

郭诗梦, 李漪濛, 刘佳欣, 王悦, 吴周周, 王术, 周婵婵, 牟静怡, 刘俊峰, 梁超. 有机肥等氮替代化肥对水稻土壤性质、细菌群落和产量的影响[J]. 土壤学报, 2026,

GUO Shimeng, LI Yimeng, LIU Jiaxin, WANG Yue, WU Zhouzhou, WANG Shu, ZHOU Chanchan, MU Jingyi, LIU Junfeng, LIANG Chao. Effects of Equal Replacement of Chemical Fertilizer by Organic Fertilizer on Soil Properties, Bacterial Community, and Rice Yield [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

有机肥等氮替代化肥对水稻土壤性质、细菌群落和产量的影响*

郭诗梦¹, 李漪濛¹, 刘佳欣¹, 王悦¹, 吴周周¹, 王术¹, 周婵婵^{1†}, 牟静怡², 刘俊峰³, 梁超⁴

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳农业大学作物生理研究所, 沈阳 110866; 2. 辽宁农业职业技术学院, 辽宁营口 115009; 3. 辽宁省盐碱地利用研究所, 辽宁盘锦 124010; 4. 辽宁省农业科学院, 沈阳 110161)

摘要: 为探明有机肥等氮替代化肥对稻田土壤微生物群落及水稻产量的影响, 于 2019—2023 年在辽宁稻区开展定位试验, 选用 2 个常规种植品种沈稻 47 (SD47) 和沈稻 505 (SD505), 在等氮、磷、钾条件下, 设置全化肥处理 (CF)、10% 有机肥氮 (N) 替代化肥 N (OR10)、20% 有机肥 N 替代化肥 N (OR20)、30% 有机肥 N 替代化肥 N (OR30) 4 个肥料处理。结果表明: (1) 有机肥等氮替代通过增加有效穗数、结实率与千粒重实现水稻增产, 以 OR20 处理产量最高; (2) 有机肥等氮替代显著提升土壤耕层 (0~20 cm) 有机质、全氮及速效养分 (碱解氮、有效磷、速效钾) 含量, 改善土壤肥力; (3) 有机肥等氮替代显著提高根际与非根际土壤脲酶、蛋白酶、蔗糖酶和硝酸还原酶活性, 并提高根际土壤细菌群落 Chao1 指数与香农 (Shannon) 指数; (4) 门水平上, 有机肥等氮替代通过提高变形菌门、拟杆菌门等碳、氮循环相关功能菌群的相对丰度, 降低酸杆菌门等贫营养型菌门丰度, 优化根际与非根际土壤的细菌群落结构; (5) 功能预测分析结果表明, 有机肥处理提升了非根际土中转录、碳水化合物转运代谢功能, 增强了根际土壤中氨基酸转运代谢、无机离子转运代谢、脂肪转运代谢等代谢途径。综上所述, 在相同氮、磷、钾施用量下, 有机肥等氮替代通过改变非根际与根际土壤微环境, 增强碳、氮循环关键酶活性, 优化土壤微生物群落结构, 从而提升土壤养分有效性和供给能力, 最终实现水稻增产。

关键词: 有机肥替代; 水稻产量; 土壤化学性质; 土壤酶活性; 细菌群落; 细菌多样性

中图分类号: S154.3 文献标志码: A

Effects of Equal Replacement of Chemical Fertilizer by Organic Fertilizer on Soil Properties, Bacterial Community, and Rice Yield

*沈阳市科技计划项目(24-217-2-06)、辽宁省科技厅项目(2025JH5/10400012)与国家重点研发计划项目(2016YFD0300104)资助 Supported by the Science and Technology Plan Project of Shenyang, Liaoning Province, China (No. 24-217-2-06), the Project of Department of Science and Technology of Liaoning Province, China (No. 2025JH5/10400012) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300104)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhouchan@syau.edu.cn

作者简介: 郭诗梦 (1998—), 女, 辽宁铁岭人, 博士研究生, 主要研究领域为北方水稻优质高产栽培技术。E-mail: shimengsm@163.com

收稿日期: 2025-07-30; 收到修改稿日期: 2026-02-24; 网络首发日期 (www.cnki.net):

GUO Shimeng¹, LI Yimeng¹, LIU Jiabin¹, WANG Yue¹, WU Zhouzhou¹, WANG Shu¹, ZHOU Chanchan^{1†}, MU Jingyi², LIU Junfeng³, LIANG Chao⁴

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Agriculture Vocational and Technical College, Yingkou, Liaoning 115009, China; 3. Liaoning Institute of Saline-Alkali Land Utilization, Panjin, Liaoning 124010, China; 4. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the effects of equal replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer on rice microbial community and yield. 【Method】 A long-term field experiment was conducted in Liaoning from 2019 to 2023. In this experiment, two rice cultivars, Shendao47 (SD47) and Shendao505 (SD505), were grown in the field with four fertilization treatments at same N, P, K rate: CF (100% chemical fertilizer), OR10 (10% organic fertilizer + 90% chemical fertilizer), OR20 (20% organic fertilizer + 80% chemical fertilizer), OR30 (30% organic fertilizer + 70% chemical fertilizer). 【Results】 The results revealed the following: (1) Organic fertilizer substitution increased rice yield mainly by enhancing effective panicles, grain filling rate, and 1000-grain weight, with OR20 treatment achieving the highest yield; (2) Organic fertilizer substitution significantly improved soil fertility by increasing organic matter, total nitrogen, and available nutrient content (alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium) in plow layer (0-20 cm); (3) Organic fertilizer substitution significantly enhanced the activity of urease, protease, sucrase, and nitrate reductase in both rhizosphere and bulk soil; (4) Organic fertilizer substitution significantly increased the Chao1 index (richness) and Shannon index (diversity) of bacterial communities in the rhizosphere, whereas its effect on bulk soil bacterial diversity was not statistically significant; (5) At the phylum level, organic fertilizer substitution improved the relative abundance of carbon and nitrogen cycling bacterial phyla such as Proteobacteria, Bacteroidetes, reduced the abundance of oligotrophic bacterial phyla such as Acidobacteria, and optimized the bacterial community structure in bulk and rhizosphere soil; (6) Functional prediction analysis indicated that organic fertilizer treatments enhanced transcription and carbohydrate transport and metabolism in bulk soil, and strengthened metabolism pathways such as amino acid transport and metabolism, inorganic ion transport and metabolism, and lipid transport and metabolism in rhizosphere soil. 【Conclusion】 In conclusion, under equivalent nutrient input, partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer could improve the soil micro-environment, enhance key enzyme activities, and optimize the structure and function of soil microbial communities. These changes synergistically promote soil nutrient availability and supply capacity, ultimately increasing rice yield. This practice represents a sustainable fertilization strategy suitable for paddy fields in Northeast China.

Key words: Organic fertilizer substitution; Rice yield; Soil chemical property; Soil enzyme activity; Bacterial community; Bacterial diversity

土壤微生物是土壤生态系统的核心组成部分^[1], 参与土壤碳、氮、磷、有机质等关键养分的矿化分解与转化循环^[2], 驱动土壤-植物-微生物间相互作用。根际与非根际土壤作为该相互作用的关键区域, 其微生物群落的丰度与结构直接关系养分的生化循环, 能直接或间接地反映土壤肥力^[3], 并通过调控作物对养分的获取, 最终影响作物生长发育。氮既是调节土壤微生物群落组成和功能的重要元素, 也是影响作物生长发育的必要元素。合理的氮肥施用不仅能提升土壤养分有效性, 激活土壤酶活性, 优化微生物群落结构, 还能促进作物生长, 提高产量^[4]。细菌是稻田土壤微生物群落中的优势类群, 探究不同施肥模式下根际与非根际土壤细菌群落的结构特征, 是解析施肥措施对稻田土壤肥力演变与肥料利用效率影响机制的核心切入点, 对稻田土壤可持续培肥与绿色生产具有重要意义。

然而, 当前水稻生产中普遍存在片面追求高产而过度施用化肥的问题, 过量施用的氮肥

不仅造成环境污染,还会破坏土壤健康,抑制微生物活性。与化肥相比,有机肥富含有机质和多种微量元素,兼备培肥地力与促进植物生长的双重优势^[5],但由于其含氮量低,施用量大,肥效缓慢而应用受限。有机肥与化肥配施结合了化肥的速效性与有机肥的缓释性及改良土壤的优点,被证明是维持土壤肥力与保障水稻产量的有效措施。针对有机肥配施化肥在提升水稻产量方面的研究已较为完善^[6-7],但由于土壤微生物响应机理复杂,关于配施对土壤微生物群落影响的研究结论尚不统一。齐穗期是水稻从营养生长转向生殖生长的关键时期,本课题组前期研究发现,有机肥等氮替代处理在该时期能保持更高的光合效率与氮素利用率,是高产的生理基础^[8];且此阶段土壤微环境与最终产量息息相关,因此,研究齐穗期有机肥等氮替代对根际及非根际土壤微生物的影响意义重大。此外,对于有机无机肥配施的研究多集中于湖南、湖北、江西、广西等省份,在东北地区特别是辽宁地区研究仍较缺乏。水稻是辽宁省第二大粮食作物,对保障我国粮食安全至关重要。因此,因地制宜开展研究,阐明有机无机肥配施对辽宁水稻根际与非根际土壤酶活性以及微生物群落的影响,对指导区域农田土壤施肥、实现绿色生产具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况及试验设计

该试验始于2019年,连续5年在沈阳农业大学教学科研基地进行定位试验,试验点属温带半湿润季风气候区,2023年年平均气温9.7℃,年降水量651.7 mm,年日照时数2 455.9 h。2019年试验地0~20 cm土壤全氮含量1.22 g·kg⁻¹,碱解氮110 mg·kg⁻¹,有效磷24.69 mg·kg⁻¹,速效钾158 mg·kg⁻¹,有机质28 g·kg⁻¹。

田间管理措施及供试水稻品种在各年度间保持一致。田间试验采用裂区方式,肥料为主区,共设4个肥料处理,分别为全化肥(CF)、有机肥替代10%化肥(OR10)、有机肥替代20%化肥(OR20)、有机肥替代30%化肥(OR30),所有处理施氮量均为150 kg·hm⁻²;品种为副区,供试品种为沈稻47(SD47)和沈稻505(SD505)。施用氮肥为尿素(N 460 g·kg⁻¹),有机肥为沈阳树新畜牧有限公司生产的生物有机肥(N 10 g·kg⁻¹、P₂O₅ 11.6 g·kg⁻¹、K₂O 11 g·kg⁻¹),有机质含量大于等于450 g·kg⁻¹,水分低于300 g·kg⁻¹,主要原料为牛粪。化肥占有部分按基肥:分蘖肥:拔节肥质量比为5:3:2施入,有机肥占有部分均以基肥施入。有机肥替代处理中化学磷、钾肥施入比例已减除有机肥中含量,使用过磷酸钙和硫酸钾补充以达到施用标准,使所有处理磷、钾肥用量一致,P₂O₅用量为90 kg·hm⁻²,K₂O用量为75 kg·hm⁻²。2023年于4月16日播种,5月25日移栽,行株距为25 cm×16.5 cm,密度为每公顷20万穴,每穴2~3苗。小区面积47.5 m²(9.5 m×5 m),20行区,3次重复。不同小区之间采用隔板隔离,防止水分与肥料串漏,单排单灌。

1.2 测定项目与方法

产量测定:成熟期每小区调查30穴稻株,计算单位面积穗数,取接近平均值的5穴植株,用于考察穗数、每穗粒数、结实率和千粒重。除去各处理小区边行,按实际收获面积计算产量,测定稻谷水分含量,折合计算为145 g·kg⁻¹含水量的稻谷产量;

16S rRNA 基因测序:参考 Dong 等^[9]的方法收取水稻非根际土壤、根际土壤样品。于2023年8月2日水稻齐穗期从每个小区中选取健康的水稻植株,以20 cm×20 cm面积和15~20 cm深度挖掘带土水稻样本。将摇动根系掉落的未附着于根部的土壤收集为非根际土壤,将紧密附着在水稻根表面的土壤(不超过根系周围2 mm土壤)收集为根际土壤。本研究土壤样本采用多点混合采集法,将10~15株水稻在相同处理非根际土壤及根际土壤样品混合汇总为一个样品,共收集12个非根际土壤样品和12个根际土壤样品,分装至50 mL无菌离心管用液氮带回实验室。将土壤样品分为两部分,一部分通过自然风干测定土壤酶活性,另一部分储存在-80℃冰箱中以备16S rRNA基因测序。土壤总DNA的提取使用PowerSoil DNA Isolation kit(MO BIO Laboratories, Inc., 美国)试剂盒,按操作步骤说明提取土壤DNA。用341F和785R为引物,扩增细菌16S rRNA基因V3~V4区域。

土壤酶活性测定：非根际土及根际土壤酶包括脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶、蔗糖酶。其中，脲酶活性测定采用次氯酸钠-苯酚钠比色法。蛋白酶活性测定采用茚三酮比色法。硝酸还原酶活性采用酚二磺酸比色法测定。蔗糖酶的测定采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法^[9]。

土壤理化性质测定：在 2023 年成熟期收割后，每个处理采用 5 点取样法使用土钻进行土壤取样，并将取样的土壤分为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层，将 5 点土样混合均匀，带回实验室风干，风干后过 2 mm 筛，去除根系及石子等，进行理化指标测定。有机质含量测定采用重铬酸钾容量法，碱解氮含量测定采用碱解扩散法，有效磷含量测定采用碳酸氢钠法，速效钾含量测定采用氯化钙法，全氮含量测定采用凯氏定氮法。

1.3 数据分析

采用 SPSS 29.0 软件进行方差分析 (ANOVA)，差异显著性水平设定为 $P < 0.05$ ，并采用邓肯 (Duncan) 多重比较方法检验不同处理组间差异显著性。采用 Mothur 软件计算多样性指数，使用 R 软件中“vegan”包基于 Bray-Curit 距离算法进行聚类分析。通过非多度量多维尺度 (NMDS) 检验分析样品间微生物群落结构差异。运用 Canoco5.0 软件做冗余分析 (RDA)。使用 STAMP 软件通过 Welch's t-test 方法进行功能基因差异比较。采用 Origin 2025 和 Excel 2022 绘制图表。

2 结果

2.1 有机肥等氮配施下水稻产量及土壤化学性质

如表 1 所示，有机肥配施提高水稻产量，但其增产效果受品种及配施比例共同调控。随着有机肥配施比例的提高，2 个品种水稻产量均呈现出先增加后减少的趋势，产量均在 OR20 处理最高，显著高于 CF 处理。与 CF 处理相比，SD47 在 OR20 处理下产量增加 15.66%，SD505 增加 6.54%，表明 SD47 对有机肥的响应更为敏感。在产量构成因素方面，有机肥配施主要通过显著增加单位面积有效穗数，并同步提高结实率与千粒重，从而在每穗粒数有所下降的情况下，最终实现了产量的提升。

表 1 有机肥等氮替代下水稻产量及产量构成因素

Table 1 Rice yield and yield components under equal organic fertilizer substitution treatments

品种	施肥处理	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	产量
Cultivar	Fertilization	Effective panicle / hm ²	Spikelets panicle	Grain filling/%	1000-grain weight/g	Grian yield/(t·hm ²)
SD47	CF	240.1±0d	174.5±8.44a	80.79±1.06b	24.46±0.48bc	9.13±0.34d
	OR10	273.5±18.87c	166.4±2.21ab	82.07±1.32ab	25.14±0.40abc	9.31±0.36cd
	OR20	266.8±18.87cd	161.5±0.84b	84.07±0.81a	25.60±0.79ab	10.56±0.49a
	OR30	273.5±9.43c	157.3±6.64bc	82.77±1.37ab	25.86±0.16a	9.42±0.13cd
SD505	CF	326.8±9.43b	149.0±1.12c	76.60±0.64d	24.04±0.01c	9.63±0.13cd
	OR10	353.5±18.87ab	139.3±3.67c	78.82±0.65c	24.63±0.24abc	9.90±0.06bc
	OR20	366.9±9.43a	136.2±2.75d	81.78±0.26c	25.04±0.85abc	10.26±0.18ab
	OR30	353.5±9.43ab	132.6±2.93d	81.00±0.76b	25.31±0.79abc	9.72±0.06bcd

注：SD47：沈稻 47；SD505：沈稻 505；CF，全化肥处理；OR10，90%化肥+10%有机肥；OR20，80%化肥+20%有机肥；OR30，70%化肥+30%有机肥。表中数据为均值±标准差，在同一列中，不同字母表示处理间差异显著 $P < 0.05$ 。下同。Note: SD47: Shendao 47; SD505: Shendao 505. CF, all chemical fertilizer; OR10, 90% chemical fertilizer plus 10% organic fertilizer; OR20, 80% chemical fertilizer plus 20% organic fertilizer; OR30, 70% chemical fertilizer plus 30% organic fertilizer. The data in the table are average ± standard error; different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

经过 5 年有机肥配施定位试验, 各层级土壤化学性质差异显著 (表 2)。土壤化学性质的基本规律总结如下: (1) 土壤肥力指标 (AN、AP、AK、OM、TN) 含量随土壤深度增加而递减 (0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm > 30~40 cm)。(2) 施肥处理, 特别是有机肥替代处理显著提升土壤各层级养分含量, 且提升效应随着施用年限延长而增加。(3) 施肥处理对于表层土壤 (0~20 cm) 培肥效果高于底层土壤 (20~40 cm)。(4) 0~20 cm, OR 处理的 AN、AP、AK、OM、TN 含量明显高于 CF, 且表现为: OR30 > OR20 > OR10 > CF。(5) 20~40 cm, 各处理的养分含量无显著差异。

表 2 2020 年及 2023 年有机肥等氮替代处理下水稻土壤化学性质

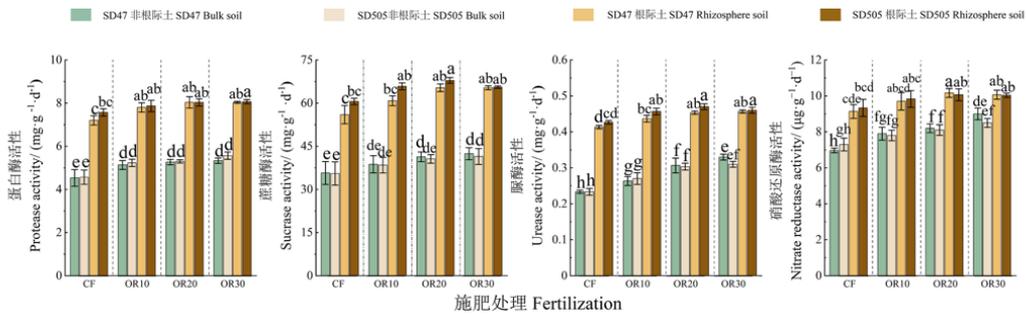
Table 2 Chemical properties of rice soil under equal organic fertilizer substitution treatments

年份	施肥处理	土壤深度	OM	TN	AN	AK	AP
Year	Fertilization	Soil depth	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)
2020	CF	0~10 cm	29.26±0.10fg	1.46±0.02fgh	139.7±2.02ef	191.1±5.31e	24.73±0.82cde
	CF	10~20 cm	27.66±0.26i	1.31±0.06i	114.7±2.29gh	186.4±3.72e	23.01±0.06e
	CF	20~30 cm	19.23±0.37l	0.67±0.03k	47.04±1.60k	158.9±2.74h	15.63±1.10f
	CF	30~40 cm	13.77±0.22m	0.49±0.01l	25.29±2.20l	141.0±3.57i	4.71±0.24g
	OR10	0~10 cm	29.56±0.24f	1.53±0.05ef	146.0±2.16de	194.0±3.74e	25.48±1.29c
	OR10	10~20 cm	28.23±0.28hi	1.39±0.08hi	118.5±4.97g	190.8±2.91e	23.2±0.54de
	OR10	20~30 cm	19.39±0.31kl	0.72±0.02jk	48.15±0.99jk	160.3±3.71gh	15.87±0.30f
	OR10	30~40 cm	13.80±0.32m	0.5±0.02l	25.53±0.85l	143.7±1.13i	4.93±0.33g
	OR20	0~10 cm	29.92±0.48def	1.62±0.05de	152.0±7.90cd	192.1±1.76e	25.83±0.68bc
	OR20	10~20 cm	28.49±0.17ghi	1.42±0.06gh	121.2±2.06g	188.3±2.99e	23.33±0.33de
	OR20	20~30 cm	19.51±0.67jkl	0.77±0.05jk	49.42±1.47ijk	161.0±12.35gh	15.78±0.14f
	OR20	30~40 cm	13.83±0.21m	0.51±0.01l	25.94±0.67l	141.6±3.23i	5.06±0.11g
	OR30	0~10 cm	30.03±0.55def	1.71±0.11cd	155.5±4.14c	191.0±2.91e	25.92±0.63bc
	OR30	10~20 cm	28.60±0.51gh	1.46±0.05fgh	109.9±1.78h	186.3±3.14e	23.4±0.30de
	OR30	20~30 cm	19.59±0.21jkl	0.80±0.02j	51.10±2.47ijk	158.7±9.09h	15.81±0.75f
OR30	30~40 cm	13.95±0.11m	0.52±0.02l	26.05±0.73l	142.3±0.59i	5.13±0.18g	
2023	CF	0~10 cm	30.72±0.62cde	1.76±0.09c	167.1±3.24b	232.5±4.84cd	26.27±0.50bc
	CF	10~20 cm	29.85±0.65ef	1.46±0.05fgh	135.2±2.74f	225.2±0.87d	24.41±0.55cde
	CF	20~30 cm	19.74±0.57jkl	0.74±0.03jk	53.20±2.15l	183.9±2.57e	15.99±0.21f
	CF	30~40 cm	13.80±0.41m	0.51l	27.75±2.15ijk	161.0±7.44gh	5.10±0.57g
	OR10	0~10 cm	31.13±0.09bc	1.79±0.07bc	171.2±7.11ab	239.5±3.45bc	27.35±0.58ab
	OR10	10~20 cm	30.69±0.16cde	1.52±0.03efg	138.3±1.14f	231.5±4.33cd	24.61±0.4cde
	OR10	20~30 cm	20.21±0.67jk	0.75±0.02jk	54.28±0.06ij	185.6±2.20e	16.23±0.13f
	OR10	30~40 cm	14.30±0.59m	0.51l	28.17±1.00l	166.6±6.47fgh	5.15±0.18g
	OR20	0~10 cm	31.75±0.75ab	1.86±0.06ab	174.5±5.21a	246.3±1.22ab	28.09±1.15a
	OR20	10~20 cm	30.80±0.24cd	1.54±0.06ef	139.6±3.04ef	236.5±6.20bc	25.03±1.81cd
	OR20	20~30 cm	20.44±0.34j	0.76±0.02jk	55.01±1.06ij	188.3±2.96e	16.37±0.28f
	OR20	30~40 cm	13.83±0.29m	0.52l	28.42±0.42l	170.3±3.65fg	5.22±0.12g
	OR30	0~10 cm	32.11±0.30a	1.90±0.07a	176.0±6.87a	252.8±3.39a	28.71±0.81a
	OR30	10~20 cm	31.09±0.42bc	1.56±0.02ef	141.3±2.34ef	240.6±5.65bc	25.46±2.97c
	OR30	20~30 cm	20.44±0.69j	0.76±0.01jk	55.74±1.39i	191.0±0.98e	16.63±0.30f
OR30	30~40 cm	13.90±0.08m	0.52l	28.67±0.78l	172.8±4.38f	5.30±0.21g	

注: OM: 有机质; TN: 全氮; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾。Note: OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; AN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium.

2.2 水稻根际与非根际土壤酶活性

如图 1 所示, 不同施肥处理下, 2 个品种的非根际土壤蛋白酶活性均显著高于非根际土壤, 增幅达 44.91%~65.69%。随着有机肥配施比例增加, SD47 与 SD505 的非根际与根际土壤蛋白酶活性均呈上升趋势。这表明有机肥配施可有效提升土壤蛋白酶活性, 且根际效应显著。蔗糖酶同样表现为根际高于非根际, 但在品种间及施肥响应上存在差异。在非根际土壤中, SD47 的活性高于 SD505, 而在根际土壤中则相反。施肥处理间, CF 与 OR10 处理的差异不显著, 各有机肥配施处理间也无显著差异。脲酶活性也表现出显著的根际优势。在非根际土中, 两品种间差异不显著, 在施肥处理间, 在 0~20% 替代比例中, 表现出随有机肥比例增加, 各土壤部位 (非根际和根际土壤, 下同) 脲酶活性显著增强的趋势, 其中, OR20 处理与 OR30 处理无显著差异, OR30 处理脲酶活性最高。硝酸还原酶活性同样具有明显的根际优势, 随着有机肥配施比例的增加, SD47 与 SD505 非根际土壤酶活性持续上升; SD505 根际土壤酶活性随着有机肥配施比例增加而上升, SD47 根际土壤酶活性随着有机肥配施比例增加, 呈先增加后降低的趋势, 在 OR20 处理活性最高。综上所述, 有机肥配施能显著提高土壤蛋白酶、脲酶及硝酸还原酶活性, 且这些酶活性普遍具有显著的根际效应。蔗糖酶活性对施肥的响应存在品种与部位特异性。



注: 数据为均值±标准差, 不同字母表示处理间差异显著 $P < 0.05$ 。下同。Note: The data are average ± standard error, different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

图 1 有机肥等氮替代下根际土壤、非根际土壤蛋白酶、蔗糖酶、脲酶、硝酸还原酶活性

Fig. 1 Protease activity, sucrase activity, urease activity, and nitrate reductase activity for rhizosphere soil and bulk soil under equal organic fertilizer substitution treatments

2.3 有机肥等氮替代化肥对土壤细菌群落的影响

Chao1 指数、香农 (Shannon) 指数是衡量土壤微生物 α 多样性的指标。图 2 表明, 品种和土壤部位对 Chao1 指数有显著影响。整体而言, 根际土壤的 Chao1 指数显著高于非根际土壤。施肥处理显著影响物种丰富度。在 SD505 的非根际土壤中, Chao1 指数随有机肥比例增加而上升, OR30 显著最高。而在 SD47 非根际土壤中, OR10 处理的 Chao1 指数最高, 但所有施肥处理间差异不显著。对根际土壤而言, SD47 中, OR20、OR30 的 Chao1 指数高于 CF、OR10 的 Chao1 指数, SD505 表现出相同趋势。2 个品种的 Shannon 指数未出现较大差异, 但存在有机肥配施处理高于全化肥处理的趋势。由此可见, 20%~30% 的有机肥替代比例可有效提高水稻根际与非根际土壤的微生物多样性。

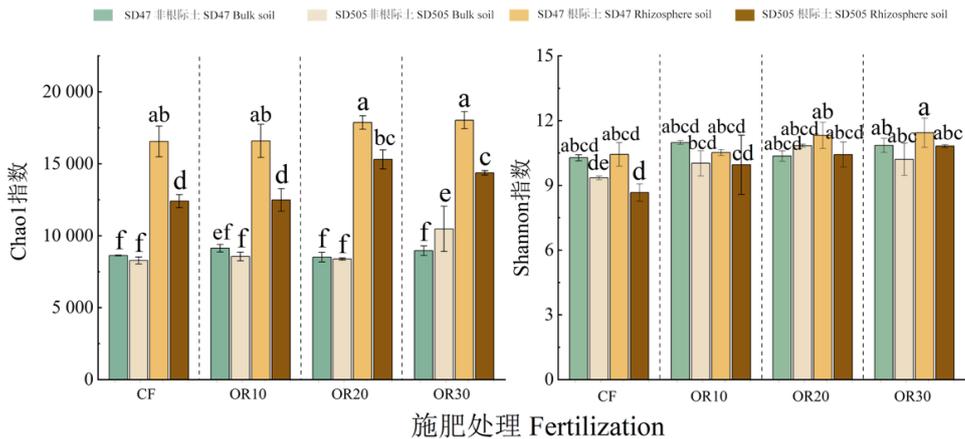


图2 有机肥等氮替代下根际土壤、非根际土壤细菌群落 Chao1 指数与香农 (Shannon) 指数

Fig. 2 Chao1 index and Shannon index for rhizosphere soil and bulk soil under equal organic fertilizer substitution treatments

2.4 有机肥等氮替代化肥对水稻土壤细菌群落结构的影响

基于操作分类单元 (OTU) 水平的主坐标分析 (PCoA) 表明 (图 3), 品种、土壤部位 (根际与非根际土壤) 及施肥处理均对土壤细菌群落结构产生显著影响。根际土壤中 PCoA 前两主轴的累计解释率 (SD47: 43.93%; SD505: 49.70%) 普遍高于非根际土壤 (SD47: 33.30%; SD505: 48.53%), 说明施肥措施对根际微生物群落结构的塑造作用较非根际土壤更为明显。同时, 在相同土壤部位下, SD505 品种的细菌群落结构对施肥处理的响应较 SD47 更为敏感。综上表明, 土壤细菌群落结构受品种、根际效应与施肥管理的共同调控, 且根际区域及特定基因型对施肥措施具有更强的响应性。

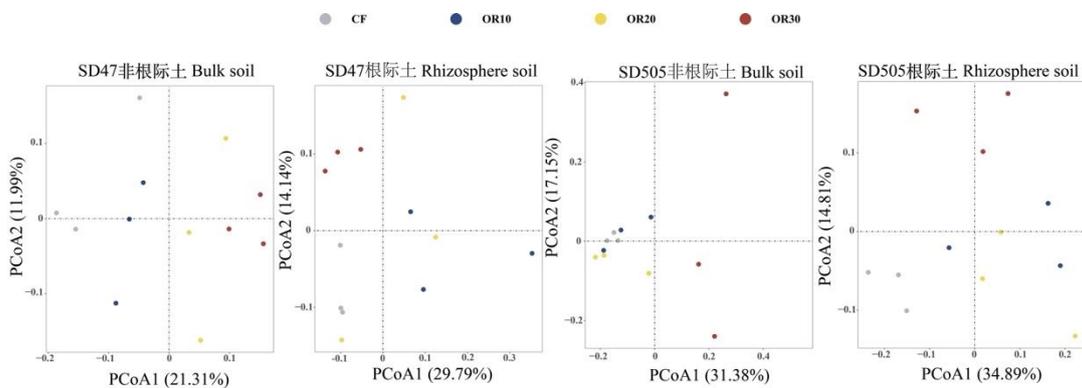


图3 有机肥等氮替代下非根际土壤、根际土壤不同处理基于操作分类单元 (OTU) 下的主坐标分析 (PCoA)

Fig. 3 Principal coordinates analysis (PCoA) analysis at operational taxonomic unit (OTU) for bulk soil and rhizosphere soil under equal organic fertilizer substitution treatments

2.5 有机肥等氮替代化肥对水稻土壤微生物群落组成的影响

土壤细菌群落在门水平上的组成情况如图 4 所示。2 个品种 4 个处理非根际土壤与根际土壤相对丰度占比前 10 的菌门分别是变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、拟杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门、骺骨细菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门、疣微菌门。不同有机肥替代比例对两个品种非根际土壤群落组成影响趋势相似, 有机肥替代处理与全化肥处理相比, 提高变形菌门、拟杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门的丰度, 降低酸杆菌门、硝化螺旋菌门、疣微菌门的丰度。

根际土壤的细菌群落结构则表现出显著的品种与施肥交互效应。关键氮循环菌门——变形菌门与绿弯菌门对有机肥的响应具有品种特异性。在 SD47 根际中, 变形菌门丰度随有机

肥比例增加呈先升后降趋势 (OR20 最高), 绿弯菌门则持续增加 (OR30 最高); 而在 SD505 根际中, 变形菌门丰度持续上升 (OR30 最高), 绿弯菌门则先增后减 (OR20 最高)。此外, 与碳代谢相关的酸杆菌门和拟杆菌门响应较为一致: 有机肥替代降低了酸杆菌门丰度, 提高了拟杆菌门丰度, 该趋势与非根际土壤相同, 证实了有机肥对土壤微生物群落的调控作用。

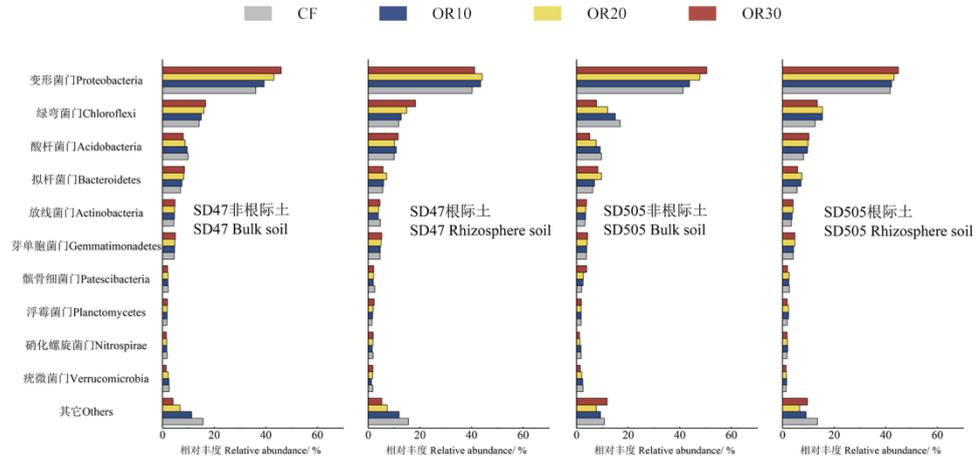


图 4 有机肥等氮替代下根际土壤、非根际土壤细菌群落基于门水平组成

Fig.4 Relative abundance of bacterial communities at the phylum level for rhizosphere soil and bulk soil under equal organic fertilizer substitution treatments

选取丰度排名靠前的 10 个属, 于图 5 以门水平分类显示。非根际土壤与根际土壤优势菌属类似, 主要包括厌氧黏细菌、硫杆菌属、*Haliangium*、盐单胞菌属 (*Halomonas*)、芽单胞菌属等, 分属于酸杆菌门、芽单胞菌门、变形菌门和绿弯菌门。其中, 盐单胞菌属 (*Halomonas*) 为最优势菌属, 且其相对丰度在有机肥配施处理中提升最为显著。进一步分析发现, 与土壤氮循环相关的菌属 (如厌氧黏细菌、*Haliangium* 和芽单胞菌属) 在有机肥配施下相对丰度增加, 而硫杆菌属的丰度则有所降低, 表明有机肥输入可能通过调控特定功能菌属的丰度来影响土壤氮素转化过程。

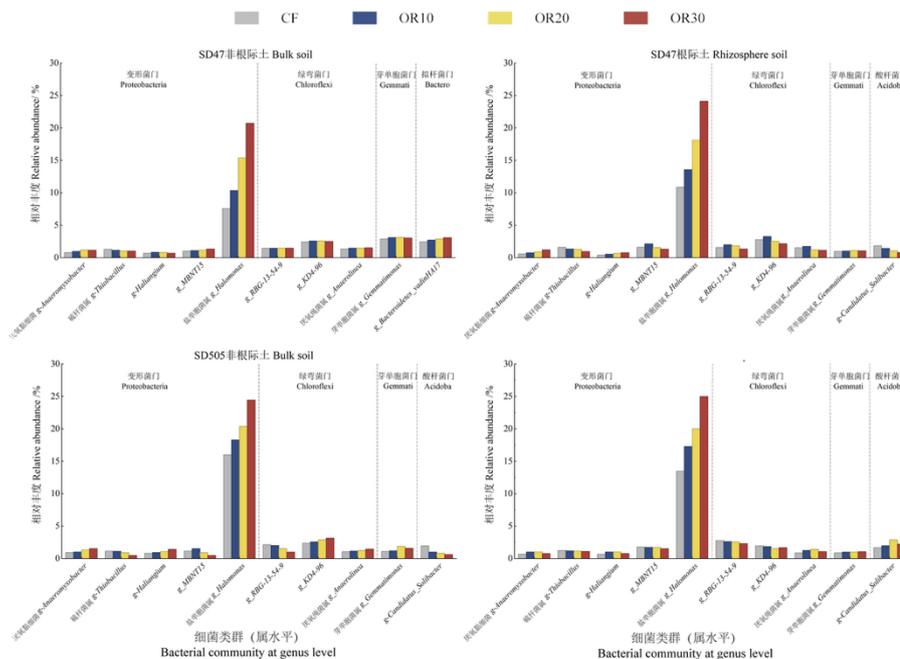
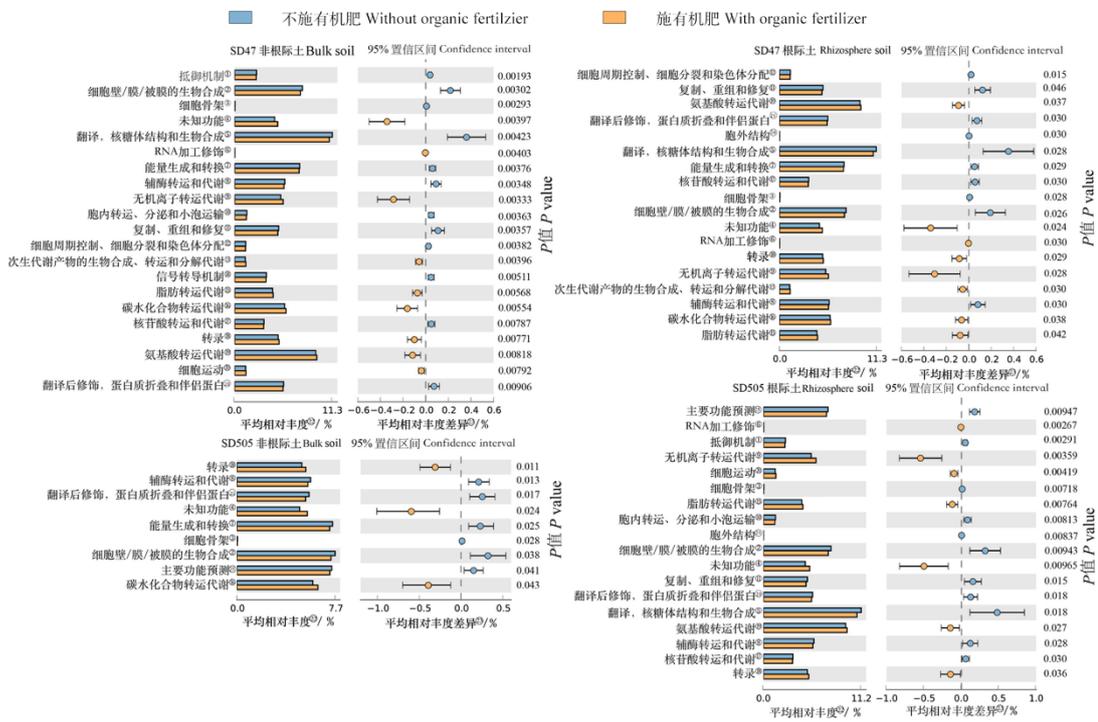


图 5 有机肥等氮替代下根际土壤、非根际土壤细菌群落基于属水平的组成

Fig.5 Relative abundance of bacterial communities at the genus level for rhizosphere soil and bulk soil under equal organic fertilizer substitution treatments

2.6 有机肥等氮替代化肥对水稻土壤细菌功能潜力的影响

通过对 22 个功能子类进行比较分析 (图 6), 发现不同水稻品种和土壤部位的细菌功能存在显著差异。根际土壤的差异功能类群多于非根际土壤。具体而言, 在 SD47 的根际与非根际土壤中, 有机肥处理显著提升了细菌在 RNA 加工修饰、转录和次级代谢产物相关功能上的丰度; 而全化肥处理则在蛋白质合成与修饰、遗传信息传递、能量代谢等基础功能方面更具优势。对于 SD505, 其非根际土壤中仅转录和碳水化合物转运代谢功能在有机肥处理下显著增强; 但在根际土壤中有有机肥处理广泛提高了包括 RNA 加工、离子转运、细胞运动以及氨基酸和脂质代谢在内的多种功能途径的丰度。上述结果表明, 有机肥对土壤细菌功能的影响具有品种和根际特异性, 尤其在根际区域能够更全面地激活与物质代谢和转运相关的功能。



注 Note: ① Defense mechanisms; ② Cell wall/membrane/envelope biogenesis; ③ Cytoskeleton; ④ Function unknown; ⑤ Translation, ribosomal structure and biogenesis; ⑥ RNA processing and modification; ⑦ Energy production and conversion; ⑧ Coenzyme transport and metabolism; ⑨ Inorganic ion transport and metabolism; ⑩ Intracellular trafficking, secretion, and vesicular transport; ⑪ Replication, recombination and repair; ⑫ Cell cycle control, cell division, chromosome partitioning; ⑬ Secondary metabolites biosynthesis, transport and catabolism; ⑭ Signal transduction mechanisms; ⑮ Lipid transport and metabolism; ⑯ Carbohydrate transport and metabolism; ⑰ Nucleotide transport and metabolism; ⑱ Transcription; ⑲ Amino acid transport and metabolism; ⑳ Cell motility; ㉑ Posttranslational modification, protein turnover, chaperones; ㉒ Mean proportion; ㉓ Difference in mean proportion; ㉔ Extracellular structures; ㉕ General function prediction only.

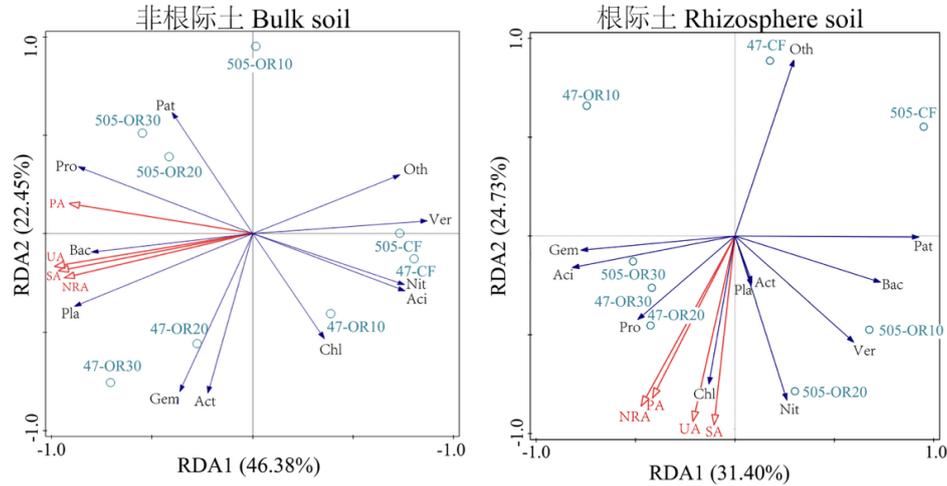
图 6 有机肥处理与全化肥处理对根际土壤、非根际土壤细菌功能潜力的影响

Fig. 6 Effect of organic fertilizer and chemical fertilizer on bacterial functional potential in rhizosphere soil and bulk soil

2.7 土壤酶活性与土壤微生物群落的关系

冗余分析表明, 水稻品种和施肥处理共同驱动了根际与非根际土壤细菌群落结构的差异 (图 7)。在非根际土壤中, RDA 前两轴累计贡献率达 68.83%。单施化肥与低比例有机肥替

代 (OR10) 的群落结构相似, 而高比例替代处理明显聚集成另一类群, 说明高比例有机肥替代显著改变了群落结构。相关分析显示, 脲酶、硝酸还原酶、蔗糖酶与拟杆菌门、浮霉菌门呈较强正相关; 蛋白酶与拟杆菌门、变形菌门相关性较高, 其中, 与变形菌门相关性最为显著。在根际土壤中, RDA 前两轴累计贡献率为 56.13%, 低于非根际土壤, 表明根际微生物群落对酶活性变化的响应相对较弱。此外, 根际土壤中菌群与酶的关联模式与非根际不同: 绿弯菌门主要受脲酶和蔗糖酶影响, 而变形菌门则与硝酸还原酶和蛋白酶含量的相关性更强。



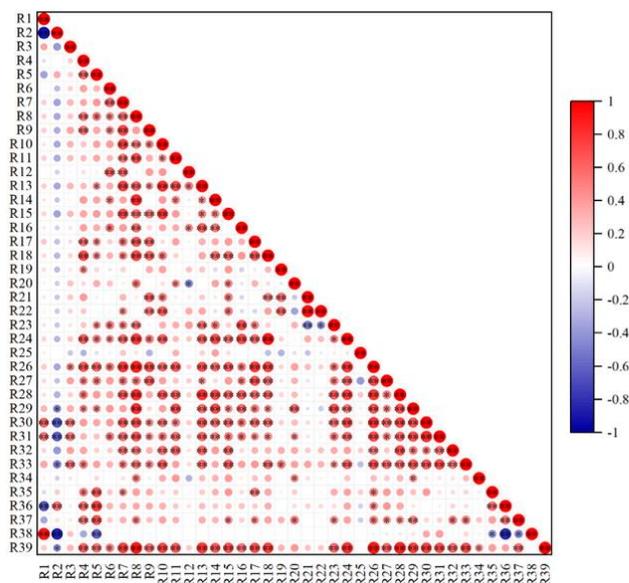
注: 47: 沈稻 47; 505: 沈稻 505; PA: 蛋白酶活性; SA: 蔗糖酶活性; UA: 脲酶活性; NRA: 硝酸还原酶活性; Pro: 变形菌门; Chl: 绿弯菌门; Aci: 酸杆菌门; Bac: 拟杆菌门; Act: 放线菌门; Gem: 芽单胞菌门; Pat: 骸骨细菌门; Pla: 浮霉菌门; Nit: 硝化螺旋菌门; Ver: 疣微菌门; Oth: 其余菌门。Note: 47: Shendao 47; 505: Shendao 505; PA: Protease activity; SA: Sucrase activity; UA: Urease activity; NRA: Nitrate reductase activity; Pro: Proteobacteria; Chl: Chloroflexi; Aci: Acidobacteria; Bac: Bacteroidetes; Act: Actinobacteria; Gem: Gemmatimonadetes; Pat: Patensibacteria; Pla: Planctomycetes; Nit: Nitrospirae; Ver: Verrucomicrobia; Oth: others.

图 7 有机肥等氮替代处理基于土壤酶活性和细菌群落门水平的冗余分析 (RDA)

Fig.7 Redundancy analysis (RDA) based on soil enzyme activity and dominant bacterial phyla under equal organic fertilizer substitution treatments

2.8 有机肥等氮替代下土壤化学性质、酶活性、微生物群落多样性与水稻产量的相关关系

Pearson 相关性分析表明 (图 8), 有机肥配施比例与每穗粒数呈显著负相关, 与千粒重、结实率呈极显著正相关, 这是有机肥等氮替代提升产量的原因。同时有机肥替代比例与表层土壤 (0~20 cm) 养分 (AN、AP、AK、TN、OM) 呈显著正相关 (除 10~20 cm 有效磷含量), 且有机肥配施比例对齐穗期根际、非根际土壤酶 (脲酶、蛋白酶、蔗糖酶、硝酸还原酶) 活性呈极显著正相关。有机肥替代比例与微生物群落多样性也呈正相关, 与非根际土壤微生物 Chao 指数及根际土壤 Shannon 指数呈显著正相关。



注：红色表示正相关，蓝色表示负相关，*表示在 0.05 水平上显著相关，**表示在 0.01 水平上极显著相关。R1：有效穗数； R2：每穗粒数； R3：产量； R4：千粒重； R5：结实率； R6~R10 分别为 2023 年 0~10 cm 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质； R11~R15 分别为 2023 年 10~20 cm 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、有机质； R16~R20 分别为 2023 年 20~30 cm 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质； R21~R25 分别为 2023 年 30~40 cm 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质； R26：非根际土脲酶； R27：非根际土蔗糖酶； R28：非根际土硝酸还原酶； R29：非根际土蛋白酶； R30：根际土脲酶； R31：根际土蔗糖酶； R32：根际土硝酸还原酶； R33：根际土蛋白酶； R34：非根际土 Chao 指数； R35：非根际土 Shannon 指数； R36：根际土 Chao 指数； R37：根际土 Shannon 指数； R38：品种； R39：有机肥替代比例。Note: Red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation, * indicates a significant correlation at the 0.05 level, and ** indicates a highly significant correlation at the 0.01 level. R1: Effective panicle; R2: Spikelets; R3: Yield; R4: 1000-grain weight; R5: Seed setting rate; R6-R10: AN, AP, AK, TN, OM at 0-10 cm for 2023; R11-R15: AN, AP, AK, TN, OM at 10-20 cm for 2023; R16-R20: AN, AP, AK, TN, OM at 20-30 cm for 2023; R21-R25: AN, AP, AK, TN, OM at 30-40 cm for 2023; R26: UA-Bulk soil; R27: SA-Bulk soil; R28: NA-Bulk soil; R29: PA-Bulk soil; R30: UA-Rhizosphere soil; R31: SA-Rhizosphere soil; R32: NA-Rhizosphere soil; R33: PA-Rhizosphere soil; R34: Chao-Bulk soil; R35: Shannon-Bulk soil; R36: Chao-Rhizosphere soil; R37: Shannon-Rhizosphere soil; R38: Cultivar; R39: Organic fertilizer substitution ratio.

图 8 有机肥等氮替代下土壤化学性质、酶活性、微生物群落多样性与水稻产量的相关关系

Fig.8 Pearson correlations between soil chemical properties, enzyme activities, microbial community diversity, and rice yield under equal organic fertilizer substitution treatments

3 讨论

3.1 有机肥等氮替代化肥对水稻产量的影响

目前,在保证水稻高产的前提下,减少化肥施用是农业工作的重点。为提升氮素利用率,有机肥配施化肥已广泛应用于各种作物^[10-11]。然而,现有研究多集中于在足量化肥的基础上增施有机肥,可能会加重环境负担。相比而言,有机肥等氮替代化肥被证明是更具环境友好性的施肥策略。尽管多项研究表明有机肥等氮配施能够提高水稻产量^[12-13],但因试验条件及品种差异,其对产量构成因素的结果尚不一致。本研究结果表明,有机肥等氮替代主要通过显著提高有效穗数、结实率与千粒重实现增产(表 1),这可能是由于有机肥在穗萌发与籽粒灌浆阶段提供更为稳定的养分供应,促进有效分蘖形成与籽粒充实^[14]。前期研究进一步证

实, 配施处理在齐穗期前积累更多干物质, 并于齐穗期后维持更高的光合效率及叶面积指数, 为高产奠定生物量基础^[8]。尽管有机肥替代使每穗粒数降低, 但其对于有效穗数、结实率和千粒重的提升抵消了由每穗粒数降低带来的负面影响, 最终实现水稻增产 (表 1)。

3.2 有机肥等氮替代化肥对土壤化学性质的影响

土壤肥力主要取决于土壤有机质与大量养分元素含量。长期定位试验表明, 有机肥与化肥配施能显著改善土壤养分情况^[15-16], 增强土壤的养分供应能力。本研究发现, 相较于全化肥处理, 有机肥替代显著提高土壤有机质和全氮含量, 且提升效果随有机肥替代比例增加而增强 (表 2)。该现象一方面源于有机肥富含碳、氮等有机组分, 其直接输入能为土壤补充有机质, 曾骏等^[17]的长期定位试验同样证实, 化肥与有机肥配施可显著提高 0~7.5 cm、7.5~15 cm、15~30 cm 各土壤层级的有机质含量。另一方面, 与化肥养分易损失的特性相比, 有机肥中的氮素释放缓慢, 有利于氮素在土壤中的累积, 提高土壤全氮含量。李文军等^[18]发现, 化肥均衡施用配施有机肥显著促进 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤全氮含量增加, 同时该效应随土层加深而明显减弱, 与本研究结果类似。综上所述, 单施化肥的培肥效果远不如有机肥配施, 其原因可能在于长期单施化肥加速土壤原有有机质的分解消耗, 而配施则通过外源有机质的输入协调土壤碳、氮平衡, 促进有机质积累, 从而持续提升土壤肥力。

土壤有效态养分是土壤-植物-微生物系统物质循环的核心, 直接影响植物的可利用性、微生物活性及养分循环效率^[19]。Liu 等^[20]研究提出, 适宜施用有机肥能促进微生物的生长繁殖, 从而活化土壤中难溶性养分, 提高其有效态养分含量。碱解氮、有效磷和速效钾是评估土壤氮、磷、钾供应强度的关键指标, 直接影响水稻营养状态。本研究发现, 有机肥等氮替代化肥可显著提高 0~20 cm 土壤碱解氮、有效磷、速效钾养分含量, 且三种养分均随有机肥配施比例的增加而呈上升趋势 (表 2)。这与已有研究结论^[21]一致。然而, 配施处理对 20~40 cm 土壤养分含量提升不显著 (表 2), 这可能与有机肥养分释放较缓慢且主要积累于耕作层有关。

3.3 有机肥等氮替代化肥对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤新陈代谢与物质转化的重要介质, 其活性高低直接反映土壤生物化学过程的强度, 是评价土壤质量的重要指标。本研究发现, 非根际土壤酶活性受施肥处理影响, 与水稻品种无关; 而根际土壤酶活性同时受施肥处理和品种影响, 且活性水平显著高于非根际土壤 (图 1)。氮肥是影响土壤酶活性的主要因素, 不同氮源对其影响显著。与化肥相比, 有机肥富含有机质, 能为土壤微生物提供更丰富的营养, 促进微生物生长, 从而使土壤酶活性增强。关键酶活性分析显示, 有机肥等氮替代显著提高根际与非根际土壤中脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶和蔗糖酶的活性, 且 4 种酶活性均随着有机肥替代比例的增加而上升 (图 1), 与前人研究结果^[22]相似。这可能是由于有机肥的施入通过提升土壤有机质含量, 增强了微生物代谢活性, 从而促进了相关酶的产生, 加速了碳、氮养分的转化与释放, 尤其在微生物活跃的根际区域更为明显^[23]。

3.4 有机肥等氮替代化肥对土壤微生物群落的影响

施肥通过改变根际与非根际微域环境, 影响微生物群落结构, 调控植物生长^[9]。根际微生物因受根系活动强烈影响而更为活跃, 在养分循环中起关键作用。本研究证实, 根际土壤 Chao1 指数显著高于非根际土壤 (图 2), 这与根系沉积物及分泌物为微生物提供丰富的碳源有关, 且水稻品种间存在差异, 反映了水稻基因型对根际微生物的调控作用。此外, 根际与非根际土壤细菌群落 Shannon 指数无显著差异 (图 2), 表明二者的细菌群落组成存在一定相似性。关于有机肥配施化肥对细菌 α 多样性的影响, 现有结论并不统一, 这种差异可能与土壤类型、取样方法及作物品种等因素有关。本研究结果表明, 与单施化肥相比, 有机肥等氮替代对非根际土壤细菌多样性无显著影响, 但能显著提高根际土壤细菌多样性 (图 2)。

这说明有机肥对微生物群落的调节作用主要发生在根际区域,可能通过优化根际微环境促进土壤生态功能。

有机肥施用能够显著改变细菌群落结构^[24]。本研究中,各处理下优势菌门(相对丰度大于10%)均为变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门(图4),这与王娟娟等^[25]研究得到的水稻土壤细菌优势菌群类似,但配施有机肥显著调控了其相对丰度(图4):提高变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门的相对丰度,同时降低酸杆菌门与硝化螺旋菌门的相对丰度。这些变化反映了土壤碳、氮循环功能的增强和养分条件的改善。此外,非根际土壤对有机肥配施的响应在水稻品种间较为一致,而根际土壤群落结构则表现出明显的品种差异(图4),体现了根际微环境的特殊性。

土壤微生物多样性是维持土壤多功能性的关键^[26]。研究表明,施用有机肥能通过提升土壤养分及引入外源微生物,增强生态系统功能。本研究中,功能预测分析显示,非根际土壤在转录、碳水化合物转运等功能上较强,而根际土壤则在氨基酸代谢、离子转运、脂质代谢等关键代谢途径上功能更为富集(图6)。这说明有机肥配施通过重塑细菌群落结构,尤其增强了根际区域的代谢功能潜力,从而提升土壤生态系统的整体功能。

3.5 土壤酶活性与细菌群落的相关关系

土壤酶主要来源于土壤微生物、植物根系及残体分解,其中,土壤细菌是土壤酶的重要来源之一。前人研究指出,土壤酶活性与细菌存在直接关联^[27],这与本研究结果(图7)相似。对于非根际与根际土壤10个优势菌群与4种土壤酶活性进行冗余分析(图7)发现:在非根际土壤中,脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶和蔗糖酶活性与变形菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门、浮霉菌门相对丰度呈正相关,而与酸杆菌门、硝化螺旋菌门和疣微菌门的相对丰度呈负相关;在根际土壤中,蛋白酶和硝酸还原酶与变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门和疣微菌门均呈正相关;而脲酶和蔗糖酶除与上述菌门呈正相关外,还与拟杆菌门呈正相关。这些差异可能与不同门类细菌在土壤生态功能中的作用机制不同有关。冯慧琳等^[28]认为土壤酶活性与细菌的关系是多变的,特定菌门与特定土壤酶的关系并不相同,与本研究结果(图7)相印证。

3.6 有机肥等氮替代下土壤化学性质、酶活性、群落特性对水稻产量的影响

有机肥等氮替代化肥作为一种可持续的农田管理措施,通过改善土壤理化性质和微生物群落结构,提升作物产量。本研究发现,配施处理下根际与非根际土壤脲酶(UA)、根际土壤蔗糖酶(SA)、蛋白酶(PA)是影响水稻产量的关键酶活性因子(图8)。脲酶活性增强有助于提高铵态氮含量,促进作物对氮素的吸收;蔗糖酶能催化蔗糖分解,为植物和微生物提供速效碳源;蛋白酶可加速含氮有机物降解,释放可利用的小分子氮。三者协同为水稻产量形成提供碳、氮保障。同时,配施处理显著提高土壤表层(0~20 cm)碱解氮、有效磷、速效钾、全氮与有机质含量^[29]。此外,有机肥替代化肥能够增加细菌的多样性,改善土壤稳定性^[30],本研究中也观察到有机肥替代比例与土壤微生物多样性呈正相关(图8)。综上所述,有机肥等氮替代化肥通过改善土壤化学性质,调节土壤细菌群落结构,增强关键酶活性,优化了土壤-植物系统中的养分循环与供应,促进作物对养分的吸收,从而提升产量。

4 结论

有机肥等氮替代化肥既能实现水稻增产,又能培肥土壤。研究表明,有机肥等氮替代优化了产量构成因素,通过显著增加有效穗数、千粒重与结实率,在每穗粒数减少的情况下实现水稻增产。同时,有机肥配施显著提升耕层土壤有机质、全氮及速效养分含量,增强了脲

酶、蛋白酶、蔗糖酶、硝酸还原酶等关键土壤酶活性,通过促进变形菌门、拟杆菌门等有益菌门富集,优化细菌群落结构,提高根际、非根际土壤微生物多样性。因此,在辽宁地区,有机肥等氮替代化肥,既能培肥土壤,调控土壤微生物多样性,又能增加水稻产量,是一种值得推荐的施肥模式。

参考文献(References)

- [1] Chen H L, Luo J X, He Y, et al. Effects of nitrogen reduction combined with rice straw biochar on rice yield traits and soil bacterial community structure and function[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(9): 1983-1994. [陈海浪, 罗家欣, 何洋, 等. 减氮配施生物炭对水稻生产力及土壤细菌群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1983-1994.]
- [2] Liu L Z, Guo B Q, Wang F, et al. Effects of long-term nitrogen application on the soil ammonifier and nitrogen mineralization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 543-554. [刘灵芝, 郭冰清, 王丰, 等. 长期施氮对土壤氨化细菌和氮矿化作用的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 543-554.]
- [3] Yang Y H, Huang X C, Zhu H Q, et al. Bacterial community structure and composition under long-term combined application of organic and inorganic fertilizers in a yellow paddy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(6): 984-992. [杨叶华, 黄兴成, 朱华清, 等. 长期有机与无机肥配施的黄壤稻田土壤细菌群落结构特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 984-992.]
- [4] Bian Q, Sun B, Li D M, et al. Impact of organic amendment on the bacterial community and rice yield in paddy soil[J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 543-550. [卞清, 孙波, 李大明, 等. 有机物料还田对稻田土壤细菌群落和水稻产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 543-550.]
- [5] Qiao C C. Study on microecological mechanism of *Trichoderma* bio-organic fertilizer for improved crop yield[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. [乔策策. 木霉生物有机肥提升作物产量的微生物生态学机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.]
- [6] Gao P, Lei X Y, Lu Y X, et al. Effects of partial substitution of organic nitrogen fertilizer for chemical nitrogen fertilizer on rice yield and quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(13): 1-6. [高鹏, 雷星宇, 鲁耀雄, 等. 有机氮肥替代部分化学氮肥对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(13): 1-6.]
- [7] Chen Y J. Effect of organic fertilizer continuously replacing part of chemical fertilizer on rice yield[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2024, 36(5): 78-82. [陈远景. 有机肥连续替代部分化肥对水稻产量的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2024, 36(5): 78-82.]
- [8] Guo S M, Li Y M, Wu Z Z, et al. Effects of partial organic fertilizer substitution on grain yield, nitrogen use efficiency, and physiological traits of rice in northeastern China[J]. Agronomy, 2025, 15(7): 1576.
- [9] Dong H Y, Sun H Y, Jiang L L, et al. Characteristics of root-associated bacterial community and nitrogen biochemical properties of two Japonica rice cultivars with different yields[J]. Food and Energy Security, 2022, 11(1): e357.
- [10] Fei C, Zhang K X, Ma H X, et al. Effects of organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer on root growth, nitrogen use, yield and quality of maize[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025, 53(5): 26-34. [费聪, 张开祥, 马宏秀, 等. 有机肥配施氮肥对玉米根系生长、氮素利用及产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 26-34.]
- [11] Liu H S, Cui J H, Liu M, et al. Effects of replacing part of chemical fertilizer with organic fertilizer on Foxtail Millet yield, soil nutrients and enzyme activities[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022(7): 71-81. [刘寒双, 崔纪菡, 刘猛, 等. 有机肥替代部分化肥对谷子产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 71-81.]
- [12] Zeng P, Hu D S, Luo X Z, et al. Replacing chemical N fertilizer by manure improves the yield and quality of rice and soil fertility[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(7): 39-42. [曾鹏, 胡东升, 罗熙哲, 等. 有机肥氮替代化肥氮对水稻产质量及土壤养分的影响[J]. 湖南农业科学, 2024(7): 39-42.]
- [13] Shi X R, Ren B B, Jiang L L, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on the photosynthetic

- rate, nitrogen use efficiency and yield of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 154-162. [石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 154-162.]
- [14] Moe K, Moh S M, Htwe A Z, et al. Effects of integrated organic and inorganic fertilizers on yield and growth parameters of rice varieties[J]. Rice Science, 2019, 26(5): 309-318.
- [15] Xu Y X, Zhu Z L, Wang Y F, et al. Effect of organic fertilizer instead of partial chemical fertilizer on rice yield and soil physicochemical properties[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(4): 817-822. [徐有祥, 朱真令, 王昱妃, 等. 有机肥部分替代化肥对水稻产量和土壤理化性质的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(4): 817-822.]
- [16] Wu X Y, Xu Y B, Lei B K, et al. Effects of manure substitution for chemical fertilizers on soil nitrogen, organic matter content and rice yield in paddy field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(10): 2217-2223. [吴茜虞, 续勇波, 雷宝坤, 等. 粪肥替代对稻田土壤氮素、有机质含量及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2217-2223.]
- [17] Zeng J, Guo T W, Bao X G, et al. Effects of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization[J]. Soils and Fertilizer Sciences in China, 2008(2): 11-14. [曾骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2): 11-14.]
- [18] Li W J, Peng B F, Yang Q Y. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 488-500. [李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 488-500.]
- [19] Hua M X, Hu C, Chen H, et al. Effect of organic substitution on crop-soil-microbial stoichiometric characteristics and soil phosphorus fractions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, DOI:10.11766/trxb202412120486. [华明秀, 胡灿, 陈浩, 等. 有机肥替代对作物-土壤-微生物化学计量特征及土壤磷形态的影响[J/OL]. 土壤学报, 2026, DOI:10.11766/trxb202412120486.]
- [20] Liu X L, Yang W P, Li W G, et al. Moderate organic fertilizer substitution for partial chemical fertilizer improved soil microbial carbon source utilization and bacterial community composition in rain-fed wheat fields: Current year[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1190052.
- [21] Hou H Q, Liu X M, Liu G R, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 516-523. [侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523.]
- [22] Guo Y, Wen L, Shi L H, et al. Effects of long-term application of fertilizers on rhizosphere soil nitrogen cycling enzyme activity and yield in double cropping rice field[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2025, 40(1): 113-121. [郭勇, 文丽, 石丽红, 等. 长期施肥对双季稻田根际土壤氮循环酶活性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2025, 40(1): 113-121.]
- [23] Zhu H H, Zhu Q H, Liu S L, et al. Effects of straw incorporation on the accumulation and availability of N and P in red soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 919-924. [朱捍华, 朱奇宏, 刘守龙, 等. 稻草还土对红壤氮磷积累及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 919-924.]
- [24] Zhang J S, Liu C Z, Zheng C F, et al. Effects of Chinese milk vetch returning incorporated with chemical fertilizer reduction on the composition and function of soil bacterial communities in paddy fields[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2936-2944. [张济世, 刘春增, 郑春风, 等. 紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2936-2944.]
- [25] Wang J J, Zhu Z J, Qian X Q, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with application of different organic fertilizers on soil bacterial community structure during rice season[J]. Soils, 2021, 53(5): 983-990. [王娟娟, 朱紫娟, 钱晓晴, 等. 减施化肥与不同有机肥配施对稻季土壤细菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 983-990.]
- [26] Wang B, Zhang Y C, Wang X Y, et al. Effects of sustained low level organic fertiliser and chemical fertiliser blending on soil fertility and multifunctionality in oasis farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 1059-1071. [王冰, 张宇辰, 王昕悦, 等. 持续低量有机肥与化肥配施对绿洲农田土壤肥力和多功能性的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(4): 1059-1071.]
- [27] Diamantidis G, Effosse A, Potier P, et al. Purification and characterization of the first bacterial laccase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(7): 919-927.

- [28] Feng H L, Xu C S, He H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 422-432. [冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422-432.]
- [29] Li Y, Pu M Y, Li J S, et al. Effects of long-term organic fertilization on physicochemical properties, enzyme activity and crop yield of alkaline soils in soda meadows[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2025, 56(4): 26-35. [李妍, 蒲名扬, 李佳时, 等. 长期有机培肥对苏打草甸碱土理化性质、酶活性及作物产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2025, 56(4): 26-35.]
- [30] Jia X C, Yang Q L, Dong S T, et al. Using manure for improving nitrogen fertilization and maize yield[J]. *Experimental Agriculture*, 2020, 56(6): 901-914.

(责任编辑: 陈荣府)