

李淑贤, 李娟, 张立成, 等. 甘薯化肥减量增效结合土壤酸化治理的施肥技术 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (12): 1315-1324.

LI S X, LI J, ZHANG L C, et al. Research on Fertilization Technology for Reducing Fertilizer Application to Increase Efficiency with Soil Acidification Treatment in Sweet Potato [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (12): 1315-1324.

甘薯化肥减量增效结合土壤酸化治理的施肥技术

李淑贤^{1,2}, 李娟^{2*}, 张立成², 章明清², 张华³, 张世昌³,
潘住财⁴, 林明贤⁵, 张民生⁶

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 3. 福建省农田建设与土壤肥料技术推广站, 福建 福州 350003; 4. 福建省南安市农业农村局, 福建 南安 362300; 5. 福建省漳浦县土壤肥料技术推广站, 福建 漳浦 363200; 6. 福建省云霄县土壤肥料技术推广站, 福建 云霄 363300)

摘要:【目的】探讨甘薯最佳施肥管理技术, 提高甘薯施肥效益, 治理土壤酸化现象。【方法】在福建省甘薯主产区开展系列田间试验的基础上, 确定有机肥替代化肥的最佳比例和农用氢氧化镁、牡蛎壳粉调理剂的最佳用量, 探讨其化肥减量增效和改酸的应用效果, 总结提出有机-无机结合土壤酸化调理剂的施肥技术。【结果】有机肥替代化肥比例的试验结果表明, 在福建省现有土壤肥力条件下有机肥替代 25% 化肥相较于其他替代比例, 薯块产量最高, 净增收达 13.5%。进一步田间试验表明, 有机肥替代 25% 化肥的施肥措施在全省不同肥力等级田块上均具有普遍的增产效果, 高产田、中产田和低产田甘薯分别增产 4.1%、7.2% 和 18.5%; 相较于高产田, 中、低产田增产效果更加明显, 表明有机肥还可以改良培肥中、低产田, 进一步提高土壤生产潜力。土壤酸化调理剂最佳用量试验结果显示, 在推荐施肥的基础上添加 300 kg·hm⁻² 的农用氢氧化镁或者 1500 kg·hm⁻² 的牡蛎壳粉的增产和改酸效果较好。化肥减量和酸化治理技术的田间试验显示, 有机肥替代 25% 化肥配施 300 kg·hm⁻² 农用氢氧化镁调理剂的施肥措施相较于习惯施肥, 甘薯产量显著提高 4641.7 kg·hm⁻², 土壤 pH 提高 0.49 个 pH 单位。【结论】在推荐施肥基础上, 有机肥替代 25% 化肥配施 300 kg·hm⁻² 农用氢氧化镁或者 1500 kg·hm⁻² 牡蛎壳粉是甘薯减肥增效和土壤酸化治理的最佳施肥技术。

关键词: 甘薯; 有机肥; 土壤酸化调理剂; 施肥技术

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 12-1315-10

Research on Fertilization Technology for Reducing Fertilizer Application to Increase Efficiency with Soil Acidification Treatment in Sweet Potato

LI Shuxian^{1,2}, LI Juan^{2*}, ZHANG Licheng², ZHANG Mingqing², ZHANG Hua³, ZHANG Shichang³,
PAN Zhucan⁴, LIN Mingxian⁵, ZHANG Minsheng⁶

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China; 3. Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou, Fujian 350003, China; 4. Nanan Agricultural Bureau, Nanan, Fujian 362300, China; 5. Zhangpu Agricultural Technology Popularization Station, Zhangpu, Fujian 363200, China; 6. Yunxiao Soil and Fertilizer Station, Yunxiao, Fujian 363300, China)

Abstract: 【Objective】An optimized fertilization for sweet potato farming that could simultaneously reduce fertilizer usage, increase land fertility, and regress soil acidifying was formulated. 【Method】Based on the results accumulated from years of field experiments conducted in the major sweet potato producing areas of Fujian province, a fertilization program applying organic and chemical fertilizers and soil conditioners were proposed. Effects of partially replacing chemicals with organic

收稿日期: 2024-08-20 修回日期: 2024-09-20

作者简介: 李淑贤 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事耕地质量培育与提升研究, E-mail: shuxian1219@163.com

* 通信作者: 李娟 (1977—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事作物营养与施肥研究, E-mail: lj-95@163.com

基金项目: 国家甘薯产业技术体系建设专项 (CARS-10); 福建省科技计划公益类专项 (2021R1025005); 福建省农业高质量发展超越“5511”协同创新工程项目 (XTCXGC2021009)

fertilizers and adding magnesium hydroxide and/or oyster shell conditioner on soil fertility and acidification at farmlands of varied fertility and productivity were analyzed. 【Result】 More than other replacement rates, substituting 25% conventionally applied inorganic compounds with organic fertilizers had demonstrated an increased tuber yield by 13.5% in sweet potato cultivation field trials. The increase varied depending upon the fertility and productivity of the site. The application appeared to be more effective on barren soils, as it raised the yield by 4.1% on the highly productive lands, 7.2% on the intermediately productive lots, and 18.5% on lowly productive fields. For remedying acidification on land, the addition of agricultural magnesium hydroxide at a rate of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ or oyster shells at $1\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in soil not only raised the pH but also the yield of sweet potatoes grown on it. On the field where 25% chemicals were replaced by an organic fertilizer along with $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of magnesium hydroxide application, a significantly increased tuber yield of $4\,641.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and soil pH by 0.49 over the conventional fertilization was achieved. 【Conclusion】 Replacing 25% of chemical fertilizer with an organic one and adding agricultural magnesium hydroxide at a rate of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ or oyster shells at $1\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for fertilization significantly reduced the fertilizer usage, improved the efficiency, and mitigated the soil acidification in sweet potato farming.

Key words: sweet potato; organic fertilizer; soil acidification conditioner; fertilization

0 引言

【研究意义】甘薯是福建省第二大粮食作物，常年种植面积约为 17 万 hm^2 ，种植地大多位于土壤贫瘠的山区和沿海丘陵坡地^[1]。为提高甘薯产量，生产者习惯采用大量施肥的方式，结果造成甘薯产量长期徘徊不前、土壤养分失衡和土壤酸化等一系列问题^[2-3]。因此，探讨甘薯减肥增效和土壤酸化治理技术，对进一步提高甘薯产量和改良土壤具有重要意义。【前人研究进展】众多研究表明，施用有机肥可以提高土壤中有机质含量，改善土壤结构和培肥地力^[4]；施用土壤酸化调理剂可以阻控土壤酸化进程，改善土壤理化特性，提高土壤 pH^[5]。现有研究表明，化肥配施有机肥可通过提高土壤养分、有机碳含量，调节土壤 pH、减缓土壤酸化进程、提升植株光合作用以及抗逆境能力等方式促进甘薯薯块膨大、降低地上部茎茎质量与地下部块茎质量的比值，从而提高甘薯产量^[6-8]。化肥配施土壤调理剂可改良酸性土壤，维持土壤养分供应，提高土壤酶活性，促进根系养分吸收利用，并提高叶片光合作用进而促进作物生长发育，提高作物品质，实现作物高产^[9-11]。【本研究切入点】本课题组前期探究显示，在推荐施肥基础上有机肥替代 25% 化肥具有最佳增产效果，该结论是与有机肥替代 50% 化肥相比较得到的，因试验设计的替代比例跨度过大使该结论尚显粗糙。并且，目前有机肥替代部分化肥同时配施土壤调理剂对甘薯产量影响和土壤酸化调节效应的应用研究仍然较少，可供大面积推广应用的施肥技术规范则更少。【拟解决的关键问题】本研究在前期福建甘薯有机肥替代化肥比例^[12]基础上，进一步完善甘薯有机肥替代化肥的最佳比例，探索在福建土壤条件下有机-无机肥配施结合土壤酸化调理剂的最佳施肥技术，旨在为甘薯化肥减量增效和土

壤酸化治理提供可推广应用的施肥管理模式。

1 材料与方法

1.1 甘薯有机肥替代化肥田间试验

在甘薯主产区设置了不同比例有机肥替代化肥的田间试验。试验共 5 个处理：（1）推荐施肥（RF）；（2）有机肥替代 20% 化肥（80%RF+20%OR）；（3）有机肥替代 25% 化肥（75%RF+25%OR）；（4）有机肥替代 30% 化肥（70%RF+30%OR）；（5）有机肥替代 40% 化肥（60%RF+40%OR）。施肥处理中推荐施肥处理的施肥量以甘薯经济施肥量^[12]为依据，其余施肥处理是在推荐施肥基础上的等量氮磷钾处理，具体施肥量见表 1（不同施肥方案 1）。试验设 3 次重复，小区面积 20 m^2 。试验地分散设置在甘薯主产区，选择当地具有代表性土壤类型和土壤肥力水平的地块作为试验田。

为验证有机肥替代化肥最佳比例在甘薯主产区的普遍适用性，进一步在高产田、中产田、低产田 3 种不同地力水平^[13]的田块设置了有机肥替代化肥技术的田间验证试验。试验设 4 个处理：（1）对照（CK）；（2）习惯施肥（FP）；（3）推荐施肥（RF）；（4）有机肥替代 25% 化肥（75%RF+25%OR）。施肥处理中的习惯施肥处理以测土配方施肥项目在全省甘薯生产施肥现状调查结果的平均施肥量为依据，具体施肥量见表 1（不同施肥方案 2）。

试验肥料分别选用尿素（N 46%）、过磷酸钙（ P_2O_5 12%）、氯化钾（ K_2O 60%），有机肥选用商品有机肥（ $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 5\%$ ）。其中，相关研究表明在一定的阈值（ $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）范围内，适量氯化钾肥的施用可以提高甘薯产量^[14]，综合考虑到福建地区气候特点和土壤特征，且氯化钾肥价格相对便宜，故本试验钾肥选用氯化钾（ K_2O 60%）。甘薯施

表 1 甘薯有机肥替代化肥田间试验设计

Table 1 Field experiment on partial replacement of chemicals with organic fertilizer for sweet potato farming

不同施肥方案1 Different fertilization scheme 1/(kg·hm ⁻²)					不同施肥方案2 Different fertilization scheme 2/(kg·hm ⁻²)				
处理 Treatments	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	处理 Treatments	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer
推荐施肥 RF	180	60	225	0	对照 CK	0	0	0	0
80%推荐施肥+20%有机肥 80%RF+20%OR	144	48	180	2400	习惯施肥 FP	205.5	114	115.5	0
75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+25%OR	135	45	169.5	3000	推荐施肥 RF	180	60	225	0
70%推荐施肥+30%有机肥 70%RF+30%OR	126	42	157.5	3600	75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+OR25%	135	45	169.5	3000
60%推荐施肥+40%有机肥 60%RF+40%OR	108	36	135	4800					

肥分为基肥、苗期追肥和薯块膨大初期追肥 3 次施用。其中，50% 的氮肥和钾肥以及 100% 的磷肥和有机肥作基肥施用；35% 的氮肥和 20% 的钾肥在薯苗插植后 20 d 左右的苗期作追肥施用；剩余 15% 氮肥和 30% 钾肥在薯苗插植后 45 d 左右的薯块膨大初期作追肥施用。施肥方法为在整地前施用基肥，然后起垄，追肥采用侧破垄开浅沟施用。因多年多点田间试验时间跨度长和试验区分布较广等原因，为确保研究结果在生产应用中的普适性，供试甘薯品种

选用当地大面积种植的良种，同一试验田供试甘薯品种相同，试验时间均在当地甘薯正常生产季节。试验区周围设宽 1 m 以上的保护行，其他的田间管理同当地大田一致。

试验实施前，采用“S”型布点法采集 0~20 cm 的混合基础土样 1 kg 用于土壤基本肥力性状的测定，具体供试土壤的基础理化性状见表 2。土壤指标测定方法参常规方法^[15]。甘薯收获时，各小区单收单称，分别记录薯块鲜重产量。

表 2 供试土壤主要理化性状

Table 2 Major physiochemical properties of soils at test sites

试验类型 Experiment types	试验点数 No.of trials	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
有机肥替代化肥最佳比例 The optimal ratio of organic fertilizer replacement	6	6.12±0.70	15.10±3.42	82.25±22.36	52.66±22.20	92.15±32.97
有机肥替代化肥 Organic fertilizer replaces chemical fertilizer	13	5.67±0.40	18.56±5.59	108.82±24.41	51.37±21.70	140.96±33.25
农用氢氧化镁最佳用量 The optimal dosage of agricultural Mg(OH) ₂	2	4.98±0.13	12.59±8.91	105.35±29.20	15.16±12.54	117.55±15.69
牡蛎壳粉最佳用量 The optimal dosage of oyster shells	2	5.41±0.32	18.84±1.22	136.15±14.35	55.77±10.50	108.75±17.61
化肥减量和酸化治理 Fertilizer reduction and acidification treatment	2	4.95±0.30	12.25±8.70	96.95±13.36	26.04±23.07	118.16±20.23

1.2 土壤酸化治理技术田间试验

为探讨在福建土壤条件下土壤酸化调理剂配施的最佳用量，在甘薯主产区设置了农用氢氧化镁、牡蛎壳粉最佳用量试验。农用氢氧化镁最佳用量试验共设计 5 个处理：（1）推荐施肥（RF）；（2）推荐施肥+氢氧化镁 1（RF+Mg1）；（3）推荐施肥+氢氧化镁 2（RF+Mg2）；（4）推荐施肥+氢氧化镁 3（RF+

Mg3）；（5）推荐施肥+氢氧化镁 4（RF+Mg4），具体施肥量见表 3（农用氢氧化镁用量）。牡蛎壳粉最佳用量试验共设计 5 个处理：（1）推荐施肥（RF）；（2）推荐施肥+牡蛎壳粉 1（RF+OS1）；（3）推荐施肥+牡蛎壳粉 2（RF+OS2）；（4）推荐施肥+牡蛎壳粉 3（RF+OS3）；（5）推荐施肥+牡蛎壳粉 4（RF+OS4），具体施肥量见表 3（牡蛎壳粉用量）。为验

证土壤酸化调理剂的最佳用量在甘薯主产区的增产和改酸效果，进一步在不同田块设置了化肥减量和酸化治理试验，该田间试验共设 5 个处理：（1）对照（CK）；（2）习惯施肥（FP）；（3）推荐施肥（RF）；

（4）有机肥替代 25% 化肥（75%RF+25%OR）；（5）有机肥替代 25% 化肥+氢氧化镁 [75%RF+25%OR+Mg(OH)₂]，详见表 4。

表 3 甘薯调理剂最佳用量田间试验设计
Table 3 Field experiment for optimizing conditioner dosage for sweet potato farming

农用氢氧化镁用量 The dosage of agricultural Mg(OH) ₂ /(kg·hm ⁻²)					牡蛎壳粉用量 The dosage of oyster shells/(kg·hm ⁻²)				
处理 Treatments	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	氢氧化镁 Mg(OH) ₂	处理 Treatments	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	牡蛎壳粉 Oyster shells
推荐施肥 RF	180	60	225	0	推荐施肥 RF	180	60	225	0
推荐施肥+氢氧化镁1 RF+Mg1	180	60	225	150	推荐施肥+牡蛎壳粉1 RF+OS1	180	60	225	750
推荐施肥+氢氧化镁2 RF+Mg2	180	60	225	300	推荐施肥+牡蛎壳粉2 RF+OS2	180	60	225	1 500
推荐施肥+氢氧化镁3 RF+Mg3	180	60	225	450	推荐施肥+牡蛎壳粉3 RF+OS3	180	60	225	3 000
推荐施肥+氢氧化镁4 RF+Mg4	180	60	225	600	推荐施肥+牡蛎壳粉4 RF+OS4	180	60	225	4 500

表 4 化肥减量和酸化治理田间试验设计
Table 4 Field experiment on fertilizer usage and soil acidification treatment

化肥减量和酸化治理试验 Fertilizer reduction and acidification treatment/(kg·hm ⁻²)					
处理 Treatments	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	有机肥 OR	氢氧化镁 Mg(OH) ₂
对照 CK	0	0	0	0	0
习惯施肥 FP	205.5	114	115.5	0	0
推荐施肥 RF	180	60	225	0	0
75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+25%OR	135	45	169.5	3 000	0
75%推荐施肥+25%有机肥+ 氢氧化镁 75%RF+25%OR+Mg(OH) ₂	135	45	169.5	3 000	300

田间试验实施方法、田间管理措施和产量验收与上述 1.1 试验相同。供试土壤酸化调理剂为农用氢氧化镁（莆田市华大肥料有限公司提供）和牡蛎壳粉（福建玛塔生态科技有限公司提供），全部作基肥施用。试验选用的农用氢氧化镁中 Mg(OH)₂≥39.0%，质量符合 Q/HDFL 002-2018 标准。试验选用的牡蛎壳粉是采用优质海洋牡蛎壳经新型工艺加工而成的缓释型含钙土壤调理剂，其 pH8.0~10.0，CaO≥35%，质量符合 Q/MTNY 002—2020 标准。供

试土壤的基础理化性状见表 2。农用氢氧化镁最佳用量、牡蛎壳粉最佳用量、化肥减量与酸化治理试验土壤基础交换性钙含量为（1.80±0.57）cmol·kg⁻¹，交换性镁含量为（0.20±0.02）cmol·kg⁻¹。

1.3 数据处理

评价甘薯施肥效益时，以每千克 N 6.0 元、P₂O₅ 5 元、K₂O 5 元、商品有机肥 0.8 元、农用氢氧化镁 1.8 元、牡蛎壳粉 0.6 元和薯块 1.5 元的市场均价为依据计算。数据采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 进行统计分析，采用 Excel 2019、origin 2024 绘制图表，采用单因素随机区组方差分析比较处理间的效应差异，最小显著差数法（least significant difference, LSD）比较平均数之间的差异显著性。检验水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 甘薯有机肥替代化肥的最佳比例

近 4 年来，在甘薯主产区不同肥力田块上完成了 6 个田间试验，试验结果均值见表 5。随着有机肥替代化肥的比例从 20% 提高至 40%，薯块产量呈现先升高后下降的趋势。方差分析表明，75%RF+25%OR 处理的薯块产量显著高于其他 4 个处理，增产率平均达到 18.2%；80%RF+20%OR、70%RF+30%OR 处理的薯块产量显著高于 RF 处理，但 60%RF+40%OR 处理与 RF 处理间并无显著性差异。结合田间施肥成本以及薯块产值计算施肥效益，甘薯净增收表现为 75%RF+25%OR>70%RF+30%OR>80%RF+20%OR>

RF>60%RF+40%OR。75%RF+25%OR 处理的甘薯净产值最高，比 RF 处理增加 13.5%，但 60%RF+40%OR 处理的甘薯净增收低于 RF 处理。由此可知，有机肥替代比例只有在合理范围内才能获得较高的薯块产量和施肥效益。表 5 结果表明，在推荐施肥基础上，有机肥替代 25% 化肥为最佳替代比例。

表 5 不同有机肥替代化肥比例对甘薯产量和施肥效益的影响
Table 5 Sweet potato yield and fertilization efficiency under different rates of replacing chemicals with organic fertilizer

处理 Treatments	薯块产量 Sweet potato yield			施肥效益 Fertilization benefits			
	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产 Yield increase/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/%	肥本 Fertilizer cost/ (元·hm ⁻²)	产值 Output value/ (元·hm ⁻²)	净产值 Net output value/ (元·hm ⁻²)	净增收 Net income rate/%
推荐施肥 RF	20 500.1±6 606 d	—	—	2 505.0	30 750.2	28 245.2	—
80%推荐施肥+20%有机肥 80%RF+20%OR	22 154.0±7 281 bc	1 653.9	8.1	3 924.0	33 231.0	29 307.0	3.8
75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+25%OR	24 231.3±7 801 a	3 731.2	18.2	4 282.5	36 347.0	32 064.5	13.5
70%推荐施肥+30%有机肥 70%RF+30%OR	22 971.8±7 120 b	2 471.7	12.1	4 633.5	34 457.7	29 824.2	5.6
60%推荐施肥+40%有机肥 60%RF+40%OR	21 231.7±6 686 cd	731.6	3.6	5 343.0	31 847.6	26 504.6	-6.2

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P<0.05$)。下表同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences at $P<0.05$. Same for below.

2.2 有机肥替代化肥对甘薯产量的影响

近 4 年，在甘薯主产区的高产田、中产田、低产田分别完成了 3、8、1 个田间试验。表 6 结果表明，在高、中、低产田中，甘薯增产规律均表现为 75%RF+25%OR>RF>FP>CK，75%RF+ 25%OR 处理的薯块产量均显著高于其他 3 个处理。不同地力水平下增产规律的不同点在于，不施化肥的中、低产田和高产田相比增产率大幅度降低，中产田地力水平下的 CK 处理相较于高产田的增产率降低了 21.6%，低产田地力水平下的 CK 处理相较于高产田的增产率降低了 29.7%。仅施用化肥的 FP 处理的中、低产田和高产田甘薯的增产率相持平，高、中、低产田的增产率分别为-3.4%、-4.0%、-6.6%。施用有机肥的中、低产田比高产田甘薯的增产效果更加明显，相较于高产田，中产田地力水平下施用有机肥的 75%RF+25%OR 处理的增产率提升了 3.1%，低产田地力水平下施用有机肥的 75%RF+25%OR 处理的增产率提升了 14.4%。因此，通过更广泛的区域试验研究表明，有机肥替代 25% 化肥的施肥措施在全省不同地力水平下增产效果具有普遍适应性，并且在中、低产田中增产效果更加明显。

2.3 土壤酸化调理剂的最佳用量

2.3.1 土壤酸化调理剂不同用量对甘薯产量的影响
近 2 年来，在甘薯主产区分别完成了 2 个农用氢氧化镁最佳用量试验和 2 个牡蛎壳粉最佳用量试

验。结果（表 7）表明，添加农用氢氧化镁或牡蛎壳粉处理的甘薯产量均显著高于推荐施肥处理。农用氢氧化镁最佳用量试验中甘薯增产规律为 RF+Mg2>RF+Mg3>RF+Mg4>RF+Mg1>RF，RF+Mg2 处理甘薯的增产率相较于 RF+Mg3、RF+Mg4、RF+Mg1 处理分别增加了 1.6%、6.3%、6.8%。牡蛎壳粉最佳用量试验甘薯增产规律为 RF+OS2>RF+OS3>RF+OS4>RF+OS1>RF，RF+OS2 处理甘薯的增产率相较于 RF+OS3、RF+OS4、RF+OS1 处理分别增加了 1.1%、2.8%、4.5%。由此可知，在推荐施肥的基础上添加 300 kg·hm⁻² 的农用氢氧化镁或 1 500 kg·hm⁻² 的牡蛎壳粉可进一步促进甘薯增产。

2.3.2 土壤酸化调理剂不同用量对土壤 pH 的影响

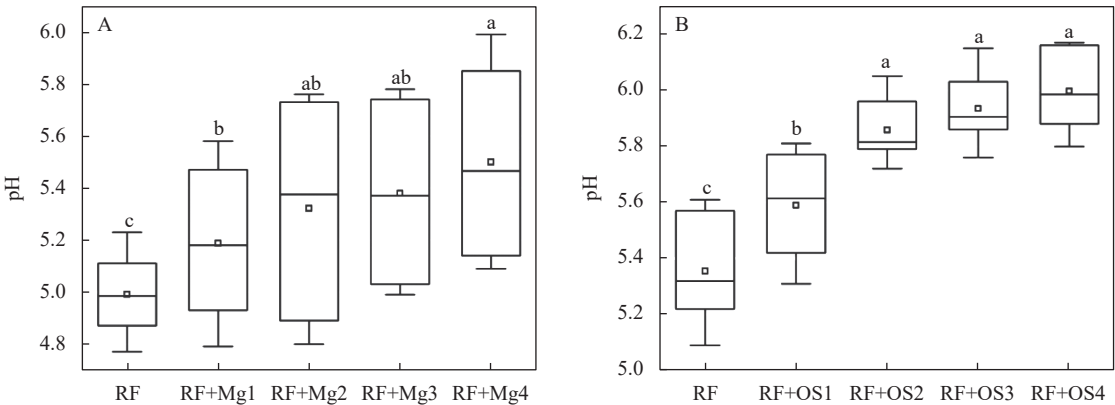
根据试验结束时各处理耕层土样 pH 测定结果，由图 1（A）可知，随着农用氢氧化镁用量的增加，土壤 pH 值依次递增。RF+Mg1、RF+Mg2、RF+Mg3、RF+Mg4 的土壤 pH 分别为 5.19、5.32、5.38、5.50，4 个处理的土壤 pH 显著高于推荐施肥处理，分别提高了 0.20、0.33、0.39、0.51 个 pH 单位。RF+Mg4 处理的土壤 pH 显著高于 RF+Mg1 处理，但与 RF+Mg2、RF+Mg3 处理的土壤 pH 无显著性差异 ($P>0.05$)。
由图 1（B）可知，在牡蛎壳粉最佳用量试验中，RF 处理的土壤 pH 为 5.36，RF+OS1、RF+OS2、RF+OS3、RF+OS4 处理的土壤 pH 显著高于推荐施肥处理，分别提高了 0.23、0.50、0.58、0.64 个 pH 单

表 6 有机肥替代化肥对甘薯产量的影响
Table 6 Sweet potato yield affected by chemical fertilizer replacement

试验田地力类别 Farmlands with varied fertility and productivity	施肥处理 Treatments	薯块产量 Sweet potato yield		
		产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	增产 Yield increase/(kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/%
高产田 High yield field	对照 CK	40 360.0±4437 c	-4441.1	-9.9
	习惯施肥 FP	43 291.1±5317 b	-1 510.0	-3.4
	推荐施肥 RF	44 801.1±4937 b	—	—
	75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+OR25%	46 633.3±4995 a	1 832.2	4.1
中产田 Middle yield field	对照 CK	22 236.3±2 503 c	-10 218.4	-31.5
	习惯施肥 FP	31 156.9±6 197 b	-1 297.8	-4.0
	推荐施肥 RF	32 454.7±6 894 b	—	—
	75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+OR25%	34 777.0±5 896 a	2 322.3	7.2
低产田 Low yield field	对照 CK	11 737.3±13 c	-7 687.7	-39.6
	习惯施肥 FP	18 141.7±617 b	-1 283.3	-6.6
	推荐施肥 RF	19 425.0±2046 b	—	—
	75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+OR25%	23 016.7±1 774 a	3 591.7	18.5

表 7 土壤酸化调理剂不同用量对甘薯产量影响
Table 7 Sweet potato yield under different dosages of soil acidification conditioner

调理剂类别 Conditioner categories	施肥处理 Treatments	薯块产量 Sweet potato yield		
		产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	增产 Yield increase/(kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/%
农用氢氧化镁 Agricultural Mg(OH) ₂	推荐施肥RF	29475.0±5324 b	—	—
	推荐施肥+氢氧化镁1 RF+Mg1	32508.3±7227 a	3033.3	10.3
	推荐施肥+氢氧化镁2 RF+Mg2	34511.7±6958 a	5036.7	17.1
	推荐施肥+氢氧化镁3 RF+Mg3	34058.3±6130 a	4583.3	15.5
	推荐施肥+氢氧化镁4 RF+Mg4	32658.3±6345 a	3183.3	10.8
牡蛎壳粉 Oyster shell	推荐施肥RF	17238.0±1606 b	—	—
	推荐施肥+牡蛎壳粉1 RF+OS1	18928.7±1188 a	1690.7	9.8
	推荐施肥+牡蛎壳粉2 RF+OS2	19702.3±1104 a	2464.3	14.3
	推荐施肥+牡蛎壳粉3 RF+OS3	19506.0±709 a	2268.0	13.2
	推荐施肥+牡蛎壳粉4 RF+OS4	19222.7±1101 a	1984.7	11.5



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 图 2 同。

Data with different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$. Same for Fig. 2.

图 1 不同用量农用氢氧化镁 (A)、牡蛎壳粉 (B) 对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of addition dosages of agricultural magnesium hydroxide (A) and oyster shells (B) on soil pH

位。RF+OS4、RF+OS3、RF+OS2 处理的土壤 pH 显著高于 RF+OS1 处理；但三者间的土壤 pH 并无显著性差异 ($P>0.05$)。综上可知，配施一定量农用氢氧化镁或牡蛎壳粉均可有效提高土壤 pH 值，同时结合甘薯产量情况可知，在推荐施肥的基础上添加 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的农用氢氧化镁或 $1500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的牡蛎壳粉是增产改酸的最佳调理剂用量。

2.4 有机肥替代 25% 化肥配施土壤酸化调理剂对甘薯产量和土壤 pH 的影响

从表 8 可以看出，75%RF+25%OR、75%RF+25%OR+Mg(OH)₂ 处理的甘薯产量显著高于 CK、FP、RF 处理 ($P<0.05$)；FP、RF 处理的甘薯产量显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)；75%RF+25%OR+Mg(OH)₂ 处理的增产率相较于 75%RF+25%OR 处理提高了 2.3%。由此可以推出，有机肥替代 25% 化肥配施农用氢氧化镁调理剂可进一步提高甘薯产量。

表 8 不同施肥措施对甘薯产量的影响
Table 8 Sweet potato yield under different fertilization treatments

施肥处理 Treatments	薯块产量 Sweet potato yield		
	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产 Yield increase/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/ %
对照 CK	24 508.3±5 146 c	-5 850.0	-19.3
习惯施肥 FP	29 425.0±7 804 b	-933.3	-3.1
推荐施肥 RF	30 358.3±7 775 b	—	—
75%推荐施肥+25%有机肥 75%RF+25%OR	33 358.3±8 446 a	3 000.0	9.9
推荐施肥+25%有机肥+氢氧化镁 75%RF+25%OR+Mg(OH) ₂	34 066.7±9 208 a	3 708.4	12.2

试验结束时各处理耕层土样 pH 测定结果如图 2 所示，各处理土壤 pH 值表现为 75%RF+25%OR+Mg(OH)₂>CK>75%RF+25%OR>RF>FP。75%RF+25%OR、RF 处理的土壤 pH 显著高于 FP 处理 ($P<0.05$)，表明添加有机肥和减少化肥用量可以降低土壤 pH 下降程度。RF+25%OR+Mg(OH)₂ 处理的土壤 pH 相较于 CK 处理提高了 0.06 个 pH 单位，相较于 FP、RF、75%RF+25%OR 处理显著提高了 0.49、0.40、0.33 个 pH 单位。结果表明，75%RF+25%OR+Mg(OH)₂ 施肥措施不仅可以消除施用化肥所产生的酸化现象，还可以进一步提高土壤 pH 值。

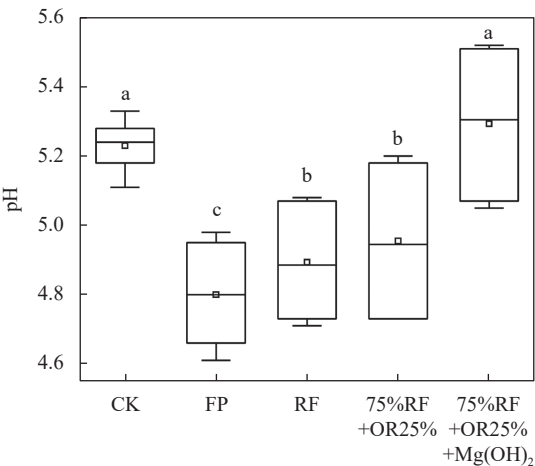


图 2 不同施肥措施对土壤 pH 的影响
Fig. 2 Soil pH under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 化肥替代有机肥比例与甘薯产量和施肥效益的关系

良好的土壤肥力是作物高效生产的基础，而施肥是补充土壤肥力的有效途径^[16]。化肥被誉为粮食的“粮食”，在农作物稳产中具有重要意义，为全球粮食增产作出了 50% 以上的贡献^[17]。施用化肥虽能保证作物产量，但过量施用化肥不仅会增加施肥成本，还会破坏环境，而化肥配施有机肥是一种有效的解决措施。化肥减量配施有机肥不仅能够满足作物的高产需求，而且能够促进土壤肥力稳定提升，提高肥料利用率，起到保护环境、节约资源等作用^[18]。采用化肥减量配施有机肥的施肥策略时，不仅要考虑肥料资源的高效合理利用，同时还需控制好作物产量与经济效益之间的平衡关系^[19]。研究表明，不同比例有机肥替代化肥均能有效提高甘薯产量，但有机肥替代比例过高会导致其施肥效益降低，当有机肥的替代比例为 25% 时，其产量和施肥效益最高。并且在不同地力水平下开展的有机肥替代化肥技术试验同样证明，75%RF+25%OR 处理为最佳施肥处理。因此，化肥配施有机肥施用，需对作物产量与施肥效益进行综合考虑，以确定化肥减量比例并配施有机肥改良土壤，增强土壤肥力，促进作物增产。

3.2 不同地力水平下甘薯产量对施肥措施的响应

采用化肥减量配施有机肥施肥策略时还需关注在不同地力水平下作物增产的情况。不施化肥的中、低产田和高产田相比增产率大幅度降低，表明化肥的施用对作物生长发育是至关重要的，一旦缺失将会严重导致作物减产减收。高产田在不施肥的

情况下,初始可凭借本身肥沃的土壤供给作物生长,维持基础产量,但长此以往高产田养分逐渐耗失从而演变为中、低产田。仅施用化肥的 FP(习惯施肥)处理的中、低产田和高产田甘薯的增产率相持平,表明单施化肥可维持作物的基础产量,但过度依赖化肥,有机肥施用不足会造成土壤酸化、肥力下降等问题^[20]。在化肥的基础上添加有机肥施用的中、低产田比高产田甘薯的增产效果明显,表明有机肥配施化肥是作物高产的关键措施,在推荐施肥的基础上配施有机肥可培肥改土,提高土壤养分供应,促进中、低产田逐步转化为高产田,从而促进作物生长,进一步提高作物产量^[21-22]。

3.3 土壤调理剂可有效改善土壤酸化现象

酸性土壤长期遭受侵蚀,导致表土淋失,土壤中钙、镁、氮、磷等营养元素大量流失,铝、锰、铁等元素大量溶出,形成的铝毒对作物产生直接毒害作用的同时限制作物对多种养分的吸收,严重影响作物的生长^[23]。在农田生态系统中,大量使用化肥尤其是氮肥是农田土壤酸化的主要原因,农田土壤酸化速率与氮肥施用量呈显著正相关^[24]。本研究结果同样表明,过度施用氮肥可显著降低土壤 pH 值,当减少氮肥的使用量以及增添有机肥可以减缓土壤酸化程度。一方面,过量的氮肥进入土壤后硝化作用生成的 NO_3^- 被淋溶和氨挥发作用产生大量 H^+ ,导致土壤酸化,因此减少氮肥的施用即可减少 H^+ 的产生量,从而缓解土壤酸化^[25-26]。另一方面,施用有机肥可通过提高土壤有机质含量引起土壤有机质弱酸性官能团解离有机阴离子质子化形成中性分子,从而提高土壤 pH 缓冲能力和抗酸化能力^[27]。

土壤调理剂是一种有效的酸化修复物质,可以有效改善土壤结构,恢复土壤活力,增强土壤保肥性、透气性及保水性,阻控土壤酸化,降低铝的毒害作用,从而提高农作物的产量及品质^[28-29]。农用氢氧化镁调理剂本身是碱性物质,可直接中和土壤中的酸性物质,提高土壤 pH 值,从而改善土壤结构,这有助于促进作物根系生长,增强植物的养分吸收量,进而提高作物产量。施用牡蛎壳粉土壤调理剂可以降低土壤潜性酸含量,提高土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶的活性,改善土壤养分状况,从而阻控土壤酸化,提高作物产量^[30-32]。本研究表明,添加农用氢氧化镁调理剂处理的甘薯产值不仅最高,而且可以消除施用肥料所产生的酸化现象,进一步提高土壤 pH 值。因此,在化肥配施有机肥的基础上添加 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的农用氢氧化镁为最佳施肥措施。本研究提出的农用氢氧化镁调理剂

与牡蛎壳粉调理剂,它们的多年应用效果是否存在差异未来还需进一步开展试验研究。

4 结论

针对福建省甘薯主产区现存的土壤肥力状况,在化肥推荐施肥基础上有机肥替代 25% 化肥是最佳替代比例,同时配施 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 农用氢氧化镁或者 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 牡蛎壳粉的增产和改酸效果最佳。因此,在推荐施肥基础上有机肥替代 25% 化肥配施适量农用氢氧化镁或牡蛎壳粉调理剂是甘薯化肥减量增效和土壤酸化治理的有效施肥管理技术。

参考文献:

- [1] 林子龙,杨立明,郭其茂,等.福建省甘薯产业现状与发展对策[J].福建农业科技,2014,45(8):85-89.
LIN Z L, YANG L M, GUO Q M, et al. Present situation and development countermeasure of sweet potato industry in Fujian Province [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2014, 45(8): 85-89. (in Chinese)
- [2] 禹阳,谢一芝,郭小丁,等.不同施肥方式对中低产田甘薯产量和土壤肥力的影响[J].江苏农业科学,2020,48(22):77-81.
YU Y, XIE Y Z, GUO X D, et al. Impacts of different fertilization methods on yield and soil fertility of sweet potato in low or medium yield farmland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(22): 77-81. (in Chinese)
- [3] 张晓彤,张亚东,普正仙,等.不同施肥处理对柚园土壤酸度及养分的影响[J].中国土壤与肥料,2023(1):81-89.
ZHANG X T, ZHANG Y D, PU Z X, et al. Effects of different fertilization treatments on soil acidity and nutrients in pomelo orchard [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1): 81-89. (in Chinese)
- [4] 解艳玲,贺萌萌,马玲芳,等.化肥减氮及有机肥配施对水稻产量及土壤养分含量的影响[J].现代农业科技,2023(14):1-4.
XIE Y L, HE M M, MA L F, et al. Effects of nitrogen reduction and organic fertilizer combination on rice yield and soil nutrient content [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(14): 1-4. (in Chinese)
- [5] 管西林,张玉凤,田慎重,等.不同土壤改良措施对胶东酸化设施菜田的改良效果[J].中国蔬菜,2024(10):89-96.
GUAN X L, ZHANG Y F, TIAN S Z, et al. Effects of different soil improvement measures on acidified greenhouse vegetable fields in Jiaodong area [J]. *China Vegetables*, 2024(10): 89-96. (in Chinese)
- [6] 李敏,刘亚军,王文静,等.无机肥与有机肥配施对甘薯生理特性及产量构成因素的影响[J].江苏农业科学,2023,51(16):91-98.
LI M, LIU Y J, WANG W J, et al. Impacts of combined application of inorganic and organic fertilizers on physiological characteristics and yield components of sweet potato [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(16): 91-98. (in Chinese)
- [7] 王静,王磊,刘耀斌,等.长期施用不同有机肥对甘薯产量和土壤生

- 物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 184–192.
- WANG J, WANG L, LIU Y B, et al. Effects of long-term different types of organic fertilizer application on sweet potato yield and soil biological traits [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 184–192. (in Chinese)
- [8] 徐聪, 张辉, 唐忠厚, 等. 减量氮肥配施有机肥及硝化抑制剂对土壤 pH 值、甘薯产量及构成的影响[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 26–30, 71.
- XU C, ZHANG H, TANG Z H, et al. Impacts of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer and nitrification inhibitor on soil pH, sweetpotato tuber yield and its components [J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39(2): 26–30, 71. (in Chinese)
- [9] 黄洁雪, 王晓琳, 郭劼, 等. 化肥减施配施土壤调理剂对草莓品质和土壤养分的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(1): 55–63.
- HUANG J X, WANG X L, WU J, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner application on strawberry quality and soil nutrient [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(1): 55–63. (in Chinese)
- [10] 吴多基, 姚冬辉, 魏宗强, 等. 化肥配施土壤调理剂对酸化红壤性水稻土改良效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(6): 1277–1284.
- WU D J, YAO D H, WEI Z Q, et al. A study on the effect of chemical fertilizer combined with soil conditioner on acidified red paddy soil [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(6): 1277–1284. (in Chinese)
- [11] 刘亚军, 逯昀, 王文静, 等. 有机肥与土壤调理剂对连作甘薯生长发育及土壤肥力的影响[J]. 作物杂志, 2024(3): 168–174.
- LIU Y J, LU Y, WANG W J, et al. Effects of organic fertilizer and soil conditioner on the growth and development of continuous cropping sweet potato and soil fertility [J]. *Crops*, 2024(3): 168–174. (in Chinese)
- [12] 李娟, 张立成, 张华, 等. 福建甘薯氮磷钾推荐施肥与有机肥替代化肥技术模式[J]. 福建农业学报, 2022, 37(8): 968–976.
- LI J, ZHANG L C, ZHANG H, et al. Recommended NPK fertilization and partial replacement with organic manure for sweet potato cultivation in Fujian [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(8): 968–976. (in Chinese)
- [13] 徐志平, 姚宝全, 章明清, 等. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究 I·土壤基础肥力对作物产量的贡献率及其施肥效应[J]. 福建农业学报, 2008, 23(4): 396–402.
- XU Z P, YAO B Q, ZHANG M Q, et al. Soil testing and fertilizer formulation for major crops in Fujian-effects of soil condition and fertilization on crop yield [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 23(4): 396–402. (in Chinese)
- [14] 刘运平, 杨守祥, 史衍玺, 等. 氯化钾对甘薯产量与品质的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(3): 146–152.
- LIU Y P, YANG S X, SHI Y X, et al. Effects of potassium chloride on growth characteristics and yield of sweet potato [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(3): 146–152. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 杜成喜. 周口市土壤养分现状、变化与评价及施肥对策[J]. 农业科技通讯, 2015(4): 166–172.
- DU C X. Current status, changes and evaluation of soil nutrients and fertilization strategies in Zhoukou City [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015(4): 166–172. (in Chinese)
- [17] 李娜, 张志伟, 李艳红, 等. 不同施肥处理对夏玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(16): 130–132.
- LI N, ZHANG Z W, LI Y H, et al. Effect of different fertilization treatments on yield and fertilizer utilization rate of summer maize [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(16): 130–132. (in Chinese)
- [18] XIE G M, LIANG M, CHEN P, et al. The effects of tillage and the combined application of organic and inorganic fertilizers on the antioxidant enzyme activity and yield of maize leaves [J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 968.
- [19] 王雪薇, 夏文豪, 刘涛, 等. 减氮增铵对滴灌玉米氮素营养及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(3): 461–466.
- WANG X W, XIA W H, LIU T, et al. Response of reducing nitrogen and enhancing ammonium to maize N nutrition and yield under drip irrigation condition [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(3): 461–466. (in Chinese)
- [20] 石子建, 唐鹏, 许竹激, 等. 化肥减量配施有机肥对鲜食玉米产量品质和土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 77–82.
- SHI Z J, TANG P, XU Z W, et al. Influences of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on yield and quality of fresh corn and soil physicochemical properties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(5): 77–82. (in Chinese)
- [21] 黄艳岚, 张超凡, 张道微, 等. 有机肥替代化肥对马铃薯产量、氮肥利用和土壤养分的影响[J]. 湖南农业科学, 2022(6): 25–28.
- HUANG Y L, ZHANG C F, ZHANG D W, et al. Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on potato yield, nitrogen utilization efficiency and soil nutrients [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2022(6): 25–28. (in Chinese)
- [22] 杨龙涛, 尚玮瑶, 万子龙, 等. 化肥减量配施生物有机肥对露地西葫芦产量、品质和养分分配的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 64–73.
- YANG L T, SHANG W Y, WAN Z L, et al. Effects of fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizer on yield, quality and nutrient allocation of zucchini in open field [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(2): 64–73. (in Chinese)
- [23] 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.
- SHEN R F, ZHAO X Q. The sustainable use of acid soils [J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(3): 16–20. (in Chinese)
- [24] ZHU Q C, VRIES D W, LIU X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980–2010 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497–1505.
- [25] 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.
- 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. (in Chinese)
- [26] BARAK P, JOBE B O, KRUEGER A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin [J]. *Plant and Soil*, 1997, 197(1): 61–69.
- [27] SHI R Y, LIU Z D, LI Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 77–84.
- [28] 栗方亮, 张青, 王煌平, 等. 土壤调理剂对蜜柚产量、品质及土壤性状的影响 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (6): 39–44.
- LI F L, ZHANG Q, WANG H P, et al. Effects of soil amendments on yield, quality of honey pomelo and soil properties [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(6): 39–44. (in Chinese)
- [29] 何志发. 土壤调理剂对琯溪蜜柚产量及改良土壤酸化的影响 [J]. 福建热作科技, 2020, 45 (4): 30–32.
- HE Z F. Effect of the Guanxi pomelo production and improvement soil acidification by soil conditioner [J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 2020, 45(4): 30–32. (in Chinese)
- [30] 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 等. 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43 (11): 5224–5233.
- ZHAO L F, HUANG P W, YANG C D, et al. Effects of oyster shell powder and lime on availability and forms of phosphorus and enzyme activity in acidic paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5224–5233. (in Chinese)
- [31] 柳开楼, 熊华荣, 胡惠文, 等. 特贝钙土壤调理剂对红壤旱地花生产量和阻控土壤酸化的影响 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (5): 93–98.
- LIU K L, XIONG H R, HU H W, et al. Effects of soil conditioner (named by Tebeigai) on peanut yield and controlling soil acidification in red soil [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(5): 93–98. (in Chinese)
- [32] 孙蓟锋. 几种矿物源土壤调理剂对土壤养分、酶活性及微生物特性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- SUN J F. Effects of several mineral conditioners on soil nutrition, enzyme activity and microbe characteristics [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)

(责任编辑: 徐梦婷)