

DOI:10.11766/trxb202311050456

明润廷, 万方, 那立苹, 吴海程, 王薇, 谭文峰, 伍玉鹏. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2024.

MING Runtong, WAN Fang, NA Liping, WU Haicheng, WANG Wei, TAN Wenfeng, WU Yupeng. Effect of Soil Acid Reduction and Fertilizer Cultivation Under Conditioner Application: Meta-analysis Based on Acid Soil Improvement Studies in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024.

改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析*

明润廷, 万方, 那立苹, 吴海程, 王薇, 谭文峰, 伍玉鹏[†]

(华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070)

摘要: 为了准确评估土壤改良剂施用对中国酸性土壤的降酸培肥效果, 对 127 篇已发表的相关文献进行了 Meta 分析, 明确了酸性土壤改良剂施用对土壤酸度、土壤肥力和作物产量的影响。结果显示: 改良剂在极强酸性土壤 ($\text{pH} \leq 4.5$) 中的降酸效果最好, 施用后土壤 pH 增幅达 14.39%, 土壤交换性铝和交换性酸的削减率分别为 68.61% 和 69.90%。改良剂本身的 pH 和碱度是影响改良剂降酸效果的主要因素, 其中以石灰类改良剂降酸效果最好, 施用后土壤 pH 增加 18%, 交换性酸减少 75.81%。改良剂本身的养分含量和施用量是影响改良剂培肥土壤的主要因素, 其中有机肥类改良剂施用对土壤速效氮、有效磷的提升效果最好 (分别为 60.16% 和 135.30%), 生物质炭类改良剂对土壤速效钾和有机质的提升效果最好 (达 75.52% 和 76.02%)。施用改良剂通过降低土壤酸度、增加土壤肥力达到增产的效果, 其中以生物质炭类改良剂的增产效果最好 (达 78.23%)。综上, 对于强酸性土壤建议施用石灰、高碱度生物质炭等高 pH、高碱度改良剂; 对于酸性且有机质含量较低的土壤建议施用高碱度有机肥、生物质炭等改良剂; 对于酸性且有机质含量较高的土壤建议施用生物质炭、矿物类改良剂; 而对于弱酸性土壤, 建议施用普通有机肥。未来有必要进一步加强无机类和有机类改良剂的配合施用研究, 以此获得较好的酸性土壤改良效果。

关键词: 酸性土壤; 土壤改良; 改良剂; 土壤肥力; Meta 分析

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

Effect of Soil Acid Reduction and Fertilizer Cultivation Under Conditioner Application: Meta-analysis Based on Acid Soil Improvement Studies in China

MING Runtong, WAN Fang, NA Liping, WU Haicheng, WANG Wei, TAN Wenfeng, WU Yupeng[†]

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to accurately evaluate the effect of soil conditioner application on acid reduction and fertilizer cultivation of acidic soils in China. **【Method】** This study conducted a meta-analysis of 127 published literature, and identified the effects of acid soil conditioner application on soil acidity, soil fertility, and crop yield. **【Result】** The results showed that the acid reduction effect of the conditioner in extremely acidic soil

*国家重点研发计划项目 (2021YFD1901202) 资助 Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1901202)

[†]通信作者 Corresponding author, E-mail: wyp19851205@126.com

作者简介: 明润廷 (2001—), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 从事土壤改良研究。E-mail: 3258186409@qq.com

收稿日期: 2023-11-05; 收到修改稿日期: 2024-02-15; 网络首发日期 (www.cnki.net):

($\text{pH} \leq 4.5$) was the best. After application, the soil pH increased by 14.39%, and the reduction rates of exchangeable Al and exchangeable acidity reached 68.61% and 69.90%. The pH and basicity of the conditioner itself were the main factors affecting the acid-lowering effect of the conditioner, among which the lime conditioner had the best effect. It was observed that the soil pH increased by 18% and the exchangeable acidity decreased by 75.81% after application. The nutrient content of the conditioner itself and the amount of the conditioner were the main factors affecting the soil fertility after the conditioner application and the application of organic fertilizer had the best effect on the improvement of soil available nitrogen and available phosphorus (60.16%, 135.30% respectively). Also, biochar amendments had the best effect on the improvement of soil-available potassium and organic matter (75.52% and 76.02%). The application of amendments can reduce soil acidity and increase soil fertility to increase production, and biochar amendments had the best effects of increasing production, reaching 78.23%. **【Conclusion】** For managing acidic soils, it is recommended to apply high pH and high alkalinity amendments such as lime and biochar. For acidic soils with low organic matter content, it is recommended to apply high-alkalinity organic fertilizer, biochar and other amendments while biochar and mineral amendments are recommended for acidic soils with high organic matter content. For weakly acidic soil, it is recommended to apply common organic fertilizer. Nevertheless, it is necessary to further strengthen research on the combined application of inorganic and organic amendments to obtain a better effect on acid soil improvement.

Key words: Acid soil; Soil improvement; Conditioner; Soil fertility; Meta-analysis

土壤 pH 是决定农田土壤肥力特征的重要参数之一, 而土壤酸化已成为全球耕地最为普遍的过程^[1]。土壤酸化会导致土壤结构破坏、养分流失、土壤重金属活性增强, 降低土壤质量和生产力, 使作物减产^[2]。自 1980 年至 21 世纪初, 我国农田土壤 pH 下降了约 0.5 个单位, 酸化土壤面积达全国土壤面积的 22.7%^[3]。控制土壤酸化、改良酸性土壤是我国保障农业可持续发展的关键。

土壤改良剂指加入土壤用于改善土壤物理、化学、生物活性的物质^[4]。已有大量学者针对酸性土壤筛选、研发了一系列土壤改良剂, 包括石灰类改良剂(石灰石、白云石等)、矿物和工业副产品(磷石膏、碱渣、粉煤灰等)、有机物料改良剂(秸秆、腐熟粪便等)和新型改良剂(聚丙烯酰胺、丛枝菌根真菌等)^[5]。也有较多学者对不同改良剂的施用效果进行了比较。王荣辉等^[6]比较了基于电石废渣、矿场废弃物和石灰的 3 种酸性土壤改良剂, 发现不同来源、不同施用量的改良剂对水稻产量的影响差异较大。闫静等^[7]发现碱渣对烟田土壤酸度的改良效果要优于石灰, 但李九玉等^[8]的研究结果显示石灰对茶园表层土壤的改良效果要优于碱渣。上述研究表明, 土壤改良剂种类繁多, 但不同改良剂类型、不同施用量、不同施用条件均会影响其对酸性土壤的改良效果。然而, 现有的对比试验由于规模限制, 选择的改良剂种类一般不超过 6 类^[8], 用量梯度不超过 6 个^[9], 针对的土壤类型最多为 2 种^[10], 所获得的结果并不能较为全面地比较众多类型改良剂的优缺点和施用效果, 限制了对已有改良剂科学、合理的使用。

数据整合分析(Meta-analysis)可对同一主题下的多个独立试验或研究进行综合统计, 以判断试验中的处理对试验对象产生的效应及其大小^[11]。本研究收集整理了我国开展的酸性土壤改良田间试验和培养试验, 采用 Meta-analysis 的方法分析改良剂施用后土壤酸度、土壤肥力和作物产量的变化, 以期更为全面、综合地比较不同类型改良剂的改良效果, 为改良剂在酸性土壤中的合理施用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 数据来源

在 Web of Science 和中国知网 (CNKI) 数据库中, 以关键词“土壤酸化、酸性土壤、红壤”, “改良、调理、修复”和“农田、耕地”对 2023 年 6 月 1 日前发表的相关期刊文献进行检索和筛选。筛选标准为: (1) 研究对象为旱耕地, 不包括水田、果园和药材园; (2) 试验地点在中国, 试验时间明确; (3) 试验中对照组为空白或基施化肥两种形式, 处理组为施用改良剂, 且施用量明确, 其他因素一致; (4) 文献中的重复数明确且不小于 3; (5) 土壤无其他物质污染; (6) 土壤 pH ≤ 6.5 ; (7) 当一项研究有多次取样时, 取数据明确的最后一次取样; (8) 土壤数据来自非根际土。经筛选共获得 127 篇有效文献。

1.2 数据提取及换算补齐

提取文献中土壤 pH、速效氮、有效磷、速效钾、有机质、交换性酸和交换性 Al 含量数据及作物生物量 (产量) 数据, 提取各个试验处理的重复数以及改良剂施用信息 (包括改良剂类型、用量、性质、施用时间等)。根据土壤性质、改良剂性质、改良剂类型以及改良剂施用条件进行分组 (表 1)。

表 1 主要分组变量情况
Table 1 Main grouping variables

分组条件 1 Grouping condition 1	分组条件 2 Grouping condition 2	亚组 Subgroup
土壤性质 Soil properties	土壤 pH	<4.5、4.5~5.5、5.5~6.5
改良剂性质 Properties of conditioner	改良剂 pH	<7、7~8、8~9、9~10、>10
改良剂类型 Type of conditioner	改良剂碱度 / (cmol·kg ⁻¹)	<100、100~200、200~300、>300
改良剂施用条件 Conditioner application conditions	单一改良剂	生物质炭类、植物物料、有机肥、矿物类、工业副产物、石灰类、成品改良剂、其他
	混合改良剂	有机或无机混合、有机和无机混合
	施用量 / (g·kg ⁻¹)	<2、2~20、 ≥ 20
	施用时间 / d	≤ 70 、70~180、>180
	是否与化肥配施	是、否

已有研究中文字和表格展示的数据直接提取, 图形展示的数据使用 GetData Graph Digitizer 2.24 提取, 每组数据均应包括平均值 (M)、样本量 (n) 和标准差 (SD)。如文献中提供标准误 (SE), 则利用公式 $SD=SE \times \sqrt{n}$ 转换为 SD。如果标准误 SE 缺失, 取对应实验组或对照组的 10% 作为替代^[12]。所有数据在分析前进行标准化处理, 改良剂施用量单位统一为 g·kg⁻¹, 大田试验的改良剂施用量根据施用深度和土壤容重进行换算, 若未提供施用深度则默认施用深度为 0~20 cm^[11]; 如果给出的 pH 数据是用 KCl 溶液进行测定的, 则根据公式 $pH_{H_2O} = -1.95 + 11.58lg pH_{KCl}$ ^[13] 将其转化; 土壤有机质 (SOM) 数据以土壤有机碳 (SOC) 表示的利用公式 $SOM=SOC \times 1.724$ ^[14] 转化。

1.3 数据分析

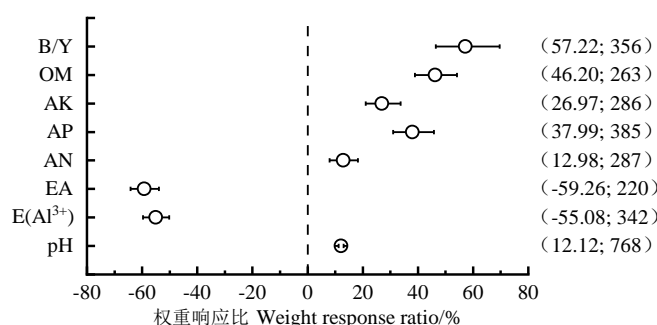
采用对数响应比 (Response ratios, RR) 来评估试验处理中添加土壤改良剂对酸化土壤相关指标的影响程度。对于研究中的某一指标而言, 对数响应比 (RR) 为处理组的均值 (X_E) 与对照组的均值 (X_C) 之比^[15], 依据公式 $lnRR = \ln(X_E \div X_C) = \ln(X_E) - \ln(X_C)$ 进行计算。各组的总体异质性采用非参数化随机效应模型计算, 合并效应值采用加权的抽样检验方法进行随机化检验, 其权重 W_j 基于对数响应比 (lnRR) 的方差和案例间方差 (Pooled study variance) 进行计算^[15]。各合并效应值的 95% 置信区间使用迭代 64 999 次的拔靴法进行计算。若置信区间与 0 重叠, 则表示施用改良剂对酸化土壤相关指标无显著影响; 若置信区间不与零重叠, 则表明施用改良剂对酸化土壤相关指标具有显著的正效应 (>0) 或负效应 (<0) (P<0.05)。采用罗森塔尔失安全系数

(Rosenthal's fail-safe number) 检验发表偏倚^[15]。对数响应比及其 95% 的置信区间通过 $M=(\exp(\ln RR)-1)\times 100\%$ 转化为权重响应比 (处理相对于对照增减的百分数, M) 后用 Origin 9.1 作图。

2 结果

2.1 改良剂施用下酸性土壤化学性质和作物产量的变化

改良剂施用使土壤 pH、速效氮、有效磷、速效钾和有机质分别增加 12.12%、12.98%、37.99%、26.97% 和 46.20%，并使土壤中交换性酸和交换性 Al 的含量分别降低 59.26% 和 55.08% (图 1)。此外，改良剂施用后作物增产 57.22%。



注：误差线代表 95% 的置信区间，纵轴代表无效线。E(Al³⁺)、EA、AN、AP、AK、OM 和 B/Y 分别代表交换性 Al、交换性酸、速效氮、有效磷、速效钾、有机质和生物量/产量，括号内数值分别代表权重响应比和样本数。若置信区间不与零重叠，则表明显著增加(>0)或减少(<0)($P < 0.05$)。下同。Note: Error line represents 95% confidence interval, the vertical axis represents an invalid line. E(Al³⁺), EA, AN, AP, AK, OM and B/Y represent exchangeable aluminum, exchangeable acidity, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter and biomass/yield respectively, and values in brackets represent weight response ratio and sample number respectively. If the confidence interval does not overlap with zero, it indicates a significant increase (> 0) or decrease (< 0)($P < 0.05$). The same as below.

图 1 改良剂对酸性土壤化学性质和作物产量的影响

Fig. 1 Effects of conditioner application on chemical properties of acidic soil and crop yield

2.2 改良剂施用下土壤酸度的变化

改良剂在极强酸性土壤 (pH ≤ 4.5) 中的改良效果最好，施用后土壤 pH 增幅达 14.39%，交换性 Al 和交换性酸分别下降 68.61% 和 69.90% (图 2)。随土壤 pH 升高，土壤改良剂的降酸效果逐渐减弱。土壤有机质含量对改良剂的降酸效果影响并不显著。

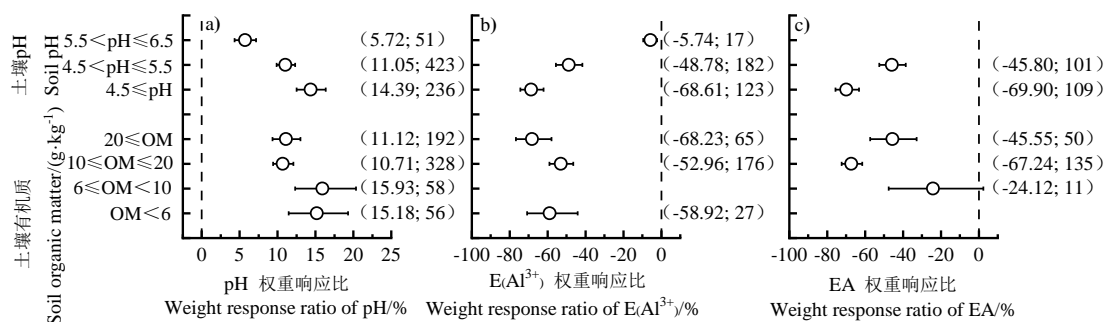


图 2 不同土壤性质下施用改良剂的降酸效果

Fig. 2 Soil acid reduction by conditioner application under different soil properties

改良剂的降酸效果随改良剂碱度及 pH 升高而加强 (图 3)。改良剂 pH 从小于等于 7 增加至大于 10, 其施用后土壤 pH 的增幅从 5.18% 增至 16.33%, 交换性 Al 的降幅从 22.10% 增至 80.99%, 交换性酸的降幅从 29.60% 增至 77.05%。改良剂碱度从小于 100 提高至大于 300 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其施用后土壤 pH 的增幅从 6.83% 增至 18% 左右, 交换性酸的降幅从 31.62% 增至 84.62%。

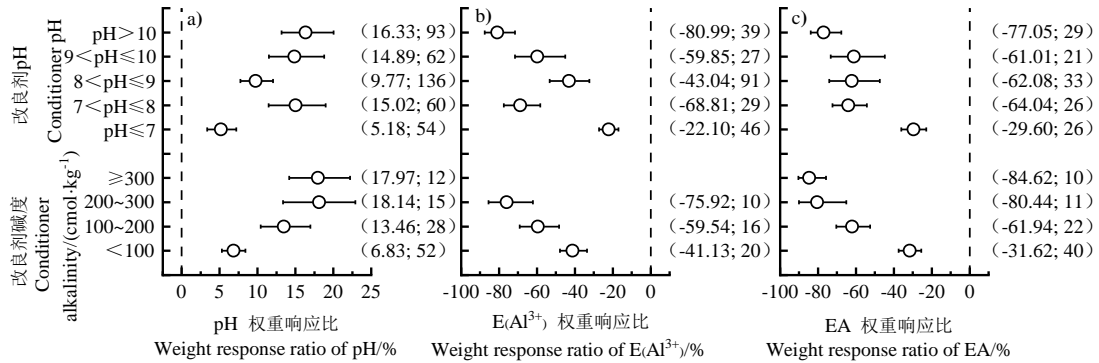
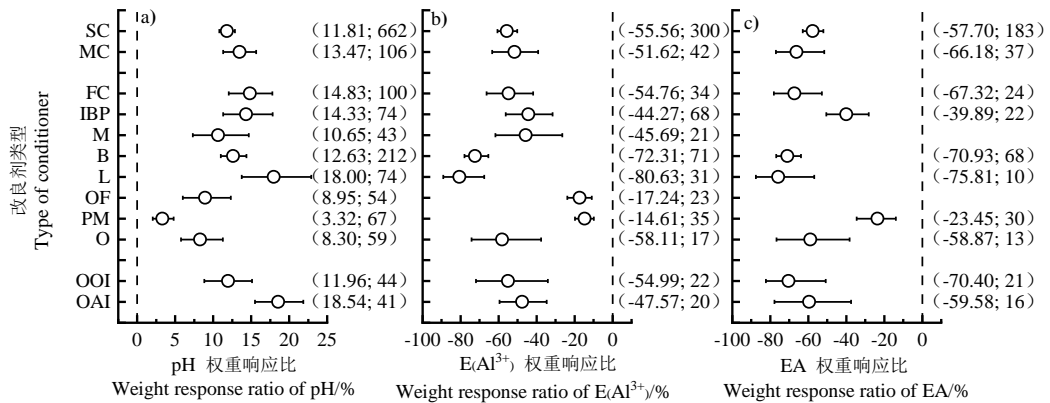


图 3 改良剂性质对土壤降酸效果的影响

Fig. 3 Effects of conditioner properties on soil acid reduction

生产实践中存在施用单一改良剂或混施几种改良剂的情况, 但结果显示两者的降酸效果并无显著差异 (图 4)。施用单一改良剂时, 石灰类改良剂的降酸效果最好, 土壤 pH 增幅达 18%, 交换性 Al 和交换性酸降幅分别达 80.63% 和 75.81%。混合施用改良剂时, 有机-无机混施对土壤 pH 的提升效果显著优于有机混施或无机混施。



注: SC: 单一改良剂; MC: 混合改良剂; FC: 成品改良剂; IBP: 工业副产物; M: 矿物类; B: 生物质炭类; L: 石灰类; OF: 有机肥; PM: 植物物料; O: 其他; OOI: 有机或无机混合; OAI: 有机和无机混合。下同。Note: SC: single conditioner; MC: mixed conditioner; FC: finished product conditioner; IBP: industrial by-products; M: minerals; B: biochar; L: lime; OF: organic fertilizer; PM: plant material; O: other; OOI: organic or inorganic mixture; OAI: organic and inorganic mixture. The same as below.

图 4 改良剂类型对土壤降酸效果的影响

Fig. 4 Effects of conditioner types on soil acid reduction

改良剂对土壤酸度的改良效果与其施用量呈正相关 (图 5)。改良剂施用量为小于 2、2~20 和大于等于 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 土壤 pH 的增幅依次为 8.07%、10.88% 和 17.13%, 土壤交换性 Al 的降幅分别为 41.02%、55.97% 和 63.59%, 土壤交换性酸的降幅分别为 47.76%、51.58% 和 66.72%。改良剂对土壤酸度的改良效果大体上随施用时间的增加而减弱 (图 5)。改良剂施用小于等于 70 d 时, 土壤 pH 和交换性 Al 的变化幅度为 14.17% 和 60.91%, 显著高于施用后 70~180 d 的土壤。

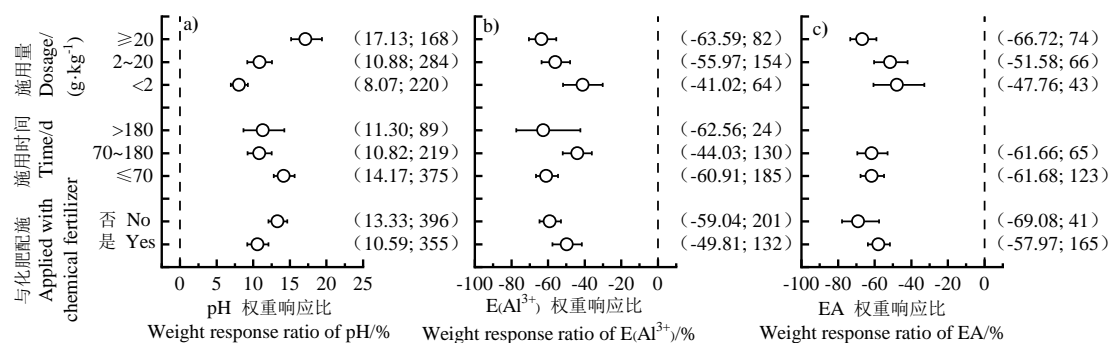


图 5 改良剂施用条件对土壤降酸效果的影响

Fig. 5 Effects of conditioner application method on soil acid reduction

2.3 改良剂施用下土壤肥力的变化

在不同 pH 和有机质含量的土壤之间，改良剂施用对土壤速效氮、有效磷、速效钾和有机质含量的影响并无显著差异（图 6），但相对而言在酸性土壤（ $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ ）中施用改良剂更有利于土壤速效养分和有机质含量的提高。

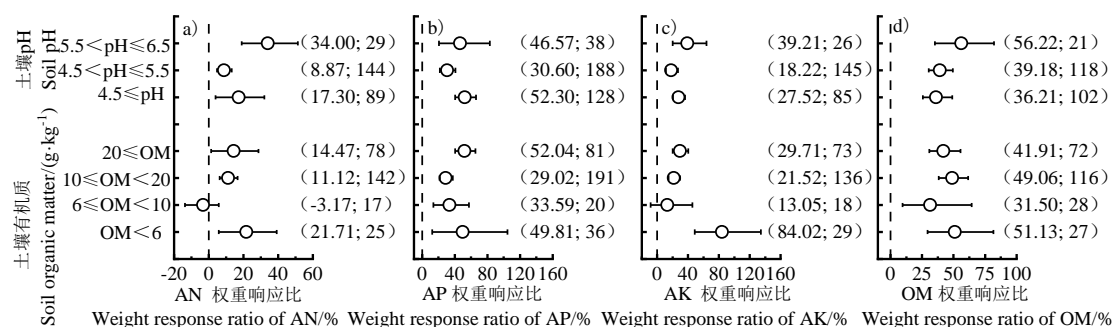


图 6 不同土壤性质下施用改良剂的土壤培肥效果

Fig. 6 Soil fertility improvement by conditioner application under different soil properties

过高 pH ($\text{pH} > 10$) 改良剂的施用不利于土壤肥力的提高（图 7）。反之，施用 $\text{pH} \leq 7$ 的改良剂时土壤速效氮和有效磷的增幅最高（51.38% 和 108.23%），施用 $9 < \text{pH} \leq 10$ 的改良剂时土壤速效钾的增幅最高（90.31%），施用 $7 < \text{pH} \leq 8$ 的改良剂时土壤有机质的增幅最高（116.65%）。

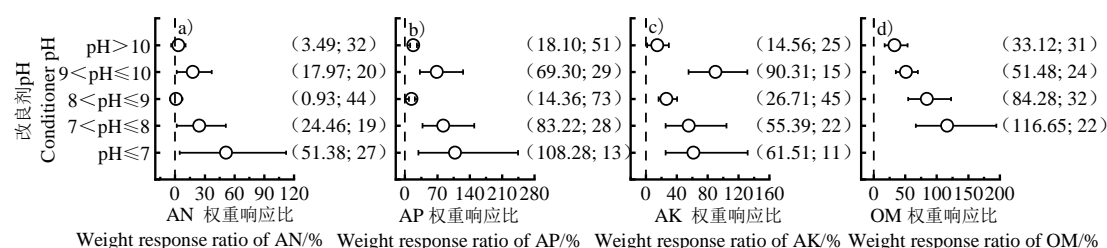


图 7 改良剂性质对土壤培肥的影响

Fig. 7 Effects of conditioner properties on soil fertility improvement

单施或混施改良剂对土壤肥力的影响无显著差异（图 8）。单施一种改良剂时，有机肥类改良剂对土壤速效氮和有效磷的增幅最大（60.16%、135.30%），生物质炭类改良剂对土壤速效钾和有机质的提升效果最好（达 75.52% 和 76.02%）。

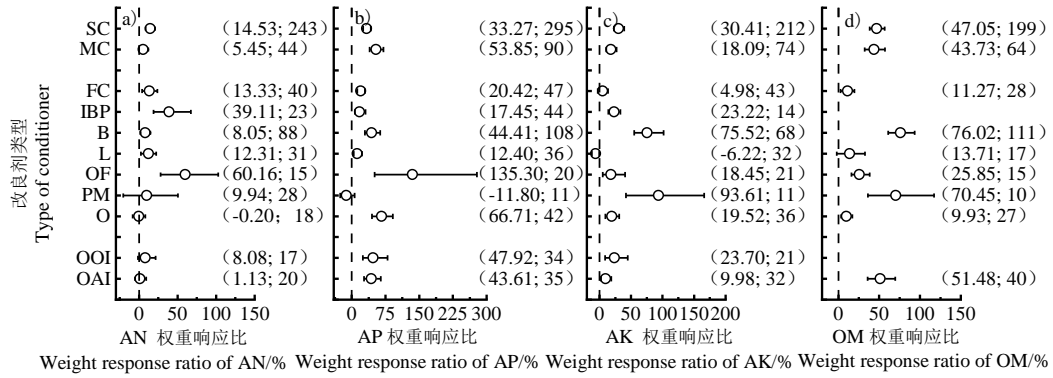


图 8 改良剂类型对土壤培肥的影响

Fig. 8 Effects of conditioner types on soil fertility improvement

改良剂施用量与土壤速效养分、有机质含量成正比(图 9)。随着改良剂施用量从小于 $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至大于等于 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤有效磷、速效钾和有机质含量增幅从 21.22%、11.57% 和 19.32% 显著增加至 92.61%、75.19% 和 156.87%。改良剂对土壤有机质的提升随时间延长而减弱, 改良剂配施化肥降低了改良剂的培肥效果。

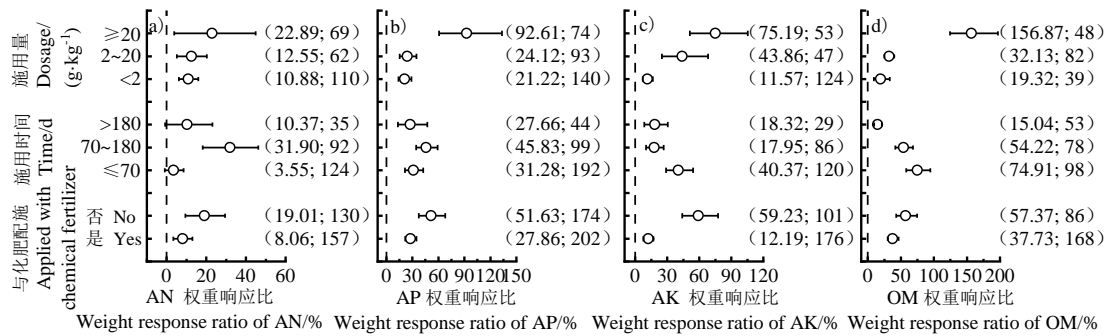


图 9 改良剂施用条件对土壤培肥的影响

Fig. 9 Effects of conditioner application method on soil fertility improvement

2.4 改良剂施用下作物生物量(产量)的变化

土壤理化性质越差, 改良剂施用对作物增产的效果越显著, 土壤 $\text{pH} \leq 4.5$ 时改良剂的增产效果达 93.52%, 土壤有机质含量低于 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时施用改良剂可增产一倍以上(图 10)。一定范围内, 改良剂 pH 的提高有利于作物产量提升, 施用 pH 为 9~10 的改良剂时增产效果最好(87.65%), 但过高 pH (> 10) 的改良剂施用增产效果减弱。改良剂类型影响作物的增产效果, 施用单一改良剂时, 增产效果从高到低依次为生物质炭类(78.23%)、石灰类(67.60%)、矿物类(62.56%)、有机肥(37.23%)、成品改良剂(20.45%)和植物物料(5.00%)。作物产量随着改良剂施用量的增加而增加, 当改良剂施用量大于等于 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时增产效果达到一倍以上。改良剂施用后短期内对作物的增产效果更为明显。

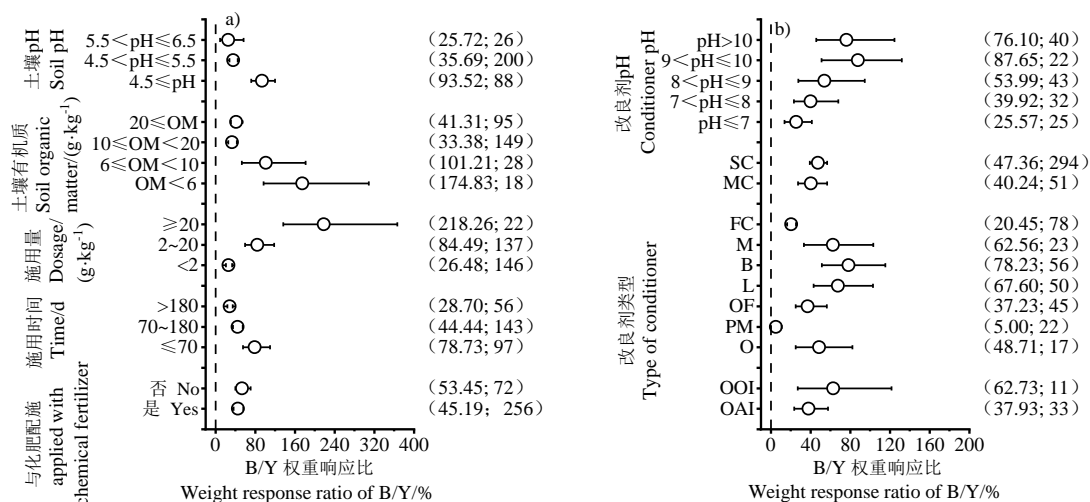


图 10 施用改良剂对作物生物量/产量的影响

Fig. 10 Effects of conditioner application on crop biomass/yield

3 讨论

3.1 施用改良剂对土壤酸度的影响

改良剂施用平均使土壤 pH 增加 12.12%、土壤交换性酸和交换性 Al 含量分别下降 59.26% 和 55.08% (图 1), 是改良酸性土壤的有效方法。此外, 在酸化越严重的土壤中改良剂对土壤的改良效果越好。这主要是因为酸化越严重的土壤其阳离子交换量 (CEC) 和交换性盐基离子含量越低^[16-17], 对酸、碱的缓冲能力就越弱。

已有的研究更多关注改良剂的 pH, 因为 pH 越高对土壤酸度的改良效果越好^[18]。本研究 (图 3) 证实了该观点, 进一步指出改良剂碱度也是影响其降酸效果主要因素^[19]。物料的碱度是对有机阴离子含量的估计, 随着有机物料的分解, 有机阴离子被脱羧, 导致质子的消耗和 CO₂ 的释放^[20-21]。尤其是有机物料, 其施入土壤的中后期土壤 pH 上升幅度与有机肥中碱性物质含量 (即碱度) 高度相关 (图 3)。若剔除氮素氨化和硝化作用的影响, 施入有机物料的碱度几乎完全等于当量石灰试验的酸中和量^[20]。这也可以解释本研究中 pH 为 7~8 的改良剂降酸效果与 pH>10 的改良剂无显著差异 (图 3) 的原因, 即本研究中 pH 为 7~8 的改良剂大部分是堆肥后的有机肥和低温制成的生物质炭, 均有较高的碱度^[21]。因此, 在筛选、研发酸性土壤改良剂时, 除了 pH 外改良剂碱度也是一个需要考虑的指标。

改良剂在短期 (70 d) 内的降酸效果表现更好 (图 5), 是因为改良剂本身含有的碱性物质可在短时间内释放, 中和土壤溶液中的 H⁺, 使 pH 快速上升。中期以后, 土壤胶体中的潜性酸持续释放, 而改良剂中的碱性物质逐渐枯竭, 从而又使得 pH 下降^[22]。有机物料难降解的特性有助于延长其产生的有机阴离子脱羧基化和碱性物质释放过程^[23], 基于有机物料研发长效抑酸改良剂逐渐成为当前产品研发的热点。

化肥中的氮在土壤中会向硝酸盐转化并产生质子, 土壤中不断产生和累积的 H⁺会加速土壤盐基离子的损失, 从而降低土壤酸碱缓冲能力, 加速土壤酸化^[24]。改良剂施用促进作物对土壤硝酸盐的吸收利用, 加快了氮肥向硝酸盐的转化过程可能是化肥配施减弱改良剂降酸效果的原因。

3.2 施用改良剂对土壤肥力的影响

施用改良剂有助于土壤培肥。土壤 pH 提升有利于增加土壤有效磷和速效钾的有效性, 如增加土壤中无机磷的溶解、吸附态磷的解吸以及磷与其他土壤组分的反应等, 降低磷肥施入土壤

后的固定速率,提高土壤的供磷水平等^[10];土壤交换性 Al^{3+} 的降低和 pH 的升高导致土壤表面的负电荷大量增加,为 K^+ 等阳离子创造了更多的吸附点位,从而增加了阳离子在土壤表面的吸附量^[17],减少了钾离子的淋溶损失,提高了钾的有效性。但过高 pH 改良剂的施用不利于土壤速效养分和有机质的提高(图 7),这可能与高 pH 改良剂的主要类型有关。低 pH 改良剂大多是有机类物质,富含养分和有机质,而高 pH 改良剂大多是石灰等无机物质,养分和有机质含量低。这反映改良剂本身的养分含量对土壤速效养分的影响远大于土壤酸度改变对土壤速效养分的影响。

总体而言,有机肥改良剂对土壤速效氮和有效磷的增幅大于生物质炭类改良剂,但生物质炭类改良剂对土壤速效钾的增幅要大于有机肥改良剂(图 8)。这除了与改良剂本身的养分含量有直接的关系以外,还与改良剂本身的特性有关。有研究表明,生物质炭的添加对土壤速效氮的含量无显著影响,甚至会导致土壤速效氮含量降低^[9],但有机肥的施用能够有效增加土壤速效氮含量^[25]。生物质炭中含有大量的 $\text{K}^{[17]}$,并且会促进土壤中缓效钾向速效钾的释放^[26],所以生物质炭对土壤速效钾的增幅大于有机肥。生物质炭中大量稳定有机碳在施入土壤后使得土壤有机碳含量显著升高^[27],而有机肥中的有机质降解速度较生物质炭更快,这可能是生物质炭对土壤有机质提升作用显著大于有机肥的原因。

3.3 施用改良剂对作物生物量/产量的影响

土壤酸化会导致土壤中的矿质营养元素流失、养分有效性下降和严重的铝毒,进而限制植物的生长^[28]。Meta 分析结果(图 1)显示,添加改良剂能够显著降低土壤酸度,增加土壤肥力,从而显著增加作物的产量,这与大部分的单一改良剂试验相符^[7,29]。

在酸化越严重的土壤中,改良剂对作物的增产效果越好(图 10),这与改良剂对强酸性土壤的改良效果更好有关。土壤酸化会导致土壤中的有效硅、有效硼和碱解氮含量下降,还会使土壤中盐基离子淋失,导致作物减产^[30]。该现象在强酸性土壤中尤为明显,当土壤 $\text{pH}<5.5$ 时土壤中固相铝溶出对作物产生毒害,当土壤 $\text{pH}<4.0$ 时甚至会导致作物无法生长^[31]。徐仁扣等^[31]的研究结果表明,酸性土壤 pH 由 5.4 下降 0.7 个单位时,油菜籽减产 40%,而当土壤 pH 由 4.6 下降 0.4 个单位时,油菜籽减产 62% 以上。由此可见,酸化越严重的土壤对作物的限制作用越强,此时改良剂施用对土壤酸度的提高在作物增产的效果上也更为明显。

一定范围内改良剂 pH 的提高有利于作物增产(图 10),这与改良剂对土壤酸度的改良效果(图 3)一致。但过高 pH (大于 10) 的改良剂却使作物增产效果有所减弱,这除了与土壤培肥效果有关,还可能与植物组织和器官的分化有关。过高 pH 的改良剂施用后短期内可能会在土壤中形成一个以改良剂为中心的高 pH 区域,并抑制该区域植物组织和器官的分化^[32]。总体而言,无机类改良剂对土壤酸度的改良效果要优于有机类(图 4),而有机类改良剂对土壤肥力的提升效果较好(图 8)。本研究并未在单一类型(有机或无机)改良剂施用和有机、无机改良剂混合施用之间发现显著差异(图 10),这可能涉及不同类型改良剂之间的协同、拮抗作用,也可能归咎于目前不同改良剂组合施用的研究结果较少。但作物增产是土壤酸度减弱和土壤速效养分提升的综合表现,未来有必要进一步加强无机类和有机类改良剂的配合施用研究,以获得更好的酸性土壤改良效果。

4 结论

施用改良剂可有效降低土壤酸度,增加土壤肥力,并达到增产的效果。改良剂的 pH 和碱度越高,对土壤酸度的改良效果就越好,因此对于强酸性土壤 ($\text{pH}<4.5$) 建议施用石灰、高碱度生物质炭等高 pH 以及高碱度改良剂。有机肥和生物质炭类的改良剂培肥能力较强,因此对于酸性 ($4.5\leq\text{pH}<5.5$) 且有机质含量较低 (小于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的土壤建议施用高碱度有机肥、生物质炭等改良剂,对于酸性 ($4.5\leq\text{pH}<5.5$) 且有机质含量较高 (大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的土壤建议施用生

物质炭、矿物类改良剂, 对于弱酸性 ($5.5 \leq \text{pH} < 6.5$) 土壤, 建议施用有机质含量较高的有机肥进行改良。

参考文献 (References)

- [1] Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1248-1263. [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] He H, Li Y, He L F. Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants[J]. *South African Journal of Botany*, 2019, 123(25): 23-29.
- [3] Gao L Y, Lin W P, Zhang F J, et al. Research progress of biochar in improving soil acidification[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(1): 35-44. [郜礼阳, 林威鹏, 张凤姬, 等. 生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(1): 35-44.]
- [4] Li Y, Liu D, Fan R Q, et al. Research progress of soil ameliorants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(10): 63-69. [李赞, 刘迪, 范如芹, 等. 土壤改良剂的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(10): 63-69.]
- [5] Jiao W. Effects of different admendments on crop growth and physical and chemical properties of acidic soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. [矫威. 不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.]
- [6] Wang R H, Li Y M, Yao J W, et al. Effects of conditioner on rice yield and acid soil properties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(29): 46-51. [王荣辉, 李宇苗, 姚建武, 等. 调理剂对水稻产量及酸性土壤性质的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(29): 46-51.]
- [7] Yan J, Shi R Y, Wang C J, et al. Effects of different amendments on soil acidity and tobacco growth in acidic tobacco field[J]. *Soils*, 2023, 55(3): 612-618. [闫静, 时仁勇, 王昌军, 等. 不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(3): 612-618.]
- [8] Li J Y, Wang N, Xu R K. Amelioration of industrial by-products on soil acidity in red soil[J]. *Soils*, 2009, 41(6): 932-939. [李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. *土壤*, 2009, 41(6): 932-939.]
- [9] Xia H, Riaz M, Zhang M Y, et al. Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 196: 110531.
- [10] Zhou H W, Wang X Q, Qi Y B, et al. Effects of amounts of mineral conditioner on the nutrient status in acid soil and the yield of oilseed rape[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3): 243-249. [周昊文, 王香琪, 齐永波, 等. 矿物质调理剂用量对酸性土壤养分状况和油菜生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(3): 243-249.]
- [11] Li C. Meta-analysis and empirical study on the remediation effect of soil conditioner on heavy metal cadmium pollution [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. [李翠. 土壤调理剂对重金属镉污染修复效应的 Meta 分析及实证研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.]
- [12] Feng Z Z, Shang B, Gao F, et al. Current ambient and elevated ozone effects on poplar: A global meta-analysis and response relationships[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 832-840.
- [13] Li Y, Cui S, Chang S X, et al. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: A global meta-analysis [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1393-1406.
- [14] Duan Z H. Biochar remediation effect and life cycle analysis of cadmium-contaminated soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. [段子豪. 镉污染土壤生物炭修复效果与生命周期分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.]
- [15] Liu G H, Mai W X, Tian C Y. Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils: Meta analysis[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 86-96. [刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 86-96.]
- [16] Li J, Xia S G, Shi X Y, et al. Soil acid buffering capacity of subtropical arbuscular and ectomycorrhizal forests in subtropical China and its main influencing factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023[2024-01-16].

- <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230713.0938.002.html>. [李静, 夏尚光, 石晓芸, 等. 亚热带丛枝和外生菌根森林土壤酸缓冲性能及其主要影响因素 [J]. 生态学杂志, 2023[2024-01-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230713.0938.002.html>.]
- [17] Yuan J H, Xu R K, E S Z, et al. Forms of base cations in biochars and their roles in acid soil amelioration[J]. *Soils*, 2019, 51(1): 75-82. [袁金华, 徐仁扣, 俄胜哲, 等. 生物质炭中盐基离子存在形态及其与改良酸性土壤的关系[J]. 土壤, 2019, 51(1): 75-82.]
- [18] Geng N, Kang X R, Yan X X, et al. Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 232: 113241.
- [19] Wang H, Dong Y, Tong X J, et al. The amelioration effects of canola straw biochar on Ultisol acidity varied with the soil in which the feedstock crop was cultivated[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3): 1424-1434.
- [20] Li Y C, Li Z W, Wang Y X. Effect of four kinds of plant materials on improving soil acidity in tea garden[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 204-209. [李艳春, 李兆伟, 王义祥. 4种植物物料改良茶园土壤酸度的效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 204-209.]
- [21] Meng H Q, LV J L, Xu M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(5): 1153-1160. [孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153-1160.]
- [22] Hu M, Xiang Y S, Lu J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 72-77. [胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.]
- [23] Li Z A, Zou B, Ding Y Z, et al. Effect of plant residues on soil acidity and its mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2382-2388. [李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2382-2388.]
- [24] Cai Z J, Yu Q Y, Wu W B, et al. Changes in soil acidity under different land use in Zengcheng District, Guangdong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(6): 980-988. [蔡泽江, 余强毅, 吴文斌, 等. 广东省增城区不同耕地利用类型下赤红壤酸度变化[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 980-988.]
- [25] Wu Q Y, Xu Y B, Lei B K, et al. Effects of manure substitution for chemical fertilizers on soil nitrogen, organic matter content and rice yield in paddy field [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(10): 2217-2223. [吴茜虞, 续勇波, 雷宝坤, 等. 粪肥替代对稻田土壤氮素、有机质含量及水稻产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2217-2223.]
- [26] Zhang M Y. Effect of biochar on microbial community and potassium in acidic soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. [张梦阳. 生物炭对酸性土壤微生物群落及钾素的作用机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.]
- [27] Meng Y, Shen Y W, Meng W W, et al. Effect of biochar on agricultural soil aggregates and organic carbon: A meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6847-6856. [孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 等. 生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6847-6856.]
- [28] Shen R F, Zhao X Q. The sustainable use of acid soils[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(3): 16-20. [沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报, 2019, 9(3): 16-20.]
- [29] Shi R Y, Li J Y, Xu R K, et al. Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1088-1095. [时仁勇, 李九玉, 徐仁扣, 等. 生物质灰对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1088-1095.]
- [30] Yu T, Yang Z F, Tang J R, et al. Impact of acidification on soil quality in the Dongting Lake region in Hunan Province, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 98-104. [余涛, 杨忠芳, 唐金荣, 等. 湖南洞庭湖区土壤酸化及其对土壤质量的影响[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 98-104.]
- [31] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167. [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.]

- [32] Yan Z H, Hu Z H, Wang S C, et al. Effects of lime content on soil acidity, soil nutrients and crop growth in rice-rape rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23): 4285-4295. [闫志浩, 胡志华, 王士超, 等. 石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52(23): 4285-4295.]

(责任编辑：陈荣府)