立宇, 等. 施用有机肥对土壤有机磷转化的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 39-43.
- [27] 周春霖, 尹金来, 洪立洲, 等. 猪粪和磷肥对黄潮土速效磷、有机磷组分及其有效性的影响[J]. 江苏农业学报, 2001, 17(1): 39-43.
- [28] 曹翠玉, 张亚丽, 沈其荣, 等. 有机肥料对黄潮土有效磷库的影响[J]. 土壤, 1998, 30(5): 235-238.
- [29] 杨利玲, 杨学云, 古巧珍, 等. 长期施肥对旱地土壤有机磷及其组分的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 942-945.
- [30] 李和生, 马宏瑞, 赵春生. 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 116-118.
- [31] 冯跃华, 张杨珠, 黄运湘. 湖南稻田土壤有机磷组分的施磷效应、季节变化及生物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 634-641.
- [32] 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 443-446.
- [33] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- [34] XU G, SUN J N, SHAO H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecol Eng, 2014, 62: 54-60.
- [35] 张伟明, 陈温福, 孟军, 等. 东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14): 2406-2424.