

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.18372

养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响

刘东海^{1, 2, 3}, 陈云峰^{1, 2, 3}, 李双来^{1, 2, 3}, 乔艳^{1, 2, 3}, 张智¹, 胡诚^{1, 2, 3*}

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 湖北 武汉 430064; 3. 农业农村部武汉黄棕壤生态环境重点野外科学观测试验站, 湖北 武汉 430064)

摘要: 为评价中稻养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 推荐施肥对中稻产量效应、养分利用率的影响, 于 2013 ~ 2017 年期间在湖北省开展了 42 个试验, 并对结果进行了分析。广水市推荐施肥 NE 比习惯施肥 FP 施氮肥低 18.0%, 磷肥高 23.9% 和钾肥高 8.9% 情况下, 中稻增产 1.4%, 差异不显著。赤壁市推荐施肥 NE 比习惯施肥 FP 施氮、磷和钾肥分别减少 8.8%、32.9% 和 44.1% 的情况下, 中稻增产 6.9%, 差异不显著。中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为 12.5、9.5 和 1.3 kg/kg, 中稻氮、磷和钾肥平均当季利用率分别为 39.8%、6.5% 和 27.9%。水稻养分专家系统推荐施肥促进了水稻对氮磷钾养分的吸收和利用, 达到增产增收效果, 氮肥利用效率也高于全国平均水平, 可在中稻种植区推广应用。

关键词: 养分专家系统 (NE); 中稻; 产量; 养分利用率; 湖北省

水稻是我国种植面积最大, 产量最高, 氮肥用量最多的粮食作物之一, 而湖北省是我国水稻大省之一, 水稻播种面积占粮食作物总播种面积的 50% 左右, 稻谷产量占粮食总产 70% 左右^[1]。在水稻生产上由于施氮量过高, 养分管理不当, 农民施肥方式粗放, 造成了肥料利用效率低, 肥料流失和浪费以及农业的面源污染问题, 给环境带来危害^[2-3]。目前测土配方施肥是常用的施肥方法^[4-5], 但是需要分析化验各种土壤养分指标, 费时费力。近年来, 一种基于作物产量反应和农学效率的农田养分专家系统 (Nutrient Expert, 以下简称 NE), 结合目标产量、土壤性质、气候条件及养分管理措施等作物生产相关信息, 在没有土壤测试值情况下, 利用 QUEFTS (quantitative evaluation of the fertility of tropicals oils) 模型, 针对农田快速生成个性化的施肥方案^[6], 已经在小麦^[7-8]、玉米^[9-11]、水稻^[12]等多种作物上开展了农田养分推荐。本研究从 2013

年开始在湖北进行了多年多点的田间试验对水稻养分专家系统进行验证和改进, 旨在土壤测试不及时或条件不具备情况下建立一种简便, 适用于我国小农户为经营主体的中稻推荐施肥和养分管理方法。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验自 2013 年 5 月水稻种植季始, 连续 5 年在中稻上试验。试验地点位于湖北省广水市和赤壁市。广水市供试土壤类型为黄棕壤, 赤壁市供试土壤类型为红壤, 均是一季中稻, 秸秆不还田。2013 年广水市和赤壁市分别布置 4 户农田; 2014 年广水市和赤壁市分别布置 5 和 4 户农田; 2015 和 2016 年广水市和赤壁市分别均布置 5 户农田; 2017 年赤壁布置 5 户农田。

1.2 试验区土壤基本理化性状

中稻试验前取 0 ~ 20 cm 耕层土壤, 常规法进行理化性状分析, 结果见表 1。

1.3 试验设计与方法

每季作物试验以农户为重复, 每户设置 6 个处理, 每个处理 30 m²。处理包括: 1) NE: 水稻养分专家系统推荐施肥; 2) NE-N: 不施氮肥, 磷钾肥用量同 NE 处理; 3) NE-P: 不施磷肥, 氮钾肥用量同 NE 处理; 4) NE-K: 不施钾肥, 氮磷肥用

收稿日期: 2018-09-10; 录用日期: 2018-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目“肥料养分推荐方法与限量标准”(2016YFD0200100)。

作者简介: 刘东海 (1984-), 男, 河北邯郸人, 助理研究员, 硕士, 主要从事植物营养、土壤肥料方面研究工作。E-mail: liudonghai111@126.com。

通讯作者: 胡诚, E-mail: huchenghz@163.com。

量同 NE 处理；5) OPTS：当地农技推广部门推荐施肥处理；6) FP：农民习惯施肥；施肥量见表 2。2013 到 2017 年共 42 户农田进行田间试验。试验前进行农户施肥情况调查，运行养分专家施肥推荐系统将各个农户的施肥情况、产量信息及相关生产条件进行分析，提出当地中稻推荐施肥用量。试验用氮肥为尿素（N 46.0%），磷肥为过磷酸钙（P₂O₅ 16%），钾肥为氯化钾（K₂O 60%）。

表 1 试验区域土壤农化性质（样本数 n=42）

试验区	特征值	有机质 (g/kg)	pH 值	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
广水	最小值	4.02	5.49	3.76	0.38	14.11	3.59	62.93
	最大值	24.49	7.27	15.46	4.37	31.60	25.18	213.10
	平均值	14.94	6.48	10.00	2.50	19.58	13.06	138.74
	变异系数 (%)	34.40	7.85	37.37	48.79	27.12	47.62	36.07
赤壁	最小值	15.67	5.16	8.18	0.73	14.45	4.60	61.56
	最大值	40.93	8.28	27.73	6.52	19.31	21.36	249.31
	平均值	28.63	6.10	16.28	3.00	17.01	10.72	153.44
	变异系数 (%)	35.14	13.54	44.81	51.14	7.13	36.21	28.53

表 2 不同处理施肥量 (kg/hm²)

处理号	广水			赤壁		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NE	153.9 ± 1.7	68.9 ± 2.5	85.5 ± 8.6	147.6 ± 3.9	63.3 ± 2.4	60.4 ± 4.1
FP	187.6 ± 4.0	55.6 ± 2.56	78.5 ± 8.9	161.9 ± 4.3	94.3 ± 6.9	108.0 ± 3.0
OPTS	165.8 ± 2.6	60.0 ± 1.1	97.4 ± 3.9	173.3 ± 4.0	60.4 ± 1.0	88.7 ± 0.9

所有处理的耕作、除草、病虫害防治等均按常规管理方式进行。广水市供试水稻杂交品种为两优 766、Y 两优 1998、Ⅱ 优 1128、Ⅱ 优 188、Ⅱ 优 476、岗优 188 和苯两优 9 号。广水市种植密度 23.1 万穴/hm²。磷、钾肥在播种前作基肥一次性撒施。基蘖穗肥比例为 40:30:30。赤壁市供试水稻杂交品种为岗优 1577、明优 98、苯两优 9 号和晶两优 534。赤壁市种植密度 28.0 万穴/hm²。磷、钾肥在播种前作基肥一次性撒施。基蘖穗肥比例为 40:30:30。水稻均在 5 月 25 日左右插秧，9 月 24 日左右收获，小区全部收获进行测产。

1.4 有关指标计算

养分积累量 (kg/hm²) = [非收获物干重 (kg/hm²) × 非收获物养分含量 (g/kg) + 籽粒干重 (kg/hm²) × 籽粒养分含量 (g/kg)] / 1 000

肥料利用率 (%) = (施肥区养分积累量 - 减素处理区养分积累量) / 施肥量 × 100

肥料农学效率 (kg/kg) = (施肥区籽粒产量 - 减素处理区籽粒产量) / 施肥量

施肥收益 (元/hm²) = 作物籽粒产量 × 籽粒

价格 - 化肥成本

施肥产投比 = 施肥收益 / 化肥投入

试验数据采用 SPSS 20 和 Excel 2007 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 推荐施肥对中稻产量的影响

从表 3 看出，在广水市和赤壁市 NE 处理中稻产量最高，分别是 8 100 和 7 425 kg/hm²，比 FP 和 OPTS 处理均增产，但差异不显著；其中 NE-N 处理中稻产量最低，只有 6 019 和 5 754 kg/hm²。施氮分别增产 34.6% 和 29.0%，施磷肥分别增产 15.4% 和 2.8%，施钾肥分别增产 1.7% 和 0.7%。

2.2 推荐施肥对中稻经济效益的影响

从表 4 看出，NE-K 施肥收益最高，其次是 NE，NE-N 施肥收益最差。在广水市和赤壁市 NE 较 FP 分别增收 343 和 1 884 元/hm²，NE 较 OPTS 分别增收 947 和 585 元/hm²。在广水市 OPTS 比 FP 欠收 604 元/hm²，而在赤壁市则增收 1 299 元/hm²。基于养分专家系统推荐施肥，在广水市和赤壁市施

用氮肥纯收益分别是4 546和3 482元/hm²，施用磷肥纯收益分别是2 241和-29元/hm²，施用钾肥纯收益分别是-221和-292元/hm²，适量减少钾肥投入，更有利于增收。NE产投比比FP和OPTS高。因此养分专家系统推荐施肥（NE）有利于增产增收。

表 3 不同处理对中稻产量的影响

处理号	广水			赤壁		
	产量 (kg/hm ²)	与 FP 比 (%)	与 OPTS 比 (%)	产量(kg/hm ²)	与 FP 比 (%)	与 OPTS 比 (%)
NE	8 100 ± 330a	1.4	4.3	7 425 ± 225a	6.9	1.6
NE-N	6 019 ± 422c	-24.6	-22.5	5 754 ± 220b	-17.1	-21.3
NE-P	7 017 ± 434b	-12.1	-9.6	7 224 ± 205a	4.1	-1.2
NE-K	7 963 ± 364ab	-0.3	2.5	7 373 ± 171a	6.2	0.9
FP	7 985 ± 263ab	—	2.8	6 943 ± 200a	—	-5.0
OPTS	7 766 ± 321ab	-2.7	—	7 309 ± 155a	5.3	—

注：同列数据后小写字母不同表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。

表 4 中稻施肥的经济效益（元/hm²）

处理号	广水			赤壁		
	施肥 收益	肥料 投入	产投 比	施肥 收益	肥料 投入	产投 比
NE	19 054	2 006	9.5	17 517	1 788	9.8
NE-N	14 508	1 141	12.7	14 035	925	15.2
NE-P	16 813	1 431	11.8	17 546	1 236	14.2
NE-K	19 265	1 439	13.4	17 809	1 361	13.1
FP	18 711	2 050	9.1	15 633	2 419	6.5
OPTS	18 107	2 085	8.7	16 932	2 071	8.2

注：水稻价格2.6元/kg；N、P₂O₅和K₂O价格分别为5.65、8.33和6.67元/kg。

2.3 推荐施肥对中稻氮磷钾养分积累量的影响

在广水市和赤壁市NE较FP植株氮积累量分别增加了6.6%和14.1%，植株磷积累量分别增加了5.2%和17.9%，植株钾积累量分别增加了7.8%和0.9%；OPTS较FP植株氮积累量分别增加了3.3%和17.9%，植株磷积累量分别增加了8.2%和14.2%，植株钾积累量分别增加了2.1%和9.2%。NE与OPTS促进了中稻对氮、磷和钾素养分的吸收利用。

表 5 施肥对中稻养分积累量的影响（kg/hm²）

处理号	广水			赤壁		
	N	P	K	N	P	K
NE	160.4 ± 12.4a	34.3 ± 1.9a	224.0 ± 23.0a	179.8 ± 10.1a	36.6 ± 2.1a	288.0 ± 14.9a
NE-N	102.7 ± 10.2b	25.2 ± 2.1b	143.8 ± 14.9b	116.5 ± 8.1c	28.4 ± 1.8b	229.4 ± 13.2b
NE-P	134.2 ± 13.9ab	31.0 ± 3.1ab	176.3 ± 19.0ab	175.6 ± 10.6a	31.5 ± 1.9ab	283.2 ± 13.6a
NE-K	147.6 ± 11.9a	33.0 ± 2.3a	191.1 ± 18.3ab	192.7 ± 10.9a	36.1 ± 2.2ab	277.8 ± 14.3a
FP	150.4 ± 11.0a	32.7 ± 2.3a	207.8 ± 21.5a	157.6 ± 10.0b	31.0 ± 1.7b	285.6 ± 13.2a
OPTS	155.4 ± 13.9a	35.3 ± 3.0a	212.2 ± 22.0a	185.8 ± 10.2a	35.4 ± 1.7ab	311.9 ± 15.0a

2.4 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率

表6可见，广水市中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为13.6、15.7和1.6kg/kg，赤壁市中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为11.3、3.2和0.9kg/kg。广水市中稻氮、磷和钾肥平均当季利用率分别为36.7%、4.9%和38.7%，赤壁市中稻氮、

磷和钾肥平均当季利用率分别为42.8%、8.0%和17.0%。

2.5 推荐施肥对中稻氮、磷、钾素平衡的影响

基于中稻秸秆未还田情况下，计算肥料投入与植株携出养分平衡状况（表7）。广水市和赤壁市NE植株氮素平均携出量分别为160.4和179.8kg/hm²，

表6 肥料的农学效率和当季利用率

养分	广水		赤壁	
	农学效率 (kg/kg)	当季 利用率 (%)	农学效率 (kg/kg)	当季 利用率 (%)
N	13.6	36.7	11.3	42.8
P ₂ O ₅	15.7	4.9	3.2	8.0
K ₂ O	1.6	38.7	0.9	17.0

平均亏缺 7.4 和 31.8 kg/hm², 而 FP 平均携出量分别为 150.4 和 157.6 kg/hm², 平均盈余为 36.6 和 4.4 kg/hm², 而 OPTS 平均携出量分别为 155.4 和 185.8 kg/hm², 平均盈余为 10.6 和 -12.8 kg/hm²。广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株磷素平均携出量在 31.0 ~ 36.5 kg/hm², 盈余为 23.3 ~ 63.0 kg/hm², 广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株钾素平均携出量 207.9 ~ 311.9 kg/hm², 平均亏缺 115.2 ~ 222.9 kg/hm²。

表7 中稻氮、磷、钾素表现平衡

(kg/hm²)

地点	处理号	施肥量			养分移走量			养分盈余		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
广水	NE	153.9	68.9	85.5	160.4	34.4	224.0	-7.4	34.7	-139.0
	NE-N	0	68.9	85.5	102.7	25.2	143.8	-102.7	43.8	-58.8
	NE-P	153.9	0	85.5	134.2	31.0	176.3	18.8	-31.0	-91.3
	NE-K	153.9	68.9	0	147.6	33.0	191.1	5.4	36.0	-191.1
	FP	187.6	55.6	78.5	150.4	32.7	207.9	36.6	23.3	-128.9
	OPTS	165.8	60.0	97.4	155.4	35.4	212.2	10.6	24.7	-115.2
赤壁	NE	147.6	63.3	60.4	179.8	36.6	288.0	-31.8	26.5	-228.0
	NE-N	0	63.3	60.4	116.5	28.4	229.4	-116.5	34.6	-169.4
	NE-P	147.6	0	60.4	175.6	31.5	283.2	-27.6	-31.5	-223.2
	NE-K	147.6	63.3	0	192.7	36.1	277.8	-44.7	26.9	-277.8
	FP	161.9	94.3	108.0	157.6	31.0	285.6	4.4	63.0	-177.6
	OPTS	173.3	60.4	88.7	185.8	35.4	311.9	-12.8	24.6	-222.9

3 小结与讨论

当前, 高量化肥投入导致了较高土壤基础养分供应^[13], 并对环境安全构成了潜在威胁, 作物养分专家系统 (NE) 是基于作物产量反应和农学效率, 能够针对农田快速生成个性化的施肥方案。本试验表明, 广水市中稻养分专家系统推荐施肥 NE 比习惯施肥 FP 施氮肥低 18.0%, 磷肥高 23.9% 和钾肥高 8.9% 情况下, 中稻增产 1.4%, 差异不显著。赤壁市中稻养分专家系统推荐施肥 NE 比习惯施肥 FP 施氮、磷和钾肥分别低 8.8%、32.9% 和 44.1% 的情况下, 中稻增产 6.9%, 差异不显著。NE 虽然降低了氮肥用量, 由于相应增加了磷钾肥的施用量, 使农田养分供应更加均衡, 提高了作物产量, 实现了节肥增效^[12-14]。在广水市和赤壁市 NE 较 FP 分别增收 343 和 1 884 元/hm², 无显著差异。施用氮肥纯收益分别是 4 546 和 3 482 元/hm², 施用磷肥纯收益分别是 2 241 和 -29 元/hm², 施用钾肥纯收

益分别是 -221 和 -292 元/hm²。在广水市和赤壁市 NE 较 FP 植株氮积累量分别增加了 6.6% 和 14.1%, 植株磷积累量分别增加了 5.2% 和 17.9%, 植株钾积累量分别增加了 7.8% 和 0.9%; 基于中稻养分专家系统推荐施肥的中稻氮肥利用效率高于全国平均水平^[2], 磷肥和钾肥利用效率低于全国平均水平, 可能与试验地磷钾含量高有关。广水市和赤壁市 NE 植株氮素呈现亏缺, 而 FP 植株氮素呈现盈余。广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株磷素呈现盈余, 广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株钾素呈现亏缺, 因此秸秆还田对培肥地力有重要意义。

参考文献:

- [1] 游艾青, 陈亿毅. 湖北省水稻生产发展战略思考 [J]. 湖北农业科学, 2008, 47 (11): 1361-1364.
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.

- [3] 韩宝吉. 湖北省中稻最佳养分管理技术研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [4] 陈桂英. 建阳市水稻测土配方施肥研究与应用 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [5] 卜容燕, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 中稻氮磷钾肥的施肥效果及推荐用量 [J]. 中国农学通报, 2010, (14): 218-221.
- [6] 何萍, 金继运, Mirasol F P, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (2): 499-505.
- [7] 贾良良, 杨军芳, 孙彦铭, 等. 小麦养分专家系统推荐施肥对河北省冬小麦产量、养分效率和环境效应的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (5): 51-55.
- [8] 苏瑞光, 王宜伦, 刘举, 等. 养分专家系统推荐施肥对潮土冬小麦产量及养分吸收利用的影响 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34 (1): 120-125.
- [9] 王宜伦, 苏瑞光, 刘举, 等. 养分专家系统推荐施肥对超高产夏玉米产量及养分吸收利用的影响 [J]. 河南农业科学, 2014, 43 (6): 44-48.
- [10] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (6): 1387-1394.
- [11] 魏建林, 谭德水, 郑福丽, 等. 养分专家系统推荐施肥对小麦玉米产量、效益及养分平衡的影响 [J]. 山东农业科学, 2018, (2): 87-92.
- [12] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [13] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On farm estimation of an in season nitrogen management strategy based on soil Nmin test [J]. Field Crops Research, 2008, 105: 48-55.
- [14] 赵士诚, 魏美艳, 仇少君, 等. 氮肥管理对秸秆还田下土壤氮素供应和冬小麦生长的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (2): 20-25.

Effects of nutrient expert recommendation fertilization on middle rice yield and nutrient utilization in Hubei province

LIU Dong-hai^{1, 2, 3}, CHEN Yun-feng^{1, 2, 3}, LI Shuang-lai^{1, 2, 3}, QIAO Yan^{1, 2, 3}, ZHANG Zhi¹, HU Cheng^{1, 2, 3*}
(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei 430064; 2. Key Laboratory of Fertilizer Resource Utilization in Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan Hubei 430064; 3. Wuhan Yellow-Brown Soil Field Key on the Ecological Environment Monitoring Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan Hubei 430064)

Abstract: This research evaluated the effect of fertilizer recommendation method of nutrient expert system (NE) on rice yield and nutrient use efficiency in Hubei province. Totally 42 experiments on rice growth were conducted during 2013 to 2017. In Guangshui county, compared with farmer's practice, the NE recommendation significantly reduced N application rate by 18.0%, but increased P₂O₅ and K₂O rate by 23.9% and 8.9%, respectively, the rice yield with NE recommendation increased by 1.4%, which has no significant differences. In Chibi county, the NE recommendation significantly reduced N, P₂O₅ and K₂O application rate by 8.8%, 32.9% and 44.1%, respectively, the rice yield with NE recommendation increased by 6.9% than farmer's practice, which has no significant differences. The average agronomic efficiencies of N, P₂O₅ and K₂O were 12.5, 9.5 and 1.3 kg/kg, and fertilizer use efficiency were 39.8%, 6.5% and 27.9%, respectively. NE recommended fertilization for rice could promote the absorption and accumulation of N, P and K of rice, improve yield and income, and nitrogen fertilizer use efficiency as well, which is worthy of popularization and application.

Key words: nutrient expert system (NE); middle rice; yield; nutrient use efficiency; Hubei province