

减氮配施腐植酸基复合调理剂改良酸化水稻土的微生物-养分协同效应^①

吕勇杰^{1,3}, 侯盼^{1,2}, 马军伟^{1,2}, 俞巧钢^{1,2}, 孙万春^{1,2}, 王强^{1,2}, 林辉^{1,2}, 叶静^{1,2}, 朱晓芳⁴, 沈仁芳⁴, 杨艳⁵, 王峰^{1,2*}

(1 浙江省农业科学院农产品质量安全全国重点实验室, 杭州 310021; 2 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 3 缙云县土肥能源和农田建设中心, 浙江缙云 321400; 4 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 5 浙江丰瑜生态科技股份有限公司, 浙江浦江 322200)

摘要: 针对南方水稻土因化学氮肥过量施用导致的酸化加剧与减肥增效难度大的问题, 本研究于 2023—2024 年连续两个水稻季在浙江省丽水市缙云县开展田间小区试验, 设置常规施肥(CK)、减氮 15%(85%N)和减氮 15% 配施腐植酸基复合调理剂(85%N+HA)3 个处理, 系统分析了不同处理对土壤理化性质、生物学特性及水稻产量构成的影响, 探究了减氮配施腐植酸基复合调理剂对酸化水稻土的协同改良效应。结果表明: 与 CK 处理相比, 85%N 处理对土壤酸度无显著改善, 而 85%N+HA 处理显著提高土壤 pH 0.17 个单位, 且降低了土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 含量。在减氮条件下, 85%N+HA 处理有效维持了土壤碱解氮含量, 并显著提高了有效磷和速效钾含量; 同时, 该处理显著提升了土壤有机质含量, 促进了大团聚体形成, 增强了蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性, 提高了土壤细菌 Shannon 指数和 ACE 指数, 并显著增加了假单胞菌门的相对丰度。最终, 85%N+HA 处理通过增加穗数和穗粒数, 提高了水稻产量, 较 CK 处理显著提升 18.5%。综上, 减氮配施腐植酸基复合调理剂处理通过化学与生物学过程的协同作用, 在降低氮肥用量的同时实现了酸化土壤改良、地力提升与水稻增产, 为南方酸化稻田治理提供了有效的技术途径。

关键词: 减氮; 腐植酸基复合调理剂; 酸化土壤改良; 土壤肥力; 微生物群落

中图分类号: S-3 文献标志码: A

Synergistic Effects of Microbial-Nutrient Interactions Under Combined Application of Nitrogen Reduction and Humic Acid in Acidic Paddy Soil

LÜ Yongjie^{1,3}, HOU Pan^{1,2}, MA Junwei^{1,2}, YU Qiaogang^{1,2}, SUN Wanchun^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, LIN Hui^{1,2}, YE Jing^{1,2}, ZHU Xiaofang⁴, SHEN Renfang⁴, YANG Yan⁵, WANG Feng^{1,2*}

(1 State Key Laboratory for Quality and Safety of Agricultural Products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2 Institute of Environment, Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3 Jinyun County Soil, Fertilizer, Energy and Farmland Construction Center, Jinyun, Zhejiang 321400, China; 4 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 5 Zhejiang Fengyu Technology Co., Ltd., Pujiang, Zhejiang 322200, China)

Abstract: To address the challenges of exacerbated soil acidification and difficulty in achieving both fertilizer reduction and efficiency enhancement in southern China's paddy soils, primarily caused by excessive chemical nitrogen fertilizer application, this study investigated the synergistic improvement effects of combining nitrogen reduction with a humic acid soil conditioner. A two-year field experiment (2023—2024) was conducted using plot trials in Jinyun County, Lishui City, Zhejiang Province. Three treatments were established: conventional fertilization (CK), 15% nitrogen reduction (85%N), and 15% nitrogen reduction combined with humic acid amendment (85%N+HA). Soil physicochemical properties, biological characteristics, and rice yield

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1902904)、国家自然科学基金项目(32302678)和国家玉米产业技术体系-土壤污染修复与地力提升项目(CARS-02-25)资助。

* 通信作者(wangfeng@zaas.ac.cn)

作者简介: 吕勇杰(1970—), 男, 浙江缙云人, 学士, 农艺师, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: 591679023@qq.com

components were systematically analyzed. The results showed that compared with CK, 85%N did not significantly ameliorate soil acidity, whereas 85%N+HA significantly increased soil pH by 0.17 units and reduced the contents of exchangeable H^+ and Al^{3+} . Under nitrogen reduction, 85%N+HA effectively maintained the level of alkaline-hydrolyzable nitrogen and significantly enhanced the contents of available phosphorus and available potassium. Furthermore, this treatment significantly increased soil organic matter, promoted the formation of macro-aggregates, enhanced the activities of sucrase, urease, and acid phosphatase, improved soil bacterial diversity (Shannon and ACE indices), and significantly increased the relative abundance of Pseudomonadota. Ultimately, 85%N+HA significantly increased rice yield by 18.5% compared to CK, achieved through higher panicle number and more grains per panicle. In conclusion, the combined application of reduced nitrogen and humic acid amendment, through the synergy of chemical and biological processes, successfully mitigates soil acidification, enhances soil fertility, and increases rice yield while reducing nitrogen input, providing an effective technical pathway for the remediation of acidified paddy fields in southern China.

Key words: Nitrogen reduction; Humic acid-based composite conditioner; Acidified soil amelioration; Soil fertility; Microbial community

水稻作为我国最重要的粮食作物,其稳定生产对国家粮食安全具有重要的战略意义。我国南方地区不仅是我国水稻的主产区,更是保障粮食供给的关键区域。然而,受成土母质、强降雨淋溶以及长期高强度农业利用的影响,该区域土壤普遍呈现酸化加剧的趋势^[1-2]。近年来,化学肥料尤其是氮肥的过量施用,进一步加速了土壤酸化进程。土壤酸化会引发铝、锰等有毒金属离子活化,抑制作物根系发育^[3];导致钾、钙、镁等盐基离子淋失,造成土壤养分失衡^[4];破坏土壤团粒结构,降低微生物活性,最终导致土壤肥力衰退与水稻产质量下降^[4-5]。面对这一严峻挑战,研发能够在缓解土壤酸化的同时提高水稻产量的绿色高效技术模式,已成为当前南方水稻产区亟待解决的重要科学问题与实践需求。

缓解土壤酸化,国内外研究者提出了两条主要的技术路径:一是源头“阻酸”,即减少化肥尤其是氮肥的投入^[6-7];二是过程“控酸”,即通过施用改良剂来阻控酸化并提升肥效^[8]。在氮肥减量方面,研究证实,合理降低氮肥施用量是控制农田土壤酸化最直接、最根本的措施之一^[9-10]。佟德利和徐仁扣^[7]通过室内培养试验发现,减少氮肥用量可以降低土壤净硝化速率,从而从源头上减少 H^+ 的产生。然而,单一的氮肥减施在实践中常面临作物减产的风险,其技术推广在很大程度上依赖于与能保障养分供应的其他措施相结合。在土壤改良剂应用方面,腐植酸作为一种天然有机高分子聚合物,因其在改良酸化土壤方面的巨大潜力而备受关注。其作用机制主要体现在以下几个方面:首先,腐植酸分子结构中含有丰富的羧基($-COOH$)、酚羟基($-OH$)等官能团,可通过络合作用固定土壤中的活性 H^+ 和 Al^{3+} ,并释放 OH^- ,从而直

接提升土壤 pH,缓解铝毒害^[11];其次,腐植酸作为外源有机质,能显著提升土壤有机碳库,其多孔结构和巨大的比表面积有助于形成稳定的有机-无机复合体,改善土壤团粒结构,增强土壤酸缓冲性能,提高土壤保水保肥能力^[12-13];再者,腐植酸能为土壤微生物提供优质的碳源,显著提高微生物生物量碳、氮含量,并促进细菌群落多样性与有益菌门增殖^[14]。此外,腐植酸还能通过与养分元素的络合、吸附作用,减少铵态氮的挥发与硝化,抑制土壤对磷、钾的固定,从而提高肥料利用率^[15]。

当前,尽管氮肥减量与腐植酸改良作为独立措施已被广泛研究,但二者在酸化水稻土中的协同机制尚不明确。因此,本研究在全国酸化治理重点县——浙江省缙云县开展田间试验,系统探究“减氮配施腐植酸”模式的综合改良效应。本研究的重点在于:①阐明该模式对土壤活性酸度与长期缓冲能力的协同提升效果;②揭示该模式通过调控微生物群落结构与酶活性,驱动有机质积累与养分转化的生物学过程;③明确上述土壤理化与生物学性质的改善对水稻产量形成的影响,最终为协同实现土壤酸化改良与粮食增产提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在浙江省丽水市缙云县东方镇(28°74'19"N, 120°16'98"E)进行。试验区属于典型的亚热带季风气候,年平均气温 18.8 °C,年均降水量 1 739 mm。试验前耕作层(0~20 cm)土壤养分状况为: pH 5.12,全氮 1.18 g/kg,速效钾 120.3 mg/kg,有效磷 19.52 mg/kg,有机质 15.36 g/kg。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计, 共设置 3 个处理: ①CK, 农户常规施氮量 $N\ 220\ \text{kg}/\text{hm}^2$; ②85%N, 常规施氮量下减氮 15%, 即施氮量 $N\ 187\ \text{kg}/\text{hm}^2$; ③85%N+HA, 常规施氮量下减氮 15%+3 000 kg/hm^2 腐植酸基复合调理剂。其中, 农户施用肥料为“浙农”复合肥料(浙江惠多利肥料科技有限公司生产), $N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$ 为 15-15-15。调理剂为“土沃宝”(浙江丰瑜科技股份有限公司生产), pH 10.5, 有机质 $\geq 20.0\%$, 腐植酸 $\geq 8.0\%$, $CaO \geq 15.0\%$, $MgO \geq 10.0\%$ 。土壤调理剂于 2023 年水稻移栽前(6月中旬)作为基肥一次性施入。各处理磷、钾养分统一由三元复合肥作基肥一次性供给, 全生育期不再额外追施。氮肥分基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施用, 其中基肥占总氮 60%, 以复合肥带入; 分蘖肥占总氮 30%, 穗肥占总氮 10%, 均以尿素为氮肥分次追肥。每个处理设 3 次重复, 共计 9 个小区。各小区之间以 30 cm 宽田埂隔离, 防止水肥串扰, 四周设置 1 m 宽保护行, 各小区具备独立灌排设施。试验过程中, 病虫害防治及水分管理严格按照当地农技人员推荐的方法实施, 田间其他管理措施与当地生产保持一致。供试水稻品种为“甬优 1540”(感温型籼型三系杂交稻, 由浙江省宁波市农业科学研究院选育), 已在南方红黄壤地区广泛种植。试验期间, 水稻分别于 2023 年 6 月 21 日与 2024 年 6 月 21 日进行育苗移栽, 栽植密度为 15×10^4 蔸/ hm^2 (行株距 26 cm $\times$ 25 cm), 并分别于 2023 年 11 月 1 日与 2024 年 11 月 8 日收获。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 水稻产量及产量构成测定 于 2023—2024 年两个水稻生长季的成熟期, 分别从每个小区收取 $1\ \text{m}^2$ 的代表性样本进行实收测产(3 次重复), 并同步连续采集 10 株水稻的穗部样品。所有样品经 $105\ ^\circ\text{C}$ 杀青 30 min、 $75\ ^\circ\text{C}$ 烘干至恒重后, 进行人工脱粒; 随后统计单位面积穗数、每穗粒数及千粒重等农艺性状, 最终折算得出理论产量。

1.3.2 土壤指标测定 于 2024 年水稻成熟期, 在各小区按五点取样法采集耕作层(0~20 cm)土壤样品, 混合均匀后构成一个代表性复合样, 剔除石砾和植物残体后分为两份: 一份置于通风阴凉处自然风干(定期翻动, 确保均匀干燥), 经玛瑙研钵逐级研磨后, 过 100 目尼龙筛(孔径 0.15 mm), 装入密封袋避光保存, 用于土壤 pH、交换性氢(H^+)、交换性铝(Al^{3+})和土壤交换性酸与养分测定; 另一份置于 $-80\ ^\circ\text{C}$ 冰箱冷冻保存用于土壤微生物测定。

各项土壤指标均参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》^[16]进行测定。具体如下: pH 采用玻璃电极法(土水质量比 1 : 2.5)测定; 交换性 H^+ 与交换性 Al^{3+} 采用氯化钾交换-中和滴定法测定, 二者之和为土壤交换性酸含量; 全氮采用凯氏定氮法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定; 有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 可溶性有机碳通过去离子水浸提-TOC 仪法测定; 微生物生物量碳通过氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定; 土壤团聚体粒级采用湿筛法测定; 酸缓冲容量(β)采用酸碱滴定法测定^[17]; 土壤酶活性使用 TECAN 酶标仪配合苏州梦犀生物医药科技有限公司的专用试剂盒进行测定。土壤总 DNA 使用 Omega Bio-tek 试剂盒(安诺伦北京生物科技有限公司)提取。以提取的 DNA 为模板, 使用引物 338F(ACTCCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R(GGACTACHVGGGTWTCTAAT) 对细菌 16S rRNA 基因的 V3~V4 区进行 PCR 扩增^[18]。反应程序为: $95\ ^\circ\text{C}$ 预变性 3 min; 随后进行 30 个循环的变性($95\ ^\circ\text{C}$, 30 s)、退火($55\ ^\circ\text{C}$, 30 s)和延伸($72\ ^\circ\text{C}$, 45 s); 最后 $72\ ^\circ\text{C}$ 终延伸 10 min。扩增产物经 FASTP (v0.20.0) 进行质控、FLASH (v1.2.7) 进行序列拼接后, 使用 UPARSE (v7.1) 在 97% 相似度水平下进行 OTU 聚类。物种注释则通过 RDP classifier (v2.11) 基于 Silva (v138) 数据库完成, 置信度阈值设为 70%。本部分测序与生物信息学分析工作均由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

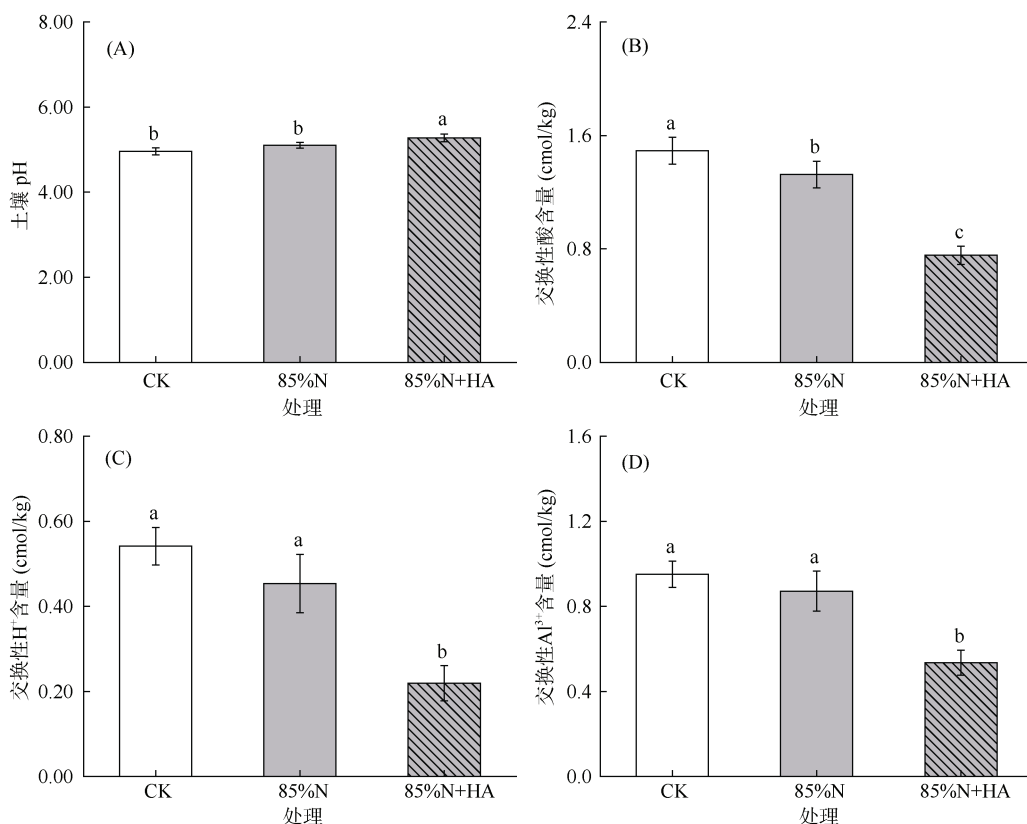
1.4 数据处理与分析

本文图表中所有数据均以“平均值 $\pm$ 标准差”的形式表示。采用 SPSS 27.0 软件进行统计分析, 首先通过 Quantile-Quantile Plot(Q-Q 图)与 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验。对符合正态分布的数据, 使用单因素方差分析(One-way ANOVA)结合 Duncan 多重比较法, 检验各处理间差异的显著性 ($P < 0.05$)。数据整理与图表绘制分别使用 Excel 2021 和 Origin 2022 完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤酸度和缓冲性能的影响

由图 1 可知, 与 CK 处理相比, 85%N+HA 处理显著提高了土壤 pH 0.17 个单位, 而 85%N 处理对 pH 无显著改善。在交换性酸组分方面, 85%N+HA 处理显著降低了土壤交换性酸、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 含量, 降幅分别为 43.0%、51.6% 和 38.5%; 而 85%N



(CK: 农户常规施氮量; 85%N: 常规施氮量下减氮 15%; 85%N+HA: 常规施氮量下减氮 15% 配施腐植酸基复合调理剂。图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 1 不同施肥处理对土壤酸度的影响

Fig. 1 Soil acidity under different fertilization treatments

处理仅使交换性酸含量显著降低 11.2%, 对 H^+ 和 Al^{3+} 含量影响不显著。

由图 2 可知, 在不同的酸添加量下, 85%N+HA 处理的土壤酸缓冲容量(β 值)均表现出最优的持续稳定性。在 0~5 mmol/kg 酸添加范围内, 85%N+HA 处理的 β 值显著高于 CK 处理, 而 85%N 处理略低于 CK 处理。随着酸添加量增加, 85%N+HA 处理的 β 值始终维持最高水平, 85%N 处理则持续最低。该结果表明, 配施腐植酸可显著增强减氮条件下土壤的酸缓冲能力。

2.2 不同处理对土壤养分状况的影响

由图 3 可知, 各处理间土壤全氮含量无显著差异。在碱解氮方面, 85%N+HA 处理较 CK 处理提升 8.1%, 且显著高于 85%N 处理 11.9%; 而 85%N 处理碱解氮含量较 CK 处理略有下降。85%N+HA 处理显著提高了土壤有效磷和速效钾含量, 增幅分别为 28.9% 和 19.8%, 而 85%N 处理对二者均无显著影响。可见, 配施腐植酸能有效维持减氮条件下的土壤氮素供应, 并显著提升磷钾养分有效性。

由表 1 可知, 85%N+HA 处理显著提升了土壤有机质、微生物生物量碳和可溶性有机碳含量, 较 CK

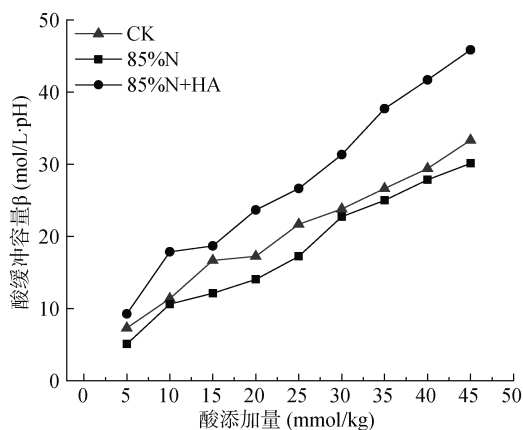


图 2 不同施肥处理对土壤酸缓冲容量的影响

Fig. 2 Soil acid buffering capacities under different fertilization treatments

处理分别增加 15.2%、30.0% 和 21.3%, 较 85%N 处理分别提升 12.7%、23.0% 和 16.2%; 而 85%N 处理对各有机碳组分均无显著影响。

2.3 不同处理对土壤团聚体粒级的影响

如图 4 所示, 与 CK 处理相比, 85%N 处理使 2~0.05 mm 和 0.05~0.002 mm 粒级团聚体比例分别显著增加 27.1% 和 39.4%, 使 ≤ 0.002 mm 粒级团聚体

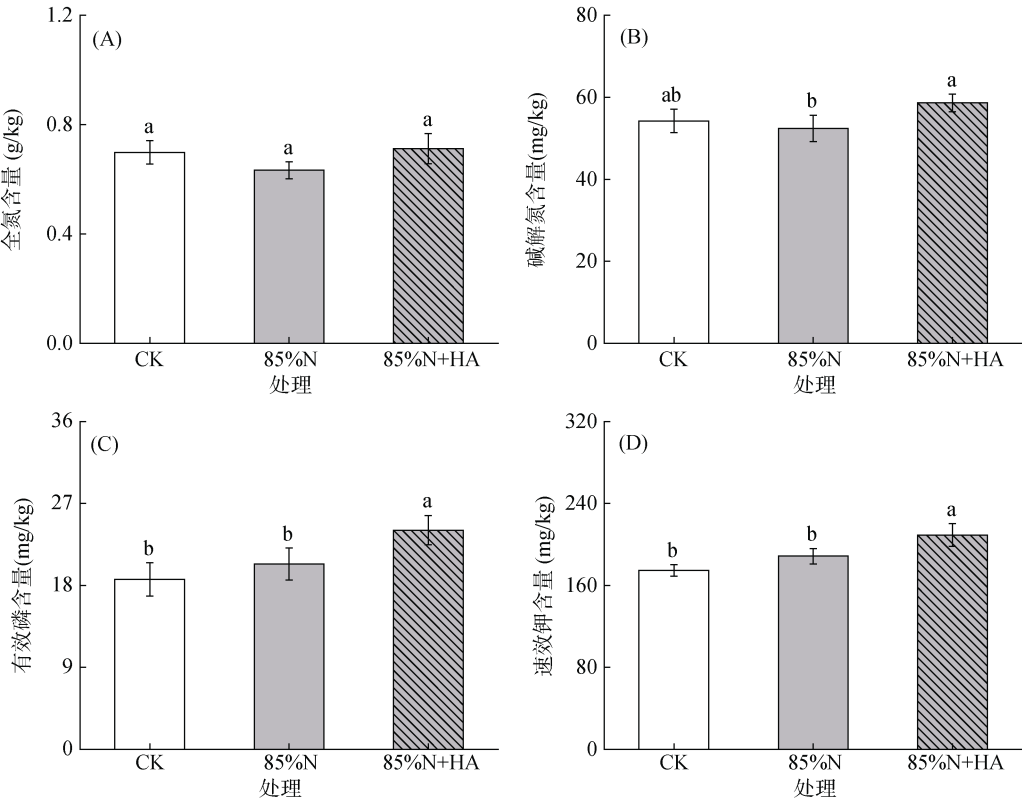


图 3 不同施肥处理对土壤养分含量的影响
Fig. 3 Soil nutrient contents under different fertilization treatments

表 1 不同施肥处理下土壤有机碳组分
Table 1 Soil organic carbon fractions under different fertilization treatments

处理	有机质 (g/kg)	微生物生物量 碳 (mg/kg)	可溶性有机碳 (mg/kg)
CK	15.06±0.39b	202.68±8.67b	47.96±1.92b
85%N	15.39±0.57b	214.22±8.25b	50.06±2.12b
85%N+HA	17.35±0.51a	263.49±11.12a	58.17±1.53a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)，下同。

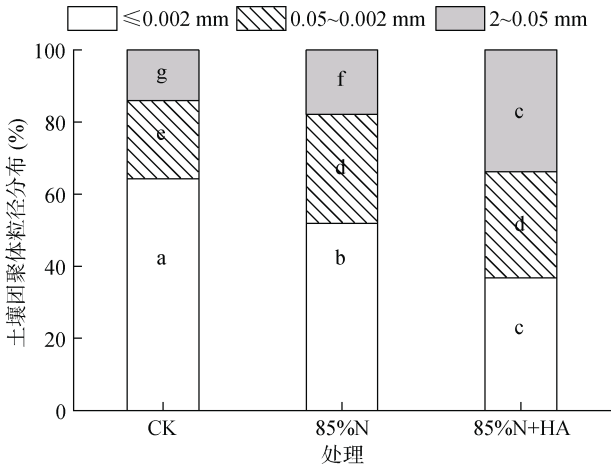


图 4 不同施肥处理对土壤团聚体粒径分布的影响
Fig. 4 Soil aggregate size distributions under different fertilization treatments

比例显著降低 19.2%；85%N+HA 处理效果更为显著，2~0.05 mm 粒级团聚体比例大幅增加 140.2%，0.05~ 0.002 mm 粒级团聚体比例增加 35.5%，≤ 0.002 mm 粒级团聚体比例降低 42.7%。该结果表明，配施腐植酸能更有效地促进大粒径团聚体形成，优化土壤结构。

2.4 不同处理对土壤生物学性质的影响

2.4.1 酶活性 由表 2 可知，与 CK 处理相比，85%N+HA 处理显著提升了土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性，提升幅度分别为 47.7%、28.2%、2.0% 和 39.6%；85%N 处理仅显著提高酸性磷酸酶活性(17.7%)，对其他酶活性无显著影响。该结果表明，配施腐植酸能更全面地激活土壤酶系统，增强养分转化能力。

2.4.2 微生物多样性 如表 3 所示，所测序样本覆盖度(Coverage)均大于 0.99，表明数据可靠性高。与 CK 处理相比，85%N+HA 处理显著提高了土壤细菌的 Shannon 指数(4.9%)、ACE 指数(31.6%)和 Chao 指数(31.7%)，且其 Shannon 指数值显著高于 85%N 处理。可见，减氮配施腐植酸能有效提升土壤细菌群落的多样性和丰富度。

2.4.3 微生物群落结构 由图 5 可知，不同施肥处

表 2 不同施肥处理下土壤酶活性
Table 2 Soil enzyme activities under different fertilization treatments

处理	蔗糖酶 (mg/(g·d))	脲酶 (mg/(g·d))	过氧化氢酶 (mmol/(g·d))	酸性磷酸酶 (mmol/(g·d))
CK	7.51±1.18b	274.22±25.23b	58.48±0.48b	7.69±0.05c
85%N	8.13±0.82b	302.94±31.17ab	58.79±0.48b	9.05±0.49b
85%N+HA	11.09±1.23a	351.61±39.10a	59.64±0.05a	10.73±0.75a

理显著改变了土壤微生物群落结构。在门水平上，各处理优势菌群均为绿弯菌门、假单胞菌门、酸杆菌门和拟杆菌门。与 CK 处理相比，85%N+HA 处理显著改变了菌群组成，其中假单胞菌门相对丰度提升 12.8%，绿弯菌门和酸杆菌门分别降低 21.0% 和 14.0%，而 85%N 处理对各菌门影响较小。该结果表明，配施腐植酸能特异性地促进假单胞菌门等有益菌群的增殖，优化微生物群落结构。

表 3 不同施肥处理下土壤细菌群落 α 多样性指数
Table 3 α diversity indexes of soil bacterial communities under different fertilization treatments

处理	多样性指数		丰富度指数		覆盖度
	Shannon 指数	Simpson 指数	ACE 指数	Chao 指数	
CK	7.39±0.03c	0.001 3±0.000 1a	3 301±177b	3 285±167b	0.998 9
85%N	7.55±0.03b	0.001 1±0.000 1b	3 711±318b	3 692±300b	0.998 8
85%N+HA	7.75±0.08a	0.000 8±0.000 1c	4 345±367a	4 325±345a	0.998 5

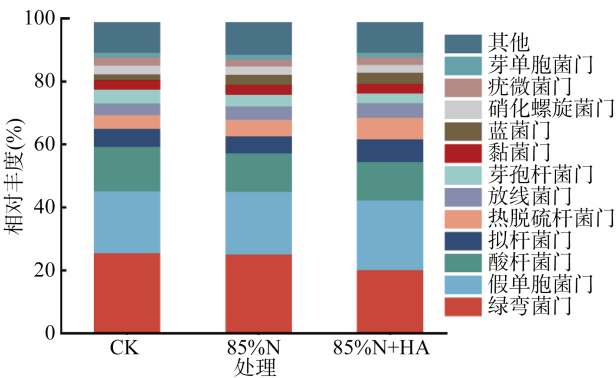


图 5 不同施肥处理对土壤细菌门水平群落结构的影响
Fig. 5 Soil microbiome community constructions at phylum level under different fertilization treatments

2.5 不同处理对水稻产量和经济效益的影响

如表 4 所示，85%N+HA 处理产量最高，较 CK 处理显著提高 18.5%(两年平均值，下同)，较 85%N

处理显著提高 12.9%；而 85%N 处理较 CK 处理增产 4.9%，差异未达显著水平。产量构成分析表明，85%N+HA 处理的增产主要源于穗数和穗粒数的提升，其中穗数和穗粒数分别较 CK 处理显著增加了 5.01% 和 11.2%，而千粒重在各处理间无显著差异。由此可知，配施腐植酸可通过增加穗数和穗粒数实现减氮条件下的水稻增产。

另外，85%N 处理较 CK 处理平均增收 882 元/hm²，扣除成本变动后平均净收益增加 1 315 元/hm²；85%N+HA 处理较 CK 处理平均增收 3 374 元/hm²，平均净收益增加 1 557 元/hm²。可见，85%N+HA 处理尽管增加了调理剂的投入成本，但由于其显著的增产效果，平均净收益较 85%N 处理高出 242 元/hm²，经济效益优势明显。

表 4 不同施肥处理下水稻产量及产量构成与经济效益
Table 4 Rice yields and its components and economic benefits under different fertilization treatments

年份	处理	穗数 (10 ⁴ 穗/hm ²)	每穗粒数	千粒重 (g)	产量 (t/hm ²)	产值 (元/hm ²)	较 CK 增加成本(元/hm ²)	较 CK 增加产值(元/hm ²)	较 CK 增加净收益(元/hm ²)
2023	CK	127±1b	233±4c	23.0±0.2a	6.78±0.18b	18 984	—	—	—
	85%N	125±3b	248±4b	22.8±0.3a	7.05±0.17b	19 740	-433	756	1 189
	85%N+HA	135±2a	257±2a	23.2±0.5a	8.03±0.05a	22 484	1 817	3 500	1 683
2024	CK	136±3ab	205±1c	22.6±0.1a	6.28±0.11b	17 584	—	—	—
	85%N	132±3b	220±2b	22.8±0.3a	6.64±0.08b	18 592	-433	1 008	1 441
	85%N+HA	141±3a	230±5a	23.0±0.4a	7.44±0.32a	20 832	1 817	3 248	1 431

注：稻谷价格为 2.8 元/kg；“浙农”复合肥料价格为 2.8 元/kg；“土沃宝”调理剂价格为 1.5 元/kg，成本按两年均摊计；尿素价格为 2.2 元/kg。

3 讨论

3.1 减氮配施腐植酸基复合调理剂可协同降酸与增强缓冲性能

本研究中,减氮 15% 配施腐植酸调理剂(85%N+HA)处理使土壤 pH 提升了 0.17 个单位,并大幅降低了交换性 H^+ (降幅 51.6%)和交换性 Al^{3+} (降幅 38.5%)的含量。这一结果与南方酸化红壤性水稻土的相关研究结论相符^[19],但本研究进一步揭示了其与传统石灰类改良剂在作用机理上的本质区别。本研究所用腐植酸基复合调理剂中 CaO+MgO 含量超过 25%,表明其中含有一定量的无机碱性物质,这些碱性组分可通过酸碱中和反应对土壤酸度改良发挥重要的直接作用。然而,与传统石灰类材料主要依赖快速酸中和不同,该复合调理剂的优势在于腐植酸组分可提供额外的长期缓冲效能。生石灰等材料虽可快速提升 pH,但效果难以持久,且存在复酸化风险^[20]。本研究观察到,85%N+HA 处理在不同酸输入梯度下均表现出最优且稳定的酸缓冲容量,这凸显了腐植酸更为核心的长期调控机制。其作用机理可归结为三方面:首先,调理剂中的碱性物质可直接中和土壤中的酸性物质,快速提升 pH 并补充盐基离子;其次,腐植酸分子中富含的羧基与酚羟基等表面官能团,可通过质子化/去质子化反应发挥酸缓冲作用,这是腐植酸增强土壤酸缓冲性能的关键机制,同时,这些官能团还能通过络合作用直接固定土壤溶液中的活性 H^+ 和毒性 Al^{3+} ,形成稳定的有机-铝络合物,从而从体系中直接去除致酸离子^[21-22];再者,腐植酸作为有机胶体,能通过络合作用固持盐基离子,减缓其在多雨条件下的淋溶损失,从而为土壤提供持续的酸中和潜力^[23-24]。因此,减氮配施腐植酸构建的是一种基于“有机络合固定”与“盐基缓释补充”的双重缓冲机制,为实现土壤酸度的长期稳定恢复提供了更为可持续的解决方案。

3.2 减氮配施腐植酸基复合调理剂可增强土壤养分供应

在氮肥减量 15% 的背景下,85%N+HA 处理不仅维持了土壤碱解氮水平,甚至较单一减氮处理显著提升了 11.9%。这一结果有力地证实了腐植酸在氮素管理中的“增效剂”角色。其机制可能包括以下方面:一方面,腐植酸基复合调理剂本身含有少量的氮、磷、钾养分,可为土壤直接提供一定的养分补充。另一方面,腐植酸可通过其巨大的比表面积和表面电荷物理吸附 NH_4^+ ,减少氨挥发^[25];同时,其生物活性可部

分抑制硝化细菌的活性,从而延缓铵态氮向硝态氮的转化,减少硝化过程中 H^+ 的释放以及 NO_3^- 的淋失^[15],这与前人关于腐植酸固持氮素的报道一致^[26]。对于磷和钾元素,85%N+HA 处理使土壤有效磷和速效钾含量分别较常规施肥处理显著增加 28.9% 和 19.8%,效果远优于单一减氮处理。这更进一步验证了腐植酸在活化与固持养分方面的双重功能:在磷活化方面,腐植酸阴离子可与土壤固磷组分(如铁、铝氧化物)竞争吸附位点,甚至通过络合反应溶解部分固定态磷,促使其向有效态转化^[27];在钾固持方面,腐植酸通过提升土壤阳离子交换量及其本身的负电性进而有效吸附 K^+ ^[28]。本研究结果为腐植酸提高养分利用效率的多路径机制提供了有力的田间实证。

3.3 减氮配施腐植酸基复合调理剂可改善土壤微生物群落结构和多样性

本研究中,85%N+HA 处理显著优化了土壤团聚体组成,使大粒径团聚体(2~0.05 mm)比例激增 140.2%,而黏粒级团聚体(≤ 0.002 mm)比例显著降低。这与有机肥投入改善团聚体结构的研究结论^[29]相吻合,并明确了腐植酸作为天然有机胶结剂的核心作用——通过氢键、阳离子桥、范德华力等多种机制与土壤矿物及微生物分泌物相互作用,驱动微团聚体向大团聚体的胶结与稳定^[13, 29-30]。改良后的团聚体结构为微生物创造了更适宜的栖息微环境,这直接体现在 85%N+HA 处理下微生物生物量碳和可溶性有机碳含量分别显著增加 30.0% 和 21.3%。这表明腐植酸作为优质外源碳源,有效激发了微生物的活性与繁殖^[31]。在土壤酶活性方面,85%N+HA 处理蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性分别提升了 47.7%、28.2% 和 39.6%,这与前人结果相互印证^[32]。本研究通过高通量测序进一步揭示,85%N+HA 处理显著提高了土壤细菌的 Shannon 指数和 ACE 指数,这与化肥减量配施腐植酸可提升微生物多样性的发现^[14]一致。更值得注意的是,85%N+HA 处理特异性地提高了假单胞菌门(相对丰度增加 12.8%)等具有碳氮循环与溶磷功能的有益菌群的丰度^[33-34]。这表明,该模式不仅普遍提升了微生物的多样性与丰度,更有针对性地塑造了服务于土壤肥力提升的功能性群落结构。

3.4 减氮配施腐植酸基复合调理剂通过优化土壤微环境实现水稻增产

本研究连续两季的产量数据表明,85%N+HA 处理使水稻产量较 CK 处理显著提高 18.5%。同时经济效益分析表明,85%N+HA 处理的两年平均净收益均高于 85%N 和 CK 处理,表明配施调理剂处理的综合

经济回报优于单一减氮处理。这一发现与其他作物体系,如北疆玉米^[35]与新疆棉花^[36]在减氮背景下配施腐植酸获得增产的结果相呼应,证实了该模式的普适潜力。其增产机制主要归因于:在减氮背景下,腐植酸的引入有效缓解了酸化土壤的铝毒胁迫,为根系生长发育创造了健康的土壤环境^[11];同时,该模式提升并稳定了土壤的营养供应能力,特别是在水稻幼穗分化与籽粒灌浆的关键时期,保障了光合产物与矿质营养向穗部的高效转运^[37]。本研究中,85%N+HA处理下穗数与穗粒数的显著增加,正是土壤障碍消减与养分供应优化最直接的生理体现。此外,该处理在第二年未追加调理剂投入的情况下仍保持了显著的增产效果和正向净收益,表明腐植酸基复合调理剂对土壤的改良效应具有一定的持续性,这将进一步提升其长期经济效益。

4 结论

减氮配施腐植酸土壤调理剂通过“化学降酸-物理培肥-生物激活”的多路径协同机制,有效破解了南方酸化水稻土治理中减肥与增产的矛盾。该技术模式不仅能中和土壤活性酸、增强土壤酸缓冲性能,还能通过优化土壤团聚体结构、激活微生物群落功能和提升酶活性,构建健康的土壤微生态系统。在减氮条件下,该模式仍能维持土壤氮素供应,显著提升磷钾有效性,并主要通过增加穗数和穗粒数实现水稻增产,可为南方酸化稻田治理提供可行技术方案。但鉴于本研究试验周期与范围的限制,建议后续重点开展长期定位观测,并在不同酸化程度及不同土壤类型区验证该技术的适用性,同时深化对水稻地上部生理机制的研究。

参考文献:

- [1] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263.
- [2] Han Y, Yi D, Ye Y C, et al. Response of spatiotemporal variability in soil pH and associated influencing factors to land use change in a red soil hilly region in Southern China[J]. Catena, 2022, 212: 106074.
- [3] 刘立娟,刘佳慧,赵泓成,等.生物质炭改良酸性土壤及缓解植物铝毒害的研究进展[J].土壤,2025,57(4):736-743.
- [4] Du L X, Zhang Z Y, Chen Y Q, et al. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2024, 319: 109643.
- [5] Xu D H, Ros G H, Zhu Q C, et al. Major drivers of soil acidification over 30 years differ in paddy and upland soils in China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 916: 170189.
- [6] Cheng J, Yang C Z, Zhang L, et al. The competitive effects of crop straw return and nitrogen fertilization on soil acidification[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 388: 109638.
- [7] 佟德利,徐仁扣.三种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):853-859.
- [8] 周腾云,胡敏骏,徐君,等.酸性土壤改良:基于靶向控铝的精准调控思考[J].土壤,2025,57(6):1242-1251.
- [9] Wang P S, Xu D H, Lakshmanan P, et al. Mitigation strategies for soil acidification based on optimal nitrogen management[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 229-242.
- [10] Liu L, Wen Z, Liu S, et al. Decline in atmospheric nitrogen deposition in China between 2010 and 2020[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(8): 733-736.
- [11] 张水勤,袁亮,林治安,等.腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1065-1076.
- [12] 王雅婷,陈子平,陈世金,等.腐植酸肥料增产作物与改良土壤研究新进展[J].腐植酸,2023(4):21-26.
- [13] 刘艳,唐亚福,杨越超,等.大颗粒活化腐植酸肥对苹果土壤团聚体和有机碳的影响[J].应用生态学报,2022,33(4):1021-1026.
- [14] 孔德庸,邢力文,韦娜,等.化肥减量配施腐植酸生物肥对黑钙土理化性质及微生物多样性的影响[J].土壤通报,2024,55(3):746-757.
- [15] Liu M, Xu M, Xu J K, et al. Humic acid urea enhanced productivity and reduced active nitrogen loss in summer maize-winter wheat cropping system: A field lysimeter experiment[J]. Field Crops Research, 2024, 319: 109656.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [17] 童文彬,李荣会,杨海峻,等.浙江省典型农田土壤酸化关键 pH 段的酸缓冲性能及影响因素研究[J].农学报,2024,14(4):37-41.
- [18] 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.
- [19] 吴多基,姚冬辉,魏宗强,等.化肥配施土壤调理剂对酸化红壤性水稻土改良效果研究[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1277-1284.
- [20] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149.
- [21] Liu C Y, Jiang M T, Yuan M M, et al. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. Nature Food, 2023, 4(10): 912-924.

- [22] 赵文瑞, 高双, 赵宽, 等. 腐殖酸钾对酸性土壤铝毒害的缓解作用与机制[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 185–191.
- [23] 杨彦明, 周祎, 张子健, 等. 腐殖酸与不同耕作措施对盐碱土碳库和微生物群落结构的影响[J]. 作物杂志, 2024(1): 157–165.
- [24] Ai S, University N A, et al. Coupling mechanism of methane production and carbon fixation regulated by artificial humic acid in paddy soils: Insights into microbial communities and metabolic pathways[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(30): 15777–15791.
- [25] 徐宇帆, 申亚珍, 张文太, 等. 腐植酸基缓释尿素对氮素淋失和氨挥发的阻控[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(4): 801–811.
- [26] 刘灿华, 袁天佑, 闫军营, 等. 减氮配施腐植酸对耕层土壤理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 77–83.
- [27] 王茜, 卢树昌. 两种调理剂配施对设施富磷土壤磷素吸收与转化的影响[J]. 北方园艺, 2020(8): 87–92.
- [28] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. 腐植酸, 2015(2): 1–8.
- [29] Zhu Y C, Zhang M, Han X Z, et al. Evaluation of the soil aggregate stability under long term manure and chemical fertilizer applications: Insights from organic carbon and humic acid structure in aggregates[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 376: 109217.
- [30] Gao Y X, Feng H J, Zhang M, et al. Straw returning combined with controlled-release nitrogen fertilizer affected organic carbon storage and crop yield by changing humic acid composition and aggregate distribution[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137783.
- [31] Li Y, Zhang M L, Wang X B, et al. Synergistic enhancement of cadmium immobilization and soil fertility through biochar and artificial humic acid-assisted microbial-induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 476: 135140.
- [32] 孙海燕, 孙义卓, 周雯, 等. 化肥减量配施腐植酸生物肥对土壤生物学性质和玉米干物质量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 677–684.
- [33] Xu M Y, Wu Y H, Bing H, et al. Microorganisms promote soil phosphorus bioavailability at the beginning of pedogenesis[J]. Global Change Biology, 2025, 31(8): e70419.
- [34] 李琳琳, 石宁, 王菲. 不同有机物料改善富磷菜田土壤微生物结构功能和蔬菜磷素吸收利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(1): 114–127.
- [35] 卢小倩, 付超, 陈金露, 等. 氮肥减量配施腐植酸对北疆灌区土壤有机碳组分、酶活性及玉米产量的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, 2025: 1–18. (2025-10-20). <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0162>.
- [36] 周杰闻, 汤秋香, 林涛, 等. 减氮配施腐植酸对海岛棉植株及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(8): 1541–1551.
- [37] Li G H, Ni C, Zhu C J, et al. Foliar application of nano carbon dots increases grain yield in rice *via* enhancing leaf photosynthesis and stem assimilates translocation under nitrogen deficiency[J]. Field Crops Research, 2025, 333: 110037.

(责任编辑：于 飞)