

马 鹏, 张宇杰, 林 郇, 等. 油-稻轮作下前茬氮肥投入与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库及作物产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 896-904.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.013

油-稻轮作下前茬氮肥投入与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库及作物产量的影响

马 鹏, 张宇杰, 林 郇, 吕 旭, 伍杂日曲, 舒川海, 杨志远, 孙永健, 马 均
(四川农业大学水稻研究所/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 温江 611130)

摘要: 通过 2017–2019 年 2 年大田定位试验, 研究了油-稻轮作下前茬氮肥投入量与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库及作物产量的影响。在油菜季设置常规施氮 (N_{180} kg/hm², N_c)、减量施氮 (N_{150} kg/hm², N_r) 2 个处理, 水稻季在 N_{150} kg/hm² 用量基础上设置 3 个运筹 M1、M2 和 M3, 其基肥、分蘖肥、穗肥配比分别为 2:2:6、3:3:4 和 4:4:2, 以不施氮为对照 (M_0)。结果表明: 2 年试验结果基本一致, 稻田土壤养分含量和碳库年度间表现为 2019 年略高于 2018 年, 而水稻产量和周年产量则表现为 2019 年略低于 2018 年。油菜季减量施氮 (N_r) 相对于常规施氮 (N_c) 提高了稻田土壤有机质、速效磷、总有机碳、微生物碳的含量。在油菜季 N_c 和 N_r 处理下, 稻季 M3 氮肥运筹下土壤总有机碳含量显著高于 M_0 、M1 和 M2, 而 M1 和 M2 处理间差异不显著。相对于油菜 N_c , 油菜季 N_r 与稻季 M3 运筹下的稻田有机质、全氮、速效磷、土壤总有机碳、微生物碳含量和水稻产量 2 年平均分别增加了 16.07%、1.07%、2.29%、4.18%、45.73% 和 1.45%, 作物周年产量下降 3.63%, 但不显著。从资源高效和环境效益方面综合考虑, 油菜季减少氮肥投入 30 kg/hm², 配合稻季 M3 (基肥: 分蘖肥: 穗肥=4:4:2) 运筹模式是提高油-稻轮作体系稻田固碳、土壤养分状况和稳定作物产量的较好生产模式。

关键词: 油-稻轮作; 减量施氮; 氮肥运筹; 碳库; 产量

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0896-09

Effects of nitrogen fertilizer input and rice season nitrogen fertilizer application on soil nutrients, carbon pool and yield in rape-rice rotation

MA Peng, ZHANG Yu-jie, LIN Dan, LYU Xu, WUZA Ri-qu, SHU Chuan-hai, YANG Zhi-yuan, SUN Yong-jian, MA Jun

(Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Sichuan Province, Wenjiang 611130, China)

Abstract: In order to reveal the effects of nitrogen fertilizer input and nitrogen fertilizer application in rice season on paddy field soil nutrients, carbon pool and crop yield in rape-rice rotation, a field experiment was conducted in 2017–2019. In this rotation system, conventional nitrogen rate (180 kg/hm² in rape season, N_c) and reduced nitrogen rate (150 kg/hm² in rape season, N_r) were set up. Based on the application rate of 150 kg/hm² nitrogen in rice season, three models named M1–M3 were also

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301701、2017YFD0301706、2018YFD0301202); 四川省育种攻关专项 (2016-NYZ0051)

作者简介: 马 鹏 (1989-), 男, 宁夏固原人, 博士研究生, 主要进行水稻高产高效研究。 (E-mail) 1163299054@qq.com

通讯作者: 马 均, (E-mail) majunp2002@163.com

set up, and the application rate of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer was 2:2:6, 3:3:4 and 4:4:2, respectively. The results showed that the two-year test results were basically the same. The soil nutrient content and carbon pool performance in 2019 were slightly higher than those in 2018, while the rice yield and annual yield in 2019 were slightly lower than those in 2018. Compared with

conventional nitrogen application, the reduced nitrogen application in rape season increased the contents of paddy soil organic matter, available phosphorus, total organic carbon and microbial carbon. Under the Nc and Nr treatments in the rape season, the total organic carbon content of the soil under the M3 treatment in the rice season was significantly higher than that under M0, M1 and M2 treatments, but the differences between the M1 and M2 treatments were not significant. Compared with Nc treatment, the contents of organic matter, total nitrogen, available phosphorus, total soil organic carbon microbial carbon and rice yield under Nr treatment in rape season and M3 treatment in rice season increased by 16.07%, 1.07%, 2.29%, 4.18%, 45.73% and 1.45%, respectively, the annual crop yield decreased by 3.63%, but the difference was not significant. Considering the resource efficiency and environmental benefits, Nr treatment in the rape season combines with M3 treatment (basic fertilizer : tillering fertilizer : panicle fertilizer = 4 : 4 : 2) in the rice season is best production model for improving carbon fixation in paddy fields, improving soil nutrient status, and stabilizing crop yield in rape-rice rotation system.

Key words: rape-rice rotation; reduced nitrogen application; nitrogen fertilizer application; carbon pool; yield

作物轮作产生的秸秆是农田土壤有机碳重要的来源^[1-2]。秸秆还田可以提高土壤微生物活性和土壤质量,减少因焚烧带来的环境压力,又可以循环补充土壤养分,减少化肥的投入量^[3-4]。农业生产中的肥料直接或者间接影响土壤有机碳的矿化和积累^[5-7]。研究结果表明土壤碳库管理指数大小表征土壤肥力的高低^[8]。刘合明等^[9]研究发现用碳库管理指数表征土壤养分和土壤碳素变化状况比土壤有机碳更加有用。农田土壤养分能充分反映农田土壤内部状况,保证农作物的丰产丰收。土壤有机碳是作物生长的养分和土壤微生物生命活动所需营养的重要来源。因此,土壤养分和有机碳可以用于反映秸秆还田和施肥措施的合理性。关于秸秆还田和化肥配施对土壤质量影响的研究比较多^[10],但是多数研究结果反映的是长期定位施肥体系下的累积效应,且大多研究局限于单季稻或者前茬氮肥对土壤有机碳的调控,而揭示短期施肥对土壤有机碳的影响,以及轮作模式下减量施氮与肥料运筹方式对稻田土壤养分、碳库及作物周年生产力的影响研究仍较少。油-稻轮作是四川盆地主要的轮作模式,季节间的干湿交替变化影响着系统氮素的循环,前茬油菜收获后残留在土壤中的氮素对稻田土壤养分、碳库等产生的影响不明。因此,本研究通过田间定位试验,研究在秸秆全量还田条件下,前作减氮和稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库及作物周年生产力的影响,以期油-稻轮作模式减少氮肥投入、优化农业资源利用提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与土壤状况

试验于 2017 年 10 月开始定位,于 2019 年 9 月

结束定位,在四川省成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验基田进行。油菜品种为绵油 15 号,水稻品种为 F 优 498。供试土壤类型为砂壤土,2017 年 0~20 cm 土层有机质含量为 24.21 g/kg,全氮 1.52 g/kg,碱解氮 114.93 mg/kg,速效磷 23.89 mg/kg,速效钾 52.61 mg/kg,pH 为 6.19。2 年的主要气象数据如图 1 所示。

1.2 试验设计与实施

试验采用两因素裂区设计,主区为油菜季常规施氮(180 kg/hm²)和减量施氮(150 kg/hm²)2 种氮肥投入量,分别用 Nc 和 Nr 表示;副区为稻季氮肥运筹方式,即在水稻季施氮量 150 kg/hm²基础上设置 3 个运筹方式:基肥:分蘖肥:穗肥=2:2:6(M1)、基肥:分蘖肥:穗肥=3:3:4(M2)和基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2(M3)。以不施氮处理(M0)为对照,共 8 个处理,3 次重复。小区面积 12.9 m²,小区间筑埂(30 cm)并用塑料薄膜包裹,以防串水串肥。

油菜分别于 2017 年 9 月 13 日育苗,10 月 12 日移栽,2018 年 5 月 1 日收获,2018 年 9 月 14 日育苗,10 月 13 日移栽,2019 年 5 月 3 日收获,移栽规格 50 cm×35 cm。油菜秸秆切成 10 cm 左右全量还田,秸秆分小区撒施于田间,人工翻耕。油菜季 N、P₂O₅、K₂O 配比 2:1:2,氮肥按基肥:追肥=5:5 配施,磷、钾肥全作底肥。

水稻采用地膜育秧,2018 年 4 月 17 日播种,5 月 23 日人工移栽,9 月 2 日收获;2019 年 4 月 17 日播种,5 月 24 日人工移栽,9 月 4 日收获。移栽规格 33.3 cm×16.7 cm,每穴单株。水稻季 N、P₂O₅、K₂O 配比为 2:1:2,磷肥(P₂O₅) 75 kg/hm²、钾肥(K₂O) 150 kg/hm²全部作基肥施用,基肥在移栽前 1 d 施入,

藜肥于移栽后7 d施用,穗肥分促花肥和保花肥(5:5) 2次于倒4叶和倒2叶期施用。水稻收获后秸秆

切碎全量还田到对应小区,其他田间管理同当地高产栽培。各处理秸秆全量还田量如表1所示。

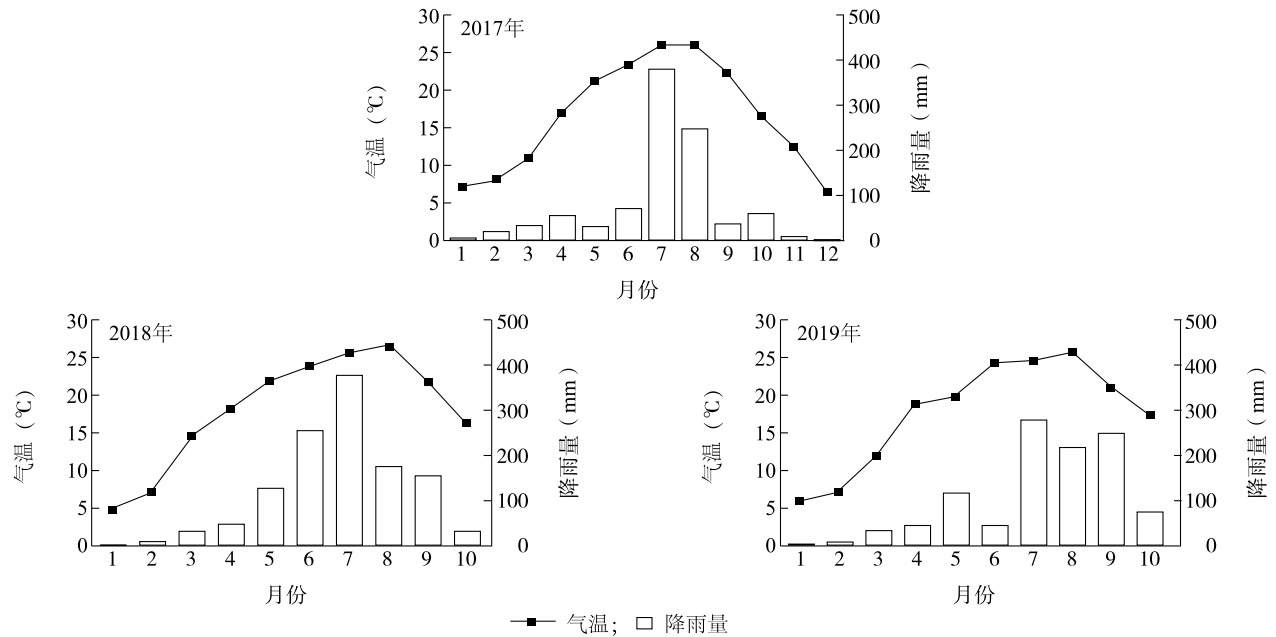


图1 试验阶段气象数据

Fig.1 Meteorological data during the test phase

表1 不同氮肥处理油菜和水稻收获后秸秆还田量

Table 1 The amount of straw returned to the field after harvest of rape and rice under different nitrogen fertilizer treatments

年份	处理	油菜秸秆还田量 (kg/hm ²)	水稻秸秆还田量 (kg/hm ²)
2017-2018	Nc	M0	4 810
		M1	10 036
		M2	10 555
		M3	10 826
	Nr	M0	4 142
		M1	10 126
		M2	10 205
		M3	10 904
2018-2019	Nc	M0	6 574
		M1	10 250
		M2	10 284
		M3	10 397
	Nr	M0	5 051
		M1	10 160
		M2	10 307
		M3	10 623

Nc 和 Nr 分别为油菜季常规施氮(180 kg/hm²)和减量施氮(150 kg/hm²) 2种氮肥投入量; M1、M2、M3 分别为稻季施氮量 150 kg/hm²基础上设置的3个运筹方式:基肥:分蘖肥:穗肥=2:2:6,基肥:分蘖肥:穗肥=3:3:4和基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2; M0 为不施氮对照。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 样品采集 分别于2018年9月和2019年9月水稻收获前1 d用土钻在试验地各小区采用五点取样法收集0~20 cm土壤样品,拣除杂草等杂物,混合后带回实验室测定土壤养分和土壤碳库含量。

1.3.2 测定方法 土壤 pH 按照水土比2.5:1.0(质量比)电位法测定,有机质含量采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 稀释热法测定,全氮采用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定,速效磷采用钼锑抗比色法测定,速效钾采用火焰光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,土壤总有机碳和可溶性有机碳采用重铬酸钾外加热氧化法测定,土壤易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化比色法测定^[11],土壤微生物碳采用氯仿熏蒸法测定^[12]。碳库指数=农田土壤有机碳含量/对照农田土壤有机碳含量。油菜和水稻成熟后,各小区单独收割脱粒,油菜籽和稻谷晒干后分别按标准含水量 10.1%和 13.5%折算实收产量。周年粮食产量=油菜实际产量+水稻实际产量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 统计数据,采用 DPS 9.50 数据处理软件进行数据统计分析,用最小显著

差数法(LSD)分析不同处理间平均数在 $P<0.05$ 的差异显著性,采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 油-稻轮作下前季减量施氮与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分含量的影响

油-稻轮作下,前作减量施氮与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分含量的影响如表2所示,从整体上看,2年试验结果基本一致,稻田土壤养分含量年度间表现为2019年略高于2018年。与常规施氮(Nc)相比,油菜季减量施氮(Nr)提高了稻田土壤有机质、速效磷和全氮的含量,2年平均增幅分别为18.57%、6.43%和0.83%,全氮增加不明显;降低了速效钾、铵态氮和硝态氮含量,2年平均降幅分别为5.22%、4.65%和5.82%。油菜季Nc处理和Nr处理下,稻季M1、M2、M3相对于M0显著增加了稻田土壤的养分含量,其中以M3增幅最大。在Nc处理下,稻季M3处理相对

于M0、M1、M2处理,稻田有机质含量2年平均分别增加25.82%、19.48%和25.77%,全氮分别增加了8.34%、4.21%和9.58%,速效磷分别增加了70.92%、17.98%和20.46%,速效钾分别增加了42.46%、1.87%和3.51%,硝态氮分别增加了65.58%、9.80%和44.47%。在Nr处理下,稻季M3处理相对于M0、M1、M2处理,稻田有机质含量2年平均增幅分别为43.25%、20.37%和2.96%,全氮增幅分别为15.87%、10.21%和22.41%,速效磷增幅分别为69.79%、8.80%和11.59%,速效钾增幅分别为48.51%、6.13%和14.88%,硝态氮增幅分别为54.25%、31.83%和19.71%。油菜季Nr相对于Nc,稻季M3运筹下的稻田有机质、全氮、速效磷含量2年平均分别增加了16.07%、1.07%和2.29%。由此可见,油菜季减施氮肥(Nr)配合稻季M3(基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2)运筹模式更有利于提高稻田土壤养分含量。

表2 不同施氮处理对稻田土壤养分的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on soil nutrients in paddy field

年份	处理		有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	铵态氮(mg/kg)	硝态氮(mg/kg)
2018年9月	Nc	M0	18.43±0.32f	1.67±0.07bc	23.01±0.06g	41.27±0.28f	22.84±0.16e	10.51±0.31f
		M1	19.56±0.28e	1.74±0.15b	32.48±0.03e	58.33±0.18ab	19.20±0.19f	15.55±0.07c
		M2	18.68±0.27f	1.65±0.10c	36.42±0.01d	57.38±0.34c	36.82±0.22a	11.40±0.06e
		M3	23.47±0.42c	1.86±0.12a	41.51±0.03b	59.45±0.61a	33.61±0.34b	17.67±0.23a
		平均	20.03	1.73	33.35	54.1	28.11	12.78
	Nr	M0	18.89±0.20f	1.64±0.02c	25.02±0.26f	39.45±1.04g	18.61±0.01f	10.57±0.06g
		M1	22.58±0.27d	1.73±0.04b	38.51±0.21c	55.73±1.02d	29.96±0.06c	12.03±0.24e
		M2	26.49±0.06ab	1.51±0.09d	38.52±0.18c	51.38±2.15e	33.61±0.19b	13.49±0.10d
		M3	27.29±0.22a	1.88±0.03a	42.56±0.19a	58.97±0.36ab	23.52±0.20d	16.46±0.22b
		平均	23.81	1.69	36.15	51.38	26.42	11.63
2019年9月	Nc	M0	19.70±0.25f	1.88±0.15b	27.38±0.18e	44.48±0.60f	23.67±0.10e	11.21±0.49e
		M1	20.58±0.29e	1.95±0.24ab	34.82±0.13d	61.54±1.57b	21.35±0.09f	17.24±0.36b
		M2	19.45±0.27f	1.86±0.25b	40.87±0.14c	60.59±0.04c	38.54±0.04a	13.64±0.97d
		M3	24.49±0.49c	1.98±0.12a	44.21±0.18ab	62.66±1.51a	34.67±0.06c	18.27±0.66a
		平均	21.05	1.91	36.82	57.31	29.55	14.34
	Nr	M0	19.98±0.18f	1.87±0.15bc	26.62±0.06e	42.14±0.22g	19.68±0.36g	11.69±0.09e
		M1	23.67±0.27d	1.96±0.13b	42.13±0.06b	58.42±0.36d	31.97±0.11d	14.08±0.99d
		M2	27.58±0.24b	1.82±0.05c	40.03±0.27c	54.07±0.81e	35.71±0.41b	15.21±0.61c
		M3	28.38±0.29a	2.19±0.12a	45.12±0.21a	62.18±0.24a	26.13±0.28e	17.86±0.15b
		平均	24.9	1.96	38.47	54.2	28.37	13.96

各处理见表1注。同一列同一年份不同小写字母表示土壤养分在不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 油-稻轮作下前季减量施氮与稻季氮肥运筹对稻田土壤碳库的影响

由表 3 可知,油-稻轮作下,前作减量施氮与稻季氮肥运筹对稻田土壤碳库的影响各异。从整体上看,2 年度试验结果基本一致,稻田土壤碳库和碳库指数年度间表现为 2019 年略高于 2018 年。与油菜季 Nc 处理比较,Nr 处理降低了稻田土壤总有机碳、可溶性有机碳和易氧化性碳的含量,2 年平均降幅分别为 3.95%、1.91% 和 3.36%,但差异不显著;增加了微生物碳含量,2 年平均增加了 30.46%。在 Nc 和 Nr 处理下,稻季 M1、M2、M3 处理相对于 M0 处理显著增加了稻田土壤的总有机碳、可溶性有机碳、微生物碳、易氧化性碳和碳库指数,其中以 M3 运筹处理增幅最大。在 Nc 处理下,稻季 M3 处理相对于 M0、M1、M2 处理总有机碳含量 2 年平均增幅

分别为 8.79%、4.23% 和 0.88%,可溶性有机碳含量增幅分别为 25.76%、13.81% 和 1.09%,微生物碳增幅分别为 32.29%、8.28% 和 29.60%,易氧化性碳含量增幅分别为 28.02%、26.12% 和 5.63%。在 Nr 处理下,稻季 M3 处理相对于 M0、M1、M2 处理总有机碳含量 2 年平均增幅分别为 20.77%、17.40% 和 12.34%,可溶性有机碳含量增幅分别为 25.57%、1.91% 和 23.62%,微生物碳含量增幅分别为 84.84%、9.11% 和 56.93%,易氧化性碳含量增幅分别为 53.60%、2.28% 和 8.99%。油菜季 Nr 处理相对于 Nc 处理,稻季 M3 运筹下的土壤总有机碳、微生物碳含量和碳库指数 2 年平均分别增加了 4.18%、45.73% 和 3.47%。由此可见,油菜季减施氮肥配合稻季 M3 (基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2) 运筹模式更有利于碳库的增加。

表 3 不同施氮处理对稻田土壤碳库的影响

Table 3 Effects of different nitrogen treatments on soil carbon pool in paddy field

年份	处理		总有机碳含量 (g/kg)	可溶性有机碳含量 (mg/kg)	微生物碳含量 (mg/kg)	易氧化性碳含量 (g/kg)	碳库指数
2018 年 9 月	Nc	M0	16.79±0.11c	111.55±0.76e	160.94±0.93h	2.58±0.15bc	1.04±0.05cd
		M1	17.13±0.53b	123.11±1.14c	196.84±0.22e	2.63±0.16bc	1.06±0.02bc
		M2	18.07±0.55ab	139.12±1.05ab	163.64±0.35g	3.18±0.18ab	1.12±0.08ab
		M3	18.12±0.51a	140.21±0.97a	213.59±0.39c	3.41±0.15a	1.13±0.04ab
		平均	17.52	128.5	183.75	2.95	1.09
	Nr	M0	15.79±0.53c	113.88±0.63d	166.42±0.53f	2.06±0.14c	0.98±0.03d
		M1	16.20±0.43b	137.57±0.92b	287.46±0.49b	3.21±0.2ab	1.01±0.02cd
		M2	16.52±0.46b	112.93±0.50d	198.27±0.31d	2.96±0.21b	1.03±0.03cd
		M3	18.61±0.49a	140.09±1.15a	328.38±0.38a	3.27±0.18ab	1.15±0.08a
		平均	16.78	126.12	245.13	2.88	1.04
2019 年 9 月	Nc	M0	17.02±0.48c	113.05±0.47e	169.88±0.97f	2.89±0.16d	1.06±0.06cd
		M1	18.18±0.53b	125.09±1.15d	207.31±0.62d	2.92±0.16d	1.13±0.04b
		M2	18.38±0.54b	140.72±1.1bc	174.11±0.79g	3.44±0.16ab	1.14±0.06b
		M3	18.67±0.58a	142.27±1.75a	224.05±0.83c	3.58±0.12a	1.16±0.07ab
		平均	18.06	130.28	193.84	3.21	1.12
	Nr	M0	15.95±0.52c	115.78±1.05e	175.36±0.57e	2.31±0.2e	0.99±0.06d
		M1	16.45±0.49b	138.64±0.57c	296.74±1.11b	3.34±0.13b	1.02±0.03d
		M2	17.61±0.41b	114.92±0.93e	208.14±1.20d	3.19±0.18c	1.09±0.06bc
		M3	19.73±0.41a	141.41±0.52b	308.58±0.54a	3.43±0.16ab	1.22±0.02a
		平均	17.43	127.69	247.2	3.07	1.08

各处理见表 1 注。同一列同一年份不同小写字母表示土壤碳库在不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 油-稻轮作下前季减量施氮与稻季氮肥运筹对作物周年产量的影响

油-稻轮作下前季减量施氮与稻季氮肥运筹对作物产量的影响如表 4 所示,2 个年度试验结果基本一致,油菜产量年度间表现为 2019 年略高于 2018 年。减量施氮处理(Nr)相比常规施氮处理(Nc)显著降低了油菜产量,2 年平均减产幅度为 18.72%,水稻产量 2 年平均减产幅度为 1.11%,差异不显著。在 Nc 处理和 Nr 处理下,水稻产量在不同氮肥运筹下均表现为 M3>M2>M1>M0。在 Nc 处理下,稻季 M3 处理相对于 M1 处理和 M2 处理水稻

产量 2 年平均分别增加 4.61%和 1.82%,周年产量分别增加 3.56%和 1.40%。在 Nr 处理下,稻季 M3 处理相对于 M1 和 M2 处理水稻产量 2 年平均分别增加 6.11%和 4.95%,周年总产 2 年平均分别增加 4.83%和 4.02%。油菜季 Nr 处理相对于 Nc 处理,稻季 M3 运筹下的水稻产量 2 年平均增加了 1.45%,周年产量降低了 3.63%,但差异不显著。从水稻产量和周年总产来看,油菜季减量施氮(减少氮肥投入 30 kg/hm²)配合稻季 M3 运筹模式(基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2)可以实现水稻高产稳产,同时减少氮肥投入。

表 4 不同施氮处理对作物产量的影响

Table 4 Effects of different nitrogen treatments on crop yield

年份	处理		油菜产量 (t/hm ²)	水稻产量 (t/hm ²)	周年产量 (t/hm ²)	增产率 (%)
2017-2018	Nc	M0	2.59a	7.14c	9.73d	-
		M1		8.90b	11.49b	18.08
		M2		9.36ab	11.95ab	22.81
		M3		9.60a	12.19a	25.28
	Nr	M0	2.22b	6.62c	8.84e	-
		M1		8.98b	11.20c	26.69
		M2		9.05b	11.27c	27.48
		M3		9.67a	11.89ab	34.51
2018-2019	Nc	M0	3.54a	6.45c	9.99c	-
		M1		9.09b	12.63a	26.42
		M2		9.12ab	12.66a	26.72
		M3		9.22a	12.76a	27.72
	Nr	M0	2.72b	6.26c	8.98d	-
		M1		9.01b	11.73b	30.62
		M2		9.14b	11.84b	31.84
		M3		9.42a	12.14ab	35.18

各处理见表 1 注。同一列同一年份不同小写字母表示作物产量在不同处理间差异显著(P<0.05)。

2.4 稻田碳库指标与土壤肥力的相关性

分析 2 年土壤总有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳及易氧化碳含量与稻田土壤肥力指标的相关性,结果如表 5 所示。土壤总有机碳含量与速效钾含量和硝态氮含量呈显著正相关关系;可溶性有机碳含量与土壤速效磷含量呈显著相关关系,而与速效钾含量则呈极显著正相关关系;微生物碳含量与土壤有机质、全氮和速效磷含量呈显著正相关关系;易氧化碳含量与土壤速效磷和铵态氮含量呈显著正相关关系,与速效钾含量呈极显著正相关关系;土壤总有机

碳、可溶性有机碳、易氧化碳含量与作物周年产量呈显著正相关关系,其中总有机碳含量与周年产量的相关系数最大(0.84*)。经逐步回归分析,土壤总有机碳含量= 0.254×全氮含量(g/kg)+12.961×有机质含量(g/kg)+0.204×速效磷含量(mg/kg),可以认为土壤总氮、有机质和速效磷含量与土壤总有机碳含量关联度较大。周年作物产量= 0.279×总有机碳含量(g/kg)+8.46×有机质含量(g/kg)+0.196×全氮含量(g/kg)+0.242×速效磷含量(mg/kg)-0.017 可溶性有机碳含量(mg/kg),表明作物周年产量与土壤总有机

机碳、有机质、全氮、速效磷含量关联度较高,土壤总有机碳、有机质、全氮、速效磷含量是影响作物周年产

量的主要因素。

表 5 稻田碳库指标与土壤肥力的相关性

Table 5 Correlation between carbon pool indicators and soil fertility in paddy field

指 标	有机质	全氮	速效磷	速效钾	铵态氮	硝态氮	总有机碳	水稻产量	周年产量
总有机碳	0.48	0.64	0.66 *	0.76 *	0.29	0.79 *	1	0.71 *	0.84 *
可溶性有机碳	0.27	0.61	0.68 *	0.82 **	0.49	0.59	0.59	0.77 *	0.70 *
微生物碳	0.71 *	0.79 *	0.76 *	0.55	0.1	0.55	0.35	0.55	0.37
易氧化碳	0.51	0.4	0.77 *	0.83 **	0.78 *	0.62	0.69 *	0.90 **	0.74 *

$n = 24, df = 23$ 。* 表示显著相关, ** 表示极显著相关。

3 讨 论

3.1 油-稻轮作下前茬氮肥投入与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库的影响

秸秆还田配施适量化肥能够培肥地力,提高作物产量^[13]。杨滨娟等研究结果表明,秸秆还田配施低量氮、磷、钾肥可显著增加土壤全氮、速效钾含量^[14]。前人从秸秆还田方式、还田量、还田时间、秸秆还田与化肥配合施用等方面对土壤有机质的影响进行了研究^[15-16]。秸秆还田和有机肥配施处理可以增加土壤有效氮和速效磷含量,但速效钾含量随着种植年限的增加呈下降趋势^[17]。黄容等^[18]研究结果表明,秸秆还田与化肥减量配施处理较常规施肥处理提高了土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量,且土壤速效养分随着减量施肥水平的提高呈先增加后降低的趋势。本研究结果表明,在油-稻轮作秸秆全量还田条件下,与油菜季常规施氮(Nc)相比,油菜季减量施氮(Nr)提高了稻田土壤有机质、速效磷和全氮的含量,油菜季减施氮肥(Nr)配合稻季 M3 运筹对稻田土壤养分含量的提高效果最佳。原因可能是在微生物分解秸秆的过程中适量的氮肥和适宜的氮肥运筹,可以为微生物提高氮源^[19],调节适宜土壤微生物生长的 C/N,促进土壤微生物活性,从而加快了微生物对秸秆中有机态养分的分解释放,提高了土壤养分。

土壤碳库是由很多不同稳定性组分组成的,其动态平衡是土壤肥力保持和提高的重要内容。李琳等^[20]研究认为秸秆还田能够增加土壤中活性有机碳组分,同时改善有机碳质量。吴玉红等^[21]研究发现秸秆还田配施减量肥料能提高土壤有机碳及活性有机碳含量。赵亚南等^[22]研究结果表明秸秆还田

与化肥配施处理对有机碳含量的提升效果高于单施化肥处理。本研究结果表明,稻田碳库含量在秸秆还田的第 2 年略高于第 1 年,原因可能是随着油菜和水稻秸秆逐年归还进入土壤,土壤汇碳功能增强,从而提升了土壤基础地力。本试验条件下,油菜季减量施氮(Nr)下稻季 M3 运筹对稻田土壤总有机碳和微生物碳含量的提高效果最为显著,但在提高易氧化性碳含量方面没有体现出明显优势。相关分析结果表明,土壤总氮、有机质、速效磷含量与土壤总有机碳含量呈显著正相关关系,可能是因为土壤有机碳的分解受土壤微生物碳氮平衡的影响,土壤 C/N 在很大程度上影响其分解速率,而油菜季减量施氮(Nr)处理下稻季 M3 运筹能够控制土壤 C/N 在适宜的范围(9.01~9.89),提高土壤微生物活性,加快秸秆腐解,提高土壤有机质等养分含量。另外,水稻季淹水状态降低了土壤矿化和腐殖化的过程^[23-25]。张瑞等^[26]研究结果表明短期施肥可以同时提高土壤活性有机碳含量,这是因为土壤有机碳由不同活性的碳库组成,短期施肥对土壤有机碳的影响首先表现在活性碳库上,对周转速度较慢的非活性碳库的影响较为缓慢,而长期施肥能维持有机碳持续大量输入,促使各个碳库之间的相互转化,因此非活性碳库也逐渐发生变化,直至碳库间达到动态平衡并维持在一定的比例^[27]。

3.2 油-稻轮作下前茬氮肥投入与稻季氮肥运筹对作物产量的影响

农业中化肥零增长是现代农业中发展的目标,不同种植体系中减量施肥得到了广泛关注,很多研究结果表明,在麦-稻、玉米-油菜等轮作体系中减量施肥对产量的影响较小^[28-30]。丁文金等^[31]研究结果表明,秸秆还田氮肥减量处理对双季稻总产量不

会产生明显的负面影响。黄容等^[18]研究结果表明,秸秆全量覆盖配合氮肥减量 20%~30%处理能够提高水稻产量。本研究结果表明,土壤总有机碳含量与土壤养分和作物周年产量呈显著或极显著正相关关系,土壤总氮、速效磷含量与土壤总有机碳含量的相关度较大,因此,秸秆还田后,应以合理的氮肥用量及合理的氮肥管理方式调节土壤 C/N,使得秸秆更快地腐解。否则,会引起 C/N 失调,起不到增产的效果^[32]。本研究结果表明,在油-稻轮作系统下,油菜季减量施氮降低了油菜的产量,而油菜季减量施氮(Nr),稻季 M3 (基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2)氮肥运筹下水稻产量最高,可能是由于前茬减量施氮,稻田土壤肥力处于较低状态,水稻季后氮前移有利于水稻形成优势群体,而且水田具有较好的水热稳定性,基础地力对水稻产量的贡献大^[33]。此外,也可能是因为水稻季油菜秸秆还田和油菜季水稻秸秆还田的肥料产生的效应有所差别,水稻季油菜秸秆还田后高温和淹水条件有利于油菜秸秆的腐解和养分的释放,加之稻季 M3 氮肥运筹,弱化了油菜季化肥减量对水稻生长的影响,营造了一个适温环境,加强了土壤水、温、肥的耦合效果,增加了土壤微生物活性,缩短了土壤有机质矿化分解过程,有利于营造对水稻生长有利的环境。这一研究结论与赵亚南等^[34]研究的稻-油轮作减量施肥对水稻油菜生长影响的结论一致。本试验中,油菜季减量施氮相比于常规施氮处理降低了油菜的产量,但是随着秸秆还田年限的增加,油菜减产效应有下降趋势,可能是因为随着油菜和水稻秸秆逐年归还进入土壤,提升了土壤基础地力,化肥减量对油菜产量的影响作用减小。

4 结 论

在油-稻轮作模式下,油菜季减少氮肥投入 30 kg/hm² (约 18%),水稻季在施氮 150 kg/hm²下以基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2 运筹模式可以有效地改善稻田土壤养分和碳库状况,提高水稻产量。

参考文献:

- [1] 孙卫民,杨滨娟,钱海燕,等.秸秆还田配施不同配比化肥对晚稻产量及土壤肥力的影响[J]. 农学学报,2012,2(12):16-21.
- [2] 南雄雄,游东海,田霄鸿,等.关中平原农田作物秸秆还田对土壤有机碳和作物产量的影响[J]. 华北农学报,2011,26(5):225-232.
- [3] 杨 帆,董 燕,徐明岗,等.南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3040-3944.
- [4] GAMI S K, LAUREN J G, DUXBURY J M. Soil organic carbon and nitrogen stocks in Nepal long-term soil fertility experiments [J]. Soil & Tillage Research, 2009,106(1):95-103.
- [5] 谭亦杭,沈健林,蒋炳伸. 秸秆还田与水分管理对双季水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 农业现代化研究,2018,39(3):511-519.
- [6] 徐明岗,于 荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
- [7] 王改玲,李立科,郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):20-26.
- [8] 于维水,王碧胜,王士超,等. 长期不同施肥下我国 4 种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J]. 中国土壤与肥料,2018(2):29-34.
- [9] 刘合明,杨志新,刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J]. 生态环境,2008(5):334-337.
- [10] 李晓峰,程金秋,梁健,等.秸秆全量还田与氮肥运筹对机插梗稻产量及氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2017,43(6):912-924.
- [11] 吕国红,周广胜,周 莉,等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. 气象与环境学报,2006,22(2):51-55.
- [12] 陈 果. 淹水土壤中微生物生物量碳测定方法的研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [13] 劳秀荣,孙伟红,王 真,等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报,2003,40(4):618-623.
- [14] 杨滨娟,黄国勤,徐 宁,等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报,2014,34(13):3779-3787.
- [15] LOU Y L, XU M G, WANG W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization [J]. Soil and Tillage Research, 2011,113(1):70-73.
- [16] SAFFIH-HDADI K, MARY B. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(3):594-607.
- [17] 闫洪奎,胡 博,高立祯. 长期施用秸秆及有机肥对辽宁北部棕壤土壤有效养分的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2013,44(6):812-815.
- [18] 黄 容,高 明,万毅林,等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学,2016,37(11):4446-4456.
- [19] 张 鑫. 秸秆还田下氮肥管理对土壤微生物学特性的影响[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [20] 李 琳,伍芬琳,张海林,等. 双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(1):248-253.
- [21] 吴玉红,郝兴顺,田霄鸿,等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻茬

- 麦土壤养分、酶活性及产量影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5):127-134.
- [22] 赵亚南,柴冠群,张珍珍,等. 稻麦轮作下紫色土有机碳活性及其长期不同施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(22): 4398-4407.
- [23] YAN X, ZHOU H, ZHU Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 42-51.
- [24] 夏海勇,王凯荣,赵庆雷,等. 秸秆添加对土壤有机碳库分解转化和组成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4):386-393.
- [25] 杨艳华,苏瑶,何振超,等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):312-320.
- [26] 张瑞,张贵龙,姬艳艳,等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
- [27] JENKINSON D S, RAYNER J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments[J]. Soil Science, 1977, 123(5): 298-305.
- [28] 张均华,刘建立,张佳宝,等. 施氮量对稻麦干物质转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10):1736-1742.
- [29] 刘学军,巨晓棠,张福锁. 减量施氮对东小麦-夏玉米种植体系中氮肥利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458-462.
- [30] 段然,汤月丰,文炯,等. 减量施肥对湖垌旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国农业生态学报, 2013, 21(5): 536-543.
- [31] 丁文金,马友华,胡宏祥,等. 秸秆还田与减量施肥对双季稻产量及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境与发展, 2013(4): 76-81.
- [32] 徐勇,沈其荣,钟增涛,等. 化学处理和微生物混合培养对水稻秸秆腐解和组分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1):59-65.
- [33] 李忠芳,张水清,李慧,等. 长期施肥下我国水稻土基础地力变化趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1394-1402.
- [34] 赵亚南,宿敏敏,吕阳,等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864-873.

(责任编辑:张震林)