DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0321

油茶壳生物有机肥配合减施化肥对生菜生长及土壤肥力的影响

蒋越华[1],金 刚[1],范稚莲[2],黄海连[3],黄显雅[1],陈 涛[1]

(1.广西壮族自治区亚热带作物研究所 南宁 530001; 2.广西大学 南宁 530004;
3.梧州职业学院 广西梧州 543002)

摘 要:为促进油茶壳肥料化利用以及应用于生菜生产,筛选出适合生菜的最佳施肥方案,以直立型生菜为材料,设置CK(不施肥)、CF(常规施肥)、T1(化肥减量20%+3750 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥)、T2(化肥减量20%+6000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥)、T3(化肥减量20%+9000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥)5个处理,分析不同施肥处理对生菜生长、营养品质及土壤性质的影响。结果表明:(1)施用油茶壳生物有机肥能促进生菜生长,其中T2处理下生菜的单株商品质量最大(112.64 g),其株高与单施化肥处理CF差异不显著;(2)施用油茶壳生物有机肥能提高生菜的营养品质,T3处理总糖含量最高,维生素C、蛋白质和叶绿素含量则在T1处理最高;(3)施肥在短期内对土壤pH的影响不大,随着油茶壳生物有机肥的增加,有机质含量呈递增趋势,T2处理对土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量的提升效果最显著,较CF分别提高了16.5%、6.6%和20.2%;(4)与CF相比,T2处理中土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性分别提高了8.5%、32.4%和10.7%,仅T1与T3处理酸性磷酸酶活性差异显著,其他处理间酸性磷酸酶活性差异不显著。对15项指标进行隶属函数分析,评价结果以T2处理效果最佳。综上,T2处理(化肥减量20%+6000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥)是本试验条件下生菜最为适宜的施肥模式,能够提高土壤肥力,促进生菜优质丰产,可为油茶壳生物有机肥的应用推广提供参考。

关键词:生菜;油茶壳;生物有机肥;营养品质;土壤改良

中图分类号:S636.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-175-09

Effects of *Camellia oleifera* shell-derived bio-organic fertilizer combined with reduced chemical fertilizer application on lettuce growth and soil fertility

Jiang Yuehua[1], Jin Gang[1], Fan Zhilian[2], Huang Hailian[3], Huang Xianya[1], Chen Tao[1]

(*1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, Guangxi, China; 2. Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Wuzhou Vocational College, Wuzhou 543002, Guangxi, China*)

Abstract: To enhance the resource utilization of *Camellia oleifera* shell and support evidence-based lettuce production, this study identified the optimal fertilization scheme for promoting lettuce growth. The lettuce was used as the test crop, and CK(no fertilization), CF(conventional fertilization), T1(fertilizer reduction 20% +*C. oleifera* shell bio-organic fertilizer 3750 kg·hm^{-2}), T2(fertilizer reduction 20%+*C. oleifera* shell bio-organic fertilizer 6000 kg·hm^{-2}), and T3(fertilizer reduction 20%+*C. oleifera* shell bio-organic fertilizer 9000 kg·hm^{-2}) were set up to investigate the effects of different fertilization treatments on lettuce growth, quality and soil fertility. The experimental results showed that:(1)Application of bio-organic fertilizer derived from *C. oleifera* shells significantly enhanced lettuce growth. Among all treatments, T2 yielded the greatest aboveground fresh mass(112.64 g). But plant height under T2 did not differ significantly from that observed under CF.(2)Application of *C. oleifera* shell-derived bio-organic fertilizer enhanced the nutritional quality of lettuce. Total sugar content was maximized under the T3 treatment, whereas vitamin C, protein, and chlorophyll content were highest under the T1 treatment.(3)Short-term fertilization exerted negligible effects on soil pH. Soil organic matter content increased progressively with rising application rates of *C. oleifera* shell bio-organic fertilizer. The T2 treatment produced the most pronounced improvements in soil alkaline hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available

收稿日期:2026-04-21;**修回日期:**2026-07-17

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB21220041);广西农业科学院基本科研业务专项项目(2026YT014)

作者简介:蒋越华,女,高级工程师,主要从事农业资源利用与生态农业研究工作。E-mail:411763251@qq.com

potassium content, which were elevated by 16.5%, 6.6%, and 20.2%, respectively, relative to the CF treatment.(4)Relative to the control treatment(CF), the T2 treatment enhanced soil urease, sucrase, and catalase activities by 8.5%, 32.4%, and 10.7%, respectively. Only the difference in acid phosphatase activity between T1 and T3 treatment was significant, while no statistically significant differences in acid phosphatase activity were observed across other treatments. Finally, a comprehensive evaluation based on membership function analysis of 15 integrated agronomic, quality, and soil health indicators confirmed that T2 treatment achieved the highest overall performance. In summary, the T2 treatment(fertilizer reduction 20%+*C. oleifera* shell bio-organic fertilizer 6000 kg·hm^{-2})was the optimal fertilization strategy for sustainable lettuce production. It could not only effectively improve soil fertility, but also significantly improved both the quality and yield of lettuce. As such, it provides a scientifically substantiated basis for the practical application and wider promotion of *C. oleifera* shell bio-organic fertilizer.

Key words: Lettuce; *Camellia oleifera* shell; Bio-organic fertilizer; Nutritional quality; Soil improvement

生菜是重要的叶用蔬菜作物，富含蛋白质、糖类、膳食纤维、维生素 C、生菜素和甘露醇等多种营养成分，这些活性物质具有预防贫血、防癌、抗衰老、降低血压和防止心律紊乱等功能[1]。生菜为我国消费量最大的叶用蔬菜作物之一，也是广西“南菜北运”和“西菜东调”的主要蔬菜品种。随着人们生活水平的提高，蔬菜产业得到快速发展，土壤对肥料养分的需求也日益增大。施肥是维持土壤肥力和提高作物产量的重要措施之一，目前农民普遍通过加大化肥用量来提高产量，由此带来的土壤退化、农产品质量安全问题愈发凸显，严重影响了蔬菜产业高质量和可持续发展。利用农林废弃物如秸秆、果壳、菌渣等生产生物有机肥，增加有机肥源、改善土壤结构是维持土壤生态系统和提高蔬菜品质的有效途径。

油茶是我国南方特有的木本油料树种，与油橄榄、油棕、椰子并称为世界四大木本油料植物[2]。油茶产业已成为江西、湖南、广西等省区农业农村经济的重要支柱产业。油茶壳是油茶果加工茶油产生的副产物，占整个油茶果质量的 50%~60%[3]，随着油茶种植面积的扩大，油茶壳的产生量也日益增多，每年产生的油茶壳约 375 万 t[4]。然而，目前这些油茶壳尚未得到有效利用，大多数被随意丢弃或者作为燃料直接燃烧，不仅造成资源的浪费，还污染了环境。肥料化处理是实现农林废弃物资源化利用中最简单和最有效的途径。研究显示，油茶壳作为一种生物质原料，富含有机质及茶皂素、多酚等成分[5]，是生产有机肥的理想原料。开展油茶壳肥料化利用研究，不仅实现资源有效利用，还能延伸油茶产业链、促进农业绿色可持续发展。

研究显示，油茶壳与油茶麸按体积比 3∶1 堆制的有机肥养分含量较高[6]；卢香等[7]认为油茶果壳在与牛粪、油茶饼粕等共堆肥中占比越高，越有利于养分的积累；施用油茶壳有机肥能提高作物产量，培肥土壤[8-9]。生物有机肥是具备有机肥和微生物功能菌双重功效的肥料，较普通有机肥更具应用推广价值。谢育利等[10]研究表明，化肥减量 20%配施氨基酸生物有机肥对生菜增产提质效果最好。张庆等[11]通过向中药渣堆肥中接种三种芽孢杆菌并在生菜上开展盆栽肥效试验，发现巨大芽孢杆菌+中药渣有机肥+化肥处理对生菜的生长和土壤改善效果最佳。

不同种类、来源和比例的生物有机肥与化肥配施产生的效果不同，不同的施肥制度和模式对土壤和作物的影响也存在差异[12]。目前，在生菜生产上应用生物有机肥的报道较少，关于油茶壳生物有机肥对生菜生长及土壤肥力的研究尚未见报道。油茶壳生物有机肥为本课题组研制，为使该产品得到更好的应用推广，本研究以生菜为试验材料，探究化肥减施、配施不同比例油茶壳生物有机肥对生菜生长、营养品质及土壤肥力的影响，为油茶壳生物有机肥应用于生菜生产提供最佳施肥建议，为促进蔬菜和油茶产业绿色可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年 12 月至 2024 年 2 月在广西亚热带作物研究所三队科研基地开展。试验区土壤质地为砂壤土，土壤 pH 为 6.38，有机质含量(w，下同)33.96 g·kg^{-1}，碱解氮含量 9.00 mg·kg^{-1}，有效磷含量 161.07 mg·kg^{-1}，速效钾含量 407.39 mg·kg^{-1}。

1.2 材料

供试油茶壳生物有机肥由油茶壳、鸡粪、有机物料腐熟剂、枯草芽孢杆菌等原料加工而成。具体方法为：采用 50 kg 粉碎后油茶壳、干鸡粪 15 kg 调节堆肥原料 C/N 在 35∶1，按堆体质量的 1‰添加有

机物料腐熟剂（购置北京清大元农生物科技有限公司），加水调节堆体水分在60%左右，堆制成直径1.2 m、高1 m圆锥形发酵堆。当堆体温度达到55 ℃并持续7 d后进行第1次翻堆，每隔7~10 d翻堆1次，并及时补充水分使堆体水分保持在60%左右，待堆体温度逐渐趋于常温时，按照堆肥质量的2%接种枯草芽孢杆菌，拌匀，静置7 d，即得到油茶壳生物有机肥。堆肥产品指标如下：pH 6.4，水分19.4%，有机质含量48.0%，重金属砷、镉、铅、铬、汞含量分别为10、2、44、30及0.1 mg·kg^{-1}，有效枯草芽孢杆菌活菌数0.21亿•g^{-1}，N、P_2O_5、K_2O含量分别为1.98%、3.28%、1.54%。

堆肥发酵所用的有机物料腐熟剂购自北京清大元农生物科技有限公司，枯草芽孢杆菌由广西科学院提供。供试作物为意大利生菜（直立型），购自福州闽皇种业有限公司。供试化肥有三元复合肥（N∶P_2O_5∶K_2O=15∶15∶15）和尿素（N含量46%），分别由广东佛山青上肥料制造有限公司及广西河池化工股份有限公司提供。

1.3　试验设计

试验共设置5个处理，分别为：不施底肥（CK）、常规施肥（CF，复合肥750 kg·hm^{-2}）、化肥减施20%+油茶壳生物有机肥（T1，低梯度，复合肥600 kg·hm^{-2}+油茶壳生物有机肥3750 kg·hm^{-2}）、化肥减施20%+油茶壳生物有机肥（T2，中梯度，复合肥600 kg·hm^{-2}+油茶壳生物有机肥6000 kg·hm^{-2}）、化肥减施20%+油茶壳生物有机肥（T3，高梯度，复合肥600 kg·hm^{-2}+油茶壳生物有机肥9000 kg·hm^{-2}），施肥方案见表1。2023年11月27日进行田间翻耕、晾晒并划分小区，每个处理3次重复，共15个小区，小区面积为8 m^2（8 m×1 m）。

2023年12月5日生菜采用常规播种育苗，同时将生物有机肥、复合肥作为底肥一次性均匀施入试验小区，施底肥后覆膜。待生菜长至2片真叶后，于2024年1月3日将长势一致的生菜苗移栽到小区，株距20~25 cm。根据生菜生长情况，各处理分别在2024年1月17日和2月2日追施尿素，施肥方案见表1。其他田间管理措施一致，于2024年2月14日采收。

表1　试验各处理的施肥量

Table 1　The total amount of fertilizer applied in each treatment　（kg·hm^{-2}）

处理 Treatment	复合肥用量 Compound fertilizer usage	油茶壳生物有机肥用量 Application amount of Camellia oleifera shell bio-organic fertilizer	2024年1月17日追施尿素用量 Application amount of urea on January 17, 2024	2024年2月2日追施尿素用量 Application amount of urea on February 2, 2024
CK	0	0	60	60
CF	750	0	60	60
T1	600	3750	60	60
T2	600	6000	60	60
T3	600	9000	60	60

1.4　样品采集与分析

1.4.1　生菜样品　于2024年2月14日（生菜采收期）进行土样和生菜样本采集，每个小区随机选取10株生菜，收集地上部分带回实验室，将植株洗净并用滤纸吸干，用电子天平称量单株商品质量，采用直尺测量生菜株高；随后立即测定生菜营养品质指标，分别采用2，6-二氯靛酚滴定法、酸水解-斐林试剂滴定法、凯氏定氮法、丙酮+乙醇（1∶1）浸提法测定[13]维生素C、总糖、蛋白质、叶绿素含量。

1.4.2　土壤样品　样品收获后采用“S”型布点法在每个小区采集0~20 cm耕层土样约1 kg，装袋后带回实验室平摊在塑料布上，风干研磨后过筛，并用自封袋保存用于测定土壤理化指标。采用pH酸度计测定土壤pH；分别采用重铬酸钾-外加热法、碱解扩散法、氟化铵-盐酸浸提法、乙酸铵浸提-火焰光度法测定[13]土壤中的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量；分别采用靛酚蓝比色法、二硝基水杨酸比色法、对硝基酚磷酸钠法和紫外分光光度法测定[14]土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性。

1.5　数据分析

数据采用Excel软件进行数据处理和图表制作。通过SPSS 18.0软件进行方差分析，并用新复极差法（Duncan法）进行差异显著性检验（P<0.05）。

采用隶属函数法对不同施肥处理下生菜生长、品质及土壤理化性质指标进行综合评价：

按公式$X(f)=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$求各指标隶属数值，式中：$X$为某一处理条件下某一指标的测定值，$X_{max}$为该指标测定的最大值，$X_{min}$为该指标所测定的最小值。若某一指标与评价效果呈负相关，可通过反隶属函数计算其隶属函数值：

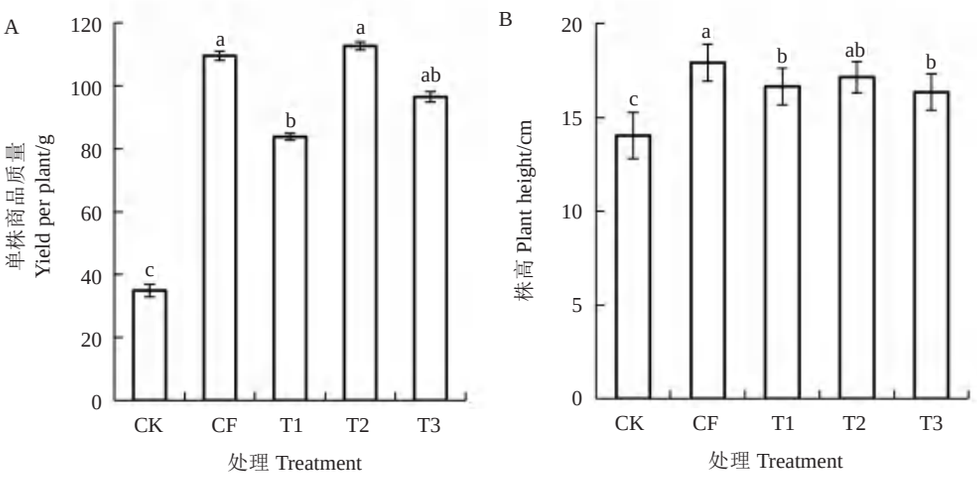
$X(f)=1-(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$。

最后，将不同处理条件下各隶属函数值进行累加，求其平均值，即为综合评价指数，平均值越大，则说明综合效果越好。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对生菜单株产量和株高的影响

由图 1 可知，与 CK 相比，施肥对生菜的单株商品质量和株高均有显著影响，不同施肥处理的生菜单株商品质量由高到低依次为 T2>CF>T3>T1>CK。T2 处理的单株商品质量最大，为 112.64 g，较 CK 处理显著提高了 222.1%，较 CF 处理提高了 2.8%，T2 和 CF 处理间无显著差异。在化肥减施量相同的处理下，随着油茶壳生物有机肥施用量的增加，生菜单株商品质量呈先升高后降低的趋势，T2 处理的单株商品质量显著高于 T1，T1 与 T3 处理间差异不显著。在株高方面，施肥处理组的株高均显著高于 CK 处理。其中，CF 处理的株高最大，为 17.92 cm，其次为 T2，株高为 17.15 cm，较 CF 降低了 4.3%，两处理间差异不显著。T1、T3 处理的株高较 CF 分别显著降低了 7.1%和 8.8%，T1 和 T3 处理间差异不显著。在化肥减施量相同的处理下，生菜株高随着油茶壳生物有机肥施用量的增加呈先升高后降低的趋势，在 T2 处理下达到最大。说明适量增施油茶壳生物有机肥均能促进生菜生长，在化肥减施 20%基础上配施中等梯度即 6000 kg·hm^{-2} 油茶壳生物有机肥的长势与单施化肥相当或更优，施用量过高或过低均不利于生菜的生长发育。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1　不同处理对生菜单株商品质量和株高的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on yield per plant and plant height in lettuce

2.2　不同施肥处理对生菜营养品质的影响

2.2.1　*不同处理对生菜维生素 C 含量的影响*　由图 2 可知，各处理生菜的维生素 C 含量高低依次为 T1>T2>CF>CK>T3。T1 处理下维生素 C 含量最高，较 CK 和 CF 分别显著增加了 15.3%和 8.9%。与 CK 相比，T2 处理的维生素 C 含量显著提高 6.6%，但 CF 和 T2 差异不显著。在化肥减施量相同的条件下，随着油茶壳生物有机肥施用量的提高，生菜中维生素 C 含量呈逐渐降低的趋势，T3 处理下维生素 C 含量最低，为 4.93 mg·100 g^{-1}，较 CF 显著降低了 6.3%。

2.2.2　*不同处理对生菜蛋白质含量的影响*　由图 3 可知，各处理下生菜的蛋白质含量在 1.18~1.51 g·100 g^{-1} 之间，从高到低排序为 T1>CK>CF>

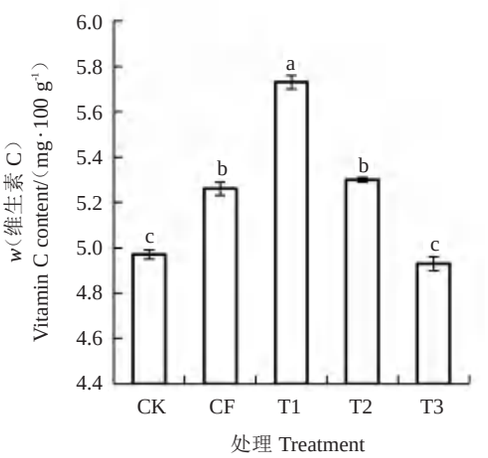


图 2　不同施肥处理对生菜维生素 C 含量的影响

Fig. 2　Effects of different treatments on vitamin C content in lettuce

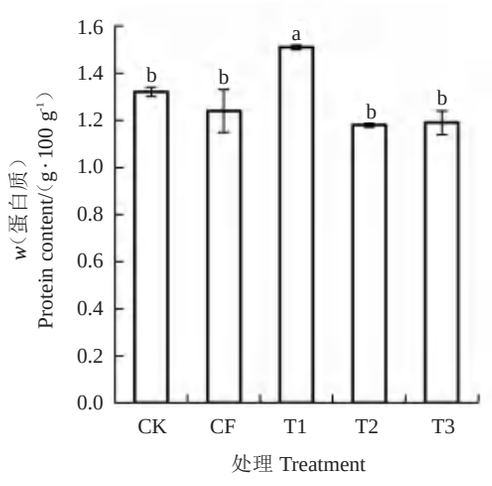


图 3　不同施肥处理对生菜蛋白质含量的影响

Fig. 3　Effects of different treatments on protein content in lettuce

T3>T2。T1 处理下生菜的蛋白质含量最高，较 CK 和 CF 分别显著提高了 14.4%、21.8%。与 CF 相比，T2、T3 处理下生菜的蛋白质含量分别降低了 4.8% 和 4.0%，且三者间差异不显著。在化肥减施量相同的条件下，生菜蛋白质含量随油茶壳生物有机肥的增加呈下降趋势，T1 处理生菜的蛋白质含量显著高于 T2 和 T3 处理。

2.2.3　不同处理对生菜总糖含量的影响　从图 4 可看出，与 CK 相比，施肥显著提高了生菜总糖含量。T3 处理下生菜的总糖含量最高，为 0.826 g·100 g^{-1}，与 CK 和 CF 相比分别增加了 80.7%、15.0%，且差异显著。相较 CF，T1 处理的总糖含量增加了 3.3%，而 T2 处理降低了 0.4%，CF、T1、T2 三者间无显著差异。在化肥减施量相同的条件下，生菜总糖

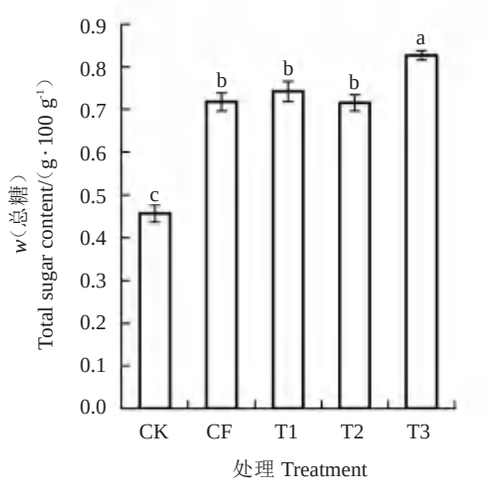


图 4　不同施肥处理对生菜总糖含量的影响

Fig. 4　Effects of different treatments on total sugar content in lettuce

含量表现为高梯度油茶壳生物有机肥处理（T3）显著高于中（T2）、低梯度（T1）油茶壳生物有机肥处理，说明增施有机肥可以促进生菜糖的合成，特别是高梯度生物有机肥效果更为显著。

2.2.4　不同处理对生菜叶绿素含量的影响　由图 5 可知，各处理生菜中叶绿素含量由高到低为 T1>T2>CK>T3>CF，T1 处理最高，为 0.520 mg·g^{-1}，与 CF 相比增加了 24.1%，且差异显著；其次为 T2 处理，叶绿素含量为 0.465 mg·g^{-1}，较 CF 提高了 11.0%，但两者差异不显著。在化肥减施量相同的条件下，叶绿素含量随油茶壳生物有机肥施加量的增大逐渐降低，T1 处理比 T2、T3 处理分别高出 11.8%、23.8%，T1 与 T2 处理差异不显著，但与 T3 处理差异显著。

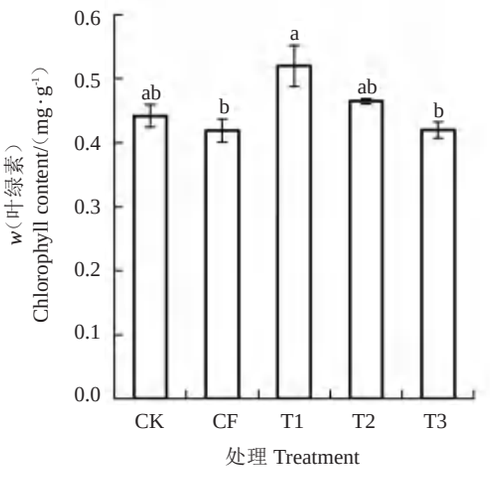


图 5　不同处理对生菜叶绿素含量的影响

Fig. 5　Effects of different treatments on chlorophyll content in lettuce

2.3　不同施肥处理对土壤理化性质的影响

土壤理化指标检测结果显示，各施肥处理对土壤理化性质有不同程度的影响（见表 2）。总体来看，施肥对土壤 pH 影响较小，增加了土壤有机质和营养元素的积累。施肥处理组土壤 pH 介于 6.24~6.31，与 CK 处理相比 pH 有所降低，降低幅度在 0.05~0.12；与 CF 相比，T1、T2 处理的 pH 分别提高 0.05、0.06，T3 处理的 pH 则减少 0.01，但各处理间无显著差异。施肥提高了土壤中的有机质含量，各处理有机质含量从高到低依次为：T3>T2>T1>CF>CK，T3 处理下有机质含量最高，较 CK 和 CF 分别显著提高了 9.2%和 7.9%；在化肥施用量相同的条件下，土壤有机质含量随油茶壳生物有机肥施用量提高而增大，而土壤速效养分含量则呈先升高后降低的趋势。T2 处理下土壤的碱解氮、有效磷、速效

表 2　不同处理对土壤理化性质的影响

Table 2　Effects of different treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	*w*（有机质）Organic matter content/（g·kg^{-1}）	*w*（碱解氮）Alkali-hydrolyzable nitrogen content/（mg·kg^{-1}）	*w*（有效磷）Available phosphorus content/（mg·kg^{-1}）	*w*（速效钾）Available potassium content/（mg·kg^{-1}）
CK	6.36±0.02 a	36.10±0.21 b	9.59±0.09 c	145.69±8.74 b	318.56±4.33 d
CF	6.25±0.01 a	36.52±0.14 b	11.43±0.50 b	241.61±1.20 a	348.81±1.69 c
T1	6.30±0.02 a	37.00±1.67 b	11.20±0.12 b	245.50±3.91 a	352.50±1.08 c
T2	6.31±0.01 a	37.51±0.20 b	13.32±0.14 a	257.57±1.12 a	419.44±2.73 a
T3	6.24±0.01 a	39.42±0.27 a	12.87±0.25 a	253.14±4.71 a	385.76±2.73 b

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

钾含量均最高，其中碱解氮和速效钾含量分别较单施化肥组 CF 显著提高了 16.5%、20.2%，有效磷含量较 CF 提高了 6.6%，但差异不显著；T1 处理土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量与 CF 均无显著差异。总体来看，化肥减量配施油茶壳生物有机肥处理较 CF 提高了土壤有机质含量，pH、碱解氮、有效磷和速效钾含量随油茶壳生物有机肥的增加呈先增后减趋势，T2 处理对土壤养分含量提升最明显。

2.4　不同施肥处理对土壤酶活性的影响

从图 6 可看出，各处理间土壤脲酶活性存在差异，其活性高低表现为 CK>T2>CF>T3>T1。施肥处理组的脲酶活性较 CK 有所降低，但 CK 与 T2 差异不显著。与 CF 相比，除了 T1 处理土壤脲酶活性显著下降外，T2 处理下的脲酶活性提高了 8.5%，但

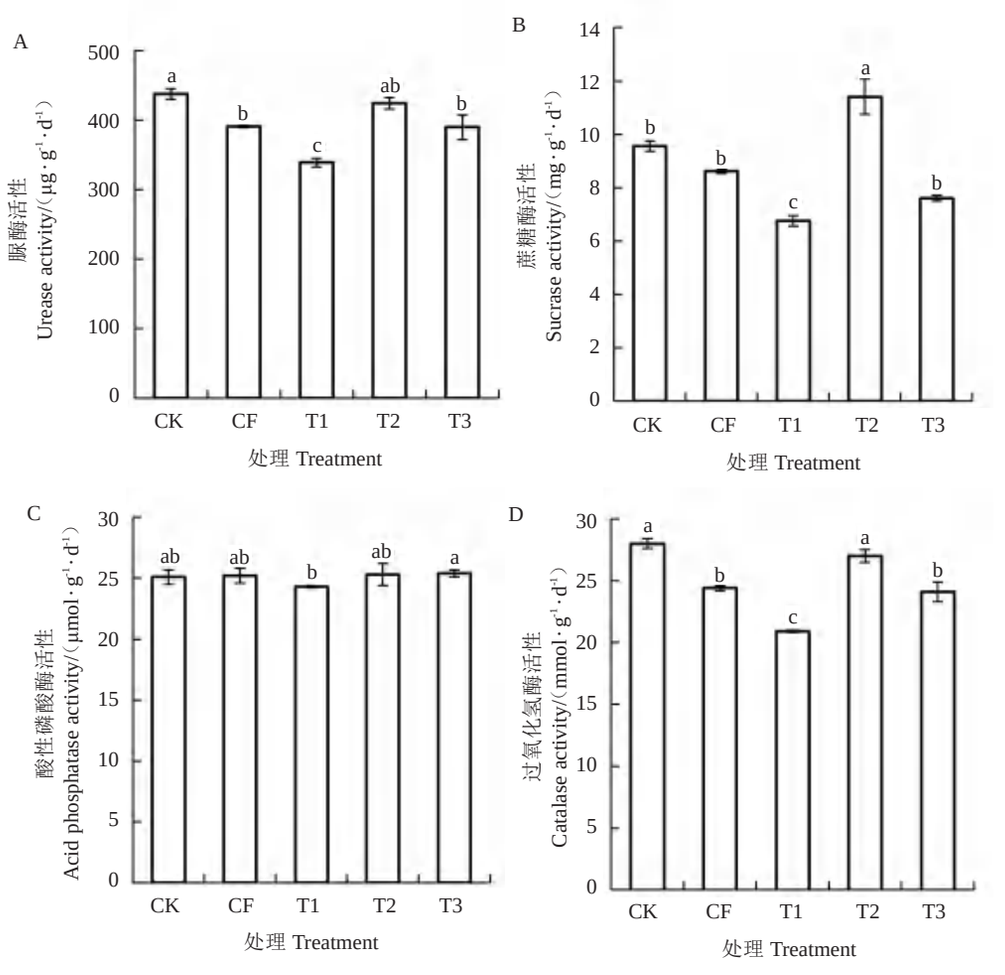


图 6　不同处理对土壤酶活性的影响

Fig. 6　Effects of different treatments on soil enzyme activity

与 CF、T3 差异不显著。在化肥施用量相同的处理下，脲酶活性随油茶壳生物有机肥用量增加呈先升高后降低的趋势，T2 处理的脲酶活性比 T1 和 T3 分别高出 25.1%和 8.8%。T2 处理的蔗糖酶活性显著高于其他处理，较 CK 和 CF 分别显著提高 19.4%和 32.4%。在化肥施用量相同的处理下，蔗糖酶活性与脲酶活性的变化相似，随油茶壳生物有机肥施用量的提高呈先升后降趋势，T2 处理的蔗糖酶活性最高。相较 CF，化肥减施 20%配施不同梯度的油茶壳有机肥对酸性磷酸酶活性的影响不大；施入高梯度油茶壳生物有机肥处理的酸性磷酸酶活性显著高于低梯度处理，中梯度油茶壳生物有机肥处理的酸性磷酸酶活性高于低梯度处理，但二者间差异不显著。与 CF 相比，T1 处理的土壤过氧化氢酶活性显著降低了 16.7%，而 T2 处理的土壤过氧化氢酶活性较 CF 显著提高了 10.7%，T3 与 CF 差异不显著。

2.5　不同处理对生菜生产多性状指标影响的综合评价

运用隶属函数法对试验中 15 项指标进行综合评价，根据平均隶属函数值的大小判断各处理相对优劣的程度。从表 3 可看出，各处理的平均隶属函数值从大到小依次排序为：T2>T3>CF>T1>CK，T2 处理隶属函数值最大，为 0.737，其次为 T3 处理，为 0.539，CK 最小，说明施肥均能促进生菜的生长。综合来看，T2 处理是种植生菜最适宜的施肥方式，即在化肥减施 20%的基础上，施用油茶壳生物有机肥

表 3　不同处理对生菜生长、品质及土壤理化性质影响的综合性评价

Table 3　Comprehensive evaluation of the effects of different treatments on the growth, quality of lettuce and soil physicochemical properties

指标 Index	CK	CF	T1	T2	T3
株高 Plant height	0.000	1.000	0.674	0.802	0.596
单株商品质量 Yield per plant	0.000	0.960	0.628	1.000	0.791
维生素 C 含量 Vitamin C content	0.050	0.413	1.000	0.463	0.000
总糖含量 Total sugar content	0.000	0.707	0.772	0.699	1.000
蛋白质含量 Protein content	0.424	0.182	1.000	0.000	0.030
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.228	0.000	1.000	0.455	0.010
pH	1.000	0.083	0.500	0.583	0.000
有机质含量 Organic matter content	0.000	0.121	0.273	0.424	1.000
碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content	0.000	0.504	0.444	1.000	0.882
有效磷含量 Available phosphorus content	0.000	0.857	0.892	1.000	0.960
速效钾含量 Available potassium content	0.000	0.300	0.332	1.000	0.667
脲酶活性 Urease activity	1.000	0.527	0.000	0.866	0.516
蔗糖酶活性 Sucrase activity	0.602	0.400	0.000	1.000	0.181
酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity	0.727	0.818	0.000	0.909	1.000
过氧化氢酶活性 Catalase activity	1.000	0.493	0.000	0.859	0.451
平均隶属度 Average membership	0.335	0.491	0.501	0.737	0.539
排序 Rank	5	3	4	1	2

6000 kg·hm^{-2}有利于生菜稳产提质。

3　讨论与结论

合理施肥是提高作物产量、品质和维持土壤地力的基础，直接关系到农业的可持续发展[15]。化肥减量并配施有机肥是落实原农业部实施双减政策、实现化肥零增长的重要途径。生物有机肥兼具传统有机肥和微生物肥料的优点，不仅能缓解长期施用化肥造成的土壤板结，改善土壤理化性质，还能提高土壤微生物活性甚至提高作物产量和品质。生物有机肥施用不足或过量施用可能都会影响作物正常生长发育，甚至产生负效应，不同作物有机肥替代化肥的适宜比例也不同[16-17]。余顺平等[18]、乔丙颖等[19]研究结果表明，化肥减施 20%配施有机肥对土壤综合肥力改善效果最佳。鲜质量和株高均是反映作物长势和产量的重要指标。本试验在化肥减量 20%基础上配施不同比例的油茶壳生物有机肥，T2 处理生菜单株商品质量最高，CF 其次（T2>CF>T3>T1>CK），但株高表现为 CF 高于 T2，这种差异的原因可能是本试验施用的化肥是三元复合肥（氮磷钾质量比为 15∶15∶15），单施化肥处理供氮能力较强，过量施氮易引起植株营养过剩，植

株养分吸收不平衡，表现为植株徒长，从而影响植株的生长和产量形成。有机肥养分比较全面但养分释放速率缓慢，化肥减施并配施油茶壳生物有机肥后，养分比例出现氮低、磷钾高的状况，这在一定程度上使植株的生长受到影响。本试验中化肥减施20%并配施中梯度（6000 kg·hm^{-2}）油茶壳生物有机肥的生菜单株商品质量、株高均高于高梯度和低梯度处理。

施用生物有机肥能有效改善作物的营养品质，提高维生素C、糖含量等，其原因在于生物有机肥中含有多种元素和促生菌，可促进植物生长，分解释放出多种氨基酸和多肽，有助于品质提升[20]。本试验中，在化肥施用量相同的处理下，施用低梯度油茶壳生物有机肥处理（T1）下生菜的维生素C、蛋白质和叶绿素含量均高于中、高梯度处理；生菜的糖含量则与油茶壳生物有机肥施用量呈正相关，即T3处理下生菜的总糖含量最高，说明施用高梯度油茶壳生物有机肥有助于糖的积累，这与茹朝等[21]在白菜上的研究一致。

生物有机肥配合减施化肥不仅可以提高作物营养品质，还能改善土壤理化性状，提高土壤养分含量。生物有机肥对提高土壤有机质含量有显著作用，且表现为随着施用量增加而增加的趋势[22]，本研究同样得出施用油茶壳生物有机肥的土壤有机质和养分含量较不施肥处理有不同程度的提高，这与付丽军等[15]、闫鹏科等[23]的研究结果一致，证实了施用生物有机肥对土壤地力具有良好的提升效果。其原因一方面是生物有机肥含有较高的有机质，施用后增加土壤中的腐殖质，与土壤中的磷、钾等阳离子发生络合反应，促进土壤无机养分的释放[24]；另一方面是生物有机肥含有大量有益微生物能活化土壤养分。本试验所用的油茶壳生物有机肥主要微生物是枯草芽孢杆菌，具有固氮、解磷、解钾的功能，能有效分解或转化土壤有机质。试验土壤有机质含量与油茶壳生物有机肥的施用量呈正相关，但土壤速效养分随油茶壳生物有机肥的增加呈先升高后降低的趋势，此结果与常健玮等[25]的研究结果一致。这可能是施用高梯度的生物有机肥在短时间内有机质不易分解矿化的缘故，同时也说明生物有机肥的用量应适宜有度，改善土壤养分并非越多越好。本研究中化肥减施20%配施6000 kg·hm^{-2}（T2）的油茶壳生物有机肥能有效提升土壤肥力。

研究指出，施用化肥引起土壤酸化主要原因是化肥氮在土壤中容易转化为铵态氮和硝态氮，在转化过程中均会释放出H^+，导致土壤pH值降低，而施用有机肥能对土壤中的H^+和Al^{3+}有较强的吸附作用，从而提高土壤pH[26]。本试验中，单施化肥组的土壤pH相较于不施肥的对照处理确实有所降低，但化肥减量配施油茶壳生物有机肥的三组处理下土壤pH同样略低于对照，与理论不相符的原因一方面可能是本试验所用的为微酸性土壤（pH=6.38），对土壤的改良效果不及在强酸性土壤上效果显著；另一方面也可能与生菜生长期较短有关，外来有机质进入土壤后分解出较多的有机酸使pH暂时降低，说明短期内施用生物有机肥对土壤酸碱度影响不大。

土壤酶是植物根系以及微生物分泌到细胞外的一类具有催化活性的大分子物质，是评价土壤肥力和反映土壤代谢活性的重要指标，其活性与土壤类型、作物种类、施肥种类、肥料用量、耕作制度等因素密切相关[27]。本试验中，与CK相比，仅化肥减施20%配施6000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥处理（T2）提高了蔗糖酶活性，化肥减量配施不同梯度油茶壳生物有机肥处理土壤脲酶和过氧化氢酶活性均有不同程度降低，且配施不同比例油茶壳生物有机肥对土壤酶活性的影响不同。脲酶活性较CK降低可能是施入的油茶壳生物有机肥通过调节微生物的分泌代谢来改变脲酶活性，以减少氮素损失，宋以玲等[27]在研究化肥减量配施生物有机肥对油菜地土壤酶活性影响研究中也得到类似的结果。本试验施肥对酸性磷酸酶活性影响不大。部分研究[28-29]表明，施用生物有机肥能提高土壤酶活性，本试验出现结果不一致的原因可能是试验所用的土壤类型、施肥方式及肥料施用量不同。与单施化肥的处理（CF）相比，化肥减施20%配施6000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥处理的土壤酶活性均有提高；且在化肥施用量相同的处理下，土壤酶活性与土壤养分含量的变化相似，均呈现先升高后降低的趋势，其原因主要是生物有机肥的添加丰富了土壤有机质、微生物菌群的种类和数量，改善了土壤微生物活性，在一定范围内生物有机肥配施比例越大，土壤酶活性越高。T2处理的脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性均高于CF、T1、T3处理，说明T2处理与土壤组成的生物环境最适宜，土壤营养达到平衡状态，有效促进了土壤酶活性的增强。

综上所述，化肥减量20%+6000 kg·hm^{-2}油茶壳生物有机肥（T2）比单施化肥（CF）更有利于提高土壤有机质、碱解氮、速效磷、有效钾含量和土壤酶活

性，并有效提高生菜产量，是适宜生菜生产的良好施肥模式。

参考文献

[1] Bhatta S. Influence of organic fertilizer on growth yield and quality of lettuce（*Lactuca sativa* L.）：A review[J]. Journal of Pharmaceutical Innovation，2022（11）：1073-1077.

[2] 刘雪梅，陈嘉玮，王宇航. 油茶壳活性炭的制备及应用研究进展[J]. 应用化工，2018，47（1）：190-192.

[3] 刘竹，杨守禄，姬宁，等. 油茶果壳高值化利用研究进展[J]. 材料导报，2020，34（增刊 1）：120-127.

[4] Zhang J P，Ying Y，Li X B，et al. Physical and chemical properties of *Camellia oleifera* shell composts with different additives and its maturity evaluation system[J]. Environmental Science and Pollution Research International，2020，27：35294-35302.

[5] 李嘉伟，邢鹏，张迎娴，等. 大孔吸附树脂纯化油茶壳中多酚类化合物的研究[J]. 湖南农业科学，2014（15）：60-63.

[6] 黄欣，黄开顺，李开祥. 油茶壳及油茶麸堆制有机肥研究初报[J]. 广西林业科学，2011，40（4）：325-327.

[7] 卢香，黄安香，柏文恋，等. 不同比例油茶果壳在有机肥发酵过程中养分变化特征解析[J]. 贵州林业科技，2023，51（2）：1-7.

[8] 杨丹亚，蒋越华，莫良玉，等. 油茶壳堆肥用量对土壤肥力及苦麦菜生长与品质的影响[J]. 贵州农业科学，2024（4）：47-55.

[9] 梁芳，农定霖，吴宏鑫，等. 以油茶壳有机肥作为基肥对沃柑园土壤特性及沃柑品质的影响[J]. 农业与技术，2021，41（7）：21-23.

[10] 谢育利，王吉平，苏天明，等. 有机肥部分替代化肥对生菜生长及土壤环境的影响[J]. 西南大学学报（自然科学版），2022，44（5）：41-49.

[11] 张庆，胡春胜，刘彬彬，等. 生物有机肥配施化肥对生菜生长和土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报（中英文），2023，31（5）：725-741.

[12] 赵丽洁，赵海燕，韩根兰，等. 氮肥配施有机肥对谷子品质的影响[J]. 作物杂志，2023（6）：224-232.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京：中国农业出版社，2000.

[14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.

[15] 付丽军，王永存，张璐，等. 生物有机肥部分替代化肥对生姜产量、养分利用效率及土壤肥力的影响[J]. 中国瓜菜，2023，36（8）：77-83.

[16] Chandra S N D，Chowdhury A A M，Mira R，et al. Supplemental organic manures and foliar application of magic growth improve the productivity of transplanted rice with reduced application of chemical fertilizers[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus，2022，87（2）：111-120.

[17] Tsigereda M，Feyissa A S，Gonfa Y K，et al. Growth and marketable yield of lettuce（*Lactuca sativa* L.）as affected by bio-slurry and chemical fertilizer application[J]. Heliyon，2024，10（2）：e23600.

[18] 余顺平，熊于斌，廖涛，等. 连续化肥减量配施有机肥提升植烟土壤肥力质量的综合评价[J]. 中国土壤与肥料，2024（1）：70-78.

[19] 乔丙颖，胥婷婷，张洋，等. 不同有机肥替代比例对青稞产量、养分利用和土壤性质的影响[J]. 农业资源与环境学报，2024，41（5）：1062-1070.

[20] 汪自松，秦玉秀，沈伟，等. 化肥减量配施有机肥对樱桃番茄土壤生物学特性及产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料，2024（2）：58-64.

[21] 茹朝，郁继华，武玥，等. 化肥减量配施生物有机肥对露地大白菜产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报，2022，34（8）：1626-1637.

[22] 龚雪蛟，秦琳，刘飞，等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报，2020，31（4）：1403-1416.

[23] 闫鹏科，常少刚，孙权，等. 施用生物有机肥对枸杞产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料，2019（5）：112-118.

[24] 任立军，李金，邹洪涛，等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤，2023，55（4）：756-763.

[25] 常健玮，刘国群，颜雯婷，等. 不同有机肥替代比例对橘园土壤及果实品质影响研究[J]. 中国土壤与肥料，2024（5）：78-88.

[26] 冯慧敏，杨春亚，梁秀荷，等. 灵芝菌渣生物有机肥配合减施化肥对土壤理化性质及紫、绿芥菜生长和品质的影响[J]. 蔬菜，2025（8）：38-45.

[27] 宋以玲，于建，陈士更，等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报，2018，32（1）：352-360.

[28] 杜宏辉，贾学刚，杨涛. 化肥减量及配施生物有机肥对马铃薯产量、矿质元素含量及土壤肥力的影响[J]. 中国瓜菜，2023，36（9）：66-74.

[29] Jin N，Jin L，Wang S Y，et al. Reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer affects the soil microbial community and yield and quality of lettuce[J]. Frontiers in Microbiology，2022，13：863325.