

黄巧义, 蓝华生, 唐拴虎, 易琼, 黄旭, 张木, 李萍, 付弘婷. 施用碱性物料对稻-稻-菜三熟耕作土壤肥力和作物产量的影响 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(7): 79–87.

施用碱性物料对稻-稻-菜三熟耕作土壤肥力和作物产量的影响

黄巧义¹, 蓝华生², 唐拴虎¹, 易琼¹, 黄旭¹, 张木¹, 李萍¹, 付弘婷¹

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所 / 农业部南方植物营养与肥料重点实验室 /

广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510610)

摘要: 【目的】广东省稻-稻-菜三熟种植区域化肥施用量高, 土壤酸化严重, 耕地质量下降风险高。研究了碱性物料对稻-稻-菜三熟耕作土壤肥力和作物产量的影响, 为该区域耕地土壤肥力和作物产量提升提供理论和技术支撑。【方法】2015—2017年在广东省台山市开展田间试验, 试验设施用熟石灰(Lime)、酸性土壤调理剂(ASC)和常规施肥对照3个处理。分析不同处理对作物养分含量、产量和土壤肥力等指标的影响。【结果】ASC处理周年产量最高, 其次是Lime处理, 对照最低。Lime处理和ASC处理冬种四季豆较对照增产较大, 而早、晚稻的产量基本一致。Lime处理和ASC处理有效磷含量高于对照, 但差异不显著。在冬种蔬菜季, Lime处理和ASC处理作物磷含量较对照有一定的提高趋势。与对照相比, Lime处理和ASC处理显著提高土壤pH值, 其中Lime处理在冬种蔬菜季、早稻季和晚稻季的增幅均达到显著水平, 而ASC处理仅在早稻季达到显著水平。与对照相比, Lime处理和ASC处理土壤有效磷和有机碳含量有一定的提高趋势, 其中冬种蔬菜季的增幅较大; 但对土壤容重、碱解氮和速效钾含量没有影响。与对照相比, Lime处理和ASC处理可有效提高土壤酸性磷酸酶活性, 其中冬种蔬菜季的增幅达到显著水平。【结论】在稻-稻-菜三熟种植系统中, 施用石灰和酸性土壤调理剂均可达到改酸效果, 有效提高土壤有效磷含量和酸性磷酸酶活性, 提高冬种四季豆、早稻和晚稻的产量, 其中冬种蔬菜季对碱性物料的响应更显著。在本试验条件下, 施用石灰和酸性土壤改良剂可作为广东省稻-稻-菜三熟种植区域酸化土壤改良的有效措施, 其中石灰的改酸效果更优。

关键词: 稻-稻-菜; 产量; 石灰; 酸性土壤调理剂; 土壤肥力

中图分类号: S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2020) 07-0079-09

Effects of Applying Alkaline Materials on Soil Fertility and Crop Yield in Rice–Rice–Vegetable Rotation System

HUANG Qiaoyi¹, LAN Huasheng², TANG Shuanhu¹, YI Qiong¹,

HUANG Xu¹, ZHANG Mu¹, LI Ping¹, FU Hongting¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/

Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/

Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of

Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

收稿日期: 2020-04-16

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503123); 广州市科技计划项目产学研协同创新重大专项(201704020187); “十三五”广东省农科院学科团队建设项目(粤农科〔2016〕95号)

作者简介: 黄巧义(1985—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为土壤与植物营养, E-mail:huangqiaoyi@gdaas.cn

通信作者: 唐拴虎(1966—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为新型肥料及植物营养, E-mail:1006339502@qq.com

Abstract: 【Objective】Higher chemical fertilizers were applied in rice–rice–vegetable triple cropping area, which caused serious soil acidification and high risks in the decrease of land quality. The effects of two alkaline materials (lime and acid soil conditioner) on soil fertility and crop yield in rice–rice–vegetable rotation system were studied so as to provide theoretical and technical support for the improvement of soil fertility and crop yield in such cropping area. 【Method】A field experiment was carried out in Taishan City of Guangdong Province from 2015 to 2017 with three treatments: hydrated lime (lime), acid soil conditioner (ASC) and conventional fertilization (CK). The effects of different treatments on crop nutrient content, yield and soil fertility were compared. 【Result】The annual yield of ASC treatment was the highest, followed by lime treatment and CK treatment. The yield of winter kidney bean treated by lime and ASC was higher than that of CK, while the yield of early and late rice was basically the same. The effective tiller number of early and late rice under lime treatment and ASC treatment was higher than that of CK, but the difference was not significant. In winter vegetable season, the P contents of the crops under lime and ASC treatments increased slightly. Soil pH value was increased greatly under lime treatment and ASC treatment. In winter vegetable season, early rice season and late rice season, soil pH values under lime treatment were significantly higher than those of CK treatment. For ASC treatment, the soil pH value only increased significantly in early rice season. Compared with CK, the soil available P and SOC under lime and ASC treatments were increased slightly, especially in winter vegetable season. However, there was no difference in soil bulk density, alkali nitrogen and available K among different treatments. Compared with CK treatment, the activity of soil acid phosphatase was increased significantly under lime treatment and ASC treatment, and the increase during winter vegetable season was significant. 【Conclusion】In the rice–rice–vegetable triple cropping system, the application of lime and acid soil conditioner can alleviate the soil acidification effectively, increase the soil available P and acid phosphatase activity, and increase the yields of kidney bean, early rice and late rice. The responses of alkaline materials were greater in winter vegetable season. Under the experimental conditions, the application of lime and acid soil conditioner can be used as effective measures to improve acidified soil in the rice–rice–vegetable triple cropping areas of Guangdong Province, and the lime has a greater impact on soil pH.

Key words: rice–rice–vegetable; yield; lime; acid soil conditioner; soil fertility

【研究意义】稻 – 菜轮作体系的化肥施用量高，不仅导致养分资源浪费、引发农业面源污染，同时还导致耕地土壤酸化^[1-3]。长期监测数据结果表明，稻 – 菜轮作种植制度的土壤酸化程度较水稻连作种植制度严重^[4]。郑超等^[5]调查发现，2015 年广东省农田土壤 pH 值的平均数和中位数分别为 5.49 和 5.3。而我们对“稻 – 稻 – 菜”三熟种植区耕地土壤 pH 值取样发现，大部分土壤 pH 值均在 5.0 以下。耕地土壤酸化导致土壤中铵态氮、钾、钙、镁等养分离子更易流失，磷有效性降低，土壤肥力下降；同时，土壤中铝、锰、镉等金属活性提高，降低土壤质量；强酸土壤环境还威胁作物根系生长，影响作物产量^[6-8]。因此，开展稻 – 稻 – 菜”三熟种植土壤酸性土壤改良试验研究，筛选适宜的土壤改良技术，对促进广东省“稻 – 稻 – 菜”三熟种植系统可持续发展具有重要意义。

【前人研究进展】施用石灰是改良土壤酸性的常规农业措施，研究表明，在稻油轮作区施用

石灰可有效提高土壤 pH 值，并提高土壤速效氮、交换性钙镁含量及油菜和水稻产量^[9]。短期和长期田间试验结果均表明，施用石灰具有明显的改良土壤酸性、提高作物产量的效果^[10]。也有研究认为，石灰的溶解性和移动性较差，易引起土壤板结^[8,11]。施用富含碱性物料的酸性土壤改良剂是近年进行酸性土壤改良的一种新措施^[6,11-12]。研究表明，土壤调理剂也可有效提高土壤 pH 值，有效降低土壤交换性铝含量，促进作物根系生长，提高作物产量^[11-12]。施用石灰和土壤调理剂改良土壤酸性的效果受不同种植制度影响，以及对作物产量的影响也有所差异^[10]。

【本研究切入点】某一作物或者单一作物连作系统施用石灰或者土壤调理剂的研究已较多^[6,10-13]，在稻 – 油轮作系统也有石灰改酸的相关研究^[9]，华南地区稻 – 菜轮作体系的土壤酸化程度及酸化特征有别于其他种植系统，而采用石灰和酸性土壤调理剂进行土壤改良的系统研究尚未见报道。【拟解决的关键问题】为了明确稻 – 稻 –

菜三熟种植体系下采用石灰和土壤改良剂对土壤酸性的改良效果,本研究通过田间试验,研究了石灰和酸性土壤调理剂对广东省典型稻-稻-菜三熟种植区域土壤pH值、其他土壤理化形状和作物产量等方面的影响,为稻-稻-菜三熟种植区域土壤酸性改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于2015年4月至2017年4月在广东省台山市都斛镇南村($22^{\circ} 15' 39'' \text{N}$, $112^{\circ} 49' 36'' \text{E}$)进行。台山市试验点位于广东省珠三角西南部,属于南亚热带海洋性季风气候,气候温和,雨量充沛,日照充足,热量丰富。年平均气温 22.3°C ,年平均日照2 006 h,年均降水量3 500.5 mm以上,无霜期360 d。

供试土壤为砂壤土,试验前0~20 cm土层的基本理化性质为:pH 4.98,有机质21.50 g/kg,碱解氮116.18 mg/kg,有效磷46.21 mg/kg,速效钾80.15 mg/kg。供试石灰采购自市面上普通的生石灰;供试酸性土壤调理剂是广东省农业科学院资源与环境研究所自研的调理剂,其生产原料包括白云石、碱渣、石灰等,pH值为10.4。

1.2 试验方法

试验设施用熟石灰(Lime)、酸性土壤调理剂(ASC)和常规施肥对照3个处理,每个处理4次重复,随机区组排列,小区面积 31.14 m^2 ($4.84 \text{ m} \times 6.95 \text{ m}$)。小区间筑埂后用塑料薄膜包覆隔离,实行单独排灌,防止水、肥渗透。

石灰和酸性土壤调理剂均作基肥施用,在每一季作物移栽前1 d施用,每茬施用量为 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$,施用后采用农用机具将其与土壤混匀。早、晚稻化肥采用“新农科”牌水稻控释肥(广州新农科肥业科技有限公司生产),在水稻移栽前全部基施。冬种蔬菜施用18 : 7 : 15复合肥,分4次进行,其中基肥10%,移栽后15、25、35 d各追施30%。

1.3 田间管理

早造水稻品种为常规稻品种黄丝占,晚造水稻品种为新宁丝苗。每年早稻于4月下旬至5月上旬移栽,7月中下旬收获,全生育期约为83 d;晚稻于8月上中旬移栽,11月上旬收获,全生育期约为93 d;冬种蔬菜为四季豆,品种为泰优15

号玉豆(由泰国引进,茂名南方良种蔬菜公司选育)。四季豆于12月中旬播种,1月中旬上架,2月下旬开花,3月下旬开始收获第一批豆,4月底全部收获完毕,全生育期约为125 d,全年作物覆盖天数约为301 d。

1.4 测产与样品采集

田间试验开始前采集0~20 cm耕层土样,用于测定pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾。

于2016年7月早稻成熟期和11月晚稻成熟期,各小区单独收获,测产。2017年3—4月四季豆收成季节每小区单独收获,称重,记录四季豆产量。水稻收获前,每小区取样5株,进行室内考种,包括有效穗数、实粒数、结实率、千粒重。在各种作物收获时,每个小区取样2株,用于作物养分含量分析。

生物量测定:样品采集后立即洗净、擦干,将稻谷和稻草分开,105 °C杀青30 min,随后75 °C烘干至恒重。

植株含氮量测定:将各处理茎叶和穗部样品在105 °C下杀青30 min,随后在75 °C下烘干至恒重,粉碎后过0.5 mm筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,用凯氏定氮法测定。

2016年7月早稻收获期和11月晚稻收获期,以及2017年4月四季豆收获期采集每个试验小区的耕层土壤样品。一部分土壤样品风干处理,用于基本理化性状分析;另取一部分样品放于4 °C冰箱,用于土壤酶活性分析。

土壤样品经风干过筛后,采用常规土壤农化分析方法进行理化分析^[14]。土壤pH(2.5 : 1)用酸度计电位法,有机碳用重铬酸钾容量法,土壤碱解氮用碱解扩散法,有效磷用Olsen法,速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。

土壤关键胞外酶活性,包括土壤过氧化氢酶、脱氢酶、蔗糖酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的测定:土壤过氧化氢酶、脱氢酶、蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性依次采用高锰酸钾滴定法、TTC还原法、3,5-二硝基水杨酸比色法、靛酚蓝比色法和磷酸苯二钠比色法进行测定, β -1,4-葡萄糖苷酶采用荧光微型板酶检测方法测定^[15]。

采用MS Excel 2007进行数据整理。试验数据采用R软件的agricolae包进行方差分析,各处理之间的多重比较采用LSD-test法;采用R软件的ggplot2包进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤不同改良措施的作物产量

稻-稻-菜三熟种植制度下, 不同土壤改良措施的周年产量总体表现为 ASC > CK > Lime, 但差异不显著(表 1)。Lime 和 ASC 处理冬种蔬菜产量均高于 CK, 但差异不显著, 表明四季豆对石灰和酸性土壤调理剂的反应相对较小, 其产量差异不显著。施用石灰和酸性土

表 1 土壤改良措施对稻-稻-菜三熟种植体系作物产量的影响

Table 1 Effects of adding acid soil conditioner on yield of crops in rice-rice-vegetable rotation system (t/hm²)

处理 Treatment	四季豆 Kidney bean	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	周年产量 Annual yield
CK	36.27 ± 1.08 a	5.71 ± 0.07 a	5.54 ± 0.06 a	47.52 ± 1.00 a
Lime	36.56 ± 0.49 a	5.70 ± 0.04 a	5.56 ± 0.04 a	47.83 ± 0.51 a
ASC	36.73 ± 1.00 a	5.69 ± 0.03 a	5.56 ± 0.05 a	47.99 ± 0.98 a

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after the date in the same column represent significant differences.

壤调理剂对早稻和晚稻的产量也没有显著影响。因 Lime 和 ASC 处理冬种蔬菜季产量高于 CK, 其周年作物产量也均高于 CK。Lime 处理冬种蔬菜季、早稻季和晚稻季产量与 ASC 处理非常接近。

2.2 土壤不同改良措施的水稻产量构成因素

由表 2 可知, Lime 和 ASC 处理早、晚稻有效穗数均较 CK 有一定的提高, 但差异不显著。Lime 和 ASC 处理早、晚稻每穗实粒数、结实率和千粒重较 CK 没有规律性的变化趋势。同时, Lime 处理早、晚稻产量构成因素与 ASC 处理基本一致。

2.3 土壤不同改良措施对作物氮、磷、钾养分含量的影响

由表 3 可知, 冬种蔬菜季作物氮、磷、钾含量均高于早稻季和晚稻季。Lime 和 ASC 处理蔬菜磷含量均高于 CK, 但差异不显著。Lime 和 ASC 处理早稻和晚稻氮、磷、钾含量较 CK 没有表现出规律性的变化趋势。

表 2 土壤改良措施对稻-稻-菜三熟种植体系水稻产量构成因素的影响

Table 2 Effects of adding acid soil conditioner on yield components of rice in rice-rice-vegetable rotation system

作物 Crops	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles	每穗实粒数 Filled grains per panicle	结实率 Filled grain rate (%)	千粒重 1000 grain weight (g)
早稻 Early rice	CK	15.83 ± 1.19 a	148.94 ± 10.42 a	79.44 ± 2.04 a	18.48 ± 0.13 a
	Lime	15.92 ± 0.46 a	149.46 ± 4.74 a	79.88 ± 1.60 a	18.51 ± 0.37 a
	ASC	16.19 ± 0.62 a	148.56 ± 9.60 a	79.67 ± 0.83 a	18.49 ± 0.10 a
晚稻 Late rice	CK	14.75 ± 0.68 a	162.25 ± 5.38 a	79.01 ± 2.64 a	18.37 ± 0.18 a
	Lime	14.53 ± 1.38 a	161.60 ± 6.76 a	78.85 ± 2.94 a	18.29 ± 0.15 a
	ASC	14.63 ± 1.00 a	162.15 ± 8.75 a	79.10 ± 1.28 a	18.49 ± 0.15 a

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after the date in the same column represent significant differences.

表 3 土壤改良措施对稻-稻-菜三熟种植体系植株氮、磷、钾养分含量的影响

Table 3 Effects of adding acid soil conditioner on N, P, K contents of crops in rice-rice-vegetable rotation system

作物 Crop	处理 Treatments	氮 N (mg/kg)		磷 P (mg/kg)		钾 K (mg/kg)	
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain
四季豆 Kidney bean	CK	21.33 ± 0.66 a	29.25 ± 0.75 a	2.66 ± 0.16 a	5.34 ± 0.05 a	25.75 ± 3.17 a	24.75 ± 2.09 a
	Lime	22.30 ± 0.7 a	30.10 ± 1.12 a	2.72 ± 0.06 a	5.43 ± 0.05 a	25.64 ± 3.87 a	25.48 ± 2.52 a
	ASC	22.10 ± 0.91 a	29.53 ± 0.57 a	2.70 ± 0.11 a	5.35 ± 0.15 a	25.83 ± 1.83 a	24.73 ± 5.43 a
早稻 Early rice	CK	9.30 ± 0.82 a	12.85 ± 0.19 a	1.90 ± 0.05 a	2.62 ± 0.07 a	27.24 ± 0.98 a	3.24 ± 0.18 a
	Lime	9.65 ± 0.76 a	12.83 ± 0.97 a	1.90 ± 0.02 a	2.68 ± 0.08 a	26.83 ± 1.30 a	3.34 ± 0.17 a
	ASC	9.78 ± 0.48 a	12.70 ± 0.35 a	1.96 ± 0.06 a	2.72 ± 0.08 a	27.22 ± 1.06 a	3.24 ± 0.12 a
晚稻 Late rice	CK	7.63 ± 0.61 a	11.53 ± 0.43 a	1.85 ± 0.02 a	2.75 ± 0.06 a	24.98 ± 1.5 a	3.57 ± 0.15 a
	Lime	7.98 ± 0.39 a	11.85 ± 0.99 a	1.85 ± 0.08 a	2.74 ± 0.04 a	24.92 ± 1.29 a	3.49 ± 0.18 a
	ASC	7.73 ± 0.3 a	11.83 ± 0.43 a	1.86 ± 0.03 a	2.74 ± 0.05 a	25.00 ± 1.01 a	3.59 ± 0.21 a

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after the date in the same column represent significant differences.

2.4 土壤不同改良措施对土壤理化形状的影响

从表 4 可以看出，“稻 – 稻 – 菜”三熟种植体系下，不同作物显著影响绝大部分土壤理化性状 ($P < 0.0001$)，土壤改良措施仅显著影响土壤 pH 值 ($P < 0.0001$)。

为了更清楚地表征土壤改良措施对土壤理化形状的影响，对不同处理的土壤理化性状进行单因素方差分析。从表 5 可以看出，Lime 处理和 ASC 处理土壤容重较 CK 没有明显的变化趋势，表明施用石灰和酸性土壤调理剂对“稻 – 稻 – 菜”三熟种植体系的土壤容重没有明显影响。Lime 处理和 ASC 处理土壤 pH 值均高于 CK，Lime 处理对冬种蔬菜季、早稻季和晚稻季土壤 pH 值均有显著的提升作用；ASC 处理早稻季土壤 pH 值均显著高于 CK，ASC 处理晚稻季土壤 pH 值稍高

于 CK，但差异不显著。与 CK 相比，Lime 处理和 ASC 处理土壤有效磷含量均有一定的提高，其中冬种蔬菜季的增幅较大。Lime 处理和 ASC 处理对稻 – 稻 – 菜三熟种植体系下土壤有机碳含量有一定的提升作用，但效果不显著。施用石灰和酸性土壤调理剂对土壤碱解氮和速效钾没有明显影响。

2.5 不同土壤改良措施对土壤胞外酶活性的影响

对稻 – 稻 – 菜三熟种植体系不同土壤改良措施的土壤胞外酶活性进行测定，结果（表 6）表明，不同生长季节的土壤胞外酶活性差异显著 ($P < 0.0001$)，土壤改良措施仅显著影响土壤酸性磷酸酶活性。图 1 进一步表示了不同作物生长季期间不同土壤改良措施对土壤胞外酶活性的影响。与 CK 相比，Lime 处理和 ASC 处理的酸性

表 4 不同生长季节和土壤改良措施对土壤理化性状影响的方差分析

Table 4 Variance analysis of the effects of different growth season and treatments on the soil physical and chemical properties

土壤指标 Soil properties	生长季节效应 Growing season effects		土壤改良效应 Soil amendment effects		交互效应 Interaction	
	F	P	F	P	F	P
容重 Bulk density	5.44	0.0103	0.78	0.4694	1.78	0.1625
pH 值 pH value	296.27	< 0.0001	31.75	< 0.0001	2.94	0.0385
有机碳 Organic C	3.63	0.0401	1.21	0.3139	1.50	0.2312
碱解氮 Alkaline N	29.51	< 0.0001	0.37	0.6930	0.34	0.8460
有效磷 Available P	139.70	< 0.0001	0.94	0.4010	0.82	0.5230
速效钾 Available K	192.46	< 0.0001	0.29	0.7500	0.35	0.8400

表 5 土壤改良措施对稻 – 稻 – 菜三熟种植体系土壤理化性状的影响

Table 5 Effects of adding acid soil conditioner on the soil physical and chemical properties in rice–rice–vegetable rotation system

作物 Crop	处理 Treatments	容重 Bulk density (g/cm ³)	pH 值 pH value	有机碳 Organic C (g/kg)	碱解氮 Alkaline N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
四季豆 Green bean	CK	1.27 ± 0.01 a	4.19 ± 0.11 b	18.10 ± 0.48 a	164.73 ± 18.65 a	56.18 ± 2.75 a	108.36 ± 15.22 a
	Lime	1.27 ± 0.01 a	4.41 ± 0.04 a	18.10 ± 0.31 a	165.45 ± 8.47 a	58.05 ± 4.95 a	110.47 ± 10.23 a
	ASC	1.27 ± 0.00 a	4.37 ± 0.10 ab	18.48 ± 0.57 a	174.11 ± 6.81 a	59.29 ± 3.26 a	106.11 ± 19.19 a
早稻 Early rice	CK	1.26 ± 0.01 a	4.66 ± 0.06 b	17.22 ± 1.28 a	148.79 ± 3.78 a	46.52 ± 1.92 a	40.28 ± 7.06 a
	Lime	1.27 ± 0.02 a	4.93 ± 0.09 a	18.26 ± 1.45 a	146.96 ± 11.34 a	47.80 ± 1.93 a	49.01 ± 7.27 a
	ASC	1.26 ± 0.01 a	5.04 ± 0.01 a	18.61 ± 0.92 a	150.78 ± 17.65 a	49.23 ± 3.12 a	44.23 ± 6.30 a
晚稻 Late rice	CK	1.27 ± 0.01 a	4.98 ± 0.06 b	18.87 ± 0.91 a	134.28 ± 10.20 a	38.73 ± 0.97 a	34.05 ± 5.76 a
	Lime	1.28 ± 0.01 a	5.16 ± 0.08 a	20.26 ± 2.05 a	134.28 ± 10.24 a	39.26 ± 2.82 a	31.36 ± 2.75 a
	ASC	1.27 ± 0.02 a	5.11 ± 0.09 ab	18.56 ± 1.20 a	132.38 ± 5.30 a	37.39 ± 1.95 a	32.19 ± 6.45 a

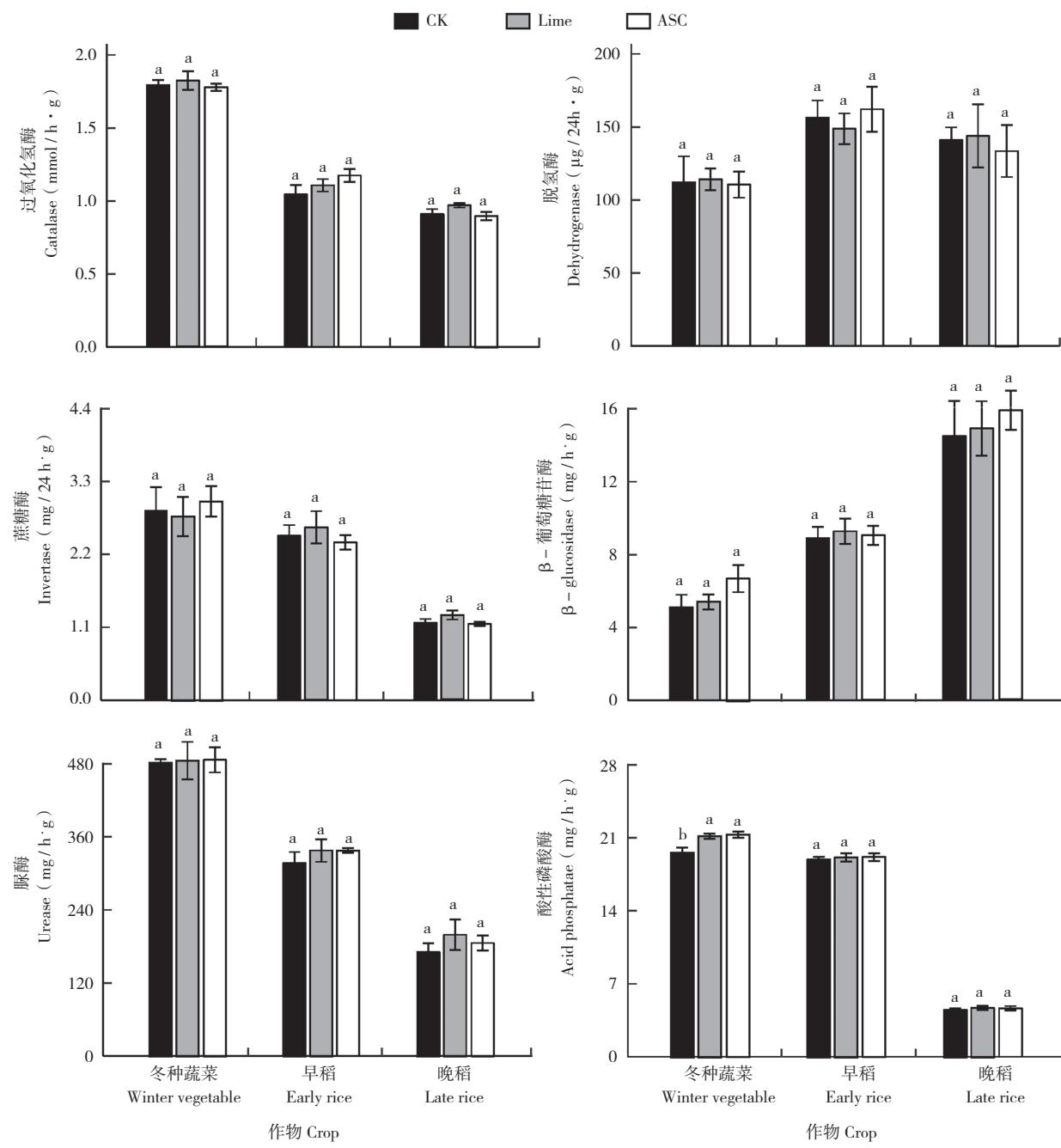
注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after the data in the same column represent significant differences.

表 6 不同生长季节和土壤改良措施对土壤胞外酶活性影响的方差分析

Table 6 Variance analysis of the effects of different growing season and treatments on soil extracellular enzyme activities

土壤胞外酶 Soil extracellular enzyme	生长季节效应 Growing season effects		土壤改良措施效应 Soil amendment effects		交互效应 Interaction	
	F	P	F	P	F	P
过氧化氢酶 Catalase	359.70	< 0.0001	1.11	0.3430	1.22	0.3230
脱氢酶 Dehydrogenase	7.27	0.0030	0.04	0.9923	0.18	0.9456
蔗糖酶 Invertase	58.07	< 0.0001	0.05	0.9510	0.34	0.8460
β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	63.78	< 0.0001	0.79	0.4660	0.21	0.9330
脲酶 Urease	195.83	< 0.0001	0.72	0.4950	0.14	0.9650
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	2645.20	< 0.0001	4.47	0.0210	2.74	0.0490



柱上小写英文字母不同者表示处理间差异显著

Different lowercase letters above the bars represent significant differences among treatments

图 1 不同土壤改良措施对“稻 - 稻 - 菜”三熟种植体系土壤胞外酶活性的影响

Fig. 1 Effects of adding acid soil conditioner on soil enzyme activities under rice-rice-vegetable rotation system

磷酸酶活性有所提高，其中冬种蔬菜季的增幅达到显著水平。Lime 处理和 ASC 处理的脲酶和 β -葡萄糖苷酶也较 CK 处理有一定的增加趋势，但差异不显著。不同土壤改良措施的土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脱氢酶没有表现出规律性的变化趋势。

3 讨论

3.1 不同土壤改良措施对土壤理化形状的影响

本研究结果表明，稻-稻-菜三熟种植体系中，土壤 pH 值在冬种蔬菜季节下降明显，而通过早、晚稻轮作，土壤 pH 值逐步提高，表明稻-稻-菜三熟种植制度具有独特的酸化特征。酸性土壤的改良措施主要采用施用碳酸盐、白云石等碱性物料^[6,8]。这些碱性物料溶解后释放出 HCO_3^- 和 OH^- 离子，中和土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} 等酸性离子^[6]。土壤培养试验结果表明，添加石灰等碱性物料后，土壤交换性铝含量减少 2.01 mg/kg，交换性氢离子减少 0.4 cmol/kg，土壤交换性酸总量降低 1.5 cmol/kg 以上，pH 值提高 0.66 个单位^[11]。田间应用试验结果也表明，施用石灰和酸性土壤调理剂可显著提烟草、稻-菜轮作、大豆、玉米、小麦等作物农田的土壤 pH 值^[9-10,12,16]。本研究结果也表明，在稻-稻-菜三熟种植体系中，施用石灰和酸性土壤调理剂均可有效提高土壤 pH 值，其中石灰处理在冬种蔬菜季、早稻季和晚稻季的 pH 值均显著高于对照处理，酸性土壤调理剂仅在早稻季达到显著水平。土培试验结果也表明，石灰的改酸效果优于酸性土壤调理剂，因其碱性强于酸性土壤调理剂^[11]。

碱性物料提高了耕层土壤的 pH 值，可促进磷酸铁铝的溶解性，从而提高土壤有效磷含量^[9,17]。本研究结果表明，稻-稻-菜三熟种植体系中施用石灰和酸性土壤调理剂处理的土壤有效磷含量有一定的提高趋势，但差异不显著，这可能是由于该种植体系中磷肥用量较大，土壤本身有效磷含量较高。研究表明，施用石灰和酸性土壤调理剂可促进土壤有机质的降解，有机质矿化释放出无机氮，从而提高土壤碱解氮含量^[13]。本研究结果表明，在稻-稻-菜三熟种植体系中，施用石灰和酸性土壤调理剂处理的土壤有机碳含量反而表现出一定的增高趋势，其中早稻季较明显，这可能是由于施用碱性物料提高了水稻根系和地上部分的生长，从而提高了水稻根系输出的

有机碳量，从而提高土壤有机碳含量。石灰和酸性土壤调理剂溶解释放出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，与 K^+ 竞争土壤胶体的吸附点位，可能降低土壤交换性钾的含量^[9,13]。本研究结果表明，在稻-稻-菜三熟种植系统中，石灰和酸性土壤调理剂处理对土壤速效钾含量的影响没有表现出规律性的变化趋势，这可能是水旱轮作管理模式影响了土壤中钾离子的溶解和迁移，尚需长期监测验证。采用石灰进行酸性土壤改良，通常是将石灰撒施于农田表面。但是，石灰的移动性较差，在耕层土壤中转化为石 ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)，并大量累积，从而导致土壤板结的次生危害^[10,12]。本研究结果表明，在稻-稻-菜三熟种植系统中，施用石灰和酸性土壤改良剂对土壤容重没有显著影响，这可能是由于水稻轮作过程中长期淹水过程加快了石灰的溶解和迁移。有研究发现，石灰对西洋参连作系统的土壤微生物具一定抑制作用，并降低土壤脲酶活性^[18]。而长期定位试验结果表明，在强风化的酸性土壤中施用石灰可显著提高土壤微生物活性，从而提高胞外酶活性^[19]。本研究结果表明，在稻-稻-菜三熟种植体系中，施用石灰和酸性土壤调理剂对土壤胞外酶活具有一定的提高效果，其中冬种蔬菜季的酸性磷酸酶活性显著提高，该结果与长期定位试验结果基本吻合^[19]。稻-稻-菜三熟种植体系中，冬种蔬菜季处于干旱状态，对碱性物料的响应可能较早稻季和晚稻季更强烈。

3.2 不同土壤改良措施对作物产量的影响

本研究结果表明，施用石灰和土壤调理剂可有效提高稻-稻-菜三熟种植体系的土壤 pH 值，并对冬种四季豆的产量有一定的提升效果，但差异不显著。类似研究结果也均表明，施用石灰和土壤调理剂可有效提高提高马铃薯、烟草、大豆等作物的产量和品质^[10,12-13,19-20]，并对稻-菜轮作体系的中水稻和油菜也有增产效果^[9]。强酸土壤环境影响土壤养分离子的有效性，并提高有害金属离子的活性，对作物生长产生毒害作用^[8,21]。施用石灰和土壤调理剂改善了土壤酸环境，从而有利于作物生长。研究表明，酸性土壤施用石灰和土壤调理剂后，作物的养分吸收累积量显著高于常规施肥处理^[9,13]，改善作物营养状况。本研究结果也表明，在稻-稻-菜三熟种植体系中施用石灰和酸性土壤调理剂处理的作物氮、磷、钾含量有一定的提高趋势，其中冬种蔬菜季的趋势更

明显，但差异不显著。这可能是由于水稻根系系统较四季豆更庞大，其养分吸收能力本身较强，从而抗逆能力更强。相似研究结果也表明，施用大豆对石灰等碱性物料的产量响应较水稻、小麦等粮食作物更明显^[10]。另外，强酸土壤环境高浓度的 Al³⁺ 危害作物根系细胞，抑制作物根系生长^[8]。盆栽试验发现，当土壤 pH 值为 3.9 时，大麦的根系生长显著受限；而施用石灰和酸性土壤调理剂提高土壤 pH 后，大麦的根长、根系总表面积和根系活力均显著提高，其地上部分生物量也显著提高^[11]。稻-稻-菜三熟种植系统中，早稻季和晚稻季处于淹水状态，Al³⁺ 浓度可能相对低于冬种蔬菜季，这也可能是冬种蔬菜季对石灰和酸性土壤改良剂更敏感的原因。

4 结论

稻-稻-菜三熟种植体系下，施用石灰和酸性土壤调理剂可显著提高耕层土壤 pH 值，增加土壤有效磷含量，提高土壤酸性磷酸酶活性，有利于提高作物产量。稻-稻-菜三熟种植体系中不同作物对石灰和酸性土壤调理剂的响应程度有所不同，冬种蔬菜季期间，石灰和酸性土壤调理剂处理的 pH 值增幅最大，同时土壤有效磷和酸性磷酸酶活性的提高幅度也大于早稻季和晚稻季，作物增产幅度也最明显。石灰提升土壤 pH 值的效果优于酸性土壤调理剂，但酸性土壤调理剂处理的周年产量最高。在本试验条件下，施用石灰或者酸性土壤调理剂可作为广东省稻-稻-菜三熟种植区域酸性土壤的有效改良措施，其中冬种蔬菜季施用的必要性更大，可实现该区域土壤可持续利用。

参考文献 (References) :

- [1] 章明清, 李娟, 孔庆波, 姚宝全, 陈燕花. 菜-稻轮作对菜田氮、磷利用特性和富集状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 117-126. doi: 10.11674/zwyf.2013.0114.
ZHANG M Q, LI J, KONG Q B, YAO B Q, CHEN Y H. Effect of vegetable-paddy rice rotation system on N and P utilization characters and their enrichments in vegetable fields [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (1) : 117-126. doi: 10.11674/zwyf.2013.0114.
- [2] 黄锦法, 曹志洪, 李艾芬, 张蚕生. 稻麦轮作田改为保护地菜田土壤肥力质量的演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (1) : 19-25. doi: 10.11674/zwyf.2003.0104.
HUANG J F, CAO Z H, LI A F, ZHANG C S. Soil fertility quality evolution after land use change from rice-wheat rotation to plastic film covered vegetable [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (1) : 19-25. doi: 10.11674/zwyf.2003.0104.
- [3] 官春云, 黄璜, 黄国勤, 孙丹平, 梁玉刚. 中国南方稻田多熟种植存在的问题及对策[J]. 作物杂志, 2016, 171 (2) : 1-7. doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2016.02.001.
GUAN C Y, HUANG H, HUANG G Q, SUN D P, LIANG Y G. Problems and countermeasures of paddy field multiple cropping in Southern China [J]. *Crops*, 2016, 171 (2) : 1-7. doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2016.02.001.
- [4] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, Colinet G. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6) : 1615-1621. doi: 10.11674/zwyf.2015.0629.
ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W, COLINET G. Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21 (6) : 1615-1621. doi: 10.11674/zwyf.2015.0629.
- [5] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 郭颖, 柴敏, 梁雪映, 毕如田. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (2) : 593-601. doi: 10.13287/j.1001-9332.201902.030.
ZHENG C, GUO Z X, YUAN Y Z, GUO Y, CHAI M, LIANG X Y, BI R T. Spatial and temporal changes of farmland soil acidification and their influencing factors in different regions of Guangdong Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (2) : 593-601. doi: 10.13287/j.1001-9332.201902.030.
- [6] VARGAS J P R, SANTOS D R, BASTOS M C, SCHEAEFERA G, PARISIA P B. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 185: 47-60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.014>.
- [7] KALKHORAN S, PANNELL D J, THAMO T, WHITE B, POLYAKOV M. Soil acidity, lime application, nitrogen fertility, and greenhouse gas emissions: Optimizing their joint economic management [J]. *Agricultural Systems*, 2019, 176: 102684. doi: 10.1016/j.agsy.2019.102684.
- [8] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 王才斌. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33 (11) : 3137-3143.
YU T Y, SUN X S, SHI C R, WANG C B. Advances in soil acidification hazards and control techniques [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33 (11) : 3137-3143.
- [9] 闫志浩, 胡志华, 王士超, 梁圣昌, 武红亮, 王瑾瑜, 邢婷婷, 余喜初, 李大明, 卢昌艾. 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. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.23.009.
YAN Z H, HU Z H, WANG S C, HUAI S C, WU H L, WANG J Y, XING T T, YU X C, LI D M, LU C A. 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. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.23.009.

- [10] MARA S, FONTOURA V, CASTRO P H, CHERUBIN M B, MORAES R P, BAYER C, TIECHER T. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 193: 27–41. doi: 10.1016/j.still.2019.05.005.
- [11] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 不同调理剂对酸性土壤降酸效果及大麦幼苗生长的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, 269 (3): 118–124. doi:10.11838/sfsc.20170320.
- HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of soil conditioner on acid reduction and the seedling growth of barley [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, 269 (3): 118–124. doi:10.11838/sfsc.20170320.
- [12] 郑祥洲, 郭宝玲, 王英男, 张玉树, 丁洪. 施用新型土壤调理剂改善烟草产量品质及土壤理化性质 [J]. 热带作物学报, 2019, 40 (7): 1278–1283. doi: 10.3969/j.issn.1000–2561.2019.07.005.
- ZHENG X Z, GUO B L, WANG Y N, ZHANG Y S, DING H. New type soil conditioner improves soil properties and tobacco yield and quality [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40 (7): 1278–1283. doi: 10.3969/j.issn.1000–2561.2019.07.005.
- [13] PAN X Y, LI J Y, DENG K Y, XU R K, SHEN R F. Four-year effects of soil acidity amelioration on the yields of canola seeds and sweet potato and N fertilizer efficiency in an ultisol [J]. *Field Crops Research*, 2019, 237: 1–11. doi: 10.1016/j.fcr.2019.03.019.
- [14] 鲁如坤. 土壤 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 195.
- LU R K. Soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 195.
- [15] GUO P, WANG C Y, JIA Y, WANG Q, HAN G M, TIAN X J. Responses of soil microbial biomass and enzymatic activities to fertilizations of mixed inorganic and organic nitrogen at a subtropical forest in East China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 338 (1): 355–366. doi: 10.1007/s11104–010–0550–8.
- [16] SHI R Y, LI J Y, XU R K, QIN W. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 162: 41–45. doi: doi.org/10.1016/j.still.2016.04.017.
- [17] BENAVIDES J, JIN Z W, CHEN C, JIANG F, HOPKINS L, ZHANG X L, HAN Z Q, BILLY Z, CHEN C, CHEN X M. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: A five-year field trial in upland red soil, China [J]. *Field Crops Research*, 2019, 232: 77–87. doi: 10.1016/j.fcr.2018.12.013.
- [18] 舒秀丽, 赵柳, 孙学振, 平华, 潘立刚, 王晶. 不同土壤改良剂处理对连作西洋参根际微生物数量、土壤酶活性及产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (6): 1289–1294. doi: 10.3724/SP.J.1011.2011.01289.
- SHU X L, ZHAO L, SUN X Z, PING H, PAN L G, WANG J. Effects of soil amendments on rhizosphere microbial number, soil enzyme activity and yield of continuous cropped American ginseng [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (6): 1289–1294. doi: 10.3724/SP.J.1011.2011.01289.
- [19] INAGAKI T M, MORAES S J C, CAIRES E F, GONCALVES D R P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 156–165. doi: 10.1016/j.agee.2016.06.034.
- [20] 孟庆英, 韩旭东, 张春峰, 朱宝国, 王囡囡, 贾会彬, 邹洪涛. 白浆土施有机肥及石灰对土壤酶活性与大豆产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, 269 (3): 56–60. doi: 10.11838/sfsc.20170310.
- MENG Q Y, HAN X D, ZHANG C F, ZHU B G, WANG N N, JIA H B, ZOU H T. Effects of organic fertilizer and lime application on soil enzyme and soybean yield in planosol [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017, 269 (3): 56–60. doi: 10.11838/sfsc.20170310.
- [21] 曾廷廷, 蔡泽江, 王小利, 梁文君, 周世伟, 徐明岗. 酸性土壤施用石灰提高作物产量的整合分析 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (13): 2519–2527. doi: 10.3864/j.issn.0578–1752.2017.13.011.
- ZENG T T, CAI Z J, WANG X L, LIANG W J, ZHOU S W, XU M G. Integrated analysis of liming for increasing crop yield in acidic soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (13): 2519–2527. doi: 10.3864/j.issn.0578–1752.2017.13.011.

(责任编辑 杨贤智)