

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.034

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 Mengxue, HAO Rui, LIU Xinwei, 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.

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

申梦雪,郝芮,刘新伟,危万浩,操云飞,舒胡佳,

郝宗宇,王沪玉,王玲,史志华

(华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070)

摘要: [目的] 合理施用秸秆和有机肥能有效改良土壤,对土壤酸度和抗侵蚀能力产生积极作用。[方法] 以酸化红壤为研究对象,对比常规施肥(CK),化肥减量(30%)和秸秆还田(6 000 kg/hm²,FSM0),及化肥减量(30%)加上秸秆还田(6 000 kg/hm²)和配施不同梯度有机肥(1 500,3 000,4 500,6 000 kg/hm²) (FSM1,FSM2,FSM3,FSM4)对油菜生长各阶段土壤性质和产量的影响。[结果] 化肥减量配施秸秆和有机肥显著改善土壤酸度和养分状况($p < 0.05$),与CK相比,5种处理下土壤pH提高0.05~0.25个单位,交换性H⁺、交换性Al³⁺、交换性酸分别降低10.82%~39.81%,5.18%~22.10%,5.67%~23.90%,交换性盐基总量上升7.63%~34.68%;土壤全氮和有机质含量也显著提高(19.22%~62.86%和18.43%~61.50%)。土壤力学特性分析显示,随着有机肥施用量的增加,土壤抗剪强度明显提升,而黏聚力和内摩擦角则呈现先升高后下降的趋势。FSM2处理下,抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均达到峰值,与CK相比,分别提高22.22%,20.06%和11.38%。经济效益分析表明,FSM2处理的净收入最高。[结论] 综合考虑土壤酸化改良、肥力提升、结构改善,以及油菜经济效益,推荐措施为化肥减量(30%)结合秸秆还田(6 000 kg/hm²)和施用3 000 kg/hm²有机肥。研究结果可为酸化土壤改良与增产提供科学依据。

关键词: 秸秆还田;有机肥;土壤酸度;土壤抗剪强度;油菜产量

中图分类号:S157.3;S156.6 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)06-0333-10

Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw and Organic Fertilizer Application on Soil Acidification Mitigation and Erosion Control

SHEN Mengxue, HAO Rui, LIU Xinwei, WEI Wanhao, CAO Yunfei, SHU Hujia,

HAO Zongyu, WANG Huyu, WANG Ling, SHI Zhihua

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] To demonstrate that appropriate application of straw and organic fertilizer can effectively improve soil quality, have a positive effect on soil acidification mitigation and erosion control. [Method] Acidified red soil was used as the research object and a comparative analysis was performed for the effects of conventional fertilization (CK), chemical fertilizer reduction (30%), straw returning (6 000 kg/hm², FSM0), and the combination of chemical fertilizer reduction (30%) coupled with straw returning (6 000 kg/hm²) and different gradients of organic fertilizers (1 500, 3 000, 4 500 and 6 000 kg/hm²) (FSM1, FSM2, FSM3, and FSM4) on soil properties at different stages of rapeseed growth and rapeseed yield. [Results] The reduction of chemical fertilizers combined with straw and organic fertilizer application significantly ($p < 0.05$) improved soil acidity and nutrient status. Compared with CK, soil pH increased by 0.05~0.25 unit under the five treatments, while exchangeable H⁺, exchangeable Al³⁺, and exchangeable acids decreased by 10.82%~39.81%, 5.18%~22.10% and 5.67%~23.90%, respectively. Additionally, the total exchangeable base increased by 7.63%~34.68%, and the total nitrogen and organic matter contents in

收稿日期:2024-09-15 修回日期:2024-09-27 录用日期:2024-10-14 网络首发日期(www.cnki.net):2024-12-09

资助项目:湖北省科技重大专项(2023BBA003-03);国家重点研发计划项目(2021YFD1901201)

第一作者:申梦雪(2000—),女,硕士研究生,主要从事水土流失与土壤肥力研究。E-mail:1636623860@qq.com

通信作者:王玲(1989—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wangling_ln@mail.hzau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

the soil also significantly increased (by 19.22%~62.86% and 18.43%~61.50%, respectively). Analysis of soil mechanics properties indicated that with the increase of organic fertilizer application, soil shear strength was significantly enhanced, while the cohesion and internal friction angle exhibited a trend of first increasing and then decreasing. Under FSM2 treatment, the shear strength, cohesion, and internal friction angle all reached their peak values, with a respective increase of 22.22%, 20.06% and 11.38% relative to CK. Economic benefit analysis revealed that FSM2 had the highest net income. [Conclusion] Based on soil acidification improvement, fertility enhancement, structural improvement, and rapeseed economic benefits, chemical fertilizer reduction (30%) coupled with straw returning (6 000 kg/hm²) and 3 000 kg/hm² organic fertilizer application can be recommended as the optimal management strategy. The results of this study can provide a scientific foundation for improving soil acidification and increasing crop yields.

Keywords: straw returning to the field; organic fertilizer; soil acidity; soil shear strength; rapeseed yield

Received: 2024-09-15

Revised: 2024-09-27

Accepted: 2024-10-14

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

我国酸性土壤面积约为 218 万 km², 占全国陆地总面积的 22.7%^[1]。目前, 土壤酸化已成为我国耕地土壤退化的主要形式之一。土壤酸化是伴随土壤发生和发育的一个自然过程, 主要由土壤中游离的碳酸和有机酸解离产生氢离子(H⁺)驱动^[2], 表现为土壤交换性酸不断增加, pH 不断降低。酸沉降、矿物离子的淋溶流失和化肥过量施用等自然和人为因素, 加速土壤酸化进程^[3]。土壤酸化往往伴随土壤养分流失、土层变薄、土壤结构变差和抗蚀能力降低等, 进而导致作物产量和经济效益下降, 与我国当前倡导的“绿色农业”和“可持续发展”理念相悖^[4]。因此, 研究能够高效缓解土壤酸化、改善土壤结构、遏制水土流失并提高作物产量的策略, 对于保障农业可持续发展具有重要意义。

国内外学者针对土壤酸化改良开展广泛研究, 主要集中于减施化肥、施用土壤改良剂及建立合理的耕作制度等方面^[5-6]。已有研究^[7]表明, 每增施 100 kg/hm² 氮肥, 土壤 pH 平均下降 0.65 个单位, 这一结果强调从源头控制土壤酸化的必要性, 尤其是减少氮肥的施用。同时, 施用有机肥可以显著提高土壤有机质和速效养分含量, 增加土壤中盐基离子及有机质官能团, 进而增强对 H⁺ 和 Al³⁺ 的吸附能力, 有效抑制和缓解土壤酸化^[8]。土壤改良剂的施用也是缓解土壤酸化和改善土壤质量的有效手段, 其中施用石灰是最为简单且降酸效率最高的方法, 但其长期施用容易导致土壤板结^[9]。生物质炭^[10]作为新兴的土壤酸化改良材料, 虽然具有显著的酸化改良效果, 但因其制作过程繁琐且成本较高, 推广应用受到限制。此外, 秸秆还田能够快速补充土壤的碱基阳离子, 已有研究^[11]表明, 施用 4 500 kg/hm² 的秸秆可使土壤 pH 提高 0.45 个单位, 并使土壤盐基总量增加 15.1%。同时, 采用翻耕、旋耕和轮耕等耕作方式, 可以使土壤有机质含量提高 0.6%~4.7%, 并有效降低土壤可蚀性^[12]。

总体而言, 在土壤降酸和结构改良方面, 各类措施的研究均取得重要进展。然而, 单一措施往往难以以保证改良效果的稳定性和持续性。多种措施组合, 如绿肥、秸秆和石灰的联合使用, 表现出良好的互补性, 对土壤改良和作物产量提升具有显著效果^[13]。在黄淮海平原地区, 通过减少化肥使用, 并配合施用秸秆和有机肥, 能够实现小麦籽粒增产 492.86%, 并显著提升土壤质量^[14]。在酸性土壤中进行秸秆还田, 并适量施用有机肥, 能够中和秸秆分解过程中产生的有机酸, 促进有机物质的腐解, 提高土壤的侵蚀阻控能力^[15]。因此, 在化肥减量的基础上增施秸秆和有机肥是一种良好的集成调酸控酸、培肥和改善土壤结构的综合治理模式。

油菜作为我国重要的油料作物之一, 其年均播种面积和总产均占世界的 1/4 以上^[16]。湖北是我国油菜的主产区, 但由于施肥方式不当, 导致土壤质量退化, 油菜生长不良和产量下降^[17]。鉴于此, 本研究结合湖北省农户的实际生产情况, 探讨在化肥减量的基础上, 施入秸秆和有机肥对土壤 pH、肥力、结构, 以及油菜生长和产量的影响, 旨在为酸化土壤的降酸增产和结构改善提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在湖北省咸宁市双溪桥镇 (114°19'21"E、29°50'29"N) 进行, 该地区海拔 200~800 m, 属于亚热带大陆性季风气候, 平均气温 16.8℃, 年平均降水量 1 577.4 mm, 年平均日照时间 1 754.5 h, 试验土壤为第四纪红壤。试验开展前土壤的初始性质为土壤 pH 5.25, 有机质质量分数 12.08 g/kg, 全氮质量分数 0.62 g/kg, 速效磷质量分数 2.85 g/kg, 速效钾质量分数 145.28 mg/kg, 土壤质量密度 1.10 g/cm³。

1.2 试验设计

本试验共设置 6 个处理: 常规施肥 (CK), 化肥减

施30%、6 000 kg/hm²秸秆(FSM0),化肥减施30%、6 000 kg/hm²秸秆、1 500 kg/hm²有机肥(FSM1),化肥减施30%、6 000 kg/hm²秸秆、3 000 kg/hm²有机肥(FSM2);化肥减施30%、6 000 kg/hm²秸秆、4 500 kg/hm²有机肥(FSM3);化肥减施30%、6 000 kg/hm²秸秆和6 000 kg/hm²有机肥(FSM4)。其中,秸秆还田量根据当地上季作物(玉米)的秸秆量全量还田;化肥减量和有机肥施用量则依据国家农业农村部《2023年秋冬季冬小麦、冬油菜、马铃薯科学施肥技术指导意见》^[18]进行设置。每个处理设置3个重复,共18个小区,小区面积约为27 m²。每个小区之间设置1.5 m的保护行,以防止相邻处理串水串肥。化肥为当地农资店购买的复合肥15-7-8(N-P₂O₅-K₂O),用量为750 kg/hm²,减量30%的化肥用量为525 kg/hm²。上季玉米秸秆产量为6 000 kg/hm²,将秸秆粉碎为5 cm左右小段全量还田。商品有机肥和玉米秸秆pH为7.81和6.53,有机质质量分数为44.99%和61.53%,全氮质量分数为1.30%和0.98%,全磷质量分数为68.7 mg/kg,全钾质量分数为44.61,25.44 mg/k。所有小区冬季追肥1次,常规施肥小区追施尿素150 kg/hm²,化肥减施30%小区追施尿素105 kg/hm²。其余除草、杀虫等管理与当地农民的常规管理一致。

1.3 样品采集

分别在油菜苗期、蕾薹期、花期、角果期和收获期进行土样的采集。按照五点取样法在每个小区用土钻取0—20 cm土层的土样,并将其混合。土样去除石块和根茬后,自然风干并研磨,随后过1,0.25 mm筛,以供后续土壤理化性质的测定。在收获期,采用符合抗剪试验要求的环刀(内径6.18 cm,高2 cm),采集各个小区原状土样,每个小区采集4个,用于土壤抗剪强度的测定。

1.4 测定方法与数据处理

1.4.1 土壤样品测定 土壤pH通过pH组合电极测定。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定可交换性K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺浓度;交换性盐基离子总量为K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺之和。采用KCl交换中和滴定法测定土壤可交换性酸和可交换性H⁺;可交换性酸与可交换性H⁺的差值即为可交换性Al³⁺。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;采用流动分析仪测定土壤全氮^[19]。原状土样的抗剪强度采用全自动四联直剪仪进行测定;将采集的环刀土样垂直推入剪切盒后,在不同的垂直压力(100,200,300,400 kPa)下,以0.8 mm/min的剪切速率进行快剪,直到试样剪切破坏。直剪试验严格按照土工试验方

法标准(GB/T 50123—1999)^[20]进行,并根据库伦式计算黏聚力和内摩擦角,具体见公式(1)。

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为剪应力(kPa); C 为黏聚力(kPa); σ 为竖直应力(kPa); φ 为内摩擦角(°)

1.4.2 植物样品测定 在油菜收获期,随机选取各小区1 m²样方采集油菜样品。样品经脱粒、晒干至恒重后称重,以确定产量。在油菜苗期、蕾薹期、花期、角果期和收获期,使用DJI MAVIC 3无人机在田间进行多光谱遥感数据采集。无人机的飞行参数设置为:分辨率1.8 cm、飞行高度40 m、航向重叠率80%和旁向重叠率70%。

1.4.3 油菜经济效益计算 总收益(G ,元/hm²)和净收入(N ,元/hm²)的计算公式分别为:

$$G = Y \times 5.96 \quad (2)$$

$$N = G - F_i - O_i \quad (3)$$

式中: Y 为油菜产量(kg/hm²); F_i 为肥料投入(元/hm²); O_i 为其他投入(元/hm²);5.96为油菜籽粒价格(元/kg)。

1.4.4 数据处理 利用Origin 2023软件进行基础数据处理和作图,采用DJI Terra软件生成航拍无人机影像,运用ArcGIS 10.6软件对无人机飞行影像进行分析处理。使用SPSS 20.0软件对试验数据进行方差分析和显著性检验,处理间差异采用邓肯(Duncan)多重比较法,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

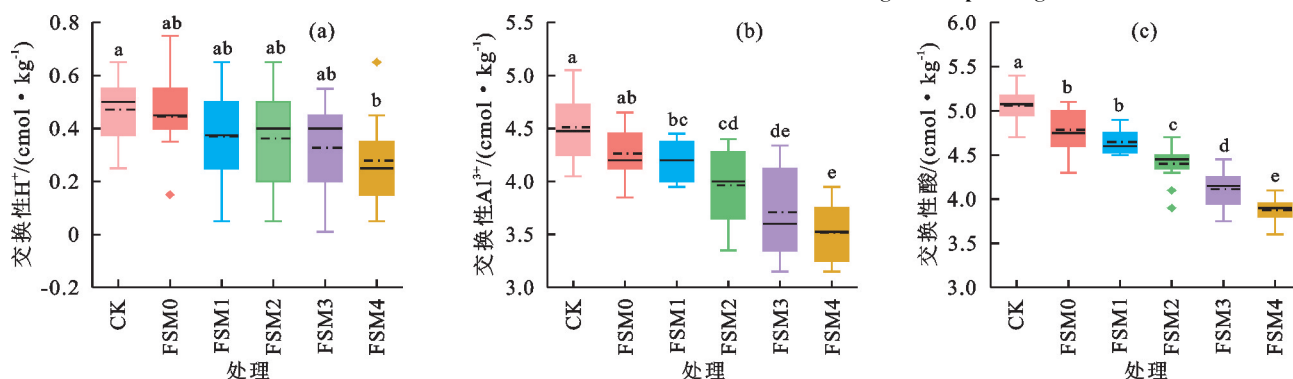
2.1 不同施肥处理对土壤酸度的影响

由图1可知,油菜生长期,除CK处理外,其他处理的土壤pH随油菜生长先上升后趋于稳定,CK处理下的土壤pH则在油菜苗期上升后呈下降趋势。其中,FSM4处理在整个油菜生长周期中的土壤pH一直处于较高水平。随着有机肥施用量的增加,同一生长阶段的土壤pH也随之上升。与CK处理相比,SFM1、SFM2、SFM3、SFM4处理使土壤pH分别平均增加0.09,0.18,0.19,0.23个单位。可见,只施化肥加剧土壤酸化,而适量减少化肥并配合施用秸秆和有机肥可有效提高土壤pH。

土壤交换性酸由交换性H⁺和交换性Al³⁺含量的总和表示。由图2可知,在整个油菜生育期中,秸秆和有机肥的施入均不同程度降低土壤的交换性H⁺、交换性Al³⁺及交换性酸含量。各指标均表现出FSM4<FSM3<FSM2<FSM1<FSM0<CK的趋势。其中,FSM4处理的交换性H⁺、交换性Al³⁺及交换性酸的最小值分别为0.32,3.49,3.81 cmol/kg,与CK相比分别降低39.81%,22.10%,23.90%。可

见,施用化肥导致土壤交换性酸、 Al^{3+} 含量增加,而化肥减量配施秸秆和有机肥可以有效降低土壤交换性 Al^{3+} 和交换性酸含量。

土壤交换性盐基总量由交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 构成。随着油菜生长,土壤交换性盐基总量呈持续增加趋势,且各处理下的土壤交换性盐基总量均在油菜成熟期达到最大值(图 3)。在整个生育期内,与 CK 处理相比,FSM1、FSM2、FSM3 和 FSM4 处理下的土壤交换性盐基总量分别平均增加 17.07%,23.06%,28.22%,34.68%。油菜生长进入蕾薹期后,各处理间的土壤交换性盐基总量差异逐渐减小。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同处理下交换性 H^+ 、 Al^{3+} 及交换性酸含量

Fig.2 Contents of exchangeable H^+ , Al^{3+} and exchangeable acid under different treatments

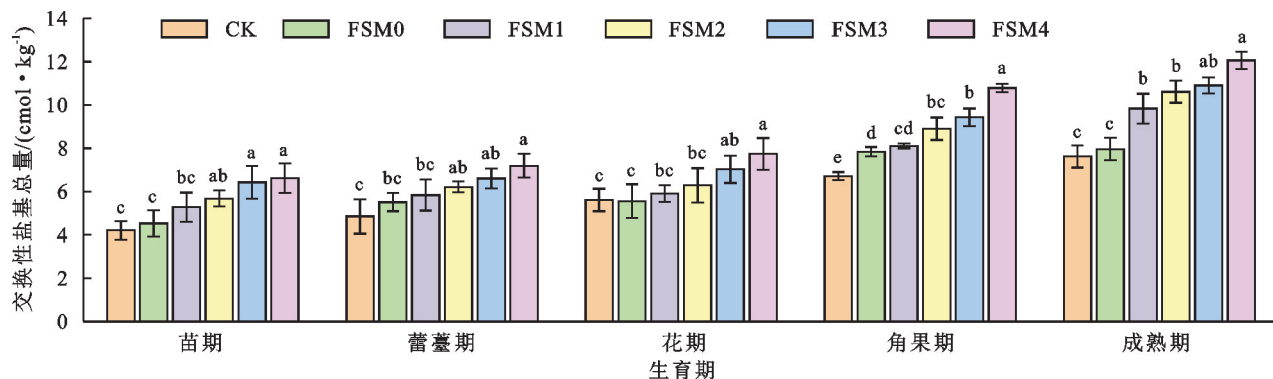


图 3 不同时期各处理下土壤交换性盐基含量

Fig.3 Exchangeable base content in soil under different treatments at different stages of rapeseed growth

不同处理下土壤在 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 波长的红外光谱主要集中在 $3622, 3437, 1628, 1427, 1082, 1033, 778, 693, 530, 472 \text{ cm}^{-1}$ 处(图 4)。已有研究^[21]表明, $3622, 3437 \text{ cm}^{-1}$ 是羟基伸缩振动的吸收峰,主要来源是土壤中的碳水化合物和羟基和氨基酸的 N-H 伸缩振动吸收; 1628 cm^{-1} 吸收峰来源于芳香族的酰胺 $\text{C}=\text{O}$; 1427 cm^{-1} 为羧基 $-\text{COO}^-$ 变形和伸缩振动; 1082 cm^{-1} 可能是多糖 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动,也有可能为有机硅化合物 $\text{Si}-\text{O}$ 伸缩振动; 1033 cm^{-1} 来源为土壤硅酸盐矿物 $\text{Si}-\text{O}$ 伸缩振动;在 $778, 693, 530, 472 \text{ cm}^{-1}$ 来源为土壤硅 $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 对称伸缩振

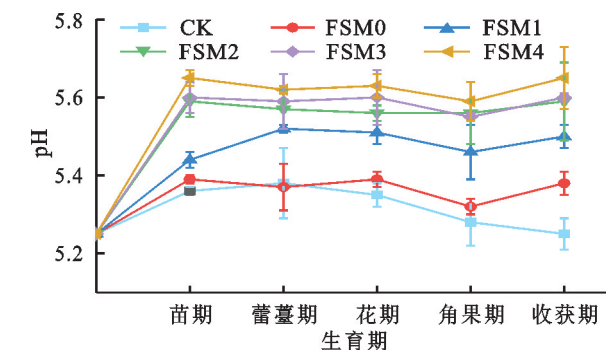


图 1 油菜不同生育期各处理下土壤 pH 变化趋势

Fig.1 Variation trend of soil pH under different treatments at different stages of rapeseed growth

动或膨润土 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 和 $\text{Si}-\text{O}$ 键伸缩^[22]。

由图 4 可知,不同处理的图谱形状和特征峰基本相似,但吸收峰强度不同,说明有机肥施入量的差异未能改变土壤中官能团的种类和组成结构,但对官能团含量存在一定影响。与 CK 处理相比,化肥减量配施秸秆和有机肥可增强土壤中芳香碳、羧基碳、烷氧碳含量,具体表现为 $\text{FSM4} > \text{FSM3} > \text{FSM2} > \text{FSM1} > \text{FSM0}$ 。这些含氧官能团(羧基、酚羟基)增加土壤负电荷点位,具有强吸附作用,进而增强土壤对酸的缓冲能力,提高土壤 pH。

2.2 不同施肥处理对土壤养分的影响

由图 5 可知,在油菜全生育期内,相较于 CK 处

理,化肥减量并配施秸秆及有机肥均不同程度地提高土壤有机质和全氮含量,其中 FSM4 处理组的增幅最为显著($p < 0.05$)。在相同生育期,土壤有机质和全氮含量均呈 $FSM4 > FSM3 > FSM2 > FSM1 > FSM0 > CK$ 的趋势。同一处理不同时期土壤有机质和全氮含量均呈上升趋势。试验结果表明,化肥减量配施秸秆(FSM0)、化肥减量配施秸秆与有机肥(FSM1、FSM2、FSM3、FSM4)处理均有利于提高土壤有机质和全氮含量。其中,化肥减量配施秸秆和 3 000 kg/hm² 有机肥(FSM4)处理的提升效果最佳,全氮和有机质分别提升 62.86% 和 61.50%。

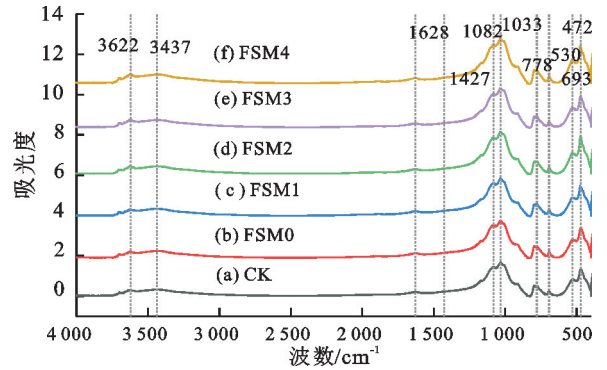


图 4 不同处理下有机质红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of organic matter under different treatments

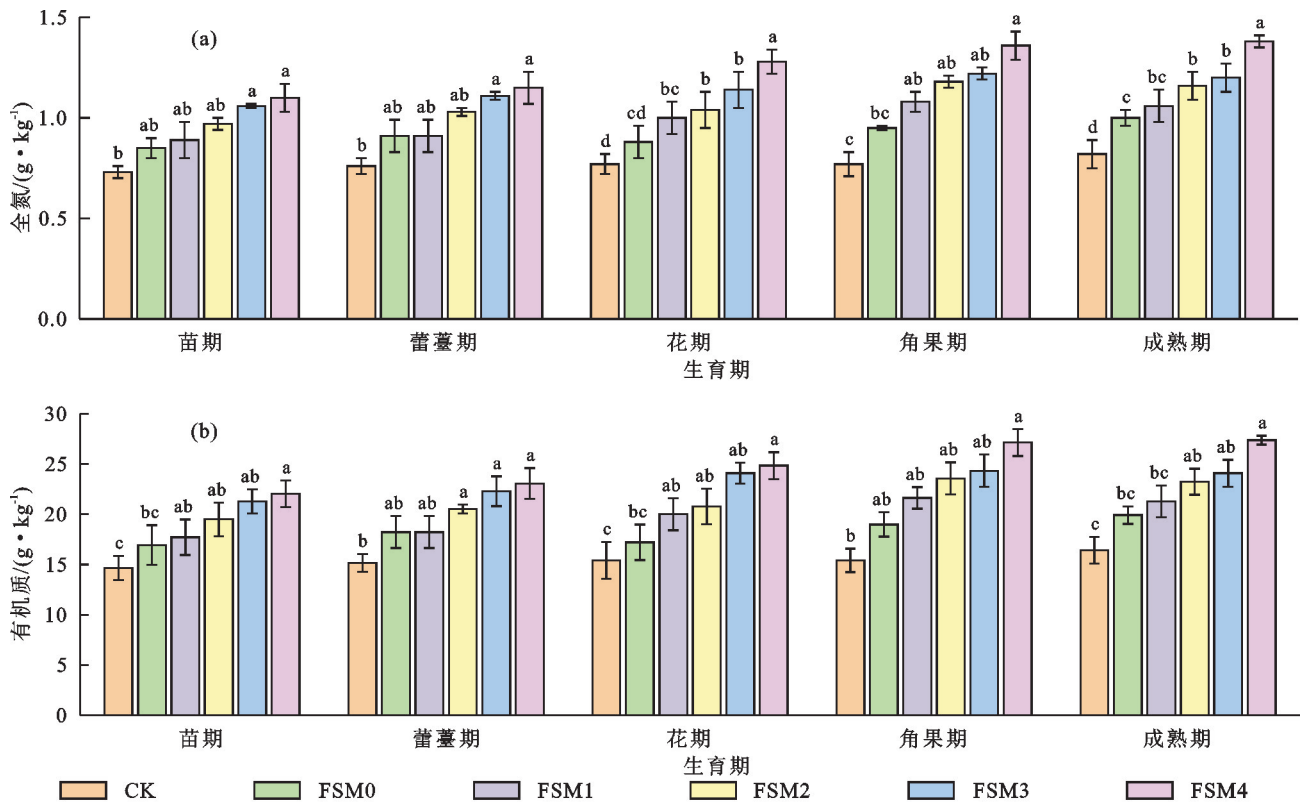


图 5 油菜不同生育期各处理下土壤全氮和有机质含量

Fig.5 Soil total nitrogen and organic matter contents under different treatments at different stages of rapeseed growth

2.3 不同施肥处理对土壤侵蚀阻控的影响

采用土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角反映土壤抗侵蚀能力。由图 6 可知,土壤快剪试验得到的应力—应变曲线均呈应力硬化型,其中土壤结构的破坏伴随显著的塑性变形。应力—应变曲线可划分为 2 个阶段:第 1 阶段,在剪切初期,剪切力与剪切位移呈近似线性增长,表明土壤主要发生弹性形变;第 2 阶段,当剪切位移在 6 mm 附近时,剪应力增加至土样所能承受的最大值,导致土样原始结构开始破坏,随着破坏面开始发生滑动直至土壤结构完全丧失强度特性,此时曲线斜率不断变小,趋于平缓。

在 100, 200, 300, 400 kPa 的竖直应力下,CK、FSM0、FSM1、FSM2、FSM3 和 FSM4 处理土壤的峰值

抗剪强度分别为 81~241, 85~254, 91~260, 99~273, 93~250, 91~240 kPa。各剪切力与竖直应力呈现显著正相关($p < 0.05$),各组处理的最大剪切力随着竖直应力的增加而增加。

当土壤在外部荷载作用下发生剪切破坏时,作用在剪切面上的极限剪切力为土壤的抗剪强度,其数值上等于峰值抗剪强度。本研究选取剪切位移为 6 mm 附近所对应的最大剪应力作为土样的抗剪强度。由图 7 可知,在 100 kPa 竖直应力下 CK、FSM0、FSM1、FSM2、FSM3 和 FSM4 土壤峰值抗剪强度分别为 81, 85, 91, 99, 93, 91 kPa。FSM2 处理峰值抗剪强度最大,相较于 CK 而言,100 kPa 竖直应力下 FSM2 处理的抗剪强度显著增长 22.22% ($p < 0.05$)。

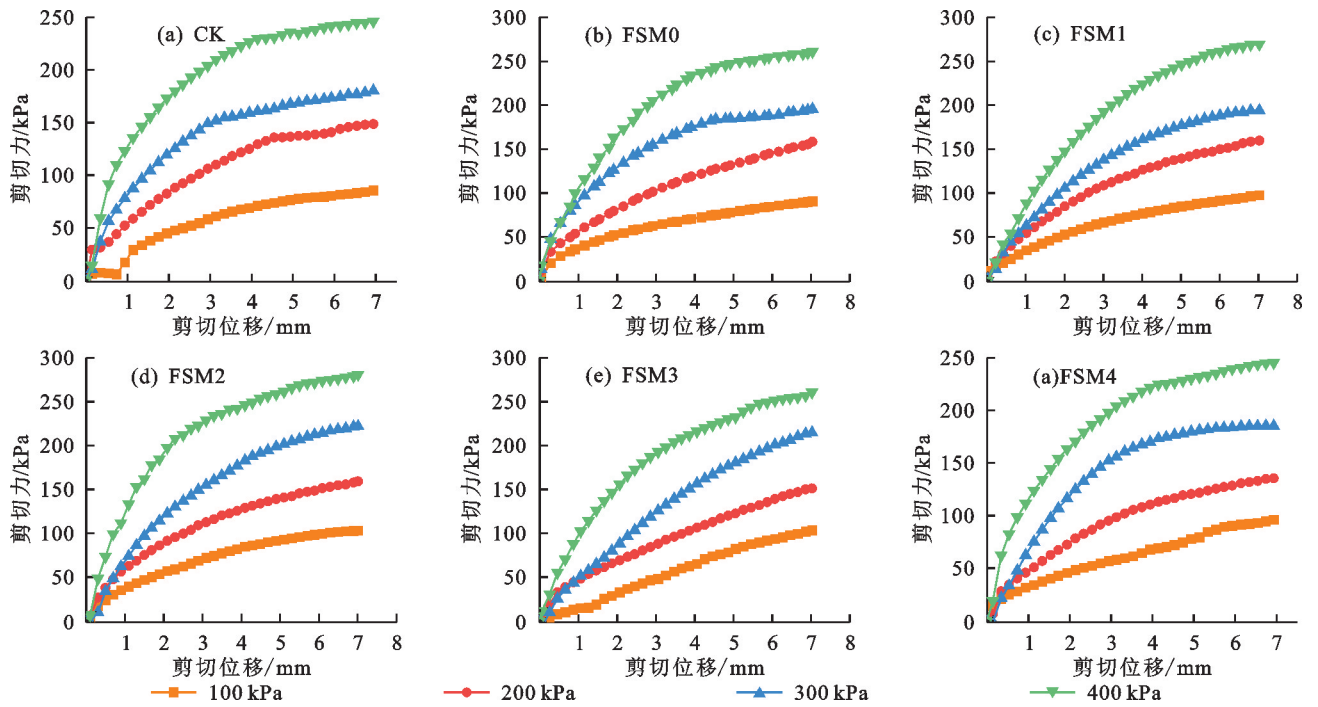


图 6 不同施肥处理下的土壤应力-应变曲线

Fig.6 Soil stress-strain curves under different fertilization treatments

总之,随着有机肥施入量的增加,土壤峰值抗剪强度呈先升高后下降的趋势,且在 FSM2 处理下达到峰值。因此,化肥减量配施秸秆与有机肥对土壤抗剪强度和稳定性有较大贡献。

为了进一步研究有机肥与秸秆的施入对土壤力学特性的影响,通过库仑定律计算出土样的内摩擦角与黏聚力。由图 7 可知,CK、FSM0、FSM1、FSM2、FSM3 和 FSM4 处理下,土壤的黏聚力和内摩擦角分别为 31.21~37.48 kPa 和 27.25°~33.036°。随着有机肥施入量的增加,土壤黏聚力呈先上升后下降的趋势,在 FSM2 处理下达到最高值(37.48 kPa)。可见,适量施用有机肥能显著增强土壤黏聚力,但过量施用可能导致黏聚力降低。内摩擦角随着有机肥施入量的增加呈先增大后减小的趋势,在 FSM2 处理下内摩擦角达到最大值,与 CK 相比增长11.38%。

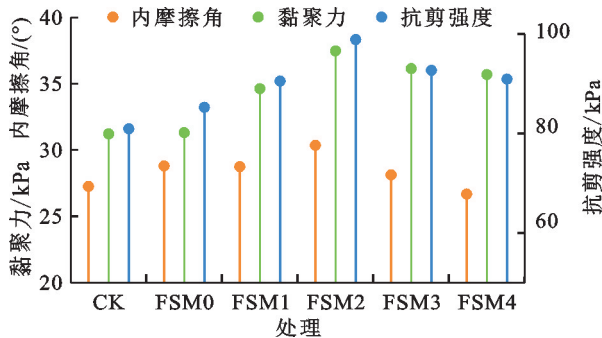


图 7 不同处理下土壤峰值抗剪强度、黏聚力和内摩擦角

Fig.7 Peak shear strength, cohesion and internal friction angle of soil under different treatments

2.4 不同施肥处理对作物长势、产量和经济效益的影响

由图 8 可知,油菜不同生育期的 NDVI 值呈先上升后下降的趋势(花期除外)。在角果期,NDVI 数值最大(0.783 4),花期由于油菜遭受冻害 NDVI 值下降。在同一生育期,随着有机肥施入量的升高,NDVI 值呈逐渐升高的趋势。具体而言,与 CK 相比,有机肥的施入 NDVI 可显著提高 0.69%~9.05% ($p < 0.05$)。

CK、FSM0、FSM1、FSM2、FSM3 和 FSM4 处理的油菜产量分别为 1 901,2 030,2 321,2 546,2 598,2 645 kg/hm²。由图 8 可知,随着有机肥施入量的升高,油菜的产量在逐渐升高,FSM4 处理的油菜产量一直保持最高水平。与 CK 处理相比,FSM2、FSM3 和 FSM4 处理显著提高油菜产量 ($p < 0.05$),产量分别提高 33.93%,36.66%,39.61%。试验结果表明,化肥减施的情况下,配施秸秆和有机肥是提高油菜产量的有效途径。

由表 1 可知,化肥减量配施秸秆和有机肥对油菜总收益、净收入有显著影响 ($p < 0.05$)。随着有机肥施入量的增加,总收益呈逐渐增加的趋势。与 CK 处理相比,FSM2、FSM3、FSM4 处理总收益显著提高 ($p < 0.05$),分别提高 34.51%,36.28%,39.82%。随着有机肥施用量的增加,劳动力和物料成本随之上升,尽管作物产量有所提高,但总成本的增加导致净收入先增加后减少;在 FSM2 处理下净收入最高(0.58万元/hm²)。

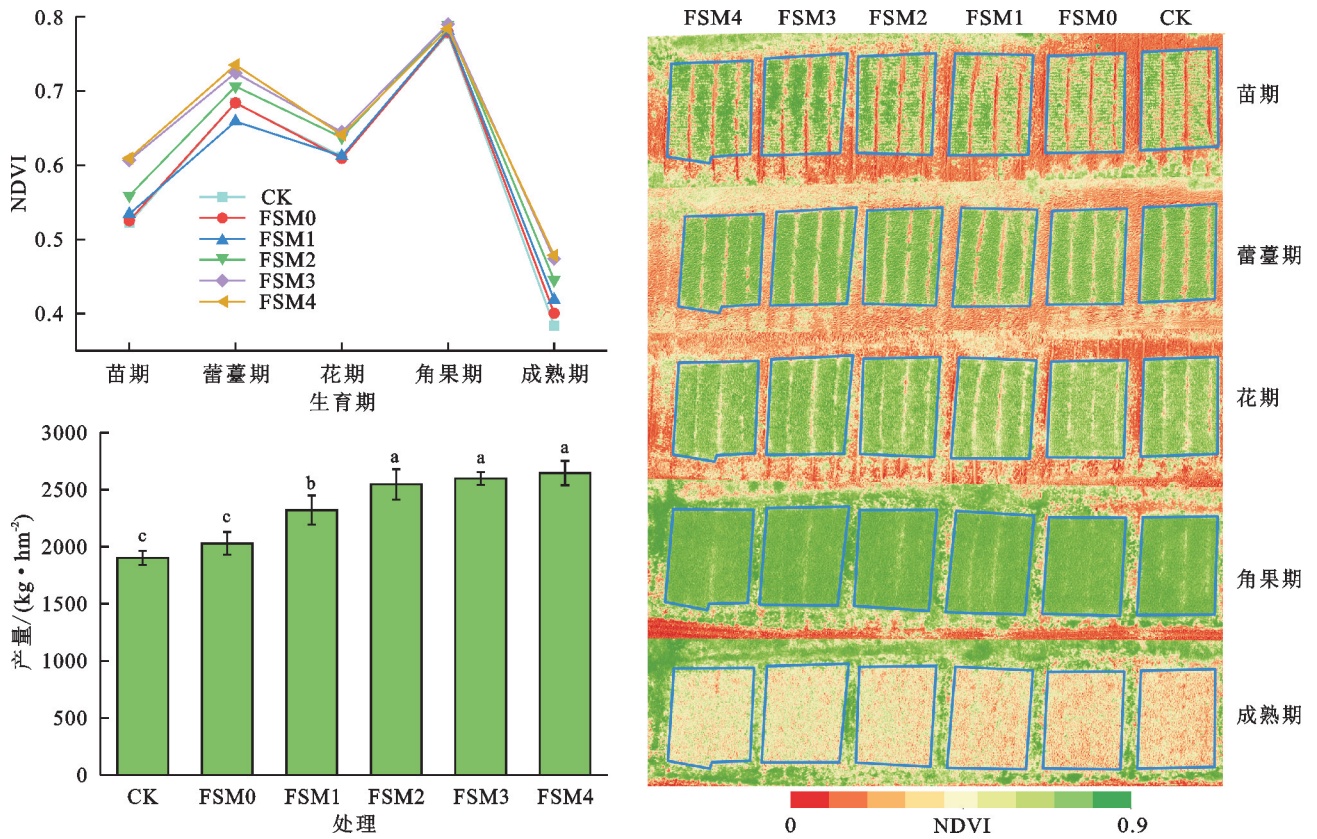


图 8 不同处理油菜长势空间分布和产量

Fig.8 Spatial distribution of rapeseed growth and yield under different treatments

表 1 不同处理对冬油菜经济效益的影响

Table 1 Effects of different treatments on economic benefits of winter rapeseed

处理	投入				总收益	净收入
	农资	农机	人工	总投入		
CK	0.27	0.21	0.23	0.71	1.13c	0.42b
FSM0	0.21	0.21	0.23	0.64	1.21c	0.57a
FSM1	0.32	0.21	0.30	0.83	1.38b	0.55a
FSM2	0.43	0.21	0.30	0.94	1.52a	0.58a
FSM3	0.54	0.21	0.30	1.05	1.54a	0.49ab
FSM4	0.66	0.21	0.30	1.17	1.58a	0.41b

3 讨论

本研究表明,单施化肥加剧土壤酸化(图 1),而减少化肥用量并配合施用秸秆及有机肥,可通过减少硝化作用所释放出来的氢离子进而缓解土壤酸化(图 2)。秸秆还田显著提高土壤中交换性碱基离子的含量(图 3),尽管存在研究显示秸秆还田可能在特定条件下导致土壤酸化加剧^[23]。造成这种差异的原因之一是土壤初始 pH 不同。已有研究^[23]表明,旱地和水田的土壤 pH 临界点分别为 6.7 和 5.4;超过这些阈值时,秸秆还田可能引起土壤酸化。本研究表明,与单施化肥相比,秸秆还田结合有机肥施用显著抑制土壤酸化(图 1),因此,建议在秸秆还田时配合施用有机肥。秸秆和有机肥的施入使土壤中芳香碳、羧基碳、烷氧碳增加

(图 4),这些含氧官能团(羧基、酚羟基)增加土壤的负电荷点位,强化土壤对酸的吸附和缓冲能力。同时,有机官能团促进土壤中交换性铝和活性铝向有机络合态铝的转化,防止了作物因铝毒而减产的现象^[8]。

随着化肥减量及秸秆和有机肥施入量的增加,土壤的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角呈先升高后下降的趋势;在 FSM2 处理时上述各参数值达到最高(图 7)。施入土壤的有机物质发挥胶结土壤颗粒和填充土壤孔隙的作用,改变土壤的力学强度特性^[24]。秸秆还田后,秸秆表层被土壤细颗粒包裹、挤压,其弯曲部位具有的抗拉性能对土壤颗粒产生约束作用^[15],从而提高土壤的抗剪强度。但相关研究^[25]表明,秸秆还田量过高使秸秆在土壤中分布的均匀度降低,使得土壤颗粒相互间接触不充分,影响土壤结构和密实性,进而降低土壤黏聚力。FSM3、FSM4 处理中的土壤抗剪强度略有下降(图 7),原因是过量有机肥施入导致有机肥颗粒过多填充在土粒表面的孔隙,减少土粒间接触面积,从而降低土粒间的摩擦力和黏聚力。

基于无人机多光谱数据,对油菜长势空间分布进行分析,结果显示,油菜不同生育期的 NDVI 数值呈先上升后下降的趋势(花期除外)(图 8),与 LI 等^[26]的研究结论一致。随着油菜生长,其 NDVI 值逐渐增加,主要是由于油菜的叶片、叶孔增加,叶片表面散

热能力增强,近红外波段反射值增加,叶绿素吸收能力增强。花期时,油菜的 NDVI 值降低,主要归因于油菜过冬遭受到冻害,导致叶片受损。当茎叶由黄色变为绿色,叶绿素含量降低,相应的红波段的反射值将增加,NDVI 值下降^[27]。此外,同一生育期,随着有机肥施入量的升高,油菜 NDVI 值逐渐升高,表明有机肥的施入有利于作物的生长。

秸秆还田和有机肥增施对改善土壤养分状况和提高产量均有积极作用。实施措施后,土壤全氮和有机质分别提高 19.22%~62.86%和 18.43%~61.50%(图 5),与 VANZOLINI 等^[28]的研究结论一致。土壤碳氮具有耦合关系,有机肥通过提高土壤中有机质含量,进而提高氮的含量^[13]。秸秆还田配施有机肥可以改善土壤结构,从而有助于促进根系生长和对养分的吸收,进而提高油菜产量^[18]。本研究表明,通过化肥减量配施秸秆和有机肥,油菜产量提高 4.71%~21.40% ($p < 0.05$) (图 8)。陈梦茹等^[29]研究表明,与单施化肥相比,有机肥替代化肥可显著提高玉米籽粒产量的 6.07%~19.53%。有机肥施入量对油菜产量和净收入有显著影响 ($p < 0.05$);在 FSM2 处理下净收入最高(表 1),与前人^[30]研究结论相似。随着有机肥施用量的增加,劳动力和物料成本随之上升,尽管作物产量有所提高,但总成本的增加导致净收入先增加后减少。

4 结论

化肥减量配施秸秆和有机肥均可提高土壤交换性盐基离子、有机质官能团、全氮及有机质含量,同时降低交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 和交换性酸含量,从而改善土壤酸化并促进土壤养分提高。其中,化肥减量 30%、秸秆施入量 $6\ 000\ kg/hm^2$ 和有机肥施入量 $6\ 000\ kg/hm^2$ (FSM4) 处理的土壤酸化改良和肥力提升效果最佳。采用土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角反映土壤抗侵蚀能力。随着有机肥施入量的增高,土壤的抗剪强度、内摩擦角和黏聚力呈先升高后下降的趋势,在 FSM2 处理时上述参数值达到最大。因此,化肥减量 30%、秸秆施入量 $6\ 000\ kg/hm^2$ 和有机肥施入量 $3\ 000\ kg/hm^2$ (FSM2) 处理在改善土壤结构方面效果最好,可有效降低土壤侵蚀风险。当综合考虑土壤酸化改良、肥力提升、结构改善,以及油菜产量和净收入时,化肥减量 30%、秸秆施入量 $6\ 000\ kg/hm^2$ 和有机肥施入量 $3\ 000\ kg/hm^2$ (FSM2) 处理的效果最佳。

参考文献:

- [1] 赵其国. 开拓资源优势, 创新研发潜力, 为我国南方红壤地区社会经济发展作贡献: 纪念中国科学院红壤生态实验站建站 30 周年[J]. 土壤, 2015, 47(2): 197-203.
- [2] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167.
- [3] CHEN S C, LIANG Z Z, WEBSTER R, et al. A high-resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 655: 273-283.
- [4] 刘莉, 刘静. 基于种植结构调整视角的化肥减施对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 17-25.
- [5] LIU L, LIU J. Study on the path of chemical fertilizer reduction from the perspective of planting structure adjustment [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 17-25.
- [6] 刘禹池, 岳丽杰, 卢庭启, 等. 不同调酸措施对西南山地酸化土壤改良及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 191-198.
- [7] LIU Y C, YUE L J, LU T Q, et al. Effects of different acid regulating measures on acidification soil improvement and maize yield in southwest mountainous areas[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(1): 191-198.
- [8] 康飞, 杜学军, 胡树文, 等. 基于 Web of Science 和万方专利对土壤酸化和改良材料研究的计量分析[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1261-1270.
- [9] KANG F, DU X J, HU S W, et al. Bibliometric analysis of soil acidification and improvement materials based on web of science and wanfang patent [J]. Soil, 2021, 53(6): 1261-1270.
- [10] 周晓阳, 周世伟, 徐明岗, 等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [11] ZHOU X Y, ZHOU S W, XU M G, et al. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of southern China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [12] SHI R Y, LIU Z D, LI Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185: 77-84.

- [9] BUTTERLY C R, WANG X J, SALE P, et al. Liming effect of non-legume residues promotes the biological amelioration of soil acidity via nitrate uptake[J]. *Plant and Soil*, 2021, 464(1): 63-73.
- [10] HUANG K, LI M Q, LI R P, et al. Soil acidification and salinity: The importance of biochar application to agricultural soils[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: e1206820.
- [11] 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 C 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 soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1205-1213.
- [12] 杨佳宇. 耕作与培肥对农田黑土养分及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- YANG J Y. Effects of tillage and fertilization on nutrients and enzyme activity in the farmland of black of black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [13] 刘芳禧, 方畅宇, 庾振宇, 等. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响[J/OL]. *土壤学报*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20230920.0907.004>.
- LIU F X, FANG C Y, YU Z Y, et al. Effects of green manure, rice straw return and lime combination on soil acidity and rice yield[J/OL]. *Acta Pedologica ainica*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20230920.0907.004>.
- [14] 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.
- GUO W, LI D D, XU J S, et al. Effects of application of straw and organic-inorganic fertilizers on soil quality and wheat yield in different texture fluvo-aquic soils[J]. *Acta Pedologica ainica*, 2024, 61(5): 1360-1373.
- [15] YANG Y H, LIU H, WU J C, et al. Soil enzyme activities, soil physical properties, photosynthetic physical characteristics and water use of winter wheat after long-term straw mulch and organic fertilizer application[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: e1186376.
- [16] 焦茹玉, 朱羿霖, 谢其均, 等. 168份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐种质资源鉴定[J/OL]. *植物遗传资源学报*, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240223005>.
- JIAO R Y, ZHU Y L, XIE Q J, et al. Identification of Sali-tolerant germplasm during seed germination period in 186 accession of brassica napus [J/OL]. *Journal of Plant Genetic Resources*, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240223005>.
- [17] 郑洪林, 付玲, 王新刚, 等. 推进湖北油菜种业高质量发展的探讨[J]. *中国种业*, 2023(10): 33-35.
- ZHENG H L, FU L, WANG X G, et al. Discussion on promoting high quality development of rapeseed seed industry in Hubei Province [J]. *China Seed Industry*, 2023(10): 33-35.
- [18] 中华人民共和国农业农村部.《2023年秋冬季小麦、冬油菜、马铃薯科学施肥技术指导意见》[EB/OL]. 农业农村部种植业管理: 农业农村部科学施肥专家指导组, 2023 [2024-09-22]. http://www.moa.gov.cn/xw/zxfb/202309/t20230928_6437567.htm.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the people's Republic of China. 《Technical guidance on scientific fertilization of winter wheat, winter rape and potato in autumn and winter 2023》[EB/OL]. *Plant management of Ministry of Agriculture and Rural Affairs: Ministry of Agriculture and rural science fertilization expert guidance group*, 2023 [2024-09-22]. http://www.moa.gov.cn/xw/zxfb/202309/t20230928_6437567.htm.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 495.
- [20] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准: 中华人民共和国住房和城乡建设部; 国家市场监督管理总局, 2019: 717.
- China Renewable Energy Engineering Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute. Standard for geotechnical testing method: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China; State Administration for Market Regulation, 2019: 717.
- [21] LIU T Q, GUO L J, CAO C G, et al. Long-term rice-oil-seed rape rotation increases soil organic carbon by improving functional groups of soil organic matter [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 319: e107548.
- [22] AUDETTE Y, CONGREVES K A, SCHNEIDER K, et al. The effect of agroecosystem management on the distribution of C functional groups in soil organic matter: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(7): 881-894.
- [23] LIANG F, LI B Z, VOGT R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: e107176.
- [24] 张光辉. 施用PAM对砂质花岗岩红壤抗剪强度及水分特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- ZHANG G H. Effect of application on the shear strength and moisture properties of sandy granite red soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [25] 李骞, 罗璟, 裴向军, 等. 秸秆纤维加筋固化土物理力学

- 特性与抗冻融性能试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(1):128-135.
- LI Q, LUO J, PEI X J, et al. Experimental study on physical and mechanical properties and freeze-thaw resistance of straw fiber reinforced solidified soil[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2024,41(1):128-135.
- [26] LI C C, LI H J, LI J Z, et al. Using NDVI percentiles to monitor real-time crop growth[J].Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:357-363.
- [27] 臧少龙,刘淋茹,高越之,等.基于无人机影像多时相的小麦品种氮效率分类识别[J].中国农业科学,2024,57(9):1687-1708.
- ZANG S L, LIU L R, GAO Y Z, et al. Classification and identification of nitrogen efficiency of wheat varieties based on UAV multi-temporal images[J].Scientia Agricultura Sinica,2024,57(9):1687-1708.
- [28] VANZOLINI J I, GALANTINI J A, MARTÍNEZ J M, et al. Changes in soil pH and phosphorus availability during decomposition of cover crop residues[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2017,63(13):1864-1874.
- [29] 陈梦茹,邢英英,解云霞,等.有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):369-381.
- CHEN M R, XING Y Y, XIE Y X, et al. Effects of organic manure and other nitrogen substitutes on spring maize growth, yield and water and fertilizer utilization efficiency[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):369-381.
- [30] 张乃丹,宋付朋,张喜琦,等.速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮能力及小麦产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):337-344.
- ZHANG N D, SONG F P, ZHANG X Q, et al. Effect of available and slow-released nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on soil nitrogen supply capacity and wheat yield in coastal saline soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(6):337-344.
- (上接第 332)
- [29] YIN D W, YANG X Y, WANG H Z, et al. Effects of chemical-based fertilizer replacement with biochar-based fertilizer on albic soil nutrient content and maize yield[J].Open Life Sciences,2022,17(1):517-528.
- [30] DA SILVA CARNEIRO J S, RIBEIRO I C A, NARDIS B O, et al. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability[J].The Science of the Total Environment,2021,760:e143955.
- [31] 李玥,韩萌,杨劲峰,等.炭基肥配施有机肥对风沙土养分含量及酶活性的影响[J].花生学报,2020,49(2):1-7.
- LI Y, HAN M, YANG J F, et al. Effect of biochar-based fertilizer combined with organic fertilizer on nutrient content and enzyme activities in aeolian sandy soil[J].Journal of Peanut Science, 2020,49(2):1-7.
- [32] ZHENG J L, WANG S J, WANG R M, et al. Ameliorative roles of biochar-based fertilizer on morpho-physiological traits, nutrient uptake and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under water stress[J].Agricultural Water Management,2021,257:e107129.
- [33] KANG S W, KIM S H, PARK J H, et al. Effect of biochar derived from barley straw on soil physicochemical properties, crop growth, and nitrous oxide emission in an upland field in South Korea[J].Environmental Science and Pollution Research,2018,25(26):25813-25821.
- [34] 刘琪琪.秸秆生物质炭基肥对水稻和玉米生长及产量的影响[D].南京:南京农业大学,2017.
- LIU Q Q. Effect of straw biochar based fertilizer on rice and maize growth and grain yield[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [35] 刘文秀.生物炭基肥料对玉米和菠菜生长的影响研究[D].山东泰安:山东农业大学,2016.
- LIU W X. Effects of Biochar-based fertilizer on the growth of corn and spinach[D].Shandong Taian: Shandong Agricultural University,2016.
- [36] YANG Y F, AHMED W, YE C H, et al. Exploring the effect of different application rates of biochar on the accumulation of nutrients and growth of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) [J].Frontiers in Plant Science, 2024,15:e1225031.