

有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应

张文学¹, 王少先^{1,†}, 金伟², 徐丽萍², 唐先干¹, 熊丽¹, 王萍¹,
夏文建¹, 刘增兵¹, 孙刚^{1*}, 李祖章¹, 刘光荣¹, 邵彩虹¹

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心 / 国家农业环境宜春
观测实验站, 江西南昌 330200; 2 南昌市农业技术推广中心, 江西南昌 330000)

摘要: 【目的】研究短期内 (<5 年) 有机无机氮配施比例对土壤肥力以及水稻产量的影响, 以明确提升地力与兼顾产量的养管理措施。【方法】田间定位试验于 2017—2021 年在长江中下游的红壤双季稻田进行。共设 6 个处理: 不施肥 (CK), 单施化肥 (CF), 有机氮比例分别为 25%、50%、75% 与 100% 的有机无机肥配施处理 (25%ON, 50%ON, 75%ON, 100%ON)。2021 年, 早、晚稻成熟后测产; 晚稻收获后采集耕层土壤样品, 分析土壤物理性状 (容重与大团聚体含量)、化学性状 (pH、有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、速效钾、有效锌、有效硅) 与生物学性状 (脲酶、酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶、微生物生物量碳、微生物生物量氮), 采用土壤肥力综合指数 (IFI) 评价不同比例有机肥料的培肥效果, 运用偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析有机无机肥配合比例对 IFI 以及产量的影响。【结果】随着有机肥比例的提高, 有机无机肥配施提升土壤物理、化学、生物学性状的效果也随之提升。土壤有机质含量和 β -葡萄糖苷酶活性与其它所有指标的相关关系均达显著水平, 有机碳含量与碳循环过程对土壤物理结构、养分以及微生物活性均有较强影响。相对于其他指标, 土壤全磷与有效磷的变异系数较大, 受有机肥投入的影响较大。施肥显著提高了土壤 IFI, 有机无机肥配施的肥力指数显著高于单施化肥, 且随着有机肥配施比例升高而递增, 而双季稻产量则随着有机肥配施比例升高而递减, 有机肥配施比例 $\leq 50\%$ 时, 产量与单施化肥持平, $>50\%$ 时表现为减产。PLS-PM 分析结果显示, 有机肥和无机肥投入对 IFI 均有显著影响, 有机肥的效应大于无机肥; 有机肥对产量无显著影响, 而无机肥投入量对产量影响显著。【结论】有机无机肥配施可以全面改善土壤环境, 提高土壤肥力, 且有机肥配施比例越高效果越好。但如果培肥时间较短 (5 年以内), 化肥氮对产量的贡献占绝对优势, 有机氮的投入比例应控制在 50% 以下, 才能兼顾地力提升与产量的维持。

关键词: 稻田; 有机肥氮占比; 大团聚体含量; 酶活性; 土壤肥力综合指数; 水稻产量

Short-term effects of organic to chemical nitrogen proportion on paddy soil fertility and double rice yield

ZHANG Wen-xue¹, WANG Shao-xian^{1,†}, JIN Wei², XU Li-ping², TANG Xian-gan¹, XIONG Li¹, WANG Ping¹,
XIA Wen-jian¹, LIU Zeng-bing¹, SUN Gang^{1*}, LI Zu-zhang¹, LIU Guang-rong¹, SHAO Cai-hong¹

(1 Institute of Soil and Fertilizer & Resources and Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences / Technology Research Center for Red Soil Improvement / National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Nanchang, Jiangxi 330200, China; 2 Agriculture Technology Extension Center of Nanchang, Jiangxi 330000, China)

Abstract: 【Objectives】We explored the effects of organic fertilizer proportions in total N input on the rice yield and soil fertility in short-term, in order to propose a reasonable organic fertilizer ratio for improving soil fertility and rice yield simultaneously. 【Methods】A localized field experiment was conducted successively for

收稿日期: 2022-11-21 接受日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860588); 农田智慧施肥项目; 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301601); 国家重点研发计划项目 (2022YFD2301001); 江西省农业科学院基础研究与人才培养专项 (JXSNKYJCRC202315); 中央引导地方科技发展专项 (20231ZDD02003)。

联系方式: 张文学 E-mail: xuezi405@163.com; †共同第一作者 王少先 E-mail: wshxjx@126.com

* 通信作者 孙刚 E-mail: sgemail@163.com

five years from 2017 to 2021 under double rice systems in Yichun City, Jiangxi Province. The experimental scheme was composed of no fertilizer control (CK), sole chemical NPK fertilizers (CF), organic N (pig manure) replacing 25%, 50%, 75% and 100% of chemical N input (denoted as 25%ON, 50%ON, 75%ON, and 100%ON), all the fertilizer treatments had the same total N, P and K input. The grain yields of early and late rice were recorded every year at harvest. At harvesting of late rice in 2021, tillage layer soil samples were collected for the determination of 15 physical, chemical properties, and biological properties indicators. The soil integrated fertility index (IFI) of treatment was calculated and the importance of organic and chemical fertilizer on IFI and yield was assessed by partial least squares path model (PLS-PM). **【 Results 】** Compared to CF treatment, organic fertilizer promoted the soil physical, chemical and biological properties, and the effect was enhanced with the increasing of organic N proportion. Soil organic matter and β -glucosidase activity were significantly correlated with the soil chemical and physical indicators. Among the tested indicators, total and available P content had the highest variable coefficient values, showing their sensitivities to the input of organic fertilizer. All the fertilization treatments improved the IFIs, and the four organic replacement treatments did better than CF treatment. The IFIs increased with the enhancing of organic N proportion, while the grain yield effect was on the contrary. The 25%ON and 50%ON treatment were recorded similar annual yield with CF, while 75%ON and 100%ON treatments were reordered significantly lower annual yield. PLS-PM results showed that both chemical and organic fertilizers had significant effect on the IFIs, and the effect of organic fertilizer was higher than that of chemical fertilizer; organic fertilizer had no significant effect on rice yield, while inorganic fertilizer had significant effect. **【 Conclusions 】** Chemical fertilizer plays a decisive role for maintenance of rice yield, but limited effect on soil fertility. Whereas organic fertilizer shows no obvious effect on rice yield in short term, but contributes greatly to the improvement of soil fertility. The proportion of organic fertilizer nitrogen should be controlled within 50% for maintaining high rice yield and improving soil fertility simultaneously.

Key words: paddy field; organic fertilizer N proportion; macro-aggregate content; enzyme activity; soil integrated fertility index; rice yield

土壤肥力是土壤物理、化学和生物学性质的综合和客观反映^[1-3]。土壤综合肥力指数法^[4], 即模糊综合评判法, 是基于土壤理化或生物学指标对土壤肥力的隶属度值和权重计算的土壤肥力综合评价指数^[1,5] (integrated fertility index, IFI), 相比于单因子评价, 更能准确反映土壤肥力的真实水平^[6-8], 表征作物的高产潜力。“万物土中生, 有土斯有粮”, 耕地是保障国家粮食安全的根本^[9]。我国耕地地力总体偏低, 中低产田面积占耕地总面积比例高达 70%, 基础地力对粮食生产的贡献率约为 52%, 比发达国家低 20%~30%^[10-11]。近些年, 随着我国工业化和城镇化进程的加速, 耕地面积有所减少, 一些土壤出现了肥力退化现象^[12-13]。施肥是提高土壤综合肥力指数的有效措施^[3,7,14], 施用有机肥可提高土壤肥力, 改善土壤结构, 有效缓解我国农田土壤酸化、有机质含量下降、土壤生物多样性降低等一系列耕地退化问题, 有利于农田生态系统可持续生产^[15-19]。我国有机肥资源丰富, 有机肥料实物量约 57 亿 t/年, 折合 N 约 3000 万 t、P₂O₅ 约 1300 万 t 和 K₂O 约 3000 万 t^[5,20]。

然而, 有机肥中养分含量不高且分解缓慢, 需与养分含量高且速效的化肥结合施用以实现维持作物产量兼顾地力提升的效果^[1,21], 且化肥与有机肥的配比不同, 对作物增产和土壤培肥的效果也不同^[22]。短期试验 (<5 年) 报道指出, 有机肥与化肥氮比例为 8:2 时可获得水稻产量与环境效应的“双赢”^[23], 麦田连续 3 年有机肥比例在 18%~24% 时的培肥与产量效果最佳^[21], 玉米、棉花、花生等作物的最优有机氮比例为 20%~30%^[24], 鸡粪氮比例为 25%~50% 时的土壤肥力与水稻产量最高^[25]。而长期 (>20 年) 试验结果则证实 70% 的有机氮比例对水稻增产和土壤肥力提高的效果最好^[26-27]。因此, 试验时期的长短也影响着有机无机肥料配施的效果。

当前我国三大粮食作物氮肥、磷肥和钾肥的当季平均利用率仅分别为 33%、24% 和 42%^[16], 配施有机肥可迅速提升化肥的利用率^[28], 同时促进农作物健康生长, 维持系统生产力稳定^[29]。以南方红壤双季稻为研究对象, 探究稻田培肥初期有机肥与化肥适宜的配施比例, 优选出地力与产量同步提升的有机

肥配比比例, 为保障粮食安全以及化肥减施技术提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验在江西省农业科学院高安试验基地 (28°14'50"N, 115°07'32"E) 进行, 该区属于亚热带湿润气候, 海拔高度 47 m, 年平均气温 17.5℃, 无霜期长达 240~307 天, 年降水量 1560 mm, 降水季节分配不均, 全年降水 60% 以上集中在 4—6 月。土壤类型为近代河流冲积物发育的潮沙泥田, 质地为砂质粘壤, 种植制度为早稻和晚稻一年两季。播种前土壤有机质含量 28.54 g/kg, 全氮含量 1.91 g/kg, 全磷 0.59 g/kg, 全钾 13.88 g/kg, 有效磷 23.7 mg/kg, 速效钾 81.24 mg/kg, pH 5.27。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理: 不施肥 (CK); 单施化肥 (CF); 25%、50%、75% 和 100% 的 4 个比例猪粪有机氮配施化肥氮处理, 分别记作 25%ON、50%ON、75%ON、100%ON。供试化肥为尿素 (N 46%)、钙镁磷肥 (P_2O_5 12%) 和氯化钾 (K_2O 60%), 猪粪为符合 NY525—2011 标准的商品有机肥, 其理化性质为: pH 8.09、有机碳 33.12%、全氮 1.20%、全磷 (P_2O_5) 1.36%、全钾 (K_2O) 1.46% (以干基计)。除对照外, 按等量原则, 各处理 N、 P_2O_5 、 K_2O 施入量早稻季为 150、75 和 150 kg/hm², 晚稻季为 180、60 和 180 kg/hm², 猪粪施用量以氮素总量的比例计算, 猪粪有机肥带入的磷、钾养分在相应的化肥投入量中扣除。猪粪有机肥作为基肥一次性施入, 化肥中的氮肥分 3 次施入, 40% 作基肥, 30% 作分蘖肥, 30% 作孕穗肥, 磷、钾肥作为基肥一次性施入。小区面积 40 m² (5 m × 8 m), 小区间以 50 cm 的分隔行隔开, 且

保持小区间的田埂高出地面 40 cm, 并用塑料薄膜包裹田埂以防止相互串水串肥, 每个处理 3 次重复, 随机区组排列。试验于 2017 年 4 月早稻移栽开始定位监测, 2021 年 11 月晚稻收割后结束。种植制度为一年两季, 供试早稻品种为‘中嘉早 17’, 晚稻为‘五优航 1573’, 水稻种植密度以及各项栽培管理措施与当地农民习惯保持一致。各处理化肥和有机肥具体投入量见表 1, 按等氮磷钾原则, 在 50%ON、75%ON 与 100%ON 处理下, 高比例有机氮替代化肥氮时, 有机肥带入的 P_2O_5 已大于试验设计施肥量, 因此, 化肥 P_2O_5 投入量为 0, 同理, 100%ON 处理带入的 K_2O 也大于设计施肥量, 故化肥 K_2O 投入量为 0。与 CF 处理相比, 50%ON、75%ON 与 100%ON 处理只做到了 N 投入量相同, P_2O_5 投入量不一致, 100%ON 处理 K_2O 投入量也不一致。

1.3 测定方法与计算

2021 年早、晚稻收获时, 各小区单独收割记录产量。2021 年晚稻收获后, 采集耕层土壤样品, 分析土壤物理、化学、生物学指标。

1.3.1 土壤物理、化学性状的测定与计算 物理指标中容重采用环刀法^[30]测定; 孔隙度由土壤比重、容重值计算得出; 水稳性团聚体测定方法采用湿筛法, 具体操作根据仪器 (日本 DAIKI/DIK2001) 说明进行, 套筛孔径依次为 2、1、0.5、0.25、0.106 mm, 分级结束后, 将各级粒径的土样收集烘干称重。水稳性大团聚体含量与平均重量直径计算方法^[31]如下:

$$\text{水稳性大团聚体含量 } (R_{0.25}) = M_{r_{>0.25}} / M_T$$

式中: $M_{r_{>0.25}}$ 为粒径 > 0.25 mm 的团聚体重量, M_T 为团聚体的总重量。

团聚体平均重量直径 (MWD, mm):

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

表 1 有机和无机养分年投入量 (kg/hm²)

Table 1 The annual nutrient input from organic and chemical fertilizers of each treatment

处理 Treatment	有机肥料 Pig manure				化肥 Chemical fertilizer		
	N	P_2O_5	K_2O	有机碳 Organic C	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	0	0	0	330	135	330
25%ON	82.5	93.50	100.38	2277	247.50	41.50	229.63
50%ON	165	187.00	200.75	4554	165.00	0	129.25
75%ON	247.5	280.50	301.13	6831	82.50	0	28.88
100%ON	330	374.00	401.50	9108	0.00	0	0

式中: x_i 为 i 粒级团聚体的平均直径, w_i 为 i 粒级团聚体占总重的百分含量。

化学指标 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量 (CEC)、有效锌、有效硅测定方法参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》^[30]。

1.3.2 土壤生物学性状 微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN) 的测定采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 溶液浸提法, 新鲜土壤放入真空干燥器, 放置适量氯仿 (除去乙醇) 遮光、密闭熏蒸 24 h 后, 用 0.5 mol/L 的 K_2SO_4 溶液浸提, 测定滤液中的有机碳、氮含量^[30], 计算方法如下:

$$MBC = E_C / K_C, MBN = E_N / K_N$$

式中: E_C 、 E_N 为熏蒸和未熏蒸样品碳、氮含量之差; K_C 、 K_N 为回收系数, 分别为 $K_C=0.45$ ^[32-33], $K_N=0.54$ ^[34]。

土壤脲酶活性使用脲酶试剂盒 (Solarbio Science and Technology Co., Ltd., Beijing, China), 方法为靛酚蓝比色法, 试验步骤严格遵循说明书进行, 酸性磷酸酶活性以及 β -葡萄糖苷酶活性测定采用荧光微型板酶检测技术, 具体操作参见文献^[35]。

1.3.3 土壤肥力综合性评价指数 将所有指标与水稻产量进行相关性分析, 将相关性 >0.2 的指标选为肥力参评指标^[36], 用于计算土壤肥力综合性评价指数。根据模糊数学中的加权乘法原则, 土壤肥力综合指数 IFI 采用下列公式计算^[1, 37]:

$$IFI = \sum_{i=1}^n q_i w_i$$

式中: q_i 为第 i 项土壤肥力评价指标的隶属度值, w_i 为第 i 项土壤肥力评价指标的权重值。土壤肥力综合指数 (IFI) 范围在 0~1, 数值越高, 土壤肥力越高。

隶属度函数值 q_i : 将土壤肥力评价指标测定值通过相应的隶属度函数转化为 0~1 的无量纲值。根据常用的理化指标与作物生长反应间的关系, 符合正 S 型函数的指标为: 团聚体、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾与阳离子交换量; 符合抛物线型函数的指标为: pH; 各指标的上限、下限临界值以及最优值参照^[1, 38-40], 具体如下:

正 S 型计算公式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq L \\ 0.1 + 0.9(x-L)/(U-L) & L < x < U \\ 1.0 & x \geq U \end{cases}$$

式中: $f(x)$ 表示隶属度值, x 表示指标实测值, L 和

U 分别表示下限和上限临界值。

抛物线型计算公式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq L, x \geq U \\ 0.1 + 0.9(x-L)/(O_1-L) & L < x < O_1 \\ 1.0 & O_1 \leq x \leq O_2 \\ 1 - 0.9(x-O_2)/(U-O_2) & O_2 < x < U \end{cases}$$

式中: $f(x)$ 表示隶属度值, L 和 U 分别表示下限和上限临界值, O_1 和 O_2 分别表示最优值的下限和上限临界值。

对于生物学指标, 采用简单线性评分法, 按照“越高越好”原则, 指标测定值最高的视其隶属度为 1, 其他测定值与该最高值的比值为各自的隶属度值^[41-42], 计算公式如下:

$$f(x) = \frac{x}{x_{\max}}$$

式中: $f(x)$ 为隶属度值, x 为指标测定值, $x_{\max}$ 为指标最高测定值。

权重值 w_i : 将所有参评指标进行主成分分析, 各指标的公因子方差与所有指标公因子方差和的比值为该指标的权重值。

1.4 数据处理

按照与产量相关性原则筛选, 本研究的参评指标为大团聚体含量 $R_{0.25}$ 、pH、有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量、脲酶、酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶、微生物生物量碳、微生物生物量氮等 15 项用于土壤肥力分析。

所有数据首先采用 IBM SPSS 23.0 进行正态分布检验与方差齐性检验, 对于不符合正态分布的数据通过正态得分法进行转化使其符合正态分布, 方差不齐的则采用取对数或者开根号处理。数据采用 SAS v8 软件进行方差分析与描述统计, SPSS 23.0 进行主成分分析。采用 Origin 2018 对土壤综合肥力指数参评指标的隶属度函数绘制雷达图; 采用 R(4.2.0) 的“corrplot”程序包对土壤物理、化学以及生物学性状的 18 个指标作相关性分析, 运用“plsmp”程序包对土壤物理性状、化学性状、生物学性状、综合肥力指数、产量以及有机氮与无机氮投入进行偏最小二乘路径回归分析 (PLS-PM)。

2 结果与分析

2.1 有机氮肥替代化肥对土壤物理、化学、生物性质的影响

由表 2 可见, 所有处理间土壤容重、孔隙度无

表 2 土壤物理指标

Table 2 Physical properties of soil

处理 Treatment	容重 (g/cm ³) Bulk density	孔隙度 (%) Porosity	土壤团聚体分布 Distribution of soil aggregates (%)					平均重量直径 (mm)	
			>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	R _{0.25}	<0.25 mm	MWD
CK	1.15±0.01 a	56.72±3.73 a	6.71±0.47 d	6.17±0.64 d	11.77±0.87 b	17.25±1.38 b	41.90±1.88 d	58.10±1.88 a	45.48±0.75 e
CF	1.12±0.03 a	57.64±0.99 a	8.88±0.67 bc	4.78±0.47 e	15.06±0.98 a	17.52±1.14 b	46.24±0.75 c	53.76±0.75 b	49.74±1.31 d
25%ON	1.10±0.03 a	58.47±1.32 a	6.55±0.62 d	7.63±0.26 c	12.20±0.17 b	20.29±1.28 a	46.67±0.84 c	53.33±0.84 b	48.40±1.31 d
50%ON	1.09±0.02 a	58.72±0.57 a	8.62±0.49 c	8.78±0.50 b	15.34±0.81 a	17.71±0.76 b	50.45±1.34 b	49.55±1.34 c	54.92±1.23 c
75%ON	1.11±0.05 a	58.11±1.75 a	9.71±0.52 ab	9.61±0.44 b	15.46±0.79 a	20.21±0.07 a	55.00±1.41 a	45.00±1.41 d	58.89±1.59 b
100%ON	1.07±0.03 a	59.76±1.10 a	10.16±0.47 a	11.71±0.43 a	15.30±0.46 a	19.95±0.35 a	57.12±0.73 a	42.88±0.73 d	62.52±1.09 a

注: CK—不施肥对照; CF—全部化肥处理; 25%ON、50%ON、75%ON和100%ON分别代表有机氮比例为25%、50%、75%、100%的处理, R_{0.25}—粒径>0.25 mm团聚体总量。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK—No fertilizer control; CF—Chemical fertilizer; 25%ON, 50%ON, 75%ON and 100%ON represent the treatments with organic N ratio of 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively. R_{0.25}—Total content of size>0.25 mm aggregates; MWD—Average weight diameter. Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 3 土壤化学指标

Table 3 Chemical properties of soil

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有效氮 Available N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	有效锌 Available Zn (mg/kg)	有效硅 Available Si (mg/kg)
CK	5.17±0.15 c	29.09±1.66 c	2.45±0.16 b	0.56±0.04 d	14.71±1.39 a	238.96±8.85 c	25.47±1.66 d	105.95±8.85 d	12.66±0.85 c	5.37±0.36 e	32.88±1.68 b
CF	5.33±0.10 bc	29.95±1.45 c	2.50±0.11 b	0.59±0.02 d	15.29±1.62 a	243.99±9.50 bc	28.06±2.09 d	115.78±2.84 cd	13.17±0.31 bc	5.27±0.20 e	33.44±3.44 b
25%ON	5.42±0.10 bc	31.23±1.41 bc	2.65±0.14 ab	0.71±0.04 c	15.88±0.59 a	266.19±18.08 ab	35.54±3.09 c	123.48±4.24 c	14.19±1.08 b	14.06±2.12 d	35.97±0.66 b
50%ON	5.49±0.21 b	33.11±1.74 ab	2.79±0.17 a	0.83±0.03 b	16.18±0.48 a	277.94±17.83 a	53.30±3.91 b	139.65±10.37 b	15.79±0.19 a	42.02±0.70 c	36.47±3.45 b
75%ON	5.88±0.22 a	34.03±0.94 a	2.81±0.12 a	0.89±0.04 a	16.18±1.73 a	286.75±13.07 a	63.21±1.90 a	149.47±6.15 b	15.81±0.45 a	53.25±1.93 b	41.28±2.46 a
100%ON	5.94±0.15 a	35.52±1.72 a	2.79±0.07 a	0.94±0.02 a	16.30±1.02 a	289.64±11.77 a	67.46±3.88 a	171.02±7.09 a	16.20±1.12 a	62.40±3.47 a	42.40±2.24 a

注: CK—不施肥对照; CF—全部化肥处理; 25%ON、50%ON、75%ON和100%ON分别代表有机氮比例为25%、50%、75%、100%的处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK—No fertilizer control; CF—Chemical fertilizer; 25%ON, 50%ON, 75%ON and 100%ON represent the treatments with organic N ratio of 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively. Cation exchange capacity Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$).

显著差异, 土壤容重范围在 1.07~1.15 g/cm³, 孔隙度的范围在 56.72%~59.76%, 物理性状总体适宜作物生长^[43]。施肥处理对大团聚体 ($R_{0.25}$) 和微团聚体 (粒径<0.25 mm) 的百分比均有显著影响。与 CK 相比, 施肥处理显著降低了粒径<0.25 mm 微团聚体含量, 提高了大聚体 $R_{0.25}$ 含量与平均重量直径 MWD。与 CF 相比, 50%ON、75%ON、100%ON 处理显著提高了大聚体 $R_{0.25}$ 的含量以及平均重量直径 MWD。以上结果说明有机氮比例在 50% 以上, 促进了土壤大团聚体的形成, 提高了土壤结构的稳定性, 且有机肥比例越高越好。

由表 3 可知, 与 CF 相比, 25%ON 处理显著提高了全磷、有效磷和有效锌含量 3 项指标, 50%ON 处理显著提高了除 pH、全钾、有效硅含量外的 8 项指标, 而 75%ON 和 100%ON 处理显著提高了除全钾含量外的 10 项指标, 表明高比例的有机氮肥投入更有利于整体提升土壤养分状况。

有机肥比例显著影响着土壤中与碳、氮、磷转化相关的酶活性以及微生物生物量碳氮含量 (表 4)。与单施化肥 CF 相比, 25%ON 处理显著提高了 β -葡萄糖苷酶活性; 50%ON 显著提高了除酸性磷酸酶外的其余 2 个酶的活性, 以及 MBC 和 MBN 含量; 75%ON 和 100%ON 提升了所有测定酶活性和微生物生物量碳、氮含量, 且高有机肥比例的提升效果更显著。

对所有指标进行相关性分析, 结果 (图 1) 表明, 土壤容重与其他指标均呈负相关关系, 特别是与土壤大团聚体 ($R_{0.25}$)、 β -葡萄糖苷酶、有机质含量负

相关关系达显著水平; 全钾与大多数指标相关性较弱, 与土壤阳离子交换量 (CEC)、脲酶活性、速效钾、 β -葡萄糖苷酶、有机质含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$); 其余指标之间相关性均达到显著、极显著水平 ($P<0.05$, $P<0.01$); 在所有指标中, 有机质含量以及 β -葡萄糖苷酶活性与其余指标的相关性均达到显著水平, 说明土壤有机碳含量以及碳循环对土壤物理结构、养分以及微生物活性均有较强烈的影响。

2.2 土壤肥力单因素评价与综合肥力评价

变异系数大小说明了变异程度大小, 按照变异系数<10% 为弱变异性, 变异系数=10%~100% 为中等变异性, 变异系数>100% 为强变异性^[44-46]的原则, 利用 SAS 软件对 15 项土壤指标进行描述统计分析 (表 5)。从表 5 可以看出, 属于弱变异性的指标有 $R_{0.25}$ 、pH 及有机质、全氮、全钾、有效氮含量和酸性磷酸酶, 换句话说, 这 7 个指标在土壤中相对稳定, 受外界因子的影响较小; 中等强度变异的指标有全磷、有效磷、速效钾含量及阳离子交换量、脲酶、 β -葡萄糖苷酶、微生物生物量碳、微生物生物量氮, 其中又以全磷与有效磷的变异系数较大, 分别为 20.07% 和 38.01%, 说明全磷和有效磷对施肥处理的响应相对灵敏, 具体到本试验, 有机肥投入比例对土壤磷素养分的影响较大。

根据土壤肥力综合指数 (IFI) 的公式计算各处理的 IFI。15 项肥力评价指标的隶属度值由各指标对应的隶属度函数得出, 各指标的权重值由主成分分析得到。隶属度值分析结果由雷达图呈现 (图 2), 由

表 4 不同施肥处理土壤酶活性及微生物生物量碳、氮含量
Table 4 The enzyme activities and MBC and MBN contents in soils under different fertilizations

处理 Treatment	脲酶 Urease [NH ₄ ⁺ -N mg/(g·d)]	酸性磷酸酶 Acid phosphatase [mg/(g·d)]	β -葡萄糖苷酶 β -Glucosidase [nmol/(g·h)]	微生物生物量碳 MBC (mg/kg)	微生物生物量氮 MBN (mg/kg)
CK	65.42±6.07 d	1936.43±107.33 c	509.63±11.54 c	127.37±4.75 c	10.49±0.58 c
CF	79.94±3.42 c	2005.86±119.69 bc	534.17±34.31 c	131.89±7.48 c	11.88±0.72 bc
25%ON	84.81±4.10 bc	2147.41±36.56 abc	613.07±21.40 b	143.09±9.00 bc	12.77±1.31 b
50%ON	89.84±8.56 ab	2243.05±179.85 ab	704.47±33.79 a	158.75±5.62 ab	14.41±0.72 a
75%ON	90.98±2.89 ab	2336.01±91.14 a	708.32±24.34 a	163.86±12.66 a	14.82±0.98 a
100%ON	98.87±5.23 a	2320.28±204.33 a	723.26±32.59 a	172.36±12.65 a	15.39±0.50 a

注: CK—不施肥对照; CF—全部化肥处理; 25%ON、50%ON、75%ON和100%ON分别代表有机肥氮比例为25%、50%、75%、100%的处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No fertilizer control; CF—Chemical fertilizer; 25%ON, 50%ON, 75%ON and 100%ON represent the treatments with organic N ratio of 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively. MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen. Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$).

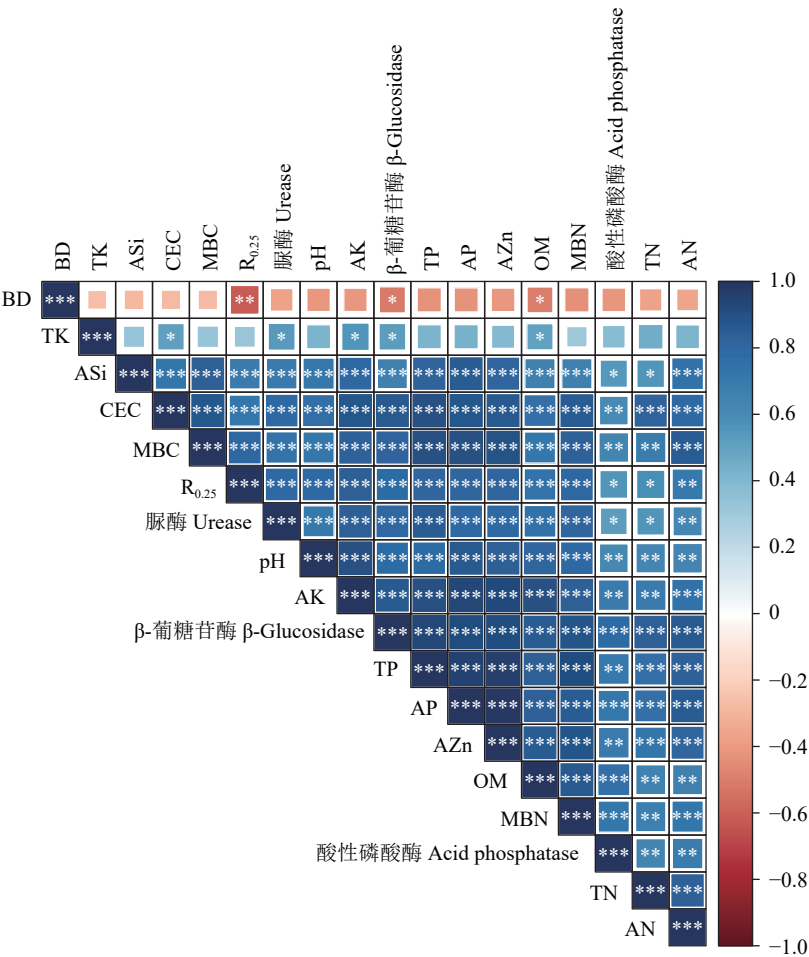


图 1 各指标的相关关系

Fig. 1 Correlation between indicators

注：R_{0.25}—粒径>0.25mm 团聚体；OM—有机质；TN—全氮；TP—全磷；TK—全钾；AN—有效氮；AP—有效磷；AK—速效钾；CEC—阳离子交换量；MBC—微生物生物量碳；MBN—微生物生物量氮。

Note: R_{0.25}—Size>0.25 mm aggregate; OM—Organic matter; TN—Total N; TP—Total P; TK—Total K; AN—Available N; AP—Available P; AK—Available K; CEC—Cation exchange capacity; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen.

图 2 可知，全钾 (TK) 距中心点的距离较近，说明供试土壤缺钾严重，且不同施肥处理对钾素养分提升效果甚微，其余指标分布比较分散，说明不同施肥处理对其有着明显影响。

主成分分析结果表明，KMO 检验 (KMO 值为 0.8) 说明原有变量适宜做主成分分析，得到每个指标的公因子方差及其权重值 (表 6)。由表 6 可知，前 2 个主成分 (特征值大于 1) 对于总方差的累计贡献率达到 84.22%，同时各指标公因子方差均大于 70.7%，说明前 2 个主成分能够较好的反映土壤各指标以及整体信息。

由图 3 可知，与 CK 相比，所有施肥处理均显著提高了土壤肥力综合指数；与 CF 相比，所有配施有机氮肥处理均显著提高了土壤肥力综合指数，且随着有机氮肥配施比例的升高，肥力指数呈现递增趋

势。以上结果表明，施肥可以提高土壤肥力，配施有机肥效果更好，而且有机肥的配施比例越高，培肥效果越好。

2.3 水稻产量及其与土壤肥力的关系

由表 7 可知，与不施肥处理相比，施肥处理均显著提高了稻谷产量，有机氮配施比例为 25% 与 50% 时，早、晚稻以及年总产量与单施化肥处理无显著差异，而有机氮比例升高至 75% 与 100% 时，早稻产量和年总产量均显著低于单施化肥处理，可能由于高比例有机肥中的养分释放速度过慢，无法满足当季水稻形成产量的需要，尤其是对早稻影响更大，早稻生长期间气温较低不利于有机肥中养分释放，晚稻因有前一季的养分残留效应，受影响相对较小。以上结果说明，培肥 5 年内施入高比例 (>50%) 有机氮肥不利于产量的维持。

表 5 土壤属性描述性统计量
Table 5 Descriptive statistics of soil properties

变量 Variable	均值 Mean	极差 Range	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD	变异系数 CV (%)
R _{0.25}	47.14	14.34	39.89	54.23	3.62	7.68
pH	5.54	1.02	5.06	6.08	0.32	5.76
有机质 Organic matter (g/kg)	32.15	9.57	27.46	37.03	2.66	8.27
全氮 Total N (g/kg)	2.67	0.68	2.27	2.95	0.19	6.99
全磷 Total P (g/kg)	0.76	0.46	0.51	0.97	0.15	20.07
全钾 Total K (g/kg)	15.76	4.78	13.33	18.11	1.20	7.59
有效氮 Available N (mg/kg)	267.24	74.33	228.83	303.16	23.34	8.73
有效磷 Available P (mg/kg)	45.51	48.30	23.60	71.90	17.30	38.01
速效钾 Available K (mg/kg)	134.22	79.81	96.92	176.72	23.28	17.34
阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	14.64	5.33	12.02	17.35	1.56	10.65
酸性磷酸酶 Acid phosphatase [mg/(g·24 h)]	2164.84	722.17	1833.82	2555.99	197.90	9.14
脲酶 Urease [NH ₄ ⁺ -N mg/(g·24 h)]	84.97	44.96	58.61	103.57	11.71	13.78
β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase [nmol/(g·h)]	632.15	241.27	501.91	743.18	91.41	14.46
微生物生物量碳 MBC (mg/kg)	149.55	64.94	122.00	186.94	18.77	12.55
微生物生物量氮 MBN (mg/kg)	13.29	5.89	10.06	15.95	1.93	14.49

Note: CEC—Cation exchange capacity; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen; SD—Standard deviation; CV—Coefficient of variation.

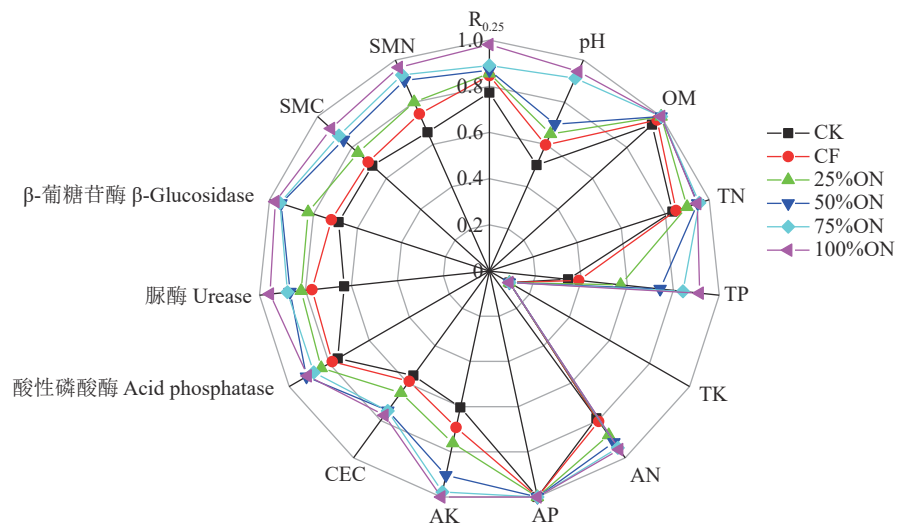


图 2 各指标隶属度值的雷达图

Fig. 2 Radar plot of membership value of indicators

注：R_{0.25}—粒径>0.25mm 团聚体；OM—有机质；TN—全氮；TP—全磷；TK—全钾；AN—有效氮；AP—有效磷；AK—速效钾；CEC—阳离子交换量；MBC—微生物生物量碳；MBN—微生物生物量氮。
Note: R_{0.25}—Size>0.25 mm aggregate; OM—Organic matter; TN—Total N; TP—Total P; TK—Total K; AN—Available N; AP—Available P; AK—Available K; CEC—Cation exchange capacity; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen.

为了研究有机氮、无机氮投入量与土壤物理、化学以及生物学性状、综合肥力指数和产量的相互关系，构建了偏最小二乘路径模型 (PLS-PM, 图 4)。物理、化学与生物学指标均为参与综合肥力指数评价的相应集合。结果显示，拟合度为 0.744，整体模型性能较好。有机氮与化肥氮对物理、化学性状以及综合肥力指数的路径系数均达到显著水平，且有机氮投入对综合肥力指数的路径系数远大于无机氮，

表 6 肥力指标主成分分析

Table 6 Principal components analysis (PCA) of soil fertility indicators

指标 Index	主成分 Principal component		公因子方差 Communality	权重 Weight
	1	2		
特征值 Eigenvalues	11.492	1.140		
贡献率 (%) Contribution	76.616	7.602		
累积贡献率 (%) Cumulative contribution	76.616	84.218		
因子载荷 Factor loading				
R _{0.25}	0.858	-0.181	0.769	0.061
pH	0.854	-0.359	0.858	0.068
有机质 Organic matter	0.886	-0.149	0.808	0.064
全氮 Total N	0.813	0.213	0.707	0.056
全磷 Total P	0.972	0.006	0.944	0.075
全钾 Total K	0.539	0.760	0.868	0.069
有效氮 Available N	0.872	0.258	0.826	0.065
有效磷 Available P	0.965	-0.070	0.936	0.074
速效钾 Available K	0.943	-0.234	0.944	0.075
阳离子交换量 CEC	0.918	-0.035	0.844	0.067
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.780	0.334	0.721	0.057
脲酶 Urease	0.842	-0.281	0.788	0.062
β-葡糖苷酶 β-Glucosidase	0.956	0.051	0.917	0.073
微生物生物量碳 MBC	0.913	0.094	0.842	0.067
微生物生物量氮 MBN	0.926	-0.062	0.862	0.068

注：加粗数字代表高权重指标。
Note: Bold character indicate highly weighted indicators. CEC—Cation exchange capacity; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen.

说明有机肥与化肥的施入对综合土壤肥力有着直接显著的影响，有机肥的影响大于化肥。对于产量，只有化肥氮投入量的路径系数达到显著水平，而有机肥对产量无此效应，由此导致土壤肥力随有机氮投入比例升高而递增，产量则随着化肥投入比例增加而递增，这说明产量的高低主要取决于速效养分的供应情况，而非长效养分的释放，再次证明了化肥对当季作物产量的突出贡献，有机肥对土壤肥力的重要作用，因此，必须均衡考虑高比例有机肥利于培肥，低比例有机肥有利于稳定产量，适宜的配施比例才能达到土壤培肥与稻谷增产的“双赢”目的。

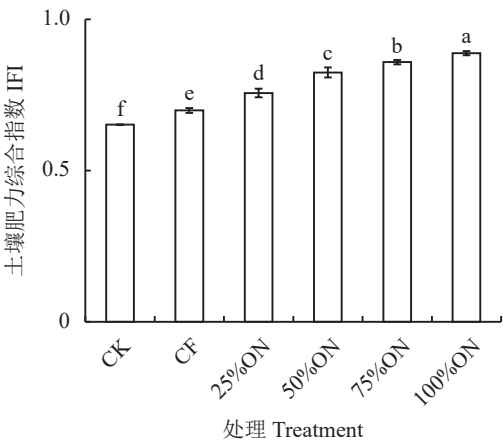


图 3 土壤肥力综合指数

Fig. 3 Integrated fertility index (IFI) of soil

注：CK—不施肥对照；CF—化肥；25%ON，50%ON，75%ON，100%ON—分别为 25%、50%、75%、100% 有机氮占总氮量比例。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No fertilizer; CF—Chemical fertilizer; 25%ON, 50%ON, 75%ON, 100%ON—the ratio of organic fertilizer-N in total N supply is 25%, 50%, 75%, 100%, respectively. Different lowercase letters above the bars mean significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 7 不同处理的稻谷产量 (t/hm^2)

Table 7 Rice grain yield of different treatments

处理 Treatment	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	总产量 Total yield
CK	2.33±0.22 c	4.18±0.16 c	6.51±0.25 d
CF	5.66±0.10 a	6.10±0.16 a	11.76±0.14 a
25%ON	5.60±0.29 a	6.15±0.27 a	11.75±0.36 a
50%ON	5.51±0.22 a	6.11±0.19 a	11.61±0.09 a
75%ON	4.81±0.342 b	5.82±0.72 ab	10.62±0.34 b
100%ON	4.52±0.25 b	5.52±0.21 b	10.04±0.40 c

注：CK—不施肥对照，CF—全部化肥处理，25%ON、50%ON、75%ON 和 100%ON 分别代表有机氮比例为 25%、50%、75%、100% 的处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No fertilizer control, CF—Chemical fertilizer. 25%ON, 50%ON, 75%ON and 100%ON represent the treatments with organic N ratio of 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively. Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$).

3 讨论

土壤质量评价方法有很多种，其中运用最多的是综合指数法和内梅罗指数法^[4]。土壤肥力质量评价优先考虑综合指数法，而土壤环境质量或健康质量评价，则首选内梅罗指数法^[4]。本研究表明，施肥可以显著提高土壤养分含量与综合肥力指数，与单施化肥处理相比，不同比例有机肥的配施处理对土壤

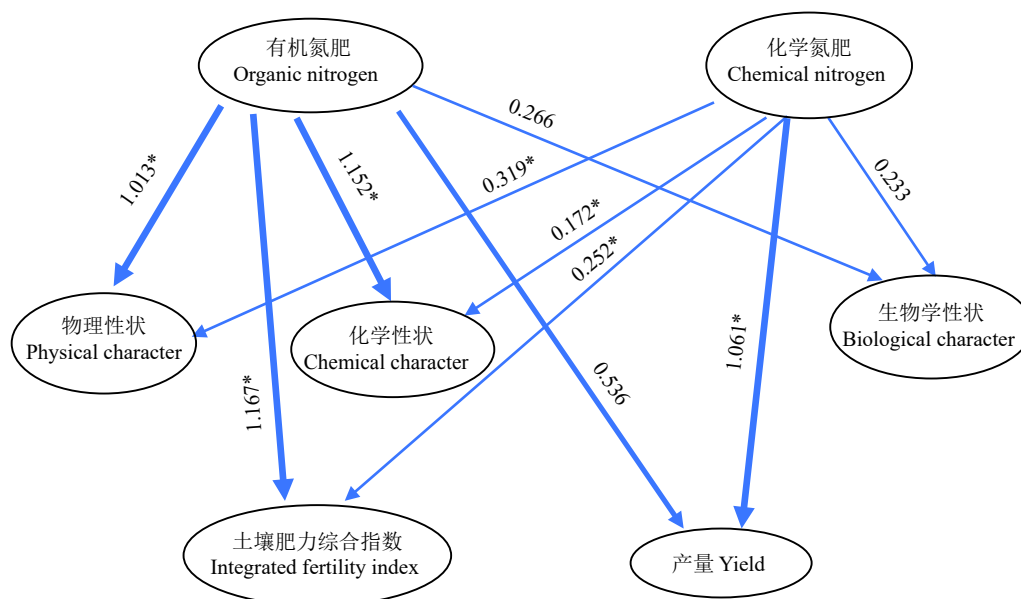


图 4 有机无机氮肥投入对土壤肥力综合指数与产量影响的偏最小二乘路径模型分析

Fig. 4 Effects of organic and chemical fertilizer input on integrated fertility index and rice yield analyzed by the partial least squares path mode (PLS-PM)

注: 路径系数由 1000 次自助抽样法计算得出, 变量间箭头和联线粗细分别表示路径系数方向和大小, 数字旁“*”表示路径系数达显著水平 ($P < 0.05$).

Note: Path coefficients are calculated after 1000 bootstraps. The arrow indicates the effect direction, and the thickness of line between indicators represents the values of path coefficient, the thicker, the higher of the path coefficient, and the “*” beside data indicates significant path coefficient ($P < 0.05$).

大团聚体含量、团聚体平均重量直径、土壤养分、土壤酶活性以及微生物生物量碳氮均有明显提高, 且高比例有机肥配施效果更好, 最终的土壤综合肥力指数 (IFI) 也呈现出一致规律: 所有施肥处理的 IFI 显著高于不施肥处理, 有机肥处理的 IFI 显著高于单施化肥处理, 有机氮配施比例越高 IFI 也越大, 说明 IFI 可以比较准确地反映土壤肥力。

有机肥还可以改善土壤结构, 提高土壤养分含量从而提升土壤肥力^[1, 22], 且随着有机肥施用量的增加其提升效果越明显^[9]。在本研究中, 与单施化肥相比, 配施 50% 及以上有机肥均促进了大团聚体的形成, 提高了土壤结构的稳定性, 配施 25% 有机肥仅显著提高了全磷、有效磷和有效锌含量以及 β -葡糖苷酶活性, 配施 50% 有机肥时显著提高了有机质、全氮、全磷、有效氮、有效磷、速效钾、有效锌、阳离子交换量、微生物生物量碳氮含量以及脲酶、 β -葡糖苷酶活性等 12 项化学与生物学指标, 而 75%ON 和 100%ON 处理显著提高了除土壤全钾含量外的其余 16 项指标, 最终的 IFI 随有机肥配施比例升高而递增, 说明配施有机肥对土壤理化特性与生物学特性均有较好的改善与提高, 利于土壤生态环境的整体提升, 且高比例有机肥的提升效果更好。

高比例有机肥培肥效果更好可能与其带入大量的养分有关。本研究所用猪粪有机肥所含的 N、 P_2O_5 、 K_2O 、有机碳养分极其丰富, 由于所有施肥处理均以等量氮磷钾投入为原则, 以氮素等量为标准计算, 因此, 随着有机肥配施比例的升高, P_2O_5 、 K_2O 、有机碳养分带入量增加, 当配施比例大于 50% 时, 磷、钾养分不同程度地高于单施化肥处理, 相关性分析表明有机质含量与容重呈显著负相关, 与其它指标显著正相关, 说明有机质对提升肥力其余指标也有着重要的影响。因此, 高比例有机肥除了直接带入大量的养分外, 改善土壤结构与提高微生物活性的间接效应也是显而易见的, 可见, 有机肥比例越高, 对土壤理化性状与生物学特性提升效果越好, 这可能正是土壤综合肥力随有机肥比例升高而递增的内在原因。

有机无机肥不同配施比例以及不同施用年限对土壤培肥效果以及作物产量的影响均有差异^[22-25]。在长达 20 年培肥期限时, 有机肥配施比例 70% 对于提高土壤肥力与稻谷产量均达到最佳状态^[26], 研究表明, 有机氮配施化肥氮连续施用 5 年, 有机肥配施比例越高土壤肥力综合指数越高, 而产量则表现为有机肥配施比例在 75% 以上时产量呈下降趋势, 尤

其是早稻更明显,这可能由于有机肥的缓释性导致的当季利用率偏低、养分供应不及时影响产量的提高。因为水稻关键生育期只有几十天,而有机肥的养分分解与释放则是一个漫长的过程,如果在水稻关键生育期有机肥释放的养分不能满足其生长所需,在一定程度上会影响产量的发挥;在早稻生长期,整体气温偏低,不利于有机肥分解,而且早稻生育期较短,因此高比例有机肥的缓慢分解很可能对早稻产量造成不利影响;相比之下,晚稻生长期,气温偏高,利于有机肥分解,加上前茬残留效应,高比例有机肥对晚稻产量的影响小于早稻。本试验采集的土壤样品为晚稻收获后,土壤中的养分含量为肥料的残留量,高比例有机肥处理下土壤中养分残留量也较高,进一步证明在水稻生育期被吸收利用的养分较少,导致有机肥养分残留较多,因此,后续还需要进一步探讨不同有机肥配施比例下有机肥有效养分的释放规律与水稻养分需求规律的吻合性,更好地解释稻田施用适宜比例有机肥提高产量的原因。本研究与已有报道结论不同,可能由于培肥年限差距较大所致,随着培肥时间延长,有机肥处理下土壤中长期积累的有效养分足以在很大程度上满足水稻生长发育需要,则可以同步达到培肥与增产的目的。本试验结果表明,有机氮和无机氮对土壤肥力与产量的影响截然不同。PLS-PM 路径分析说明,有机氮肥与无机氮肥的投入量对土壤肥力的影响均达到显著水平,尤其是有机肥的影响更大,而产量则只受到无机氮肥投入量的显著影响,即化肥对产量的当季贡献占绝对优势,而有机肥对土壤肥力提升极其重要。因此,要兼顾土壤培肥效果与增产效应就需要平衡无机肥与有机肥的投入比例,还要考虑培肥年限的影响。本试验证明,在短期内,有机肥配施比例宜控制在 50% 以下才能达到培肥与稳产双赢目的,随着培肥时间的延长,土壤中养分逐渐累积,可以适当提高有机肥配施比例。

4 结论

有机肥提高土壤肥力的作用大于化肥,化肥对当季水稻产量的贡献远超有机肥,在短期(5 年)内,有机肥在总氮素投入量中的比例控制在 50% 以内,可获得土壤肥力和水稻产量的双赢。

参 考 文 献:

[1] 曹志洪,周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 黄兴成,李渝,白怡婧,等. 长期不同施肥下黄壤综合肥力演变及作物产量响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1484–1491.
- Huang X C, Li Y, Bai Y J, *et al.* Evolution of yellow soil fertility under long-term fertilization and response of crop yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1484–1491.
- [3] 包耀贤,徐明岗,吕粉桃,等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197–4204.
- Bao Y X, Xu M G, Lü F T, *et al.* Evaluation method on soil fertility under long term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [4] 林卡,李德成,张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 736–744.
- Lin K, Li D C, Zhang G L. Literature analysis on soil quality assessment in China based on CNKI database[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 736–744.
- [5] 赵伟霞,栗岩峰,张宝忠,等. 土壤肥力提升原理与技术研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 1–5.
- Zhao W X, Li Y F, Zhang B Z, *et al.* Technologies and mechanisms for improving soil fertility: A Review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 1–5.
- [6] 张小卓,史静,张乃明,等. 云南主要葡萄种植区土壤肥力特征与评价[J]. 土壤, 2014, 46(1): 184–187.
- Zhang X Z, Shi J, Zhang N M, *et al.* Fertility characteristics and evaluation of the wine-growing region of Yunnan[J]. Soils, 2014, 46(1): 184–187.
- [7] 李敏,梁伟健,付时丰,等. 花生缓释专用肥配施根瘤菌菌剂的肥效和增产增效作用研究[J]. 花生学报, 2022, 51(2): 32–38.
- Li M, Liang W J, Fu S F, *et al.* Effects of slow-release peanut fertilizer combined with rhizobium agent on efficiency of fertilizer and yield of peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51(2): 32–38.
- [8] 张江周,刘亚男,高伟,等. 我国香蕉园土壤肥力现状的整合分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(7): 1401–1410.
- Zhang J Z, Liu Y N, Gao W, *et al.* Integrated analysis of soil fertility status in the banana orchards in China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(7): 1401–1410.
- [9] 蔡苗,宋向阳,邓睿. 我国耕地质量监测研究现状及展望——基于 CNKI 数据库文献分析[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(12): 84–86.
- Cai M, Song X Y, Deng R. Research status and prospect of cultivated land quality monitoring in China——literature analysis based on CNKI database[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(12): 84–86.
- [10] 沈仁芳,王超,孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 135–144.
- Shen R F, Wang C, Sun B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “Storing Grain in Land and Technology” [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 135–144.
- [11] 沈仁芳,颜晓元,张甘霖,等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1051–1059.
- Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, *et al.* Status quo and strategic thinking for the development of soil science in China in the new

- era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1051–1059.
- [12] 张桃林. 守护耕地土壤健康支撑农业高质量发展[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 1–4.
- Zhang T L. Protecting soil health of cultivated land to promote high-quality development of agriculture in China[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 1–4.
- [13] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(4): 459–467.
- Zhou J M. Evolution of soil quality and sustainable use of soil resources in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4): 459–467.
- [14] 丁阔, 王雪梅, 陈波浪, 等. 有机肥对库尔勒香梨园土壤养分与综合肥力指数的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(6): 2599–2604.
- Ding K, Wang X M, Chen B L, *et al.* Effects of organic fertilizer on soil nutrient and integrated fertility index of Korla fragrant pear orchard[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(6): 2599–2604.
- [15] 呼娟娟, 陶瑞, 褚贵新. 有机无机肥配合生化抑制剂抑制土壤有机碳的转化[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(1): 19–31.
- Hu J J, Tao R, Chu G X. Partial replacement of inorganic N with cattle manure and combining use of biochemical inhibitors inhibit organic carbon conversion in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 19–31.
- [16] 张俊岭, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 783–796.
- Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, *et al.* Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783–796.
- [17] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3133–3139.
- Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133–3139.
- [18] Inselsbacher E, Umana N H N, Stange F C, *et al.* Short-term competition between crop plants and soil microbes for inorganic N fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 360–372.
- [19] Song W F, Shu A P, Liu J A, *et al.* Effects of long-term fertilization with different substitution ratios of organic fertilizer on paddy soil[J]. *Pedosphere*, 2022, 32(4): 637–648.
- [20] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(6): 1462–1479.
- Niu X S, Ju X T. Organic fertilizer resources and utilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462–1479.
- [21] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(8): 1330–1338.
- Lu W D, Li J H, Luo T, *et al.* Effects of different organic fertilizer replacement rates on wheat yield and soil nutrients over three consecutive years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1330–1338.
- [22] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(7): 8–14.
- Xu M G, Lu C A, Zhang W J, *et al.* Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(7): 8–14.
- [23] 唐丽, 谢勇, 荣湘民, 等. 有机肥不同比例替代化肥氮对水稻产量、氮素吸收与流失风险的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(9): 132–142.
- Tang L, Xie Y, Rong X M, *et al.* Effects of different ratios of inorganic-N substituted by manure on rice yield, nitrogen absorption and nitrogen loss risk[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(9): 132–142.
- [24] Huang L N, Cheng S M, Liu H L. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on growth and nitrogen fate in banana at seedling stage[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113826.
- [25] 汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2014, 20(5): 1178–1185.
- Wang J D, Zhang H, Zhang Y C, *et al.* Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1178–1185.
- [26] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 758–765.
- Hou H Q, Ji J H, Liu X M, *et al.* Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 52(4): 758–765.
- [27] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(4): 904–913.
- Lü Z Z, Wu X D, Hou H Q, *et al.* Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 904–913.
- [28] 万连杰, 李俊杰, 张绩, 等. 有机肥替代化肥技术研究进展[J]. *北方园艺*, 2021, (11): 133–142.
- Wan L J, Li J J, Zhang J, *et al.* Research progress on the technology of organic fertilizer partial substituted for chemical fertilizer[J]. *Northern Horticulture*, 2021, (11): 133–142.
- [29] 雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(9): 1393–1408.
- Lei W Y, Li N, Teng P J, *et al.* Research on the decomposition processes of organic materials and their mechanisms on improving soil fertility in cropland ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(9): 1393–1408.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [31] 张翰林, 郑宪清, 何七勇, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 216–220.
- Zhang H L, Zheng X Q, He Q Y, *et al.* Effect of years of straw

- returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 216–220.
- [32] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 167–169.
- [33] Vance E D, Brggke P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [34] Brookes P C, Landman A, Pruden G. *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837–842.
- [35] Zhang Q, Zhou W, Liang G, *et al.* Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 94: 59–71.
- [36] Li P, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 112–118.
- [37] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326–1333.
- Deng S H, Zeng L T, Guan Q, *et al.* Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in south China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1326–1333.
- [38] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[J]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Xu J M, Zhang G L, Xie Z M, *et al.* Indices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [39] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362–369.
- Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of southeastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(4): 362–369.
- [40] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, *et al.* Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149: 325–334.
- [41] Li P, Wu M, Kang G, *et al.* Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J/OL]. *Geoderma*, 2020, 373: 114416.
- [42] Liebig M A, Varvel G, Doran J W. A simple performance-based index for assessing multiple agro-ecosystem functions[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 313–318.
- [43] 王克孟, 马玉军. 淮阴市高产土壤肥力指标的研究[J]. *土壤*, 1992, 24(5): 239–243.
- Wang K M, Ma Y J. Research on soil fertility indexes in high yield in Huaiyin City[J]. *Soils*, 1992, 24(5): 239–243.
- [44] 余慧敏, 朱青, 傅聪颖, 等. 江西鄱阳湖平原区农田土壤微量元素空间分异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 172–184.
- Yu H M, Zhu Q, Fu C Y, *et al.* Spatial variability characteristics and impacting factors of soil trace elements in Poyang Lake plain, Jiangxi of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 172–184.
- [45] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985, 35(9): 10–21.
- Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, *et al.* A preliminary study on spatial variability of soil characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 35(9): 10–21.
- [46] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 等. 中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性—以河北省为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 6053–6063.
- Cao X H, Long H Y, Zhou J G, *et al.* Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of topsoil carbon, nitrogen and phosphorus in Hebei Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18): 6053–6063.