

稻麦轮作减量施肥技术研究

熊又升¹, 熊汉锋^{2*}, 郭衍龙³, 王海生⁴, 刘威¹, 严与向³, 谢媛园¹, 周剑雄¹, 杨立军¹

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 鄂州职业大学, 湖北 鄂州 436000;
3. 鄂州市农业科学研究所, 湖北 鄂州 436000; 4. 武汉市农业检测中心, 湖北 武汉 430012)

摘要:为实现化肥高效施用和零增长目标, 采用稻麦轮作大田定位试验, 探讨不同减量施肥模式对稻麦轮作体系作物产量及养分利用效率的影响。试验设置不施肥(T1)、常规施肥(T2)以及等养分条件下有机肥与化肥配施(T3)、T3减20%化肥氮增施氮肥增效剂(T4)、T3减20%化肥磷增施磷素活化剂(T5)以及T3减20%化肥氮磷增施氮肥增效剂+磷素活化剂(T6), 共6个处理。结果表明:与常规施肥(T2)相比, 各减量施肥处理对稻麦体系作物周年产量影响不显著;T4处理有利于提高氮素和钾素的偏生产力、农学利用率, 提高氮素和磷素吸收效率, 提高作物磷素总吸收量;T5处理可以明显提高作物磷素总吸收量、磷素利用效率、磷素偏生产力、磷素的农学利用率, 提高作物钾素农学利用率和钾素的偏生产力;T6处理可以明显提高作物的氮磷钾的利用效率和农学利用率, 提高氮素和钾素的偏生产力;T3处理对作物氮磷素的吸收与利用均无显著影响, 显著提高了作物钾素的偏生产力。综合结果表明, 有机肥与化肥配施基础上减少20%化肥氮磷增施氮肥增效剂+增施磷素活化剂(T6)模式有利于协调作物养分吸收和稳定作物产量, 可作为长江中下游相似生态区域稻麦轮作种植减肥增效的优选模式。

关键词:产量; 养分利用效率; 稻麦轮作; 减量施肥

从2004—2017年, 我国粮食生产实现了“十四连增”, 化肥施用量逐年增高是粮食连续增产的主要因子, 特别是大幅度增加氮肥的用量。化肥过量施用导致肥料利用率偏低^[1-2], 不仅造成巨大的经济损失, 还造成了环境污染, 危害农产品品质安全^[3-4], 不利于农业绿色发展^[5]。因此大力推进化肥减量提效, 积极探索产出高效、资源节约、环境友好的现代农业发展之路, 是推进农业绿色发展的重要措施。目前有研究针对减少肥料投入, 保证作物产量的养分管理技术做了探索^[6-8]。稻麦轮作是长中下游地区粮食作物的主要种植制度。稻麦轮作面临的主要问题是肥料用量大、养分利用效率(简称养分利用率)低。因此, 研究减量施肥对稻麦轮作制中作物产量和养分利用率的影响对于提高农田生产力、保护生态环境等方面具有重要意义。

近年有大量关于减量施肥研究报道。蒋鹏

等^[9]发现减少施氮量, 水稻的产量并未出现显著下降; 氮肥农学利用率、偏生产力、吸收利用率有所增加。秦雪超等^[10]发现化肥减量替代不会降低华北平原小麦-玉米轮作产量。近年有些稻麦轮作减量施肥研究^[11-12]。程秀洲等^[13]发现减施氮肥5%能提高小麦植株内全磷和全钾含量及作物产量。近年有肥料增效剂在玉米^[14]、棉花^[15]、水稻^[16]以及蔬菜类^[17-18]作物上应用的报道。研究表明, 施用肥料增效剂可以减少肥料用量, 简化施肥方式, 降低施肥成本, 减轻化肥污染, 保护环境^[19-20]。目前减量施肥研究集中在单季或双季作物氮肥减施和有机肥替代, 多季作物定位试验和对周年累积养分利用率的研究少有报道, 而且受气候条件和土壤肥力等因素的影响, 减量施肥效果可能存在着很大的区域性差异。为探究不同减量施肥模式在稻麦轮作制生产中的效果, 本研究在湖北省鄂州市开展3年稻麦轮作减量施肥田间定位试验, 研究不同减量施肥模式(包括有机肥替代化肥以及配合施用氮肥增效剂、磷素活化剂等措施)对作物产量及氮磷钾养分吸收利用的影响, 以期对湖北稻麦轮作区的高产、低耗、增效提供技术依据。

收稿日期: 2022-03-11; 录用日期: 2022-05-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200506)。

作者简介: 熊又升(1963-), 研究员, 博士, 主要从事土壤改良、作物养分协同技术和新肥料等研究。E-mail: yshxiong@126.com。

通讯作者: 熊汉锋, E-mail: xhfeng987@163.com。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及供试材料

试验于 2017 年 11 月—2020 年 10 月在湖北省鄂州市路口农场进行, 该区域属亚热带季风性气候, 年均气温 17℃, 年均日照时数 2003.7 h, 年均降水量 1282.8 mm, 无霜期 273 d。供试土壤为湖积物母质发育的潮土, 土壤质地为壤土。土壤基本理化性状为: pH 5.76, 有机质 10.06 g/kg, 全氮 0.90 g/kg, 全磷 0.70 g/kg, 全钾 17.47 g/kg, 碱解氮 70.86 mg/kg, 有效磷 4.35 mg/kg, 速效钾 55.6 mg/kg。

供试肥料: 尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P_2O_5 12%)、氯化钾 (K_2O 60%), 供试有机肥含氮 (N) 1.08%、磷 (P_2O_5) 0.30%、钾 (K_2O) 4.20%。供试小麦品种为郑麦 9023, 水稻品种为雍丰香

1 号。

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理: ①不施肥对照 (T1); ②当地常规施肥 (T2); ③有机肥与化肥配施 (T3); ④在有机肥与化肥配施的基础上减化肥氮 20%+ 氮肥增效剂 (T4); ⑤在有机肥与化肥配施的基础上减化肥磷 20%+ 磷素活化剂 (T5); ⑥在有机肥与化肥配施的基础上减化肥氮 20%、磷 20%+ 氮肥增效剂+ 磷素活化剂 (T6)。小麦常规施肥的氮、磷、钾用量分别为 180、105、120 kg/hm², 其中氮肥按基追比 7:3 分次施用, 磷、钾肥做基肥一次性施入。水稻常规施肥的氮、磷、钾用量分别为 210、105、135 kg/hm², 其中氮肥按基追比 6:2:2 分次施用。不同施肥模式下的详细施肥情况见表 1。

表 1 稻麦轮作试验施肥情况

(kg/hm²)

处理	化肥			有机肥	氮肥增效剂	磷素活化剂
	N	P_2O_5	K_2O			
	小麦-水稻	小麦-水稻	小麦-水稻			
T1	0-0	0-0	0-0	0	0	0
T2	180-210	105-105	120-135	0	0	0
T3	180-210	105-105	120-135	1500	0	0
T4	144-168	105-105	120-135	1500	1.67	0
T5	180-210	84-84	120-135	1500	0	225
T6	144-168	84-84	120-135	1500	1.67	225

供试氮肥增效剂和磷素活化剂为沈阳中科新型肥料有限公司生产。氮肥增效剂为脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺 (0.04%) 和硝化抑制剂双氰胺 (19%); 磷素活化剂为植酸酶 A 酶 (3000 活苗单位/g)。

每个处理设 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积 30 m²。小区间筑土埂, 高约 30 cm, 宽 20 cm。小麦分别于 2017 年 11 月 4 日、2018 年 10 月 26 日、2019 年 10 月 24 日播种, 2018 年 5 月 19 日、2019 年 5 月 21 日、2020 年 5 月 19 日收获。小麦播种量为 150 kg/hm²。水稻分别于 2018 年 4 月 14 日、2019 年 4 月 14 日、2020 年 4 月 13 日播种, 2018 年 9 月 25 日、2019 年 9 月 25 日、2020 年 9 月 27 日收获。水稻播种量为 150 kg/hm²。田间其他管理同当地常规。

1.3 样品采集与分析

每个小区单打单收, 田间直接测定产量, 取 1 kg 样品, 烘干后计算含水量, 再通过含水量折算

出小区实际产量。籽粒和秸秆样品装袋, 放入烘箱中于 80℃烘干至恒重, 称干重, 粉碎过筛后采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 采用流动注射分析仪测定氮和磷含量, 火焰光度计测定钾含量^[21]。

1.4 计算公式

养分相关指标计算方法^[22]如下:

植株养分总吸收量 (kg/hm²) = 植株各器官干重之和 × 养分含量;

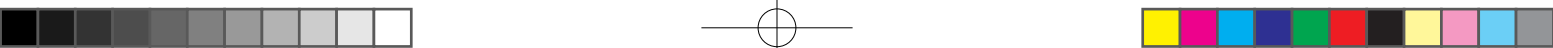
养分偏生产力 (kg/kg) = 施养分作物产量 / 养分施用量;

养分利用效率 (kg/kg) = 籽粒产量 / 植株养分总吸收量;

养分农学利用率 (%) = (施养分区作物产量 - 不施养分区产量) / 养分施用量 × 100。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 对试验数据进行计算和处理,



用 SAS 8.1 进行统计分析, 用 LSD 法检验处理间 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同减量施肥模式对作物产量的影响

由表 2 可知, 3 年中与 T1 处理相比, 施肥 (T2、T3、T4、T5、T6) 处理作物产量均显著增加, 但各施肥处理间无显著差异。2017—2018 周年

是常规施肥处理产量最高, 各减量施肥处理产量均略低于常规施肥 T2 处理, 但无显著差异, 各减量施肥处理 (T4、T5、T6) 间差异也不明显。2018—2019 周年是 T6 处理产量最高, 各减量施肥处理 (T4、T5、T6) 产量高于 T2 处理。2019—2020 周年是 T2 处理产量最高, 各减量施肥处理产量均略低于常规施肥处理, 但差异不明显, 各减量施肥处理 (T4、T5、T6) 间产量也无显著差异。

表 2 稻麦轮作条件下不同处理对作物产量的影响 (kg/hm²)

处理	2018 年			2019 年			2020 年		
	小麦	水稻	周年	小麦	水稻	周年	小麦	水稻	周年
T1	3095a	3819.2a	6914.2a	1418a	817.6a	2235.6a	1226a	1447.4a	2673.4a
T2	5337b	6684.7b	12021.7b	2352b	3099.3b	5451.3b	2931b	3226.6b	6157.6b
T3	4633b	6319.2b	10952.2b	1826b	3128.2b	4954.2b	2541b	2892.6b	5433.6b
T4	5074b	6559.3b	11633.3b	2746b	2846.4b	5592.4b	2994b	2522.4b	5516.4b
T5	4589b	6201.8b	10790.8b	2564b	3000.4b	5564.4b	3033b	2819.2b	5852.2b
T6	4856b	6081.7b	10937.7b	2701b	3290.0b	5991.0b	2951b	2541.3b	5492.3b

注: 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 不同减量施肥模式对作物氮素吸收与利用的影响

由表 3 可知, 2017—2018 周年 T2 处理的地上部氮素总吸收量高于其他处理, 而 T4 处理的氮素总吸收量高于 T3、T5、T6 处理, 各减肥处理间的地上部氮素总吸收量没有显著差异。T5 处理的氮素总吸收量在 2018—2019 周年和 2019—2020 周年是最高, 较 T2 处理分别提高了 9.57% 和 0.51%。3 周年 T4 和 T6 处理的氮素利用率、氮素偏生产力

和农学利用率都高于 T2 处理。其中 2017—2018 周年 T4 与 T2 处理间的氮素利用率和氮素偏生产力差异显著。T5 处理的氮素利用率在 2018—2019 周年和 2019—2020 周年高于 T2 处理, T5 的处理氮素偏生产力和农学利用率在 2018—2019 周年高于 T2 处理。但是 T3 处理的氮素总吸收量、农学利用率、氮素利用率和氮素偏生产力均低于 T2 处理, 但两者间无显著差异。上述结果说明, T4 和 T6 处理有利于增强作物对氮素的吸收能力, 提高氮素吸收效率, 增强氮素的利用效率; T3 处理对作物氮素的吸收与利用均无显著影响。

表 3 稻麦轮作条件下不同处理对作物氮素的吸收与利用的影响

处理	养分总吸收量 (kg/hm ²)			养分利用率 (kg/kg)			养分偏生产力 (kg/kg)			养分农学利用率 (%)		
	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年
T1	128.5a	46.9a	54.6a									
T2	319.9b	180.8b	176.7c	45.59ab	31.88a	29.08a	28.62ab	12.98a	14.66a	12.16a	7.65ab	8.30a
T3	274.9b	161.7b	150.1bc	34.87a	27.34a	22.75a	26.08a	11.80a	12.94a	9.61a	6.47a	6.57a
T4	311.9b	155.6b	134.5b	54.59b	32.34a	23.80a	34.62c	16.64b	16.42a	14.04a	9.99ab	8.46a
T5	286.0b	198.1b	177.6c	37.52a	35.99b	29.28a	25.69a	13.25a	13.93a	9.23a	7.93ab	7.57a
T6	262.0b	182.8b	153.6bc	39.74a	40.45b	29.48a	32.55bc	17.83b	16.35a	11.97a	11.18b	8.39a

2.3 不同减量施肥模式对作物磷素吸收与利用的影响

由表 4 可知, 与 T1 处理相比, 施肥处理 (T2、T3、T4、T5、T6) 均显著增加了作物地上部磷素

总吸收量。2017—2018 周年 2018—2019 周年 T4、T5、T6 处理的作物地上部磷素总吸收量高于常规施肥 T2 处理。2019—2020 周年各减量施肥处理 (T4、T5、T6) 的作物地上部磷素总吸收量低于常

规施肥 T2 处理。2018—2019 周年 T4、T5、T6 处理的作物地上部磷素利用率和农学利用率高于常规施肥 T2 处理。2017—2018 周年各减量施肥处理 (T4、T5、T6) 的磷素利用率和农学利用率高于常规施肥 T2 处理。2019 年 T6 处理的磷素利用率也显著高于 T2 处理。施肥处理间的作物利用率没有显著差异。2019—2020 周年 T4、T5、T6 处理磷素偏生产力低于 T2 处理, 2017—2018 周年 T5 处理

磷素偏生产力也低于 T2 处理。但是 T3 处理的磷素总吸收量、农学利用率、磷素利用率和磷素偏生产力均低于 T2 处理, 但两者间无显著差异。上述结果说明, T4、T5、T6 处理可以明显提高作物磷素总吸收量、磷素利用率、磷素的偏生产力和农学利用率, 而 T3 处理对作物磷素的偏生产力、利用率、农学利用率均无显著影响。

表 4 稻麦轮作条件下不同处理对作物磷素的吸收与利用的影响

处理	养分总吸收量 (g/hm ²)			养分利用率 (kg/kg)			养分偏生产力 (kg/kg)			养分农学利用率 (%)		
	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年
T1	23.0a	10.7a	12.6a									
T2	40.3b	27.0b	30.8b	8.23a	7.76a	8.70a	57.25a	25.96a	29.32a	24.32a	15.31ab	16.59a
T3	39.0b	26.8b	26.2b	7.61a	7.67a	6.49a	52.15a	23.59a	25.87a	19.23a	12.94a	13.14a
T4	47.0b	30.1b	26.0b	11.40a	9.24a	6.40a	55.39a	26.63a	26.27a	22.47a	15.98ab	13.54a
T5	44.7b	31.0b	28.7b	12.89a	12.08a	9.58a	51.38a	26.50a	27.87a	23.07a	19.81ab	18.92a
T6	41.3b	32.9b	26.6b	10.88a	13.22a	8.36a	52.08a	28.53a	26.15a	23.95a	22.35b	16.78a

2.4 不同减量施肥模式对作物钾素吸收与利用的影响

由表 5 可知, 各施肥处理作物的地上部钾素总吸收量显著高于 T1 处理, 2018—2019 和 2019—2020 周年 T5 处理钾素总吸收量高于 T2 处理。2018—2019 和 2019—2020 周年 T5、T6 处理钾素利用率高于 T2 处理。3 年中 T6 处理的钾素利用率高于 T2 处理。2019—2020 周年 T4 处理的钾素利用率高于 T2 处理, 而 2017—2018 和 2018—2019 周年 T4 处理的钾素利用率低于 T2 处理, 但

差异不明显。3 个周年各减量施肥 (T4、T5、T6) 处理钾素的偏生产力高于 T2 处理。2018—2019 周年 T4、T5、T6 处理钾素农学利用率高于 T2 处理。3 个周年 T3 处理钾素农学利用率低于 T2 处理, 但差异不显著。上述结果说明, T4、T5、T6 处理可以提高作物钾素总吸收量、钾素利用率、钾素的偏生产力和农学利用率, T3 处理可以提高作物钾素的偏生产力, 而对作物钾素利用率、农学利用率无显著影响。

表 5 稻麦轮作条件下不同处理对作物钾素的吸收与利用的影响

处理	养分吸收量 (kg/hm ²)			养分利用率 (kg/kg)			养分偏生产力 (kg/kg)			养分农学利用率 (%)		
	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年
T1	229.2a	66.4a	70.8a									
T2	389.7bc	223.8b	199.6b	59.42ab	58.27a	37.72a	25.61a	8.28a	9.90a	18.92a	11.91a	12.90a
T3	439.3bc	206.3b	170.0b	77.81b	51.80a	36.75a	44.52b	20.19b	22.81b	14.96a	10.07a	10.22a
T4	349.9b	203.0b	178.8b	44.69a	50.57a	40.01a	40.56b	18.35b	20.12b	17.48a	12.43a	10.53a
T5	378.8b	239.3b	205.6b	55.41ab	64.01a	49.94a	43.08b	20.71b	20.43b	14.36a	12.33a	11.78a
T6	333.2b	226.1b	179.8b	38.52a	59.12a	40.39a	39.97b	20.61b	21.68b	14.90a	13.91a	10.44a

3 讨论

从本研究产量结果来看, 第 1 年和第 3 年作物各减量施肥处理产量均略低于常规施肥处理, 差异

不显著。第 2 年配合增效剂的减量施肥处理产量均略高于常规施肥处理, 差异也不明显。有机肥替代处理产量均略低于常规施肥处理, 差异不显著。这与钟国荣^[11]、易琼等^[12]的研究结果相似, 也与



本课题组前期的研究结果是一致的^[22]。其原因可能是增施肥料增效剂和有机-无机肥配施能提高肥料利用率,促进作物生长,进而保证了产量。

养分吸收及其利用是作物产量形成的重要基础,施肥可以不同程度地影响植株养分吸收及其利用。本研究结果表明,配合氮增效剂的减量施肥处理有利于增强作物对氮素的吸收能力,提高氮素吸收效率,增强氮素的利用效率。田秀英等^[23]研究发现,尿素全量配施氮肥增效剂能显著提高氮素的农学利用率、生理效率和氮素利用率。易琼等^[12]研究表明,减氮 20% ~ 30% 处理提高了氮肥当季利用率、氮素农学利用率和氮肥偏生产力。钟国荣^[11]研究表明优化减量施肥可提高水稻和小麦的氮肥吸收利用率。陈志龙等^[24]研究表明有机肥替代氮肥处理可提高氮肥利用率和氮肥农学利用率。其原因可能是氮肥增效剂能够延缓氮硝化,有很好的硝化抑制作用,使土壤中硝态氮含量维持在较低水平,还能够增加土壤无机氮含量,能在氮肥施入后较长时间内维持较高的可利用氮的供应强度^[19]。同时,增施肥料增效剂能提高肥料利用率,肥料增效剂与有机肥中含有的腐殖酸、有机酸等结合,能综合吸附肥料中的养分,起到控释和缓释的作用。

磷在植物体中的含量仅次于氮和钾,植物对磷的吸收和利用受各种因素影响。本研究结果表明,配合磷增效剂的减量施肥处理可以明显提高作物磷素总吸收量、磷素利用效率、磷素的偏生产力和农学利用率。这与本课题组前期的研究结果是一致的^[22]。有研究认为皓达肥料增效剂可促进萝卜和大白菜吸收养分,提高萝卜和大白菜氮磷钾养分效力系数^[25-26]。赵亚南等^[8]研究表明小麦-玉米轮作减量施肥后,磷肥偏生产力、农学利用率和表观回收率提高。程秀洲^[13]研究表明减施氮肥 5% 能提高小麦植株内全磷含量。其原因可能是增效剂有刺激作物生长和促进养分吸收的效果,又能维持磷在土壤中的活性,有利于作物根系吸收,从而提高肥料利用率。

作物对钾肥的需求量比较高,其吸收利用也受施肥的影响^[27]。本研究结果表明,配合增效剂的减量施肥处理可以明显提高钾素总吸收量、钾素农学利用率、钾素的偏生产力。有机肥替代可以提高作物钾素的偏生产力,这与杨勇等^[28]在水稻上的应用效果相似,也与本课题组前期的研究结果是一

致的^[24]。程秀洲等^[13]研究表明稻-麦轮作体系减施氮肥 5% 能提高小麦植株内全钾含量。范立春等^[18]研究表明肥料增效剂可提高马铃薯的钾肥利用率。许猛等^[15]研究表明增效剂可以促进棉株地上部氮、磷、钾养分的积累。这可能是增效剂和有机-无机肥配施可以促进作物对化肥中养分的利用,同时协同作用导致磷、钾肥利用率有所提高。

4 结论

在稻麦轮作生产系统中,不同减量施肥模式对作物产量没有明显影响。总体上来看,肥料增效剂有一定的效果,肥料用量减少 20% 以后,作物产量降低也不显著。配合增效剂的减量施肥处理可增强作物对氮磷钾素的吸收,提高氮磷钾的利用效率。有机肥替代可以提高作物钾素的偏生产力。因此,在稻麦轮作生产系统中,结合增效剂的施用,可以减少 20% 的化肥用量,这样可以保证作物产量,节约肥料成本,从而获得较高的经济效益并降低过量化肥施用带来的环境风险。

参考文献:

- [1] 王激清. 我国主要粮食作物施肥增产效应和养分的分析与评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [2] 闫湘, 金继运, 何萍. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (2): 450-459.
- [3] 史常亮, 郭崧, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究 [J]. 农业现代化研究, 2016, 37 (4): 671-679.
- [4] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (5): 1158-1165.
- [5] 汪玉, 赵旭, 王磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (5): 829-835.
- [6] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究 [J]. 土壤, 2009, 41 (3): 372-376.
- [7] 吴光磊. 麦季氮肥运筹调控冬小麦-夏玉米两作体系氮素利用及氮肥残效研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [8] 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.
- [9] 蒋鹏, 徐富贤, 熊洪, 等. 测苗定氮综合氮素管理提高直播稻产量和肥料利用效率 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (1): 107-119.
- [10] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (7): 1558-1567.

- [11] 钟国荣. 施肥模式对苏南地区稻麦轮作制度下土地生产力的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [12] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1069-1077.
- [13] 程秀洲, 胡林彬, 邢潇晨. 豫南地区高肥力地块稻-麦轮作定位减量施肥试验研究 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (36): 99-109.
- [14] 王士坤, 唐振海, 董彦琪, 等. 肥料增效剂与氮肥配施对夏玉米生长发育和产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2015, 44 (12): 53-56.
- [15] 许猛, 袁亮, 李伟, 等. 复合氨基酸肥料增效剂对新疆棉花生长、产量和养分利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (4): 87-92.
- [16] 王薇, 张耀玲, 郝兴顺, 等. 不同增效剂与氮肥减量配施在水稻上的应用效果 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48 (5): 84-87.
- [17] 耿川雄, 鲁耀, 周敏, 等. 不同肥料增效剂对甘蓝产量及养分吸收利用率的影响 [J]. 贵州农业科学, 2022, 50 (1): 63-68.
- [18] 范立春, 孙磊, 王丽华, 等. 不同施肥量配合纳米碳肥料增效剂对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 208-212.
- [19] 何威明, 保万魁, 王旭. 氮肥增效剂及其效果评价的研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (3): 1-7.
- [20] 徐星凯, 周礼恺, Van Cleemput O. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化以及形态分布的影响 [J]. 土壤学报, 2000, 37 (3): 339-345.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 刘威, 熊又升, 徐祥玉, 等. 减量施肥模式对稻麦轮作体系作物产量和养分利用效率的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20 (5): 91-99.
- [23] 田秀英, 王正银. 尿素与复合氮肥增效剂配施对水稻氮素利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 120-123.
- [24] 陈志龙, 陈杰, 许建平, 等. 有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用率的影响 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41 (7): 55-57.
- [25] 蔡力, 王文伟, 战帅, 等. 氮磷钾肥与皓达肥料增效剂配施对萝卜产量与氮磷钾吸收量的影响 [J]. 上海蔬菜, 2018 (4): 58-61.
- [26] 战帅, 王文伟, 王运华, 等. 氮磷钾肥与皓达肥料增效剂配施对大白菜产量及氮磷钾吸收量的影响 [J]. 上海蔬菜, 2017 (5): 55-58.
- [27] Liu M, Yu Z, Liu Y, et al. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74 (3): 245-258.
- [28] 杨勇, 蒋宏芳, 荣湘民, 等. 不同肥料增效剂在水稻上的应用效果研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2015 (5): 83-87.

Study on reduction fertilization technology of rice-wheat cropping system

XIONG You-sheng¹, XIONG Han-feng^{2*}, GUO Yan-long³, WANG Hai-sheng⁴, LIU Wei¹, YAN Yu-xiang³, XIE Yuan-yuan¹, ZHOU Jian-xiong¹, YANG Li-jun¹ (1. Plant Protection and Soil Fertilizer Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei 430064; 2. Ezhou Vocational University, Ezhou Hubei 436000; 3. Agricultural Sciences Institute of Ezhou City, Ezhou Hubei 436000; 4. Wuhan Agricultural Testing Center, Wuhan Hubei 430012)

Abstract: In order to explore the effects of different reducing fertilizer application modes on yield, nutrient use efficiency in rice-wheat cropping system to provide theoretical basis for achieving efficient application of chemical fertilizer and its zero increase in China, this paper carried out a 3-year field positioning experiment of rice-wheat cropping system. The experiment set 6 treatments, including no fertilizer (T1), conventional chemical fertilization (T2), combined application of organic manure and chemical fertilizer (T3), reducing 20% chemical nitrogen fertilizer plus increasing nitrogen fertilizer synergist application (T4), reducing 20% chemical phosphorus fertilizer along with phosphorus activator application (T5), and reducing 20% chemical nitrogen fertilizer and 20% chemical phosphorus fertilizer along with nitrogen fertilizer synergist plus phosphorus activator application (T6). The results showed that compared with T2, the effect of fertilizer reduction on rice-wheat yield was not significant. T4 treatment improved the partial productivity and the agronomic use efficiency of nitrogen and potassium, the absorption efficiency of nitrogen and phosphorus, and the total uptake of phosphorus. T5 treatment significantly increased the total phosphorus uptake, phosphorus use efficiency, partial productivity of phosphorus, agronomic use efficiency of phosphorus, and agronomic use efficiency and the partial productivity of potassium in crops. T6 treatment significantly improved the nitrogen, phosphorus and potassium use efficiency and agronomic use efficiency of crops, and improved the partial productivity of nitrogen and potassium. T3 treatment had no significant effect on the uptake and utilization of nitrogen and phosphorus, but significantly increased the partial productivity of potassium in wheat and rice. In conclusion, the T6 treatment was beneficial to coordinate nutrient uptake and stabilize wheat and rice yield. It could be a preference pattern for reducing fertilizer application and increasing efficiency in rice-wheat cropping system at the middle and lower reaches of the Yangtze River and other regions with similar ecological conditions.

Key words: yield; nutrient use efficiency; rice-wheat cropping system; reduced fertilizer application