

DOI: 10.11766/trxb202306120228

郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 周云鹏, 王青霞, 周谈坛, 赵炳梓. 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

GUO Wei, LI Dandan, XU Jisheng, ZHOU Yunpeng, WANG Qingxia, ZHOU Tantan, ZHAO Bingzi. Effects of Application of Straw and Organic-inorganic Fertilizers on Soil Quality and Wheat Yield in Different Texture Fluvo-aquic Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

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*

郭伟^{1,2}, 李丹丹¹, 徐基胜¹, 周云鹏^{1,2}, 王青霞^{1,2}, 周谈坛^{1,2}, 赵炳梓^{1,3†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 秸秆与化肥和粪肥配施是改善土壤质量的有效措施, 但其在不同质地潮土中对小麦产量的影响及影响机制尚不清楚。本研究基于中国科学院封丘农业生态实验站设置的 7 年长期定位试验, 选取砂质、壤质和黏质 3 种质地潮土(下文分别简称砂土、壤土和黏土), 每种质地潮土均包含 5 个处理: 不施化肥+秸秆离田(N0S0)、不施化肥+秸秆还田(N0S)、常规施化肥+秸秆离田(NS0)、常规施化肥+秸秆还田(NS)和施化肥+秸秆还田+鸡粪替代 20%氮肥(NSM), 研究了不同施肥模式在不同质地潮土中对土壤质量和小麦产量的影响。结果表明, 在砂土、壤土和黏土中, 与 N0S0 处理相比, NS 处理的籽粒产量分别增加 611.56%、440.00%和 403.55%, NSM 处理的籽粒产量分别增加 676.56%、546.67%和 492.86%。在砂土、壤土和黏土中, 与 N0S0 处理相比, N0S 和 NS0 处理的土壤质量指数(SQI)显著提升, NS 处理则进一步提升。NSM 处理在砂土中 SQI 优于 NS 处理, 但在壤土和黏土中与 NS 处理无显著差异。随机森林分析表明, 砂土中, pH、碱解氮(AHN)、可溶性有机氮(DON)、有效磷(AP)、有机碳(SOC)和速效钾(AK)是影响籽粒产量的关键土壤性质; 壤土中, AP、pH、AK、AHN、微生物生物量碳(MBC)和 SOC 是影响籽粒产量的关键土壤性质; 黏土中, AP、DON、AHN 和 pH 是影响籽粒产量的关键土壤性质。偏最小二乘路径模型表明, 在砂土、壤土和黏土中, 影响小麦产量的关键土壤性质均受施肥模式显著调控, 且均对 SQI 具有显著影响, 而 SQI 均对小麦籽粒产量具有直接显著影响, 影响小麦产量的关键土壤性质可以作为监测土壤质量和小麦产量变化的指标以指导优化施肥。此外, 在壤土中, SQI 还通过影响小麦产量构成因素而间接影响籽粒产量。因此, 秸秆与化肥和鸡粪配施改善了土壤质量, 并在不同质地潮土中通过不同作用方式直接或间接影响了小麦产量。

关键词: 秸秆还田; 有机肥; 化肥; 土壤质量; 养分含量; 小麦产量

中图分类号: S154.36

文献标志码: A

Effects of Application of Straw and Organic-inorganic Fertilizers on Soil Quality and Wheat Yield in Different Texture Fluvo-aquic Soils

*国家自然科学基金项目(41977102)、中国科学院战略性先导科技专项任务(XDA24020104-2)和中国现代农业产业技术体系项目(CARS-03)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41977102), the "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA24020104-2), and the Modern Agriculture Research System of MOF and MARA, China (No.CARS-03).

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: bzhaob@issas.ac.cn

作者简介: 郭伟(1992—), 男, 河北晋州人, 博士研究生, 主要从事土壤结构及微生物研究。E-mail: wguo@issas.ac.cn

收稿日期: 2023-06-12; 收到修改稿日期: 2023-11-26; 网络首发日期(www.cnki.net):

GUO Wei^{1,2}, LI Dandan¹, XU Jisheng¹, ZHOU Yunpeng^{1,2}, WANG Qingxia^{1,2}, ZHOU Tantan^{1,2}, ZHAO Bingzi^{1,3†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】The combined application of crop straw with chemical fertilizers and manure is an effective measure to improve soil quality, but its effect on wheat yield and its mechanism in the different textures of fluvo-aquic soils are still unclear. 【Method】Here, we examined shifts in soil quality and wheat grain yield when three soil textures (sandy, loam and clay) were subjected to different management strategies and through a 7-year field experiment at the Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences. Five different treatments were used: no fertilizer or crop straw returning (N0S0), crop straw returning (N0S), traditional chemical fertilization (NS0), crop straw returning with chemical fertilizer (NS), and crop straw returning with chemical fertilizer and the nitrogen was substituted 20% by chicken manure (NSM). 【Result】The results showed that compared with the N0S0 treatment, the grain yield under the NS treatment was increased by 611.56%, 440.00%, and 403.55% while under the NSM treatment, it was increased by 676.56%, 546.67% and 492.86%, respectively. In sandy, loam, and clay soils, compared with the N0S0 treatment, the soil quality index (SQI) under the N0S and NS0 treatments was significantly increased, with that under the NS treatment being more significant. In sandy soil, the SQI of the NSM treatment was better than that of the NS treatment, but in loam and clay soils, the SQI of the NSM and NS treatments showed no significant differences. Random forest analysis indicated that in sandy soil, grain yield was significantly affected by pH, alkali-hydrolyzable nitrogen (AHN), dissolved organic nitrogen (DON), available phosphorus (AP), soil organic carbon (SOC), and available potassium (AK), in loam soil, it was significantly affected by AP, pH, AK, AHN, microbial biomass carbon (MBC), and SOC, while in clay soil, grain yield was significantly affected by AP, DON, AHN, and pH. The partial least squares path model (PLS-PM) showed that in sandy, loam, and clay soils, the soil properties significantly affecting grain yield were significantly regulated by management strategies, and all of these properties had significant effects on SQI, and SQI had direct significant effects on grain yield. The key soil properties affecting grain yield could be used as indicators to monitor the changes in soil quality and grain yield to select management strategies. In addition, in loam soil, SQI also indirectly affected the grain yield by affecting wheat yield components. 【Conclusion】The combined application of crop straw with chemical fertilizers and chicken manure improved soil quality and directly or indirectly affected grain yield through different action modes in the different textures of fluvo-aquic soils.

Key words: Straw returning; Organic fertilizer; Chemical fertilizer; Soil quality; Nutrient concentration; Wheat yield

小麦是我国最主要的粮食作物之一，在粮食生产中发挥着重要作用，近几十年来，随着人口增长和农业用地面积减少，促进粮食增产已成为一个重要目标^[1]。集约化农业中无机肥的施用保证了粮食产量，但由于缺乏施肥建议，普遍存在化肥施用过量的情况。据报道^[2]，我国小麦生产中氮、磷和钾肥的当季利用率范围分别仅为 26%~31%、10%~20%和 30%~40%。低肥料利用率不仅导致资源浪费，还产生了严重的环境问题，如土壤退化、温室气体排放增加和水体富营养化等^[2-3]，不利于农业可持续发展。

我国拥有丰富秸秆资源，诸多研究^[4-7]表明，秸秆还田是提高土壤有机质、生物活性和养分有效性的有效措施。粪肥含有丰富的营养元素、有机质和有益微生物，可以提高土壤肥力和酶活性、改善土壤结构和促进养分转化等^[8]。但单独施用粪肥可能存在营养物质释放速度较慢且释放期较长的问题^[9]，为此，一些研究^[9-10]使用了粪肥部分替代化肥以减少化肥投入的解决方案，例如 Liu 等^[9]研究表明使用猪粪部分替代化肥提高了土壤养分含量，增加了有益微生物。因此，化肥与秸秆配施及粪肥部分替代化肥可以减少长期过量施用化肥等对土壤质量造成的不利影响，然而其对土壤养分状况的改善程度以及是否能够保持或提升作物产量还有待进一步明确^[4]。

不同质地土壤由于黏粒比例和孔隙大小等方面的差异，而对土壤养分状况、有机碳储存和持水能力

等具有重要影响,从而影响作物生产力^[11-12]。例如 Islam 等^[5]发现在小麦-玉米轮作系统中,秸秆还田措施在砂质和壤质土壤中较黏质土壤对作物产量具有更大的提升,这可能是由于黏质土壤中被黏粒压实的秸秆沉积物不能正常分解,从而影响了作物根系生长和作物产量。砂质、壤质和黏质潮土在黄淮海平原普遍存在,但不同农业施肥模式对土壤养分状况和作物产量的影响是否因土壤质地不同而存在差异还需要进一步对比研究。

土壤质量反映了土壤提供生态系统功能的能力,在维持环境质量和农业生产可持续发展方面发挥着重要作用^[10]。不同土壤指标对施肥措施的反应可能不同,从而使评估施肥措施产生的影响变得复杂^[13-14],因此将反映土壤功能的多项土壤指标整合到土壤质量指数中,将土壤质量评价程序标准化,有利于评估施肥模式等农业实践对土壤肥力和生产力是否具有预期的效果,从而优化农业管理^[8, 15]。当前已有研究^[10, 16]通过总数据集法和最小数据集法等方法计算了土壤质量指数,评估了不同农业施肥模式对土壤质量的影响,然而,将土壤质量指数与作物生产力之间的关系进行定量评价的研究还较少^[17],因此,有必要建立路径模型,以评估施肥模式、土壤质量指数和作物产量之间的关系。

黄淮海平原是我国重要的粮食主产区,而长期以来集约化种植中不合理施肥增加了土壤质量降低的风险,本研究以设置在河南封丘的长期定位试验为研究平台,选取砂质、壤质和黏质潮土,研究了 5 种施肥模式在不同质地潮土中的土壤质量及小麦产量,主要目的包括:(1)明确不同施肥模式在不同质地潮土中对土壤质量的影响,(2)探究秸秆配施化肥和粪肥在不同质地潮土中影响小麦产量的潜在机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验位于河南省新乡市封丘县的中国科学院封丘农业生态实验站(35°01'N, 114°24'E),该区域为半干旱半湿润的暖温带季风气候,年均气温 13.9℃,年均降水量 615 mm,蒸发量约 1 875 mm,全年日照时数 2 300~2 500 h。该区域土壤类型为黄河冲积物发育形成的典型潮土。试验期间(2018 年 10 月 1 日至 2019 年 6 月 30 日)日降水量和平均气温(图 1)由站内自动气象站监测和记录。

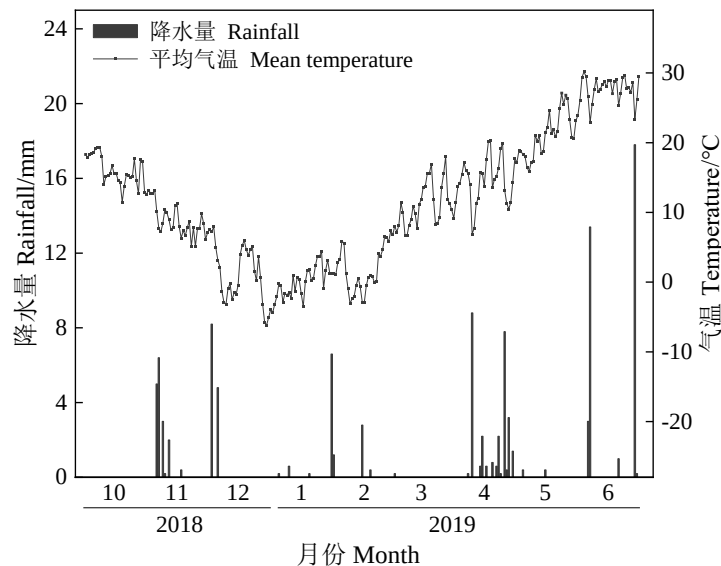


图 1 试验期间日降水量和平均气温

Fig. 1 Daily precipitation and average temperature during the experimental period

1.2 试验设计

本试验始于 2012 年 10 月,包含砂质、壤质和黏质三种质地潮土,每种土壤质地潮土均设置 5 个处

理：不施化肥+秸秆离田（N0S0）、不施化肥+秸秆还田（N0S）、常规施化肥+秸秆离田（NS0）、常规施化肥+秸秆还田（NS）和施化肥+秸秆还田+鸡粪替代 20%氮肥（NSM），每个处理设置 3 个重复，每个小区面积为 3 m²（2 m×1.5 m）。试验开始前，土壤（0~20 cm）基本性质见表 1。

表 1 试验开始前土壤基本性质

Table 1 Basic soil properties before the experiment

土壤质地 Soil texture	土壤颗粒组成 Soil particle composition/%			土壤理化性质 Soil physicochemical properties			
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	pH	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)
砂土 Sandy soil	85.91±0.01a	9.50±0.01c	4.59±0.00c	8.68±0.02a	0.35±0.06c	0.87±0.01b	18.29±0.13b
壤土 Loam soil	64.65±0.01b	20.84±0.00b	14.52±0.01b	8.51±0.01b	0.62±0.06b	1.08±0.02a	18.03±0.05c
黏土 Clay soil	6.75±0.04c	54.23±0.04a	39.02±0.04a	8.51±0.01b	0.94±0.02a	1.10±0.01a	20.78±0.05a

注：TN：全氮；TP：全磷；TK：全钾。表中数据为平均值±标准误（ $n=3$ ），同列不同小写字母表示不同土壤质地（砂土、壤土和黏土）间差异显著（ $P<0.05$ ）。Note: TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium. The data in the table are of means ± standard deviation ($n=3$). Different letters in the same column indicate a significant difference between different soil textures ($P<0.05$).

作物种植制度为夏玉米和冬小麦轮作，玉米品种为郑单 958，小麦品种为百农矮抗 58。N0S、NS 和 NSM 处理在播种前将该处理上一季作物收获的全部秸秆经晒干和粉碎后，通过人工翻地均匀还田，还田深度为 20 cm。N0S0 和 NS0 处理在作物收获后将作物的地上部分全部移除。

NS0、NS 和 NSM 处理在小麦季的施肥标准为：氮肥（N）250.0 kg·hm⁻²，磷肥（P₂O₅）160.0 kg·hm⁻²，钾肥（K₂O）105.0 kg·hm⁻²；在玉米季的施肥标准为：氮肥（N）210.0 kg·hm⁻²，磷肥（P₂O₅）134.4 kg·hm⁻²，钾肥（K₂O）88.2 kg·hm⁻²。氮肥在小麦季 60%为基施，其余 40%于返青期作为追肥施用；在玉米季 40%为基施，其余 60%于大喇叭口期作为追肥施用。磷肥和钾肥在两季施肥中均为基施。小麦季和玉米季所施化肥均为尿素（含 N 46.0%）、磷酸二铵（含 P₂O₅ 42.0%）和硫酸钾（含 K₂O 52.0%）。小麦季和玉米季施肥中，NSM 处理施用的尿素含氮量占氮肥施用标准 80%，其余 20%使用鸡粪有机肥（含 N 24.16 g·kg⁻¹；P₂O₅ 8.04 g·kg⁻¹；K₂O 10.40 g·kg⁻¹）替代，并将磷肥和钾肥施用标准减去所施鸡粪有机肥中的 P₂O₅ 和 K₂O 含量后，使用磷酸二铵和硫酸钾补充以达到施用标准，鸡粪有机肥作为基肥施用。

1.3 样品采集与测定

土壤样品和小麦植株样品于 2019 年 6 月小麦收获后采集。根据 S 型采样法使用土钻采集每个小区 0~20 cm 土样，混合后分成两部分，一部分风干后用于土壤基本理化性质测定，一部分保存于 -20℃用于土壤可溶性有机碳（DOC）、可溶性有机氮（DON）、微生物生物量碳（MBC）和微生物生物量氮（MBN）测定。小麦植株样品分为籽粒和秸秆两部分，分别烘干和粉碎后用于全氮（TN）、全磷（TP）和全钾（TK）含量的测定。

土壤 pH、有机碳（SOC）、碱解氮（AHN）、有效磷（AP）和速效钾（AK）含量以及小麦籽粒和秸秆的 N、P 和 K 含量采用常规方法^[18]测定；DOC 和 DON 采用 Multi C/N 分析仪（Analytik Jena, Multi3100，德国）测定；MBC 和 MBN 采用氯仿熏蒸法^[18]测定。

1.4 土壤质量指数计算

本研究采用总数据集法^[19]，基于 Duncan 多重比较选取在不同施肥处理间具有显著性差异（ $P<0.05$ ）的土壤指标，即 pH、SOC、AHN、AP、AK、DOC、MBC、DON 和 MBN 等 9 个土壤指标，用以评价不同施肥模式对土壤质量的影响。土壤质量指数（Soil quality index, SQI）计算方法^[10, 19]如下：

首先，将每个土壤指标转换为 0~1.0 之间的得分（ s_i ），各土壤指标中，SOC、AHN、AP、AK、DOC、MBC、DON 和 MBN 的得分通过公式 s_i' 计算，pH 的得分通过公式 s_i'' 计算：

$$S'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$S''_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中, s_i 为第 i 个指标的得分, x_i 、 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为第 i 个指标的测量值、最大值和最小值。

其次, 通过主成分分析, 根据第 i 个指标的综合得分与所有指标综合得分之和的比率计算第 i 个指标的权重 (w_i)。最后, 将得分值 (s_i) 乘以其权重 (w_i), 计算 SQI:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \times s_i \quad (3)$$

式中, n 为指标的数量, s_i 和 w_i 为第 i 个指标的得分和权重。

1.5 数据统计分析

使用 SPSS 26.0 软件的单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较分析不同处理间小麦籽粒产量、产量构成因素、籽粒和秸秆养分含量、土壤理化性质和 SQI 的差异。使用 R4.2.2 软件的 randomForest 包和 rfPermute 包进行随机森林分析, 以评估影响籽粒产量的土壤理化性质的重要性 and 显著性。使用一元线性回归模型分析 SQI 与小麦籽粒产量的关系。使用 R4.2.2 软件的 plspm 包构建偏最小二乘路径模型 (Partial least squares path model, PLS-PM), 以分析影响小麦产量的机制。其余统计分析采用 Microsoft Excel2019、R4.2.2 和 Origin 2021 软件进行数据处理和绘图。

2 结果

2.1 不同施肥处理的小麦产量及产量构成因素

各处理的小麦籽粒产量范围在砂土中为 1.18~9.84 t·hm⁻², 在壤土中为 1.37~9.38 t·hm⁻², 在黏土中为 1.15~7.21 t·hm⁻² (表 2)。与 N0S0 处理相比, N0S 处理在砂土、壤土和黏土中籽粒产量均无显著变化。与 N0S0 处理相比, NS0 处理在砂土、壤土和黏土中籽粒产量均显著提高, 增幅分别为 539.20%、410.12% 和 328.21%; NS 处理在砂土和黏土中籽粒产量进一步提升, 增幅分别提高至 611.56% 和 403.55%, 但在壤土中的增幅为 440.00%, 与 NS0 处理相比未表现出显著差异。NSM 处理在砂土、壤土和黏土中籽粒产量均为各处理中最高, 分别达到 9.84、9.38 和 7.21 t·hm⁻², 与 N0S0 处理相比分别增加 676.56%、546.67% 和 492.86%。

与 N0S0 处理相比, N0S 处理在砂土、壤土和黏土中穗数、千粒重和穗粒数均无显著变化 (表 2)。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土和壤土中穗数均显著提高, 平均分别增加 40.71% 和 27.15%; 而在黏土中, 各处理间的穗数差异不显著。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在壤土和黏土中千粒重均显著提高, 平均分别增加 16.82% 和 22.60%, 而在砂土中只有 NS 处理的千粒重相较于 N0S0 处理显著提高, 为 49.36 g, 增加了 16.33%。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土、壤土和黏土中穗粒数均显著提高, 平均分别增加 87.17%、68.79% 和 95.67%。

表 2 不同施肥处理小麦产量及产量构成因素

Table 2 Yield and yield components of wheat relative to treatments

土壤质地 Soil texture	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/(t·hm ⁻²)	产量构成因素 Yield components		
			穗数	千粒重	穗粒数
			Spike	1000-grain	Grain
			number(plant·m ⁻²)	weight/g	number/spike
砂土 Sandy soil	N0S0	1.27±0.06d	411.00±16.07b	42.43±1.89b	17.83±0.71b
	N0S	1.18±0.02d	380.22±33.57b	43.04±3.00b	14.13±4.59b
	NS0	8.10±0.16c	564.89±13.18a	48.40±0.71ab	31.57±0.81a

	NS	9.01±0.16b	585.44±2.31a	49.36±0.97a	33.33±1.17a
	NSM	9.84±0.13a	584.66±22.56a	48.23±0.89ab	35.23±0.13a
壤土	N0S0	1.45±0.13c	400.89±15.99b	42.75±1.27b	16.73±2.84b
Loam soil	N0S	1.37±0.07c	385.45±14.39b	42.21±0.15b	13.20±2.19b
	NS0	7.40±0.08b	487.78±12.93a	50.40±0.47a	28.00±3.00a
	NS	7.83±0.41b	505.44±31.52a	49.98±0.47a	28.10±1.24a
	NSM	9.38±0.29a	536.00±26.77a	49.45±1.06a	28.63±0.75a
黏土	N0S0	1.22±0.07d	467.55±47.26a	41.39±0.54b	12.00±2.45b
Clay soil	N0S	1.15±0.04d	394.89±11.58a	44.65±2.69b	15.33±3.15b
	NS0	5.21±0.09c	421.11±17.98a	50.62±0.42a	27.37±0.61a
	NS	6.13±0.12b	453.00±19.88a	51.31±0.64a	30.83±1.24a
	NSM	7.21±0.28a	467.00±6.17a	50.30±0.60a	29.23±1.10a

注: N0S0: 不施化肥+秸秆离田; N0S: 不施化肥+秸秆还田; NS0: 常规施化肥+秸秆离田; NS: 常规施化肥+秸秆还田; NSM: 施化肥+秸秆还田+鸡粪替代 20%氮肥。表中数据为平均值±标准误 ($n=3$), 同一列不同小写字母表示该质地土壤中不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: N0S0: no fertilizer or crop straw returning; N0S: crop straw returning; NS0: traditional chemical fertilization; NS: crop straw returning with chemical fertilizer; NSM: crop straw returning with chemical fertilizer and the nitrogen was substituted 20% by chicken manure. The data in the table are of means $\pm$ standard deviation ($n=3$). Different letters in the same column indicate a significant difference between treatments in this soil texture ($P < 0.05$). The same as below.

2.2 不同施肥处理的小麦籽粒和秸秆养分含量

N0S 处理在砂土中籽粒 N、籽粒 P 和籽粒 K 含量分别为 17.12、4.31 和 3.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 N0S0 处理相比均显著提高, 增幅分别为 7.79%、17.87%和 8.71%, 而在壤土和黏土中籽粒 N、籽粒 P 和籽粒 K 含量均无显著变化 (表 3)。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土、壤土和黏土中籽粒 N 含量均表现为显著升高, 平均分别增加 42.04%、18.89%和 29.02%。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土和黏土中籽粒 P 含量显著降低, 平均分别降低 14.34%和 24.59%, 籽粒 K 含量平均分别降低 6.01%和 12.98%, 而在壤土中籽粒 P 和籽粒 K 含量均无显著变化。

与 N0S0 处理相比, N0S 处理在砂土、壤土和黏土中秸秆 N 含量、秸秆 P 含量和秸秆 K 含量均无显著变化。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土、壤土和黏土中秸秆 K 含量均显著升高, 平均分别增加 124.80%、94.13%和 47.45%。与 N0S0 处理相比, NS0、NS 和 NSM 处理在砂土和壤土中秸秆 N 含量均显著提高, 平均分别增加 54.92%和 43.26%, 而在黏土中只有 NS0 处理秸秆 N 含量显著提高, 为 5.18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增加了 50.44%。

表 3 不同施肥处理小麦籽粒和秸秆养分含量

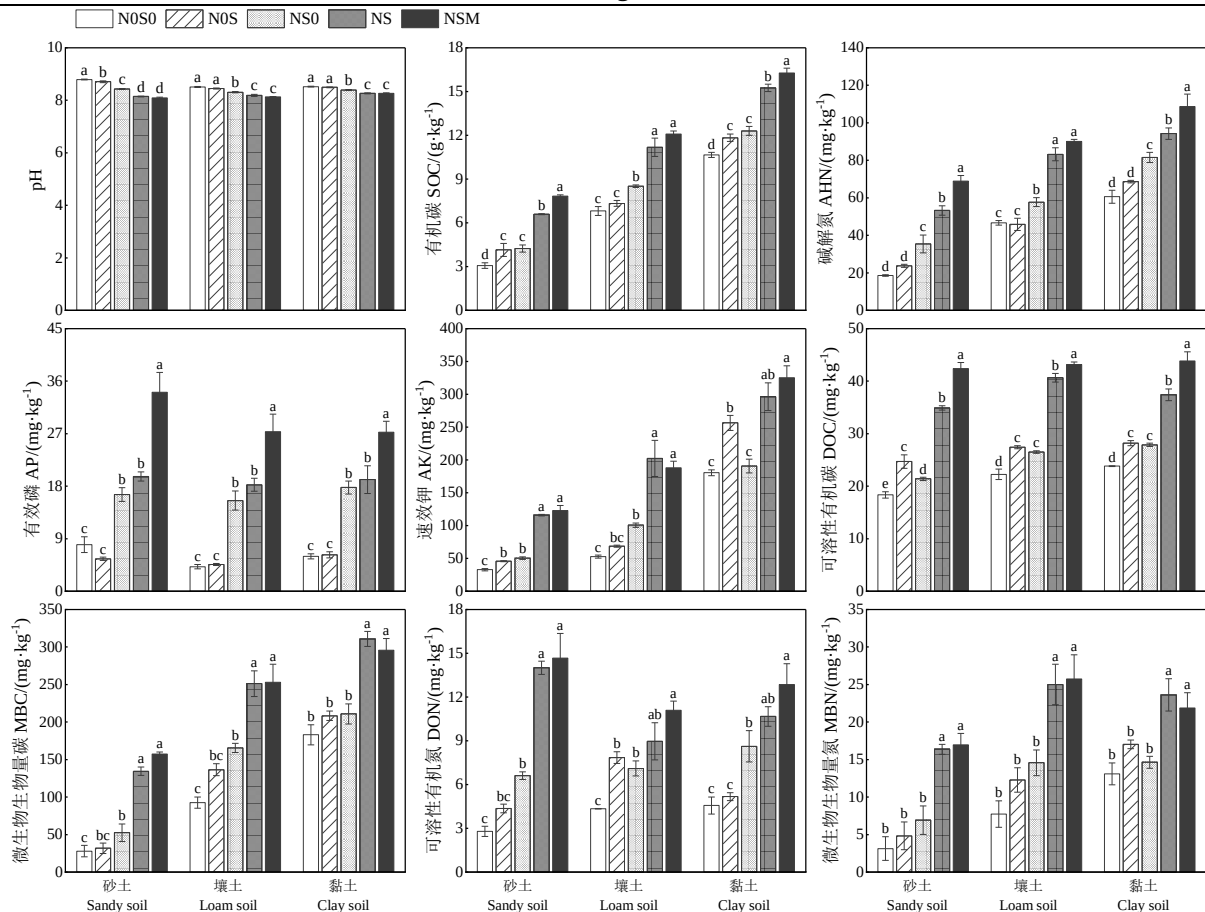
Table 3 Nutrient concentrations of wheat grain and wheat straw relative to treatments

土壤质地	处理	籽粒 N 含量	籽粒 P 含量	籽粒 K 含量	秸秆 N 含量	秸秆 P 含量	秸秆 K 含量
Soil texture	Treatment	Grain N concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Grain P concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Grain K concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Straw N concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Straw P concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Straw K concentration/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
砂土	N0S0	15.88±0.42c	3.66±0.18b	2.76±0.05b	3.25±0.20c	0.45±0.04ab	14.89±1.02c
Sandy soil	N0S	17.12±0.13b	4.31±0.06a	3.00±0.06a	3.49±0.18c	0.53±0.08a	17.26±0.64c
	NS0	22.32±0.35a	3.07±0.06c	2.54±0.04c	5.02±0.24ab	0.37±0.05ab	27.27±1.09b
	NS	23.07±0.23a	3.07±0.09c	2.58±0.04c	4.72±0.23b	0.31±0.08b	33.34±3.85ab
	NSM	22.29±0.63a	3.26±0.15c	2.65±0.04bc	5.38±0.13a	0.36±0.03ab	39.79±2.93a
壤土	N0S0	18.82±0.37b	3.49±0.01a	2.63±0.05a	3.01±0.11b	0.23±0.01a	15.15±0.69b

Loam soil	N0S	18.99±0.29b	3.77±0.16a	2.73±0.09a	3.14±0.05b	0.31±0.03a	18.62±4.92b
	NS0	23.10±0.53a	3.26±0.16a	2.55±0.08a	4.26±0.16a	0.25±0.03a	26.10±0.13a
	NS	22.22±0.36a	3.48±0.28a	2.66±0.09a	4.47±0.14a	0.29±0.07a	30.14±0.86a
	NSM	21.80±0.83a	3.29±0.10a	2.63±0.05a	4.21±0.27a	0.30±0.05a	31.98±0.62a
黏土	N0S0	17.49±0.37c	4.42±0.21a	2.95±0.09a	3.44±0.17b	0.46±0.03ab	16.42±0.54c
Clay soil	N0S	17.52±0.43c	4.35±0.04a	2.88±0.01ab	3.82±0.11b	0.58±0.07a	18.03±0.25c
	NS0	23.34±0.39a	3.10±0.07c	2.47±0.03c	5.18±0.47a	0.40±0.09ab	21.21±0.58b
	NS	22.70±0.18ab	3.26±0.11bc	2.55±0.05bc	4.40±0.38ab	0.30±0.04b	25.65±1.50a
	NSM	21.67±0.36b	3.64±0.17b	2.69±0.09b	4.11±0.09b	0.28±0.04b	25.79±1.10a

2.3 不同施肥处理的土壤理化性质和土壤质量指数

各处理的土壤 pH 范围在砂土中为 8.09~8.79,在壤土中为 8.13~8.51,在黏土中为 8.26~8.52(图 2)。与 N0S0 处理相比, N0S 处理在砂土中 pH 降低 0.98%,但在壤土和黏土中无显著变化; NS0 处理在砂土、壤土和黏土中 pH 均显著降低,降幅分别为 4.13%、2.39%和 1.49%; NS 和 NSM 处理在三种质地土壤中 pH 均进一步降低,平均降幅分别增加至 7.69%、4.11%和 2.99%,但 NS 和 NSM 处理之间的 pH 在三种质地土壤中均无显著差异。与 N0S0 处理相比, N0S 处理在砂土和黏土中均显著提高了 SOC 和 AK 含量,在砂土中分别增加 35.32%和 39.68%,在黏土中分别增加 11.08%和 42.14%,而 AHN、AP、MBC 和 DON 含量无显著变化;在壤土中显著提高了 DON 含量,增加了 81.09%,而 SOC、AK、AHN、AP 和 MBC 含量无显著变化。与 N0S 处理相比, NS0 处理在砂土中 AHN 和 AP 含量显著提高,分别增加 49.15%和 198.14%,而 SOC、AK、MBC 和 DON 含量无显著变化;在壤土中 SOC、AHN 和 AP 含量显著提高,分别增加 16.10%、25.84%和 239.40%,而 AK、MBC 和 DON 含量无显著变化;在黏土中 AHN、AP 和 DON 含量显著提高,分别增加 18.78%、185.49%和 66.69%,而 SOC 和 MBC 含量无显著变化。与 N0S 和 NS0 处理相比, NS 处理在砂土中显著提高了 SOC、AHN、AK、MBC 和 DON 含量,平均分别增加 57.46%、80.14%、140.80%、219.37%和 155.36%,分别达到 6.60 g·kg⁻¹、53.25 mg·kg⁻¹、115.89 mg·kg⁻¹、134.44 mg·kg⁻¹和 14.01 mg·kg⁻¹;在壤土中显著提高了 SOC、AHN、AK 和 MBC 含量,平均分别增加 41.16%、60.66%、139.04%和 66.43%,分别达到 11.18 g·kg⁻¹、83.21 mg·kg⁻¹、202.37 mg·kg⁻¹和 251.28 mg·kg⁻¹;在黏土中显著提高了 SOC、AHN 和 MBC 含量,平均分别增加 26.40%、25.58%和 48.28%,分别达到 15.25 g·kg⁻¹、94.26 mg·kg⁻¹和 310.76 mg·kg⁻¹。与 NS 处理相比, NSM 处理在砂土和黏土中进一步显著提高了 SOC、AHN 和 AP 含量,在砂土中分别增加 18.85%、29.49%和 73.42%,分别达到 7.84 g·kg⁻¹、68.96 mg·kg⁻¹和 34.12 mg·kg⁻¹,在黏土中分别增加 6.69%、15.33%和 42.32%,分别达到 16.27 g·kg⁻¹、108.71 mg·kg⁻¹和 27.24 mg·kg⁻¹;在壤土中进一步显著提高了 AP 含量,增加了 49.82%,达到 27.33 mg·kg⁻¹。



注: SOC: 土壤有机碳; AHN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; DOC: 可溶性有机碳; MBC: 微生物量碳; DON: 可溶性有机氮; MBN: 微生物量氮。柱状图上的误差线为标准误, 不同小写字母表示该质地土壤中不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: SOC: Soil organic carbon; AHN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; DOC: Dissolved organic carbon; MBC: Microbial biomass carbon; DON: Dissolved organic nitrogen; MBN: Microbial biomass nitrogen. The error lines in the bar chart are standard errors. Different letters indicate a significant difference between treatments in this soil texture ($P < 0.05$). The same as below.

图2 不同施肥处理土壤理化性质

Fig. 2 Soil physicochemical properties relative to treatments

图3所示, 与N0S0处理相比, N0S和NS0处理在砂土、壤土和黏土中SQI均显著提升, 平均分别提高200.00%、330.58%和263.78%; NS处理在砂土、壤土和黏土中SQI均进一步提升, 增幅分别为923.86%、1122.17%和795.91%, 分别达到0.72、0.73和0.66。NSM处理在砂土中SQI优于NS处理, 与N0S0处理相比增加1204.71%, 达到0.91, 但在壤土和黏土中与NS处理无显著差异。

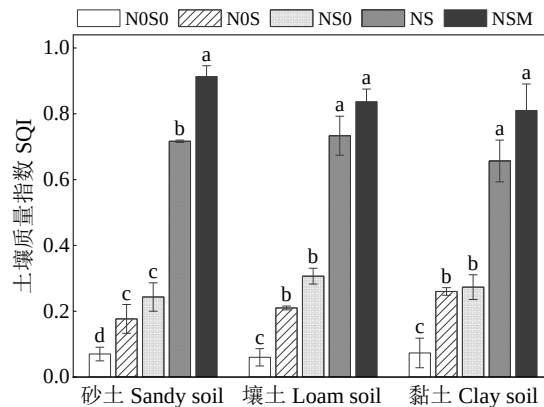
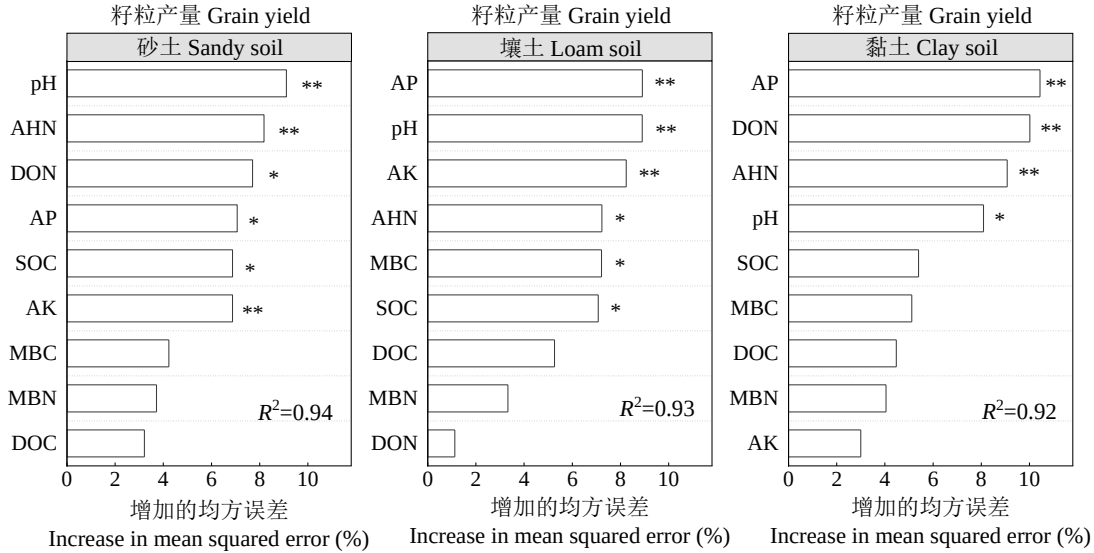


图3 不同施肥处理土壤质量指数

Fig. 3 Soil quality index relative to treatments

2.4 小麦产量影响因素的综合分析

随机森林分析（图4）结果表明，砂土中，pH、AHN、DON、AP、SOC 和 AK 是影响籽粒产量的关键土壤性质；壤土中，AP、pH、AK、AHN、MBC 和 SOC 是影响籽粒产量的关键土壤性质；黏土中，AP、DON、AHN 和 pH 是影响籽粒产量的关键土壤性质。



注：*和**分别表示显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著相关 ($P < 0.01$)。Note: “*” indicates a significant correlation ($P < 0.05$), and “**” indicates an extremely significant correlation ($P < 0.01$).

图4 影响籽粒产量的关键土壤理化性质

Fig. 4 Key soil physicochemical properties affecting grain yield

线性回归分析（图5）结果表明，在砂土、壤土和黏土中，SQI 与籽粒产量均呈显著正向线性关系。

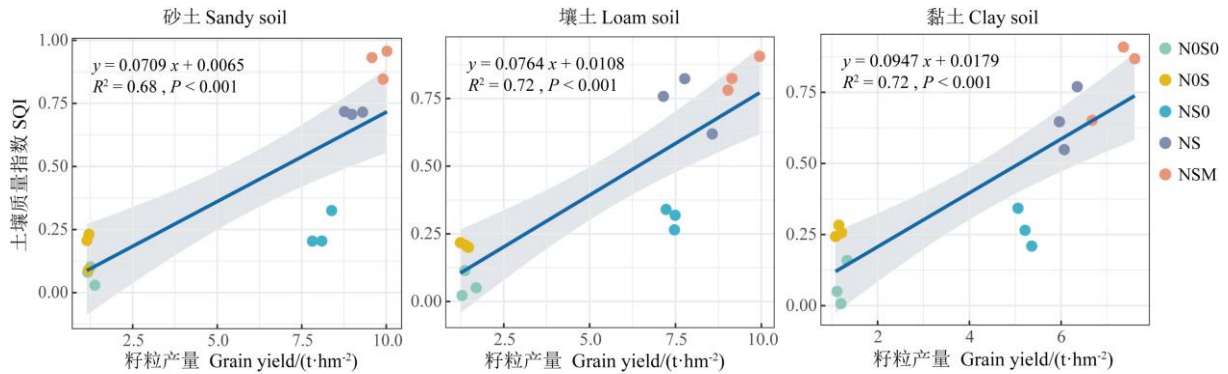


图5 土壤质量指数与籽粒产量的线性回归分析

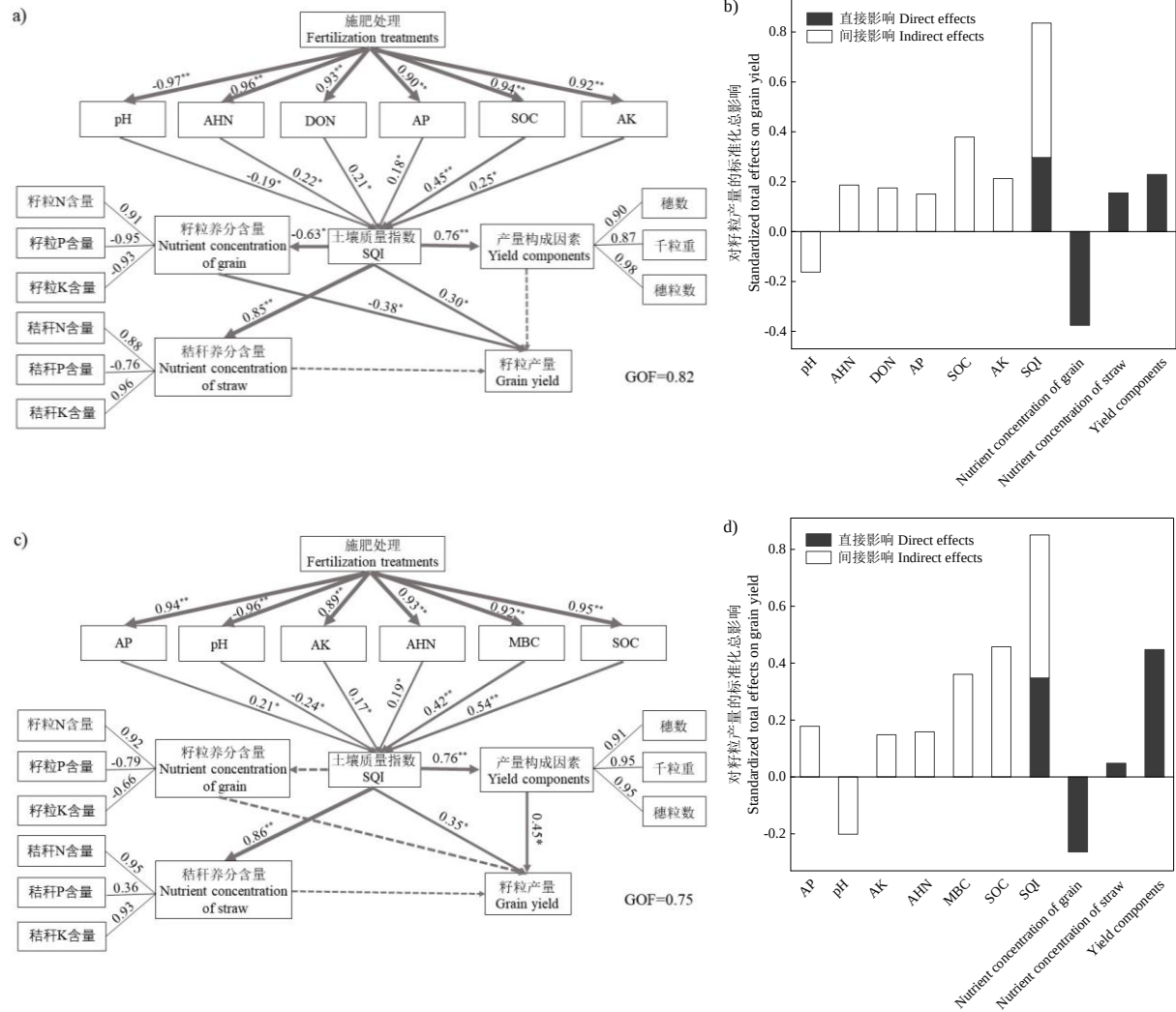
Fig. 5 Linear regression analysis of soil quality index and grain yield

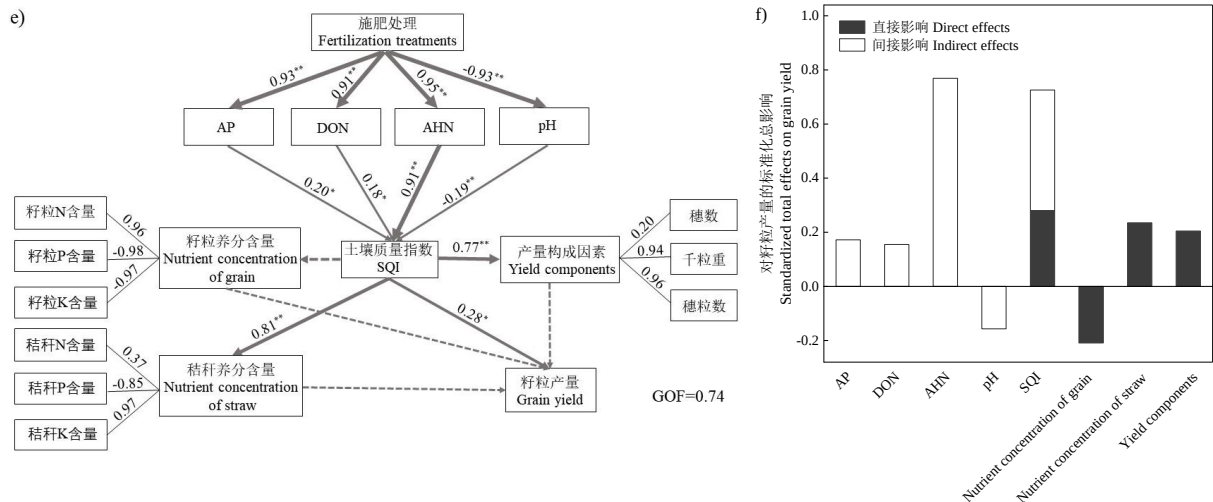
为进一步明确和量化施肥模式、影响籽粒产量的关键土壤理化性质、土壤质量、小麦养分含量、产量构成因素与籽粒产量之间的关系，构建了偏最小二乘路径模型（图6）。结果表明，砂土中影响籽粒产量的关键土壤性质（pH、AHN、DON、AP、SOC 和 AK）、壤土中影响籽粒产量的关键土壤性质（AP、pH、AK、AHN、MBC 和 SOC）和黏土中影响籽粒产量的关键土壤性质（AP、DON、AHN 和 pH）均受

施肥模式显著调控, 并显著影响 SQI, 其中除 pH 受施肥模式负调控且与 SQI 负相关外, 其它土壤性质均受施肥模式正调控且与 SQI 正相关。

在砂土、壤土和黏土中, SQI 均对籽粒产量具有显著的直接正效应。在砂土中, 籽粒养分含量与 SQI 显著负相关, 并与籽粒产量显著负相关。在壤土中, 产量构成因素与 SQI 显著正相关, 并与籽粒产量显著正相关。

影响籽粒产量的关键土壤性质中, 在砂土中, SOC 对籽粒产量具有最高的间接正效应; 在壤土中, SOC 和 MBC 对籽粒产量具有最高的间接正效应; 在黏土中, AHN 对籽粒产量具有最高的间接正效应。





注：图 a 和图 b 为砂土，图 c 和图 d 为壤土，图 e 和图 f 为黏土。偏最小二乘路径模型中，实线表示有显著影响($P < 0.05$)，虚线表示无显著影响($P > 0.05$)，*表示 $P < 0.05$ ，**表示 $P < 0.01$ ，线条上的数字为回归系数，回归系数越高线条越粗。GOF (Goodness of fit)：拟合优度。
Note: Figures a and b belong to sandy soil, figures c and d belong to loam soil, and figures e and f belong to clay soil. In the partial least squares path model, the solid line indicates a significant effect ($P < 0.05$) and the dashed line indicates no significant effect ($P > 0.05$). “*” indicates $P < 0.05$, and “**” indicates $P < 0.01$. The number on the line is the regression coefficient, the higher the regression coefficient, the thicker the line. GOF: Goodness of fit.

图 6 小麦产量影响机制的偏最小二乘路径模型

Fig. 6 Partial least squares path model for influencing mechanism of wheat yield

3 讨论

3.1 不同施肥模式对土壤理化性质和土壤质量的影响

本研究结果表明，AHN、pH 和 AP 在砂土、壤土和黏土中均为影响籽粒产量的关键土壤指标（图 4），路径模型还表明，AHN、pH 和 AP 对 SQI 具有显著影响（图 6）。氮是作物生长所需的最重要的矿质元素之一^[1]，特别是碱解氮等有效氮是农业生态系统中的重要限制性养分^[17]。本研究结果表明，在砂土、壤土和黏土中，N0S 处理的籽粒产量与 N0S0 处理相比均无显著性差异（表 2），即在不施化肥的情况下，秸秆的添加并未引起产量的变化。Islam 等^[5]发现，在小麦—玉米轮作系统中，在不施化肥的情况下，秸秆还田对产量没有显著影响，甚至降低了作物产量，这与本研究结果相似。这可能由于微生物驱动的秸秆分解高度基于土壤氮水平，施用化肥（特别是氮肥）可以供应足够的氮，从而刺激微生物活性，促进秸秆分解，有利于作物生长和提高籽粒产量^[4]。Huang 等^[7]也指出无机氮肥的施用会加速高碳氮比秸秆的分解。本研究中，在砂土、壤土和黏土中，N0S 处理的 AHN 含量与 N0S0 处理相比均无显著性差异（图 2），难以为微生物活动提供足够的氮源。土壤 pH 与土壤养分有效性和微生物活性密切相关^[5, 7, 16]，Giovannetti 等^[11]指出由于土壤养分以离子形式（如 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 H_2PO_4^- ）被作物根系吸收，pH 对养分有效性具有关键作用，Huang 等^[7]研究表明，pH 可影响土壤微生物和土壤酶活性，从而影响秸秆分解和土壤养分转化。在酸性土（ $\text{pH} < 6.5$ ）中，pH 的下降会加剧土壤酸化程度，从而活化铝和锰等有害重金属元素、危害土壤生物，此外还会溶解和淋失土壤中的钾、钙和镁等营养物质^[20]，并减少作物对水分的吸收^[11]，而在碱性土（ $\text{pH} > 7.5$ ）中，pH 的适当降低会提高土壤中多种矿质养分的可利用性，并且增加土壤导水性和土壤保水量，此外 pH 的适当降低还会更利于根细胞生长和根系水分运输^[11]。本研究区土壤为碱性土，研究结果表明，在砂土、壤土和黏土中，化肥的施用使 NS0 处理的 pH 相较 N0S0 处理显著降低（图 2），这与铵态氮肥通过硝化作用释放质子而引起的土壤 pH 下降有关^[21]；NS 和 NSM 处理的 pH 相较 NS0 处理

进一步显著下降(图2),这可能与添加秸秆和有机肥后有机酸和氨基酸等酸性物质的增加有关^[21],pH的降低可能会使土壤环境更利于微生物生长和改变微生物群落组成,及通过提高土壤碳氮有效性而刺激微生物活性和作物生长^[5]。AP可以影响作物根系的总长度和生物量等性状,以及作物的分蘖数等地上部特征^[22],本研究发现,在砂土、壤土和黏土中,与NS0处理相比,NS处理的AP含量无显著变化,而NSM处理则显著提高了AP含量(图2),这可能是由于粪肥较低的C/N值和自身具有的活性微生物,更有利于养分释放,增加了土壤中磷的有效性^[8]。

本研究结果表明,SOC和AK在砂土和壤土中为影响籽粒产量的关键土壤指标,DON在砂土和黏土中为影响籽粒产量的关键指标,MBC在壤土中为影响籽粒产量的关键指标(图4),路径模型还表明,SOC、AK、DON和MBC均对SQI具有显著影响(图6)。与单施化肥相比,化肥配施秸秆提供了额外的养分输入,导致SOC积累,较高的SOC含量可以改善土壤结构、持水能力和养分循环以及提供作物生长所需的大量营养元素和微量营养元素^[5],并且是微生物生长的重要能量来源^[17],从而促进作物生长。Zhang等^[4]发现化肥配施秸秆显著影响了SOC含量,并且作物产量与SOC含量呈显著正相关性。本研究发现,在砂土和黏土中,NSM处理的SOC含量较NS处理进一步提升(图2),表明粪肥加速了有机质转化以增加SOC含量^[10],这与前人^[8]的研究结果一致。需要注意的是,作物产量和SOC含量通常是非线性相关的,即当SOC储量达到临界值时,作物产量不会正向线性增加^[4]。有研究^[5, 23]表明,土壤AK是参与许多作物生理过程的重要营养物质,并且受秸秆还田显著影响。Duncan等^[22]还指出,AK可以影响土壤N的有效性,因为K⁺可以占据土壤颗粒上的负电荷位点,从而移除残留在土壤溶液中的NH₄⁺,这一过程促进了NH₄⁺向NO₃⁻的转化,有助于作物对N的吸收。本研究中,AK在砂土和壤土中显著影响籽粒含量,但在黏土中对籽粒产量无显著影响(图4),在砂土、壤土和黏土中,各处理的AK含量范围分别为32.79~122.69 mg·kg⁻¹、52.69~202.37 mg·kg⁻¹和180.44~325.07 mg·kg⁻¹(图2),表明黏土更利于AK积累,使AK出现盈余,但张桃林等^[20]指出土壤中过量盈余的速效养分会延长作物生育期,不利于作物的生长。

本研究结果表明,壤土中NS和NSM处理具有最高的MBC含量,砂土和黏土中NS和NSM处理具有最高的DON含量(图2),不稳定碳和不稳定氮是微生物获取能量的重要来源^[24],土壤微生物参与土壤有机质的矿化和腐殖化以及养分循环,并且在土壤大团聚体形成中起着重要作用^[25],有研究^[17]表明,肥力较高的土壤通常具有更高的MBC含量。

土壤质量改善对作物增产和确保农业生产力非常关键^[26]。本研究结果表明,NS和NSM处理在砂土、壤土和黏土中SQI均为各处理中最高,其中在砂土中,NSM处理相较NS处理进一步提升了SQI(图3),即化肥配施秸秆或化肥配施秸秆和鸡粪通过改善土壤养分有效性以及pH和SOC等指标,提升了土壤质量。He等^[10]指出,在小麦种植系统中,与常规施肥相比,使用有机肥替代20%氮肥显著提升了SQI,Li等^[8]指出,配施猪粪、秸秆和农家肥等,通过改善pH、SOC、TN、AK、AP、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N等土壤性质而对土壤质量产生积极影响,与本研究结果相似。

3.2 不同施肥模式对小麦养分含量的影响

不同施肥模式影响作物植株中养分的积累,籽粒和秸秆中N、P和K等营养元素的含量可以反映小麦对土壤中养分的吸收和利用,对小麦生长和产量具有重要影响^[27]。

施肥模式、籽粒养分含量和小麦产量之间具有复杂的关系^[1, 28]。本研究中,在砂土中,与单施化肥的NS0处理相比,NS和NSM处理显著提高了土壤质量指数(图3)和籽粒产量(表2),但3个处理间的籽粒N、P和K含量均无显著差异,分别恒定在22.29~23.07 g·kg⁻¹、3.07~3.26 g·kg⁻¹和2.54~2.65 g·kg⁻¹范围内(表3)。这可能是由于较高的小麦生物量水平下产生的养分稀释效应^[22],Lollato等^[28]通过在美国俄克拉荷马州进行长期试验(1966—2016年),发现当小麦籽粒产量在4.0 t·hm⁻²以内时,籽粒N含量与籽粒产量呈负相关性,当小麦籽粒产量超过6.0 t·hm⁻²时,籽粒N含量恒定在19.9 g·kg⁻¹左右,与本研究结果相似。但是,在籽粒N、P和K浓度基本恒定的情况下,籽粒产量的增加意味着籽粒中积累了更多的N、P和K总量,即化肥配施秸秆及化肥配施秸秆和粪肥可能通过改善土壤中的养分状况和作物根系生长等^[29],更有利于作物对土壤中养分的获取和吸收,或提高作物的养分利用率^[29]。

本研究中,路径模型表明,在砂土、壤土和黏土中,土壤质量均与小麦秸秆养分含量显著正相关(图

6), 即更优的土壤质量更有利于秸秆中养分浓度的提升, 使促进小麦生长发育和将养分向籽粒输送, Duncan 等^[22]指出小麦秸秆中养分含量的增加反映了生态系统的生产力和养分供应能力的增强; Chen 等^[15]指出作物秸秆的 P 和 K 含量体现了土壤中有效磷和速效钾的供应情况。Ghafoor 等^[30]研究表明, 小麦秸秆中的 P 和 K 含量的增加促进了小麦产量的增加, 本研究发现, 在砂土、壤土和黏土中, 小麦秸秆养分含量对籽粒产量均表现出正效应 (图 6), 但是未达到显著性水平。

3.3 土壤质地对土壤养分和小麦产量的影响

本研究中的潮土成土母质为黄河多次泛滥冲积后的产物, 其不同空间形成了砂土、壤土和黏土等不同土壤质地^[31]。本研究中, 同一施肥模式在不同质地土壤中的小麦产量存在差异, 例如 NS 处理在砂土、壤土和黏土中的产量分别为 9.01、7.83 和 6.13 t·hm⁻², NSM 处理在砂土、壤土和黏土中的产量分别为 9.84、9.38 和 7.21 t·hm⁻² (表 2)。Islam 等^[5]通过 meta 分析评估了无机肥配施秸秆在砂土、壤土和黏土 (根据美国农业部土壤分类系统划分) 3 种质地土壤下对作物产量的影响, 发现在小麦或玉米单作种植系统中, 壤土对作物产量提升最高, 其次是砂土、黏土; 而在小麦—玉米轮作种植系统中, 砂土对作物产量具有最高的提升, 其次是壤土、黏土, 与本研究结果相似。这可能由于不同土壤质地中, 颗粒聚集、土壤通气性和水分条件不同, 微生物活性、酶活性、土壤养分循环和养分有效性也存在差异, 进而对作物生长和作物产量产生不同的影响^[11, 31]。本研究中, 各处理的 SOC 含量范围在砂土中为 3.06~7.84 g·kg⁻¹, 在壤土中为 6.82~12.09 g·kg⁻¹, 在黏土中为 10.65~16.27 g·kg⁻¹ (图 2), 即黏土具有最高的 SOC 积累, 其次为壤土、砂土。Huang 等^[7]指出黏土通常透气性较差, 需氧微生物受抑制, 使有机物质分解相对缓慢, 导致有机质积累较高, 不利于其中营养物质的释放, 此外, 与砂土和壤土相比, 黏土通常碳氮比更高, 而碳氮比越高, 有机物质的分解速率越慢^[32], 从而影响作物生长。黏土中被黏粒压实、不能正常分解的秸秆沉积物, 还会影响作物根系的生长和根系分泌物生成^[5], Ding 等^[31]指出, 作物根系分泌物产生的不稳定碳和不稳定氮是土壤微生物所需能量的重要来源。

4 结 论

与 NS0 处理相比, NS 和 NSM 处理在砂土、壤土和黏土中均显著提高了 SQI, NS 处理在砂土和黏土中显著提高了籽粒产量, NSM 处理在砂土、壤土和黏土中均显著提高了籽粒产量。砂土中, pH、AHN、DON、AP、SOC 和 AK 是影响籽粒产量的关键土壤性质; 壤土中, AP、pH、AK、AHN、MBC 和 SOC 是影响籽粒产量的关键土壤性质; 黏土中, AP、DON、AHN 和 pH 是影响籽粒产量的关键土壤性质。在砂土、壤土和黏土中, 影响小麦产量的关键土壤性质均对 SQI 具有显著影响, 而 SQI 均对小麦籽粒产量具有直接显著影响, 因此影响小麦产量的关键土壤性质可以作为监测土壤质量和小麦产量变化的指标以指导优化施肥。上述结果表明, 常规施肥+秸秆还田或施化肥+秸秆还田+鸡粪替代 20%氮肥有利于改善土壤质量, 其不同质地土壤中通过不同作用方式影响了小麦籽粒产量。

参考文献 (References)

- [1] Yan S C, Wu Y, Fan J L, et al. Dynamic change and accumulation of grain macronutrient (N, P and K) concentrations in winter wheat under different drip fertigation regimes[J]. Field Crops Research, 2020, 250: 107767.
- [2] Xu J L, Gao Z Y, Liu S, et al. A multienviromental evaluation of the N, P and K use efficiency of a large wheat diversity panel[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108634.
- [3] Zhang J L, Nie J, Cao W D, et al. Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 142: 126641.
- [4] Zhang H Y, Hobbie E A, Feng P Y, et al. Responses of soil organic carbon and crop yields to 33-year mineral fertilizer and straw additions under different tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104943.
- [5] Islam M U, Guo Z C, Jiang F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A

- meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108447.
- [6] Qiu L L, Li D D, Zhang J B, et al. Effects of key-stone microbe based on Co-occurrence networks on wheat yield in the soils with straw returning[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2): 491-502. [邱丽丽, 李丹丹, 张佳宝, 等. 基于共现网络的关键微生物对秸秆还田土壤小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(2): 491-502.]
- [7] Huang T T, Yang N, Lu C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105171.
- [8] Li P, Wu M C, Kang G D, et al. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 373: 114416.
- [9] Liu J A, Shu A P, Song W F, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115287.
- [10] He H, Peng M W, Lu W D, et al. Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158132.
- [11] Giovannetti M, di Fossalunga A S, Stringlis I A, et al. Unearthing soil-plant-microbiota crosstalk: Looking back to move forward[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1082752.
- [12] Peng M W, He H, Wang Z K, et al. Responses and comprehensive evaluation of growth characteristics of ephemeral plants in the desert-oasis ecotone to soil types[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115288.
- [13] Mi W H, Sun T, Ma Y Y, et al. Higher yield sustainability and soil quality by manure amendment than straw returning under a single-rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2023, 292: 108805.
- [14] Gong D Q, Wang Z F, Zhang Y L, et al. Soil quality change and spatial differentiation characteristics of greenhouses land soil in Lhasa River Valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (6): 1582-1594. [宫殿清, 王兆锋, 张镡锂, 等. 拉萨河谷设施农地土壤质量变化及空间分异特征[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (6): 1582-1594.]
- [15] Chen Q Y, Liu Z J, Zhou J B, et al. Long-term straw mulching with nitrogen fertilization increases nutrient and microbial determinants of soil quality in a maize-wheat rotation on China's Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145930.
- [16] Zhang X, Qu J S, Li H, et al. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114170.
- [17] Li P, Shi K, Wang Y Y, et al. Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 190: 31-40.
- [18] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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.]
- [19] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]. Madison: Soil Science Society of America Special Publication, 1994.
- [20] Zhang T L, Li Z P, Wang X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 843-850. [张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 843-850.]
- [21] Kong P J, Zheng J, Luan L, et al. Effects of different types of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization and maize yield in upland red soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 6047-6057. [孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 6047-6057.]
- [22] Duncan E G, O'Sullivan C A, Roper M M, et al. Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: Review[J]. *Field Crops Research*, 2018, 226: 56-65.
- [23] Bai Y L, Wang L, Lu Y L, et al. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize rotation[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2467-2476.
- [24] Zhang Z M, Yan J, Han X Z, et al. Labile organic carbon fractions drive soil microbial communities after long-term fertilization[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 32: e01867.
- [25] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation

- in a Vertisol[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 232-237.
- [26] Oladele S O. Changes in physicochemical properties and quality index of an Alfisol after three years of rice husk biochar amendment in rainfed rice–Maize cropping sequence[J]. Geoderma, 2019, 353: 359-371.
- [27] Liang T, Liu M, Li S, et al. Effects of balanced fertilization on soil nutrients and growth and nutrient absorption of rice-wheat rotation system in saline-alkali farmland of tidal flat[J]. Soils, 2021, 53(3):503-510. [梁婷, 刘明, 李帅, 等. 均衡施肥对滩涂盐碱农田稻麦轮作系统土壤养分与作物生长和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3):503-510.]
- [28] Lollato R P, Figueiredo B M, Dhillon J S, et al. Wheat grain yield and grain-nitrogen relationships as affected by N, P, and K fertilization: A synthesis of long-term experiments[J]. Field Crops Research, 2019, 236: 42-57.
- [29] Duncan E G, O'Sullivan C A, Roper M M, et al. Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(3): 364-373.
- [30] Ghafoor I, Habib-ur-Rahman M, Ali M, et al. Slow-release nitrogen fertilizers enhance growth, yield, NUE in wheat crop and reduce nitrogen losses under an arid environment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(32): 43528-43543.
- [31] Ding S J, Xin X L, Yang W L, et al. Transformation of fertilizer nitrogen in fluvo-aquic soils with different textures and its influencing factors[J]. Plant and Soil, 2022, 471(1): 541-558.
- [32] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: Global patterns and controlling factors[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(2): 85-93.

(责任编辑: 檀满枝)