

磷改性炭钙基复合材料对酸化土壤性质和快白菜生长的影响^①

黄杨华^{1,2}, 邓晟宁^{1,3}, 刘昭^{1,3}, 池海峰¹, 张又弛^{1*}, 蔡超¹

(1 中国科学院城市环境研究所, 区域与城市生态安全全国重点实验室, 福建厦门 362100; 2 福建农林大学国际菌草学院, 福州 350002; 3 宁波诺丁汉大学, 浙江宁波 315199)

摘要: 为开发绿色友好的酸化改良材料, 本研究利用稻壳和牡蛎壳粉共热解制备磷改性炭钙基复合材料, 采用盆栽试验探讨了复合材料对酸化土壤性质与快白菜生长的影响。结果表明: 复合材料可改善土壤酸性, 在两种肥料剂量梯度下 50 g/kg 复合材料处理组土壤 pH 分别从 4.20 和 4.39 增加至 6.48 和 6.00。添加复合材料还能增加土壤有机质和磷等养分含量, 提高磷酸酶和脲酶活性, 降低重金属有效态含量。相比对照组, 复合材料处理组快白菜的地上部干重增加 4.5 倍, 氮、磷、钾含量分别增加 13.4%~31.6%、119%~141% 和 28.5%~81.1%。综上可见, 磷改性炭钙基复合材料可改善酸化土壤质量, 缓解土壤酸化对作物生长的胁迫作用。

关键词: 生物质炭; 牡蛎壳粉; 复合材料; 磷改性; 土壤酸化改良; 作物生长

中图分类号: S156.2 文献标志码: A

Effects of Phosphorus Modified Rice Husk-Oyster Shell Based Biochar Composite on Properties of Acidified Soil and Growth of Chinese Cabbage

HUANG Yanghua^{1,2}, DENG Shengning^{1,3}, LIU Zhao^{1,3}, CHI Haifeng¹, ZHANG Youchi^{1*}, CAI Chao¹

(1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 362100, China; 2 International College of Juncao Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3 University of Nottingham Ningbo China, Ningbo, Zhejiang 315199, China)

Abstract: In order to develop environmental-friendly amendment, a phosphorus(P) modified-biochar composite (ROP) was prepared from rice husk and oyster shell powder, and a pot experiment was conducted to investigate the effects of ROP addition on the properties of acidified soil and the growth of Chinese cabbage. Results indicated that the addition of ROP could mitigate soil acidity. In soils adding 50 g/kg ROP and two different doses of fertilizers, soil pH was increased from 4.20 and 4.39 to 6.48 and 6.00, respectively. Meanwhile, the concentrations of organic matter, nutrients like P, and the activities of phosphatase and urease were increased in ROP amended soils, while the concentrations of available heavy metals were decreased. For Chinese cabbage, the dry weight of aboveground parts of plants under ROP treatment was 4.5 times higher than the control, and the concentrations of N, P and K were increased by 13.4%–31.6%, 119%–141% and 28.5%–81.1%, respectively. In conclusion, the application of ROP can improve soil quality, and alleviate the threat of soil acidification to plant growth.

Key words: Biochar; Oyster shell powder; Composite; Phosphorus modification; Alleviation of soil acidification; Crop growth

受自然条件、酸沉降、施肥等因素影响, 耕地和草地等土壤发生不同程度的酸化^[1]。土壤酸化会造成土壤板结、重金属元素活化、微生物活性降低等不良效应, 对作物生长产生胁迫作用, 降低农产品的产量及品质^[2]。目前, 农田土壤酸化已成为我国农业绿色高质量发展亟待解决的关键环境问题。

土壤酸化治理的主要方法是施用改良剂, 如石

灰、牡蛎壳粉、磷石膏等。作为传统酸化改良技术, 施用石灰可显著提高土壤 pH, 缓解土壤酸化趋势。然而, 长期施用石灰会导致土壤板结和磷养分固定等不良后果^[3]。废弃物基改良材料如煤灰粉、碱渣等同样具备改善土壤酸性的能力, 但这些材料成分复杂且养分含量较低, 输入土壤后还可能导致重金属污染等问题^[4]。因此, 研发绿色、高效的酸化改良材料是当

①基金项目: 福建省科技计划 - STS 计划配套项目(2024T3021, 2021T3006)资助。

* 通信作者(yczhang@iue.ac.cn)

作者简介: 黄杨华(1997—), 男, 福建漳州人, 硕士, 主要从事农业土壤改良技术研究。E-mail: 136549076@qq.com

前研究的热点之一。

生物质炭是一种通过限氧热裂解农业废弃物等原料制备的环境友好型功能材料,近年来在土壤改良领域获得了广泛关注。生物质炭通常呈碱性,添加生物质炭可提高土壤 pH,增强土壤酸缓冲能力^[5]。然而,生物质炭的碱性受原料类型和热解工艺条件等因素影响,因此以往研究中生物质炭处理对土壤酸化改良效果的差异显著。例如,Dai 等^[6]发现,添加猪粪生物质炭和果皮生物质炭可使红砂土 pH 提高 1.28~2.16 个单位,而油菜秆生物质炭处理土壤 pH 与对照相近。采用改性复配方法可提升生物质炭性能。孙洪等^[7]选择生物质炭和铁锰氧化物复合材料及钙肥共同施用,有效改善了土壤酸化程度,并降低了复合材料在土壤环境中的老化趋势;He 等^[8]利用 H₂O₂ 和 HNO₃/H₂SO₄ 改性生物质炭,增加了生物质炭表面有机官能团数量,从而提高了生物质炭对土壤 pH 的调节能力。已有研究发现,牡蛎壳的主要成分为 CaCO₃,将生物质原料与牡蛎壳粉共热解会增加生物质炭的含钙碱性组分含量^[9],Ca²⁺ 的存在还可能影响生物质炭表面有机官能团的分布^[10],从而增强材料中和 H⁺ 及改善酸化土壤质量的能力。但是迄今为止,该类炭钙基复合材料的应用研究主要围绕含磷废水处理和重金属污染修复展开,其对酸化土壤的改良研究鲜见系统报道,相关效能亦不明确。

由此,本研究以前期制备的磷改性炭钙基复合材料(ROP)为研究对象,选取稻壳生物质炭(RH)和牡蛎壳热解材料(OS)作为对照材料,构建盆栽试验体系,探究 ROP 输入后酸化土壤 pH、交换性酸含量、养分含量及酶活性等性质变化,分析 ROP 对快白菜生长的影响,综合评估磷改性炭钙基复合材料在改善酸化土壤方面的效能,以为酸化土壤综合治理提供科技支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试磷改性炭钙基复合材料(ROP)以稻壳和牡蛎壳粉(粒径小于 100 目)为原料制备。具体方法如下:称取稻壳、牡蛎壳粉与 K₂HPO₄ 试剂,按质量比 80 : 8 : 11 混合,加适量水浸渍,搅拌均匀;随后置于 80 °C 下磁力搅拌 2 h,过滤后烘干;将烘干产物置于马弗炉中限氧热解,500 °C 反应 4 h;冷却后,研磨过 10 目筛备用。供试对照材料为稻壳生物质炭(RH)和牡蛎壳热解材料(OS)两种。具体制备方法如下:分别称取稻壳或牡蛎壳粉于马弗炉中限氧热解,500 °C

反应 4 h;冷却后,研磨过 10 目筛备用。3 种改良材料的理化性质如表 1 所示。

供试土壤采自福建平和县某果园表层,为酸化土壤,pH 为 4.19,交换性酸含量为 6.23 cmol/kg,有机质含量为 28.1 g/kg,重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 含量分别为 81.2、0.18、44.1、136 mg/kg。

供试作物为快白菜,种子购于厦门本地农贸市场。该品种白菜生长周期短,可四季种植。

表 1 供试改良材料基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of materials tested

性质	RH	OS	ROP
pH	10.30±0.01c	10.65±0.02b	10.83±0.01a
碱度(mmol/kg)	1.59±0.09c	18.5±0.38a	4.53±0.44b
总磷含量(g/kg)	1.41±0.06b	0.85±0.13c	8.75±0.16a
有效磷含量(g/kg)	0.36±0.02b	0.02±0.00c	2.28±0.07a
枸溶性磷含量(g/kg)	1.29±0.30b	0.42±0.01c	6.21±0.25a
总钾含量(g/kg)	2.14±0.01b	0.14±0.00c	13.1±0.11a
总钙含量(g/kg)	2.79±0.11c	295±12.24a	67.0±5.04b
碳酸盐含量(mol/kg)	1.44±0.12c	8.27±0.17a	4.32±0.08b

注:表中同行不同小写字母表示不同供试材料间差异显著($P<0.05$)。

1.2 试验设计

根据前期室内模拟试验结果,设置改良材料的施用量为 50 g/kg,氮肥施用量为 N 150、400 mg/kg 两个梯度^[11-12]进行盆栽试验。试验共 8 个处理,具体为:施加不同剂量肥料的对照处理组(N150-CK 和 N400-CK)、RH 处理组(N150-RH 和 N400-RH);OS 处理组(N150-OS 和 N400-OS)、ROP 处理组(N150-ROP 和 N400-ROP)。每个处理组均设置 6 个重复。试验同时按 N : P₂O₅ : K₂O=1 : 1 : 1 的比例复配磷肥和钾肥。试验时,将 700 g 土壤与改良材料和不同剂量肥料混合均匀后装入 1.5 L 塑料种植容器。施撒自来水润湿土壤,7 d 后播撒快白菜种子 15 粒,每日早晚两次浇水养护;10 d 后间苗为 5 株,然后继续养护 50 d 至试验结束。

1.3 采样与分析

试验结束后,收获植物样品,破坏性采集土壤样品。采用电位法测定土壤 pH(水土比为 2.5 : 1, V/m)。采用氯化钾交换-中和滴定法测定交换性氢含量和交换性铝含量,加和计算交换性酸总量^[13]。采用高温外热重铬酸钾氧化容量法测定有机质含量。采用 1 mol/L 乙酸铵提取法测定交换性盐基阳离子含量。使用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液提取土壤有效磷,采用柠檬酸提取法提取枸溶性磷,并通过钼锑抗比色法测定有

效磷和枸溶性磷含量^[14]。采用 HClO₄-HNO₃ 消解法测定土壤全钾、全钙、全磷等元素总量^[15]。采用 Solarbio 土壤酶活性检测试剂盒测定土壤脲酶活性，以及酸性、中性和碱性磷酸酶活性。使用 2 mol/L 氯化钾溶液提取土壤中无机氮，通过连华科技的硝态氮/亚硝态氮/铵态氮专用试剂盒测定硝态氮、亚硝态和铵态氮含量。采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提-电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)法测定土壤中重金属有效态含量。

另外，在收获植物样品前，使用 BERC-502 型手持式叶绿素仪测定快白菜叶绿素含量，并记录植株叶片数、株高和根长。随后采集植物样品，将其分为地上部和根部样品分别进行低温烘干，测定样品干重。通过 Vario MAX 元素分析仪测定植物地上部样品中氮含量，参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[16]测定地上部样品的磷、钾、铝、钙及部分重金属元素(Cd、Pb、Cu、Zn)含量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 处理试验数据，通过 SPSS 26 进行处理间方差分析及显著性检验，采用 Origin 2021 制图。

2 结果与讨论

2.1 改良材料对土壤性质的影响

2.1.1 改良材料对土壤 pH 和交换酸含量的影响 不同处理的土壤 pH 如表 2 所示。由表 2 可知，添加改良材料后土壤 pH 均增加，3 种材料对土壤 pH 的影响程度依次为 OS>ROP>RH。在低剂量氮肥处理(N100)下，添加 RH、OS 和 ROP 后，土壤 pH 由 CK 处理的 4.39 分别提高至 5.31、7.08 和 6.48($P<0.05$)。

随着氮肥施用量增加，土壤 pH 呈下降趋势。在高剂量氮肥处理(N400)下，RH 处理的土壤 pH 与 CK 处理之间差异不显著($P>0.05$)，但 OS 和 ROP 处理的土壤 pH 仍由 CK 处理的 4.20 分别显著提高至 6.68 和 6.00。这是因为 RH、OS 和 ROP 均为碱性材料，输入土壤环境后可提高土壤 pH。然而，随着氮肥施用量增加，NH₄⁺的释放、转化与吸收利用过程会影响土壤中 H⁺ 和盐基离子分布，导致土壤 pH 降低。据表 1 所示改良材料碱度和碳酸盐含量，3 种材料的酸中和能力存在差异，因此各处理组间土壤 pH 的降低幅度不同。稻壳与牡蛎壳粉共热解后 ROP 中碳酸盐等碱性成分含量高于 RH，碱度显著升高，这增强了 ROP 与土壤中 H⁺ 的反应能力^[17]；然而，ROP 的碱度和碳酸盐含量均低于 OS，这可能是造成 ROP 处理组土壤 pH 增幅小于 OS 处理组的主要原因。

交换性酸含量是评估土壤酸化程度的重要指标。测试结果显示，添加 3 种材料均能显著降低土壤交换性酸总量($P<0.05$)；其中 RH 处理组对土壤交换性酸总量的降低幅度最小，而 OS 和 ROP 处理组之间差异不显著($P>0.05$)。在低剂量氮肥处理下，添加 RH、OS 和 ROP 后，土壤交换性酸含量分别由 CK 处理的 1.14 cmol/kg 降低至 0.24、0.02 和 0.02 cmol/kg；在高剂量氮肥处理下，土壤交换性酸总量分别由 CK 处理的 1.31 cmol/kg 降低至 1.12、0.01 和 0.14 cmol/kg。碱性材料可中和土壤中的 H⁺，吸附或沉淀游离的 Al³⁺，从而降低土壤的交换性酸含量^[18]。相比改良材料 RH，OS 和 ROP 的 pH 和碱度更高，富含 CaCO₃ 矿物组分，且 ROP 表面含大量磷酸根与有机官能团，可与土壤中的交换性氢和交换性铝反应，因此施用改良材料 ROP 对土壤交换性酸总量的降低效果高于 RH。

表 2 改良材料对土壤 pH 和交换酸含量的影响
Table 2 Effects of amendments on soil pH and exchange acids contents

施氮处理	指标	CK	RH	OS	ROP
N150	pH	4.39±0.21d	5.31±0.10c	7.08±0.05a	6.48±0.09b
	交换性酸总量(cmol/kg)	1.14±0.08a	0.24±0.02b	0.02±0.00c	0.02±0.01c
	交换性氢含量(cmol/kg)	0.56±0.01a	0.20±0.02b	0.02±0.00c	0.02±0.01c
	交换性铝含量(cmol/kg)	0.59±0.09a	0.04±0.03b	—	—
N400	pH	4.20±0.02c	4.17±0.12c	6.68±0.04a	6.00±0.04b
	交换性酸总量(cmol/kg)	1.31±0.10a	1.12±0.17b	0.01±0.01c	0.14±0.02c
	交换性氢含量(cmol/kg)	0.72±0.04a	0.60±0.10b	0.01±0.01d	0.14±0.02c
	交换性铝含量(cmol/kg)	0.59±0.07a	0.52±0.08b	—	—

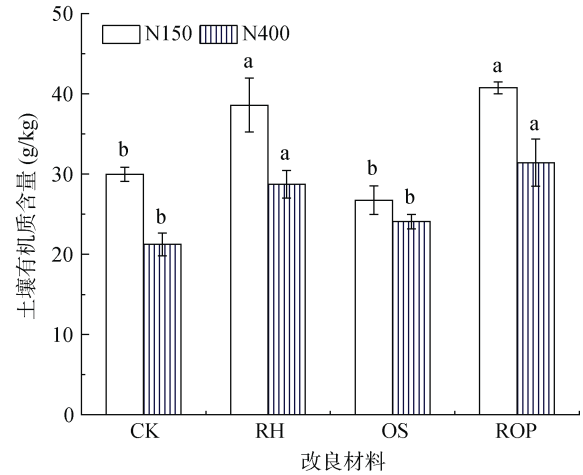
注：表中同行不同小写字母表示不同改良剂处理间差异显著($P<0.05$)；“—”表示检测指标含量低于检测限。下同。

2.1.2 改良材料对土壤有机质及养分含量的影响 施用改良材料不仅可以改善土壤酸性,还可能影响土壤有机质含量等理化指标。各处理组的土壤有机质含量测试结果如图 1 所示,可见, RH 和 ROP 处理组的土壤有机质含量显著高于对照组($P < 0.05$),而 OS 处理组的有机质含量与对照组之间差异不显著($P > 0.05$)。改良材料 RH 和 ROP 中的稻壳热解产物含有大量芳香化合物和脂肪族化合物,可有效增加土壤有机质含量,而 OS 为无机材料,因此施用 OS 对土壤有机质含量的影响不显著。随着氮肥施用量增加,各改良材料处理土壤有机质含量呈下降趋势,这可能是由于添加肥料促进了微生物对有机物质的分解利用^[19]。

土壤养分含量测试结果表明, RH 和 ROP 处理组土壤全氮含量显著高于对照组,而 OS 处理组的土壤全氮含量显著低于对照组(图 2A)。稻壳富含氮元素,热解后 RH 和 ROP 中的氮含量明显高于 OS,添加 RH 和 ROP 能够有效提升土壤中的氮素水平;同时,生物质热解产物的比表面积大,可吸附持留土壤中的无机氮^[20],从而降低栽培过程中氮养分的淋失。OS 处理组的土壤 pH 显著增加,有利于氮的矿化与氨挥发,降低了土壤中的氮含量^[21]。此外,土壤无

机氮测试结果表明(图 2B),添加改良材料后,土壤中铵态氮含量显著低于对照组,而硝态氮和亚硝态氮含量增加。铵态氮是引起土壤酸化的主要原因,而土壤硝态氮含量的增加有助于提高土壤 pH^[1],因此添加 ROP 可能通过影响氮形态转化来缓解土壤酸化趋势。

ROP 处理组显著增加土壤全钾含量,而 RH 和



(图中不同小写字母表示同一施氮处理下不同改良剂处理间差异显著($P < 0.05$); 下同)

图 1 改良材料对土壤有机质含量的影响

Fig. 1 Effects of amendments on soil organic matter contents

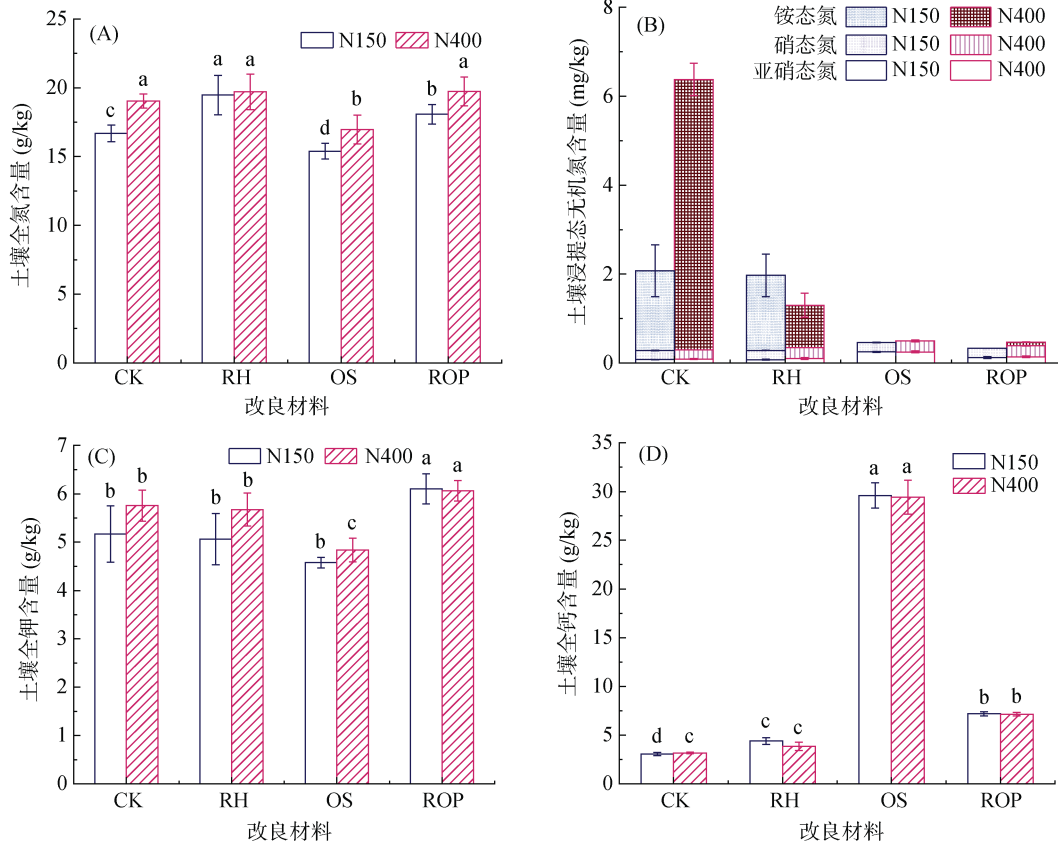


图 2 改良材料对土壤全氮(A)、无机氮(B)、全钾(C)及全钙(D)含量的影响

Fig. 2 Effects of amendments on concentrations of soil total N (A), inorganic N (B), total K (C) and total Ca (D)

OS 处理组土壤全钾含量保持稳定或降低(图 2C)。这可能是因为经磷酸二氢钾改性后, ROP 的钾含量显著高于 RH 和 OS, 因此输入 ROP 可以增加土壤钾含量。

添加改良材料后, 土壤全钙含量呈现增长趋势, 其中 OS 处理组的全钙含量增幅显著($P<0.05$)高于 ROP 处理组(图 2D)。该结果表明, 相比施用 OS, 添加 ROP 可以减少 Ca^{2+} 输入, 这有助于降低 Ca^{2+} 积累引起的土壤板结与磷素固定风险。

不同处理组中土壤磷含量测试结果如图 3 所示。添加 ROP 显著提高了土壤全磷含量, ROP 处理组的土壤全磷含量相比对照组增加了 23.0%~25.6%; 而在 RH 或 OS 处理组中, 土壤全磷含量与对照组之间无显著差异($P>0.05$)。磷改性步骤增加了 ROP 的磷含量, 添加 ROP 可直接提高土壤磷素含量。此外, 添加 ROP 还能提高土壤 pH, 增加金属离子 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等与磷酸根的络合和沉淀作用, 从而降低磷素随径流淋失的风险^[22], 这也导致土壤磷的积累。

土壤中碳酸氢钠浸提态磷被视为植物可利用的有效磷。本试验结果表明, RH 和 OS 处理组的土壤有效磷含量低于对照组, 而添加 ROP 后, 仅高剂量氮肥处理下土壤有效磷含量呈降低趋势(图 3B)。对于代表

土壤中缓释磷的枸溶性磷(图 3C), 添加 ROP 后土壤枸溶性磷含量显著增加($P<0.05$), 而 OS 处理组的枸溶性磷含量显著低于对照组, RH 处理组的枸溶性磷含量在低氮肥条件下与对照组之间无显著差异($P>0.05$)。添加改良材料可提高土壤 pH, 增加磷酸根的吸附和沉淀, 从而促进土壤中易溶态磷转变为缓释态和难溶态磷^[23]。OS 中含有大量 $CaCO_3$, 进入土壤后会释放 Ca^{2+} 与 PO_4^{3-} 形成难溶性沉淀, 导致土壤有效磷和枸溶性磷含量降低。而 ROP 和 RH 自身含一定数量的磷养分, 输入土壤后, 可增加土壤的有效磷和枸溶性磷含量, 维持土壤对作物生长的磷供给能力。

2.1.3 改良材料对土壤重金属有效态含量的影响 不同改良材料处理组中土壤重金属有效性分析结果如表 3 所示。添加 RH、OS 和 ROP 后, 土壤中 Pb 等重金属的有效态含量均呈降低趋势。研究表明, 重金属有效态含量与土壤 pH 呈负相关关系^[24]。添加强碱性的改良材料后, 土壤 pH 增加, 重金属的生物有效性降低。ROP 等材料还富含有机官能团和/或碳酸根、磷酸根等, 可与重金属离子发生络合作用、静电作用、吸附及沉淀反应等, 从而进一步降低土壤中重金属有效态含量^[25]。

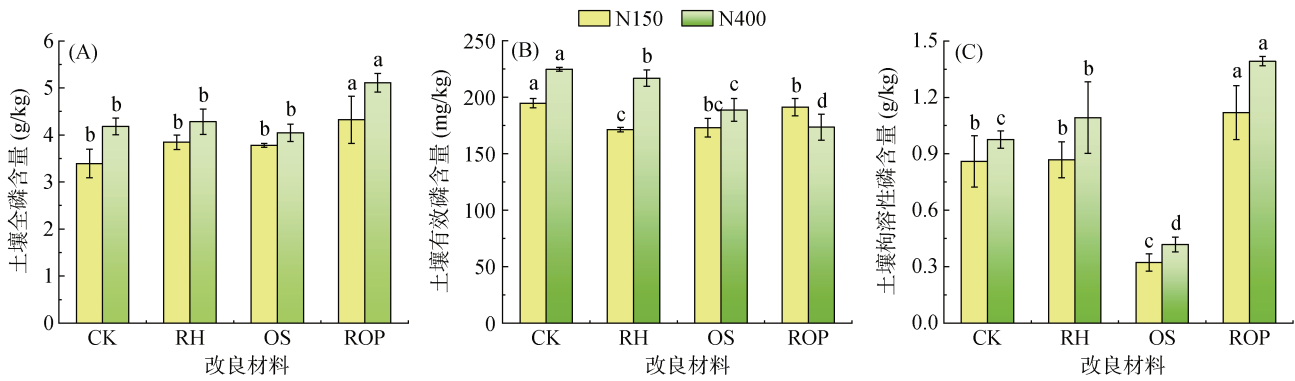


图 3 改良材料对土壤全磷(A)、有效磷(B)及枸溶性磷(C)含量的影响

Fig. 3 Effects of amendments on concentrations of soil total P (A), available P (B) and citric acid soluble P (C)

表 3 改良材料对土壤重金属有效态含量的影响

Table 3 Effects of amendments on concentrations of soil available heavy metals

施氮处理	重金属	CK	RH	OS	ROP
N150	Cd ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	31.1±3.80ab	32.5±4.00a	27.4±1.50bc	26.6±2.60c
	Pb(mg/kg)	3.26±0.16a	2.42±0.10b	2.31±0.08b	2.32±0.08b
	Cu (mg/kg)	3.33±0.21ab	3.67±0.30a	2.85±0.06b	2.91±0.47b
	Zn(mg/kg)	3.38±0.15a	3.37±212.3a	1.32±0.08c	2.02±0.33b
N400	Cd ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	40.7±1.9ab	42.6±3.6a	36.6±3.0b	38.6±1.9ab
	Pb(mg/kg)	4.92±0.45a	3.97±0.43b	3.12±0.44c	3.17±0.36c
	Cu (mg/kg)	3.31±0.27a	3.42±0.33a	2.87±0.34b	3.23±0.18ab
	Zn(mg/kg)	4.66±0.33b	5.47±0.40a	1.79±0.25d	2.99±0.17c

2.2 改良材料对土壤酶活性的影响

土壤脲酶和磷酸酶活性测试结果如图 4 所示。结果表明, 添加改良材料后土壤脲酶活性呈增加趋势, 其中 OS 处理组的脲酶活性最高, ROP 处理组次之; 然而, 随着氮肥添加量增加, 所有处理组的脲酶活性均有所降低(图 4A)。土壤脲酶活性反映了土壤的氮素供应能力, 输入氮肥后土壤中脲酶的底物增加, 酶活性随之增强^[26]。然而, 在高剂量氮肥处理下, 由于氮肥添加量过高, 土壤 pH 明显降低, 影响了微生物活性, 从而导致脲酶活性降低。改良材料可改善土壤 pH 条件, 增强氮转化功能微生物的活性。OS 或 ROP 处理对土壤 pH 的提升效果优于 RH 处理, 这可能是造成高剂量氮肥处理下 OS 和 ROP 处理土壤的脲酶活性

高于 RH 处理的重要原因。

酸性磷酸酶是土壤中主要存在的磷酸酶类型。添加改良材料后, 3 种磷酸酶活性均呈增加趋势, 其中 ROP 处理组的磷酸酶活性增加幅度最大。尽管随着氮肥添加量增加, 所有处理组的磷酸酶活性普遍降低, 但在高剂量氮肥处理下, ROP 处理的酸性磷酸酶、中性磷酸酶和碱性磷酸酶活性仍较 CK 处理增加 0.7 倍、2.0 倍和 4.5 倍(图 4B~4D)。添加改良材料后, 土壤理化性质显著改善, 有利于微生物生长, 提高了磷酸酶活性。在 OS 处理组和 ROP 处理组中, 中性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性均显著高于对照组或 RH 处理组, 这可能与 OS 和 ROP 处理下改良土壤呈中碱性有关。此外, 添加 ROP 还能通过增加土壤全磷含量, 从而提高磷酸酶活性。

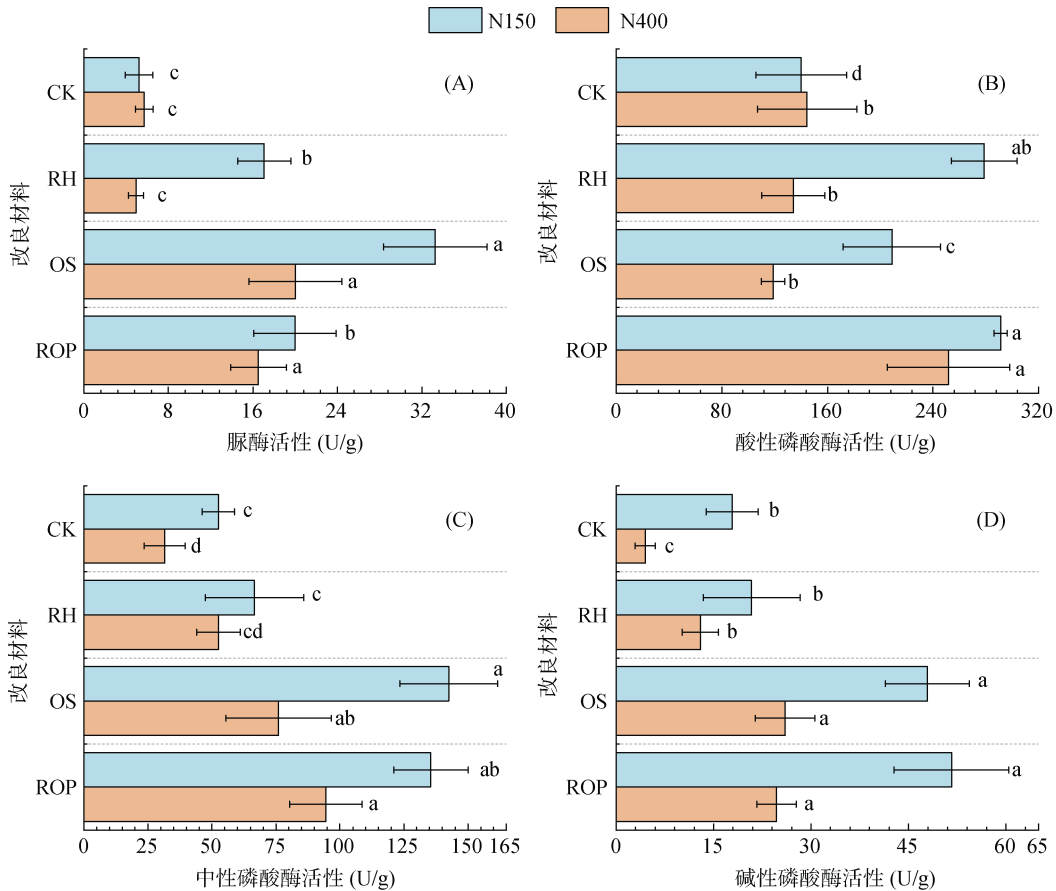


图 4 改良材料对土壤中脲酶(A)、酸性磷酸酶(B)、中性磷酸酶(C)和碱性磷酸酶(D)活性的影响
Fig. 4 Effects of amendments on activities of soil urease(A) and acid(B), neutral(C), and alkaline(D) phosphatase

2.3 改良材料对快白菜生长的影响

2.3.1 改良材料对快白菜长势和生物量的影响 各处理组快白菜的长势和生物量测试结果如图 5 所示。添加改良材料可促进快白菜生长, 快白菜的株高、根长、叶片数和叶绿素含量均显著高于对照组, 同时地上部和根部的干重亦呈增加趋势。在低剂量氮肥处理下,

添加 RH、OS 和 ROP 后, 快白菜地上部的干重分别比 CK 处理增加 3.2 倍、4.1 倍和 4.5 倍。在高剂量氮肥处理下, 各改良材料处理的作物生物量均低于低剂量氮肥处理, 但 OS 和 ROP 处理的作物地上部干重仍比 CK 处理增加 7.3 倍和 7.7 倍。酸化土壤的 pH 环境不利于植物生长, 且土壤酸化还会造成盐基离子

和磷等养分元素流失,从而抑制作物生长和农产品生产。随着氮肥添加量增加,土壤 pH 降低,土壤酸化对作物的胁迫作用加剧^[1]。然而,添加 ROP 等改良

材料能够提高土壤 pH,改善酸化土壤的养分有效性和酶活性,从而缓解土壤酸化的不利影响,并促进快白菜的生长^[27]。

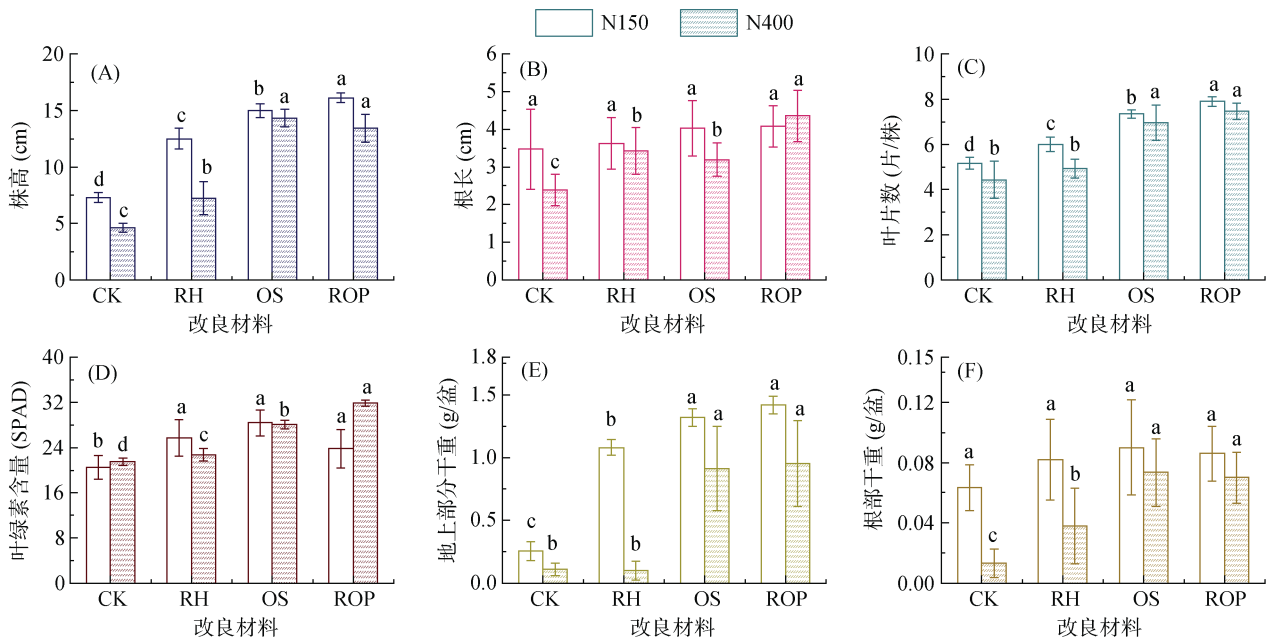


图 5 改良材料对快白菜株高(A)、根长(B)、叶片数(C)、叶绿素含量(D)、地上部分干重(E)和根部干重(F)的影响
Fig. 5 Effects of amendments on heights (A), root lengths (B), leaf numbers (C), chlorophyll contents (D), and dry weights of above ground parts (E) and roots (F) of plants

2.3.2 改良材料对快白菜地上部养分含量的影响 快白菜地上部的养分含量分析结果如图 6 所示。添加改良材料后,快白菜地上部的氮含量显著高于对照组,且地上部氮含量随氮肥添加量的增加而增加。在 ROP 处理组中,作物地上部的氮含量相对对照组增加 13.4%~31.6%。这与前人研究结果相似,添加生物质炭或牡蛎壳基材料能够改善作物根系发育,从而促进作物对养分的吸收与转运累积^[28]。此外,添加生物质炭等碱性材料还可以减少氮淋失,促进土壤中氮素转化为植物易利用形态,从而提高作物对氮的吸收^[29]。

RH 和 ROP 处理均能有效提高快白菜地上部的磷含量,而 OS 处理对其影响不显著。RH 和 ROP 材料的磷含量高于 OS,输入土壤环境后可增加土壤磷含量,有利于作物吸收磷养分;同时,RH 和 ROP 中的稻壳热解产物组分还能促进有机磷矿化,提高土壤中磷的利用率^[22]。其中,ROP 处理组的地上部磷含量是对照组磷含量的 119%~141%,显著高于其他两种改良材料处理组,这可能与 ROP 处理组的土壤全磷含量最高有关。

添加改良材料后,快白菜地上部的钾含量呈增加趋势。ROP 处理组地上部钾含量较对照组增加

28.5%~81.1%,显著高于其他处理组。这与土壤全钾含量的变化一致,ROP 本身的钾含量高,输入土壤后显著增加土壤钾含量,为作物生长提供了丰富的钾养分。

改良材料处理组的快白菜地上部铝含量低于对照组,其中 ROP 处理组的地上部铝含量相对对照组降低 52.2%~60.7%。土壤酸化会产生铝毒,影响作物细胞壁结构与有丝分裂过程等生理活动。改良材料的输入可以提高土壤 pH,降低交换性铝含量。同时,ROP 等材料还能够络合、吸附及沉淀铝离子,改变土壤中铝的分布,从而减少快白菜对铝的吸收累积^[30]。

此外,添加 OS 和 ROP 显著增加快白菜地上部的钙含量,而 RH 处理对地上部钙含量的影响不显著。OS 和 ROP 本身富含钙元素,输入土壤后会增加土壤钙含量,促进作物对 Ca^{2+} 的吸收。在高剂量氮肥处理下,各处理作物地上部的总钙含量高于低剂量氮肥处理下,这可能是因为添加过多氮肥导致土壤 pH 降低,有利于 OS 和 ROP 材料中的 CaCO_3 溶解,释放 Ca^{2+} ,增加了土壤中的可利用钙含量,促进作物吸收钙。

2.3.3 改良材料对快白菜重金属含量的影响 不同处理组快白菜地上部重金属含量如表 4 所示。添加

改良材料后,快白菜地上部的 Pb、Cd、Cu、Zn 等重金属含量降低。在 ROP 处理组中,作物地上部重金属含量与 OS 处理组的差异不显著,但不同程度地低于 RH 处理组。这与土壤重金属有效态含量变化趋势

相符,添加改良材料会提高土壤 pH,吸附固持重金属污染物,降低了土壤-植物体系中重金属的迁移传输^[25]。ROP 的碱性特征及其对重金属离子的吸附作用有助于降低植物对重金属的吸收与累积。

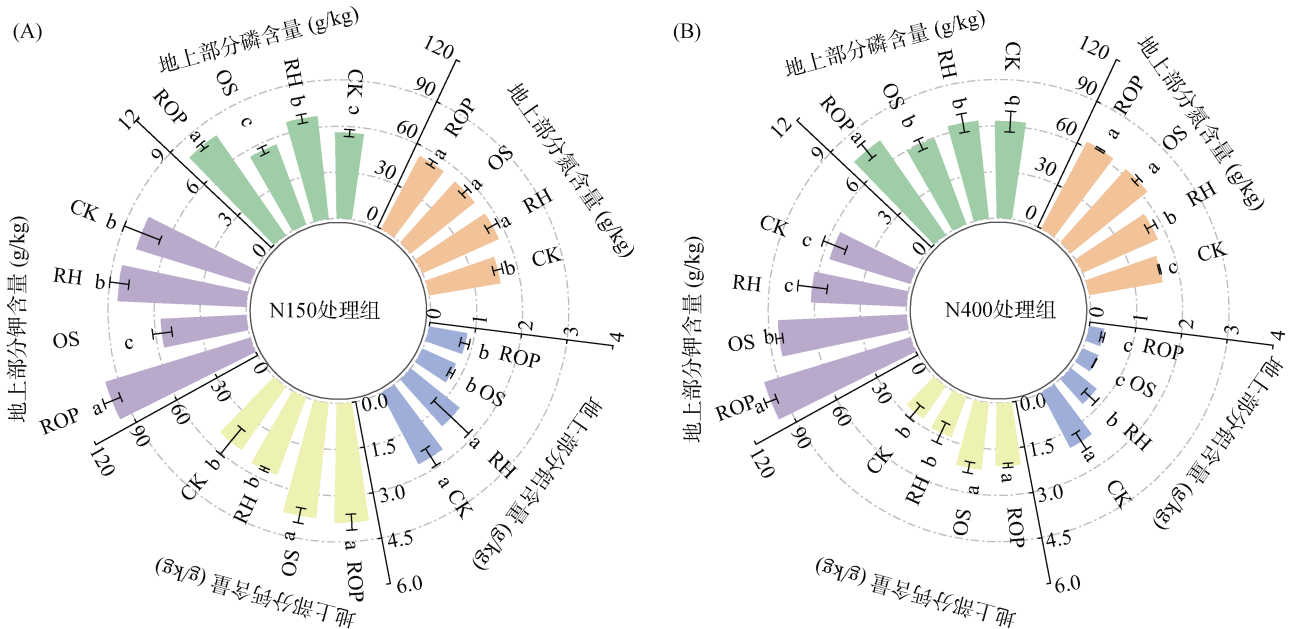


图 6 改良材料对快白菜地上部的氮、磷、钾、铝及钙含量影响
Fig. 6 Effects of amendments on concentrations of N, P, K, Al and Ca in above ground parts of plants

表 4 改良材料对快白菜地上部重金属含量的影响
Table 4 Effect of amendments on concentrations of heavy metals in above ground part of plants

施氮处理	重金属	CK	RH	OS	ROP
N150	Cd(μg/kg)	1.13±0.54a	0.69±0.14b	0.48±0.08b	0.55±0.11b
	Pb(μg/kg)	4.73±0.44a	2.75±0.63b	2.24±0.35b	2.29±0.29b
	Cu(μg/kg)	12.4±2.29a	10.6±1.34ab	8.66±0.77b	10.4±0.50b
	Zn(μg/kg)	157±11.2a	54.0±6.65b	26.3±2.42d	38.9±7.78c
N400	Cd(μg/kg)	1.96±0.56a	1.56±0.15a	0.75±0.12b	0.74±0.17b
	Pb(μg/kg)	9.76±0.18a	5.34±0.44b	3.46±0.61c	2.49±0.32d
	Cu(μg/kg)	15.8±2.47a	11.1±1.07b	9.90±0.49bc	7.89±0.75c
	Zn(μg/kg)	167±16.8a	140±13.3b	30.5±1.85c	34.8±3.68c

3 结论

1)添加改良材料能够显著提高酸化土壤 pH,降低土壤交换性酸含量。磷改性炭钙基复合材料的酸化改良效果低于牡蛎壳热解材料,但显著高于稻壳生物质炭。

2)相比对照组,磷改性炭钙基复合材料处理组土壤有机质与氮、磷、钾、钙含量增加,其中土壤钙含量的增幅低于牡蛎壳热解材料处理组。同时,磷改性炭钙基复合材料处理组土壤脲酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶活性显著升高,而重金属 Pb 等

的有效态含量显著降低,从而改善了酸化土壤质量。

3)添加磷改性炭钙基复合材料后,快白菜的株高、根长与生物量增加,地上部的磷、钾等养分含量提高,而 Pb 等重金属含量降低。

4)磷改性炭钙基复合材料能有效改善酸化土壤性质,缓解土壤酸化对作物生长的胁迫作用,在农田土壤综合治理中表现出良好的应用潜力。

参考文献:

[1] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263.

- [2] 任韬宇, 王朋顺, 袁水含, 等. 基于专利和产品登记的酸性土壤调理剂创新计量分析[J]. 土壤, 2023, 55(4): 860–870.
- [3] Jha A K, Sivapullaiah P V. Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil[J]. *Engineering Geology*, 2015, 198: 53–64.
- [4] 王其选, 陈海宁, 王巍翰, 等. 酸性农田土壤改良材料的选择与应用研究进展[J]. 山东农业科学, 2024, 56(5): 171–180.
- [5] 黄清扬, 徐仁扣, 俞元春. 不同产地油菜秸秆制备的生物质炭对红壤酸度和土壤 pH 缓冲容量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 821–827.
- [6] Dai Z M, Meng J, Muhammad N, et al. The potential feasibility for soil improvement, based on the properties of biochars pyrolyzed from different feedstocks[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(6): 989–1000.
- [7] 孙淇, 吴骥子, 吴秋产, 等. 钙肥配施生物质炭-铁锰复合材料对酸化水稻土中镉砷的钝化[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6677–6688.
- [8] He X, Hong Z N, Shi R Y, et al. The effects of H₂O₂- and HNO₃/H₂SO₄-modified biochars on the resistance of acid paddy soil to acidification[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 293: 118588.
- [9] Feng Y Y, Zhao D, Qiu S K, et al. Adsorption of phosphate in aqueous phase by biochar prepared from sheep manure and modified by oyster shells[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(48): 33046–33056.
- [10] Nan H Y, Yin J X, Yang F, et al. Pyrolysis temperature-dependent carbon retention and stability of biochar with participation of calcium: Implications to carbon sequestration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117566.
- [11] Zhao H Y, Lakshmanan P, Wang X Z, et al. Global reactive nitrogen loss in orchard systems: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153462.
- [12] 吴聪敏, 陈漂, 韩小明, 等. 三元复合肥料的酸度特征及其对土壤酸化的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 365–370.
- [13] Antonangelo J A, Neto J F, Costa Crusciol C A, et al. Comparative analysis of exchangeable aluminum in a tropical soil under long-term no-till cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 216: 105242.
- [14] DeLuca T H, Glanville H C, Harris M, et al. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 110–119.
- [15] Lee C S L, Li X D, Shi W Z, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 356: 45–61.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] Zhang H, Ke S J, Xia M W, et al. Effects of phosphorous precursors and speciation on reducing bioavailability of heavy metal in paddy soil by engineered biochars[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117459.
- [18] 赵琳, 刘桂珍, 钱笑杰, 等. 炭基肥添加对蜜柚果园酸性土壤 pH 和交换性能的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 244–251.
- [19] 郑昭佩, 刘作新, 魏义长, 等. 水肥管理对半干旱丘陵区土壤有机质含量的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 102–104.
- [20] 肖和友, 黎蕾, 陈香碧, 等. 广西蔗渣炭和玉米秸秆炭对水体中铵氮的吸附性能与比较[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(2): 381–386.
- [21] 程琳, 孙晓, 庄舜尧, 等. 模拟石灰添加对雷竹林土壤氮矿化的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 992–998.
- [22] 马珍, 黄凯文, 张珍明, 等. 添加生物炭对土壤磷素有效性影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(8): 89–96.
- [23] Gustafsson J P, Mwamila L B, Kergoat K. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils[J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 304–311.
- [24] 陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 等. 生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu、Cd 有效性影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 358–364.
- [25] 欧阳婷婷, 蔡超, 林姗姗, 等. 炭基和磷基复配材料钝化修复土壤镉污染[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2379–2388, 2178.
- [26] 邹英武, 杜洋文, 程军勇, 等. 不同配方施肥对油茶林地土壤酶活性、微生物群落结构及产量和品质影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(31): 113–121.
- [27] 夏群, 刘宇松, 李诚勇, 等. 两种改良剂对酸化苹果园土壤环境及果树生长的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 112–119.
- [28] 刘芷君, 王格格, 王钰超, 等. 两种土壤改良剂对酸化茶园土壤的修复效果[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(2): 240–246.
- [29] 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 等. 生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6235–6247.
- [30] 赵文瑞, 孔群芳, 张文娟, 等. 骨粉生物质炭对酸性土壤的改良作用[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1299–1309.

(责任编辑: 于 飞)