

等养分有机肥替代与农艺措施优化对稻田土壤质量的提升效应^①

高建^{1,2}, 陈光蕾³, 陈浩², 华明秀², 苏卫华², 王琪^{1*}, 王慎强², 汪玉^{2*}

(1 中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室, 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 2 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 3 江苏师范大学生命科学学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 本研究以中国科学院常熟农业生态实验站宜兴基地有机肥等养分替代 5 年定位试验为研究对象, 设置不施磷肥(CK), 单施化肥(CF), 猪粪源(PM)、鸡粪源(CM)和牛粪源有机肥(DM)分别替代 30% 化学磷肥, 沼渣源有机肥替代 30%(OM)、50%(50%OM)和 100% 化学磷肥(100%OM), 以及紫云英还田(MV)和秸秆还田(ST)10 个处理, 系统探究等养分有机替代和不同农艺措施对土壤质量变化及养分指标的影响。五年十季试验结果表明: 与 CF 处理相比, 添加有机肥、不同农艺措施处理的土壤质量随年限均不同程度提升, CK 处理五年土壤质量均值下降 24.1%。具体表现为: 在不同有机肥源中, PM 处理土壤质量提升最显著(16.3%); 在不同替代比例中, 100%OM 处理效果最佳(18.8%); 在不同农艺措施中, MV 处理提升幅度最大(23.1%)。以上处理对土壤质量的改善效果随时间延长呈增加趋势。相较于第一年, PM、100%OM 和 MV 处理在第五年土壤质量的提升幅度分别为其 10.2 倍、7.17 倍和 2.6 倍。此外, 增加微生物指标的综合土壤质量指数(SQI-S)较单一理化指标的评价效果更优, 能更全面反映土壤质量变化, 其变异系数由 0.20 增至 0.25, 表明综合评价指标更具敏感性。综上, 等养分有机替代及优化农艺措施均显著提高稻田土壤质量, 为土壤健康管理提供了重要依据。

关键词: 稻麦轮作; 土壤质量评价; 有机无机配比; 秸秆还田; 绿肥

中图分类号: S158; X825 文献标志码: A

Effect of Equivalent Nutrient Organic Fertilizer Substitution and Agronomic Optimization on Improving Paddy Soil Quality

GAO Jian^{1,2}, CHEN Guanglei³, CHEN Hao², HUA Mingxiu², SU Weihua², WANG Qi^{1*}, WANG Shenqiang², WANG Yu^{2*}

(1 Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA), School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 School of Life Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: This study was conducted based on a five-year field experiment at Yixing Agro-Environment Research Base, the National Agroecosystem Observatory and Research Station of Changshu, to investigate the effects of equivalent nutrient organic fertilizer substitution and agronomic optimization on soil quality and nutrient dynamics in paddy fields, which included ten treatments: no chemical P fertilizer (CK); chemical fertilizer (CF); manures of pig (PM), chicken (CM), and cattle (DM) replacing 30% of chemical phosphorus fertilizer; biogas residues replacing 30% (OM), 50% (50%OM), and 100% (100%OM) of chemical phosphorus fertilizer; green manure incorporation (MV), and straw incorporation (ST). The results from ten crop seasons over five years revealed that, compared to CF, soil quality improved to varying degrees under organic fertilizer applications and different agronomic measures, while CK led to a 24.1% decline in soil quality over five years. Among organic fertilizer sources, PM demonstrated the most significant improvement in soil quality (16.3%); among substitution ratios, 100%OM was the most effective (18.8%); and among agronomic measures, MV achieved the highest enhancement (23.1%). Notably, the improvements in soil quality showed an increasing trend over time. Compared to the 1st year, soil quality in the 5th year under PM, 100%OM,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42277026, 42407470)和江苏省自然科学基金项目(BK20230049)资助。

* 通信作者(qiawang@nuist.edu.cn; wangyu@issas.ac.cn)

作者简介: 高建(1998—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤磷循环及环境效应研究。E-mail: gaojian@issas.ac.cn

and MV were promoted by 10.2, 7.17, and 2.6 times, respectively. Furthermore, soil quality index based on integrated microbial indicators (SQI-S) outperformed single physicochemical indicators in reflecting soil quality changes comprehensively, with its coefficient of variation increasing from 0.20 to 0.25, indicating greater sensitivity. In conclusion, equivalent nutrient organic substitution and optimized agronomic practices significantly enhanced paddy soil quality, providing a robust basis for sustainable soil health management.

Key words: Rice-wheat rotation; Soil quality assessment; Organic-inorganic ratio; Straw incorporation; Green manure

土壤质量是土壤综合性能的体现,包括理化特性和生物特性,对农业生产力和生态系统服务功能具有重要影响^[1-2]。近年来,有机肥的应用逐渐成为改善土壤质量的重要途径^[3-4]。研究表明,有机肥通过补充养分^[5-6]、激活养分循环^[7-8]、提升养分有效性及缓冲能力^[9],有效改善土壤的理化性质和微生物群落特征^[10]。例如,有机肥的施用显著提高了土壤全碳、全氮和有效磷含量^[11],土壤酶活性^[12]和微生物生物量碳(MBC)含量^[13],从而增强土壤有机质分解和养分转化功能。合理施用有机肥,有助于实现农业可持续发展,还为改善生态环境和应对粮食安全提供有力支持。

随着土壤质量问题日益受到关注,研究者提出了多种评价方法和指标体系,以全面反映土壤质量的综合状况及其演变趋势^[1]。目前,土壤质量评价方法主要分定性和定量评价两大类,多数研究集中在定量评价中,主要有多变量指标克立格法、土壤质量动力学方法、土壤质量综合评分法、土壤相对质量法、土壤质量指数法、灰色关联分析法等^[14]。其中,土壤质量指数法(SQI)通过构建土壤质量综合评价模型,将多项指标按权重整合为单一指数,以反映土壤整体质量状况^[15]。近年来,该方法在评价农业管理措施对土壤质量的影响方面显示出较高的适用性。特别是土壤质量指数在关注传统理化指标的基础上,逐步引入微生物指标,如微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量磷(MBP)和土壤酶活性等,以更全面反映土壤生物活性及其生态功能的变化^[16-17]。此外,土壤生态多功能性指数能够综合反映土壤在多个生态功能方面的表现,如养分循环、生物活性、微生物功能多样性等,为全面了解土壤质量提供了更丰富的信息^[18]。

在农业管理中,平衡施肥通过优化氮(N)、磷(P)、钾(K)等主要养分的输入,满足作物营养需求,提高养分利用效率^[19],同时稳定土壤质量^[20]。本研究基于中国科学院常熟农业生态实验站宜兴基地定位试验,设置不同来源和替代比例的有机肥处理,以及紫

云英还田和秸秆还田等农艺措施,采用土壤质量综合模型结合土壤理化性质和微生物生物量指标,系统评价了稻麦轮作体系下各处理对土壤质量的长期影响。研究结果为稻麦轮作区养分管理及高效利用提供了理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验位于江苏省无锡市中国科学院常熟农业生态实验站宜兴基地(31°16'N, 119°54'E)。该区域为亚热带季风气候,年均气温 17 °C,年均降水量 1 200 mm;典型稻麦轮作区,土壤类型为湖积物母质发育水稻土。试验前(2018 年)0~20 cm 耕层土壤基本理化性质为: pH 5.24, 有机碳 9.10 g/kg, 全氮 0.94 g/kg, 全磷 0.46 g/kg, 有效磷 15.5 mg/kg。水稻品种均为南粳 46 号,小麦品种为扬麦 16 号。

1.2 试验设计

本试验研究时间为 2018 年稻季至 2023 年麦季,5 个稻麦轮作周年。共设置 10 个处理,3 次重复,小区面积 60 m²,随机区组排列:不施磷肥(CK)、单施化肥(CF)、猪粪源有机肥替代 30% 化学磷肥(PM)、鸡粪源有机肥替代 30% 化学磷肥(CM)、牛粪源有机肥替代 30% 化学磷肥(DM)、沼渣源有机肥替代 30% 化学磷肥(OM)、沼渣源有机肥替代 50% 化学磷肥(50%OM)、沼渣源有机肥替代 100% 化学磷肥(100%OM)、紫云英还田(MV)、秸秆还田(ST)。所有试验处理的施肥量见表 1。有机替代带入的 N、K 含量从相应化学 N、K 肥去除,CK 处理不施磷肥。化学 N、P 和 K 肥分别以尿素(46% N)、过磷酸钙(12% P₂O₅)、氯化钾(60% K₂O)施用。每季化肥施用量为尿素 240 kg/hm²,过磷酸钙 60 kg/hm²,氯化钾 60 kg/hm²。其中,氮肥按基肥:分蘖肥:拔节肥=3:4:3 施用,有机肥、磷肥和钾肥作基肥一次性施用。其中紫云英还田处理中,小麦季种植紫云英,稻季全量还田;秸秆还田处理为全量还田,两种还田方式均采用潜旋早翻还田。田间管理均按当地农业实践生产进行。

表1 稻麦轮作不同处理下化学肥料和有机肥料养分施用量

Table 1 Nutrient application rates of chemical and organic fertilizers under different treatments in one rice-wheat rotation

处理	施肥量(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)(kg/hm ²)		
	化肥	有机肥	合计
CK	240-0-60	0-0-0	240-0-60
CF	240-60-60	0-0-0	240-60-60
PM	233-42-51	7-18-15	240-60-60
CM	225-42-49	15-18-11	240-60-60
DM	230-42-54	10-18-6	240-60-60
OM	227-42-51	13-18-9	240-60-60
50%OM	218-30-45	22-30-15	240-60-60
100%OM	197-0-30	43-60-30	240-60-60
MV	240-60-60	0-0-0	240-60-60
ST	240-60-60	0-0-0	240-60-60

注: CK, 不施磷肥; CF, 化学磷肥; PM, 猪粪源有机肥替代 30% 化学磷肥; CM, 鸡粪源有机肥替代 30% 化学磷肥; DM: 牛粪源有机肥替代 30% 化学磷肥; OM: 沼渣源有机肥替代 30% 化学磷肥; 50%OM: 沼渣源有机肥替代 50% 化学磷肥; 100%OM: 沼渣源有机肥替代 100% 化学磷肥; MV: 紫云英还田; ST: 秸秆还田。下同。

1.3 样品采集与分析

水稻、小麦籽粒及秸秆样品经烘干、粉碎后, 过 100 目尼龙筛, 用于全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)测定。作物收获后, 根据 S 型采样法, 选取五点并使用土钻采集每个小区 0~20 cm 耕层土样。混合后分成两部分: 一部分风干后用于 TC、TN、TP、可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、有效磷(AP)等土壤基础理化指标测定; 一部分保存于 -20 °C, 用于土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量磷(MBP)、β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、β-D-纤维二糖水解酶(CBH)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基多肽酶(LAP)和碱性磷酸酶(ALP)测定。

土壤理化性质测定方法参照《土壤农化分析》^[21]。土壤样品和植株样品 TC 和 TN 使用碳氮分析仪(vario MACRO CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) 通过干烧法进行测定; TP 采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 热消化, 紫外分光光度计钼蓝比色法测定(UVmini-1240); DOC 采用去离子水浸提-TOC 分析仪(Elementar, vario TOC select, Germany)测定; NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 使用氯化钾溶液浸提(1 mol/L KCl), 采用流动分析仪测定; AP 使用碳酸氢钠(0.5 mol/L NaHCO₃, pH = 8.5)萃取 0.5 h 后钼蓝法比色测定。土壤 MBC、MBN、MBP 通过氯仿熏蒸提取法^[22]测定。

土壤胞外酶活性采用 96 孔酶标板荧光分析法^[23]进行测定。

1.4 评价指标选取与土壤质量评价

本研究依据土壤质量指标选取的针对性、区域性、敏感性和稳定性原则, 评价样区土壤质量水平。参照前人研究成果^[24-28], 本研究选取了反映土壤养分指标: TC、TN、TP、DOC、有效氮(AN=NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)、AP、MBC、MBN、MBP; 反映土壤胞外酶活性的生物学指标有 BG、CBH、NAG、LAP、ALP。

土壤属性具有空间变异性, 对土壤质量也存在动态影响, 因此在进行土壤质量指数(SQI)计算之前必须对原始数据进行标准化处理, 将各指标处理为 0~100 之间的标准隶属度值, 通过隶属度值的大小表明各项评价指标在土壤中的状态及对土壤质量的影响, 隶属度值越大, 表明在该指标下土壤质量越好, 反之较差。采取以下函数标准化^[29]:

$$P(x) = \begin{cases} 100 & x > x_2 \\ \frac{90(x-x_1)}{x_2-x_1} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 10 & x < x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P(x)$ 为各项指标的隶属度函数; x 为指标测定值; x_1 、 x_2 分别表示指标的最大值与最小值。

将理化指标(TC、TN、TP、DOC、AN、AP)和增加微生物生物量的指标(TC、TN、TP、DOC、AN、AP、MBC、MBN、MBP)分别进行主成分分析, 求出各指标主成分特征值、贡献率和累积贡献率, 然后运用因子载荷矩阵求出各指标在各主成分上的负荷量, 最终计算各指标的权重^[30-31]。

$$W_i = \frac{\text{Component Capacity}_i}{\sum (\text{Component Capacity}_i)} \quad (2)$$

式中: $\text{Component Capacity}_i$ 是第 i 项土壤质量因子的因子负荷量; W_i 是第 i 个评价因素的权重。

采用加权求和模型计算评价单元的土壤质量指数, 其中, 仅使用理化指标评价结果称为土壤质量指数(SQI), 增加微生物生物量的指标评价结果称为综合土壤质量指数(SQI)。

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n P(x)_i \times W_i \quad (3)$$

式中: SQI, 土壤健康质量指数; $P(x)_i$, 第 i 个评价因素的隶属度值; W_i , 第 i 个评价因素的权重; n , 评价指标的个数。

1.5 土壤生态多功能性指数

本文选取平均值法评估土壤生态多功能性指数

(EMF), 对选取的土壤酶活指标进行 z-score 标准化后, 对所有标准化值求平均值^[32]。z-score 标准化法计算公式如下:

$$Z_{ij} = \frac{(X_{ij} - X_i)}{S_i} \quad (4)$$

式中: Z_{ij} 表示 z-score 标准化后的数据; X_{ij} 表示原始数据; X_i 表示原始数据的算术平均值; S_i 表示原始数据的标准差。

生态多功能性平均值法计算公式如下:

$$EMF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ij} \quad (5)$$

式中: EMF 表示生态系统多功能性; Z_{ij} 表示 z-score 标准化后的数据; N 表示测定的功能数。

1.6 数据处理

数据整理统计采用 Excel 2021。应用 SPSS 26 软件对不同施肥处理下的土壤质量指标进行主成分分析, 对土壤质量指数进行配对样本 T 检验和 ANOVA 单因素方差分析(LSD)。数据可视化采用 Origin 2024。使用 R 4.2.2 软件的 PLS-PM 包构建偏最小二乘路径

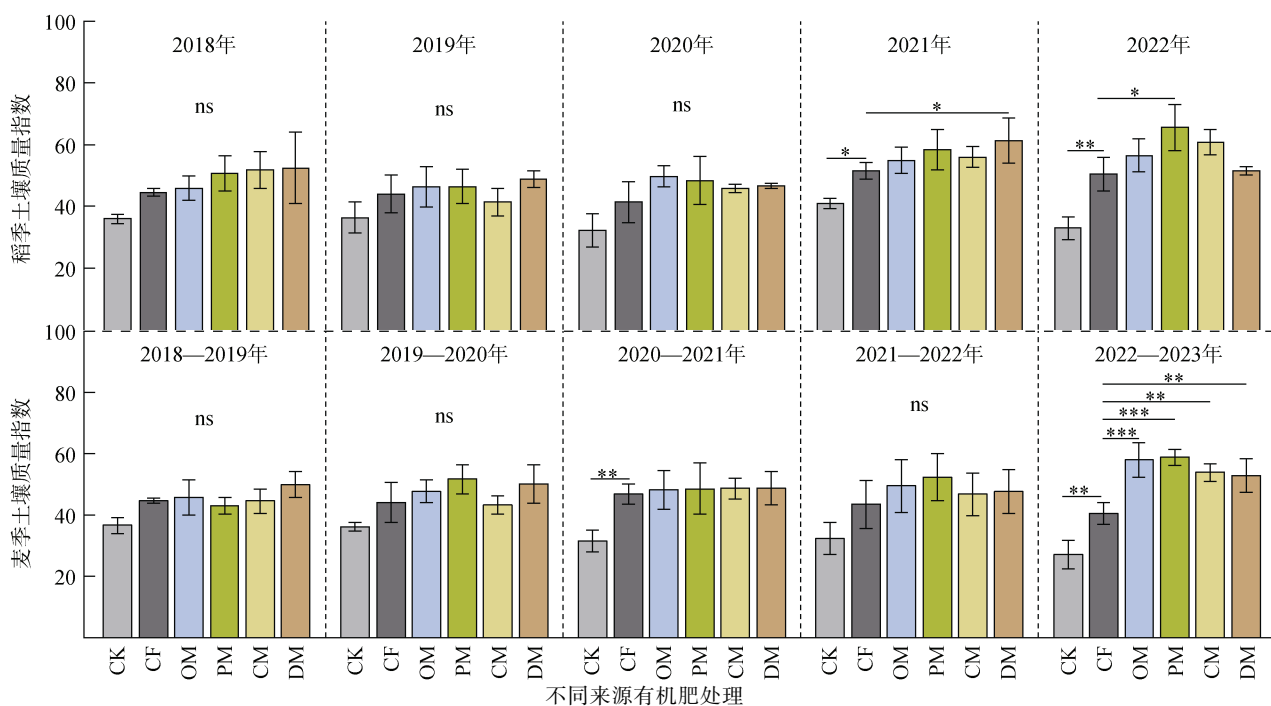
模型(Partial least squares path model, PLS-PM)以分析评价方法对土壤质量评价的影响。

2 结果与分析

2.1 不同来源有机肥对稻、麦季土壤质量指数的影响

五年十季(2018 年稻季至 2023 年麦季)土壤质量指数如图 1 所示。有机肥的施用显著提高了土壤质量。在稻季, 与 CK 处理相比, CK 处理使土壤质量降低了 34.6%, 而 OM、PM、CM 和 DM 处理分别提高了 12.3%、30.3%、20.9% 和 2.3%。在麦季, CK 处理的土壤质量降低了 32.8%, 而 OM、PM、CM 和 DM 处理分别提高了 43.0%、45.0%、32.8% 和 30.2%。

从五年土壤质量的平均增长率来看, CK、OM、PM、CM 和 DM 处理的变化率分别为 -24.1%、11.7%、16.3%、9.3% 和 13.2%。与第一年相比, 第五年 OM、PM、CM 和 DM 处理的土壤质量增幅分别是其 10.2 倍、7.17 倍、3.32 倍和 1.10 倍, 表明长期施用有机肥对土壤质量的提升具有累积效应, 且以 PM 处理效果最为显著。



(* 表示不同处理与 CF 间存在显著差异($P < 0.05$), ** 表示在 $P < 0.01$ 水平存在显著差异, *** 表示在 $P < 0.001$ 水平存在显著差异, ns 表示处理间差异无统计学意义;下同。)

图 1 不同来源有机肥下 2018—2023 年稻、麦季土壤质量指数

Fig.1 Soil quality indexes of rice and wheat seasons under different organic fertilizers from 2018 to 2023

2.2 有机肥不同替代比对稻、麦季土壤肥力的影响

如图 2 所示, 五年十季的土壤质量指数在施用不同替代比例的有机肥后显著提升。稻季与 CK 处理相比, OM、50%OM 和 100%OM 处理分别提高

了 12.3%、24.9% 和 40.7%; 麦季, OM、50%OM 和 100%OM 处理的增幅分别为 43.0%、41.4% 和 44.6%。

五年平均增长率数据显示, CK、OM、50%OM

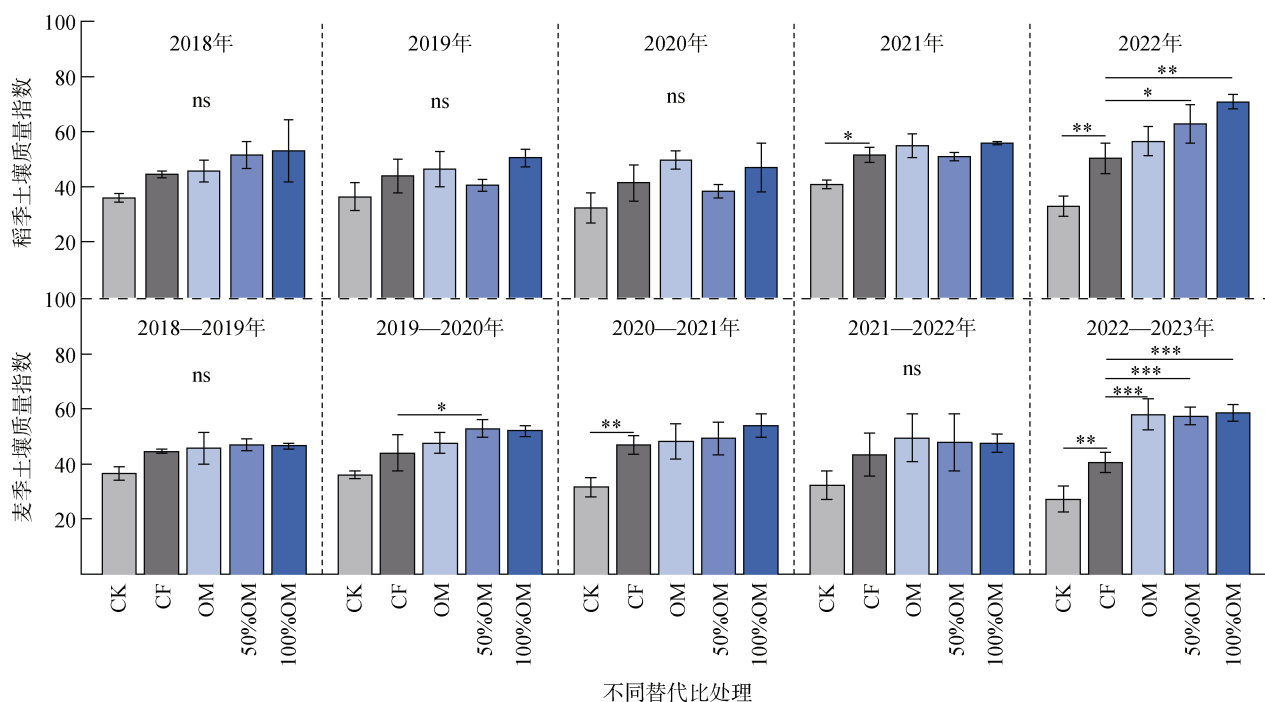


图2 有机肥不同替代比下2018—2023年稻、麦季土壤质量指数

Fig.2 Soil quality indexes of rice and wheat seasons under different substitution ratios of organic fertilizer from 2018 to 2023

和 100%OM 处理分别为-24.1%、11.7%、10.7% 和 18.8%。与第一年相比，第五年 OM、50%OM 和 100%OM 处理的土壤质量增幅分别是其 10.21 倍、3.14 倍和 3.62 倍，表明 100%OM 处理的效果最为突出，其次是 50% OM 处理。

2.3 不同农艺措施对稻、麦季土壤肥力的影响

五年十季(2018 年稻季至 2023 年麦季)不同农艺措施对土壤质量指数如图 3 所示。有机质还田(MV 和 ST 处理)在第四年后显著改善土壤质量。在稻季，与 CF 处理相比，MV 和 ST 处理的土壤质量分别提

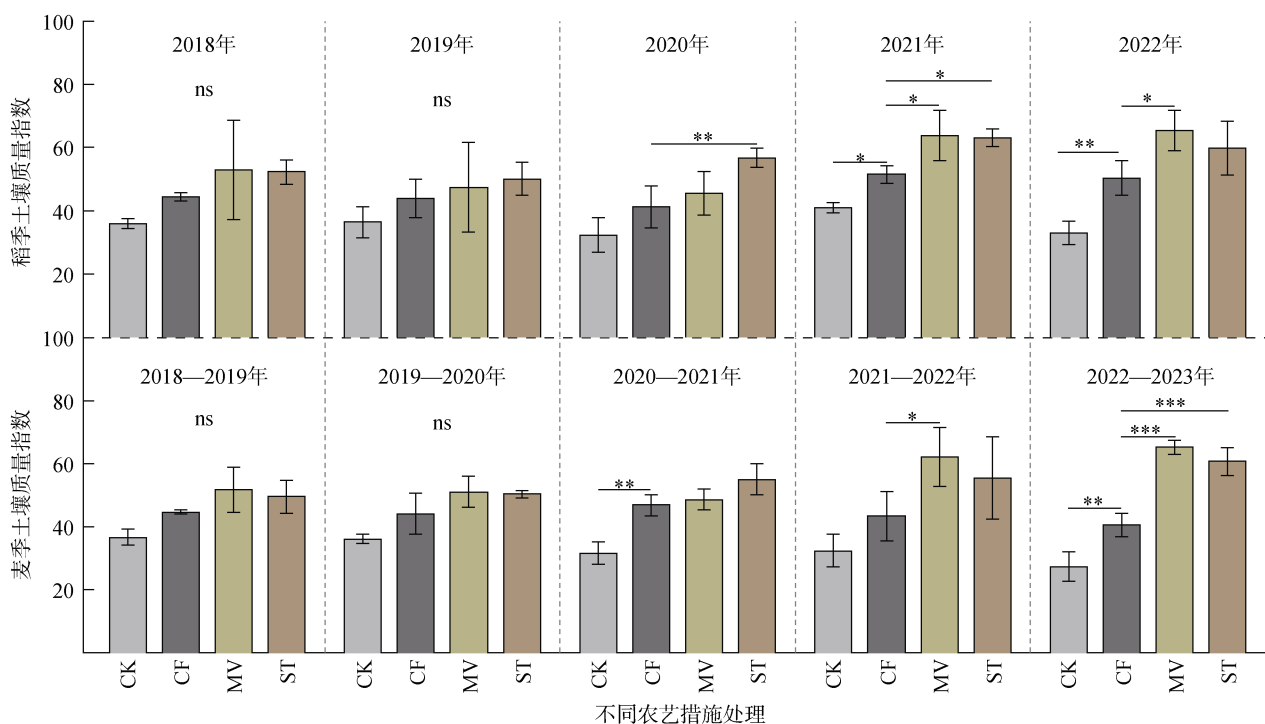


图3 不同农艺措施下2018—2023年稻、麦季土壤质量指数

Fig.3 Soil quality indexes of rice and wheat seasons under different agronomic measures from 2018 to 2023

高了 23.9% 和 22.3%;在麦季,增幅分别为 43.1% 和 27.7%。五年土壤质量的平均增长率为 MV 处理 23.1%、ST 处理 23.0%。与第一年相比,第五年 MV 和 ST 处理的增幅分别是其 2.60 倍和 2.42 倍,表明有机质还田在改善土壤质量方面具有显著效果。

2.4 土壤理化性质和微生物指标对土壤质量的影响

五年十季不同农艺措施的土壤质量指数与化学指标的线性关系如图 4 所示,TC、TN、TP、DOC、AN 和 AP 与 SQI 显著正相关,且拟合度较高。2022 年稻季的土壤质量指数和综合土壤质量指数(SQI-S)如图 5 所示,添加微生物生物量指标后,土壤质量指数的变异系数从 0.20 提高至 0.25。与 CF 处理相比, SQI-S 平均下降了 17.4%; 具体而言, CK、OM、50%OM、PM 和 CM 分别下降了 31.8%、16.4%、3.95%、8.88% 和 3.80%, 而 100%OM、DM、MV 和 ST 则分别提高了 0.66%、3.36%、11.73% 和

7.00%。此外,不同处理下 2022 年稻季土壤多功能性生态指数如图 6 所示。与 CF 处理相比, CK 处理增加了 21.29%, 而 OM、50%OM、100%OM、PM、CM、DM、MV 和 ST 处理的增幅分别为 92.2%、-40.9%、107%、332%、159%、50.0%、118% 和 160%。

2.5 土壤质量指数影响因素

2022 年稻季不同处理下的偏最小二乘路径模型如图 7 所示。结果表明,土壤总养分、速效养分、微生物生物量和土壤酶活性均受施肥模式显著调控。其中,土壤总养分、速效养分和微生物生物量对土壤质量指数(SQI)及综合土壤质量指数(SQI-S)具有显著影响。此外,综合土壤质量指数还受土壤生态多功能性调控,微生物生物量对 SQI-S 具有最高的直接正效应,凸显了微生物在土壤质量提升中的关键作用。

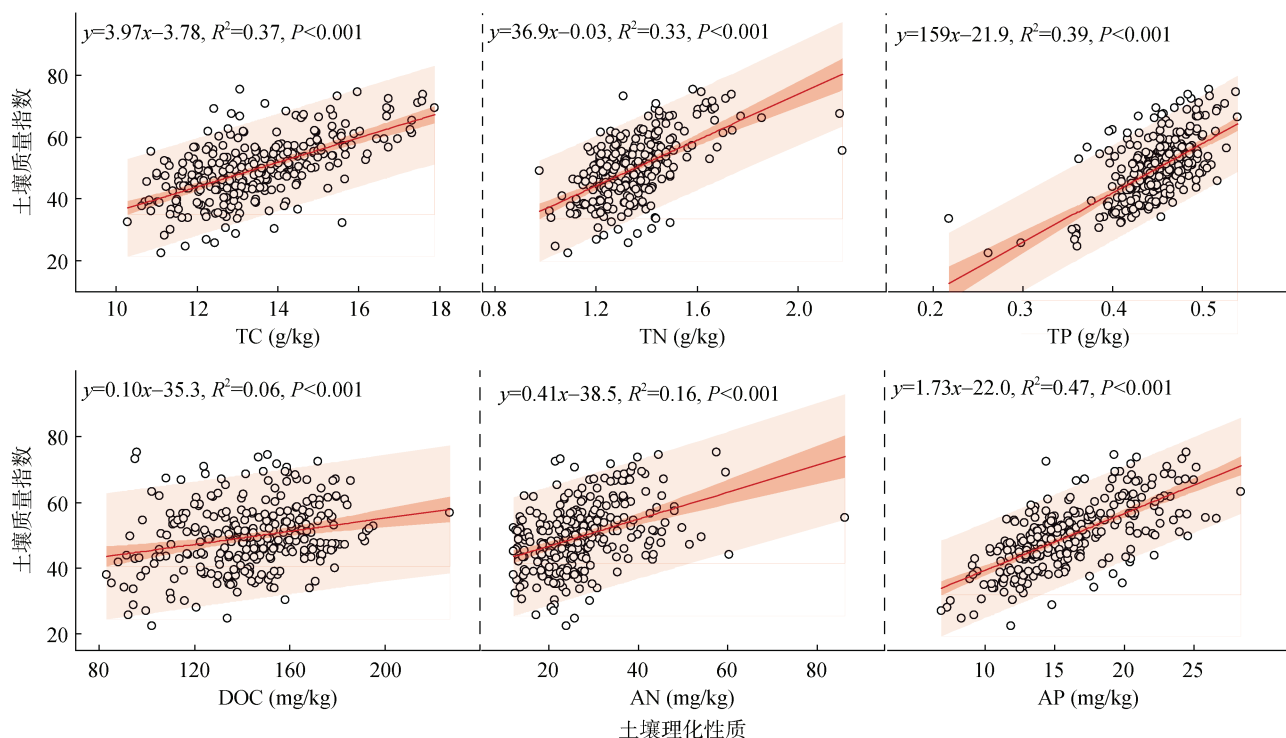


图 4 土壤质量指数和土壤理化性质的关系

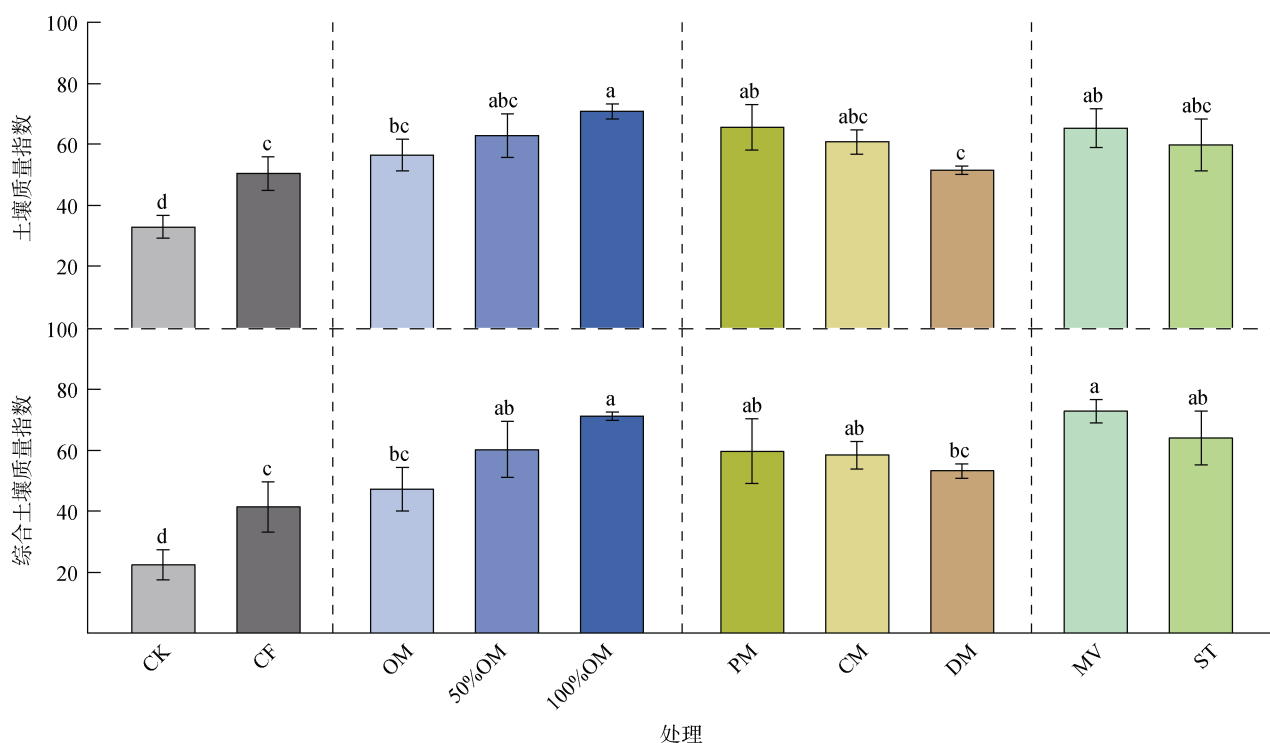
Fig. 4 Relationship between soil quality index and physicochemical properties

3 讨论

3.1 不同施肥模式对土壤质量的影响

土壤质量是农业生产中的重要指标。本研究发现,与单施化肥相比,等养分替代处理和不同农艺措施均显著提高了土壤质量,且这种提升主要集中在试验后期(图 1、图 2 和图 3)。速效养分的提升并不完

全取决于化肥施用,而是与土壤缓冲能力、微生物活性及有机无机互作等因素密切相关。部分研究表明,短期内施用化肥可迅速提高土壤速效氮、磷等养分^[33],但长期来看,有机物料的配施更能促进土壤养分的持续供给^[34-35]。尤其在维持化肥施用量不变的情况下,添加有机质能显著提升土壤质量,有机质处理下的土壤质量甚至可达到单施化肥的 2.83 倍^[36]。然而,



(柱图上方小写字母不同表示不同处理间存在显著差异($P < 0.05$))

图5 2022年稻季不同处理下土壤质量指数和综合土壤质量指数

Fig.5 Soil quality indexes and comprehensive soil quality indexes under different treatments in 2022 rice season

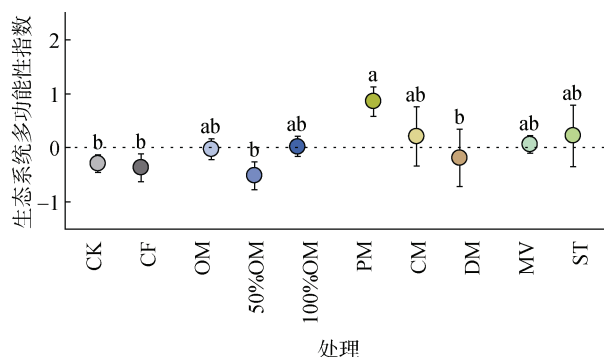


图6 2022年稻季不同处理下土壤生态多功能性指数

Fig.6 Soil ecosystem multifunctionality indexes under different treatments in 2022 rice season

由于平衡施肥方式在前期减少了养分输入^[34, 36], 因此其对土壤质量的显著改善主要体现在试验后期。

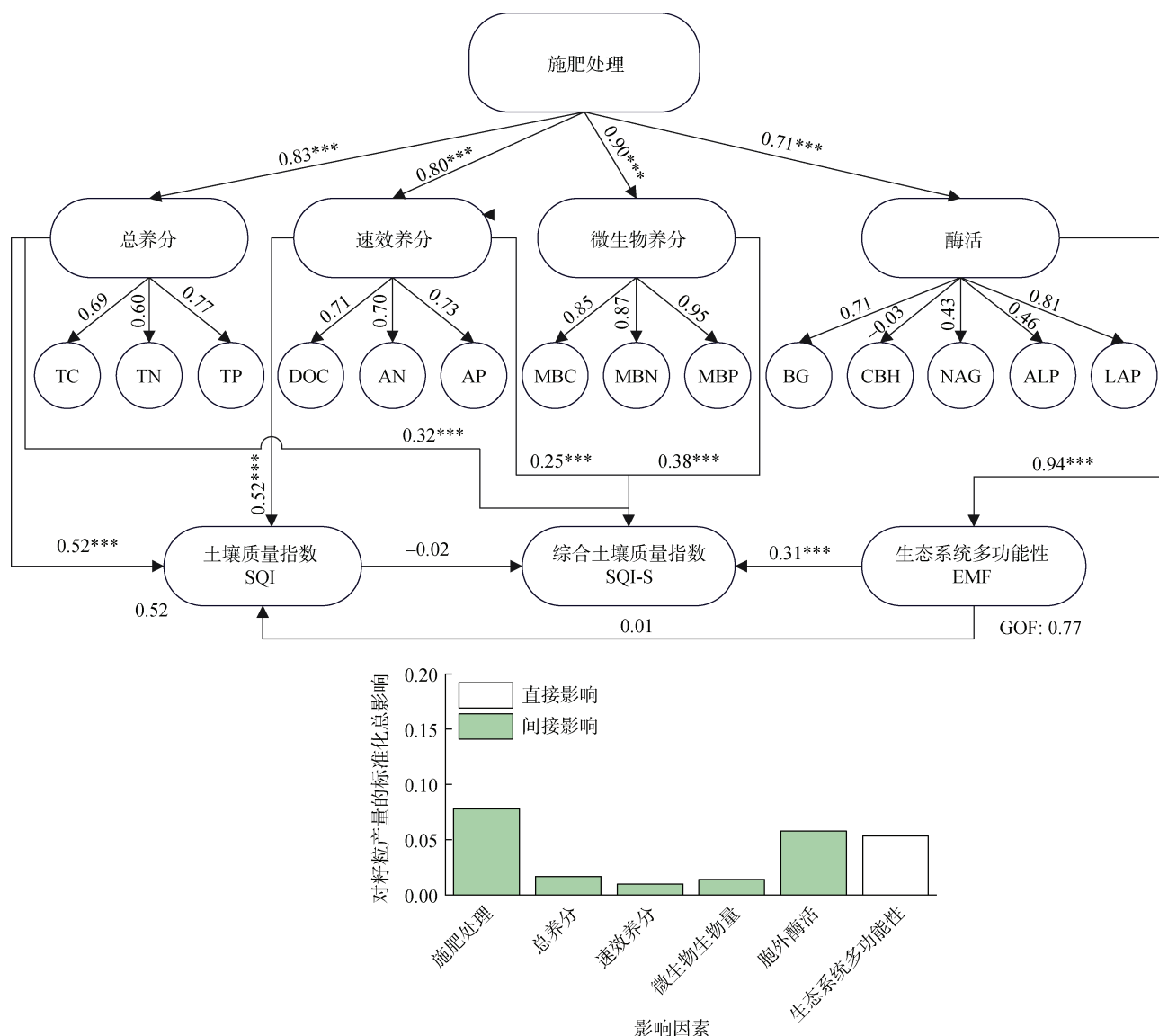
在不同来源有机肥等养分替代处理中, 相较于单施化肥, 施用有机肥显著提高了土壤质量(图 1)。其中, 猪粪和牛粪处理的土壤质量增幅明显高于鸡粪处理。已有研究表明, 猪粪腐解速度快, 对土壤全氮、有机质^[37]和速效磷^[38]的提升效果优于鸡粪, 而牛粪由于单位质量含磷量较低^[38], 其处理更多以有机形式施入氮和钾, 利于土壤养分的长期积累和缓慢释放^[35, 39]。在有机肥替代比例处理中, 替代比例越高, 土壤质量提升越显著(图 2)。研究表明, 增加有机肥替代比例

有助于增强土壤养分供应能力^[40], 从而改善土壤质量。此外, 两种有机肥的施用均向土壤中引入大量微生物及碳源, 有机质的增加不仅优化了土壤环境, 还增强了养分供应, 共同激发土壤微生物活性^[41], 进一步提高了土壤质量。这一发现与此前稻田长期有机肥替代化肥研究的结果一致^[42]。

在不同农艺措施处理中, 相较于单施化肥, 绿肥和秸秆还田处理均显著提高了土壤质量(图 3)。虽然秸秆还田提升土壤质量的速度快于绿肥, 但绿肥处理在试验后期表现出更高的土壤质量改善效果。紫云英绿肥具有较高的累积腐解率和分解速率常数^[43], 更有助于养分进入土壤微生物植物循环, 显著提升土壤质量。此外, 研究表明, 紫云英还田促进有机质矿化^[44], 而秸秆还田有利于团聚体形成和养分保留^[45], 因此两者对土壤质量的影响机制存在差异。

3.2 探究平衡施肥下土壤质量评价效果

土壤质量指数法(SQI)在土壤评价中应用广泛。本研究发现, 土壤质量指数主要受土壤总养分和速效养分调控(图 7)。研究表明, 不同轮作方式^[46]、不同有机质投入^[47]和不同土地利用方式^[48]下, 土壤总养分和土壤速效养分与土壤质量存在显著相关性(图 4)。然而在农田养分输入受控的情况下, 土壤总养分



(线条上的数字为回归系数; *表示有显著影响($P < 0.05$), **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$; GOF(Goodness of fit): 拟合优度)

图 7 综合土壤质量指数影响因素的偏最小二乘路径模型

Fig.7 Partial least squares path model for influencing factors of SQI-S

和速效养分的变化往往不显著^[34], 这可能导致仅采用理化指标评价土壤质量与实际状况存在偏差。微生物生物量在土壤质量评价中扮演关键角色。本研究发现, 微生物生物量对土壤质量的贡献超过土壤总养分和速效养分(图 7)。研究表明, 在有机无机配施条件下, 微生物指标的权重显著高于理化指标^[49]。通过结合微生物生物量对土壤质量的评价, 本研究发现土壤质量指数的变异系数显著提高(图 5), 进一步表明微生物生物量对土壤质量变化的敏感性^[17]。此外, 土壤生态功能指数(EMF)对土壤质量也具有重要贡献, 其水平显著受土壤生物多样性及群落结构影响^[16-17]。施用有机质显著提升了土壤微生物活性和群落多样性^[50]。因此, 结合微生物指标的土壤质

量指数能够更全面、准确地反映平衡施肥条件下土壤质量的变化特征。

4 结论

本研究表明, 五年的有机肥替代和农艺措施调整, 通过合理限制有机质输入, 显著扩充了土壤养分库容, 在不同程度上提升了土壤质量。其中, 平衡施肥模式下, 土壤质量随有机肥替代比例的增加而显著提高, 不同来源有机肥中以猪粪的提升效果最为显著; 在有机质还田处理中, 紫云英对土壤质量的改良效果最佳。此外, 结合微生物生物量的土壤质量评价方法显著提高了评价的准确性与敏感性。本研究为农田生态系统中土壤质量评价的应用提供了理论依据,

并对优化施肥管理和推动可持续农业发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1389–1393.
- [2] 谢越, 马东豪, 王擎运, 等. 封丘县典型农田土壤质量与时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(3): 408–417.
- [3] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [4] 刘晓霞, 杨东. 秸秆还田方式对土壤质量和萝卜产量及品质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 771–778.
- [5] 姚权, 唐旭, 肖谋良, 等. 缓释氮肥配施有机肥对稻麦轮作体系作物生长和土壤养分的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(1): 175–184.
- [6] 张玲玉, 陈光蕾, 赵洪猛, 等. 基于微生物化学计量学研究有机肥促进稻田土壤磷转化的作用[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(12): 1610–1618.
- [7] 章永松, 林咸永, 罗安程. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究——Ⅱ 有机肥(物)分解产生的有机酸及其对不同形态磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 151–155.
- [8] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 268–275.
- [9] 王小兵, 骆永明, 李振高, 等. 长期定位施肥对红壤旱地土壤有机质、养分和 CEC 的影响[J]. 江西农业学报, 2011, 23(10): 133–136.
- [10] He Z Q, Pagliari P H, Waldrip H M. Applied and environmental chemistry of animal manure: A review[J]. Pedosphere, 2016, 26(6): 779–816.
- [11] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 304–312.
- [12] 周东兴, 李欣, 宁玉翠, 等. 蚯蚓粪配施化肥对稻田土壤性状和酶活的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(2): 25–35.
- [13] 莫艳芳, 申云鑫, 贺彪, 等. 基于整合分析土壤微生物量碳、氮含量对有机肥施用的响应特征[J]. 中国土壤与肥料, 2024(6): 89–101.
- [14] 李鑫, 张文菊, 邹磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043–3056.
- [15] 黄佳惠, 张瑶, 肖凯, 等. 中国农田土壤质量评价指标及其发展趋势[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(1): 26–33.
- [16] 梁文举, 董元华, 李英滨, 等. 土壤健康的生物学表征与调控[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 719–728.
- [17] 徐炜, 马志远, 井新, 等. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 55–71.
- [18] 张俊伶, 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.
- [19] 于云飞, 汪玉, 李爽, 等. 稻麦轮作农田有机无机肥配施下磷平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1554–1562.
- [20] 王连林, 马志平, 张学刚, 等. 平衡施肥技术体系下土壤性能综合评价研究[J]. 化肥工业, 2019, 46(1): 67–72.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 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.
- [23] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309–1315.
- [24] 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.
- [25] 石艳平, 许靖雯, 罗玉博. 浙江某典型水稻产区土壤养分状况及土壤肥力质量评价[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(11): 2807–2810.
- [26] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1360–1373.
- [27] 吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 537–544.
- [28] 理鹏. 粪肥施用对水稻田土壤生态系统的健康影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [29] 吴玉红. 基于田块尺度的土壤质量评价指标体系及方法探讨[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [30] Li P, Zhang T L, Wang X X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 112–118.
- [31] Shukla M K, Lal R, Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(2): 194–204.
- [32] Ma Y H, Tian L H, Qu G P, et al. Precipitation alters the effects of temperature on the ecosystem multifunctionality in alpine meadows[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 12: 824296.
- [33] 季诗域, 王旭东, 石思博, 等. 稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1181–1188.
- [34] 杨旸, 张树兰, 杨学云, 等. 长期定位施肥对旱作壤土小麦产量、养分效率及养分平衡的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1162–1168.
- [35] 左婷, 王新霞, 侯琼, 等. 稻-麦轮作体系不同施肥模式对氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 213–221, 228.
- [36] 徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 23–32.
- [37] 吴茜虞, 续勇波, 雷宝坤, 等. 粪肥替代对稻田土壤氮素、有机质含量及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2217–2223.
- [38] 陈光蕾. 不同粪源有机肥影响水稻土磷转化的机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [39] 章志航. 不同有机肥在土壤中的养分释放规律[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- [40] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1122–1130.
- [41] 秦文宽, 冯继广, 胡云龙, 等. 土壤激发效应的机制及影响因素研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(5): 957–970.

- [42] 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.
- [43] 梁鑫宇. 不同有机物料田间腐解特征及其驱动因素[D]. 西宁: 青海大学, 2023.
- [44] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition?[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 837-843.
- [45] Duval M E, Galantini J A, Capurro J E, et al. Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161: 95-105.
- [46] 黄得志, 盛浩, 潘博, 等. 双季稻-冬闲/油菜田长期种植模式下的土壤肥力质量特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 913-919.
- [47] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 等. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 92-97, 102.
- [48] 左启林, 于洋, 查同刚, 等. 晋西清水河流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 801-810.
- [49] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. 土壤, 2010, 42(3): 415-420.
- [50] 李鹏. 旱地两熟区土壤质量评价及其对有机物料施用的响应[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.

(责任编辑: 王方方)