中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):162-173
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025268

油菜秸秆还田下氮肥减施对红壤旱地芝麻产量及氮素利用效率的影响

吕丰娟[1,2],吕茹洁[2],张志华[2],唐慧娟[2],何俊海[2],汪瑞清[2],林洪鑫[2],魏林根[2*]
(1.井冈山红壤研究所(江西省农业科学院井冈山分院),江西 吉安,343016;
2.江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,国家红壤改良工程技术研究中心,农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室,农业农村部酸化改良与利用重点实验室,耕地改良与质量提升江西省重点实验室,江西 南昌,330200)

摘要:为明确红壤旱地油菜-芝麻轮作体系中,油菜秸秆全量还田条件下芝麻获得高产的最佳施氮量,本研究于2020-2023年在江西典型红壤旱地进行田间试验。试验设置油菜秸秆全量还田下6个氮肥梯度处理:常规施氮(N0,105.0 kg/hm²)、减氮10%(N1,94.5 kg/hm²)、减氮20%(N2,84.0 kg/hm²)、减氮30%(N3,73.5 kg/hm²)、减氮40%(N4,63.0 kg/hm²)及不施氮处理(N5),以秸秆离田但常规施氮(105.0 kg/hm²)为对照(CK),分析各处理对土壤理化性质、干物质累积分配、氮肥利用效率以及农艺性状和产量的影响。结果表明,油菜秸秆还田对土壤理化性质的改良效果受施氮量调控,且随还田年限延长而增强。与CK相比,适量减氮20%(N2)在还田第二年改良效果最优:土壤容重降低9.77%,土壤有机质、有效磷和速效钾含量提高17.93%、13.62%和36.21%,速效氮含量与CK持平,C/N比优化至11.34。在作物响应方面,减氮20%(N2)处理芝麻产量最高,两年产量较CK分别提高12.12%、10.01%,氮肥收获指数、氮肥贡献率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率均与N0无显著差异,且芝麻各器官氮素累积量、干物质量均保持稳定。但当氮肥减施超过30%后(N4、N5),氮肥吸收利用率、氮肥农学效率显著降低41.74%、45.53%(与N0比),导致干物质量与产量显著降低。基于抛物线模型,油菜秸秆全量还田下芝麻获得最高产量的最佳施氮量为90.93~92.34 kg/hm²。由于减氮20%(84.0 kg/hm²)可实现芝麻高产与氮肥高效利用的协同提升,据此推荐红壤旱地油菜秸秆全量还田下,芝麻施氮量为84.0~92.34 kg/hm²。

关键词:红壤旱地;秸秆还田;氮肥减施;芝麻产量;氮肥利用效率
中图分类号:S565.3　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0162-12

Effects of nitrogen reduction under rapeseed straw return on sesame yield and nitrogen use efficiency in red soil upland

LYU Feng-juan[1,2], LYU Ru-jie[2], ZHANG Zhi-hua[2], TANG Hui-juan[2], HE Jun-hai[2], WANG Rui-qing[2], LIN Hong-xin[2], WEI Lin-gen[2*]
(1. *Jinggangshan Red Soil Research Institute, Jinggangshan Branch of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Ji'an* 343016, *China*; 2. *Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Acidified Soil Amelioration and Utilization, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Enhancement, Nanchang* 330200, *China*)

Abstract: To determine the optimal nitrogen application rate for achieving high sesame yield under full rapeseed straw return in rapeseed-sesame rotation system of red soil upland, a field experiment was conducted from 2020 to 2023 in typical red soil upland in Jiangxi Province. Six nitrogen treatments under full rapeseed straw return

收稿日期:2025-12-03
基金项目:江西省重点研发计划项目(20252BCF320016);江西省财政厅科技专项资助项目(2024JXCZ003);国家现代农业产业技术体系建设(CARS-14-2-15)
作者简介:吕丰娟(1984-),女,副研究员,主要从事油料作物高产栽培技术研究,E-mail: fengjuanlv@126.com
* 通讯作者:魏林根(1966-),男,研究员,主要从事芝麻高产栽培技术研究,E-mail: lgw0021@163.com

were established, including conventional nitrogen application (N0, 105 kg N/ha), 10% reduction (N1, 94.5 kg N/ha), 20% reduction (N2, 84.0 kg N/ha), 30% reduction (N3, 73.5 kg N/ha), 40% reduction (N4, 63.0 kg N/ha), and no nitrogen (N5). A treatment with straw removal but conventional nitrogen application (105 kg N/ha) served as control (CK). The effects of these treatments were analyzed on soil physicochemical properties, dry matter accumulation and partitioning, nitrogen use efficiency, agronomic traits and sesame yield. Results indicated that the improvement effect of straw return on soil physicochemical properties was regulated by N application rate and enhanced with the extension of return period. Compared with CK, N2 exhibited optimal improvement effect in the second year of straw return, in which soil bulk density decreased by 9.77%, while the contents of soil organic matter, available phosphorus and available potassium increased by 17.93%, 13.62% and 36.21%, respectively, while the available nitrogen content remained stable comparable to CK, and the C/N ratio was optimized to 11.34. In terms of crop response, N2 treatment achieved the highest sesame yield, with a two-year yield increase of 12.12% and 10.01% compared with CK. Meanwhile, nitrogen harvest index, nitrogen contribution rate, nitrogen partial factor productivity, and nitrogen agronomic efficiency showed no significant difference from N0. Moreover, nitrogen accumulation and dry matter weight in both vegetative organs and grains remained stable. However, when nitrogen reduction exceeded 30% (N4, N5), the nitrogen recovery efficiency and nitrogen agronomic efficiency decreased significantly by 41.74% and 45.53% (compared to N0), respectively, leading to a significant reduction in dry matter accumulation and sesame yield. Based on parabolic model, the optimal nitrogen application rate for achieving the maximum sesame yield under straw return was determined to be 90.93-92.34 kg N/ha. It is evident that a 20% nitrogen reduction (84.0 kg N/ha) could synergistically enhance both high yield and nitrogen efficiency. Accordingly, the recommended nitrogen application rate for sesame under full rapeseed straw return in red soil upland is 84.0 to 92.34 kg N/ha.

Key words: red soil upland; straw return; nitrogen reduction; sesame yield; nitrogen use efficiency

红壤是我国重要的土壤资源,广泛分布于长江以南地区,总面积2.04亿公顷,占国土面积的22.7%,是我国重要的粮油和经济作物产区[1]。由于高温多雨的气候特点,红壤区土壤风化淋溶作用强烈,加之长期高强度的耕作以及大量施用化肥等人为因素,红壤区耕地质量下降日益严重,已成为制约该区域农业高质量健康发展的主要障碍[1,2]。此外,作物收获带走大量盐基阳离子,造成土壤中H^+浓度增加,也是红壤酸化加剧、耕地质量下降的一大诱因[3,4]。

农作物秸秆中含有大量的碱性物质,还田后可改善耕层结构、提升土壤肥力,并缓控红壤进一步酸化[5,6],是红壤改良、实现农业可持续发展的关键措施之一。我国秸秆资源丰富,年产量达8亿吨,其中油菜秸秆年产量达2915万吨,仅次于玉米、水稻和小麦三大主粮作物秸秆资源量[7]。与三大粮食作物相比,油菜秸秆中钾、钙、镁等元素含量更高,还田后对红壤的改良效果更优[8-10]。同时,秸秆还田也是一种在保证作物稳产或增产的前提下,减少化肥投入实现化肥减施增效,推动农业绿色可持续发展的有效措施[9,11]。

氮肥是影响芝麻产量形成的最关键因素之一[12]。常规管理为追求芝麻高产往往采用较高的氮肥投入(105 kg·hm^{-2}甚至更高),容易导致氮肥利用率低下、面源污染等问题[13,14]。油菜-芝麻轮作是江西红壤旱地的典型种植模式。随着农业机械化水平的提高,油菜秸秆全量粉碎还田已成为常规操作。然而,作物秸秆碳氮比较高,直接还田易导致微生物与作物争氮,导致下茬作物生育前期氮素胁迫,影响作物生长进而减产[15,16]。因此,秸秆还田需要配施氮肥以保证作物稳产。由于土壤基础肥力、气候条件、还田方式与管理措施等不同,油菜秸秆还田后对红壤旱地的改良效果存在较大差异[10,17,18],其对后茬芝麻氮肥需求的影响尚不明确。基于此,本研究通过系统分析油菜秸秆全量还田下不同氮肥减施水平对红壤理化性质、芝麻氮素吸收利用及产量的综合影响,旨在阐明油菜秸秆还田对红壤的改良机制与氮肥替代效应,以期为南方红壤区土壤改良和油菜秸秆资源化利用提供理论依据,为"一地两油"的复种轮作模式提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在江西省抚州市东乡区典型红壤区

(116°20′ ~ 116°51′E, 28°2′ ~ 28°30′N)进行。该区域属于亚热带湿润气候区,全年平均气温18.0℃,年平均日照时间1427.9 h,年平均降雨量2180.6 mm,年无霜期271 d(2021年、2023年芝麻生育期内气象资料见表1)。土壤类型为第四纪红黏土母质发育而来的红壤,试验前土壤pH 4.75,有机质16.54 g·kg^{-1},全氮0.95 g·kg^{-1},速效氮83.12 mg·kg^{-1},有效磷171.64 mg·kg^{-1},速效钾191.63 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

试验于2020年10月开始,种植模式为油菜-芝麻轮作。油菜于每年10月上旬播种,密度4.0×10^{5}株·hm^2,行距30 cm,翌年5月上旬收获,之后油菜秸秆全量粉碎还田;芝麻于6月上旬接茬播种,密度每公顷2.25×10^{5}株,行距30 cm,当年9月上旬或中旬收获,之后每年重复上述轮作模式。供试油菜品种为赣油杂8号,芝麻品种为金黄麻。油菜秸秆主要养分含量为:全碳402.71 g/kg、全氮7.13 g/kg、全磷0.61 g/kg、全钾9.50 g/kg、C/N比为56∶1。

试验共有7个处理,以油菜秸秆离田但正常施氮为对照(CK,105.0 kg·hm^{-2}),设置油菜秸秆全量还田下不同施氮量处理,分别为常规施氮(N0,105.0 kg·hm^{-2})、减氮10%(N1,94.5 kg·hm^{-2})、减氮20%(N2,84.0 kg·hm^{-2})、减氮30%(N3,73.5 kg·hm^{-2})、减氮40%(N4,63.0 kg·hm^{-2})以及不施氮处理(N5,0 kg·hm^{-2}),氮肥基追比6∶4,于初花期追施。所有处理磷肥(P_2O_5)、钾肥(K_2O)施用量相同,分别为90 kg·hm^{-2}、105 kg·hm^{-2}。油菜秸秆还田采用机械粉碎至2~10 cm后人工翻压还田,还田量为4000 kg·hm^{-2},还田深度为0~20 cm。试验设置3次重复,随机区组设计,小区面积12 m^2(2 m×6 m),为减少处理间影响,小区间挖排水沟,沟宽50 cm,沟深30 cm。油菜常规施肥N∶P_2O_5∶K_2O= 150∶75∶90,磷、钾肥做基肥一次性施入,氮肥基追比5∶2∶3,分别于现蕾期和开花期追施。试验所用氮、磷、钾肥料分别为尿素(N≥46%)、钙镁磷肥(P_2O_5≥12%)和氯化钾(K_2O≥60%),油菜、芝麻其他栽培管理措施参照一般大田管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤物理性质测定 在2021、2022年9月芝麻收获后、油菜种植前,采用环刀采集0~20 cm原状土,每个小区取3个重复,计算土壤容重、孔隙度和土壤含水量[19]。

1.3.2 土壤化学性质测定 试验于2021年、2022年7月采用五点取样法收集芝麻花期0~20 cm土壤样品,采用"四分法"取1 kg带回室内剔除动植物残体和石砾,自然风干后磨细并过20目筛,采用土壤农化分析常规方法测定土壤化学性质[20]。土壤pH值采用电位法(水土比2.5∶1),有机质采用$K_2Cr_2O_7$容量-外加热法,全氮采用半微量凯氏法,速效氮采用碱解扩散法,有效磷采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用1.0 mol/L NH_4OAc浸提-火焰光度法测定。

1.3.3 干物质与氮素累积分配 2022年于芝麻成熟期叶片脱落前,每小区随机取3株芝麻,将根、茎、叶、果分开清洗干净,105℃杀青30 min,80℃烘至恒重称重,测定干物质累积量;粉碎后待测各器官氮含量。植株全氮用浓H_2SO_4-H_2O_2消煮,使用凯氏定氮仪测定[20]。

1.3.4 农艺性状与产量 收获期,每小区连续随机取10株芝麻,测量始蒴部位、空梢尖长、单株蒴果数、单株产量;每小区随机选取10个芝麻蒴果,测量并计算每蒴粒数和千粒重。芝麻群体产量由小区实收产量计算而得。

1.4 数据分析与统计

芝麻氮肥吸收利用效率计算公式如下[21]:

植株氮积累量(nitrogen accumulation amount, NAA, kg/hm^2)= 植株干物重×植株含氮量;

氮肥吸收利用率(nitrogen recovery efficiency, NRE, %)=(施氮区植株吸氮量-不施氮区植株吸氮量)/施氮量×100%;

氮肥农学利用率(nitrogen agronomic efficiency, NAE, kg/kg)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(NPFP, kg/kg)= 施氮区籽粒产

表1 芝麻生育期内月均温、月总降水量(2021年、2023年)

Table 1 Monthly mean temperature and total precipitation during sesame growth in 2021 and 2023

	2021				2023			
	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
月均温 Monthly mean temperature /℃	27.1	30.0	28.4	28.1	26.7	30.1	28.7	26.7
月总降水量 Total monthly precipitation /mm	145.4	38.4	195.1	18.6	409.4	244.2	149.2	89.5

量/施氮量;

氮素收获指数(nitrogen harvest index, NHI, %) = 成熟期籽粒含氮量/成熟期地上部氮素积累量;

氮肥贡献率(NCR, %)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮区籽粒产量×100%。

数据用Microsoft Excel统计与分析,采用最小差异显著法(LSD)检验差异显著性水平($P<0.05$),Origin 2018作图。

2 结果与分析

2.1 油菜秸秆还田下氮肥减施对土壤理化性质的影响

由表2可以看出,油菜秸秆还田对芝麻地土壤物理性质具有显著的改良作用。与秸秆离田(CK)相比,秸秆还田配施氮肥处理(N0-N5)总体上显著降低了土壤容重,并提高了土壤总孔隙度、饱和含水量和毛管含水量。与CK相比,N0处理下土壤容重两年分别降低1.14%、7.75%,土壤总孔隙度分别提高1.08%、6.81%,土壤饱和含水量分别提高0.66%、15.78%,土壤毛管含水量分别提高3.75%、14.36%,表明改良效果随还田年限延长而增强。

秸秆还田下,随施氮量降低,土壤容重呈先降低后升高趋势,土壤孔隙度和含水量呈相反趋势,但表现出年际差异。2021年,以减氮10%(N1)对土壤的改良效果最佳,土壤容重降至1.175 g/cm^3,孔隙度和含水量最高;但氮肥过量减施后,N4处理土壤容重等指标与CK持平,N5处理甚至差于CK,对土壤物理结构的改良效果被削弱。2022年,秸秆还田下氮肥减施对土壤物理性质的改良效应更为凸显。秸秆还田的累积效应使减氮20%(N2)处理表现出最优的土壤物理结构,土壤容重比CK降低9.77%,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和含水量和毛管含水量依次升高8.61%、13.89%、20.45%和24.87%;即使不施氮(N5)处理,其土壤物理性质亦与N0无显著差异。相比之下,连续两年秸秆离田(CK)的土壤容重从1.223 g/cm^2(2021年)升至1.238 g/cm^2(2022年),表现出紧实化趋势。

与物理性质一致,秸秆还田配施氮肥对土壤化学性质的改良效果在第二年更为显著(表3)。与CK相比,2021年秸秆还田各处理使土壤pH值提升0.11~0.24,以N5处理为最高,达5.00;2022年各处理提升0.18~0.37,以N4处理下pH提高7.84%最为显著。土壤有机质方面,与CK相比,2021年秸秆还田正常施氮(N0)与适量减氮(N1-N3)处理土壤有机质含量显著提高3.43%~7.28%,2022年秸秆还田各处理土壤有机质含量提高6.31%~17.93%,两年均以N2提升最为显著。土壤速效氮含量与施氮量高度相关,2021年N0处理下土壤速效氮含量与CK持平,随施氮量降低,土壤速效氮含量呈下降趋势,其中N2-N5处理降低8.14%~18.61%;2022年N0处理土壤速效氮含量较CK提高

表2 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下土壤的容重、孔隙度和含水量(2021-2022)

Table 2 Soil bulk density, porosity and moisture content for 2021 to 2022 under rapeseed straw return and nitrogen reduction

年份 Year	处理 Treatments	容重 Bulk density /(g/cm^3)	总孔隙度 Total porosity /%	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	通气孔隙度 Ventilation porosity /%	饱和含水量 Saturated water content /%	毛管含水量 Capillary moisture content /%
2021	CK	1.223ab	53.85ab	40.08ab	13.77ab	44.22ab	32.80ab
	N0	1.209b	54.43ab	41.31a	14.35a	44.51ab	34.03a
	N1	1.175c	55.66a	40.31ab	15.34a	47.27a	34.40a
	N2	1.191bc	55.11a	41.41a	14.38a	47.56a	34.94a
	N3	1.202b	54.65ab	40.76ab	13.88ab	45.6ab	33.97a
	N4	1.221ab	53.92ab	40.19ab	13.73ab	44.16ab	33.74a
	N5	1.264a	52.08b	39.29b	13.07b	42.15b	31.31b
2022	CK	1.238a	53.28a	39.75b	13.53a	43.04b	32.45b
	N0	1.142b	56.91b	42.02a	14.89a	49.83a	37.11a
	N1	1.128b	57.45b	44.17a	13.29a	50.96a	39.15a
	N2	1.117b	57.87b	45.27a	12.60a	51.84a	40.52a
	N3	1.138b	57.07b	43.15a	13.92a	50.17a	37.92a
	N4	1.142b	56.90b	42.05a	14.85a	49.84a	38.40a
	N5	1.155b	56.41b	41.39a	15.01a	48.83a	35.81a

注:表中同一列数字后小写字母表示在同一年份0.05水平上差异显著;下同

Note: Within a column, means followed by the same letter are not significantly different according to $LSD_{0.05}$ in each separate year; Same as below

11.77%,且与N1、N2处理无显著差异,但过量减氮(N3、N4、N5)导致土壤速效氮含量降低12.94%~28.58%。秸秆还田对土壤有效磷含量的影响相对较小。与CK相比,2021年秸秆还田配施适量氮肥可使土壤有效磷含量略有提高或持平,2022年适量施氮(N0-N3)可提高土壤有效磷10.14%~13.62%,以N2提升13.62%最为显著,继续降低施氮量(N4、N5)则导致土壤有效磷含量降低但与CK持平。与CK相比,N0处理下土壤速效钾含量两年分别提高8.93%、38.32%,2021年降低施氮量并未对土壤速效钾含量产生影响;2022年适量减氮(N1、N2)处理土壤速效钾含量较CK提高35.34%、36.21%,与N0持平;过量减氮(N4、N5)处理下土壤速效钾含量显著低于N0处理,但仍显著高于CK。

土壤碳氮比(C/N)的变化反映了秸秆还田下碳氮转化的耦合关系。与CK相比,2021年N1、N2处理显著提高了土壤C/N比,而N0处理与CK无显著差异。至2022年,所有秸秆还田处理的土壤C/N比均高于CK,以N2处理最高,达11.34;N0处理的C/N比增幅较小;N5处理的土壤C/N比同样处于较低水平。表明随还田年限延长,秸秆还田的固碳效应增强,适量减氮有利于同步提升土壤碳固持并维持合理的氮素供应水平。

2.2 油菜秸秆还田下氮肥减施对芝麻干物质分配的影响

与CK相比,油菜秸秆还田下常规施氮(N0)和适量减氮(N1、N2)处理显著提高了芝麻总干物质累积量(图1),增幅分别为11.41%、8.48%、9.03%;氮肥减施30%(N3)芝麻总干物质累积无显著变化,但减施40%(N4)与不施氮(N5)处理则分别降低14.45%、19.58%。

从各器官干物质分配来看,与CK相比,秸秆还田各处理均降低了芝麻根系的干物质量及其占比,根干物质占比降低1.74~2.42个百分点。茎干物质累积量以N0处理最高,除N5外,其茎干物质占比与其他处理无显著差异;N5处理下茎干物质占比显著高于其他处理4.04~7.37个百分点。叶片干物质累积量在N0、N1、N2处理下与CK无显著差异,但N3、N4、N5处理则显著降低,干物质量依次降低14.24%、25.11%、48.60%,占比依次降低1.69、1.70、4.91个百分点。N0、N1、N2处理下芝麻果壳干物质累积量较CK分别升高7.47%、17.54%、16.19%,籽粒干物质累积量分别升高16.53%、15.28%、15.77%,果壳和籽粒干物质总占比以N1、N2处理为最高;N3处理后的果壳干物质累积量仍显著高于CK,但其占比及籽粒干物质累积分配与CK无显著差异;继续减氮至N4、N5水平,芝麻壳和籽粒的干物质累积量显著下降,较N0处理后的果壳干物质量分别降低8.57%、16.92%,籽粒干物质量分别降低12.83%、20.35%,但二者占比均未发生显著变化。

2.3 油菜秸秆还田下氮肥减施对芝麻氮素累积和利用的影响

与CK相比,油菜秸秆全量还田并正常施氮(N0)显著提高了芝麻所有器官的氮素累积量(图2),以茎部氮素累积量提升幅度最大,达38.10%,其次是籽粒,增幅为16.86%。秸秆全量还田下,随施氮量降低,芝麻各器官氮素累积量均呈降低趋

表3 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下土壤的化学性质(2021-2022)

Table 3 Soil chemical properties under rapeseed straw return and nitrogen reduction (2021-2022)

年限 Year	处理 Treatments	pH	有机质 SOM /(g/kg)	全氮 TN /(g/kg)	速效氮 AN /(mg/kg)	有效磷 AP /(mg/kg)	速效钾 AK /(mg/kg)	C/N
2021	CK	4.76c	18.67b	1.11a	120.59a	221.11ab	221.86b	9.76b
	N0	4.87b	19.39a	1.15a	121.97a	230.66a	241.67a	9.78b
	N1	4.92b	20.03a	1.06a	117.70ab	233.02a	252.97a	10.96a
	N2	4.90b	19.85a	1.04a	110.78bc	232.09a	253.00a	11.07a
	N3	4.95b	19.31a	1.10a	109.12bcd	216.11b	245.51a	10.18ab
	N4	4.94b	18.81b	1.13a	105.06cd	218.55b	242.28a	9.66b
	N5	5.00ab	17.83c	1.04a	98.15d	214.75b	242.74a	9.94ab
2022	CK	4.72b	17.74c	1.12a	107.08ab	187.54b	186.65c	9.19b
	N0	4.90ab	19.48ab	1.14a	119.68a	209.31a	258.17a	9.91ab
	N1	4.95ab	20.55a	1.08a	111.29ab	211.33a	252.61a	11.04a
	N2	4.95ab	20.92a	1.07a	105.20ab	213.09a	254.23a	11.34a
	N3	5.01ab	20.05ab	1.10a	93.22b	206.56a	242.89ab	10.57a
	N4	5.09a	19.77ab	1.03a	83.95bc	191.13b	237.83b	11.13a
	N5	5.04ab	18.86b	1.06a	76.48c	186.52b	221.82b	10.32ab

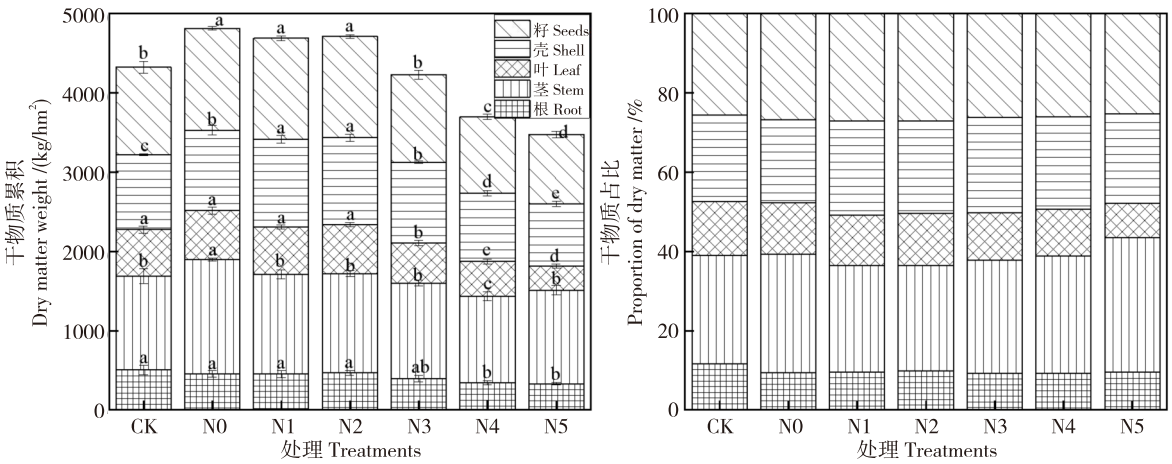


图1 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻干物质的分配(2022)

Fig. 1 Dry matter partitioning in sesame under rapeseed straw return and nitrogen reduction (2022)

势,但不同器官的响应存在差异。与N0相比,适量减氮(N1、N2)仅茎部氮素累积量显著下降,N1、N2分别降低19.91%、29.62%;继续减氮则导致芝麻各器官氮素累积量均显著降低,以茎部降幅最为显著,N3、N4、N5处理依次降低26.19%、51.70%、66.48%;其次是叶部,三个处理依次降低20.67%、35.98%、64.53%;再次是芝麻壳,三处理依次降低12.78%、30.39%、42.06%;籽粒氮素累积受影响最小,三处理依次降低15.81%、26.45%、34.64%。尤其N4、N5处理,各器官氮素累积量已显著低于油菜秸秆离田处理(CK)。

与CK相比,N0处理可显著提高芝麻对氮肥的吸收利用(表4),除NCR外,NRE、NHI、NPFP和NAE分别提高55.91%、16.54%、76.32%和84.40%。油菜秸秆全量还田下,与N0相比,减氮10%处理(N1)下芝麻氮肥吸收利用各指标均无显著变化;减氮20%(N2)处理下芝麻NRE降低15.86%;减氮30%(N3)芝麻NRE、NAE分别降低41.74%、45.53%,但NHI升高22.59%;减氮40%处理(N4)下芝麻NRE、NPFP和NAE分别降低77.19%、62.19%、80.52%,但NHI和NCR分别提高22.68%和6.94%。

2.4 油菜秸秆还田下氮肥减施对芝麻农艺性状的影响

秸秆还田对芝麻农艺性状的影响因年份而异。鉴于2022年芝麻产量和农艺性状与2021年差异较小,此处选择具有显著差异的2021年与2023年数据进行分析(表5)。油菜秸秆还田第1年(2021年),各处理间芝麻株高、始蒴部位、果轴长和空稍

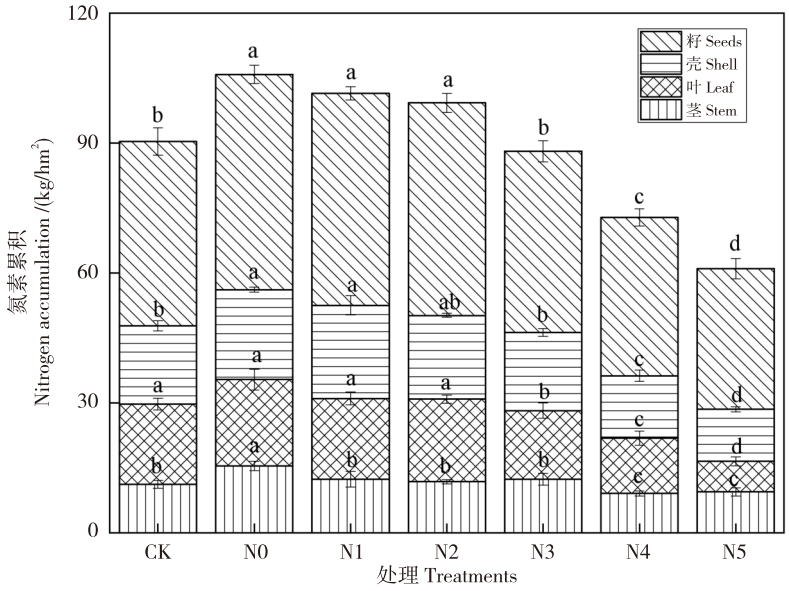


图2 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻各器官的氮素累积(2022)

Fig. 2 Nitrogen accumulation in sesame under rapeseed straw return and nitrogen reduction

表4 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻的氮肥利用(2022)

Table 4 Nitrogen use efficiency in sesame under rapeseed straw return and nitrogen reduction (2022)

处理 Treatment	氮肥吸收利用率 NRE /%	氮肥收获指数 NHI /%	氮肥贡献率 NCR /%	氮肥偏生产力 NPFP /(kg/kg)	氮肥农学利用率 NAE /(kg/kg)
CK	26.38c	10.52c	47.05b	2.28b	24.80b
N0	41.13a	12.26b	46.96b	4.02a	45.73a
N1	36.96ab	12.13b	48.30ab	3.89a	44.13a
N2	34.91b	12.18b	49.43ab	3.94a	44.76a
N3	24.26c	15.03a	49.48ab	3.26a	24.91b
N4	9.68d	15.04a	50.22a	1.52c	8.91c

尖长均无显著差异;至还田第3年(2023年),油菜秸秆还田下随施氮量降低,芝麻株高、果轴长均呈先升后降趋势,且均以N1处理为最高,但其株高与N0、N2无显著差异;而果轴长则显著大于其他处理。与N0相比,N4、N5处理导致芝麻株高分别降低4.19%、6.25%,果轴长分别降低6.32%、11.49%。

2.5 油菜秸秆还田下氮肥减施对芝麻产量及其构成的影响

2021年,秸秆还田配施氮肥仅对单株蒴果数和单株产量有显著影响。2023年,除单株蒴果数与单株产量外,粒/壳比也发生显著变化(表6)。具体而言,2021年芝麻单株蒴果数以N0为最高,且与N1、N2和N3无显著差异,但显著高于CK、N4、N5处理;单株产量则以N1为最高,与CK、N0、N2、N3无显著差异,显著高于N4、N5处理。2023年芝麻单株蒴果数以N2为最高,与N1无显著差异,但显著高于其他处理;粒/壳比以N1为最高,与CK、N0、N2、N3无显著差异,显著高于N4、N5处理;单株产量则以N2为最高,与CK、N0、N1、N3无显著差异,显著高于N4、N5处理。整体上,油菜秸秆还田下随施氮量降低,芝麻单株产量呈先升后降趋势。与N0相比,N2处理芝麻单株产量略有提高,N3处理芝麻单株产量两年分别降低13.82%、3.32%,但差异不显著。

与CK相比,油菜秸秆还田下适当施肥可以提高芝麻群体产量(表7),以N2处理为最高,2021年、2023年芝麻产量分别提高12.12%、10.01%,但随施氮水平降低,芝麻产量逐渐下降,尤其在不施氮肥(N5)情况下,两年芝麻产量分别降低27.03%、24.76%。可见,与不还田以及常规施氮量相比,秸秆还田下适当减氮有助于芝麻产量提升。

利用抛物线模拟氮肥用量与芝麻产量的关系,得到两年度芝麻产量最佳施氮量(图3)。2021年、2023年最佳施氮量分别为92.34 kg/hm^2、90.93 kg/hm^2,与常规施氮量(105 kg/hm^2)相比,分别降低12.06%、13.40%。

3 讨论

3.1 油菜秸秆还田下氮肥减施对红壤理化性质的改良效果

本研究结果表明,油菜秸秆还田可以显著改善

表5 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻的主要农艺性状

Table 5 Main agronomic traits of sesame under rapeseed straw return and nitrogen reduction /cm

处理 Treatment	2021 株高 Plant height	2021 始蒴部位 Beginning of capsule part	2021 果轴长 Fruit branch length	2021 空稍尖长 Plant top length	2023 株高 Plant height	2023 始蒴部位 Beginning of capsule part	2023 果轴长 Fruit branch length	2023 空稍尖长 Plant top length
CK	127.58a	60.28a	57.01b	10.30a	154.12bc	46.55a	105.55bc	2.02a
N0	130.68a	57.15ab	63.98a	9.55a	157.21ab	47.67a	107.29b	2.26a
N1	129.95a	59.63a	60.68ab	9.65a	164.00a	46.86a	114.97a	2.17a
N2	128.23a	58.75ab	59.53ab	9.95a	157.30ab	47.03a	108.31b	1.96a
N3	128.23a	59.32ab	58.98ab	9.93a	151.32bc	45.40a	103.75bc	2.17a
N4	127.77a	59.98a	57.30b	10.50a	150.62bc	47.29a	100.51c	2.82a
N5	121.58b	54.17b	57.99b	9.40a	147.38c	50.36a	94.97d	2.06a
F	2.40 ns	1.78 ns	1.75 ns	0.49 ns	3.63*	0.64 ns	13.30**	1.04 ns

注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著,$F_{0.05}$=2.996,$F_{0.01}$=4.821;下同

Note: Within a column, means followed by the same letter are not significantly different according to $LSD_{0.05}$, $F_{0.05}$= 2.996, $F_{0.01}$= 4.821; Same as below

表6 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻的产量构成

Table 6 Yield components of sesame under rapeseed straw return and nitrogen reduction

处理 Treatment	2021 单株蒴果数 Capsules per plant	蒴粒数 Seeds per capsule	千粒重 1000 seed weight /g	粒/壳比 Seed to capsule /%	单株产量 Yield per plant /g	2023 单株蒴果数 Capsules per plant	蒴粒数 Seeds per capsule	千粒重 1000 seed weight /g	粒/壳比 Seed to capsule /%	单株产量 Yield per plant /g
CK	59.75bc	71.37a	2.593a	1.098a	5.00ab	65.23b	80.03a	2.729a	1.418ab	8.09a
N0	67.08a	74.86a	2.510a	1.156a	5.79a	67.70b	81.32a	2.824a	1.480ab	8.12a
N1	67.05a	74.37a	2.501a	1.226a	5.96a	75.92a	84.23a	2.835a	1.568a	8.19a
N2	63.47ab	75.20a	2.658a	1.232a	5.82a	76.31a	82.37a	2.777a	1.507ab	8.30a
N3	64.10ab	73.53a	2.574a	1.248a	4.99ab	62.57b	83.51a	2.770a	1.422ab	7.85ab
N4	56.53cd	72.81a	2.575a	1.119a	4.40b	64.73b	81.27a	2.739a	1.323bc	7.08b
N5	53.75d	67.80a	2.515a	1.062a	3.98b	63.90b	81.17a	2.702a	1.198c	6.07c
F	11.28**	1.26ns	1.01ns	1.60ns	3.86*	11.15**	0.83ns	1.47ns	3.97*	17.86**

表7 油菜秸秆还田及氮肥减施处理下芝麻的产量

Table 7 Sesame yield under rapeseed straw return and nitrogen reduction

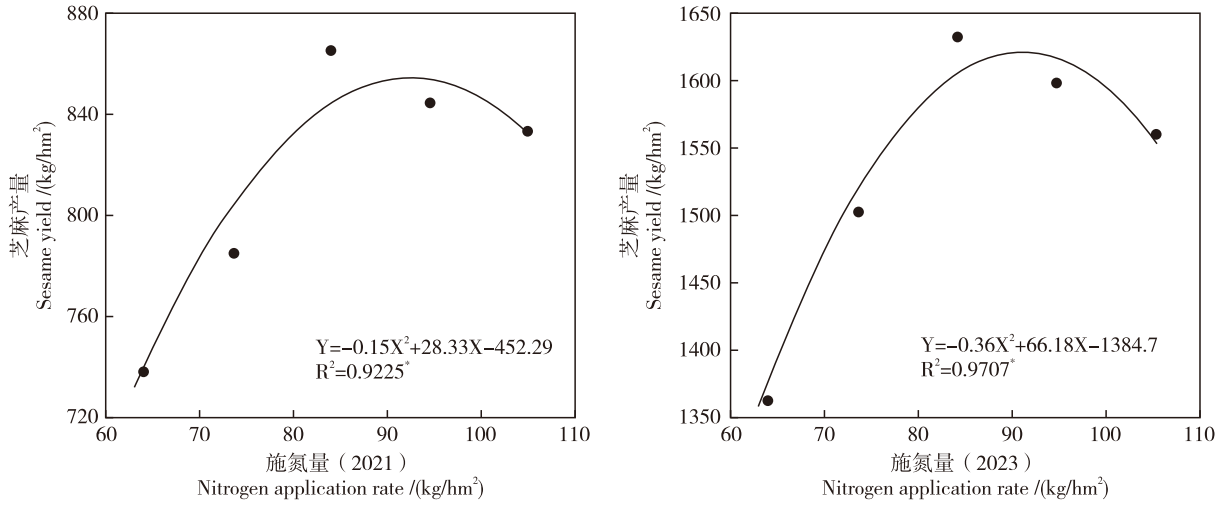
处理 Treatment	2021 产量 Yield /(kg/hm²)	变化率 Variation /%	2023 产量 Yield /(kg/hm²)	变化率 Variation /%
CK	771.83bc	—	1483.49c	—
N0	833.68a	8.01	1559.11ab	5.10
N1	845.01a	9.48	1597.67a	7.70
N2	865.38a	12.12	1632.05a	10.01
N3	784.79b	1.68	1501.77bc	1.23
N4	738.10c	−4.37	1362.14d	−8.18
N5	563.23d	−27.03	1116.22e	−24.76

注:表中同一列数字后小写字母表示在同一年份0.05水平上差异显著

Note: Within a column, means followed by the same letter are not significantly different according to $LSD_{0.05}$ in each separate year

土壤理化性质,表现为土壤pH与有机质含量升高、容重降低、养分提高等,这与多数研究结论一致[6,22-24]。其内在机制在于:秸秆中富含碳、氮、磷、钾等元素,还田后可直接提高土壤养分含量[25],且腐解后可产生大量腐殖质,促进土壤中有机质含量的提升[25,26]。此外,秸秆中含有的钙、镁等盐基离子,可与土壤中交换性H^+、Al^{3+}发生置换,同时秸秆腐解产生的碳酸盐和有机官能团也可以中和土壤酸度[27-29],从而有效提升土壤pH。而有机质的增加可与土壤中的钙、镁离子结合,促进水稳性团聚体的形成与稳定,从而改善土壤物理结构,提高通气持水性能[30,31]。

本研究中,油菜秸秆还田第二年对土壤理化性质的改良效果显著优于第一年,表现出明显的年际累积效应,这与秸秆腐解及土壤团聚体形成的时间动力学过程密切相关[32]。不同养分的释放速率差异



注/Note: *: $P<0.05$

图3 油菜秸秆还田下施氮量与芝麻产量的关系

Fig. 3 Relationship between nitrogen application rate and sesame yield under rapeseed straw return

是导致此现象的主要原因:钾在秸秆中含量较高且以离子态为主,释放迅速,在土壤中培养12 d释放率即可达到98%[9,26];而磷素虽60%以上以离子态存在,但秸秆中含磷较低,释放量较少,氮素则主要以有机态存在,释放速率慢[27]。研究发现,油菜秸秆腐解至162 d,其氮、磷的释放率仅为10.2%、33.9%[33]。因此,在秸秆还田初期需保障充足的氮素供应,以协调碳氮比,避免作物与微生物争氮,出现氮素胁迫。

秸秆作为高碳氮比有机物(本试验中油菜秸秆碳氮比高达56∶1),适量施氮可以优化土壤碳氮比,促进微生物对秸秆有机碳和氮素的转化与累积,提高土壤有机质和速效氮含量[34,35]。本研究在油菜秸秆全量还田下,随施氮量降低,土壤有机质、速效氮、有效磷和速效钾含量均呈先升高后降低趋势,且以适量减氮(N1、N2)对土壤理化性质的提升效果最优,土壤C/N比达到峰值,形成更为优化的碳氮协同过程,进一步证实氮肥施用是调控秸秆还田改土效果的关键因素,这一现象与李威等[36]在稻虾田的发现相呼应。其内在机制可能在于,足量施氮(N0)虽然促进了微生物对秸秆的快速矿化,但导致更多的碳以CO_2形式损失,碳固持效率反而降低;而适量减氮则可能优化了微生物群落,将更多秸秆碳转化为稳定的微生物残体予以保存[37]。但当氮肥过量减施(N4)或完全不施氮(N5)时,土壤氮素成为限制因子,不仅减缓了秸秆的分解速率,导致土壤有机质和氮素累积效率的下降,甚至出现土壤氮库的消耗[34]。相比之下,有效磷和速效钾受氮肥减施的影响较小,即使在过量减氮,土壤有效磷和速效钾的含量仍然维持较高水平,这主要得益于油菜秸秆自身的高钾含量及对磷素的活化作用,表明秸秆还田在红壤区磷、钾养分管理中具有不可替代的优势。此外,南方红壤区土壤普遍存在有机质含量低、养分匮乏的问题,油菜秸秆较高的氮、钾归还量,更有利于微生物的降解和转化[38],其改良效果已在水田中被证实优于其他作物[8,38]。

3.2 油菜秸秆还田下氮肥减施对芝麻氮素利用与干物质分配的影响

本研究证实,在红壤旱地条件下,油菜秸秆还田配合常规施氮(N0)可显著提高芝麻的氮肥吸收利用率(NRE)和农学利用率(NAE)指标,这与前人研究一致[39,40]。秸秆还田不仅通过自身氮素分解提供氮源,还可通过改善土壤微环境增强作物对外源氮素的吸收与固定能力[41,42],这在本研究中表现为N0处理下芝麻各器官氮素累积量均达到最高。

值得注意的是,本试验在油菜秸秆全量还田下,氮肥利用率指标(NHI、NCR除外)随施氮量减少而降低的趋势与前人部分研究结论存在差异[43,44]。究其原因,可能与本试验地的基础肥力低有关:根据《全国九大农区及省级耕地质量监测指标分级标准》[45],本试验地的SOM、pH、全氮均属于4级较低水平,导致还田初期存在较强的微生物固氮效应。在此条件下,适量的氮肥投入对于平衡碳氮比、促进秸秆腐解和满足作物早期需求至关重要。本研究结果显示,在减氮10%~20%(N1、N2)范围内,氮肥利用相关指标、籽粒氮累积量以及干物质量均保持相对稳定,表明油菜秸秆全量还田可有效补偿减氮20%以内的氮素供应缺口。

然而,当减氮幅度超过30%后,氮素成为芝麻生长发育的限制因子。作为需求量最大的矿质元素,氮素供应水平直接影响了作物的干物质累积,并导致叶与根的干物质占比降低,进而削弱了植株的“源-库”运输能力。此外,在过量减氮(N4)下,高碳氮比的秸秆还田加剧了微生物与作物争氮[46],且难以应对油菜秸秆腐解物(如有机酸等)在根际富集产生的抑制作用[47],进一步阻碍了养分吸收。有趣的是,在低氮胁迫(N4)下,植株启动了适应性响应机制,表现为NHI、NCR显著升高。这是一种典型的“氮素再分配”策略,即低氮条件下,植株将储存在营养器官中的氮转运到籽粒中[48-50],以保障成功繁殖。

3.3 油菜秸秆还田下氮肥减施的产量效应与最佳施氮量

基于抛物线模型拟合,本研究确定了油菜秸秆全量还田条件下,芝麻获得最高产量的施氮量为90.93~92.34 kg/hm^2,较常规施氮量降低12.06%~13.40%,这一结果与主要作物秸秆还田平均氮肥替代率(12.2%)基本一致[9]。值得注意的是,油菜秸秆还田的氮肥替减显著高于小麦等作物[8,38],这与其较高的氮、钾归还量密切相关,为红壤旱地化肥减施提供了更优选择。

关于年度间最佳施氮量的差异,本研究发现2023年最佳施氮量略低于2021年。这与随着秸秆还田年限延长,土壤肥力逐步提升,氮肥替代率随之提高的理论预期相符。然而,需要指出的是,尽管2023年最佳施氮量略低,但其芝麻产量却显著高于2021年。这一现象进一步凸显了气象因子对产量的调节作用:2023年芝麻生育期间降雨量更大且

分布均匀,创造了更适宜的水分条件。在旱作农业系统中水分供应充足时,作物产量潜力可得以充分发挥。因此,在实际应用中,需综合考虑土壤肥力与气候年际波动,根据降雨等条件动态调整氮肥管理策略,而非设定固定不变的施肥量。

4 结论

在红壤旱地油菜-芝麻轮作体系中,油菜秸秆全量还田是改良土壤、实现化肥减施的关键。连续还田两年可显著优化土壤物理结构,提升土壤肥力,在此前提下,氮肥减施20%(84.0 kg/hm^2)既可保证芝麻高产,又能维持氮肥农学效率与常规施氮水平相当,为兼顾产量与效益的最优管理策略。但当减氮幅度超过30%,氮素成为限制因子,显著抑制芝麻生长与产量形成。结合抛物线模型结果,推荐该模式下芝麻季的适宜施氮量为84.0~92.34 kg/hm^2,此结论为红壤旱地"油菜-芝麻"可持续健康发展提供了科学依据和关键技术参数。本研究仅在同一红壤地块进行了3年的油菜秸秆还田研究,且局限于单一油菜与芝麻品种,后续研究可选择基因型差异较大的油菜、芝麻品种,在不同土壤肥力水平的田块上进行长期试验以验证这一推荐施氮量的普适性,并探索中长期气候预测融入精准氮肥管理的可行性,为红壤旱地"油菜-芝麻"轮作体系提供更科学的理论依据。

参考文献:

[1] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 我国南方红壤酸化问题及改良修复技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2015(3): 148-151. DOI: 10.16498/j. cnki. hnnykx.2015.03.046.

[2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010. DOI:10.1126/science.1182570.

[3] 王兴祥, 李清曼, 曹慧, 等. 关于植物对红壤的酸化作用及其致酸机理[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 73-77. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3945.2004.01.017.

[4] Dong Y, Yang J L, Zhao X R, et al. Contribution of different proton sources to the acidification of red soil with maize cropping in subtropical China [J]. Geoderma, 2021, 392: 114995. DOI: 10.1016/j. geoderma.2021.114995.

[5] Hao X X, Han X Z, Wang S Y, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol[J]. Soil Tillage Res, 2022, 215: 105221. DOI:10.1016/j.still.2021.105221.

[6] 杨昌富, 张璐, 覃双结, 等. 秸秆还田调控红壤酸化的效应[J]. 中国土壤与肥料, 2025(9): 20-25. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.24775.

[7] 孙元丰, 李晓阳, 胡潇方, 等. 我国油菜秸秆资源情况、利用现状及发展建议[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(1): 1-8. DOI: 10.19802/j. issn. 1007-9084.2023266.

[8] Zhang S T, Lu J W, Zhu Y, et al. Rapeseed as a previous crop reduces rice N fertilizer input by improving soil fertility[J]. Field Crops Res, 2022, 281: 108487. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108487.

[9] 侯素素, 董心怡, 戴志刚, 等. 基于田间试验的秸秆还田化肥替减潜力综合分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 70-78. DOI: 10.11975/j. issn. 1002-6819.202212045.

[10] 陈国徽, 赵小敏, 谢国强, 等. 油稻轮作下秸秆还田对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 813-824. DOI: 10.13836/j.jjau.2022080.

[11] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2018, 81: 2695-2702. DOI:10.1016/j.rser.2017.06.076.

[12] 李丰, 王冬勇, 张鹏钰, 等. 氮磷钾配施对宜机收芝麻产量的影响及肥料效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2026(1): 140-148. DOI: 10.11838/sfsc. 1673-6257.25228.

[13] 丁芳, 吕树立, 田壮博. 减氮增密对夏芝麻光合特性、产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1): 154-161. DOI: 10.26942/j. cnki. issn.1002-2481.2026.01.17.

[14] 吕树立, 郭书亚, 丁芳, 等. 氮肥后移对芝麻氮代谢、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(8): 210-216. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.24693.

[15] Shan Y H, Cai Z C, Han Y, et al. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C: N ratios [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2008, 54(1): 46-56. DOI:10.1111/j.1747-0765.2007.00218.x.

[16] Yan F J, Sun Y J, Xu H, et al. Effects of wheat straw mulch application and nitrogen management on rice root growth, dry matter accumulation and rice quality in soils of different fertility[J]. Paddy Water Environ, 2018, 16(3): 507-518. DOI:10.1007/s10333-018-0643-1.

[17] 吴琴, 王林涛, 张小嫚. 油菜秸秆还田量对土壤理化性质及水稻生长的影响[J]. 耕作与栽培, 2024, 44(4): 64-67. DOI: 10.13605/j. cnki. 52-1065/s.2024.04.005.

[18] 翟思龙, 张云虹, 张永吉, 等. 油菜秸秆还田条件下

氮肥运筹对水稻产量和土壤可利用氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(9): 55-60. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.23678.

[19] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[21] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 729-734. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.00729.

[22] Xu X, Pang D W, Chen J, et al. Straw return accompany with low nitrogen moderately promoted deep root[J]. Field Crops Res, 2018, 221: 71-80. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.02.009.

[23] 车品高, 陈国徽, 曹国军, 等. 稻油轮作下秸秆还田对土壤养分和作物产量的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(12): 3118-3128. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.32045.

[24] 崔月峰, 孙国才, 郭奥楠, 等. 秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及pH值的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 255-260. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.049.

[25] 许映慧, 杜建军, 范如芹, 等. 秸秆腐解产物阻控红壤复酸化促进玉米生长[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 826-839. DOI: 10.11674/zwyf.2022607.

[26] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.06.047.

[27] Butterly C R, Baldock J A, Tang C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions[J]. Plant Soil, 2013, 366(1): 185-198. DOI: 10.1007/s11104-012-1422-1.

[28] Pan X Y, Xu R K, Nkoh J N, et al. Effects of straw decayed products of four crops on the amelioration of soil acidity and maize growth in two acidic Ultisols[J]. Environ Sci Pollut Res, 2021, 28(5): 5092-5100. DOI: 10.1007/s11356-020-10891-0.

[29] Wang H X, Xu J L, Liu X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. Soil Tillage Res, 2019, 195: 104382. DOI: 10.1016/j.still.2019.104382.

[30] 陈玉妮, 盛丰. 秸秆还田方式对红壤理化性质及养分淋失的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(3): 70-76. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2024283.

[31] 宣可凡, 李晓鹏, 张佳宝, 等. 有机物料改良土壤结构及其定量化研究方法综述[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 95-102. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021565.

[32] Ji X F, Jiang J, Wang Y G, et al. Small straw addition enhances straw decomposition and carbon stabilized in soil aggregates over time[J]. Soil Tillage Res, 2024, 238: 106022. DOI: 10.1016/j.still.2024.106022.

[33] 梁鑫宇, 宋明丹, 韩梅, 等. 有机物料腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1082-1090. DOI: 10.11674/zwyf.2022509.

[34] Li Y, Liu X Z, Lu J S, et al. Soil extracellular enzymes, soil carbon and nitrogen storage under straw return: a data synthesis[J]. Ind Crops Prod, 2025, 228: 120884. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120884.

[35] Xu L, Chen H, Zhou Y, et al. Long-term straw returning improved soil nitrogen sequestration by accelerating the accumulation of amino acid nitrogen[J]. Agric Ecosyst Environ, 2024, 362: 108846. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108846.

[36] 李威, 成永旭, 孙颖, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1051-1060. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200056.

[37] 李翻过, 谭小敏, 苏明, 等. 秸秆还田和种植密度对土壤-微生物-植株叶片碳氮比及内稳性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7022-7032. DOI: 10.13327/j.hjkx.202409322.

[38] 胡明明, 李志欣, 丁峰, 等. 不同水旱轮作模式下秸秆还田与精量减氮对水稻产量、氮素吸收利用及土壤氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8): 1500-1514. DOI: 10.11674/zwyf.2024101.

[39] 张刚, 王德建, 俞元春, 王灿, 庄锦贵. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877-885. DOI: 10.11674/zwyf.15169.

[40] Cheng W G, Padre A T, Sato C, et al. Changes in the soil C and N contents, C decomposition and N mineralization potentials in a rice paddy after long-term application of inorganic fertilizers and organic matter[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2016, 62(2): 212-219. DOI: 10.1080/00380768.2016.1155169.

[41] van Asten P J A, van Bodegom P M, Mulder L M, et al. Effect of straw application on rice yields and nutrient availability on an alkaline and a pH-neutral soil in a Sahelian irrigation scheme[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2005, 72(3): 255-266. DOI: 10.1007/s10705-005-3108-z.

[42] 李晓峰, 程金秋, 梁健, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插粳稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 912-924. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2017.00912.

[43] 石子建, 邵晓伟, 葛思宇, 等. 油菜秸秆还田下施氮量对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻,

2025，40(2)：78-84. DOI：10.15889/j. issn. 1002—1302.2022.22.014.

[44] 张丽娟，秦宇坤，陈俊英. 油棉两季秸秆还田下施氮量对棉花产量及氮肥利用率的影响[J]. 作物杂志，2024，4：158-163. DOI：10.16035/j. issn. 1001-7283.2024.04.020.

[45] 全国九大农区及省级耕地质量监测指标分级标准(试行)[S]. 农业农村部耕地质量监测保护中心，2019.

[46] 李录久，王家嘉，吴萍萍，等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(1)：254-262. DOI：10.11674/zwyf. 14154.

[47] 黄正，张荣萍，马鹏，等. 冬水田油菜秸秆还田和氮肥运筹对杂交稻干物质积累和产量的影响[J]. 浙江农业学报，2023，35(5)：983-991. DOI：10.3969/j. issn.1004-1524.2023.05.02.

[48] Liu Z，Sha Y，Huang Y W，et al. Efficient nitrogen allocation and reallocation into the ear in relation to the superior vascular system in low-nitrogen tolerant maize hybrid[J]. Field Crops Res，2022，284：108580. DOI：10.1016/j.fcr.2022.108580.

[49] 李丛锋，刘鹏，王空军，等. 缺氮对细胞质雄性不育玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报，2008，34(4)：684-689. DOI：10.3724/SP.J.1006.2008.00684.

[50] 苏祖芳，周培南，许乃霞，等. 密肥条件对水稻氮素吸收和产量形成的影响[J]. 中国水稻科学，2001，15(4)：281-286. DOI：10.16819/j.1001-7216.2001.04.009.

(责任编辑:郭学兰)