

稻—麦轮作体系不同施肥模式对氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响

左婷¹, 王新霞¹, 侯琼¹, 倪亮², 倪玥敏², 王剑¹, 倪吾钟¹

(1.浙江大学环境与资源学院,浙江省农业资源与环境重点实验室,杭州 310058;2.浙江大学农业试验站,杭州 310058)

摘要: 土壤肥力和养分利用效率是保障可持续粮食生产的基础。通过田间试验研究了稻—麦轮作体系下不同施肥模式氮肥利用效率和土壤有效养分的变化,结果表明:在减少养分总投入量的条件下,有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻地上部总生物量显著高于 LRF 处理($P < 0.05$),与 FP 处理差异不大;小麦秸秆生物量与 FP 和 LRF 处理差异均不显著,籽粒生物量及地上部总生物量与 LRF 处理相差不大。水稻收获期 RF-OM 处理地上部主要器官含氮量与 LRF 处理差异不显著,氮素积累总量显著高于 LRF 处理($P < 0.05$);小麦收获期 RF-OM 和 RF-S 处理秸秆、籽粒含氮量和氮素积累量与 LRF 处理均无显著差异。收获期 RF-OM 和 RF-S 处理水稻糙米和稻壳、小麦秸秆和籽粒含磷量及磷素积累量与 FP 和 LRF 处理差异都不大;水稻秸秆、稻壳及小麦秸秆含钾量和钾素积累量均显著高于 FP 和 LRF 处理($P < 0.05$)。有机肥部分替代化肥处理水稻、小麦氮肥农学利用率、氮肥表观回收率和氮肥偏生产力与 FP 和 LRF 处理相比均显著提高($P < 0.05$),氮素籽粒生产效率也高于 FP 和 LRF 处理,甚至达到显著水平($P < 0.05$)。试验表明,水稻、小麦收获期增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)土壤速效钾、缓效钾含量显著高于 FP 和 LRF 处理($P < 0.05$),水稻收获期土壤碱解氮和小麦收获期土壤有效磷含量与 LRF 处理差异不大,同时,经 1 个稻—麦轮作周期后,4 个施肥处理土壤有效养分(碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾)含量均高于供试土壤。有机肥部分替代化肥能显著提高稻麦氮肥利用效率,有利于土壤有效养分平衡,并显著提高土壤速效钾和缓效钾养分含量,是适宜的稻麦化肥减量和稳产增效施用技术。

关键词: 水稻; 小麦; 有机肥; 化肥; 部分替代; 氮肥利用效率; 土壤有效养分

中图分类号: S511.3; S512.1; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0213-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.031

Nitrogen Use Efficiency of Crops and Available Nutrient Balance in Soil as Affected by Different Fertilization Modes with a Rice-wheat Rotation

ZUO Ting¹, WANG Xinxia¹, HOU Qiong¹, NI Liang², NI Yuemin², WANG Jian¹, NI Wuzhong¹

(1.College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 2.Agricultural Experimental Station, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Soil fertility and nutrient use efficiency are the basis for sustainable food production. A field experiment was conducted to investigate the effects of different fertilization modes on nitrogen use efficiency of crops and available nutrient balance in soil with a rice-wheat rotation. The results showed that the rice shoot biomass of RF-OM and RF-S treatments with the reduced total nutrient inputs were significantly higher than that of LRF treatment ($P < 0.05$), similar to that of FP treatment. The differences of wheat straw biomass among the four fertilization treatments were not significant, the wheat grain biomass and shoot biomass of RF-OM and RF-S treatments were similar to that of LRF treatment. At rice harvesting stage, the nitrogen contents in the main shoot organs of RF-OM treatment was similar to those of LRF treatment, but the total nitrogen amount accumulated in shoots was significantly higher than that of LRF ($P < 0.05$). For wheat plants, the nitrogen contents and accumulation amounts in straws or grains of RF-OM and RF-S treatments were not significantly different from LRF treatment. At rice or wheat harvesting stage, the phos-

收稿日期: 2020-08-20

资助项目: 农业农村部农业绿色发展先行先试支撑体系建设专项(安吉县)(NG/LS2020-71-05); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)

第一作者: 左婷(1996—), 女, 硕士, 主要从事新型肥料研制与养分资源高效利用研究。E-mail: 749925397@qq.com

通信作者: 倪吾钟(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型肥料研制与养分资源管理、植物营养与环境胁迫诊断等研究。E-mail: wzni@zju.edu.cn
王新霞(1993—), 女, 硕士, 主要从事养分资源管理与农业面源污染控制研究。E-mail: 2392149668@qq.com

phorus contents and accumulation amounts in brown rice, rice husks, wheat straws and grains of RF—OM and RF—S treatments were not significantly different from FP and LRF treatments. As a result of increasing potassium doses, potassium contents and accumulation amounts in rice straws, rice husks and wheat straws were significantly higher than those of FP or LRF treatments ($P < 0.05$). Nitrogen agronomic efficiency, nitrogen apparent recovery and nitrogen partial factor productivity of RF—OM and RF—S treatments for rice or wheat were significantly higher than those of FP or LRF treatment ($P < 0.05$), the nitrogen grain production efficiency was also higher than that of FP or LRF treatment, even significantly ($P < 0.05$). At rice or wheat harvesting stage, soil exchangeable and slow-release potassium concentrations of RF—OM and RF—S treatments with raising potassium dosages were significantly higher than those of FP and LRF treatments. Soil alkali-hydrolyzed nitrogen concentrations at rice harvesting stage and soil available phosphorus concentrations at wheat harvesting stage of RF—OM and RF—S treatments were not significantly different from LRF treatment. After a whole rice-wheat rotation, concentrations of soil available nutrients (alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, exchangeable potassium, slow-release potassium) of the four fertilization treatments were all higher than those of the initial soil. Organic manure used as an alternative for chemical fertilizers is able to significantly increasing crop nitrogen use efficiency, being conducive to the balance of soil available nutrients and significant increases in the concentrations of soil exchangeable potassium and slow-release potassium, which can be regarded as a suitable technique for reducing application of chemical fertilizers, stabilizing grain yields and increasing fertilization efficiency in rice and wheat cropping.

Keywords: rice (*Oryza sativa* L.); wheat (*Triticum aestivum* L.); organic manure; chemical fertilizers; partial replacement; nitrogen use efficiency; soil available nutrient

太湖地区人口密度大,农业高度集约化,为更大限度利用土地资源,太湖流域水旱轮作十分普遍。在我国粮食作物耕地有限且逐年降低的情况下,稻麦轮作在提高复种系数、充分利用土壤养分等方面起到重要作用,其生产状况对保障我国粮食安全具有重要意义^[1]。国内众多稻麦轮作区长期定位试验^[2-3]结果均表明,作物高产稳产是土壤肥沃的重要标志,而施肥是土壤肥力保持和提高的基础,土壤肥力高低决定了粮食作物生长发育的优劣,直接影响到作物的产量和品质。高效的养分利用效率可以在较少的养分投入下使粮食作物获得相对较高的产量,但作物种植过程中常因施肥不恰当导致土壤养分含量发生较大变化,过度使用化肥不仅导致肥料养分的利用率降低,还会导致土壤肥力和质量下降,最终降低农业生产力。而有有机肥部分替代化肥施肥模式可以同时发挥 2 种肥料各自的优点,不仅提高作物产量和养分利用效率,还能提高土壤有效养分含量,为农业的可持续发展提供先决条件^[4]。

有机肥部分替代化学肥料可以增加土壤有机质含量,明显改善土壤肥力状况,有效提高土壤养分含量。祝英等^[5]研究表明,用有机肥替代 30% 化肥可以显著提高玉米地上部生物量,并有效提高土壤养分容量及供应强度;傅松等^[6]研究表明,有机肥部分替代化肥可以有效改善土壤理化性状并提高土壤肥力,其中减施化肥 10% + 有机肥 4 500 kg/hm² 处理

与对照(100% 化肥)相比,土壤有效磷含量提高 0.9 mg/kg,速效钾含量提高 0.6 mg/kg。有机肥部分替代化肥处理也是提高作物养分利用效率的重要手段之一,张娜^[7]研究水稻商品有机肥替代化肥减量施肥技术表明,在不影响产量的情况下,商品有机肥施用量为 1 500 kg/hm² 时可替代 10% 左右化肥施用量,并且与常规施肥处理相比氮肥利用率平均提高 3.3%;高怡安等^[8]研究表明,有机肥替代部分化肥可提高马铃薯氮肥利用效率,以 200 kg/667 m² 普通有机肥替代 20% 化肥处理最高,比 100% 化肥处理提高 24.8%;李顺等^[9]研究表明,化肥配施有机肥或生物有机肥显著提高小麦氮素利用效率,其中生物有机无机肥配施处理的氮素表观回收率、氮肥偏生产力和氮农学效率较农户施肥处理分别提高 135.4%, 143.4% 和 156.2%;陈琨等^[10]研究表明,有机无机肥配施处理明显提高水稻氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力。

目前,关于有机肥部分替代化肥对作物生产及土壤肥力质量影响的报道大多集中于单季作物,而稻—麦轮作体系的持续研究不多,在优化氮磷钾化肥施用的基础上,有机肥养分部分替代化肥对稻麦氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响也少见报道。本文依据南太湖地区长兴县当地粮食种植实际情况,以稻—麦轮作体系为研究对象,采用田间小区试验,研究不同有机肥部分替代化肥处理对氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的

影响,完善化肥减量条件下的施肥措施,为当地稻麦轮作条件下高产、高效粮食生产提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤为红壤性水稻土,其肥力性状为:pH 为 5.68,有机质含量 28.5 g/kg,全氮含量 1.58 g/kg,全磷含量 0.68 g/kg,全钾含量 23.3 g/kg,缓效钾含量 414.2 mg/kg,碱解氮含量 138.2 mg/kg,有效磷含量 20.4 mg/kg,速效钾含量 75.2 mg/kg。供试氮肥为尿素(N 46%),磷肥为钙镁磷肥(P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(K_2O 60%);供试有机肥料为商品有机肥、水稻秸秆、小麦秸秆,各种有机肥料的养分含量见表 1。

表 1 供试有机肥料的养分含量 单位:%

有机肥料种类	N	P_2O_5	K_2O	有机 C
商品有机肥	2.02	1.80	1.35	32.40
水稻秸秆	0.76	0.56	1.48	46.53
小麦秸秆	0.87	0.59	1.72	44.58

表 2 各处理养分投入量

单位:kg/hm²

供试作物	处理	N				P_2O_5				K_2O			
		化肥	有机肥	秸秆	总量	化肥	有机肥	秸秆	总量	化肥	有机肥	秸秆	总量
水稻季	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	FP	300.0	0	0	300.0	150.0	0	0	150.0	90.0	0	0	90.0
	LRF	270.0	0	0	270.0	120.0	0	0	120.0	90.0	0	0	90.0
	RF-OM	169.0	56.0	0	225.0	55.0	50.0	0	105.0	82.0	23.0	0	105.0
	RF-S	196.0	0	29.0	225.0	20.0	0	85.0	105.0	62.0	0	43.0	105.0
小麦季	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	FP	150.0	0	0	150.0	45.0	0	0	45.0	45.0	0	0	45.0
	LRF	135.0	0	0	135.0	36.0	0	0	36.0	45.0	0	0	45.0
	RF-OM	84.0	28.5	0	112.5	6.5	25.0	0	31.5	41.0	19.0	0	60.0
	RF-S	88.0	0	24.5	112.5	13.5	0	18.0	31.5	12.0	0	48.0	60.0

注:水稻 2017 年 6 月 18 日施用基肥,7 月 17 日施用分蘖肥,8 月 25 日施用穗肥;小麦 2017 年 11 月 20 日施用基肥,2018 年 3 月 1 日施用返青肥,3 月 30 日施用拔节肥,4 月 20 日施用孕穗肥。

供试水稻品种为“嘉禾 218”,有机肥和磷肥作基肥一次性均匀撒施,氮肥和钾肥分 3 次施用,氮肥 50%作基肥,30%作分蘖肥,20%作穗粒肥;钾肥 40%作基肥,30%作分蘖肥,30%作穗粒肥。供试小麦品种为“扬麦 12”,磷肥及钾肥一次性作基肥施用,氮肥分 4 次施用,其中 25%作基肥,10%作返青肥,50%作拔节肥,15%作孕穗肥。

1.3 测定项目与方法

水稻、小麦收获期每个处理每个小区单独收割,水稻采集饱粒、瘪粒和秸秆样品,饱粒样品分为糙米和稻壳两部分,小麦采集秸秆和籽粒样品。105℃杀青 0.5 h 之后 75℃烘干、冷却、称重、粉碎,测定地上部生物量,氮、磷和钾养分含量及积累量。氮肥农学利用率、氮肥表观回收率、氮肥偏生产力和氮素籽粒

1.2 试验设计

2017 年 6 月至 2018 年 6 月在浙江省长兴县泗安镇浙江大学农业试验站长兴分站(30°53'11"N, 119°37'26"E)进行田间定位试验,试验采用随机区组设计,设置 5 个处理:对照 CK(不施肥)、习惯施肥 FP(当地化肥常规施用量)、推荐施肥 LRF(在 FP 基础上氮肥减施 10%、磷肥减施 20%)、商品有机肥部分替代化肥 RF-OM(在 FP 基础上氮肥减施 25%、磷肥减施 30%、水稻季钾肥增施 16.7%、小麦季钾肥增施 33.3%,同时以商品有机肥氮替代 25%化肥氮施用量)、秸秆部分替代化肥 RF-S(施用秸秆有机 C 1 500 kg/hm²,氮磷钾施用量与 RF-OM 处理相同),每个处理重复 4 次,共 20 个小区,小区面积 42 m²。化肥和商品有机肥均匀撒施,其他田间管理与当地一致。各处理养分投入量见表 2,RF-S 处理种植水稻时施用小麦秸秆、种植小麦时施用水稻秸秆,秸秆还田方式为切碎后(长度为 10 cm 左右)翻耕还田,与生产上秸秆还田的实际相符。

生产效率计算公式^[11]为:

$$\text{氮肥农学利用率(kg/kg)} = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{无氮区籽粒产量}) / \text{氮肥施用量}$$

$$\text{氮肥表观回收率(\%)} = (\text{施氮区地上部氮素积累量} - \text{无氮区地上部氮素积累量}) / \text{氮肥施用量} \times 100\%$$

$$\text{氮肥偏生产力(kg/kg)} = \text{籽粒产量} / \text{氮肥施用量}$$

$$\text{氮素籽粒生产效率} = \text{籽粒产量} / \text{地上部氮素积累量}$$

水稻和小麦收获期土壤碱解氮测定采用碱解扩散法,有效磷测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法,速效钾、缓效钾含量测定采用火焰光度计法,土壤基本理化性质测定采用常规方法^[12]。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理并绘制图表,采用 SPSS 19.0 统计软件进行数据间

多重比较(Duncan's 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理水稻、小麦收获期地上部生物量

由表 3 可知,水稻收获期各处理地上部总生物量为 7 898.5~15 234.9 kg/hm²,有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻秸秆、稻壳生物量及地上部总生物量显著高于 LRF 处理($P < 0.05$),与 FP 处理差异不显著。各施肥处理间水稻糙米生物量无显著差异,其中 RF-OM 处理糙米生物

量最高,并且 RF-OM 处理水稻地上部总生物量高于 RF-S 处理。小麦收获期各处理地上部总生物量为 5 536.8~9 139.2 kg/hm²,各施肥处理间小麦秸秆生物量差异不显著,但均显著高于 CK 处理($P < 0.05$),其中 RF-OM 处理小麦秸秆生物量高于 LRF 处理。RF-OM 处理小麦籽粒生物量及地上部总生物量与 FP 和 LRF 处理差异不大,但显著高于 RF-S 处理($P < 0.05$),RF-S 处理小麦籽粒生物量及地上部总生物量与 LRF 处理无显著差异。

表 3 水稻、小麦地上部生物量

单位:kg/hm²

处理	水稻地上部生物量					小麦地上部生物量		
	秸秆	瘪粒	糙米	稻壳	总生物量	秸秆	籽粒	总生物量
CK	3556.7c	545.6c	3083.0b	713.2c	7898.5c	3123.4b	2413.4d	5536.8d
FP	7255.6a	755.1ab	5853.6a	1356.5a	15220.8a	5032.9a	4106.3a	9139.2a
LRF	6790.0b	769.7ab	5919.7a	1176.7b	14656.1b	4951.4a	4010.3bc	8961.7bc
RF-OM	7217.1a	727.7b	5956.5a	1333.5a	15234.9a	4970.9a	4062.7ab	9033.6ab
RF-S	7067.0a	786.1a	5837.0a	1319.5a	15009.7a	4938.8a	3947.2c	8886.0c

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 水稻、小麦收获期地上部养分含量及积累量

2.2.1 水稻收获期地上部养分含量及积累量 从表 4 可以看出,水稻收获期各处理秸秆含氮量为 7.27~8.50 g/kg,瘪粒含氮量为 7.79~9.01 g/kg,糙米含氮量为 12.80~14.00 g/kg,稻壳含氮量为 6.02~7.19 g/kg。RF-OM 处理秸秆含氮量与 FP 和 LRF 处理相比无显著差异,三者均显著高于 RF-S 和 CK 处理($P < 0.05$);FP 处理瘪粒含氮量显著高于其他处理($P < 0.05$);LRF 和 RF-OM 处理瘪粒含氮量差异不显著,但均显著高于 RF-S 和 CK 处理($P < 0.05$);FP 处理糙米含氮量显著高于其他处理($P < 0.05$),减氮处理(LRF、RF-OM 和 RF-S 处理)糙米含氮量相差不大。与 CK 处理相比,各施肥处理稻壳含氮量均有显著提高($P < 0.05$),各处理间有一定差异但不显著,其中 RF-OM 和 RF-S 处理稻壳含氮量高于 LRF 处理。水稻地上部氮素积累量也存在较大的差异(表 4),与 RF-S 和 LRF 处理相比,RF-OM 处理水稻秸秆氮素积累量及氮素积累总量均显著提高($P < 0.05$),但与 FP 处理差异不显著;RF-S 处理水稻秸秆氮素积累量及氮素积累总量与 LRF 处理无显著差异。FP 处理瘪粒氮素积累量显著高于 RF-OM 处理($P < 0.05$),与 LRF 和 RF-S 处理差异不显著,LRF、RF-OM、RF-S 处理瘪粒氮素积累量无显著差异。RF-OM 处理糙米氮素积累量与 FP 和 LRF 处理差异不大,三者均显著高于 RF-S 和 CK 处理($P < 0.05$)。RF-OM 和 RF-S 处理稻壳氮素积累量与 FP 处理差异不显著,三者均显著高于 LRF 和 CK 处理($P < 0.05$)。除瘪粒外,RF-OM 处

理对水稻地上部氮素积累量的影响与 FP 处理相当;除糙米外,RF-S 处理对水稻地上部氮素积累量的影响与 LRF 处理相当。

不同处理水稻收获期地上部含磷量和磷素积累量见表 4。水稻收获期各处理秸秆含磷量为 2.73~3.58 g/kg,瘪粒含磷量为 1.52~1.67 g/kg,糙米含磷量为 3.18~3.60g/kg,稻壳含磷量为 0.60~0.77 g/kg。有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻地上部含磷量和磷素积累量差异均不显著。FP 处理秸秆含磷量显著高于减磷处理(LRF、RF-OM 和 RF-S)和 CK 处理($P < 0.05$),LRF 处理秸秆含磷量显著高于 RF-OM 和 RF-S 处理($P < 0.05$)。FP 和 LRF 处理瘪粒含磷量相差不大,二者均显著高于其余处理(RF-S、RF-OM 和 CK)($P < 0.05$)。各施肥处理水稻糙米、稻壳含磷量有一定差异,但未达到显著水平。由表 4 可知,各处理地上部磷素积累量为 20.8~49.4 kg/hm²。减磷处理(LRF、RF-OM 和 RF-S 处理)秸秆磷素积累量及地上部磷素积累总量显著低于 FP 处理($P < 0.05$),LRF 处理秸秆磷素积累量及地上部磷素积累总量显著高于 RF-OM、RF-S 和 CK 处理($P < 0.05$)。LRF 处理瘪粒磷素积累量与 FP 和 RF-S 处理差异不显著,但显著高于 RF-OM 和 CK 处理($P < 0.05$)。各施肥处理水稻糙米磷素积累量有一定差异但不显著,均显著高于 CK 处理($P < 0.05$),RF-OM 和 RF-S 处理稻壳磷素积累量与 FP 处理无显著差异,三者均显著高于 LRF 和 CK 处理($P < 0.05$)。

不同处理秸秆含钾量为 14.86~20.49 g/kg,瘪

粒含钾量为 4.12~5.88 g/kg,糙米含钾量为 2.40~2.64 g/kg,稻壳含钾量为 3.28~5.20 g/kg。增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻地上部主要器官含钾量和钾素积累量无显著差异,FP 和 LRF 处理水稻地上部主要器官含钾量无显著差异。除糙米外,增钾处理水稻地上部含钾量均显著高于其余处理($P<0.05$)。各处理水稻地上部钾素积累总量为 64.9~171.3 kg/hm²,大小顺序为 RF-S>RF-OM>FP>LRF>CK。与 FP

和 LRF 处理相比,RF-OM 和 RF-S 处理水稻地上部钾素积累总量增长率分别为 12.2%~12.9%和 19.5%~20.3%。增钾处理水稻秸秆、瘪粒和稻壳钾素积累量均显著高于 FP、LRF 和 CK 处理($P<0.05$),FP 处理秸秆、稻壳钾素积累量显著高于 LRF 处理($P<0.05$),但瘪粒、糙米钾素积累量与 LRF 处理无显著差异。各施肥处理能显著提高糙米钾素积累量($P<0.05$),且各施肥处理间差异不大。

表 4 水稻地上部养分含量及积累量

指标	处理	秸秆	瘪粒	糙米	稻壳	总量
含氮量/(g·kg ⁻¹)	CK	7.27c	7.79d	12.80c	6.02b	—
	FP	8.50a	9.01a	14.00a	7.19a	—
	LRF	8.36a	8.61b	13.82b	6.90a	—
	RF-OM	8.44a	8.60b	13.80b	7.10a	—
	RF-S	7.94b	8.40c	13.70b	7.17a	—
含磷量/(g·kg ⁻¹)	CK	2.73d	1.52b	3.18b	0.60a	—
	FP	3.58a	1.67a	3.60a	0.76a	—
	LRF	3.41b	1.67a	3.43a	0.74a	—
	RF-OM	2.84c	1.55b	3.53a	0.74a	—
	RF-S	2.98c	1.54b	3.46a	0.77a	—
含钾量/(g·kg ⁻¹)	CK	14.86c	4.12b	2.40a	3.28c	—
	FP	17.61b	4.73b	2.55a	4.03b	—
	LRF	17.50b	4.82b	2.58a	3.91b	—
	RF-OM	19.85a	5.88a	2.64a	5.18a	—
	RF-S	20.49a	5.84a	2.56a	5.20a	—
氮素积累量/(kg·hm ⁻²)	CK	25.9c	4.3c	39.5c	4.3c	73.9c
	FP	61.7a	6.8a	82.0a	9.8a	160.3a
	LRF	56.8b	6.6ab	81.8a	8.1b	153.4b
	RF-OM	61.0a	6.3b	82.3a	9.5a	159.0a
	RF-S	56.1b	6.6ab	80.3b	9.5a	152.5b
磷素积累量/(kg·hm ⁻²)	CK	9.7d	0.8c	9.8b	0.4c	20.8d
	FP	26.0a	1.3a	21.1a	1.0a	49.4a
	LRF	23.1b	1.3a	20.3a	0.9b	45.6b
	RF-OM	20.5c	1.1b	21.0a	1.0a	43.7c
	RF-S	21.0c	1.2ab	20.2a	1.0a	43.5c
钾素积累量(kg·hm ⁻²)	CK	52.9d	2.3c	7.4b	2.3d	64.9d
	FP	127.8b	3.6b	14.9a	5.5b	151.7b
	LRF	118.8c	3.7b	15.3a	4.6c	142.4c
	RF-OM	143.3a	4.3a	15.7a	6.9a	170.2a
	RF-S	144.9a	4.6a	15.0a	6.9a	171.3a

2.2.2 小麦收获期地上部养分含量及积累量 从表 5 可以看出,不同处理小麦秸秆含氮量为 7.34~8.97 g/kg,籽粒含氮量为 14.01~15.93 g/kg。RF-OM 处理秸秆含氮量和氮素积累量与 FP、LRF 和 RF-S 处理差异均不显著,RF-S 处理秸秆含氮量及氮素积累量显著低于 FP 处理($P<0.05$),与 LRF 处理无显著差异。FP 处理籽粒含氮量显著高于减氮处理(LRF、RF-OM 和 RF-S 处理)($P<0.05$),减氮处理间籽粒含氮量无显著差异。FP 处理小麦地上部氮素积累总量最高,为 117.9 kg/hm²,显著高于其他处

理($P<0.05$),RF-OM 处理小麦地上部氮素积累总量与 LRF 和 RF-S 处理无显著差异。减氮处理籽粒氮素积累量无显著差异,但显著低于 FP 处理($P<0.05$),各施肥处理小麦秸秆、籽粒含氮量及氮素积累量均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。

不同处理小麦秸秆含磷量为 0.63~0.79 g/kg,籽粒含磷量为 4.03~4.32 g/kg。各施肥处理间小麦秸秆含磷量无显著差异,均显著高于 CK 处理($P<0.05$),各处理籽粒含磷量存在一定差异但未达到显著水平,其中 RF-OM 处理籽粒含磷量与 FP 处理

相当,RF-S 处理籽粒含磷量与 LRF 处理差异不大。RF-OM 和 RF-S 处理秸秆、籽粒磷素积累量与 FP 和 LRF 处理差异不显著,但均显著高于 CK 处理($P<0.05$),其中 RF-OM 处理地上部磷素积累总量与 FP 处理相当,RF-S 处理地上部磷素积累总量与 LRF 处理相差不大。

从表 5 还可看出,与 FP 和 LRF 处理相比,RF-OM 和 RF-S 处理小麦地上部钾素积累总量增长

率分别为 7.90%~9.60% 和 8.30%~10.00%。小麦秸秆含钾量为 14.68~17.77g/kg,籽粒含钾量为 5.42~6.84 g/kg,增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)小麦秸秆含钾量和钾素积累量差异不显著,但显著高于 FP、LRF 和 CK 处理($P<0.05$),FP 和 LRF 处理秸秆含钾量和钾素积累量无显著差异。除 CK 处理外,各施肥处理籽粒含钾量和钾素积累量均无显著差异。

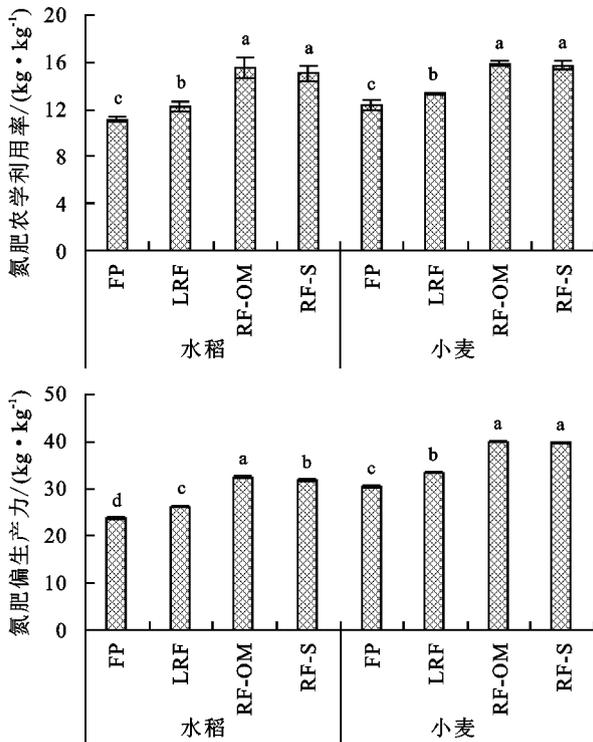
表 5 小麦地上部养分含量及积累量

处理	含氮量/(g·kg ⁻¹)		含磷量/(g·kg ⁻¹)		含钾量/(g·kg ⁻¹)		氮素积累量/(kg·hm ⁻²)			磷素积累量/(kg·hm ⁻²)			钾素积累量/(kg·hm ⁻²)		
	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	总量	秸秆	籽粒	总量	秸秆	籽粒	总量
CK	7.34c	14.01c	0.63b	4.03a	14.68c	5.42b	22.9c	38.0c	61.0d	2.0b	10.9b	12.9b	45.9c	14.7b	60.6c
FP	8.97a	15.93a	0.79a	4.31a	15.67bc	6.46a	45.1a	72.8a	117.9a	4.0a	19.7a	23.7a	78.9b	29.5a	108.4b
LRF	8.74ab	15.23b	0.76a	4.15a	15.88b	6.43a	43.4ab	68.7ab	112.1b	3.8a	18.7a	22.5a	78.9b	29.0a	108.0b
RF-OM	8.55ab	15.03b	0.79a	4.32a	17.77a	6.84a	42.2ab	67.6b	109.8bc	3.9a	19.4a	23.4a	88.0a	30.8a	118.8a
RF-S	8.26b	14.98b	0.78a	4.20a	17.48a	6.83a	40.8b	67.2b	108.0c	3.9a	18.8a	22.7a	86.3a	30.7a	117.0a

2.3 水稻和小麦氮肥利用效率

2.3.1 氮肥农学利用率 由图 1 可知,不同施肥处理水稻、小麦氮肥农学利用率分别为 11.12~15.53, 12.39~15.87 kg/kg,大小顺序均为 RF-OM>RF-

S>LRF>FP。有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻、小麦氮肥农学利用率差异未达到显著水平,但均显著高于 FP 和 LRF 处理($P<0.05$), LRF 处理显著高于 FP 处理($P<0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示相同作物不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 水稻和小麦氮肥利用效率

2.3.2 氮肥表观回收率 由图 1 可知,不同施肥处理水稻氮肥表观回收率为 28.80%~37.83%,其中有机肥部分替代化肥处理水稻氮肥表观回收率显著高于 FP 和 LRF 处理($P<0.05$),较 FP 处理提高 21.00%~31.40%,较 LRF 处理提高 18.30%~28.40%。小麦氮肥表观回收率为 37.03%~43.55%,其中 RF-OM 与 RF-S 处理差异不显著,但均显著高于 FP 和

LRF 处理($P<0.05$),有机肥部分替代化肥处理小麦氮肥表观回收率较 FP 处理提高 9.90%~14.50%,较 LRF 处理提高 10.20%~14.80%。

2.3.3 氮肥偏生产力 由图 1 可知,不同施肥处理水稻氮肥偏生产力为 23.77~32.40 kg/kg,以 RF-OM 处理最高,显著高于其他施肥处理($P<0.05$),RF-S 处理显著高于 LRF 和 FP 处理($P<0.05$)。

不同处理小麦氮肥偏生产力为 30.49~40.02 kg/kg, RF-OM 与 RF-S 处理差异不显著,但二者均显著高于 LRF 和 FP 处理($P<0.05$),LRF 处理水稻、小麦氮肥偏生产力均显著高于 FP 处理($P<0.05$)。

2.3.4 氮素籽粒生产效率 由图 1 可知,不同施肥处理水稻氮素籽粒生产效率为 45.00~51.40 kg/kg,其中各施肥处理水稻氮素籽粒生产效率显著低于 CK 处理($P<0.05$),RF-OM 处理与 RF-S、LRF 和 FP 处理差异不显著,RF-S 处理与 LRF 处理无显著差异但二者均显著高于 FP 处理($P<0.05$)。不同处理小麦氮素籽粒生产效率大小顺序为 CK>RF-S>RF-OM>LRF>FP,其中 RF-S 处理小麦氮素籽粒生产效率与 RF-OM 处理无显著差异,但显著高于 LRF 和 FP 处理($P<0.05$),RF-OM 处理与 LRF 处理差异不显著,二者均显著高于 FP 处理($P<0.05$)。

2.4 水稻和小麦收获期土壤有效养分含量

2.4.1 水稻收获期土壤有效养分含量 从表 6 可以看出,施肥能显著提高水稻收获期土壤碱解氮、有效磷、速效钾和缓效钾含量,减氮处理(LRF、RF-OM

和 RF-S 处理)土壤碱解氮含量差异不显著,但显著低于 FP 处理($P<0.05$)。RF-OM 和 RF-S 处理土壤有效磷含量差异不显著,但均显著低于 FP 和 LRF 处理($P<0.05$)。增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)土壤速效钾含量无显著差异,显著高于 FP 和 LRF 处理($P<0.05$),与 FP 处理相比,水稻收获期增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)土壤速效钾含量分别增加 11.30%和 15.10%;与 LRF 处理相比,水稻收获期增钾处理土壤速效钾含量分别增加 8.20%和 11.90%。RF-S 处理土壤缓效钾含量最高为 476.20 mg/kg,显著高于其余处理($P<0.05$),RF-OM 处理土壤缓效钾含量显著高于 FP 和 LRF 处理($P<0.05$),与 FP 处理相比,水稻收获期增钾处理土壤缓效钾含量分别增加 6.80%和 13.00%;与 LRF 处理相比,水稻收获期增钾处理土壤缓效钾含量分别增加 6.00%和 12.20%。秸秆部分替代化肥能显著提高土壤速效钾和缓效钾含量,这可能是因为作物秸秆含有丰富钾素,还田分解后可以显著增加土壤速效钾、缓效钾含量,提高土壤供钾能力。

表 6 水稻、小麦收获期土壤有效养分含量

单位:mg/kg

处理	水稻				小麦			
	碱解氮	有效磷	速效钾	缓效钾	碱解氮	有效磷	速效钾	缓效钾
CK	122.0d	16.0c	53.9c	320.0d	113.4d	16.5c	50.6c	302.0d
FP	172.1a	23.5a	65.2b	421.3c	160.6a	23.3a	75.4b	455.2c
LRF	166.8b	23.8a	67.1b	424.5c	146.4c	23.1ab	75.9b	456.4c
RF-OM	167.4b	21.4b	72.6a	450.1b	154.2b	22.3b	85.0a	490.4b
RF-S	166.5b	21.2b	75.1a	476.2a	145.8c	22.4b	87.8a	521.0a

2.4.2 小麦收获期土壤有效养分含量 由表 6 可知,小麦收获期 RF-OM 处理土壤碱解氮含量显著高于 LRF 和 RF-S 处理($P<0.05$),但显著低于 FP 处理($P<0.05$),RF-S 处理土壤碱解氮含量与 LRF 处理差异不显著。RF-OM 和 RF-S 处理土壤有效磷含量与 LRF 处理无显著差异,但显著低于 FP 处理($P<0.05$)。增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)土壤速效钾含量差异不大,但均显著高于其余处理($P<0.05$),小麦收获期增钾处理土壤速效钾含量与 FP 处理相比分别增加 12.80%和 16.40%;与 LRF 处理相比分别增加 12.00%和 15.60%。土壤缓效钾含量以 RF-S 处理最高并显著高于其他处理($P<0.05$),RF-OM 处理土壤缓效钾含量显著高于 FP、LRF 和 CK 处理($P<0.05$),小麦收获期增钾处理土壤缓效钾含量与 FP 处理相比分别增加 7.70%和 14.40%;与 LRF 处理相比分别增加 7.40%和 14.10%。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对作物收获期地上部生物量的影响

农作物生物量是表征其生长以及生产力的重要

农学参数,与作物长势和产量密切相关,是形成作物产量的基础,更是指示生态系统功能的重要标志。王忍等^[13]研究了稻草还田对水稻生物量及产量的影响,结果表明,稻草还田处理下水稻成熟期生物量显著提高 18.95%,其中穗部生物量增幅达 15.3%。本试验中,秸秆部分替代化肥处理水稻地上部生物量与推荐施肥处理相比显著提高($P<0.05$),但与习惯施肥处理差异不大,这可能是因为秸秆还田后,养分生物固持增强,释放时期延长,促进水稻生长和干物质积累。沙之敏等^[14]试验结果表明,与单施有机肥和不施肥处理相比,有机无机肥料配施处理显著提高水稻营养体和全植株生物量,单施有机肥影响水稻生长和生物量。本试验中,商品有机肥部分替代化肥处理水稻地上部生物量显著高于推荐施肥处理($P<0.05$),与习惯施肥和秸秆部分替代化肥处理差异不显著,这说明适宜比例的有机肥替代化肥处理能够满足水稻生长期对养分的需求。杨修一等^[15]的研究结果表明,与对照处理相比,以有机肥替代不同比例化肥氮素,小麦总生物量显著增加 13.83%~17.57%。本试验中,有机肥部分替代化肥处理小麦秸秆生物量与习惯施肥和推

荐施肥处理相比无显著差异,其中商品有机肥部分替代化肥处理小麦秸秆生物量比推荐施肥处理提高 0.39%。商品有机肥部分替代化肥处理小麦籽粒生物量及地上部总生物量与习惯施肥和推荐施肥处理的差异不显著,但显著高于秸秆部分替代化肥处理($P < 0.05$),而秸秆部分替代化肥处理小麦籽粒生物量及地上部总生物量与推荐施肥处理相比无显著差异。

3.2 不同施肥处理对作物地上部养分含量及积累量的影响

作物地上部不同养分含量及积累量可以反映其生长状况和养分吸收情况。杜加银等^[16]研究表明,与常规施肥处理相比,在减少氮肥施用量、优化控制磷钾肥施入的条件下,水稻分蘖期秸秆及主要生育期地上部氮、钾含量均有显著提高($P < 0.05$);刘红江等^[17]研究发现,施用 50% 有机肥替代化肥显著提高水稻的氮素积累量。本试验中,推荐施肥处理是在习惯施肥处理的基础上减氮 10%,减磷 20%;有机肥部分替代化肥处理是在习惯施肥处理的基础上氮肥减施 25%、磷肥减施 30%、水稻季钾肥增施 16.7%、小麦季钾肥增施 33.3%,结果表明,商品有机肥部分替代化肥处理水稻收获期地上部主要器官含氮量、秸秆部分替代化肥处理糙米和稻壳含氮量与推荐施肥处理的差异均不显著,减磷处理(LRF、RF-OM 和 RF-S 处理)对水稻地上部主要器官磷素含量影响不大。除糙米外,增钾处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻各部位含钾量均显著高于习惯施肥和推荐施肥处理($P < 0.05$)。施肥显著促进小麦地上部含氮量和氮素积累量,王小燕等^[18]研究认为,小麦氮素吸收和利用受施氮量的影响而有所差异,在适宜条件下小麦氮素积累量随施氮量的增加而增加,增施氮肥可显著提高小麦籽粒蛋白质及其组分含量,提高籽粒产量及品质。本试验中有机肥部分替代化肥小麦秸秆和籽粒含氮量与推荐施肥差异不显著,小麦收获期减磷处理(LRF、RF-OM 和 RF-S 处理)对植株地上部磷素含量影响不大。除瘪粒外,商品有机肥部分替代化肥水稻地上部主要器官氮素积累量与习惯施肥无显著差异,有机肥部分替代化肥水稻秸秆、瘪粒和稻壳以及小麦秸秆的含钾量和钾素积累量显著高于习惯施肥和推荐施肥($P < 0.05$),说明秸秆可以替代部分钾肥,从而保证作物正常生长,进而达到高产稳产的目的。

3.3 不同施肥处理对作物氮肥利用效率的影响

氮肥利用效率用来度量氮肥施用合理性及效果,单施无机氮肥可对农田土壤养分平衡造成不利影响,而过量施用氮肥不仅会导致作物氮肥利用率下降,还会造成其他养分贫乏^[19]。哈丽哈什·依巴提等^[20]研究表明,与单施化肥相比,有机肥氮替代部分化肥

氮有利于棉花氮磷钾养分吸收,可提高棉花氮素表观利用率、偏生产力和农学效率;李银坤等^[21]基于 2 年田间试验发现,与习惯施肥处理相比,有机肥替代化肥夏玉米氮肥偏生产力提高 58.90% ($P < 0.05$)。本试验中,与 FP 处理相比,有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)水稻氮肥农学利用率及氮肥偏生产力分别提高 3.94~4.41, 8.16~8.63 kg/kg,氮肥表观回收率提高 6.06%~9.03%。有机肥部分替代化肥处理对水稻氮肥农学利用率和氮肥偏生产力提升效果较为显著,其中商品有机肥部分替代化肥效果最好。与 FP 处理相比,有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)小麦氮肥农学利用率及氮肥偏生产力分别提高 3.36~3.48, 9.40~9.53 kg/kg,氮肥表观回收率提高 3.78%~5.52%,说明商品有机肥部分替代化肥对提高氮肥利用效率的效果优于秸秆部分替代化肥。这可能是由于有机肥的施入能改善土壤的生物性状,有利于作物营养器官中氮素的转运,从而提高作物地上部的氮肥利用效率。

与习惯施肥处理相比,有机肥部分替代化肥处理水稻氮素籽粒生产效率提高 0.86~1.99 kg/kg,小麦氮素籽粒生产效率提高 2.28~2.79 kg/kg,秸秆部分替代化肥对提高水稻、小麦氮素籽粒生产效率效果更好。本试验中,不施肥处理水稻、小麦氮素籽粒生产效率最高,且随着施氮量的增加,水稻、小麦氮素籽粒生产效率下降。崔文芳等^[22]的研究结果表明,低氮水平下的氮素籽粒生产效率最高值和最低值均高于高氮下最高值和最低值,低氮条件下玉米吐丝期和成熟期氮素干物质生产效率最高值和最低值均高于高氮下最高值和最低值,说明施氮使氮素籽粒生产效率下降。徐明岗等^[23]研究发现,有机肥与化肥配施水稻氮肥利用率平均为 36.30%,显著高于单施化肥处理,本试验的研究结果也表明,有机肥部分替代化肥可显著提高水稻和小麦氮肥利用效率($P < 0.05$),其中商品有机肥部分替代化肥提升效果更佳。Qiao 等^[24]报道,施氮量为 232~257 kg/hm²时,水稻产量最高,但从提高氮肥利用率、减少氮素损失的角度应该在此基础上削减施氮量,本研究中有有机肥部分替代化肥处理施氮量为 225 kg/hm²,相比习惯施肥和推荐施肥而言削减氮施用量,从而显著提高水稻、小麦氮肥利用效率($P < 0.05$)。

3.4 不同施肥处理对作物收获期土壤有效养分含量的影响

土壤有效养分含量可以反映土壤供肥能力,前人^[25]针对有机肥施用对土壤养分的影响方面已经开展了较多的研究,结果表明,有机肥可以增加土壤中有机质含量,使土壤形成良好的团聚体,从而改良土壤结构,提高土壤有效养分数量,有效增强土壤保肥

蓄水能力。温延臣等^[26]研究发现,与施用化肥相比,有机肥料能有效增加土壤有机氮、速效磷及速效钾含量,调节土壤养分平衡,提高土壤养分供应水平。与单施化肥相比,配施有机肥是增加土壤供氮能力较好的措施,马宁宁等^[27]研究表明,施用有机肥可以明显改善土壤的理化性状,提高土壤肥力,与单施化肥相比,配施有机肥可以显著提高土壤碱解氮、有效磷和速效钾的含量;高飞等^[28]研究表明,随着有机肥替代化肥比例的增加,水稻小麦轮作体系中土壤碱解氮、速效钾含量逐渐升高;聂佳如^[4]研究发现,即使配施比例不同,有机肥替代化肥均能提高土壤养分含量,随着有机肥在肥料中施用比例的增加,土壤中碱解氮、速效磷和速效钾含量均有所增加,增幅分别为 5.57%~24.50%,28.65%~48.42%和 16.7%~28.65%。本研究中,有机肥部分替代化肥处理水稻收获期土壤碱解氮含量显著低于习惯施肥处理($P<0.05$),与推荐施肥处理差异不显著;有效磷含量显著低于习惯施肥和推荐施肥处理($P<0.05$),可能是因为有机肥部分替代化肥在一定程度上抑制土壤有效磷含量。本试验得出,与推荐施肥相比,商品有机肥部分替代化肥小麦收获期土壤碱解氮含量增加 5.10%,秸秆部分替代化肥与推荐施肥差异不显著。白建忠等^[29]研究表明,秸秆还田不利于土壤碱解氮含量的提高。本试验中与习惯施肥处理相比,水稻收获期有机肥部分替代化肥处理土壤速效钾和缓效钾含量比分别增加 11.34%~15.06%和 6.83%~13.03%,小麦收获期有机肥部分替代化肥处理土壤速效钾和缓效钾含量分别增加 11.36%~16.45%和 7.73%~14.15%,高飞等^[28]也有相似报道,适当增加施钾量并结合有机肥料中钾素养分的循环利用对提高土壤供钾水平十分有利。

4 结论

在试验设计的施肥量条件下,收获期各施肥处理水稻、小麦地上部氮磷钾含量均能保持在正常水平,满足作物生长发育对养分的需求,同时在 1 个稻-麦轮作周期后,土壤有效养分(碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾)含量均高于供试土壤,具有明显提高土壤肥力的作用。与当地的推荐施肥比较,减氮减磷增钾条件下的有机肥部分替代化肥能显著提高或保持水稻和小麦地上部总生物量,为籽粒产量的形成奠定了物质基础。有机肥部分替代化肥处理(RF-OM 和 RF-S 处理)能显著提高水稻、小麦氮肥农学利用率、氮肥表现观回收率、氮肥偏生产力和氮素籽粒生产效率,土壤有效养分含量也高于推荐施肥,在适当减少氮磷施用量、增加钾肥用量的基础上商品有机肥或秸秆部分替代化肥是可行的,可为现代循环农业的发展提供相应的技术支撑。

参考文献:

- [1] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 156(4): 1-11.
- [2] 吴建富,曾研华,潘晓华,等.稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J].*应用生态学报*, 2013, 24(6): 1572-1578.
- [3] 马力,杨林章,沈明星,等.基于长期定位试验的典型稻麦轮作区作物产量稳定性研究[J].*农业工程学报*, 2011, 27(4): 117-124.
- [4] 聂佳如.有机肥与化肥配施对土壤养分的影响研究[J].*环境科学与管理*, 2016, 41(9): 52-55.
- [5] 祝英,王治业,彭铁楠,等.有机肥替代部分化肥对土壤肥力和微生物特征的影响[J].*土壤通报*, 2015, 46(5): 1161-1167.
- [6] 傅松,傅树斌,王丁祥,等.商品有机肥替代部分化肥对土壤养分和马铃薯产量的影响[J].*福建农业科技*, 2019(12): 60-64.
- [7] 张娜.水稻商品有机肥替代化肥减量施肥技术研究[J].*现代农业科技*, 2020(7): 12, 14.
- [8] 高怡安,程万莉,张文明,等.有机肥替代部分化肥对甘肃省中部沿黄灌区马铃薯产量、土壤矿质氮水平及氮肥效率的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 2016, 51(2): 54-60, 68.
- [9] 李顺,李廷亮,何冰,等.有机肥替代化肥对旱地小麦水氮利用及经济效益的影响[J].*山西农业科学*, 2019, 47(8): 1359-1365.
- [10] 陈琨,喻华,上官宇先,等.有机无机肥配施对冬水田水稻产量和耕层土壤性质的影响[J].*中国稻米*, 2020, 26(2): 32-35, 40.
- [11] 侯红乾,黄永兰,冀建华,等.缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J].*中国水稻科学*, 2016, 30(4): 389-396.
- [12] 鲁如坤.植物营养与施肥原理[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [13] 王忍,黄璜,伍佳,等.稻草还田对土壤养分及水稻生物量和产量的影响[J].*作物研究*, 2020, 34(1): 8-15.
- [14] 沙之敏,陈侠桦,赵峥,等.施肥方式对水稻‘花优 14’干物质积累、产量及肥料利用率的影响[J].*中国生态农业学报*, 2018, 26(6): 815-823.
- [15] 杨修一,耿计彪,于起庆,等.有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(5): 230-236.
- [16] 杜加银,茹美,倪吾钟.减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 523-533.
- [17] 刘红江,蒋华伟,孙国峰,等.有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2017(5): 61-66.

