土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202503130114 **CSTR: 32215.14.trxb202503130114**
耿锦沼, 李振轮, 张敏, 陈福慧, 马征, 梁康, 栾慧琳. 酸性菜地土壤性质及生产力对施用碳酸钙和有机物的响应[J]. 土壤学报，2026，
GENG Jinzhao, LI Zhenlun, ZHANG Min, CHEN Fuhui, MA Zheng, LIANG Kang, LUAN Huilin. Response of Soil Properties and Productivity to Application of Calcium Carbonate and Organic Matter in Acidic Vegetable Fields [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

酸性菜地土壤性质及生产力对施用碳酸钙和有机物的响应*

耿锦沼，李振轮†，张 敏，陈福慧，马 征，梁 康，栾慧琳

（西南大学资源环境学院，界面过程与土壤健康重庆市重点实验室，重庆 400716）

摘 要：蔬菜生产普遍存在氮肥用量高、轮作强度大等特点，导致土壤酸化、结构恶化、有害微生物滋生等问题，严重阻碍了菜地健康可持续发展。因此，本研究在酸性菜地上，以不施改良剂（CK）为对照，施用有机肥、腐殖酸钾、碳酸钙及其组合，通过测定土壤理化性质、有机碳组分、微生物群落结构，探索短时间内提升耕地质量的有效措施。结果表明：(1)与 CK 相比，单施全量有机肥显著提高了非根际土壤全氮、有效磷、速效钾含量，土壤非根际和根际易氧化有机碳分别显著提高 22.70%和 9.76%。单施全量碳酸钙处理显著提升了土壤 pH，但降低了非根际土壤有效磷及根际土壤碱解氮、速效钾、有机碳含量。三种改良剂复合施用较 CK 不仅显著提升土壤 pH 和白菜产量，还增加了有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳含量，同时增加了土壤细菌、真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和放线菌含量。（2）土壤理化性质与微生物群落结构间相关性分析表明：碱解氮和易氧化有机碳与非根际土壤中各类微生物群均显著正相关，可溶性有机碳与细菌显著正相关。在根际土壤中，可溶性有机碳与细菌和革兰氏阴性菌显著正相关。冗余分析的结果表明，在非根际土壤中，土壤碱解氮对微生物群落的影响最大；在根际土壤中，土壤速效钾和可溶性有机碳含量是影响根际土壤微生物群落的主要因子。(3)土壤理化性质及产量间相关性分析表明：产量与非根际土壤 pH 和根际土壤交换性钙、交换性镁显著正相关，与根际土壤碱解氮显著负相关。此外，结构方程模型表明，交换性钙、有效磷、碱解氮对白菜产量有显著正效应，革兰氏阴性菌通过有效磷而对产量产生间接影响。综上所述，三种改良剂复合施用在降低土壤酸度的同时，提高了土壤有机碳固存，增加土壤中各类微生物的生物量，进而稳定提升土壤的生产能力。

关键词：碳酸钙；土壤酸化；土壤有机碳组分；微生物群落结构
中图分类号：S156 **文献标志码：**A

Response of Soil Properties and Productivity to Application of Calcium Carbonate and Organic Matter in Acidic Vegetable Fields

GENG Jinzhao, LI Zhenlun†, ZHANG Min, CHEN Fuhui, MA Zheng, LIANG Kang, LUAN Huilin

(*Chongqing Key Laboratory of Interface Process and Soil Health, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400716*, China*)

Abstract: 【Objective】Vegetable production is frequently associated with high nitrogen fertilizer application and intensive crop rotation, resulting in soil acidification, structural degradation, and proliferation of harmful microorganisms. These factors significantly impede the sustainable development of vegetable farming. 【Method】Therefore, this study investigated the short-term effects of organic fertilizer, potassium humate, calcium carbonate, and their combinations on soil properties, organic carbon components, and microbial community structure in acidic vegetable fields with an untreated control (CK). 【Result】(1) Results showed that the sole application of full-dose organic fertilizer significantly increased total nitrogen, available phosphorus, and available potassium in non-rhizosphere soil, while significantly increasing easily oxidizable organic carbon (EOC) in non-rhizosphere (by

*国家重点研发计划项目（2016YFC0502303）资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0502303)
†通讯作者 Corresponding author，E-mail：lizhenlun@swu.edu.cn
作者简介：耿锦沼（1999—），男，河北石家庄人，硕士研究生，研究方向为土壤酸化改良。E-mail:15127165707@163.com
收稿日期：2025-03-13；收到修改稿日期：2025-07-22；网络首发日期（www.cnki.net）：

22.70%) and rhizosphere (by 9.76%) soils. The sole application of full-dose calcium carbonate significantly raised soil pH but reduced available phosphorus in non-rhizosphere soil and alkali-hydrolyzable nitrogen, available potassium, and organic carbon (SOC) in rhizosphere soil. Most notably, the combined application of all three amendments significantly increased soil pH and Chinese cabbage yield, compared to CK, while also increasing SOC, EOC, dissolved organic carbon (DOC), and the abundance of soil bacteria, fungi, Gram-positive bacteria, Gram-negative bacteria, and actinomycetes. (2) Correlation analysis between soil physicochemical properties and microbial community structure revealed that alkali-hydrolyzable nitrogen and EOC were significantly positively correlated with all measured microbial groups in the non-rhizosphere, where DOC correlated positively with bacteria. Also, in the rhizosphere, DOC correlated positively with bacteria and Gram-negative bacteria. Redundancy analysis showed that in non-rhizosphere soil, alkali-hydrolyzable nitrogen had the greatest influence on microbial communities. In rhizosphere soil, available potassium and DOC were the main factors affecting microbial communities. (3) Correlation analysis between soil properties and Chinese cabbage yield indicated that yield correlated positively with non-rhizosphere pH and rhizosphere exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+}, but negatively with rhizosphere alkali-hydrolyzable nitrogen. Structural equation modeling revealed that exchangeable Ca^{2+}, available phosphorus, and alkali-hydrolyzable nitrogen had significant positive effects on cabbage yield, with Gram-negative bacteria indirectly influencing yield through available phosphorus. 【Conclusion】Based on these results, it can be concluded that the combined application of calcium carbonate and organic amendments effectively mitigated soil acidity, enhanced soil organic carbon sequestration, increased microbial biomass, and stabilized soil productivity. This study provides an important reference for research aimed at managing soil acidification and improving crop yields in acidic soils.
Key words: Calcium carbonate; Soil acidification; Soil organic carbon components; Microbial community structure

我国蔬菜产业因高强度耕作而面临多重胁迫。叶菜类作物（如白菜）因其浅根系、短周期特性，导致菜地换茬频率高、氮肥投入量大（>300 kg·hm^{-2}·a^{-1}，以 N 计），加速土壤酸化（pH 年均下降 0.3~0.5 单位）和水稳性团聚体破坏（降幅达 40%），进而引发有机质矿化速率升高（+25%）和肥力衰退[1]。近年研究发现，酸化土壤中土传病原菌（如 *Fusarium* spp.）丰度增加 3 倍~5 倍，而有益菌门（如放线菌门）丰度下降 50%以上，直接威胁蔬菜可持续生产[2]。

土壤 pH 提升是评价酸化改良效果的核心指标，而土壤有机碳主要反映土壤肥力水平。但土壤有机碳动态变化又间接受到 pH 的调控，特别是易分解、易被微生物利用的活性有机碳组分对土壤环境变化十分敏感，能够对土壤质量的变化做出快速响应[3]。例如，长期施用有机肥通过提升土壤 pH 与酸缓冲能力，驱动易氧化有机碳和颗粒有机碳的积累[4]。而石灰则通过调节 pH 影响有机碳-矿物结合机制[5]。然而，过量施氮导致钙键结合的有机碳大量流失，以及酸化引发的微生物碳利用效率下降（从 0.35 降至 0.22），严重削弱了传统改良措施的长期效益[6]。

微生物群落重组是土壤功能恢复的关键。尽管研究证实有机无机配施可提高细菌 α 多样性，但石灰添加导致的 pH 突变可能抑制真菌群落的丰度，且短期改良对微生物功能基因的影响仍不明确[7-8]。目前，针对酸性菜地的改良研究多聚焦长期效应，而短期内碳酸钙与有机物配施对“土壤-微生物-碳库”协同调控机制的研究尚存空白。

本研究旨在解析短期改良剂的协同效应。通过田间试验，量化碳酸钙、有机肥与腐殖酸钾配施对土壤理化性质、有机碳组分及微生物群落的调控路径，重点关注：（1）复合改良对土壤酸度与速效养分的协同提升机制；（2）微生物群落结构变化与碳固存效率的耦联关系。研究结果可为酸性菜地快速修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在重庆市南川区大观镇国家农业综合示范基地（29°14′24″N，107°0′27″E）进行。该地区属亚热带湿润季风气候，平均海拔 931 m，年均气温 16.6 ℃，年均降水量 1 185 mm，90%降水量发生在 3—9 月。试验土壤为沙溪庙组泥页岩与砂岩发育的紫色土类灰棕紫泥土属，土壤质地为黏壤土，土壤 pH 5.0，土壤有机质 14.98 g·kg^{-1}，碱解氮 138.98 mg·kg^{-1}，有效磷 32.92 mg·kg^{-1}，速效钾 156 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

本试验于 2022 年 10 月—2023 年 1 月进行，供试作物为白菜（海清 3 号），供试改良剂为碳酸钙（pH 为 9.55，CaO 含量为 50 g·kg^{-1}，MgO 含量为 3.0 g·kg^{-1}）、生物有机肥（pH 为 6.38，有效活菌数大于等于 5.0×10^{7} cfu·g^{-1}，N+P_2O_5+K_2O≥6.0 g·kg^{-1}，有机质大于等于 30 g·kg^{-1}）、腐殖酸钾（pH 为 8.35，腐殖酸大于等于 50 g·kg^{-1}，有机质含量大于等于 55 g·kg^{-1}，N+P_2O_5+K_2O≥5.0 g·kg^{-1}），3 种改良剂均为市售。

共设置 9 个处理：CK：不施改良剂；M：单施全量有机肥；P：单施全量腐殖酸钾；C：单施全量碳酸钙粉；mp：半量腐殖酸钾+半量有机肥；mc：半量有机肥+半量碳酸钙粉；pc：半量腐殖酸钾+半量碳酸钙粉；mpc：半量有机肥+半量腐殖酸钾+半量碳酸钙粉；MPC：全量有机肥+全量腐殖酸钾+全量碳酸钙粉。每个处理 3 次重复，共 27 个小区，随机区组排列，小区面积 25 m^2，每个小区白菜共计 225 株，间距为 30 cm。碳酸钙全量 4 500 kg·hm^{-2}（半量 2 250 kg·hm^{-2}），有机肥全量 3 000 kg·hm^{-2}（半量 1 500 kg·hm^{-2}），腐殖酸钾全量 450 kg·hm^{-2}（半量 225 kg·hm^{-2}），改良剂均匀撒施在各相应小区后旋耕。按照 300 kg·hm^{-2} N、72 kg·hm^{-2} P_2O_5、120 kg·hm^{-2} K_2O 施肥，其中 210 kg·hm^{-2} N（由尿素提供）和全部磷钾肥（磷酸铵、硫酸钾）作为基肥，并于白菜莲座期追施 90 kg·hm^{-2} N（尿素），均采用窝施。此外，含有机肥和腐殖酸钾的处理扣除相应养分含量，其他田间管理措施一致。

1.3 土壤样品采集与分析

采用五点取样方法，在两株白菜的中间采集耕层（0~20 cm）土壤，剔除根系及石头，风干混合制成非根际土壤。根据 Gqozo 等[9]的方法采集白菜根际土壤，每个小区选取 15 株生长良好的白菜植株，拔取白菜抖动根系后，用毛刷收集其根部附着的土壤（即根际土壤），保存于-80 ℃冰箱用于土壤微生物测定。

土壤理化性质测定采用鲍士旦[10]的方法：土壤 pH 采用 1: 2.5 土水质量比电位法测定；土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定；土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—硫酸亚铁滴定法测定；土壤有效磷采用 HCl-NH_4F 法测定；速效钾采用中性乙酸铵浸提—火焰光度法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；采用 1 mol·L^{-1} 乙酸铵浸提，原子吸收分光光度法测定 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量；氯化钾—中和滴定法测定交换性酸（ExA）、交换性氢（ExH）、交换性铝（ExAl）。

采用 Jones 和 Willett[11]的方法测定可溶性有机碳。土壤微生物生物量碳（MBC）采用 Vance 等[12]的方法测定，MBC=E_c/0.38，其中 E_c 为熏蒸土壤和未熏蒸土壤的差值。易氧化有机碳（EOC）采用袁可能和陈通权[13]的方法测定。

1.4 磷脂脂肪酸（PLFA） 分析

采用磷脂脂肪酸法测定土壤微生物群落结构多样性。土壤微生物 PLFA 采用 Zelles 等[14]的方法进行测定。

1.5 数据统计分析

采用 Microsoft office 2019 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理，利用 Origin 2019 软件进行相关性热图绘制，用 Canoco5 进行冗余分析及图形绘制。利用 R 语言构建结构方程模型分析土壤性质和微生物群落对白菜产量的影响，使用最大似然法的卡方值（χ^2）、相对拟合指数（CFI）、标准化残差（SRMR）、近似均方根误差（RMSEA）评价结构方程的拟合效果。若 RMSEA<0.08、SRMR<0.08、CFI>0.90、卡方自由度比小于 3，则模型拟合结果较好[15]。

2 结 果

2.1 添加不同物料对酸化土壤理化性质及白菜产量的影响

由表 1 可知，与 CK 相比，单施有机肥和腐殖酸钾处理对土壤 pH、ExA、ExH、ExAl 无显著影响，但有机肥单施能显著提高非根际土壤中的全氮、有效磷、速效钾、交换性镁的含量，单施腐殖酸钾处理显著提高了根际/非根际土壤速效钾含量，碳酸钙单施处理显著降低了非根际土壤有效磷及根际土壤速效钾含量。添加了碳酸钙的处理均降低了土壤酸度，非根际土壤 pH 提高 0.53~1.22 个单位，根际土壤 pH 提升 0.51~0.95 个单位，且显著降低了土壤 ExA、ExH（除 mc 处理）和 ExAl 含量，同时土壤交换性钙含量显著增加，但交换性

镁变化规律不明显。无论添加何种物料，均显著降低根际土壤碱解氮含量，但根际土壤全氮（除 pc 处理显著降低外）和有效磷（除 mp 和 pc 处理显著降低外）无明显变化。总体上，碳酸钙粉末与有机物复配后，对酸化土壤的改酸培肥效果更好。

由图 1 可知，各处理白菜产量均高于 CK，提升了 2 745 kg·hm^{-2}~10 500 kg·hm^{-2}，其中 C、mp、mc、mpc、MPC 达到差异显著水平。

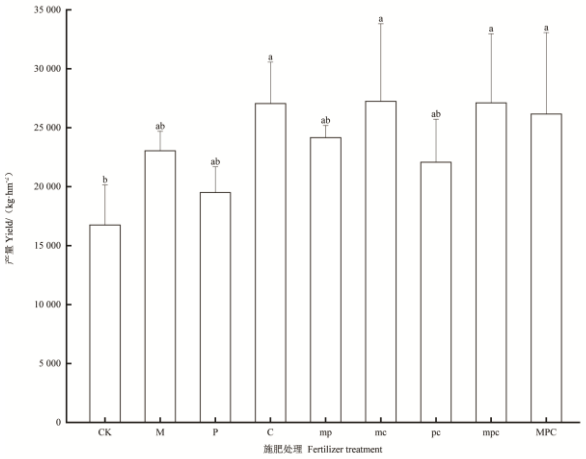
表 1 不同处理对非根际和根际土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on physicochemical properties of non-rhizosphere and rhizosphere soils

区域 Region	处理 Treatment	pH	TN/ (g·kg^{-1})	AN/ (mg·kg^{-1})	AP/ (mg·kg^{-1})	AK/ (mg·kg^{-1})
非根际 Non-rhizosphere	CK	4.71±0.07d	1.33±0.14cd	140.4±21.0bc	48.48±8.52b	156.3±17.5c
	M	4.77±0.38d	1.66±0.04a	152.9±2.9ab	67.12±3.00a	304.0±9.2a
	P	4.86±0.06cd	1.43±0.09bc	132.2±13.0bc	46.76±6.86bc	204.7±16.3b
	C	5.93±0.06a	1.51±0.09abc	136.3±6.3bc	35.56±4.97c	144.7±2.1c
	mp	5.04±0.42bcd	1.43±0.03bc	120.9±18.7c	41.22±11.16bc	162.0±13.1c
	mc	5.24±0.24bcd	1.58±0.15ab	154.0±4.4ab	40.68±2.43bc	216.7±4.0b
	pc	5.40±0.62abc	1.43±0.01bc	121.5±7.2c	35.77±3.49c	161.3±3.2c
	mpc	5.54±0.07ab	1.23±0.04d	175.1±18.9a	42.58±0.92bc	179.7±28.0bc
	MPC	5.57±0.32ab	1.54±0.18ab	172.0±20.6a	40.91±6.10bc	276.0±55.0a
区域 Region	处理 Treatment	Ca^{2+}/ (cmol·kg^{-1})	Mg^{2+}/ (cmol·kg^{-1})	ExA/ (cmol·kg^{-1})	ExH/ (cmol·kg^{-1})	ExAl/ (cmol·kg^{-1})
非根际 Non-rhizosphere	CK	10.43±0.27d	2.14±0.09bc	5.62±0.70a	0.52±0.18a	5.10±0.70a
	M	13.58±2.38cd	2.61±0.05a	5.08±0.60a	0.58±0.14a	4.50±0.48a
	P	11.73±1.56d	2.24±0.27ab	5.36±1.26a	0.39±0.04ab	4.97±1.24a
	C	25.43±6.25a	2.32±0.19ab	0.94±1.27b	0.12±0.13c	0.82±1.27b
	mp	17.56±0.97c	2.27±0.23ab	1.26±0.41b	0.27±0.18bc	0.98±0.46b
	mc	15.48±2.51cd	2.46±0.27ab	2.19±0.91b	0.27±0.07bc	1.92±0.96b
	pc	18.78±2.33bc	2.37±0.02ab	1.62±1.11b	0.23±0.15bc	1.39±1.05b
	mpc	17.71±3.97c	1.89±0.30cd	0.69±0.23b	0.15±0.02bc	0.54±0.21b
	MPC	23.12±1.69ab	1.66±0.05d	1.38±1.38b	0.16±0.14bc	1.22±1.29b
区域 Region	处理 Treatment	pH	TN/ (g·kg^{-1})	AN/ (mg·kg^{-1})	AP/ (mg·kg^{-1})	AK/ (mg·kg^{-1})
根际 Rhizosphere	CK	5.18±0.23cd	1.60±0.11a	320.8±19.8a	43.31±1.54a	230.0±6.0bc
	M	4.88±0.08d	1.61±0.13a	288.6±2.3b	43.77±0.25a	248.0±15.5ab
	P	5.08±0.15cd	1.52±0.15a	264.4±12.2bc	43.56±1.15a	265.0±4.4a
	C	6.03±0.29a	1.53±0.03a	216.0±14.5d	40.32±2.93a	161.7±13.6f
	mp	5.40±0.25bcd	1.65±0.07a	249.3±13.6b	35.85±1.21b	221.3±6.5cd
	mc	5.69±0.57abc	1.46±0.16a	279.4±10.3b	44.53±4.37a	194.3±17.5e
	pc	5.86±0.30ab	1.21±0.01b	244.9±22.8c	36.00±2.20b	203.7±16.0de
	mpc	6.13±0.29a	1.54±0.26a	250.5±1.4c	43.38±1.35a	260.3±19.5a
	MPC	6.06±0.49a	1.59±0.14a	246.5±20.8c	43.94±2.07a	231.7±16.0bc
区域 Region	处理 Treatment	Ca^{2+}/ (cmol·kg^{-1})	Mg^{2+}/ (cmol·kg^{-1})	ExA/ (cmol·kg^{-1})	ExH/ (cmol·kg^{-1})	ExAl/ (cmol·kg^{-1})
根际 Rhizosphere	CK	8.90±0.85c	1.64±0.07bcd	4.40±0.26a	0.70±0.25a	3.70±0.31a
	M	10.29±2.03bc	1.70±0.11abcd	3.99±0.06a	0.91±0.32a	3.07±0.31ab
	P	9.81±2.72c	1.53±0.04d	4.20±0.16a	0.80±0.18a	3.40±0.01a
	C	14.63±2.65ab	1.57±0.18cd	0.94±0.59c	0.20±0.03b	0.74±0.62cd
	mp	12.90±2.71abc	1.88±0.21a	2.78±0.95b	0.26±0.03b	2.52±0.92b
	mc	14.42±3.98ab	1.81±0.14ab	2.40±0.38b	0.89±0.05a	1.52±0.43c
	pc	15.92±1.51a	1.85±0.10ab	1.19±0.18c	0.25±0.13b	0.94±0.06cd
	mpc	15.59±0.43a	1.83±0.10ab	0.57±0.26c	0.07±0.06b	0.49±0.23d
	MPC	16.26±2.41a	1.78±0.02abc	0.72±0.5c	0.16±0.16b	0.56±0.36d

注：CK:不施改良剂；M：单施全量有机肥；P：单施全量腐殖酸钾；C：单施全量碳酸钙；mp：半量腐殖酸钾+半量有机肥；mc：半量有机肥+半量碳酸钙；pc：半量腐殖酸钾+半量碳酸钙；mpc：半量有机肥+半量腐殖酸钾+半量碳酸钙；MPC：全量有机肥+全量腐殖酸钾+全量碳酸钙。TN：全氮；AN：碱解氮；AP：有效磷；AK：速效钾；Ca^{2+}：交换性钙离子；Mg^{2+}：交换性镁离子；ExA：交换性酸；ExH：交换性氢离子；ExAl：交换性铝离子。同列不同字母表示不同处理间土壤数据的显著性差异（P<0.05）。下同。

Note: CK: No amendment; M: Full-dose organic fertilizer alone; P: Full-dose potassium humate alone; C: Full-dose calcium carbonate alone; mp: Half-dose potassium humate + half-dose organic fertilizer; mc: Half-dose organic fertilizer + half-dose calcium carbonate; pc: Half-dose potassium humate + half-dose calcium carbonate; mpc: Half-dose organic fertilizer + half-dose potassium humate + half-dose calcium carbonate; MPC: Full-dose organic fertilizer + full-dose potassium humate + full-dose calcium carbonate.TN: Total nitrogen; AN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; Ca^{2+}: Exchangeable Ca^{2+}; Mg^{2+}: Exchangeable Mg^{2+}; ExA: Exchangeable acidity; ExH: Exchangeable H^{+}; ExAl: Exchangeable Al^{3+}. Different letters in the same column indicated significant differences in soil data between different treatments (P<0.05). The same below.



注：不同小写字母表示各处理间产量有显著差异（P<0.05）。Note：Different lowercase letters indicate significant differences in yield among treatments (P<0.05).

图 1 碳酸钙复配有机物对白菜产量的影响
Fig. 1 Effect of calcium carbonate compound organic matter on the yield of Chinese cabbage

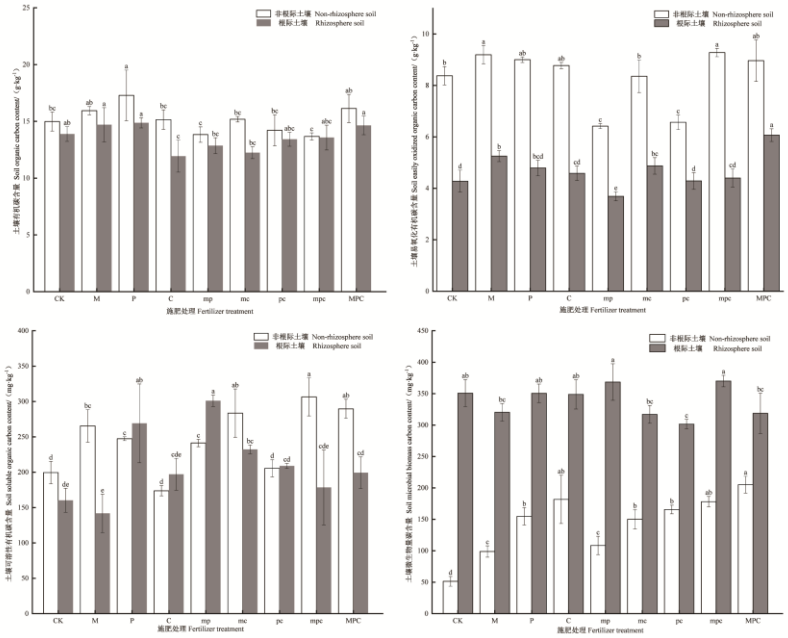
2.2 添加不同物料对酸化土壤有机碳组分的影响

有机碳组分含量变化对碳酸钙配施有机物的响应如图 2 所示。与 CK 相比，单施腐殖酸钾使非根际土壤有机碳含量显著提高 15.38%，单施碳酸钙处理下根际土壤有机碳显著降低 14.03%，而其余处理有机碳含量均无明显变化。

与 CK 相比，单施有机肥显著提高了土壤易氧化有机碳含量，而 mp 处理使其含量显著降低，非根际和根际土壤易氧化有机碳分别降低 23.36%和 13.78%。mpc 处理在非根际土壤中易氧化有机碳含量最高，为 9.28 g·kg^{-1}，显著高于 CK、mp 和 pc 处理。在根际土壤中，以 MPC 处理的易氧化有机碳含量最高（6.07 g·kg^{-1}），显著高于其他处理。

除单施碳酸钙和单施有机肥处理外，其余处理土壤可溶性有机碳均高于 CK，其中 P、mp、mc 在根际/非根际土壤中达到显著差异，但单施有机肥、三种改良剂配施的土壤可溶性有机碳仅在非根际土壤达到显著差异。

各处理非根际土壤微生物生物量碳含量均出现上升，较 CK 提升了 47.49~153.7 mg·kg^{-1}，其中以三种改良剂全量配施最高。但根际土壤微生物生物量碳含量（除 pc 处理显著降低外）无显著差异。



注：不同小写字母表示在根际或非根际土壤各处理间有显著差异（P<0.05）。下同。Note：Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in either rhizosphere or non-rhizosphere soil (P

< 0.05). The same below.

图 2 碳酸钙复配有机物对根际和非根际土壤有机碳组分的影响
Fig. 2 Effects of calcium carbonate compound organic matter on organic carbon components of rhizosphere and non-rhizosphere soil

2.3 添加不同物料对酸化土壤微生物群落结构的影响

由图 3 可知，与 CK 相比，单施有机肥和三种改良剂配施均能增加土壤微生物生物量，其中单施有机肥处理显著增加非根际土壤总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、革兰氏阳性菌生物量，三种改良剂半量配施显著增加根际土壤总磷脂脂肪酸、细菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌生物量。三种改良剂配施处理各微生物类群生物量虽也有提升，但仅非根际土壤细菌和根际土壤革兰氏阳性菌达到显著差异。

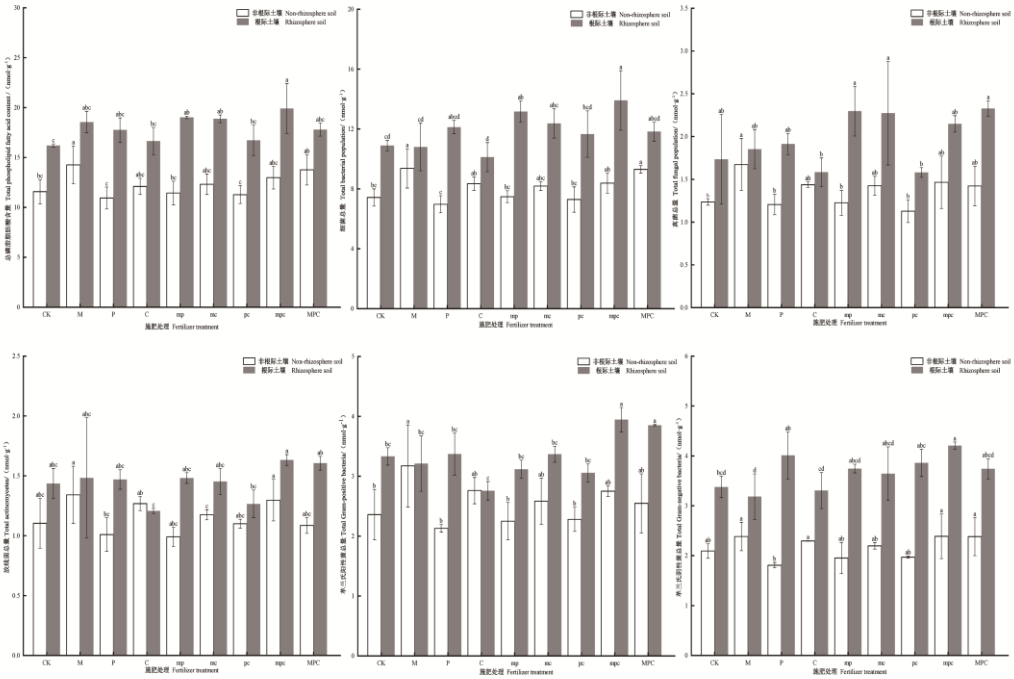
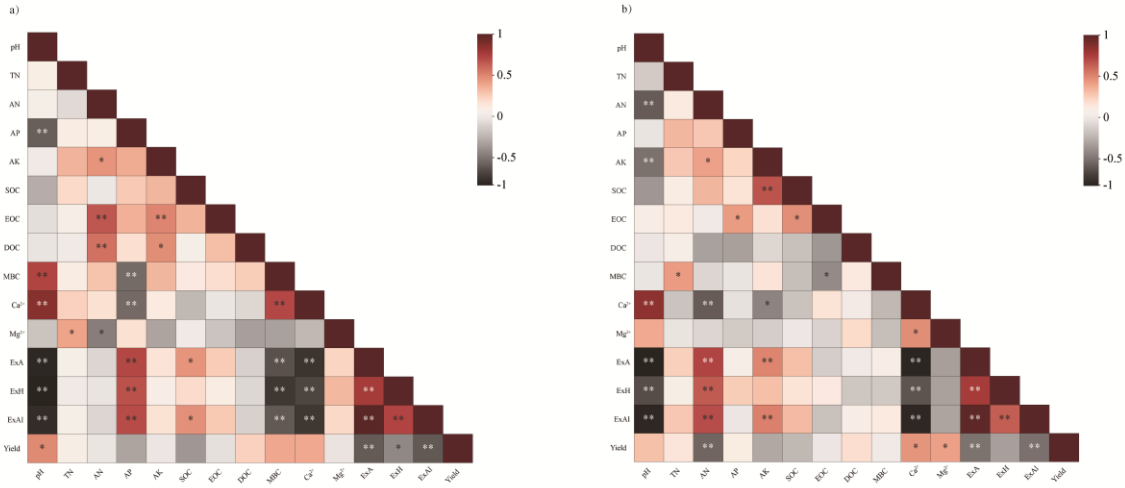


图 3 碳酸钙复配有机物对根际和非根际土壤各类微生物磷脂脂肪酸含量的影响
Fig. 3 Effects of calcium carbonate compound organic matter on phospholipid fatty acid content of various microorganisms in rhizosphere and non-rhizosphere soil

2.4 土壤理化性质与产量的相关性

对土壤理化性质和产量进行相关性分析（图 4）发现，在非根际土壤中（图 4a），土壤 pH 与微生物生物量碳呈极显著正相关；碱解氮与易氧化有机碳、可溶性有机碳极显著正相关；有效磷与微生物生物量碳和交换性 Ca^{2+}呈极显著负相关；速效钾与易氧化有机碳呈极显著正相关，与可溶性有机碳显著相关；有机碳与交换性酸和交换性铝显著正相关；微生物生物量碳与交换性 Ca^{2+}呈极显著正相关，与交换性酸、交换性氢、交换性铝呈极显著负相关。

在根际土壤中（图 4b），全氮与微生物生物量碳呈显著正相关；有效磷与易氧化有机碳呈显著正相关；速效钾与有机碳呈极显著正相关，与交换性 Ca^{2+}显著负相关；有机碳与易氧化有机碳呈显著正相关；易氧化有机碳与微生物生物量碳显著负相关；产量与非根际土壤 pH 和根际土壤交换性 Ca^{2+}、交换性 Mg^{2+}显著正相关，但与土壤交换性酸、交换性铝极显著负相关，与根际土壤碱解氮显著负相关。



注： *代表显著相关（P<0.05）,**代表极显著相关（P<0.01），***代表在（P<0.001）水平上显著相关。DOC-可溶性有机碳；EOC-易氧化有机碳；MBC-微生物生物量碳；SOC-土壤有机碳； Yield-产量。下同。Note: * represents a significant association (P<0.05), ** represents a very significant association (P<0.01), *** represents a significant association at the (P<0.001) level. DOC- soluble organic carbon; EOC- easily oxidized organic carbon; MBC- microbial biomass carbon; SOC- soil organic carbon; The same below.

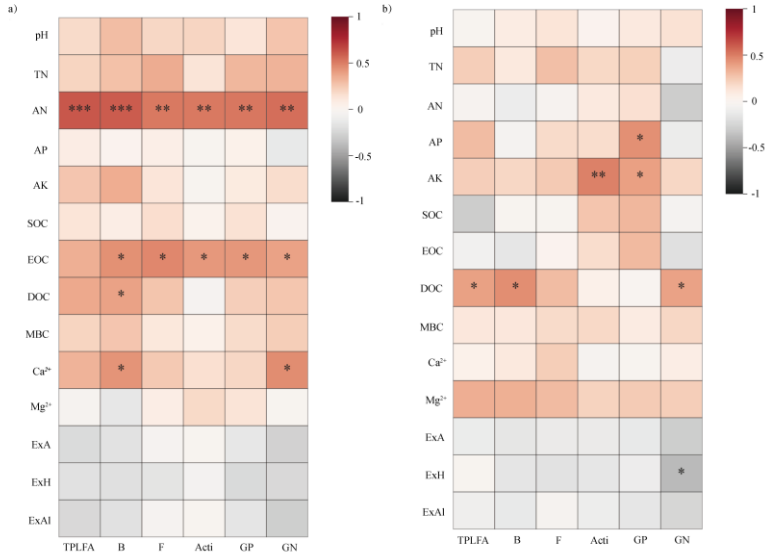
图 4 白菜产量与非根际（a）和根际（b）土壤理化性质的相关性

Fig. 4 Correlation between yield of Chinese cabbage and physicochemical properties of non-rhizosphere (a) and rhizosphere soil (b)

2.5 土壤理化性质与微生物群落结构之间的相关性及其对产量的影响

对根际和非根际土壤理化性质与微生物群落结构进行相关性分析（图 5a，图 5b）表明，非根际土壤中碱解氮和易氧化有机碳含量与细菌、真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌均呈显著正相关，可溶性有机碳仅与细菌显著正相关。在根际土壤中，可溶性有机碳含量与总磷脂脂肪酸、细菌、革兰氏阴性菌显著正相关。为进一步分析土壤理化性质对土壤微生物群落结构的影响，进行冗余分析（RDA）发现，在非根际土壤中（图 6a），RDA 的前 2 个轴共解释了数据总变异的 58.09%，土壤碱解氮对微生物群落的影响最大。在根际土壤中（图 6b），RDA 的前 2 个轴共解释了数据总变异的 49.26%，土壤速效钾和可溶性有机碳含量是影响根际土壤微生物群落的主要因子。

为进一步明确土壤属性与白菜产量间的关系，分别在非根际（图 7a）和根际土壤（图 7b）中构建了结构方程模型，且该模型与数据拟合良好（非根际卡方自由度比为 1.260，df=5，P=0.939，CFI=1.000，SRMR=0.013，RMSEA=0；根际卡方自由度比为 5.299，df=6，P=0.506，CFI=1.000，SRMR=0.047，RMSEA=0）。在非根际土壤中，白菜产量主要受土壤中交换性钙含量的影响，碱解氮含量的变化主要由易氧化有机碳、总磷脂脂肪酸、革兰氏阴性菌驱动。在根际土壤中，白菜产量主要受碱解氮、有效磷、革兰氏阳性菌的显著影响，其革兰氏阳性菌通过有效磷间接对产量产生影响。



注： TPLFA-总磷脂脂肪酸含量；B-细菌；F-真菌；Acti-放线菌；GP-革兰氏阳性菌；GN-革兰氏阴性菌。下同。Note: TPLFA-total phospholipid fatty acid content; B- bacteria; F- fungi; Acti- Actinomyces; GP-gram-positive bacteria; GN-gram-negative bacteria. The same below.

图 5 土壤理化性质与各微生物量间的相关性（a. 非根际土壤；b. 根际土壤）
Fig. 5 Correlation between soil physicochemical properties and microbial biomass (a. non-rhizosphere soil; b. rhizosphere soil)

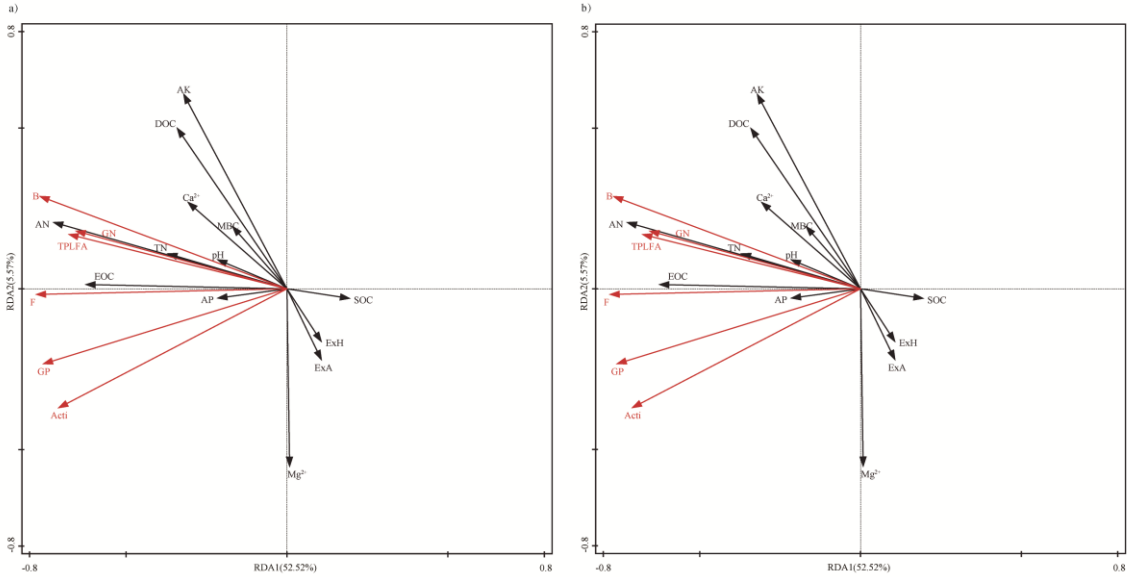
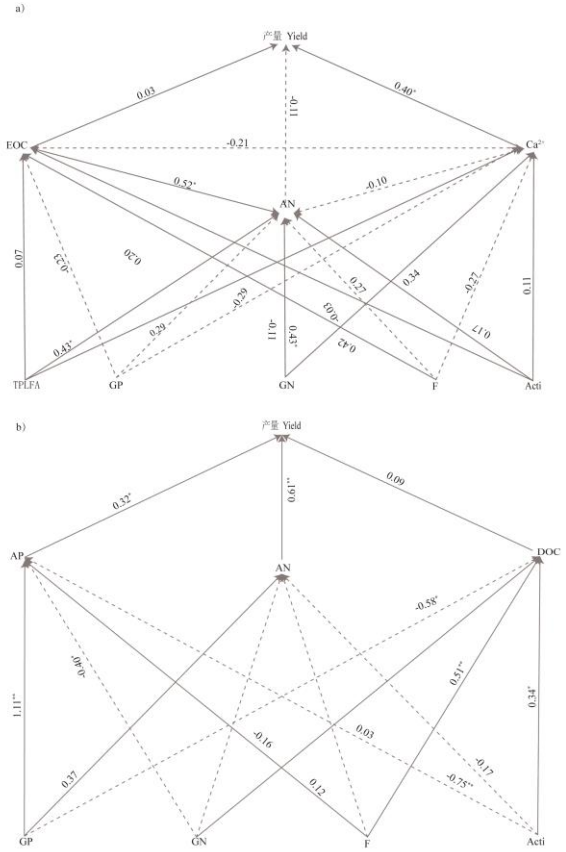


图 6 土壤理化性质与微生物群落结构间冗余分析（RDA）（a. 非根际土壤，b. 根际土壤）
Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) between soil physicochemical properties and microbial community structure (a. non-rhizosphere soil, b. rhizosphere soil)



注：箭头上方的数字表示路径系数（λ，标准化回归系数），实线和虚线分别表示有正效应和负效应，*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上的显著性。Note: The numbers above the arrows indicate the path coefficients (λ, normalized regression coefficients), the solid and dashed lines indicate positive and negative effects, respectively, and * and ** indicate significance at the $P< 0.05$ and $P<0.01$ levels.

图 7 土壤理化性质及微生物对白菜产量的直接和间接影响的结构方程模型
Fig. 7 Structural equation model of direct and indirect effects of soil physicochemical properties and microorganisms on the yield of Chinese cabbage

3 讨 论

3.1 施用三种改良剂对土壤养分的影响

研究显示，长期添加有机物料主要通过中和 H^+和促进腐殖质形成等方式提高土壤酸缓冲能力，但短期内的降酸效果仍存在争议。本研究也发现，单施有机肥和单施腐殖酸钾能够提高非根际土壤或根际土壤中速效养分含量，但并未显著降低土壤酸度（表 1）。这是因为有机肥在腐解的初期会释出 H^+和一些有机酸，导致土壤 pH 变化不明显，这与 Gondek 等[16]在砂质土壤中观察到的有机肥短期酸化现象一致。施加碳酸钙的处理均降低了土壤酸度，这与 Holland 等[17]的研究是一致的。但各处理非根际土壤 Ca^{2+}高于根际，是因为碳酸钙改良剂采用撒施方式，且 Ca^{2+}主要以质流为运移方式，溶解度较低，白菜生长从根际吸收了 Ca^{2+}，使非根际 Ca^{2+}含量显著高于根际。然而，仅施碳酸碳虽然增加了白菜产量，但土壤中碱解氮、有效磷、速效钾含量均低于 CK（表 1），当强酸性土壤 pH 提高后，白菜长势更好，加速了对氮磷钾的吸收利用，同时土壤 pH 的提升促使交换性 Al^{3+}转化为羟基铝聚合物，增加对磷素的吸附作用，从而降低磷素的有效性[18]。此外，施用碳酸钙后，土壤溶液中 Ca^{2+}/K^+比值升高（表 1），可能通过阳离子竞争促进 K^+淋失[19]。三种改良剂配施处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均高于仅施碳酸钙处理（表 1）。这也证明了碳酸钙配施有机物料具有更好的降酸及培肥效果，对保障菜地健康可持续发展具有重要意义。本研究表明，施用有机无机改良剂提高了白菜产量，但降低了根际土壤碱解氮含量（表 1），这可能是由

于土壤 pH 提高促进了白菜根系对氮素的吸收利用。另一方面，土壤理化性质和产量间相关性分析表明，白菜产量与 pH、Ca^{2+}显著正相关，与碱解氮显著负相关（图 4）。

3.2 施用三种改良剂对土壤有机碳组分的影响

本研究中，各处理（除单施腐殖酸钾外）土壤有机碳含量均与 CK 差异不显著（图 2）。这与李慧敏等[19]的研究结果相同，在等养分投入条件下，施用有机肥和腐殖酸钾并未显著增加土壤有机碳含量。此外，短期外源碳投入未能充分转化为稳定碳库，这是因为活性碳源输入量超过了微生物同化能力，降低了其代谢系统[20]。单施碳酸钙显著降低了根际土壤有机碳含量，在非根际土壤中差异不显著，且各处理非根际土壤有机碳含量要高于根际土壤（图 2）。一方面施用碳酸钙提高土壤 pH 的同时，提高了土壤中微生物活性及数量，从而加速有机质的矿化分解；另一方面，在本试验中各处理根际土壤微生物生物量碳含量要高于非根际（图 3），表明根际土壤中具有较高的微生物量，进而促进了根际有机碳的矿化分解过程，导致根际土壤有机碳含量低于非根际土壤。此外，根系释放的一系列有机化合物作为土壤微生物的能量来源，也能增强有机碳的矿化过程。总体而言，施用碳酸钙会促进有机碳的矿化损失，而三种改良剂全量复配处理土壤有机碳含量要高于 CK 和两种改良剂复配处理（图 2），说明改良剂全量配施有利于有机碳固存，能够弥补矿化损失掉的那一部分有机碳。

易氧化有机碳和可溶性有机碳主要来源于易分解或添加至土壤中的有机物料，有机物料用量越大，易氧化有机碳和可溶性有机碳含量就越高[21]。本研究中，单施全量有机物料（除根际 M 处理）及 mpc、MPC 处理土壤易氧化有机碳和可溶性有机碳均高于 CK（图 2）。与之不同的是，mp 处理土壤易氧化有机碳含量显著降低，而可溶性有机碳显著提高（图 2）。冗余分析（图 6）表明，土壤有机碳含量与各微生物类群呈负相关，这可能是 mp 处理土壤 H^+较高，破坏了其细胞膜透性，抑制相关酶系表达[22]。前人研究表明，施用有机物料有利于细菌和真菌参与有机碳的周转，显著提高土壤中 MBC 含量，其中烟秆生物质炭配施化肥通过提高土壤酶活性及细菌多样性，促进 MBC 和 POC 含量的积累[23]。在本研究中，也发现单施有机物料或有机无机配施可提高土壤 pH 和微生物生物量碳含量（图 3）。而在根际土壤中，各处理（除 mpc 外）根际土壤微生物生物量碳含量均低于 CK（图 3）。造成这种结果的原因可能与施用改良剂后各处理的碱解氮含量低于 CK（表 1）有关。Zak 等[24]认为土壤速效氮的含量影响着微生物生物量和有机碳供给，当土壤中氮素供应不足时，植物根系会与微生物竞争可利用氮，降低土壤中微生物生物量碳。根际土壤和非根际土壤在理化性质以及微生物特征上存在的明显差异是导致有机碳含量差异的一个重要原因，其中较多研究结果认为根际土壤有机碳含量要明显高于非根际土壤。但在本研究中，各处理非根际土壤易氧化有机碳含量均高于根际（图 2），这可能是由于土壤样品采集于白菜生长末期，根系分泌物相对减少，根系对土壤有机碳动态平衡的转化贡献降低[25]。此外，本研究中各处理根际土壤 MBC 含量明显高于非根际（图 2），这与 Zhang 等[26]的研究结果一致。因为根系分泌物或根系凋落物仅作用于根际区域，从而仅影响根际范围内的微生物活动，且根系分泌物中的一些小分子物质能够改变土壤碳组分和含量[27]。其中磷脂脂肪酸的数据也表明，根际土壤中的总微生物量均高于非根际（图 3），正印证了该结果。

3.3 施用三种改良剂对土壤微生物群落的影响

外源有机碳的输入可显著提高土壤微生物生物量以及细菌和真菌丰度[28]。本研究中，单施有机肥处理显著提高了非根际土壤总磷脂脂肪酸、细菌（革兰氏阳性菌）、真菌含量，但单施有机肥处理根际土壤总磷脂脂肪酸、细菌含量低于 CK（图 3），这是因为总磷脂脂肪酸、细菌（革兰氏阳性菌）含量与土壤可溶性有机碳均呈显著正相关（图 5），而根际可溶性有机碳含量低于 CK（图 2）。此外，三种改良剂复合施用处理土壤总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌含量均高于 CK 和两种改良剂复合施用（图 3）。这与宿翠翠等[29]的研究结果相似。冗余分析结果也表明，碱解氮和速效钾分别是影响非根际及根际土壤微生物群落的主要因子（图 6），且 mpc 和 MPC 处理碱解氮和速效钾含量均高于 CK 和两种改良剂复合施用（表 1）。放线菌 PLFA 含量在各处理间无显著差异（$P>0.05$，图 3），可能与其携带的抗生素合成基因，增强环境胁迫抗性有关，说明放线菌群落可能作为酸性土壤恢复的指示生物[30]。此外，由于革兰氏阳性菌更倾向于利用易分解的活性有机碳，非根际土壤中易氧化有机碳与革兰氏阳性菌呈显著正相关（图 5），且非根际土壤中易

氧化有机碳含量高于根际（图 2），这可能导致非根际土壤革兰氏阳性菌含量高于革兰氏阴性菌。而在根际土壤中出现相反的趋势（图 3），可能是因为根系分泌的小分子物质（糖类、有机酸类、氨基酸等）为革兰氏阴性菌提供了大量营养来源。

3.4 土壤理化性质和微生物群落对产量的影响

土壤微生物群落可通过促进养分循环、改善土壤结构等方式，对作物的生长和产量产生直接或间接的作用。有效性氮和有效性磷是作物生产的主要限制养分，本研究中根际碱解氮和有效磷含量直接影响白菜产量。结构方程模型显示，革兰氏阴性菌通过提升磷有效性而间接增加产量（图 7），表明其可能通过分泌植酸酶释放有机磷[31]，且革兰氏阴性菌和有效磷具有显著正相关关系（图 5）。而革兰氏阳性菌和真菌与可溶性有机碳含量有显著正效应（图 5），这表明在根际土壤中革兰氏阳性菌和真菌数量的增加将提高可溶性有机碳的含量。冗余分析也显示可溶性有机碳含量是影响土壤微生物群落组成的重要因素（图 6），这是因为可溶性有机碳是微生物生长所利用的碳源，通过降低土壤酸度促进了根系分泌物生成的相关微生物丰度[19]，但革兰氏阴性菌对土壤可溶性有机碳含量产生的负效应（图 7）尚有待进一步研究。碱解氮是显著影响非根际土壤微生物群落结构的主要因子，且与各类微生物群均呈显著正相关（图 6），这与 Wang 等[32]的研究结果一致。本研究中，非根际土壤交换性 Ca^{2+}对白菜产量有显著正效应（图 4），说明施加碳酸钙对增加白菜产量有积极的效应，也说明向土壤中补充钙离子，能够降低土壤酸度，提高白菜抗胁迫能力，促进光合产物的积累，进而提高白菜产量。

4 结 论

单施有机肥虽然增加了土壤养分和微生物生物量，但不能在短时间内有效缓解土壤酸化。单施碳酸钙提高了土壤 pH，但降低了根际土壤碱解氮的含量，阻碍了有机碳的固存。而与 CK 相比，三种改良剂复合施用能够更好地降低土壤酸度，提高土壤肥力、白菜产量、土壤各类微生物量。此外，研究发现碱解氮、速效钾、可溶性有机碳是驱动微生物群落变化的关键因子，并揭示了不同改良剂施用条件下，土壤性状与微生物群落的联系以及白菜产量对土壤性状的响应。总体而言，碳酸钙配施有机物料是改良酸性菜地及提高土壤肥力的有效措施，可为酸性菜地土壤的改良、微生物响应以及增产效果提供一定的应用借鉴，并且加深了土壤性质、微生物群落对土壤生产力影响的认识。

参考文献（References）

[1] Chen J G, Xiao W, Zheng C Y, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 142(20): 107708.

[2] Li X G, Chen D L, Carrión V J, et al. Acidification suppresses the natural capacity of soil microbiome to fight pathogenic *Fusarium* infections[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5090.

[3] Mao X L, Zheng J Y, Yu W, et al. Climate-induced shifts in composition and protection regulate temperature sensitivity of carbon decomposition through soil profile[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 172: 108743.

[4] Li Y X, Zeng X B, Wen J, et al. Differences of soil organic carbon components under organic fertilizer substitution and its influence on bacterial community [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(6): 1953-1962. [李雨欣 ,曾希柏, 文炯, 等. 有机替代下土壤有机碳组分差异及其对细菌群落的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(6): 1953-1962]

[5] Yuan M T, Li Z C, Meng J, et al. Effects of swine manure biochar application on the content and chemical structure of particulate and mineral-associated organic carbon in acidic and calcareous paddy soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(3): 441-456. [袁梦婷, 李子川, 孟俊, 等. 施用猪粪生物炭对酸性和石灰性水稻土颗粒态和矿物结合态有机碳含量及化学结构的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 [J]. 2024, 30(3): 441-456.]

[6] Zhao Z Y, Ma Y T, Zhang A, et al. Response of apple orchard bacteria co-occurrence network pattern to long-term organic fertilizer input[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 191: 105035.

[7] Mao Q Z, He B H, Ma M, et al. Effects of biochar on karst lime soil nutrients, soil microbial communities and physiology of Sichuan pepper plants [J]. Annals of Applied Biology, 2022, 181(3): 357-366.

[8] Li X Y, Li B, Chen L, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer over seven years increases yields and restores soil bacterial community diversity in wheat–rice rotation[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 133: 126445.

[9] Gqozo M P, Bill M, Siyoum N, et al. Fungal diversity and community composition of wheat rhizosphere and non-rhizosphere soils from three different agricultural production regions of South Africa[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 151: 103543.

[10] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分

析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[11] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.

[12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. Microbial biomass measurements in forest soils: Determination of kC values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 689-696.

[13] Yuan K N, Chen T Q. Studies on organo-mineral complex in soil Ⅱ.The composition and oxidation stability of organo-mineral complex in aggregates of various sizes in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1981, 18(4): 335-344. [袁可能, 陈通权. 土壤有机矿质复合体研究——Ⅱ.土壤各级团聚体中有机矿质复合体的组成及其氧化稳定性 [J]. 土壤学报, 1981, 18(4): 335-344.]

[14] Zelles L, Bai Q Y, Beck T, et al. Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(4): 317-323.

[15] Jia X L, Wang Y H, Zhang Q, et al. Reasonable deep application of sheep manure fertilizer to alleviate soil acidification to improve tea yield and quality[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1179960.

[16] Gondek K, Mierzwa-Hersztek M, Kopeć M, et al. Influence of biochar application on reduced acidification of sandy soil, increased cation exchange capacity, and the content of available forms of K, Mg, and P[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(1): 103-111.

[17] Holland J E, Bennett A E, Newton A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610: 316-332.

[18] Holland J E, White R, Haefele S M, et al. Long-term effects of lime and phosphorus application on soil extractable (Olsen) phosphorus differ between two arable UK soils[J]. Soil Use and Management, 2024, 40(4): e13160.

[19] Li H M, Tian S Y, Li D D et al. Effect of application of organic materials on content of labile organic carbon and composition of microbial community in fluvio-aquatic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 777-787. [李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 等. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响 [J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 777-787.]

[20] Chen Q Y, Liu Z J, Zhou J B, et al. Long-term straw mulching with nitrogen fertilization increases nutrient and microbial determinants of soil quality in a maize–wheat rotation on China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145930.

[21] Zhang L G, Chen X, Xu Y J, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 11318.

[22] Liu B, Xia H, Jiang C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. Science of The Total Environment, 2022, 841: 156608.

[23] Zhang H X, Zhu Q L, Guo L M, et al. Effects of combined application of tobacco stem biochar and chemical fertilizers on organic carbon fractions and microorganism in tobacco-growing soil [J]. Soils, 2022, 54(6): 1149-1156. [张红雪, 朱巧莲, 郭力铭, 等. 烟秆生物质炭与化肥配施对植烟土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. 土壤, 2022, 54(6): 1149-1156.]

[24] Zak D R, Pregitzer K S, King J S, et al. Elevated atmospheric CO_2, fine roots and the response of soil microorganisms: A review and hypothesis[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 201-222.

[25] Zhang Y R, Liu Y L, Huang X C, et al. Organic carbon mineralization characteristics in rhizosphere and bulk soil of rice under organic fertilization modes in yellow paddy fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(3): 449-458. [张雅蓉, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 不同有机肥施用模式下黄壤稻田根际和非根际土壤有机碳的矿化特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 449-458.]

[26] Zhang L, Su X Y, Meng H, et al. Cotton stubble return and subsoiling alter soil microbial community, carbon and nitrogen in coastal saline cotton fields[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 226: 105585.

[27] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022, 377(6606): 603-608.

[28] Xu Y M, Zhang L, Bai M X, et al. Effects of single application of organic amendments and their combination with biochar on microbial community composition in a red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(1): 273-284. [徐祎萌, 章磊, 白美霞 等. 有机物料单施及与生物质炭配施对红壤微生物群落组成的影响 [J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 273-284.]

[29] Su C C, Zhou Y F, Ding Z Y et al. Effects of exogenous organic materials on soil properties and microbial community in salinized farmland [J]. Soils, 2025, 57(2): 318-324. [宿翠翠, 周彦芳, 丁照耘, 等. 外源有机物料添加对盐渍化农田土壤性质和微生物群落的影响[J]. 土壤, 2025, 57(2): 318-324.]

[30] Cui X W, Lin X R, Li J B, et al. Diversity, functional characteristics and application of stress-resistant actinomycetes in environmental remediation[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(5): 1930-1943. [崔熙雯, 林小锐, 李家兵, 等. 抗逆放线菌的多样性、功能特性及其在环境修复中的应用 [J]. 微生物学报. 2023, 63(5): 1930-1943.]

[31] Jiang Z, Wang C, Sun H F, et al. Soil phosphorus availability modulates root exudation under long-term nitrogen fertilization[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 254: 106699.

[32] Wang C Q, Xue L, Dong Y H, et al. Effects of stand density on soil microbial community composition and enzyme activities in subtropical *Cunninghamia lanceolate* (Lamb.) Hook plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118559.

（责任编辑：陈荣府）