培肥措施对贫瘠红壤稻田肥力的影响及其评价

阿合古丽·努尔布拉提, 曾希柏, 文炯, 张洋, 徐冰倩, 张苗, 王亚男

引用本文:
阿合古丽·努尔布拉提, 曾希柏, 文炯, 等. 培肥措施对贫瘠红壤稻田肥力的影响及其评价[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3200–3210.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024–1155

阿合古丽·努尔布拉提, 曾希柏, 文炯, 等. 培肥措施对贫瘠红壤稻田肥力的影响及其评价[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3200-3210.

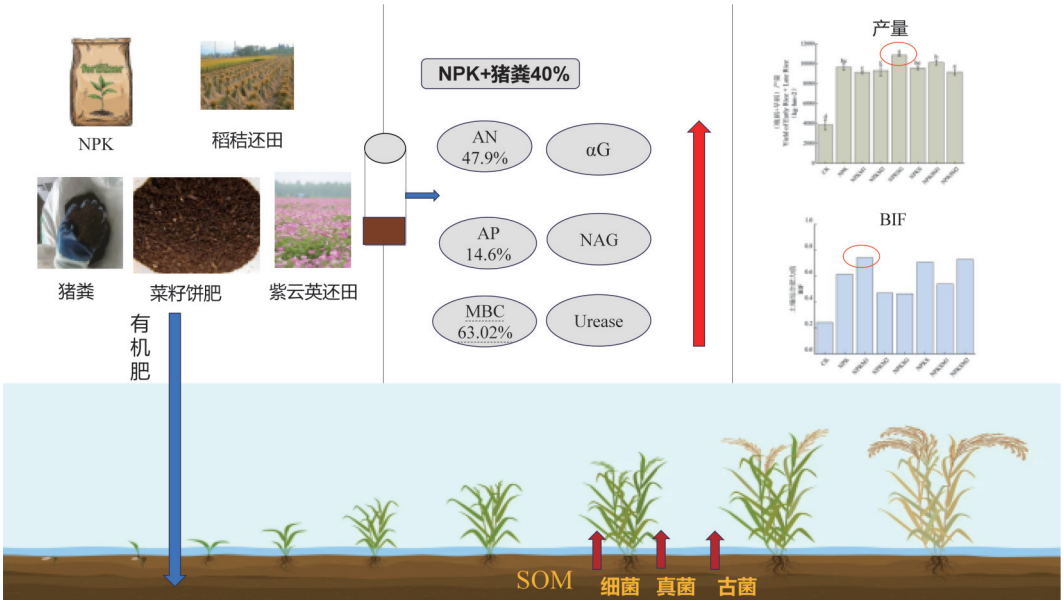
AHEGULI·NUERBULATI, ZENG X B, WEN J, et al. Effects and evaluation of fertility improvement measures on the fertility of depleted red soil paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3200-3210.

开放科学 OSID

培肥措施对贫瘠红壤稻田肥力的影响及其评价

阿合古丽·努尔布拉提[1,2], 曾希柏[1,2], 文炯[2,3], 张洋[1,2], 徐冰倩[1,2], 张苗[1,2], 王亚男[1,2*]

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2.国家农业环境岳阳观测实验站, 湖南 岳阳 414000; 3.岳阳市农业科学研究院, 湖南 岳阳 414000)



摘　要:以湖南岳阳第四纪红壤发育的贫瘠稻田为对象,探究不同培肥处理对土壤肥力的影响,并应用综合肥力指数(BIF)评价不同处理培肥土壤的效果。基于田间试验,设置不施肥、施有机肥、冬种紫云英、秸秆还田等处理,分析不同处理土壤理化性质、酶活性、微生物丰度和微生物量碳氮等的变化,采用主成分分析法建立最小数据集(MDS),应用隶属度函数模型和BIF计算评价不同处理下土壤的综合肥力。结果显示:不同培肥措施均一定程度提高了土壤的综合肥力,与单施化肥(NPK)处理相比,施用氮磷钾化肥并用猪粪替代40%氮素(NPKM1)处理下土壤碱解氮(AN)、有效磷(AP)和微生物量碳含量均显著提高,其提升幅度分别为92.1%、17.1%和75.3%,且土壤脲酶(Urease)、α-1,4-葡糖苷酶和亮氨酸氨肽酶的活性亦有一定幅度增强,但该处理显著降低了β-1,4-葡糖苷酶(βG)和β-1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖酐酶的活性。施用氮磷钾化肥并用发酵菜籽饼肥替代40%氮肥且秸秆发酵还田处理下,细菌、真菌和古菌的数量丰度相对较高。根据相关结果,构建了由土壤可溶性有机碳、AN、铵态氮、AP、容重、βG、酸性磷酸酶、Urease和细菌数量丰度等9个指标组成的MDS,以评价不同处理下土壤综合肥力的提升效果,发现NPKM1处理效果最好,指标值为0.743;施用氮磷钾化肥并早稻秸秆粉碎还田且种植紫云英还田处理下产量最高,为4 707.52 kg·hm^{-2}。综上,

收稿日期:2024-12-27　　**录用日期:**2025-02-13

作者简介:阿合古丽·努尔布拉提(1999—),女,新疆昌吉人,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态与修复。E-mail:2524219060@qq.com

***通信作者:**王亚男　E-mail:wangyanan@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD190120303);江西省重点研发计划"揭榜挂帅"项目(20223BBF61020);中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2021-IEDA)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2021YFD190120303); Jiangxi Province Key Research and Development Program "Leading the Charge with Open Competition" Project (20223BBF61020); Science Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Science (CAAS-ASTIP-2021-IEDA)

对洞庭湖区贫瘠红壤稻田而言，在施用氮磷钾化肥的基础上，施用替代40%氮的猪粪能够达到肥力和产量协同提升的目的，紫云英与秸秆还田联合施用可以达到最好的增产效果。

关键词：有机肥；贫瘠红壤稻田；土壤肥力；培肥

中图分类号：S158.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-2043(2025)12-3200-11 doi:10.11654/jaes.2024-1155

Effects and evaluation of fertility improvement measures on the fertility of depleted red soil paddy fields

AHEGULI·NUERBULATI[1,2], ZENG Xibai[1,2], WEN Jiong[2,3], ZHANG Yang[1,2], XU Bingqian[1,2], ZHANG Miao[1,2], WANG Yanan[1,2*]

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. The National Agricultural Environment Observatory in Yueyang, Yueyang 414000, China; 3. Yueyang Agricultural Research Academy, Yueyang 414000, China)

Abstract: The study was conducted on infertile paddy fields developed from Quaternary red soil in Yueyang, Hunan Province, to investigate the effects of different fertilization treatments on soil fertility. The effectiveness of soil fertilization under different treatments was evaluated using the comprehensive fertility index (BIF). Based on field experiments, treatments including no fertilization, organic fertilizer application, winter planting of Chinese milk vetch, and straw return were set up. Changes in soil physicochemical properties, enzyme activities, microbial abundance, and microbial biomass carbon and nitrogen under different treatments were analyzed. The minimum data set (MDS) was established using principal component analysis, and the comprehensive soil fertility under different treatments was evaluated using the membership function model and the BIF calculation. Different fertilization measures all improve soil comprehensive fertility to varying degrees. Compared with the treatment of applying only chemical fertilizers (NPK), the treatment of applying nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers combined with replacing 40% of nitrogen with pig manure (NPKM1) significantly increases soil alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and microbial biomass carbon content by 92.1%, 17.1%, and 75.3%, respectively. The activities of soil urease, α-1, 4-glucosidase, and leucine aminopeptidase are also enhanced to some extent under this treatment. However, the activities of β-1, 4-glucosidase (βG) and β-1, 4-N-acetylglucosaminidase are significantly reduced. Under the treatment of applying nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers combined with replacing 40% of nitrogen with fermented rapeseed cake fertilizer and returning fermented straw to the field, the abundance of bacteria, fungi, and archaea is relatively higher. Based on the relevant results, MDS consisting of nine indicators, including soil soluble organic carbon, AN, ammonium nitrogen, AP, bulk density, βG, acid phosphatase, urease, and bacterial abundance, is constructed to evaluate the improvement of soil comprehensive fertility under different treatments. It is found that the NPKM1 treatment performs the best, with an index value of 0.743. The treatment of applying nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers combined with returning crushed early rice straw and planting Chinese milk vetch achieves the highest yield, reaching 4 707.52 kg·hm^{-2}. For the barren red clay rice fields in the Dongting Lake area, applying pig manure to replace 40% of the nitrogen, based on the use of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers, achieves a synergistic increase in fertility and yield. The combined application of alfalfa and straw returning to the fields achieves the best yield increase effect.

Keywords: organic fertilizer; impoverished red soil paddy fields; soil fertility; fertilization measures

长江中下游地区属亚热带湿润气候，耕地面积约占全国的20%，是我国的重要“粮仓”之一，但该地区超过65%的耕地为中低产田[1]，特别是新开垦的水稻土，由于成土母质的肥力不高，大多肥力低、结构差、生物活性弱，水稻产量低下[2]，是所在地区中典型的低产田，也是耕地培肥的重点之一，因此水稻土培肥对所在地区粮食增产意义重大。农业生产中常通过施用有机肥(物料)培肥土壤，常用的有机物料包括秸秆、绿肥和猪粪有机肥等[3]。研究表明，施用有机物料可提高土壤有机质含量、增加土壤微生物数量和多样性、增强土壤酶活性、提升土壤氮磷钾等养分含量，从而改善土壤肥力[4]，对促进农田生态系统可持续发展具有重要意义。但也有研究认为，施用有机肥并未显著改变水稻土中的微生物群落结构[5]。相对于施用化肥，有机物料与化肥配合施用可以很好地结合有机物料养分的持久性与化肥中养分的速效性，实现土壤物理结构改善、肥力提升、作物增产、农业有机废弃物资源化利用等多重效益[6]，但是有机肥和化肥一样，不合理施用将会对土壤环境造成污染[7]，因此选用合理有效的培肥措施对土壤提质增效具有重要作用。土壤作为一个独立且复杂的自然体，其肥力状况与物理、化学和生物学性质密切相关，但以往针对不同培肥措施下土壤肥力演变的评价主要是应用物理或化学指标，而对土壤中最活跃、与肥力变化响应最密切的生物学指标，则评价最少[8]。2003年，Abbott和Murphy[9]提出了土壤生物肥力的概念，认为土壤生物

肥力是指土壤中生物对土壤肥力的影响和贡献，并指出在土壤物理、化学和生物肥力评价体系中，作为土壤生态系统动力的土壤生物组分所表征的生物肥力是处于中枢和核心地位的。因此，本研究认为即在综合考虑土壤物理和化学指标的基础上，筛选出合适的生物指标来表征土壤的生物肥力，通过综合各指标结果，最后得出土壤对应的综合肥力。目前，常采用全数据集和最小数据集（MDS）两种方法筛选和构建土壤综合肥力评价体系指标。随着研究的深入，为减少土壤样品的检测成本、提高效率，通常采用MDS法[10]。本研究以湖南岳阳第四纪红土母质发育的贫瘠稻田为对象，分析施用不同种类有机肥、冬种紫云英、秸秆还田等不同培肥措施下土壤养分、酶活性和微生物量碳氮、微生物丰度及水稻产量等指标，应用主成分分析方法确定MDS，计算土壤综合肥力指数，通过分析相关指标及综合肥力指数的变化，比较不同处理的培肥效果。通过研究，系统阐释不同措施对贫瘠稻田土壤的培肥效果，为所在区域贫瘠稻田地力和产能协同提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设置在湖南岳阳国家农业环境岳阳观测实验站（简称岳阳实验站）东面的岳阳县荣家湾镇洞庭村（28°57′N、112°44′E），该地属于东亚季风气候区，年均降水量为1 304.4~1 582.5 mm，年均气温16.8~17.5 ℃，年日照时数1 562.6~1 690.6 h，土壤类型为第四纪红土发育的水稻土。供试土壤的基本理化性质为pH值5.7、有机质8.46 g·kg^{-1}、阳离子交换量18.5 cmol·kg^{-1}、全氮0.597 g·kg^{-1}、全磷0.449 g·kg^{-1}、全钾16.52 g·kg^{-1}、碱解氮50 mg·kg^{-1}、有效磷0.3 mg·kg^{-1}、速效钾82 mg·kg^{-1}，土壤具有酸、瘦等低产田的基本特征，有效磷含量很低。

1.2 试验设计

试验小区面积24 m^2，每个处理3次重复，随机区组排列。设置8个处理，分别为：（1）不施肥（CK）；（2）单施化肥（NPK）；（3）化肥、早晚稻配施猪粪替代40%化学氮肥、秸秆不还田（NPKM1）；（4）化肥、早晚稻配施发酵菜籽饼肥替代40%氮肥、秸秆不还田（NPKM2）；（5）化肥、早稻秸秆粉碎还田、晚稻秸秆不还田、晚稻收获后种紫云英并在第二年早稻时翻耕到稻田中作为基肥（NPKSG）；（6）化肥、早稻秸秆粉碎还田、晚稻秸秆发酵还田（NPKS）；（7）早稻单施化肥、晚稻配施猪粪肥替代40%氮肥、早稻秸秆不还田、晚稻秸秆发酵后于第二年早稻还田（NPKSM1）；（8）早稻单施化肥、晚稻配施发酵菜籽饼肥替代40%氮肥、早稻秸秆不还田、晚稻秸秆发酵后于第二年早稻还田（NPKSM2）。早稻品种为湘早籼45号，晚稻品种为盛泰优018。

各处理施肥量为早稻氮素165 kg·hm^{-2}、P_2O_5 120 kg·hm^{-2}和K_2O 120 kg·hm^{-2}，晚稻氮素180 kg·hm^{-2}、P_2O_5 90 kg·hm^{-2}和K_2O 150 kg·hm^{-2}。替代的猪粪中总碳为34.93%，总氮为2.37%，总磷为2.2%，总钾为0.92%，水分为63.63%，以总氮进行换算每个小区早稻猪粪施用量10.52 kg，晚稻施用量11.4 kg。菜籽饼肥中总碳为26.82%，总氮为3.47%，总磷为4.18%，总钾为5.61%，水分为34.02%，以总氮进行换算每个小区早稻菜籽饼肥施用量13.41 kg，晚稻施用量14.57 kg。试验小区于2022年7月13日移栽晚稻、9月28日收割；晚稻收获后除NPKSG处理种植紫云英外，其余各处理均为冬闲；第二年早稻于2023年4月27日移栽，7月18日收割。

1.3 土样采集与指标的测定方法

1.3.1 土样采集

本研究按照一个试验周期采样，即在2022年晚稻收获后采集各处理0~20 cm和20~40 cm土层土壤，2023年7月18日早稻收割后再分别采集各处理0~20 cm和20~40 cm土层土壤，在土壤样品采集的同时用环刀采集土壤样品，测定土壤容重。各小区分别采集1.5 kg左右新鲜土样，其中150~200 g土壤置于-80 ℃冷藏箱中冷藏，用于测定微生物数量等；500 g放入4 ℃冰箱，用于测定酶活性和微生物量碳氮；剩余土壤自然晾干并过2 mm尼龙筛后常温保存，用于土壤养分等理化指标的测定。

1.3.2 土壤理化性质的测定

土壤pH值用pH计测定（土∶水为1∶2.5）；土壤容重（BD）用环刀法测定；土壤有机质（SOM）用重铬酸钾外加热法测定；土壤有效磷（AP）用$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定；全氮（TN）用凯氏消煮法测定；碱解氮（AN）用碱解扩散法测定；可溶性有机碳（DOC）用水浸提法-TOC仪测定；铵态氮、硝态氮采用2 mol·L^{-1} KCl浸提、流动分析仪测定；土壤铝-磷（Al-P）用NH_4Cl浸提-钼锑抗比色法测定；土壤铁-磷（Fe-P）用饱和NaCl浸提-钼锑抗比色法测定；其他理化性质测定方法参考《土壤农化分析》[11]。

1.3.3 水稻产量测定

早稻成熟后,每个小区分别选择2 m²人工收割,经脱粒机脱粒并去除空壳等杂物后,装于网袋中贮藏,自然风干后称质量并计算单位面积水稻产量。

1.3.4 土壤酶活性的测定

早稻收获时采集各处理0~20 cm土层土壤,采用Solarbio科技有限公司提供的酶活性检测试剂盒测定脲酶(Urease)、蔗糖酶(Invertase)和酸性磷酸酶(ACP)活性;采用改进的微孔板荧光法测定α-1,4-葡糖苷酶(αG)、β-1,4-葡糖苷酶(βG)、亮氨酸氨肽酶(LAP)和β-1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖酐酶(NAG)活性[12]。

1.3.5 土壤微生物量碳氮及微生物数量丰度的测定

早稻收获时采集各处理0~20 cm土层土壤,土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-浸提法,将浸提液过滤后用总有机碳分析仪(MultiN/C2100)测定[13]。

采用Fast DNA试剂盒(MP Biomedicals,Cleveland,美国)对土壤样品进行DNA提取,使用分光光度计测定DNA浓度和纯度。使用实时荧光定量PCR检测细菌、真菌和古菌的拷贝数,细菌引物为515F(GTGCCAGCMGCCGCGGTAA)、806R(GGACTACHVGGGTWTCTAAT),真菌引物为ITS7F(GTGARTCATCGARTCTTTG)、ITS4(TCCTCCGCTTATTGATATGC),古菌引物为Arch519F(CAGCCGCCGCGGTAA)、Arch915R(GTGCTCCCCCGCCAATTCCT)。实时荧光定量PCR反应体系包括6.4 μL ddH_2O,10 μLSYBR Premix Ex Taq缓冲液,0.8 μL前后引物和2μL DNA模板(稀释10倍)。先通过连接转化构建含有目标片段的质粒,然后测定质粒浓度,按10倍浓度逐级稀释配制标准曲线,以灭菌水为模板作为阴性对照,以细菌的退火温度为50 ℃、真菌退火温度53 ℃、古菌退火温度55 ℃进行扩增。扩增结束后,通过溶解曲线以确保细菌、真菌和古菌的特异性扩增,每个样品重复3次,保证扩增效率在100%±10%范围、标准曲线的R^2值在0.99以上,将测定拷贝数作为微生物数量丰度值。

1.4 贫瘠稻田土壤综合肥力指标的筛选及评价

1.4.1 土壤综合肥力指标的确定

将所测的土壤理化及生物指标共23个作为全数据集(TDS),并采用Pearson相关性和主成分分析法(PCA),结合Norm值筛选得到MDS指标。Norm值的计算可以尽最大可能避免数据冗余,并保留土壤的解释信息,计算公式为:

$$N_{jk}=\sqrt{\sum_{1}^{k}(u_{jk}^{2}\lambda_{k})} \tag{1}$$

式中:k为特征值≥1的主成分个数;λ_k表示第k个主成分的特征值;u_{jk}代表j指标的因子载荷值;N_{jk}是j指标在k个主成分的累加因子载荷值。

MDS法是采用全量数据集中有显著差异的指标进行主成分分析,选出每个主成分下因子载荷绝对值在最大因子载荷10%范围内的高权重变量并结合Pearson相关性,如果有显著相关性则选择Norm值最高的进入MDS[14-15]。

1.4.2 权重的确定

采用多元分析中的主成分分析对各指标数据进行公因子方差计算,以各指标公因子方差值占公因子方差总和的比例作为各指标的权重。

1.4.3 隶属度计算

计算隶属度函数值是将土壤综合肥力评价指标测定值,通过相应的隶属度函数转化为0~1之间的无量纲值。隶属度函数一般有抛物线型、正S型与反S型3种[16],本研究中采用正S型(指标越大越好)和抛物线型(在一定范围内最好),其中pH值、Fe-P、Al-P和BD采用抛物线型,其他指标均采用正S型。

正S型计算公式:

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\leqslant L\\ 0.1+0.9\times\dfrac{x-\mathrm{L}}{\mathrm{U}-\mathrm{L}} & L<x<U\\ 1.0 & x\geqslant U\end{cases} \tag{2}$$

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。

抛物线型计算公式为:

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\leqslant L,x\geqslant U\\ 0.1+0.9\times\dfrac{x-\mathrm{L}}{O_1-\mathrm{L}} & L<x<O_1\\ 1.0 & O_1\leqslant x\leqslant O_2\\ 1-0.9\times\dfrac{x-O_2}{U-O_2} & O_2<x<U\end{cases} \tag{3}$$

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。

1.4.4 土壤综合肥力评价方法

为表征不同有机培肥措施下土壤的综合肥力状况,利用模糊数学中的加权和法,建立土壤肥力指数模型,将所选单个指标的评价结果转换为由各评价指标相结合,包括土壤物理、化学和生物肥力特征的土壤综合肥力评价指数。公式如下:

$$BIF=\sum_{i}^{n}C_i k_i \quad (4)$$

式中：BIF为土壤综合肥力指数；C_i为各个评价指标的隶属度值；k_i为第i个评价指标的权重；n为评价指标的个数。BIF值在0~1之间，数值越高，表示土壤综合肥力越高。

1.5 数据统计与分析

采用Excel 2016进行数据整理，采用SPSS 25.0对土壤理化指标、酶活性、微生物量碳氮和微生物数量丰度数据进行方差分析及相关性分析，对MDS指标数据进行降维因子分析得到主成分，采用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻产量

为了阐明不同施肥处理对水稻生长的影响，对晚稻和早稻产量进行了分析。比较发现，经过不同的培肥处理后晚稻和早稻产量均有显著变化（表1）。晚稻产量在NPKS处理下最高，为6 235.10 kg·hm^{-2}，显著高于NPKM1和NPKSM2，分别增加了14.2%和13.8%，其次是NPKSG处理；对于早稻，NPKSG处理下产量最高，为4 707.52 kg·hm^{-2}，显著高于NPKM2和NPKS，分别增加了32.4%和41.6%。从不同处理下早稻+晚稻的产量结果来看，同样NPKSG处理最高，且显著高于其他处理，表明冬种紫云英增产效果最好。

2.2 不同处理对土壤相关理化性质的影响

本试验重点分析了早稻收获期土壤0~20 cm和20~40 cm土壤理化性质的变化。各处理经过1 a栽培水稻后，其理化性质出现了较大的差别（表2）。0~20 cm土层中，各处理均对土壤养分含量具有显著影响（P<0.05），虽然pH值和BD没有显著差异，但土壤养分指标差异显著，且与CK相比NPKM2处理下SOM、TN、NH_4^+-N含量均显著提高。与NPK相比，NPKSM1和NPKM2处理显著提高了SOM的含量，分别提高了20.8%和28.6%，且以NPKM2处理下SOM含量最高，为13.12 g·kg^{-1}；NPKM2、NPKSM2处理提高了NH_4^+-N含量，与NPK相比，分别显著提高了12.8%和15.3%；处理NPKM2、NPKSM2和NPKSG处理显著提高了TN含量，其中NPKSG与NPK处理相比，土壤TN含量提高了20.6%；NPKM1处理的AN和AP含量均显著提高，比NPK处理分别提高了92.1%和17.1%；Fe-P和Al-P在不同处理之间差异不显著。与原土的养分含量相比较，NPKSM2处理显著提高SOM和TN含量，分别提高了35.5%和31.4%，NPKM1、NPKSM1和NPKSM2处理显著提高了AN含量。比较两个土层中养分含量差异可知，不同土层间SOM、TN、AN、AP、DOC和Fe-P含量表现为0~20 cm高于20~40 cm。

表1 不同处理下晚稻和早稻的产量

Table 1 Yield of late rice and early rice under different treatments

处理 Treatment	晚稻产量 Yield of late rice/(kg·hm^{-2})	早稻产量 Yield of early rice/(kg·hm^{-2})	早稻+晚稻产量 Yield of early rice+late rice/(kg·hm^{-2})
CK	1 853.85c	1 987.51c	3 841.36d
NPK	5 826.05ab	3 808.35ab	9 634.40bc
NPKM1	5 458.00b	3 657.52ab	9 115.52c
NPKM2	5 741.00ab	3 555.02b	9 296.02c
NPKSG	6 124.10a	4 707.52a	10 831.62a
NPKS	6 235.10a	3 325.02b	9 560.12bc
NPKSM1	5 985.05ab	4 111.69ab	10 096.74b
NPKSM2	5 478.00b	3 660.02ab	9 138.02c

注：同列不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among fertilization treatments at 0.05 level. The same below.

2.3 不同处理对土壤酶活性和微生物量碳氮的影响

不同处理下0~20 cm土层土壤的酶活性亦出现了较大差异（表3）。从表3中可以看出，NPKM1处理与NPK处理相比显著提高了土壤中Urease和LAP的活性，分别提高了234.8%和124.5%，但却显著降低了βG和NAG的活性。同时，NPKSM1处理较NPK处理显著提高Urease的活性88.8%。Invertase的活性在各处理间差异不显著。综上可知，在施用化肥的同时，配施猪粪有机肥可以显著提高土壤中碳氮磷循环相关酶的活性。

对早稻土壤收获后0~20 cm土壤微生物量碳氮含量进行比较分析（图1），其结果显示：与NPK处理相比，NPKSG、NPKSM1处理的MBC含量显著降低（P<0.05），但两季均配施有机肥处理的NPKM1、NPKM2中MBC含量显著高于CK处理和NPK处理（P<0.05），与NPK相比分别增加了75.3%、20.1%。MBN含量在CK处理中最高，为22.12 mg·kg^{-1}，但有机培肥管理下土壤中的MBN含量均呈现出一定程度的降低，其中NPKSG和NPKSM1处理显著降低了MBN的含量，较CK分别降低了85.1%和57.5%，较NPK处理分别降低了79.6%和41.8%。

2.4 不同处理对土壤微生物数量丰度的影响

本试验通过定量PCR技术分析了不同类型有机肥处理对早稻收获期土壤0~20 cm土层细菌、古菌和

表2 早稻土壤不同处理下不同土层土壤pH值和养分含量

Table 2 Soil pH and nutrient content in different soil layers under various treatments for early rice

处理 Treatment	pH	容重 BD/ (g·cm^{-3})	有机质 SOM/ (g·kg^{-1})	全氮 TN/ (g·kg^{-1})	碱解氮 AN/ (mg·kg^{-1})	有效磷 AP/ (mg·kg^{-1})	可溶性有机碳 DOC/ (mg·kg^{-1})	难溶性铁磷 Fe-P/ (mg·kg^{-1})	难溶性铝磷 Al-P/ (mg·kg^{-1})	硝态氮 NO_3^--N/ (mg·kg^{-1})	铵态氮 NH_4^+-N/ (mg·kg^{-1})
0~20 cm											
CK	5.85a	1.43a	10.74bc	0.57c	32.67d	21.17b	21.65b	189.03a	35.30a	1.76c	7.19b
NPK	5.85a	1.48a	10.20c	0.63c	44.10bcd	22.58b	26.75ab	221.31a	35.82a	5.37a	7.18b
NPKM1	5.89a	1.41a	10.71bc	0.75b	84.70a	26.45a	27.78ab	217.66a	37.18a	1.36c	7.85ab
NPKM2	5.98a	1.44a	13.12a	0.87a	41.07cd	22.34b	26.02ab	188.80a	35.96a	1.90c	8.10a
NPKSG	5.78a	1.47a	10.52c	0.76b	45.03bcd	21.46b	25.85ab	163.85a	36.90a	1.98c	7.52ab
NPKS	5.79a	1.44a	11.85ab	0.74b	32.90d	24.58a	25.16ab	212.49a	36.28a	1.80c	7.90ab
NPKSM1	5.59a	1.42a	12.32a	0.82ab	59.50bc	20.67b	30.00a	216.36a	36.32a	1.65c	7.20b
NPKSM2	5.94a	1.44a	9.64c	0.86a	61.60b	21.33b	27.06ab	192.80a	37.16a	4.27b	8.28a
20~40 cm											
CK	5.74c	—	6.77b	0.47a	17.73b	18.57ab	14.93b	166.65ab	42.92a	3.13ab	8.39a
NPK	5.80c	—	7.92b	0.55a	24.27b	21.30a	15.67b	175.21ab	43.24a	2.64ab	8.37a
NPKM1	5.81c	—	4.36c	0.49a	14.47b	19.06ab	15.25b	132.63b	43.23a	2.85ab	8.49a
NPKM2	5.84c	—	7.11b	0.52a	39.67a	19.82ab	17.08b	202.63a	42.75a	3.87a	7.29a
NPKSG	6.12ab	—	9.94a	0.53a	15.63b	19.10ab	21.85a	156.13ab	42.84a	3.93a	7.92a
NPKS	6.19a	—	5.52bc	0.52a	21.00b	17.97ab	14.10b	165.32ab	43.10a	1.48b	7.59a
NPKSM1	5.82c	—	5.57bc	0.55a	16.33b	17.90ab	16.13b	163.32ab	41.80a	1.30b	7.66a
NPKSM2	5.94bc	—	6.07bc	0.48a	12.60b	17.84b	16.50b	162.40ab	42.87a	1.73b	7.97a

表3 不同处理下早稻收获期0~20 cm土层土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activity in the 0-20 cm layer at harvest of early rice under different treatments

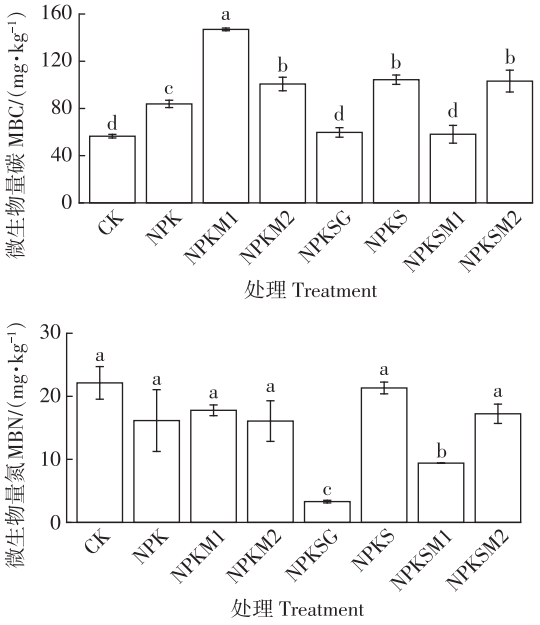
处理 Treatment	蔗糖酶 Invertase/ (mg·d^{-1}·g^{-1})	脲酶 Urease/ (μg·d^{-1}·g^{-1})	酸性磷酸酶 ACP/ (nmol·d^{-1}·g^{-1})	β-1,4-葡糖苷酶 βG/ (nmol·h^{-1}·g^{-1})	α-1,4-葡糖苷酶 αG/ (nmol·h^{-1}·g^{-1})	亮氨酸氨肽酶 LAP/ (nmol·h^{-1}·g^{-1})	β-1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖酐酶 NAG/ (nmol·h^{-1}·g^{-1})
CK	6.07a	17.10d	220.61b	161.84d	20.06cd	7.49a	67.67cd
NPK	6.27a	62.86c	234.24ab	288.73a	28.56a	3.95b	133.00a
NPKM1	6.27a	210.47a	237.71ab	233.63b	29.83a	8.87a	85.58b
NPKM2	6.10a	131.93b	234.79ab	167.68cd	27.74ab	1.75c	62.07d
NPKSG	6.33a	180.51a	233.99ab	185.25cd	18.56d	1.55c	57.03d
NPKS	6.40a	172.42a	246.76ab	188.27c	18.22d	1.46c	80.89c
NPKSM1	6.49a	118.70b	251.53a	235.59b	25.94b	1.98c	116.57a
NPKSM2	6.33a	128.12b	247.46ab	243.48b	22.41c	5.04b	79.98c

真菌数量丰度的影响(图2)。结果表明,不同有机培肥处理下,土壤微生物的数量丰度差异显著(P<0.05)。与CK处理相比,NPK、NPKM1、NPKS和NPKSM2均显著提高了土壤中细菌、古菌和真菌的数量丰度。而与NPK处理相比,不同培肥措施对微生物数量丰度的影响存在差异。具体而言,与NPK相比,NPKM2、NPKSG和NPKSM1显著降低了细菌、古菌和真菌的数量丰度,其中NPKSG的降低效果最为显著,NPKM1在降低细菌丰度的同时却增加了古菌和真菌的数量丰度。与其他处理不同的是,NPKSM2处理中细菌、古菌和真菌的数量丰度显著高于NPK处理。

2.5 稻田土壤综合肥力指标的建立及不同处理效果评价

通过比较不同有机肥处理下土壤养分、酶活性、微生物碳氮含量和微生物数量变化可知,不同有机肥措施对相关指标的影响规律并不一致,仅基于单个指标的变化很难推荐出一种最佳的配施方案,因此有必要通过构建一套贫瘠稻田土壤综合肥力评价方法,用于分析不同培肥措施对土壤肥力的综合影响,推荐较优的培肥措施。

利用SPSS软件将早稻收获期土壤测定的23个指标,按照土壤理化性质、酶活性、微生物碳氮量及微



不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著(P<0.05)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different fertilization treatments at 0.05 level. The same below.

图1 不同处理下早稻0~20 cm土层微生物量碳氮

Figure 1 Microbial biomass carbon and nitrogen in the 0–20 cm soil layer of early rice under different treatments

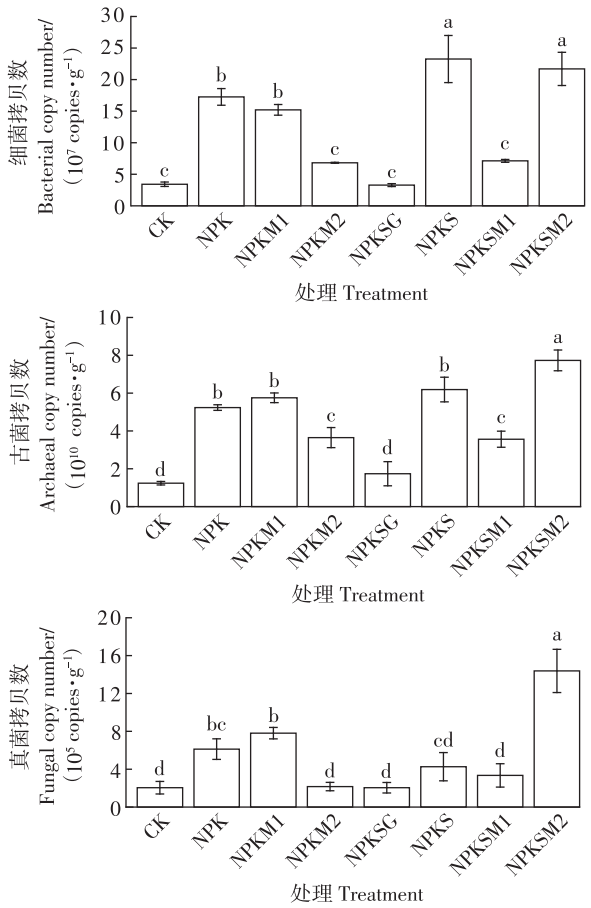


图2 不同处理下早稻0~20 cm土层土壤细菌、古菌和真菌数量丰度

Figure 2 Different treatments on the abundance of soil bacteria, archaea, and fungi in the 0–20 cm layer of early rice

生物数量3个部分进行分类，并进行主成分分析及Pearson相关性分析。根据MDS的建立原则，将各主成分中载荷绝对值大于0.5的指标分为一组，按照载荷值最大的选入MDS，当一组中高因子载荷量指标为多个且指标间具有相关性时结合Norm值大小及相关性进行指标选取。

从理化指标的主成分分析结果可知（表4），根据特征值≥1的提取原则得到5个主成分，累计贡献率为76.420%。第1组TN和DOC的载荷值最高且一样，因TN与SOM及DOC呈现显著相关性，将Norm值大的DOC选入MDS；第2组中pH载荷值最高，但因为pH与AN呈现显著相关性，因此根据Norm值选取AN进入MDS；第3组中选载荷值最大的NH_4^+-N进入MDS；第4组选载荷值最大的AP进入MDS；第五组选土壤BD进入MDS。因此，最终确定进入MDS的理化指标为DOC、AN、NH_4^+-N、AP和BD共5个指标。

酶活性指标主成分分析结果如表5所示，共有3组主成分，累计贡献率达到75.974%。第1组βG与αG和NAG均具有极显著相关性，选Norm值大的βG进入MDS；第2组Invertase载荷值最高，但因其与ACP具有极显著相关性，且考虑其值在各处理中差异不显著，故选取ACP进入MDS；第3组选Urease进入MDS。

微生物量碳氮和微生物数量的主成分分析如表6所示，仅有1个主成分，累计贡献率为65.893%。载荷值大于0.5的指标有MBC、MBN和细菌、真菌、古菌数量丰度，载荷值最高的古菌与真菌、细菌数量丰度及MBC均有极显著相关性，古菌和细菌的载荷值均大于0.9，考虑到以往经验值选取细菌数量丰度进入MDS。

综上，根据土壤理化性质、酶活性、微生物量及微生物数量丰度3个部分的结果，最终确定的MDS指标为DOC、AN、NH_4^+-N、AP、BD、βG、ACP、Urease和细菌数量丰度共9个指标。

根据隶属度的计算结果和MDS权重的数值代入公式（4）计算，结果如表7所示。从各处理的计算结果看，NPKM1处理下稻田土壤的综合肥力值（*BIF*）最高，为0.743，显著高于NPK处理的0.616和CK处理的0.243。其次，NPKSM2和NPKS处理下稻田土壤的*BIF*指数较高，分别为0.730和0.708。虽然依据本试验相关结果构建的土壤肥力评价方法中，NPKSG处理下土壤综合肥力的提升效果较差，其*BIF*指数仅为

表4 土壤理化指标主成分分析

Table 4 Results of principal components analysis of soil fertility indicators

指标 Index	主成分 Principal Component					公因子方差 Communality	Norm值	权重 Weight
	1	2	3	4	5			
TN	0.750	0.221	−0.303	−0.332	0.208	0.856	1.32	0.102
AN	0.475	0.571	0.075	−0.046	−0.398	0.717	1.13	0.085
SOM	0.570	−0.405	−0.236	0.306	0.384	0.785	1.19	0.093
NO_3^--N	−0.388	0.376	0.339	−0.533	−0.103	0.702	1.11	0.083
NH_4^+-N	0.185	0.389	−0.757	−0.184	−0.072	0.799	1.19	0.095
DOC	0.750	0.082	0.407	−0.371	0.093	0.881	1.34	0.105
AP	0.322	0.404	0.047	0.685	0.016	0.738	1.10	0.088
pH	−0.308	0.618	−0.269	−0.077	0.295	0.642	1.06	0.076
Fe-P	0.358	0.159	0.663	0.260	−0.244	0.721	1.13	0.087
Al-P	−0.300	0.580	0.011	0.488	0.156	0.689	1.09	0.082
BD	−0.082	0.204	0.478	−0.132	0.763	0.877	1.08	0.104
特征值	2.283	1.787	1.750	1.459	1.127			
贡献率/%	20.756	16.243	15.912	13.263	10.246			
累计贡献率/%	20.756	36.999	52.911	66.174	76.420			

表5 土壤酶活性指标主成分分析

Table 5 Principal component analysis of soil enzyme activity indicators

指标 Index	主成分 Principal component			公因子方差 Communality	Norm值	权重 Weight
	1	2	3			
ACP	0.490	0.673	0.045	0.695	1.20	0.131
Urease	0.024	0.543	0.741	0.845	1.07	0.159
βG	0.888	−0.186	0.013	0.824	1.39	0.155
αG	0.629	−0.469	0.384	0.763	1.23	0.143
LAP	0.028	−0.593	0.476	0.579	0.96	0.109
NAG	0.851	−0.223	−0.330	0.882	1.38	0.166
Invertase	0.444	0.727	−0.057	0.729	1.22	0.137
特征值	2.347	1.932	1.039			
贡献率/%	33.533	27.602	14.839			
累计贡献率/%	33.533	61.135	75.974			

表6 微生物数量丰度及微生物量碳氮指标主成分分析

Table 6 Principal component analysis of microbial abundance and microbial biomass carbon and nitrogen indicators

指标 Inden	主成分 Principal component 1	公因子方差 Communality	权重 Weight	Norm值
MBC	0.786	0.617	0.187	1.42
MBN	0.530	0.281	0.085	0.96
细菌丰度	0.920	0.847	0.257	1.67
真菌丰度	0.805	0.647	0.196	1.46
古菌丰度	0.950	0.902	0.274	1.72
特征值	3.295			
贡献率/%	65.893			
累计贡献率/%	65.893			

0.465,但该处理下的早稻产量却是最高,为4 707.52 kg·hm^{-2}(表1),显著高于CK与NPK处理,也比NPKM1处理高。

3 讨论

3.1 不同培肥措施对土壤理化性质及生物学性质的影响

本试验通过对比不同有机肥处理对红壤贫瘠稻田的培肥效果发现,与NPK处理相比,不同有机肥处理对0~20 cm土层pH影响不显著,而0~20 cm土层养分含量提高较明显,且NPKM2处理在提升SOM和TN含量方面发挥重要作用,这主要是由于菜籽饼肥本身有机质含量高,且含N、P、K元素较多[17]。试验发现NPKM1处理显著了提高AN和AP含量,猪粪中富含大量的P素,猪粪经发酵腐熟后因C/N较低,还田后在土壤微生物的分解作用下利于有机态氮向矿质态氮转化,使得AN含量得以提升[18]。本试验显示,在秸秆还田的处理下,NPKSM2能显著提高NH_4^+-N的含量,这是因为秸秆中的碳水化合物和其他成分可为土壤微生物提供丰富的食物来源,增强微生物活性,微生物在分解秸秆过程中,会将有机氮转化为NH_4^+-N,从而提高了NH_4^+-N含量[19];而NPKSM1处理提高DOC含量的程度优于其他措施,秸秆还田的初始阶段,秸秆中可溶性有机化合物迅速分解,导致秸秆碳释放率显著提高,从而显著提升了土壤中DOC的含量[20]。同

表7 不同处理的土壤综合肥力指数值

Table 7 Comprehensive soil fertility index values of different treatments

处理Treatment	综合肥力值*BIF*
CK	0.243
NPK	0.616
NPKM1	0.743
NPKM2	0.469
NPKSG	0.465
NPKS	0.708
NPKSM1	0.539
NPKSM2	0.730

样，在秸秆还田的条件下施用菜籽饼肥的NPKSM2处理能显著提高土壤中的NH_4^+-N，而施用猪粪的NPKSM1处理则主要提高了DOC的含量。这可能与菜籽饼肥本身富含氮养分有关[21]；DOC的增加程度与有机物的化学组成密切相关，猪粪有机肥中的有机质含有种类多样的可溶性有机物，包括蛋白质、纤维素、腐殖质和各种酶等，因此更有利于DOC的积累[22]。

土壤微生物量碳氮和酶活性是土壤综合肥力评价的关键指标[23]。本试验表明，NPKM1处理显著提高了MBC含量，这主要是因为猪粪的养分、有机碳和活性有机碳组分含量高于其他物料[24-25]。另外，与NPK相比，NPKS处理提高了MBN含量，但却降低了βG和NAG的活性，这是因为粉碎的秸秆更易于微生物分解，能够更快地提高土壤MBN[26]，而由于秸秆还田时间较短，βG和NAG活性没有显著提高。此外，土壤酶活性与微生物丰度存在密切关系，微生物丰度的增加通常会导致酶活性的提高[27]。本试验结果中不同有机肥处理对土壤细菌、真菌和古菌丰度的影响程度各异。其中NPKSM2处理显著提高了细菌、真菌和古菌的丰度，作物秸秆的投入为土壤微生物生长提供了营养[28]，同时土壤微生物对秸秆有强烈的响应[29]。相对而言，NPKSG处理却抑制了细菌、真菌和古菌的丰度，这与万水霞等[30]的研究结果相反。这种抑制可能是因为冬季种植的紫云英根系分泌的有机酸和糖类等对微生物有抑制作用，从而改变了土壤微生物丰度。

3.2 土壤培肥与作物产量的相互协同

不同培肥方式效果差异很大，但对于农业生产而言，既要培肥土壤，又要保证作物高产，这就需要将二者相互协同。本试验结果表明，NPKM1处理土壤综合肥力指数最高，但产量较低，而NPKSG处理土壤综合肥力指数最低，产量最高。本试验中除了理化指标，更加注重土壤生物指标对土壤综合肥力的影响。采用模糊数学法计算土壤综合肥力，该方法受各肥力指标所赋予权重值的影响。另外，主成分分析法虽然可以客观反映土壤肥力状况，但是会受到样本和变量的限制，可能会导致MDS指标的代表性不强，进而影响综合肥力结果。因此，为了减少这样的偏差也可以采用内梅罗指数法来进行土壤综合肥力评价，它可以避免在叠加评价指标时主观权重确定的影响，但也受极端值的影响[31]。所以，在土壤综合肥力评价时也可以采用不同的方法，将结果进行对比，提高指数的代表性和准确性。

NPKM1的综合肥力指数最高，表明该措施能显著影响土壤理化和微生物学指标，从而可提高土壤综合肥力，这与吕真真等[32]的研究结果基本一致。增加有机物料时，尽管培肥效果较好，但是养分有效性较低，水稻产量增加不明显[33]。并且过高比例的有机肥替代会导致水稻生长前期的养分供应不足，降低有效穗及实粒数量，造成水稻减产[34]。种植紫云英有利于水稻产量的提高[35]，这与NPKSG处理产量的提升优于其他培肥措施的结果一致。这是由于单种紫云英存在激发效应等原因，养分有效性较高，并且绿肥的种植会改善土壤环境和减少生物危害[36]，从而提高产量。但是可能由于有机物的投入量较少，绿肥在养分供应方面具有较强的后效性[37]等原因，对土壤的培肥效果不如猪粪有机肥高。另外，土壤综合肥力指数是由指标的隶属度值与权重计算而来，指数的高低是累积效应，反映出的是土壤综合肥力的变化，尤其是土壤生物肥力的变化，但不一定能很快作用于产量提升的效果上，只有通过长期改善土壤肥力，水稻的产量才可能会慢慢呈现出可持续的提升效果[38]。秸秆还田配施化肥能提高土壤肥力、增加作物产量[39]，本试验结果表明NPKSM2处理的产量提升效果较好，且土壤综合肥力指数较高。大量研究表明秸秆还田配施氮肥可提高土壤有机质和养分含量[40]，改变土壤微生物丰度和微生物群落结构[41]，加快养分利用进而提高作物产量，对提高土壤综合肥力发挥重要作用[42]。由于本试验时间较短，还未能完全体现养分积累的培肥效果，需要长期施用有机肥达到显著的培肥效果。

4 结论

（1）化肥配施猪粪有机肥和菜籽饼肥可显著提高贫瘠稻田化学养分含量，促进土壤碳氮转化酶活性；秸秆发酵还田配施菜籽饼肥处理可提高土壤中细菌、

真菌和古菌丰度,而秸秆还田下配合冬种紫云英还田(NPKSG)会降低土壤古菌、细菌和真菌丰度。

(2)选择DOC、AN、NH_4^+-N、AP、BD、βG、ACP、Urease和细菌数量9个指标进入MDS,用于构建土壤综合肥力评价指数。

(3)化肥配施猪粪有机肥处理下瘠薄稻田土壤综合肥力指数最高,其次是秸秆发酵还田下化肥配施菜籽饼肥处理。而目前对早稻产量提高效果最显著的措施是秸秆粉碎还田下施化肥配合冬种紫云英处理。

参考文献:

[1] JIANG X J, XIE D T. Combining ridge with no-tillage in lowland rice-based cropping system: long-term effect on soil and rice yield[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4):515-522.

[2] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(4):675-682. ZENG X B, ZHANG J B, WEI C F, et al. The status and reclamation strategy of low-yield fields in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4):675-682.

[3] 李春阳, 王海江. 不同种类有机物料培肥土壤的效果分析及评价指标[J]. 农业与技术, 2020, 40(11):36-37. LI C Y, WANG H J. Effect analysis and evaluation index of different kinds of organic materials to improve soil fertility[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(11):36-37.

[4] 吴景贵, 徐岩, 王明辉, 等. 水稻土壤有机培肥后生物性状变化研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12):241-247. WU J G, XU Y, WANG M H, et al. Study on biological properties of natural paddy soils applied with organic matters[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(12):241-247.

[5] 王伟华, 刘毅, 唐海明, 等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1):430-437. WANG W H, LIU Y, TANG H M, et al. Effects of long-term fertilization regimes on microbial biomass, community structure and activity in a paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):430-437.

[6] 刘晓霞, 陆若辉, 戴佩彬, 等. 化肥与有机肥长期配施对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(5):694-697. LIU X X, LU R H, DAI P B, et al. Effects of combined application of organic manures with chemical fertilizer on yield and soil fertility of rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2018, 59(5):694-697.

[7] 杜为研, 唐杉, 汪洪. 我国有机肥资源及产业发展现状[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3):210-219. DU W Y, TANG S, WANG H. The status of organic fertilizer industry and organic fertilizer resources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3):210-219.

[8] LEHMANN J, BOSSIO D A, KÖGEL-KNABNER I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(10):544-553.

[9] ABBOTT L K, MURPHY D V. Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture[M]. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.

[10] 盛美君, 李胜君, 杨昕玥, 等. 华北潮土农田土壤酶活性对土地利用强度的响应特征探讨[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2):299-308. SHENG M J, LI S J, YANG X Y, et al. Changes of soil enzyme activities in cropland with different land use intensities in fluvo-aquic soil area, north China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(2):299-308.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:25-100. BAO S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000:25-100.

[12] 赵婧, 王亚男, 曾希柏, 等. 不同改良措施对第四纪红壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4):1160-1176. ZHAO J, WANG Y N, ZENG X B, et al. Effects of different ameliorative measures on the enzyme activities of quaternary red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4):1160-1176.

[13] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169.

[14] LIU Z J, ZHOU W, SHEN J B, et al. Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(3):537-548.

[15] 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.

[16] 张文学, 王少先, 刘增兵, 等. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5):777-790. ZHANG W X, WANG S X, LIU Z B, et al. Evaluating soil fertility improvement effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizers in a red paddy soil using the soil fertility index[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5):777-790.

[17] 刘宏英, 张红, 李建仁, 等. 菜籽饼肥与化肥配施对马铃薯生长及产量的影响[J]. 作物研究, 2020, 34(5):435-438. LIU H Y, ZHANG H, LI J R, et al. Effects of combined application of rapeseed cake fertilizer and chemical fertilizer on potato growth and yield[J]. *Crop Research*, 2020, 34(5):435-438.

[18] 刘玲, 崔俊芳, 杨红薇, 等. 长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5):991-1000. LIU L, CUI J F, YANG H W, et al. Effects of exogenous organic materials on soil nutrients and organic carbon components in hilly region of central Sichuan, China[J]. *Soils*, 2023, 55(5):991-1000.

[19] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5):106-112. ZHANG L, HUANG J, GAO J S, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5):106-112.

[20] 张洪宾. 水稻秸秆还田对养分和酶活影响[J]. 河北农机, 2024(7):82-84. ZHANG H B. Effect of rice straw returning to field on nutrient and enzyme activities[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2024(7):82-84.

[21] 李亮, 张佩佳, 张翔, 等. 不同饼肥配比对烟田土壤生物学特性及氮素转化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4):648-657. LI L, ZHANG P J, ZHANG X, et al. Effects of different ratios of cake fertilizers on soil

biological characteristics and nitrogen transformation in tobacco field [J]. *Soils*, 2019, 51(4): 648-657.

[22] 魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380. WEI X X, XIONG J F, LI T, et al. Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2373-2380.

[23] 崔玲宇, 喻曼, 乔宇颖, 等. 基于Web of Science数据库的土壤质量评价及其微生物指标研究趋势分析[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(11): 2688-2697. CUI L Y, YU M, QIAO Y Y, et al. Research trend of soil quality assessment and microbiological indicators based on Web of Science database[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(11): 2688-2697.

[24] 周旦, 王欣, 郭小军, 等. 长期有机培肥对红壤有机碳组分及水稻产量的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36(8): 867-877. ZHOU D, WANG X, GUO X J, et al. Effects of long-term organic fertilization on organic carbon and microbial community in red soil and rice yield[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36(8): 867-877.

[25] LI F, CHEN L, ZHANG J B, et al. Bacterial community structure after long-term organic and inorganic fertilization reveals important associations between soil nutrients and specific taxa involved in nutrient transformations[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 187.

[26] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1926-1937. WU Y H, WANG L, CUI Y Z, et al. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1926-1937.

[27] 杨凯, 杜延全, 张西兴, 等. 不同有机物料与化肥配施对土壤真菌群落结构和生态功能的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 222-228. YANG K, DU Y Q, ZHANG X X, et al. Effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil fungal community structure and ecological function[J]. *Soils*, 2024, 56(1): 222-228.

[28] ZHAO X, WANG S Q, XING G X. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3): 471-482.

[29] BREULMANN M, MASYUTENKO N P, KOGUT B M, et al. Short-term bioavailability of carbon in soil organic matter fractions of different particle sizes and densities in grassland ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497: 29-37.

[30] 万水霞, 唐杉, 蒋光月, 等. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 109-117. WAN S X, TANG S, JIANG G Y, et al. Effects of Chinese milk vetch manure and fertilizer on soil microbial characteristics and yield of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(6): 109-117.

[31] 应蓉蓉, 张晓雨, 孔令雅, 等. 农用地土壤环境质量评价与类别划分研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 18-25. YING R R, ZHANG X Y, KONG L Y, et al. Technical analysis of soil environmental quality evaluation and category classification of agricultural land[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 18-25.

[32] 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]. 植物营养与肥料学报, 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 Fertilizer*, 2017, 23(4): 904-913.

[33] 郑仁兵, 李敏, 韩上, 等. 有机肥替代氮肥的水稻产量效应研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(22): 32-33. ZHENG R B, LI M, HAN S, et al. Yield effect of organic manure as substitution for nitrogen fertilizer in rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(22): 32-33.

[34] 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1146-1156. LIU Y L, LI Y, BAI Y J, et al. Effect of long-term fertilization patterns on dry matter and phosphorus accumulation and translocation in rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1146-1156.

[35] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 343-349. GAO J S, XU M G, DONG C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 343-349.

[36] 杨璐, 曾闹华, 白金顺, 等. 紫云英季土壤固氮微生物对外源碳氮投入的响应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 105-116. YANG L, ZENG N H, BAI J S, et al. Responses of soil diazotroph community to rice straw, glucose and nitrogen addition during Chinese milk vetch growth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1): 105-116.

[37] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-2126. GAO S J, ZHOU G P, CAO W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2115-2126.

[38] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616. ZHANG J Z, LI Y Z, LI Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603-616.

[39] 宁晨, 施颖, 郑足红, 等. 长期不同施肥对红壤稻田土壤酸度及养分的影响[J]. 湖北工程学院学报, 2024, 44(6): 27-32. NING C, SHI Y, ZHENG Z H, et al. Effects of long-term different fertilization on soil acidity and nutrients in red soil paddy field[J]. *Journal of Hubei Engineering University*, 2024, 44(6): 27-32.

[40] WANG Y L, WU P N, MEI F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A Meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.

[41] DHILLON G S, GILLESPIE A, PEAK D, et al. Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems[J]. *Geoderma*, 2017, 298: 1-13.

[42] BERHANE M, XU M, LIANG Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: a Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2686-2701.

（责任编辑：潘淑君）