

密植减氮对三熟区不同肥力红壤稻田作物 产量和耕层氮素的影响

王芳东^{1,2}, 吕伟生³, 符明金⁴, 郭熙¹, 孙小香¹, 赵小敏¹

(1.江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,南昌 330045; 2.江西省农业科学院基地管理中心,南昌 330200; 3.江西省红壤研究所,南昌 330046; 4.抚州市农业农村局,江西 抚州 344100)

摘要: 2017—2018 年在长江中游三熟制区(江西进贤)开展油菜—早稻—晚稻 3 季作物田间试验,初步探究了油稻稻秸秆还田下密植减氮对不同肥力红壤稻田作物产量和耕层氮素的影响,为三熟制区资源节约型与环境友好型生产技术的发展提供参考。结果表明:在油稻稻三熟秸秆还田条件下,提高土壤肥力和增加种植密度能够促进油菜及双季水稻群体生长,显著提高作物产量。增密 30%、减氮 20%的密植减氮处理,可以满足油稻稻 3 季作物生育期内的氮素需求,保证作物正常生长,并明显提高氮肥利用率。总体而言,密植减氮栽培能够达到甚至略高于常规栽培的产量水平,尤其是在高肥力条件下。短期内的密植减氮栽培并不会造成耕层土壤全氮含量及库容量显著降低,但在低肥力条件下显著降低了耕层的碱解氮含量及库容量。

关键词: 油稻稻轮作; 秸秆还田; 密植减氮; 土壤肥力; 产量; 氮素库容

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0285-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.039

Effects of High-density and Low-nitrogen on Crop Yield and Soil Nitrogen Storage in Plough Layer of Red Paddy Field with Different Soil Fertility in Triple-cropping Area

WANG Fangdong^{1,2}, LÜ Weisheng³, FU Mingjin⁴, GUO Xi¹, SUN Xiaoxiang¹, ZHAO Xiaomin¹

(1.Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Resources and Ecology of Poyang Lake Basin, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2.Base Management Center of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200; 3.Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 330046; 4.Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Fuzhou, Fuzhou, Jiangxi 344100)

Abstract: In 2017—2018, a field experiment of rape-early rice-late rice in red paddy field was conducted in triple-cropping areas (Jinxian of Jiangxi) in the middle reaches of the Yangtze River, to study the effects of higher planting density and lower nitrogen rate with straw returning on crop yield and soil nitrogen storage of red soil with different fertility, providing a reference for the development of resource conservation and environment-friendly production technology in the triple cropping system area. The results showed that under the condition of returning three crop straws to the field, increasing of soil fertility and planting density could significantly promote the increasing of growth and yield of both rice and rapeseed. The treatment of 30% higher planting density with 20% lower nitrogen application rate could meet the nitrogen demand of the three crops growth, ensure the normal growth of the crops, and significantly improve the nitrogen utilization rate. In general, the crops yield of the treatment of high planting density combined with low nitrogen rate could reach or even slightly higher than that of the conventional cultivation, especially under the condition of high fertility. In the short-term, high planting density combined with low nitrogen rate cultivation did not significantly reduce the total content and storage capacity of both total nitrogen and alkali nitrogen in plough layer soil.

收稿日期: 2020-02-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301603); 公益性行业科研专项(201503123); 江西省油菜产业技术体系专项(JXARS-08); 江西省重点研发计划专项(20171BBF60032)

第一作者: 王芳东(1987—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事农业遥感和土壤研究。E-mail: 719071588@qq.com

通信作者: 赵小敏(1962—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事土壤、农林遥感与信息、土地资源利用研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

but significantly reduced the alkali nitrogen content and the storage capacity of the plough layer soil under the condition of low fertility.

Keywords: oilseed rape-rice-rice rotation; straw returning to field; cultivation with high planting density and low nitrogen rate; soil fertility; grain yield; nitrogen storage capacity

红壤是我国南方分布最广的土壤类型,基本涵盖了长江流域冬油菜和水稻主产区^[1]。其中江西既是典型的红壤分布区,也是油菜—双季稻三熟制轮作的优势生产区,对保障国家粮油安全发挥了重要作用^[2]。红壤由于其复杂而特殊的发育和形成过程,肥力水平总体偏低^[1],而传统的三熟制模式化肥用量较高、作物带走的盐基离子较多,则进一步加剧了红壤稻田土壤质量下降和作物增产乏力^[3-4]。近年来,随着农业机械化的发展和禁烧秸秆政策的实行,秸秆切碎直接全量还田已成趋势。而通过秸秆还田,可优化土壤结构,归还土壤养分和增强微生物活性^[5]。油稻稻三熟制秸秆还田量大,充分利用秸秆的培肥节肥效应对缓解集约化种植导致的不利影响具有重要意义。

合理施用氮肥是提高水稻、油菜等粮油作物产量和效益的重要措施^[6]。但在秸秆全量还田条件下,农户生产中的习惯氮肥施用量并未发生改变^[7],更有甚者通过增加基肥氮用量来应对秸秆腐解时微生物与作物争氮带来的不利影响^[8-9]。盲目地过量施氮导致近半数的氮肥以氨挥发、径流、淋洗及反硝化等途径损失到水体及大气中^[10],造成严重的氮污染^[11]。减少氮肥投入是从源头上控制氮污染的关键措施,但可能会降低耕层氮素库容^[12-13],常规种植密度下还可能导致作物减产^[7, 14]。然而,受传统的人工育苗移栽技术(小群体、壮个体)的影响,“种植密度偏低、氮肥用量过高”的现象在水稻和油菜大面积生产上仍普遍存在^[15-16]。已有研究^[13-17]表明,适当密植可以提高水稻和油菜产量,弥补减氮造成的产量损失,并进一步提高氮肥利用率。此外,提升土壤肥力也能显著提高作物产量以及化学氮肥的回收率与残留率,减少氮肥损失^[18-19]。新形势下,水稻机插、油菜机播等机械化生产方式发展迅速,将更加有利于“密植减氮”栽培的发展^[16-17]。但目前

在油稻稻三熟制秸秆还田下,密植减氮对不同肥力红壤稻田作物产量和耕层氮素的影响还鲜见报道。因此,本研究基于油稻稻三熟制模式,开展秸秆还田下“密植减氮”栽培对不同肥力红壤稻田作物产量和耕层氮素的影响试验,以期为三熟制区资源节约型与环境友好型生产技术的发展提供科学依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2017 年 10 月至 2018 年 10 月在江西省进贤县张公镇牛溪村(28°25'N,116°23'E)进行。该区域属典型的亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛。本试验季的气象条件总体利于油菜和双季水稻生长,各月的气温分布和降水量见图 1。开展本试验前,选取水稻产量水平差异较大的田块,采集其耕层(0—20 cm)土壤样品,风干后分别测定 pH,有机质、总氮、碱解氮、速效磷、速效钾等养分含量及土壤质地。按照土壤有机质含量相差 15 g/kg 以上的标准,选取母质相同(第四纪红黏土)且质地相似的较高和较低肥力的 2 块田布置试验,其耕层的土壤基本理化性状见表 1。

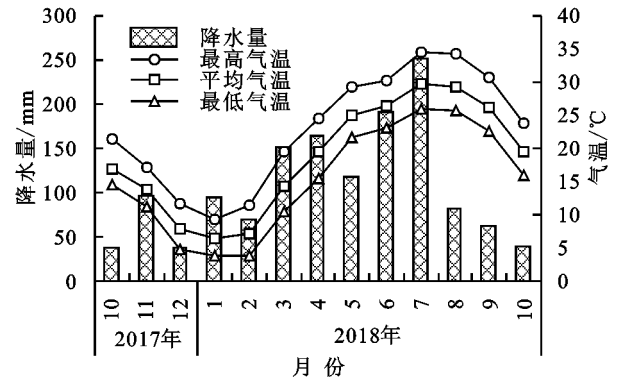


图 1 试验点 2017—2018 年油菜和水稻生育期内各月的气温和降水量

表 1 不同肥力红壤稻田耕层土壤的基本理化性状

土壤肥力	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	砂粒 (0.02~2 mm)/%	粉粒 (0.002~0.02 mm)/%	黏粒 (<0.002 mm)/%
低肥力	5.28	19.7	1.46	142.1	17.8	163.8	23	55	22
高肥力	5.42	36.8	2.54	238.7	26.3	241.6	22	54	24

分别在 2 种不同肥力的田块开展种植密度×施氮量的二因素试验。其中,施氮量设置常规施氮量(N1)和减施 20%(N2)2 个水平;种植密度设置常规密度(D1)和增密 30%(D2)2 个水平。每个处理分设 3 次重复,小区面积 8 m×5 m。油菜、早稻和晚稻

常规种植密度(D1)分别为 38.46(20 cm×13 cm), 30.77(25 cm×13 cm), 30.77(25 cm×13 cm)穴/m², 密植处理(D2)分别为 50.00(20 cm×10 cm), 40.00(25 cm×10 cm), 40.00(25 cm×10 cm)穴/m²;常规施氮量(N1)分别为 165, 150, 165 kg/hm², 减氮处理

(N2)分别为 132, 120, 132 kg/hm², 磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用量均为 90 kg/hm²。

试验采用的油菜品种为“阳光 131”,由中国油料作物研究所提供;水稻品种为“中嘉早 17”(早、晚季兼用),由中国水稻研究所提供。油菜于 2017 年 10 月 20 日播种,按照 6.0 kg/hm²的用种量和 20 cm 的行距进行条状直播,3~4 叶期以 D1 株距 13 cm、D2 株距 10 cm 的标准定苗;氮肥和钾肥按基肥:腊肥:藁肥为 6:2:2 施用,磷肥和硼砂(含 B 10%,15 kg/hm²)全作基肥施用;2018 年 4 月 25 日成熟收获。早稻于 2018 年 4 月 2 日播种,4 月 30 日移栽,7 月 19 日成熟测产;晚稻于 7 月 3 日播种,7 月 24 号移栽,10 月 16 日成熟测产。早、晚稻磷全作基肥,氮和钾按基肥:藁肥:穗肥为 5:3:2 施用。采用 7 寸硬质塑盘进行泥浆湿润育秧,播种密度为 2.0 粒/cm²。人工模拟机插,D1、D2 栽插规格分别为 25 cm×13 cm 和 25 cm×10 cm,每穴基本苗 4 根。试验前茬的稻草已全量还田,试验中所有处理的秸秆也全部切碎原位还田,并采用机械旋耕。其他田间管理按一般高产栽培技术规程进行。

1.2 测定方法

1.2.1 作物产量 成熟期,分小区单独收获籽粒(小区边行除外),晾干后称重测产^[6]。

1.2.2 地上部干物质积累量 成熟期,采用 5 点取样法在每小区随机取 10 穴长势较为一致的植株(小区边行不取),油菜按茎秆、角壳与籽粒分开,水稻按茎秆、叶子、穗子分开,之后于 105 °C 条件下杀青 30 min,再于 75 °C 条件下烘干至恒重,冷却至室温后称重^[6]。

1.2.3 植株含氮率 结合成熟期地上部干物质积累量测定,用万能粉碎机将植株样品粉碎,过 0.5 mm 筛,再用凯斯定氮仪 FOSS 2300 测定植株含氮率^[13]。

1.2.4 土壤全氮和碱解氮含量 晚稻收获之后,按五点取样法采集每小区 0—20 cm 耕作层土壤,自然风干后磨碎过筛,分别采用凯氏法、碱解扩散法^[13]测定土壤全氮和碱解氮含量。

作物地上部氮积累量(kg/hm²)=成熟期单位面积地上部干物重×植株含氮率^[13]

氮肥偏生产力(kg/kg)=作物籽粒产量/施氮量^[17]

氮素籽粒生产效率(kg/kg)=作物籽粒产量/地上部植株氮积累量^[17]

耕层氮素库容(kg/hm²)=土壤氮含量×土壤容重×土壤深度^[13]

1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据分析与制图,用 DPS 7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物产量的影响

由试验产量结果(表 2)可知,土壤肥力、种植密度和氮肥用量对油菜及双季水稻产量均有显著影响,但互作效应未达显著水平。在相同种植密度和氮肥用量条件下,土壤肥力越高油菜及水稻产量也越高。相比低肥力田块,高肥力田块油菜、早稻及晚稻各处理平均产量分别提高了 12.57%,10.26%,13.58%,周年增产 1 867.80 kg/hm²(增幅 12.24%)。而在相同肥力条件下,3 季作物产量总体表现出随氮肥用量的减少而降低,随种植密度的增加而增加的趋势,产量变幅低肥力显著高于高肥力。无论土壤肥力高低,3 季作物产量均以增密 30%+常规施氮量处理(D2N1)最高,常规密度+减氮 20%处理(D1N2)最低,D2N1 在高肥力和低肥力条件下分别比 D1N2 显著增产 8.98%和 16.61%,而在高肥力条件下与常规密度+常规施氮量处理(D1N1)差异并不显著。总体而言,在油稻稻三熟秸秆还田条件下,密植减氮处理(D2N2)能够达到甚至略高于常规密度+常规施氮量处理(D1N1)的产量水平,尤其是在高肥力条件下,但在低肥力条件下其产量要显著低于 D2N1。

表 2 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物产量的影响
单位:kg/hm²

土壤肥力	处理	油菜	早稻	晚稻
高肥力	D1N1	1636.30±41.67ab	7812.04±186.84ab	7885.19±296.17ab
	D1N2	1568.33±37.03b	7514.81±201.43b	7611.11±284.78b
	D2N1	1706.48±60.29a	8186.30±315.73a	8302.78±312.52a
	D2N2	1659.91±52.35a	7954.63±265.28a	8061.11±203.65ab
低肥力	D1N1	1473.43±42.05b	7226.11±205.93ab	7054.44±262.92b
	D1N2	1372.96±41.53c	6523.15±176.43c	6496.30±196.13c
	D2N1	1555.19±53.85a	7671.30±258.14a	7555.56±235.39a
	D2N2	1435.46±43.78bc	7118.52±280.56b	6945.37±187.71b
肥力 F	*	*	**	
密度 D	*	*	*	
氮肥 N	*	*	*	
F×D	ns	ns	ns	
F×N	ns	ns	ns	
D×N	ns	ns	ns	
F×D×N	ns	ns	ns	

注:表中数据为平均值±标准偏差;同列不同小写字母表示同一肥力下处理间差异显著(P<0.05);ns、* 和 ** 分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

2.2 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物地上部干物质积累量的影响

各处理作物地上部干物质积累量的差异同产量变化规律基本一致(表 3)。在相同条件下,3 季作物地上部干物质积累量均表现为随土壤肥力、种植密

度或者氮肥用量的增加而逐渐增加的趋势。在高肥力条件下,油菜、早稻及晚稻各处理平均干物质积累量较之低肥力条件下分别显著提高了 12.65%, 13.89%, 14.91%。与常规种植密度(D1)相比,油菜、早稻及晚稻季密植处理(D2)干物质积累量在高肥力和低肥力条件下分别增加了 4.87%, 6.59%, 6.04% 和 5.19%, 7.37%, 6.28%;而相比常规施氮量(N1), 减氮处理(N2)则分别减少了 3.54%, 5.88%, 7.69% 和 11.03%, 10.19%, 9.68%。在 2 种土壤肥力条件下, 3 季作物地上部干物质积累量均为 D2N1 最高, 且显著高于最低值处理 D1N2, 在高肥力下的晚稻季和低肥力下的 3 季均显著高于密植减氮处理(D2N2)。密植减氮处理(D2N2)地上部干物质积累量在高肥力下略高于 D1N1(晚稻季除外), 在低肥力下则略低于 D1N1, 但差异均未达显著水平。可见, 在油稻稻三熟轮作下, 秸秆还田并实行密植减氮能够保证油菜及双季水稻的正常生长。

表 3 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物地上部干物质积累量的影响 单位: kg/hm²

土壤肥力	处理	油菜	早稻	晚稻
高肥力	D1N1	5925.89±197.58ab	12275.18±346.78ab	12884.21±532.48ab
	D1N2	5684.23±195.42b	11608.82±360.81b	11967.69±349.86c
	D2N1	6175.00±239.98a	13101.98±488.99a	13667.87±548.37a
	D2N2	6004.45±273.38ab	12358.67±497.93ab	12710.67±356.76bc
低肥力	D1N1	5385.77±113.04ab	11043.90±300.42ab	11234.97±471.23b
	D1N2	4905.67±244.39b	9848.41±308.48c	10379.28±319.84c
	D2N1	5725.00±318.59a	11668.93±352.26a	12086.40±478.46a
	D2N2	5101.17±277.52b	10763.56±347.03b	10883.47±264.47bc

2.3 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物地上部氮积累量的影响

从表 4 可以看出, 与产量及地上部干物质积累量变化规律相似, 各处理 3 季作物地上部氮积累量也随着土壤肥力、种植密度及氮肥用量的增加呈增加的趋势。在高肥力条件下, 油菜、早稻及晚稻各处理平均地上部氮积累量较之低肥力条件下分别显著增加了 13.48%, 13.92%, 15.32%。相比常规种植密度(D1), 油菜、早稻及晚稻季密植处理(D2)地上部氮积累量在高肥力和低肥力条件下分别增加了 3.92%, 5.04%, 5.33% 和 5.56%, 5.73%, 6.26%; 而与常规施氮量(N1)相比, 减氮处理(N2)分别减少了 7.32%, 8.83%, 9.99% 和 10.97%, 9.61%, 10.88%。无论在高肥力还是低肥力条件下, 3 季作物地上部氮积累量也均以 D2N1 最高, 且均显著高于最低处理 D1N2, 在高肥力下的水稻季和低肥力下的 3 季还显著高于密植减氮处理(D2N2)。与 D1N1 相比, 密植减氮处理(D2N2)地上部氮积累量有所降低, 尤其是在低肥

力条件下, 但差异未达显著水平。结果表明, 在油稻稻三熟秸秆还田条件下, 密植减氮栽培在短期内基本可以满足油菜及水稻生育期的氮素需求。

表 4 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物地上部氮积累量的影响 单位: kg/hm²

土壤肥力	处理	油菜	早稻	晚稻
高肥力	D1N1	81.98±4.60ab	155.55±3.54ab	163.68±4.58ab
	D1N2	75.34±3.36b	141.83±4.27c	147.27±6.59c
	D2N1	84.53±4.89a	163.40±5.14a	170.73±5.19a
	D2N2	78.95±2.83ab	148.96±4.91bc	156.78±4.43bc
低肥力	D1N1	72.21±4.62ab	136.13±5.86b	138.93±6.46b
	D1N2	65.30±2.19c	126.35±3.14c	129.55±4.59b
	D2N1	77.33±4.29a	147.50±5.98a	152.24±7.06a
	D2N2	67.83±2.38bc	130.01±5.72bc	133.04±5.63b

2.4 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物氮肥利用率的影响

由表 5 可知, 氮肥偏生产力和氮素籽粒生产效率在不同肥力条件下表现不一。其中, 氮肥偏生产力在高肥力条件下更高, 油菜、早稻及晚稻各处理平均氮肥偏生产力较之低肥力条件下分别显著提高了 12.82%, 10.61%, 13.89%; 而氮素籽粒生产效率则反之, 但在高、低肥力条件下总体差异较小。在相同肥力条件下, 3 季作物氮肥偏生产力和氮素籽粒生产效率均表现为随种植密度的增加和氮肥用量的减少而提高的趋势, 氮肥偏生产力变化尤为显著。相比常规种植密度(D1), 密植处理(D2)油菜、早稻及晚稻季氮肥偏生产力在高肥力和低肥力条件下分别提高了 4.96%, 5.38%, 5.61% 和 5.14%, 7.73%, 8.02%, 氮素籽粒生产效率仅分别提高了 2.31%, 0.56%, 1.09% 和 1.12%, 2.08%, 2.93%; 而与常规施氮量(N1)相比, 减氮处理(N2)分别提高了 20.31%, 20.86%, 21.24% 和 15.90%, 14.47%, 16.01%, 氮素籽粒生产效率分别提高了 5.31%, 6.09%, 6.54% 和 5.22%, 3.94%, 3.27%。无论土壤肥力高低, 3 季作物的氮肥偏生产力和氮素籽粒生产效率均以 D2N2 最高、D1N1 最低, 而且 2 个处理间差异显著。表明油稻稻三熟秸秆还田条件下, 通过密植减氮栽培能够显著提高氮肥利用效率。

2.5 密植减氮对不同肥力红壤稻田耕层氮素含量及库容量的影响

除低肥力条件下的碱解氮之外, 密植减氮对不同肥力红壤稻田耕层氮素含量及库容量的影响较小(表 6)。总体来看, 耕层土壤全氮、碱解氮含量以及相应的氮素库容量表现为随着种植密度氮的增加和氮肥用量的减少而降低的变化趋势, 其中, 减氮处理的影响明显大于密植处理, 碱解氮及其库容量对处理

的响应更为敏感。在低肥力条件下,各处理的碱解氮含量及其库容量变化尤为显著,D1N2 和 D1N2 处理均显著低于 D1N1 处理(碱解氮含量分别降低了 11.04% 和 13.93%,碱解氮库容量分别降低了 9.88%和13.59%)。

总之,在油稻三熟秸秆还田条件下,短期内的密植减氮栽培并不会造成红壤稻田耕层土壤全氮含量及其库容量显著降低,但会显著降低低肥力红壤稻田耕层的碱解氮含量及其库容量。

表 5 密植减氮对不同肥力红壤稻田作物氮肥利用率的影响

单位:kg/kg

土壤肥力	处理	氮肥偏生产力			氮素籽粒生产效率		
		油菜	早稻	晚稻	油菜	早稻	晚稻
高肥力	D1N1	9.92±0.25c	52.08±1.25c	47.79±1.79c	19.51±0.93b	50.12±0.55b	48.17±0.77b
	D1N2	11.88±0.28b	62.62±1.68b	57.66±2.16b	20.83±0.59ab	53.00±1.16ab	51.71±1.47a
	D2N1	10.34±0.37c	54.58±2.10c	50.32±1.89c	20.24±1.05ab	50.23±3.26b	48.64±0.73ab
	D2N2	12.58±0.35a	66.29±2.21a	61.05±2.02a	21.03±0.17a	53.47±2.54a	51.43±0.93a
低肥力	D1N1	8.93±0.25b	48.17±1.37c	42.75±1.59d	20.04±1.10b	51.63±0.86b	49.15±0.75b
	D1N2	10.41±0.31a	54.36±1.47b	49.21±1.49b	21.03±0.68ab	53.00±2.20ab	50.75±1.18ab
	D2N1	9.43±0.33b	51.14±1.72c	45.79±1.43c	20.21±1.15ab	52.05±1.33ab	50.58±1.51ab
	D2N2	10.87±0.33a	59.32±2.34a	52.62±2.26a	21.32±1.08a	54.76±1.66a	52.24±1.47a

表 6 密植减氮对不同肥力红壤稻田耕层氮素含量及库容量的影响

土壤肥力	处理	全氮		碱解氮	
		含量/ (g·kg ⁻¹)	库容量/ (kg·hm ⁻²)	含量/ (g·kg ⁻¹)	库容量/ (kg·hm ⁻²)
高肥力	D1N1	2.62±0.17a	4930.32±316.38a	234.23±12.13a	441.48±22.34a
	D1N2	2.58±0.14a	4875.60±261.76a	221.62±10.46a	418.93±20.53a
	D2N1	2.60±0.14a	4895.52±258.89a	223.39±6.15a	420.52±13.02a
	D2N2	2.51±0.08a	4787.89±183.46a	217.93±8.14a	411.75±17.73a
低肥力	D1N1	1.41±0.09a	2808.98±185.21a	139.72±7.24a	277.59±14.14a
	D1N2	1.38±0.07a	2778.50±180.64a	125.83±5.93b	252.64±9.85b
	D2N1	1.40±0.08a	2789.07±162.24a	130.52±7.34ab	260.09±12.77ab
	D2N2	1.34±0.07a	2675.16±148.55a	122.64±4.94b	244.39±9.38b

3 讨论

土壤肥力是红壤稻田作物实现丰产的基础^[1]。已有研究^[18]表明,水稻在不施氮肥条件下的基础产量的变化与红壤肥力的变化基本一致,以土壤有机质含量来确定红壤稻田肥力的高低是相对可行的。本研究表明,提高土壤肥力能够促进油菜及双季水稻群体生长,显著提高作物产量,而减施氮肥降低了产量,且减产率随土壤肥力的降低而显著提高。这主要是因为,土壤肥力越低,其供氮能力越弱,作物生长对氮肥的响应就越敏感,因而氮肥的减施潜力也就越小^[18,20-21]。另外,考虑到秸秆还田的节肥效应,本试验设置的常规施氮量相对偏低^[22-24]。具体的节肥效应也取决于对照处理的肥料用量,对照处理的氮肥用量越高,能够减肥的空间自然也越大^[21]。而若对照处理的施肥方式本身就不合理,对施肥量或者施肥时期的优化即可实现减肥的效果^[25]。Cui 等^[26]基于全国 3 300 组水稻大田试验发现,在农民习惯施氮量减少 14.7%~18.1%条件下,水稻产量仍能增加 10.8%~11.5%;朱芸等^[27]通过长江流域的 535 组油菜大田试验得出,相比农民习惯

施肥,推荐施肥增产显著,且农民习惯施肥还有较大的减氮空间。因此,还应该根据土壤的肥力水平来确定适宜的氮肥用量及最优的施用方式^[18,28]。

合理密植,是我国农业“八字宪法”的要义之一。但受传统的人工育苗移栽技术(小群体、壮个体)的影响,农户担心增加了密度,既增加了用种量又容易倒伏而减产^[16]。因此,无论是水稻还是油菜,实际生产中的种植密度仍普遍偏低。本研究表明,油稻三季作物产量均随种植密度的增加而增加,在低肥力条件下增产更加显著。与传统的人工育苗移栽相比,直播油菜和机插水稻的个体偏小,在一定范围内增密的增产效果更加明显^[16-17]。本研究还发现,密植减氮栽培能够保证油菜和水稻正常生长,达到与常规栽培模式相当、甚至更高的产量水平,尤其是在高肥力条件下。这与以往的研究^[7,14-17]结果基本一致。适当增密能够弥补因减施氮肥引起的水稻有效穗和油菜角果数减少,提高了群体的光能拦截与利用效率,进而在保证群体数量的基础上优化群体的质量^[7,16]。对于油稻三熟制模式,生产季节紧、品种生育期短,且周年

施肥量大,合理密植自然更容易达到“增密增产、增密补迟、增密节肥”的效果。特别是在秸秆全量还田下,秸秆还田到下季作物种植间隔时间短,大量高碳氮比的秸秆快速腐解造成微生物对土壤氮的固定,减氮则可能进一步抑制作物前期生长^[22]。本研究中的减氮处理地上部生物量及氮积累量有所降低也佐证了这一点。由于在较高产量水平上,氮素依然是最主要的限制因子^[21],而作物当季所需氮素大部分源自土壤,较高的土壤肥力有利于缓解微生物对氮素的固定^[5],因此,多熟制密植减氮栽培模式在高肥力条件下效果更佳。

与前人^[13-14,17]的研究相似,2种肥力条件下3季作物氮肥偏生产力和氮素籽粒生产效率均表现为随种植密度的增加和氮肥用量的减少而升高的趋势,密植减氮栽培显著提高了氮肥利用效率。合理减氮能有效降低稻田氮素径流与渗漏损失,提高氮肥利用率,并维持水稻丰产^[29]。而适当密植有利于根系群体生长,促进作物对养分的吸收利用,从而提高肥料利用率^[16]。朱珊等^[14]研究表明,达到相同产量水平时,油菜密植比稀植节氮 22.9%~30.6%,提高氮肥表观利用率 3.6%~6.8%。陈佳娜等^[17]也发现,双季机插稻在低氮条件下的氮肥利用率显著高于高氮处理,在低氮增密条件下,可显著增加产量和氮肥利用率。相比常氮常密,减氮增密显著降低了双季稻田的土壤氮素表观盈亏量和氮素损失量,显著提高了氮素利用率^[13]。土壤肥力是影响氮肥吸收利用、土壤氮素固持和损失途径的重要因素^[11]。本研究也发现,在高肥力条件下减氮增密更有利于氮肥利用率的提高,主要原因有:一是高肥力土壤能够供应更多更均衡的作物必需养分,且土壤结构更优,能够维持更高的地下部和地上部生长,从而提高作物的氮素吸收能力^[30];二是高肥力土壤缓冲能力更强,阳离子交换量也更高,对氮素养分的固持能力更强,有利于减少氮素损失^[31];三是高肥力土壤拥有更丰富的碳源,土壤微生物数量多、活性强,土壤碳氮循环耦合紧密,能保蓄更多的活性氮^[18,32]。总之,高肥力土壤有利于协同氮素供应与作物需求,提高土壤氮素固持能力,进而显著降低氮素损失。提高土壤肥力,能够增加肥效、节约肥料并实现丰产。

作物生长所吸收的氮素大部分源自土壤,因此,耕层氮素含量及库容量是表征稻田肥力和生产力的重要指标。在本研究中,尽管密植减氮栽培显著提高了氮肥利用率,但仍有降低耕层氮素库容的趋势,且显著降低了低肥力稻田耕层的碱解氮含量及库容量。这与前人^[13,33]的研究结果总体一致。化学氮肥施入

稻田后有 3 个去向^[11]:一是直接被作物吸收利用;二是通过各种途径损失;三是残留在土壤当中。这三者此消彼长,其中增加土壤的氮素残留是扩大耕层氮素库容的重要途径,但促进作物对氮素的吸收利用也是高产的必要基础^[13]。因此,降低氮素损失对提高土壤氮素库容量意义重大。增施氮肥可以增加土壤全氮及碱解氮含量^[34],减氮能够减少土壤中的氮肥残留^[35],在氮肥减量条件下增加种植密度则可促进根系对耕层氮素的吸收,进一步减少土壤氮素残留和流失^[13,36]。彭卫福等^[18]研究还发现,对于低肥力红壤稻田,适当增施氮肥有利于提高产量和氮肥回收率;而对于高肥力红壤稻田,适量降低施氮量能够在保证产量的同时,提高氮肥回收率并降低氮肥损失。正如上所述,高肥力土壤有利于协调氮素供应与作物需求,提高土壤氮素固持能力,降低氮素损失,从而维持土壤氮素平衡。土壤氮素主要包括有机氮和无机氮,其中绝大部分为有机氮,而无机氮只有 1%~2%^[13]。油菜和水稻收获时大约有 30%~40%的氮储存于秸秆中,秸秆还田是稻油轮作补充土壤有机氮的重要途径^[6]。已有研究^[25]表明,秸秆还田可显著提高土壤的全氮含量,短期内则有降低碱解氮的趋势^[5]。但也有研究^[13]表明,在土壤无机氮匮乏条件下,较高碳氮比的秸秆还田后可激发土壤氮素矿化,进而补充土壤氮素库容。值得一提的是,在长期多熟制密植减氮条件下,土壤氮含量(特别是碱解氮含量)的降低是否会影响红壤稻田的可持续利用仍有待进一步深入研究。

4 结论

(1)提高土壤肥力和增加种植密度能够促进油菜及双季水稻群体生长,显著提高 3 季作物产量。密植减氮栽培可以满足油稻稻 3 季作物生育期内的氮素需求,保证作物正常生长,并明显提高氮肥利用率,从而达到甚至略高于常规栽培的产量水平。

(2)短期内的密植减氮栽培并不会造成耕层土壤全氮含量及库容量显著降低,但在低肥力条件下显著降低了耕层的碱解氮含量及库容量。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,35(24):7615-7622.
- [2] 吕伟生,肖国滨,叶川,等.油—稻—稻三熟制下双季稻高产品种特征研究[J].中国农业科学,2018,51(1):37-48.
- [3] 官春云,黄璜,黄国勤,等.中国南方稻田多熟种植存在的问题及对策[J].作物杂志,2016(1):1-7.
- [4] 丛日环,张智,郑磊,等.基于 GIS 的长江中游油菜种植区土壤养分及 pH 状况[J].土壤学报,2016,53(5):

- 1213-1224.
- [5] 黄山,汤军,廖萍,等.冬种紫云英与稻草还田对双季水稻产量和土壤性状的互作效应[J].江西农业大学学报,2016,38(2):215-222.
- [6] 何杰,李冰,王昌全,等.不同施氮处理对水稻油菜轮作土壤氮素供应与作物产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(15):2957-2968.
- [7] 李超,肖小平,唐海明,等.减氮增密对机插双季稻生物学特性及周年产量的影响[J].核农学报,2019,33(12):2451-2459.
- [8] 胡雅杰,朱大伟,邢志鹏,等.改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):12-22.
- [9] 朱从海,蔡爱琴,严军,等.小麦秸秆还田后施氮量对机插水稻产量的影响[J].中国稻米,2011,17(4):32-34.
- [10] Zhang F S, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [11] 王敬国,林杉,李保国.氮循环与中国农业氮管理[J].中国农业科学,2016,49(3):503-517.
- [12] 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.
- [13] 肖小平,李超,唐海明,等.秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(3):422-430.
- [14] 朱珊,李银水,余常兵,等.密度和氮肥用量对油菜产量及氮肥利用率的影响[J].中国油料作物学报,2013,35(2):179-184.
- [15] 谢小兵,周雪峰,蒋鹏,等.低氮密植栽培对超级稻产量和氮素利用率的影响[J].作物学报,2015,41(10):1591-1602.
- [16] 蒯婕,王积军,左青松,等.长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展[J].中国农业科学,2018,51(24):4625-4632.
- [17] 陈佳娜,曹放波,谢小兵,等.机插条件下低氮密植栽培对早晚兼用双季稻产量和氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2016,42(8):1176-1187.
- [18] 彭卫福,吕伟生,黄山,等.土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(18):614-624.
- [19] Peng W F, Zeng Y J, Shi Q H, et al. Responses of rice yield and the fate of fertilizer nitrogen to soil organic carbon[J]. Plant Soil & Environment, 2017, 63(9):416-421.
- [20] 张智,丛日环,鲁剑巍.中国冬油菜产业氮肥减施增效潜力分析[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1494-1504.
- [21] 黄山,汤军,廖萍,等.冬种紫云英和稻草还田下氮钾肥减量施用对双季水稻产量和养分吸收的影响[J].江西农业大学学报,2016,38(4):607-615.
- [22] 肖小军,吕伟生,余跑兰,等.三熟制油菜秸秆还田条件下施氮量对早稻产量形成和氮肥利用率的影响[J].作物杂志,2019(2):103-109.
- [23] 刘宝林,邹小云,宋来强,等.氮肥用量对迟直播早熟油菜产量及氮素利用效率的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(6):852-861.
- [24] 吕伟生,曾勇军,石庆华,等.合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮素吸收利用率[J].水土保持学报,2018,32(6):259-268.
- [25] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2013, 192: 188-194.
- [26] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of small holder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7679): 363-366.
- [27] 朱芸,徐华丽,张洋洋,等.长江流域农民习惯施肥与推荐施肥的冬油菜产量与养分效率差异分析:基于大样本地田间试验[J].中国农业科学,2018,51(15):2948-2957.
- [28] 范立慧,徐珊珊,侯福朋,等.不同地力下基肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响[J].中国农业科学,2016,49(10):1874-1884.
- [29] 李娟,李松昊,邬奇峰,等.不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):23-28, 33.
- [30] Xu X P, He P, Zhao S C, et al. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China [J]. Field Crops Research, 2016, 186: 58-65.
- [31] Houtermans M, Lehndorff E, Utami S R, et al. Nitrogen sequestration under long-term paddy management in soils developed on contrasting parent material [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53: 837-848.
- [32] 王楠,王帅,高强,等.施氮水平对不同肥力土壤微生物学特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):148-152,167.
- [33] 石柯,董士刚,申凤敏,等.小麦播量与减氮对潮土微生物量碳氮及土壤酶活性的影响[J].中国农业科学,2019,52(15):2646-2663.
- [34] 李思平,曾路生,吴立鹏,等.氮肥水平与栽植密度对植稻土壤养分含量变化与氮肥利用效率的影响[J].中国水稻科学,2020,34(1):69-79.
- [35] 张刚,王德建,俞元春,等.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.
- [36] 张娟,武同华,代兴龙,等.种植密度和施氮水平对小麦吸收利用土壤氮素的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1727-1734.