严玲玲,刘连华,颜妙珺,等.有机肥替代化肥对水稻产量及土壤质量的影响——基于长期等养分量替代的研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):301-308.
Yan L L, Liu L H, Yan M J, et al. Effects of organic fertilizer substitution for chemical fertilizer on rice yield and soil quality: A study based on long-term equal nutrient substitution [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):301-308.

# 有机肥替代化肥对水稻产量及土壤质量的影响
## ——基于长期等养分量替代的研究

严玲玲[1],刘连华[2*],颜妙珺[1],舒 畅[1],童立宇[1],周志智[1],李治潮[1] (1.益阳市农业科学院,湖南 益阳 413000；2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

**摘要:** 为探究长期有机肥替代等养分量化肥对水稻产量和土壤质量的影响,于 2018~2023 年开展了连续 6 年的大田定位实验,以不施肥处理为对照(CK),研究低施氮量条件下(早稻季 135kg/hm$^2$,晚稻季 150kg/hm$^2$),单施化肥(CF)、25%有机肥替代(COF25%)、50%有机肥替代(COF50%)对水稻生物量、产量和土壤理化性质的影响.结果表明,与 CK 相比,施肥显著促进水稻植株生长及其对氮素吸收,并提高了水稻产量,但 CF 处理与有机肥替代处理(COF)的水稻产量、氮素利用效率和氮偏生产力没有显著差异($P$>0.05).有机肥替代还田显著提升了土壤表层有机碳(SOC)含量,较 CK 处理增加了 8.40%~13.04%的 SOC 含量,且随着有机肥还田比例的增加 SOC 提升量越大.施肥处理均显著提高了土壤全磷(24.30%~33.33%)和速效钾(25.60%~35.20%)的含量,且 COF50%处理的总氮(TN)比 CK 处理显著增加了 18.18%.土壤质量指数面积法分析结果显示,土壤质量随有机肥替代比例的增加而增加,COF25%和 COF50%处理的土壤质量面积指数比 CF 处理分别高 88.81%和 222.40%.总体而言,25%~50%的有机肥替代既可保证水稻的正常生长和产量的稳定,又能通过提升 SOC 含量提升土壤质量.

**关键词：** 有机肥；水稻产量；土壤有机碳；土壤质量
**中图分类号：** X712 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-6923(2026)01-0301-08

**Effects of organic fertilizer substitution for chemical fertilizer on rice yield and soil quality: A study based on long-term equal nutrient substitution.**

YAN Ling-ling[1], LIU Lian-hua[2*], YAN Miao-jun[1], SHU Chang[1], TONG Li-yu[1], ZHOU Zhi-zhi[1], LI Zhi-chao[1] (1.Yiyang Academy of Agricultural Sciences, Yiyang 413000, China；2.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：301~308

**Abstract**：To evaluate the effects of organic fertilizer substitution on rice yield and soil quality under the conditions of equal nutrient substitution, a continuous six-year (2018~2023) field experiment was conducted. Using a no-fertilizer treatment as control (CK), this study examined the effects of chemical fertilizer (CF), 25% organic fertilizer substitution (COF25%), and 50% organic fertilizer substitution (COF50%) under low nitrogen application rates (135kg/hm$^2$ in early rice season, 150kg/hm$^2$ in late rice season) on rice biomass, yield, and soil properties. Results showed that compared with CK, fertilization promoted rice plant growth, enhanced nitrogen uptake, and increased yield. However, no significant differences ($P$>0.05) were observed in rice yield, nitrogen use efficiency, or partial factor productivity of nitrogen between CF and COF. Organic fertilizer substitution significantly increased soil organic carbon (SOC) by 8.40%~13.04% compared to CK. Moreover, the extent of SOC improvement increased with higher organic fertilizer substitution rates. All fertilization treatments significantly increased soil total phosphorus (24.30%~33.33%) and available potassium (25.60%~35.20%) contents. COF50% treatment resulted in a 18.18% significant increase in total nitrogen (TN) compared to CK. Analysis using the soil quality index area method revealed that soil quality improved with increasing organic fertilizer substitution rates. The soil quality index area values for COF25% and COF50% treatments were 88.81% and 222.40% higher, respectively, than that of the CF treatment. In conclusion, 25%~50% organic fertilizer substitution ensured normal rice growth and stable yield while enhancing soil quality through increased SOC content.

**Key words**：organic fertilizer；rice yield；soil organic carbon；soil quality

化肥过量施用已成为农业生产可持续发展的重大挑战,长期过度施肥引发的土壤质量退化、温室气体排放加剧及水体污染等环境问题日益凸显[1-2].在此背景下,2015 年农业部印发的《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》明确提出将有机肥替代技术确立为兼顾维持产量与环境可持续关键策略之

**收稿日期：** 2025-05-11
**基金项目：** 农业基础性长期性科技工作国家土壤质量数据中心观测监测任务(ZX02S191400)
* 责任作者, 副研究员, liulianhua@caas.cn

一.利用农业生物废弃物(秸秆、畜禽粪便等)等制备的商品有机肥可以提高资源利用、降低生产能耗,并兼具改良土壤环境、促进作物生长等作用[3-4].有机肥替代技术符合农业低碳绿色发展的要求,可对农业生产可持续发展目标的实现发挥重要作用[5].

近年来多项研究表明,有机肥替代还田可以通过改善土壤团粒结构、增强养分固持能力及提升微生物活性等机制,提高水稻养分利用效率[6-9].然而,关于有机肥替代还田对水稻产量的影响并没有一致的研究结论,且随着施用比例和施用年限等条件的变化,表现出不同的产量变化趋势[10-14].研究结果的不一致可能是由于气候、土壤和管理措施的多重交互作用[15-17].此外,已有研究中氮肥施用量范围大多数为 150~280kg/hm$^2$,针对低施氮量水平下有机肥替代效果关注的较少[18-19].而且,大部分研究多集中于有机肥等氮量还田,关于等养分量(即等氮磷钾含量)替代还田的研究仍需进一步的深入研究[20-21].

综上所述,已有研究多聚焦于高施氮量条件下的有机肥替代效果,低施氮量条件下有机肥替代还田的长期效应尚未明晰.因此,为了明确长期低施氮量条件下有机肥替代等养分量化肥对水稻产量及土壤质量的影响,通过 2018~2023 年 6 年大田试验,开展有机肥替代的长期定位研究.通过系统分析水稻各生育期生物量及产量,比较不同有机肥还田比例对双季稻生长、氮素利用效率及土壤质量的影响,为有机肥的科学还田提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2018~2023 年在湖南省益阳市 (28°33′N, 112°25′E)开展长期田间定位试验.该地属于亚热带季风气候,年均气温 18℃,年均降雨量为 1538mm.供试土壤属于潴育型水稻土,白鳝泥土属,白夹泥土种,试验前土壤理化性质:土壤容重为 1.09g/cm$^3$,pH 值为 4.24,有机质含量为 32.28g/kg,矿质氮含量为 160.50mg/kg,有效磷含量为 8.42mg/kg,速效钾含量为 80.73mg/kg.

### 1.2 试验设计和田间管理

每个水稻季施肥原则一致,即按照等养分原则进行施肥管理,共设置 4 个处理, 每个处理 3 次重复,随机区组排列,共 12 个小区,每个小区面积 100m$^2$,小区间以 0.5m 深和 0.3m 宽的水泥田埂隔开,独立排灌.具体试验处理设计为:1)不施用氮磷钾肥的对照处理(CK);2)当地推荐的常规施肥处理(CF);3)25%有机肥替代处理(COF25%);4)50%有机肥替代处理(COF50%).CF 处理早稻季氮肥、磷肥和钾肥施用量分别为 135、60 和 105kg/hm$^2$;晚稻季氮肥、磷肥和钾肥施用量分别为 150、65 和 120kg/hm$^2$.在施肥前测定商品有机肥中的氮、磷、钾养分含量,然后根据商品有机肥的施用量将其分别计入总的氮、磷、钾施肥量,即 COF25%和 COF50%处中由商品有机肥带入的氮磷钾含量与配施化肥的氮磷钾含量之和等于 CF 处理的氮磷钾养分含量.化学氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾.本研究使用的商品有机肥是由长沙绿丰源肥料公司和湖南湘佳现代农业有限公司按国家有机肥生产标准加工生产而成.由于每季商品有机肥中的氮磷钾含量略有不同(多年平均含量为:有机质 45.63%,N 3.31%, $P_2O_5$ 2.11%, $K_2O$ 2.74%),因此每季有机肥施用量略有不同.以 2022 年为例,各处理肥料施用量见表 1.

**表 1 各处理肥料施用量**

Table 1 Applciaiont amount of fertilizers for each treatment

| 水稻 | 处理 | 化肥 | | | 有机肥 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | N(kg/hm$^2$) | $P_2O_5$(kg/hm$^2$) | $K_2O$(kg/hm$^2$) | (t/hm$^2$) |
| 早稻 | CK | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CF | 135 | 60 | 105 | 0 |
| | COF25% | 101.2 | 36.6 | 74.5 | 1.6 |
| | COF50% | 67.5 | 13.2 | 44.1 | 3.3 |
| 晚稻 | CK | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CF | 150 | 65 | 120 | 0 |
| | COF25% | 112.5 | 39 | 86.1 | 1.8 |
| | COF50% | 75 | 13 | 52.3 | 3.6 |

注:CK为不施肥处理;CF为推荐的常规施肥处理;COF25%为25%有机肥替代处理;COF50%为50%有机肥替代处理.

水稻移栽前,将所有商品有机肥、100%磷肥、70%氮肥和 70%的钾肥作为基肥施用,剩余的氮肥和钾肥在分蘖期作为追肥施用.水稻种植模式为双季稻:早稻季,4 月下旬泡田整地,7 月中下旬收获;晚稻季在早稻收获后泡田旋地,10 月底或 11 月初收获.除了施肥管理不同,所有处理的泡田整地、插秧、灌溉、除草、杀虫等其他农艺措施均按照当地常规方式方法进行.

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生理指标 在 2021 年早稻季和晚稻季

的分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期及成熟期取水稻植株样.具体采样方法为:从每个地块选择沿一条长对角线进行三点取样法收集生长状态相似的水稻植物样本,确保三点能相对均匀地覆盖整个区域,彼此间有足够距离,且避免边际效应.在 105°C 下干燥 1h 后再在 75°C 下烘干至恒重,进行称重.对于成熟期的植株样品,用 $H_2SO_4$–$H_2O_2$ 消化粉碎样品后测定水稻植株根、茎和穗的全氮含量.在 2018~2023 年早稻季和晚稻季水稻成熟收获前,每个地块随机抽取两个 1m$^2$ 水稻测定产量.

氮素利用率(NUE)和氮素偏生产力(PFPN)的计算公式如下:

$$\mathrm{NUE}=\frac{\mathrm{NU_F}-\mathrm{NU_0}}{R_\mathrm{F}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\mathrm{PFPN}=\frac{Y_\mathrm{R}}{R_\mathrm{F}} \tag{2}$$

式中:$NU_F$ 和 $NU_0$ 分别是施肥处理(CF、COF25%、COF50%)和不施肥处理(CK)中水稻收获时地上部分氮的吸收量,kg/hm$^2$;$R_F$ 是不同施肥处理的氮肥施用量,kg/hm$^2$;$Y_R$ 是不同施肥处理水稻产量,kg/hm$^2$.

1.3.2　土壤理化性质　于 2018~2023 年晚稻季收获时,采用五点取样法取 0~20cm 表层土壤样品,测定土壤理化性质.人工去除土壤样品中石头和植物残留物,样品自然风干后,测定土壤的理化性质.土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,土壤样品经氯化钾浸提后,采用酚二磺酸比色法测定土壤硝态氮含量,采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量,两者之和即为矿质氮含量(MN);土壤全磷(TP)采用氢氧化钠熔融钼锑抗比色法测定,土壤速效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定;土壤全钾(TK)和速效钾(AK)均采用浸提–火焰光度法测定;土壤有机质(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定.土壤 pH 值使用玻璃电极酸度计测定,水土比为 5:1;土壤容重(BD)用环刀法测定.根据测定的 SOC、TN 和 TP,计算土壤碳氮比(C/N)和土壤氮磷比(N/P).

选取 2021~2023 年测定的土壤指标(包括 SOC、TN、TP、TK、MN、AP、AK、C/N、TN/TP、pH 值、BD)作为土壤健康评价指标的总数据集,利用土壤质量指数(SQI)面积法评估施肥管理对土壤质量的影响.土壤质量指数面积法是利用雷达图及其面积的对比反映不同施肥管理下土壤质量差异.具体计算方法如下:

$$\mathrm{SQI_{area}}=0.5\sum_{i}^{n}\mathrm{stP}_i^2\sin\frac{2\pi}{n} \tag{3}$$

$$\mathrm{stP}_i=\frac{P_\mathrm{Fertilization}}{P_\mathrm{CK}} \tag{4}$$

$$P_\mathrm{si}=\frac{P_i-\min(P_i)}{\max(P_i)-\min(P_i)} \tag{5}$$

式中:$SQI_{area}$ 是 SQI 区域面积;$stP_i$ 是标准化参数 $i$;$n$ 是参数数量;π 为 3.14;$P_{Fertilizaiton}$ 和 $P_{CK}$ 分别是施肥处理(CF、COF25%、COF50%)和不施肥处理(CK)的施肥量.$P_{si}$ 是标准化参数 $i$;$P_i$、$\max(P_i)$和 $\min(P_i)$分别是土壤中参数的实际值、最大值和最小值.

### 1.4　数据分析

利用 SPSS 26.0 软件进行方差分析,对各处理的指标进行显著性检验($P$<0.05).使用 Origin 2025b 正版软件绘制图片.

本研究各指标测定及分析的年份和时长如下:水稻产量、氮肥偏生产力,2018~2023 年早稻季和晚稻季,共 6 年数据;土壤理化性质,2018~2023 年晚稻季收获后取样数据,共 6 年数据;水稻生物量(根、茎、穗、总生物量)、水稻氮素吸收、氮肥利用率,2021 年早稻季和晚稻季,1 年的试验数据.截至 2021 年试验已经开展 4 年,各试验处理的效果相对稳定.因此,可根据 2021 年的相关数据趋势掌握不同施肥处理下水稻生长的响应.

## 2　结果与分析

### 2.1　水稻生物量

早稻和晚稻总生物量呈现显著性差异,各处理晚稻生物量较早稻平均提高 36.88%(图 1).施肥显著影响生物量积累,与 CK 相比,化肥(CF)和有机肥替代处理(COF25%、COF50%)在除晚稻分蘖期外的所有生育期均显著促进水稻生长($P$<0.05).具体而言,早稻季 COF50%、COF25%和 CF 处理的总生物量较 CK 分别提高 130.60%、132.89%和 118.75%,晚稻季分别提高 50.77%、58.77%和 52.20%.然而,除了早稻季分蘖期和晚稻季的齐穗期外,CF、COF25%和 COF50%处理间的总生物量没有显著差异.

干物质分配模式分析显示,CF 和 COF(COF25%和 COF50%)处理在早稻各生育期均显著促进根、茎、穗的生物量积累($P$<0.05).值得注意的是,早稻分

蘖期 COF50%处理根生物量较 CF 和 COF25%处理分别降低 21.73%和 20.48%,茎生物量分别降低 34.42%和 30.39%($P$<0.05),但此差异随生育进程推进逐渐消失.晚稻季水稻生物量差异呈现相反的时序特征,处理间的差异在齐穗期开始显现,COF25%生物量远高于其他 3 种处理.

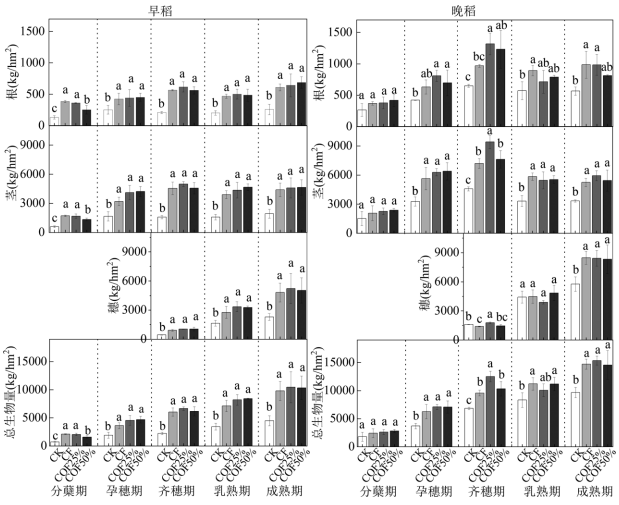



图 1 不同施肥处理下水稻生物量

Fig.1 Rice plant biomass under different fertilization treatments

CK 为不施肥处理;CF 为推荐的常规施肥处理;COF25%为 25%有机肥替代处理;COF50%为 50%有机肥替代处理;不同的小写字母表示在 $P$<0.05 的水平上存在显著差异

## 2.2 水稻氮素吸收

早稻季和晚稻季的水稻氮素吸收呈现显著性差异.2021 年测定数据显示晚稻总氮素吸收量较早稻平均提升 30.56%(图 2).方差分析表明, CF 与 COF 处理显著提高了根、茎、穗及整株氮素吸收($P$<0.05),其中早稻季 COF50%、COF25%和 CF 处理的氮吸收量较 CK 分别增加了 104.88%、104.44%和 91.93%,晚稻季增幅分别为 71.15%、84.83%和 67.98%.与水稻生物量积累的规律趋势相似 CF、COF25%和 COF50%处理的氮素吸收无统计学差异($P$>0.05).

不同器官氮素吸收呈现明显季节差异,早稻季表现为根>穗>茎,晚稻季为茎>穗>根.相比 CK 处理,早稻季,COF50%、COF25%和 CF 处理根的氮吸收量分别提高 162.45%、159.31%和 138.60%,穗的氮吸收量分别高 110.18%、123.71%和 96.46%,茎的氮吸收量分别高 81.33%、74.63%和 82.07%.晚稻季,COF50%、COF25%和 CF 处理茎的氮吸收量氮吸收率分别比 CK 高 81.22%、74.63%和 78.45%,穗的氮吸收量分别高 66.24%、71.68%和 61.16%,根的氮吸收量分别高 37.26%、58.24%和 47.76%.

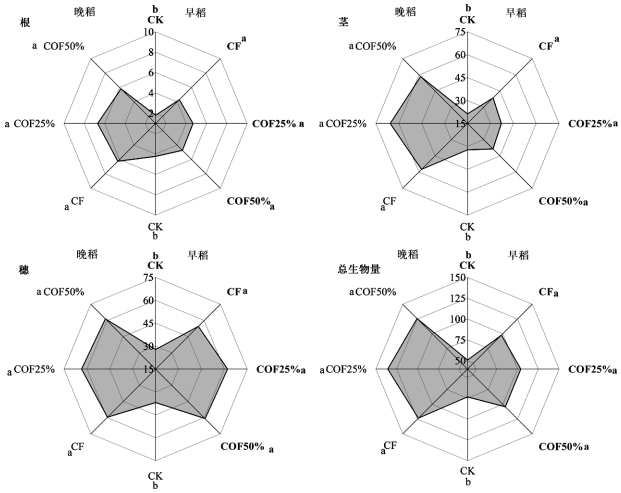



图 2 不同施肥处理下水稻成熟期氮素吸收

Fig.2 Nitrogen uptake of rice at the harvesting stage under different fertilization treatments

不同的小写字母表示在 $P$<0.05 的水平上存在显著差异

## 2.3 水稻产量、氮肥利用效率与氮肥偏生产力

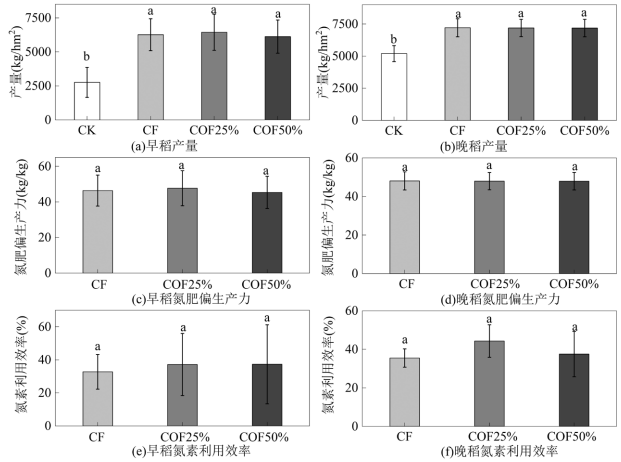



图 3 不同施肥处理下水稻产量、氮肥利用效率和氮肥偏生产力

Fig.3 Rice yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen partial factor productivity of different fertilization treatments

不同的小写字母表示在 $P$<0.05 的水平上存在显著差异

施肥处理较不施肥对照显著提升了水稻产量($P$<0.05),且早稻季增幅(113.65%~125.43%)显著高于晚稻季(36.97%~37.41%)(图 3).6 年均值显示晚稻产量较早稻提高 21.35%,但 3 种施肥处理间产量差异未达显著水平($P$>0.05),表明有机替代比例对周年

产量无显著性影响.2021 年氮肥利用率分析数据显示,COF25%与 COF50%处理下早稻氮肥利用率较 CF 分别提升 13.53%和 13.91%,晚稻季增幅为 24.90%和 5.77%,但处理间差异未达显著水平($P$>0.05).氮肥偏生产力年际变化趋势与产量、氮肥利用率的趋势一致,进一步验证三种施肥制度在氮素管理上的等效性.

### 2.4　土壤理化性质

长期定位试验揭示不同施肥制度改变了土壤理化性质(图 4).虽然 CF 的 pH 值与 CK 无差异,但单施化肥可加剧土壤酸化.而有机肥替代可以缓解土壤酸化的趋势,相比 CK 处理,COF50%处理的耕层 pH 值提升了 2.1%($P$>0.05).此外,与 CK 处理相比,有机肥替代略微降低了 BD($P$>0.05).有机肥替代还田提高了土壤养分.具体而言, COF25%处理的 SOC 含量较 CK 增加 8.40%;COF50%处理的 SOC 和 TN 含量较 CK 分别增加 13.04%和 18.18%.各施肥处理均显著提高 TP(24.30%~33.33%)和 AK(25.60%~35.20%)的含量,其中 COF50%处理 TP 含量达 0.69g/kg,较 CK 提升 33.33%($P$<0.05).虽然 3 种施肥处理之间没有显著差异,但有机肥替代处理的土壤化学性质平均值较高.总体来说,有机肥替代率越高,SOC 含量越高.

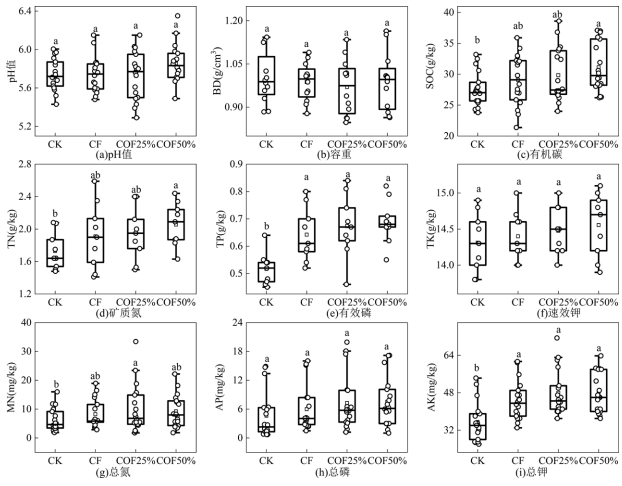



图 4　不同施肥处理下土壤 pH 值、容重(BD)、有机碳(SOC)、矿质氮(MN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)及总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)

Fig.4　The pH, soil bulk density (BD), soil organic carbon (SOC), mineral nitrogen (MN), soil available phosphorus (AP), soil available potassium (AK), and total nitrogen (TN), total phosphors (TP), total potassium (TK) under different fertilizaiton treatments

长期施肥显著改变土壤元素平衡(图 5).与 CF 相比,COF25%和 COF50%处理的土壤 C/N 比分别提高 2.43%和 1.07%,虽未达显著水平($P$>0.05)但呈现出土壤改良的趋势.值得注意的是,所有施肥处理均显著降低土壤 TN/TP 值($P$<0.05),其中 CF、COF25%和 COF50%处理的 TN/TP 值分别为 2.96、2.91 和 2.99,较 CK 处理下降了 11.57%、13.21%和 10.75%,表明施肥加剧了氮磷代谢失衡.土壤质量指数(SQI)分析显示,随着有机肥替代率的增加,SQI 面积逐渐增加,COF25%和 COF50%处理的 SQI 值分别为 1.40 和 2.38,比 CF 处理高 88.81%和 222.40%.

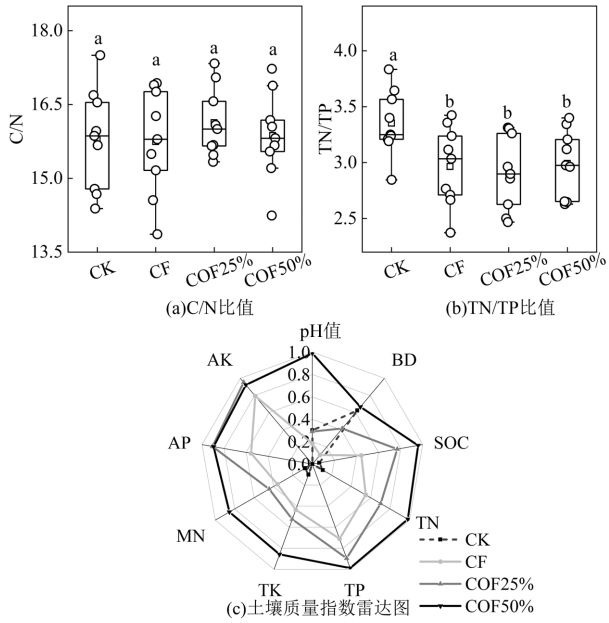



图 5　不同施肥处理下土壤健康评估

Fig.5　The soil health assessment of different fertilization treatments

## 3　讨论

### 3.1　长期有机肥替代对水稻产量的影响

本研究通过 6 年定位试验证实,有机肥部分替代化肥可维持双季稻产量的稳定性,但相比单施化肥未表现出显著增产效应($P$>0.05)(图 2).这一发现与前人研究结论一致,即有机肥部分替代化肥可以维持水稻产量[22].也有研究结果表明,有机肥替代下的水稻产量明显高于单施化肥[14,23-24].此外,也有部分研究指出,有机肥替代可能会显著降低单季稻或双季稻的产量[19,25].影响有机肥替代是否能够保证水稻稳产或增产的因素较多,除了有机肥类型、有机

替代比例、气候条件、土壤状况外,氮肥施用量也是重要的影响因子[18,26].值得关注的是,本研究CF处理的总施氮量是地方政府推荐的低施氮量水平(早稻135kg/hm$^2$, 晚稻 150kg/hm$^2$), 较同类研究(150~280kg/hm$^2$)降低 10%~25%[18,27],这可能是直接导致有机肥替代处理未表现出显著增产优势的原因.尽管如此,连续 6 年观测证实即使在减氮政策下,有机肥替代仍能通过改善土壤性质保障水稻产量,这一发现为 “化肥零增长”的政策实施提供了重要的实证支撑.

### 3.2 长期有机肥替代对土壤质量的影响

本研究表明,有机肥替代通过双重增效机制提升土壤功能(图 4).虽然统计学方面,单施化肥和有机肥替代的土壤性质之间没有显著差异,但与单施化肥相比,有机替代处理的土壤质量有所改善(图 4).SOC 的增加被认为是维持和增加作物产量的重要因素,与 CK 相比,有机肥替代处理的 SOC 显著增加,且随着替代比例的增加而增加.除了 SOC 含量外,与单施化肥相比,有机肥替代还提高了土壤 TN、TP、AN、AP 和 AK 含量,形成碳-养分协同增益效应.前人针对有机肥替代的研究也证实了有机肥对土壤环境的显著改善作用[28-29]. 此外,过量氮肥的施用可能会加剧土壤酸化[30-31].本研究表明,长期有机肥替代可以缓解化肥造成的土壤酸化,较高的替代比例将会增加土壤 pH 值[32-33].综述所述,即使在相对较低的施氮水平下,长期有机肥替代也能改善双季稻种植系统的土壤环境.

### 3.3 可持续有机肥料替代的影响

自 2015 年全国实施化肥使用量零增长行动以来,稻田肥料施用量呈显著下降趋势[34].在此背景下,虽然化肥的使用量有所下降,但实际氮肥的施用量仍远高于作物的需求.例如,有研究建议区域平均最佳氮肥施用量为 167kg/hm$^2$[35],水稻最佳氮肥施用量为 149kg/hm$^2$[36],以上推荐用量均远低于农民实际施肥量和大多数有机替代研究的氮肥施用量(150~280kg/hm$^2$)[27,37-40].此外,我国是世界上畜牧业产量最大的国家,但畜禽粪便中只有 22%的氮和不超过 50%的磷被回收到农田中,导致资源浪费和负面环境影响[42-43].因此,有机肥替代还田是农业绿色发展的重要措施之一.本研究结果表明,在当地政府推荐的低施氮量水平下,25%~50%有机肥替代可以保证水稻产量的稳定,并改善土壤质量.在未来中国绿色农业转型的要求下,建议采用化肥减量施用与有机肥替代的协同策略,从而有效促进土壤质量改善,并推动种养循环农业的发展.

## 4 结论

4.1 在低施氮量水平下,25%~50%有机肥替代可维持水稻产量,并保证水稻氮肥利用率的稳定.

4.2 有机肥替代具有显著的土壤改良效应,COF25%和 COF50%处理 SQI 面积分别较 CF 提高 88.81%和 222.40%;有机肥替代处理 SOC 含量较 CK 提升 8.40%~13.04%,且随替代比例增加而增加.

4.3 低施氮水平下,25%~50%有机肥替代可在保障水稻稳产的同时,提升土壤质量.研究成果为南方双季稻区化肥减量和有机肥替代政策的实施提供了实证支撑.

**参考文献:**

[1] Zhuang Y, Zhang L, Li S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China [J]. Agricultural Water Management, 2019,217:374-382.

[2] 刘连华,欧阳威,白 艳,等.基于田-沟-塘系统优化的稻作流域氮素面源污染减排潜力评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2693-2699.
Liu L H, Ouyang W, Bai Y, et al. Evaluation on the reduction potential of diffuse nitrogen pollution in paddy field watersheds based on field-ditch-pond system optimization [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2693-2699.

[3] 邵玟玥,于 锐,赵光影,等.富铁有机肥对重度苏打盐碱地土壤有机质及细菌群落的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4458-4469.
Shao W Y, Yu Y, Zhao G Y, et al. Effect of iron-rich organic fertilizer on soil organic matter and bacterial community in heavy soda saline-alkali soil [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4458-4469.

[4] 李 雪,周 萍,程爱武,等.长期化肥配施不同有机物料对亚热带稻田土壤微生物生物量及酶化学计量特征的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2025,31(2):305-316.
Li X, Zhou P, Cheng A W, et al. Effects of long-term combined application of chemical fertilizer and organic materials on stoichiometry of soil microbial biomass and enzyme activity in subtropical paddy fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025,31(2):305-316.

[5] 范东寿,杨福霞,郑 欣,等.绿色农业补贴的化肥减量效应及影响机制:来自有机肥补贴试点政策的证据 [J]. 资源科学, 2023,45(8):1515-1530.
Fan D S, Yang F X, Zheng X, et al. The impact of green agricultural subsidies on fertilizer reductionand its mechanisms: Evidence from pilot policies for organic fertilizer subsidies [J]. Resources Science, 2023,45(8):1515-1530.

[6] 黄 晶,周玲红,高菊生,等.红壤性水稻土无机磷形态周年内变化及

与磷肥利用率的关系 [J]. 中国土壤与肥料, 2025,(2):43−52.
Huang J, Zhou L H, Gao J S, et al. Annual changes of inorganic phosphorus form in red paddy soil within one year and its relationship with phosphorus fertilizer utilization [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2025,(2):43−52.

[7] 刘琼峰,刘　锋,谷　雨,等.湖南典型水稻土施用有机肥比例对水稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 农业现代化研究, 2025,46(1):165−173.
Liu Q F, Liu F, Gu Y, et al. Effects of organic fertilizer ratio on rice yield and nitrogenuptake and utilization in typical paddy soil in Hunan Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2025,46(1):165−173.

[8] Cao X, Liu L, Ma Q, et al. Optimum organic fertilization enhances rice productivity and ecological multifunctionality via regulating soil microbial diversity in a double rice cropping system [J]. Field Crops Research, 2024,318:109569.

[9] Shang B, Tian T, Mo Y, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers sustained rice yields and N accumulation and decreased [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025,377:109260.

[10] Bijay S, Shan Y H, Johnson−Beebout S E. Chapter 3 crop residue management for lowland rice−based cropping systems in Asia [J]. Advances in Agronomy, 2008,98:117–199.

[11] Verena S, Navin R, Jonathan A F. Comparing the yields of organic and conventional agriculture [J]. Nature, 2012,485(7397):229.

[12] Duan C, Li J, Zhang B, et al. Effect of bio−organic fertilizer derived from agricultural waste resources on soil properties and winter wheat (Triticum aestivum L.) yield in semi−humid drought−prone regions [J]. Agricultural Water Management, 2023,289:108539.

[13] Fan X, Chen X, Chen T, et al. Effects of substituting synthetic nitrogen with organic amendments on crop yield, net greenhouse gas emissions and carbon footprint: A global meta−analysis [J]. Field Crops Research, 2023,301:109035.

[14] Liu L, Li H, Zhu S, et al. The response of agronomic characters and rice yield to organic fertilization in subtropical China: A three−level meta−analysis [J]. Field Crops Research, 2021,263:108049.

[15] Lan X J, Shan J, Huang Y, et al. Effects of long−term manure substitution regimes on soil organic carbon composition in a red paddy soil of southern China [J]. Soil Tillage Research, 2022,221:105395.

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

[17] Saikia P, Bhattacharya S S, Baruah K K. Organic substitution in fertilizer schedule: Impacts on soil health, photosynthetic efficiency, yield and assimilation in wheat grown in alluvial soil [J]. Agriculture Ecosystem Environment, 2015,203:102–109.

[18] 喻　莹,万连杰,何瑞杰,等.有机肥等养分替代化肥对椪柑产量品质影响的初步研究 [J]. 江西农业大学学报, 2023,45(5):1157−1165.
Yu Y, Wan L J, He R J, et al. A preliminary study on effect of organic fertilizer and other nutrients replacing chemical fertilizer onyield and quality of ponkan [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023,45(5):1157−1165.

[19] 刘雅仙,安　宁,吴正超,等.长期水稻秸秆及生物炭还田替代等养分量化肥对寒地水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2023,29(10):1771−1782.
Liu Y X, An N, Wu Z C, et al. Effects of continuous replacing equal amount of chemical fertilizer nutrients with rice straw and straw biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in cold region [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(10):1771−1782.

[20] Dai X, Song D, Zhou W, et al. Partial substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen improves rice yield, soil biochemical indictors and microbial composition in a double rice cropping system in south China [J]. Soil & Tillage Research, 2021,205:104753.

[21] Liao B, Peng Z, Shu Y, et al. Can optimizing nitrogen management improve net ecosystem economic benefits in rice cultivation? [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,437:140756.

[22] 韩天富,马常宝,黄　晶,等.基于 Meta 分析中国水稻产量对施肥的响应特征 [J]. 中国农业科学, 2019,52(11):1918−1929.
Han T F, Ma C B, Huang J, et al. Variation in rice yield response to fertilization in China: Meta−analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(11):1918−1929.

[23] 胡丹丹,宋惠洁,段英华,等.长期施肥对红壤双季稻系统氮素盈亏和土壤碱解氮的影响 [J]. 中国农业科学, 2024,57(24):4907−4918.
Hu D D, Song H J, Duan Y H, et al. Effects of long−term fertilization on nitrogen surplus and deficitand soil alkali−hydrolyzed nitrogen in red soil double−cropping rice system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024,57(24):4907−4918.

[24] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic–inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilize application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice–wheat cropping system [J]. Applied Soil Ecology, 2016,99:1−12.

[25] Song W, Shu A, Liu J. Effects of long−term fertilization with different substitution ratio of organic fertilizer on paddy soil [J]. Pedosphere, 2022,32(4):637–648.

[26] Shi C, Zhang Q, Yu B. Higher improvement in soil health by animal−sourced than plant−sourced organic materials through optimized substitution [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2024,363:108875.

[27] 冯　涛,余　庆,丁紫娟,等.侧深施肥下有机肥替代减氮对再生稻田氮素损失与氮肥利用率的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2025,44(6):1600−1610.
Feng T, Qing Y, Ding Z J, et al. Effects of nitrogen reduction by organic manure substitution under side−deep fertilization onnitrogen loss and nitrogen fertilizer use efficiency in regenerated paddy field [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2025,44(6):1600−1610.

[28] 陈丹梅,袁　玲,黄建国,等.长期施肥对南方典型水稻土养分含量及真菌群落的影响 [J]. 作物学报, 2017,43(2):286−295.
Chen D M, Yuan L, Huang J G, et al. Influence of long−term fertilizations on nutrients and fungal communities in typical paddy soil of South China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017,43(2):286−295.

[29] 石丽红,唐海明,文丽,等.长期不同施肥模式对南方双季稻田生态系统净碳汇效应和经济收益的影响 [J]. 应用生态学报, 2022,33(9):2450−2456.
Shi L H, Tang H M, Wen L, et al. Effects of different long−term fertilization patterns on net carbon sink effect and economic benefits in

double cropping rice paddy ecosystem in southern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecolog, 2022,33(9):2450−2456.

[30] 郭春雷,李 娜,彭 靖,等.秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018,24(5):1205−1213.
Guo X L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soi [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018,24(5): 1205−1213.

[31] 李 阳,王继红.长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系 [J]. 南京农业大学学报, 2016,39(1):114−119.
Li Y, Wang J H. Variation of soil humus under long−term fertilization and its relation to soil acidity [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018,24(5):1205−1213.

[32] 申梦雪,郝 芮,刘新伟,等.化肥减量配施秸秆和有机肥对酸化土壤改良及侵蚀阻控的影响 [J]. 水土保持学报, 2024,38(6):333−342.
Shen M X, Hao R, Liu X W, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with straw and organic fertilizer application on soil acidification mitigation and erosion control [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):333−342.

[33] 黄奇娜,党洪阳,张 燕,等.施用有机肥和调理剂对田间土壤重金属有效态变化影响及水稻降镉效应研究 [J]. 中国稻米, 2024,30(2): 37−42.
Huang Q N, Dang H Y, Zhang Y, et al. Effects of organic fertilizer and soil conditioner input on the available soil heavy metals content and cadmium reduction in rice [J]. China Rice, 2024,30(2):37−42.

[34] Liu L H, Lian Z M, Ouyang W, et al. Potential of optimizing irrigation and fertilization management for sustainable rice production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,432:139738.

[35] Wu L, Chen X, Cui Z, et al. Improving nitrogen management via a regional management plan for Chinese rice production [J]. Environmental Research Letters, 2015,10:095011.

[36] Yin Y, Ying H, Xue Y, et al. Calculating socially optimal nitrogen (N) fertilization rates for sustainable N management in China [J]. Science of the Total Environment, 2019,688:1162−1171.

[37] 许剑锋,金羽清,蔡建军,等.不同肥力水平下有机肥部分替代化肥对土壤及水稻生长的影响 [J]. 安徽农学通报, 2025,1:28−32.
Xu J F, Jin Y Q, Cai J J, et al. Effects of partial substitution of organic fertilizer for chemical fertilizer on soil and ricegrowth under different fertility levels [J]. An Hui Nong Xue Tong Bao, 2025,1:28−32.

[38] 易宗建,靳 拓,袁 沛,等.有机肥氮替代比例对双季稻氮肥利用率及氨挥发特征的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2024,(10):172−181.
Yi Z J, Jin T, Yuan P, et al. Effects of organic fertilizer nitrogen replacement ratio on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization of double−crop rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024,(10):172−181.

[39] 白采禾,陈 玮,李长飞,等.洱海流域不同类型有机肥替代化肥对稻鸭共生系统氨挥发和温室气体排放的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025,33(2):387−400.
Bai C H, Chen W, Li C F, et al. Effects of replacing chemical fertilizers with different types of organic fertilizerson ammonia volatilization and greenhouse gas emissions in a rice−duck symbiotic system in the Erhai Lake Basin [J]. Chinese Journal of Eco−Agriculture, 2025,33(2):387−400.

[40] 吴茜虞,雷宝坤,徐卓颖,等.洱海流域有机肥全量替代化肥对稻田温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2025,44(1):172−183.
Wu X Y, Lei B K, Xu Z Y, et al. Effects of organic fertilizer substitution on greenhouse gas emissions in paddy fields in the Erhai watershed [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2025,44(1):172−183.

[41] 王昱杭,唐 旭,姜振辉,等.不同比例有机无机氮配施对长期稻麦轮作体系中水稻产量和氮素吸收利用的影响 [J]. 土壤通报, 2024, 55(2):401−411.
Wang Y H, Tang X, Jiang Z H, et al. Effects of long−term combined application of organic−inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in a rice−wheat rotation system [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024,55(2):401−411.

[42] Wang S, Yang P, Tan Q, et al. Identification of optimal organic fertilizer subsidy policies under dual uncertainty via a self−calibrated fuzzy−boundary interval programming method [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,438:140762.

[43] Bai Z, Ma L, Jin S, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China [J]. Environment Science Technology, 2016,50(24):13409–13418.

**作者简介：**严玲玲(1989−),女,湖南邵阳人,高级农艺师,硕士,主要从事作物栽培及土壤学研究.发表论文 10 篇.yanlingling231@126.com.