

养分专家系统推荐施肥及对安徽中稻产量的影响

李录久¹, 吴萍萍¹, 姚文麒², 王家嘉¹, 李虹颖¹

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 长丰县农业技术推广中心, 长丰 231100)

摘要: 通过田间试验分析安徽省一季中稻的施肥量及养分专家系统 (NE) 对其籽粒产量的影响。4 年 40 户试验结果表明, 相比于农民习惯施肥 (FP) 和当地农技术部门测土配方推荐施肥 (ST), NE 推荐施肥氮肥平均用量分别减少 19.99% 和 13.72%, 磷肥投入相近, 钾肥用量比 ST 降低 17.15% 而较 FP 增长 20.78%, 总体上 NE 推荐施肥既大幅度减少氮肥用量, 同时较 FP 增加磷钾供应, 又减少 ST 磷钾用量避免奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例较为合适。NE 推荐的氮磷钾施肥量对安徽省一季中稻具有较明显的增产效应。40 地试验, NE 比不施氮的对照增产 28.14% ~ 111.24%, 比不施磷增产 2.33% ~ 21.15%, 比不施钾增产 0.17% ~ 19.87%, 4 年总平均增产率分别为 42.45%、10.53% 和 11.38%, 总体上施氮的增产率很高, 部分地块施磷、施钾的增产效应也较明显, 氮磷钾的增产效应顺序为 N>>K>=P。水稻籽粒产量 ST 与 NE 相近, FP 表现较差; NE 较 ST 和 FP 分别增产 -9.28% ~ 14.96% 和 -3.31% ~ 19.36%, 平均增产 -0.76% 和 9.32%, NE 与 ST 产量基本持平, 与 FP 相比增产效应较明显, NE 具有很好的应用效果和技术优势。

关键词: 养分专家系统 NE, 氮磷钾用量, 水稻产量

水稻是我国主要的粮食作物, 1949 ~ 2009 的 60 年间, 我国水稻平均年播种面积 $3.0937 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占粮食作物播种面积的 27%; 总产平均为 $1.3329 \times 10^8 \text{ t}$, 占粮食总产的 42%, 居粮食作物首位^[1,2]。2016 年我国水稻种植面积为 $3.0178 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 总产增至 $2.0708 \times 10^8 \text{ t}$ ^[2]。安徽是我国水稻重要生产省份, 2012 年种植面积高达 $2.215 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $1.393 \times 10^7 \text{ t}$, 播种面积和总产量分别占全国的 7.35% 和 6.82%, 仅次于湖南、江西、黑龙江和江苏等省, 分别居全国第 5、第 7 位^[2,3]; 2016 年全省水稻种植面积为 $2.2655 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $1.4018 \times 10^7 \text{ t}$, 水稻生产在安徽占有重要地位。

养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 是在 SSNM 基础上应用国际上最新的 4R 养分管理技术原理, 结合 QUEFTS 模型计算最佳养分吸收, 并依据产量反应和农

学效率进行推荐施肥和养分管理的一种推荐施肥方法^[4,5]。与测土配方施肥相比, 省去了取土和化验等繁杂工作, 既充分利用农田的基础养分资源、提供合理的养分用量, 避免作物对养分的奢侈吸收, 又保障作物养分供应, 在保持土壤肥力的同时, 使养分胁迫降到最低并最终达到高产、高效的目的。2009 年以来, 我国在小麦和玉米种植区不同气候条件下全面开展了应用 NE 系统推荐施肥工作, 结果表明, 在保证作物产量的前提下, NE 能够科学减施氮肥, 提高肥料利用率, 是较好的指导农民科学施肥的新方法。2013 年起, 在农业部行业专项“南方低产水稻土改良技术”、“水田合理耕层构建技术”、国家水稻产业技术体系培肥岗位专家、中国农科院创新工程和 IPNI 的资助下, 开展了水稻 NE 田间试验, 以进一步验证水稻 NE 系统在安徽一季中稻的适应性。现将结果整理如下。

表 1 供试土壤 0 ~ 20 厘米耕层基本农化性状

年度	pH (水, 2.5:1)		有机质 (g/kg)		全氮 (g/kg)		有效 P (mg/kg)		速效 K (mg/kg)	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
2013	5.07-7.29	5.62	14.4-26.0	19.8	1.02-1.44	1.16	5.4-29.4	17.0	96.0-189.7	154.8
2014	4.96-6.50	5.74	12.5-27.4	18.5	0.88-1.75	1.39	6.0-25.6	15.5	46.2-205.8	114.1
2015	4.92-6.23	5.48	10.5-20.3	13.2	0.93-1.90	1.19	9.8-43.3	24.1	58.3-233.0	131.3
2016	5.12-6.54	5.94	10.3-19.6	14.1	0.56-0.96	0.71	10.7-33.2	20.6	95.6-194.2	137.5

1. 材料与方 法 .

1.1 土壤养分状况

试验于 2013 ~ 2016 年在安徽省合肥市长丰县和肥西县及蜀山区、滁州市定远县和明光市、阜阳市颖上县、淮南市潘集区、黄山市屯溪区 5 市 8 县市区 10 户农民地块进行，供试土壤为安徽省主要成土母质——下蜀系黄土、黄褐土和砂姜黑土发育而成的水稻土。试验前 0 ~ 20 cm 耕层土壤采用常规分析法测定，养分状况见表 1。

1.2 试验设计

每年 10 户农民试验均设置以下 6 个处理：① NE (在调查农民施肥和水稻产量等信息的基础上，基于水稻养分专家系统 NE 计算 NPK 推荐用量)，② NE-N (NE 推荐量基础上，不施氮肥)，③ NE-P (NE 推荐量基础上，不施磷肥)，④ NE-K (NE 推荐量基础上，不施钾肥)，⑤ ST (测土或当地农技推广部门推荐的施肥量)，⑥ FP (当地农民习惯施肥量)，施肥量见表 2。供试肥料品种：氮肥用尿素，磷肥用磷酸二铵或过磷酸钙，钾肥用氯化钾。小区面积 20 ~ 60 m²，固定 NE 位置，其它小区随机排列，不设重复。全部磷肥作基肥，钾肥按基肥 - 孕穗肥 50% - 50% 的比例施用。氮肥在 NE 及减 P 减 K 处理按基肥——分蘖肥——孕穗肥 50% - 30% - 20% 的比例施用，ST 及 FP 处理分别按 60% - 25% - 15% 和 70% - 30% - 0% 的比例施肥。基肥于水稻移栽前全层撒施，与土壤充分混合。供试水稻品种为丰良优 6 号、C 两优 87、两优 900、Y 两优 512、

两优 8106、皖稻 197、天优华占等当地主栽品种，每年 4 月下旬后开始育秧，5 月中下旬到 6 月上中旬移栽，9 月下旬开始陆续收获，栽插密度 25 cm × 20 cm，20000 株 /hm²。其它栽培管理措施，如病虫害防治以及水分管理，同当地一般大田水稻。

2. 结果与分析

2.1 养分专家系统 NE 的推荐施肥量

从表 2 可看出，4 年试验农民习惯施肥 FP 处理调查得出的 N、P₂O₅、K₂O 施用量为 165 ~ 270、30.0 ~ 90.0 和 30.0 ~ 105.0 kg/hm²，总平均为 209.1、62.1 和 64.0 kg/hm²，投入的 N:P₂O₅:K₂O 养分比例为 3.37:1:1.03，户与户之间养分投入量差异较大，整体上以氮为主，磷和钾投入量较少。当地测土配方施肥或农技部门推荐施肥氮磷钾养分投入量相应为 165.0 ~ 225.0、60.0 ~ 90.0 和 60.0 ~ 180.0 kg/hm²，4 年总平均为 193.9、70.7 和 93.9 kg/hm²，N:P₂O₅:K₂O 为 2.74:1:1.33。NE 专家系统计算的氮磷钾养分投入量分别为 145 ~ 195、48.0 ~ 90.0 和 54.0 ~ 120.0 kg/hm²，总平均为 167.3、66.2 和 77.3 kg/hm²，投入的 N:P₂O₅:K₂O 为 2.53:1:1.17。由此可见，NE 处理的氮肥投入量大幅度降低，相较于 FP 和 ST，4 年 40 户总平均用量分别减少 19.99% 和 13.72%，即 FP 和 ST 较 NE 多施 N 肥 25.0% 和 15.9%。至于磷肥，4 年 40 户总平均，NE 较 ST 减少 6.36%，比 FP 多 6.60%，总体上差异不大；

表 2 水稻 NE、ST 和 FP 处理施肥量 (单位: kg/hm²)

处理	养分	2013		2014		2015		2016		总平均 用量
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
NE	N	165-175	170.0	150.0-195.0	173.8	145.0-170.0	156.9	156.0-186.0	168.6	167.3
	P ₂ O ₅	60-75	65.5	60.0-90.0	71.7	60.0-80.0	69.9	48.0-72.0	57.6	66.2
	K ₂ O	70-75	73.5	60.0-120.0	77.2	54.0-78.0	63.7	78.0-120.0	94.8	77.3
ST	N	165-210	197.5	165.0-210.0	190.5	180.0-210.0	193.5	180.0-225.0	193.9	193.9
	P ₂ O ₅	60-75	72.0	60.0-90.0	70.2	60.0-90.0	72.5	60.0-80.0	68.0	70.7
	K ₂ O	70-120	105.5	60.0-180.0	93.0	60.0-105.0	83.0	90.0-105.0	91.5	93.3
FP	N	165-270	213.0	180.0-255.0	209.0	180.0-225.0	202.5	195.0-240.0	212.0	209.1
	P ₂ O ₅	37.5-90	57.0	30.0-90.0	62.3	45.0-75.0	57.0	30.0-90.0	72.0	62.1
	K ₂ O	45-105	70.5	45.0-90.0	69.8	45.0-90.0	57.0	30.0-75.0	58.5	64.0

40 农户钾平均投入, NE 比 ST 少 17.15% 而较 FP 多 20.78%, 表明 NE 既增加 FP 的钾供应又避免 ST 的奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例也较为合适 (表 3)。

2.2 养分专家系统 NE 对水稻籽粒产量的影响

2.2.1 水稻施用氮磷钾的的增产效应

水稻籽粒产量统计结果 (表 3) 表明, 安徽省水稻主产区包括江淮水稻主产区及沿江江南和沿淮地区, 水稻 NE 养分专家系统推荐的氮磷钾施肥组合具有较明显的增产效应。4 年试验, 以不施氮、磷、钾的处理 NE—N、NE—P 和 NE—K 为对照, 10 户农民 10 个地块, 水稻氮磷钾配合施用的 NE 处理较不施氮对照 (NE—N) 增产分别为 28.14% ~ 81.04%、30.05% ~ 111.24%、29.68% ~ 55.57% 和 23.68% ~ 90.29%, 平均增产

45.28%、45.27%、40.87% 和 38.82%; NE 处理较无磷的对照 (NE—P) 产量相对提高 4.17% ~ 17.20%、2.33% ~ 21.15%、6.01% ~ 15.63% 和 2.34% ~ 14.81%, 平均增产率达 10.00%、11.34%、10.93% 和 9.84%; NE 较缺钾处理 (NE—K) 增产 0.17% ~ 13.32%、4.88% ~ 15.79%、8.96% ~ 17.89% 和 2.92% ~ 19.87%, 产量平均提高 6.80%、9.71%、14.81% 和 14.23%。总体上 4 年试验, 施氮最低增产 23.68%、最高达 112.24%、总平均增产率高达 42.45%, 施氮的增产效应极为明显; 施磷最低只增产 2.33%、最高则增加 21.15%、平均提高 10.53%, 远低于氮的增产效应, 但变化幅度相对较小, 施钾与施磷效果相当, 最低仅增长 0.17%, 产量基本持平, 最高增产 19.87%、总平均增产 11.38%, 略高于磷 (表 3), 变异系数也高于磷。安徽省一季水稻 (中稻) 氮磷钾的增

表 3 各年度 10 户农民地块水稻籽粒产量统计

年度	处理	水稻籽粒产量 (kg/hm ²)				变异系数 (%)	施肥增产率 (%)				变异系数 (%)
		最小值	最大值	平均值	标准差		最小值	最大值	平均值	标准差	
2013	NE	7284	9236	8182	676.7	8.27	--	--	--	--	--
	NE—N	4773	6758	5632	677.7	12.03	28.14	81.04	45.28	14.13	31.21
	NE—P	6357	8866	7438	773.6	10.40	4.17	17.20	10.00	4.14	41.39
	NE—K	6551	8698	7661	699.7	9.13	0.17	13.32	6.80	4.72	69.48
	ST	7526	9546	8570	714.4	8.34	-9.28	2.10	-4.52	4.20	92.97
	FP	6460	8119	7393	643.7	8.71	5.12	14.02	10.68	3.32	31.12
2014	NE	7260	9680	8675	832.3	9.59	--	--	--	--	--
	NE—N	4450	7252	5972	816.0	13.66	30.05	111.24	45.27	24.80	54.77
	NE—P	6544	8890	7791	680.5	8.73	2.33	21.15	11.34	7.01	61.77
	NE—K	6270	9230	7907	975.4	12.34	4.88	15.79	9.71	3.56	36.64
	ST	7590	9580	8724	731.2	8.38	-6.03	14.96	-0.56	6.45	1154
	FP	6930	9001	7930	769.2	9.70	2.96	19.36	9.39	5.39	57.39
2015	NE	7815	9765	8778	582.4	6.64	--	--	--	--	--
	NE—N	5274	7095	6231	606.3	9.73	29.68	55.57	40.87	9.98	24.41
	NE—P	7050	8628	7913	513.0	6.48	6.01	15.63	10.93	2.59	23.70
	NE—K	6657	8370	7645	568.2	7.43	8.96	17.89	14.81	3.34	22.58
	ST	7866	9348	8669	521.9	6.02	-4.84	6.30	1.26	4.60	366.7
	FP	7455	8802	8088	461.5	5.71	2.76	13.11	8.53	3.78	44.27
2016	NE	8034	9882	8788	561.3	6.39	--	--	--	--	--
	NE—N	5193	7476	6330	650.8	10.28	23.68	90.29	38.82	20.22	52.08
	NE—P	7184	8964	8001	640.3	8.00	2.34	14.81	9.84	4.06	41.22
	NE—K	6885	8883	7694	502.0	6.52	2.92	19.87	14.23	5.18	36.42
	ST	7380	9711	8719	787.5	9.03	-5.91	11.56	0.79	5.88	742.6
	FP	7150	9050	8085	618.4	7.65	-3.31	16.17	8.69	5.95	68.44

产效应顺序为 N>>K>P。

表 3 的结果还表明，相比不施氮、不施磷和不施钾的对照，氮磷钾配合的 NE 处理，4 年的标准差均相对较小，变异系数分别为 4 个处理中最低、次低、次低和最低，水稻籽粒产量表现较为稳定，说明即使在安徽南北各地土壤和气候条件相差很大的地区，水稻养分专家系统推荐的施肥处理也能稳定增产；不施氮的 NE—N 处理，标准差相对较大，4 年变异系数均表现为最高，表明不施氮则水稻籽粒产量极不稳定，氮肥对水稻产量有重大影响；不施磷的 NE—P 处理，4 年表现不同，变异系数 2013 年次高、2014 年最高、2015 次低、2016 年最低，与试验地土壤有效磷含量有关；不施钾的 NE—K 处理，标准差和变异系数的表现与无磷处理相似，中间两年高于 P 而另外 2 年又低，主要原因是这两年基础土壤的速效钾变化幅度较大（表 1）。分析氮磷钾肥增产率变化趋势，也可以得到相似的结论，NE—N、NE—P 和 NE—K 的变异系数，变幅分别为 24.41% ~ 54.77%、23.70% ~ 61.77% 和 22.58% ~ 69.48%，平均为 40.62%、42.02% 和 41.28%，也是增施氮肥的增产率变化范围较小，施磷、施钾的增产率变幅较大，而钾又略高于磷（表 3）。

统计 4 年 10 地 40 点试验水稻施用氮磷钾的增产率分布频数与频率（表 4），可以发现，水稻施氮的增产率较高，仅有 1 地的增产率低于 25%、2 地的增产率介于 25% ~ 30%，增产率在 30% ~ 50%、50% ~ 75%、75% ~ 100% 的分别有 26 个、7 个和 2 个，相应占 65.0%、17.5% 和 5.0%，有一个点的增产率甚至超过 100%，说明水稻施用氮肥具有极为明显的增产效果，氮仍是影响安徽一季水稻（中稻）籽粒产量的决定性因素，不施氮将严重影响水稻正常生长发育，籽粒产量将会大幅度下降。表 4 还说明，磷钾肥的增产作用与氮肥有较大差异，4 年 40 地试验，分别有 7 地和 5 地试验，施磷、补

钾的增产率低于 5%，相应占 17.5% 和 12.5%；增产率在 5% ~ 10% 的占 20.0% 和 22.5%，在 10% ~ 15% 的相应占 47.5% 和 32.5%，在 15% ~ 20% 的占 10% 和 32.5%，仅个别地点的增产率超过 20%，这一结果说明，尽管安徽省一季中稻区大多数试验施磷、施钾都有明显的增产效果，但是仍分别有 37.5% 和 35% 即超过 1/3 的地块施用磷钾肥的增产率在 10% 以下，同时磷肥的增产作用总体上低于钾肥，增产率很少能超过 15%；磷钾肥的增产效应应在一些稻田不明显，特别是在沿淮淮北砂姜黑土地地区，当前这些区域土壤有效钾、速效磷含量较高，水稻施用磷钾肥的增产作用不明显，不需要每季大量施用磷钾肥，可不施、少施或隔季施用。

2.2.2 测土施肥 ST 和农民习惯施肥 FP 的产量效应

从表 3 也可看出，当地测土配方施肥或农技部门推荐施肥 ST 处理，水稻的籽粒产量也较高，4 年 40 地试验，总体上与养分专家系统 NE 处理产量相近；以 ST 作对照，4 年试验 NE 较 ST 的增产率分别为 -9.28% ~ 2.10%、-6.03% ~ 14.96%、-4.84% ~ 6.30% 和 -5.91% ~ 11.56%，平均增产 -4.52%、-0.56%、1.26% 和 0.79%，仅后两年 NE 平均产量略高且基本持平，前两个年度还低于 ST 处理，特别是 2013 年度，减产还很明显。4 年 40 地总平均增产率为 -0.76%，基本持平。进一步分析各年度 ST 处理增产率的标准差和变异系数，可以发现，标准差较大，变异系数特别高，是所有 6 个处理中最高的，4 年分别高达 93%、1154%、367% 和 743%，表明 NE 与 ST 间水稻产量差异表现得极不稳定。统计 4 年 10 地 40 点试验 NE 对 ST 处理的增产率分布频数与频率（表 4），也可以看出，共有 25 地即 62.5% 的试验，NE 与 ST 间产量差异不到 5%，差异在 5% ~ 10% 的占 27.5%，即 90% 的试验产量差异都低于 10%，说明 NE 与 ST 处理间水稻产量差异不明显。

表 4 水稻增产率总的分布频数与频率

增产率 (%)	<5 (25)		5 ~ 10 (25 ~ 50)		10 ~ 15 (50 ~ 75)		15 ~ 20 (75 ~ 100)		>20 (100)	
	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)
N 素	1	2.5	29	72.5	7	17.5	2	5.0	1	2.5
P 素	7	17.5	8	20.0	19	47.5	4	10.0	2	5.0
K 素	5	12.5	9	22.5	13	32.5	13	32.5	0	0
ST	25	62.5	11	27.5	4	10.0	0	0	0	0
FP	7	17.5	13	32.5	16	40.0	4	10.0	0	0

注：增产率分布范围，非括号内数字代表 P 素、K 素、ST 和 FP，括号内的数字仅表示 N 素增产幅度。

表3还表明, NE处理对ST的增产率, 前两年总体上表现减产而之后则为增产, 其原因可能是刚开始养分专家系统NE才引进, 需要进行更多的田间试验的验证以调整计算参数; 经过不断验证和参数调整, NE计算的氮磷钾用量组合与测土配方施肥ST的产量差异逐渐缩小并最终超越, 虽然NE的施肥量特别是氮磷用量总体上比ST低。由此可以看出, 水稻养分专家系统NE具有很好的应用效果和技术优势, 省去了繁杂的取土化验过程也能获得理想的产量。

表3也说明, 农民习惯施肥FP表现较差, 水稻籽粒产量明显低于NE和ST。4年40地试验, NE对FP的增产率分别为5.12%~14.02%、2.96%~19.36%、2.76%~13.11%和-3.31%~16.17%, 产量平均提高10.68%、9.39%、8.53%和8.69%, 总体平均产量提高9.32%, 增产效应较明显。统计分析的标准差也较小, 4年试验变异系数相对也较小。增产率分布范围(表4), 4年40地试验, 在5%~10%的占32.5%, 高达40%的点增产率达10%~15%, 而低于5%和超过15%的所占比例均较少。仅有一地试验NE产量低于FP, 其原因可能是当年这一试验所用水稻品种为粳稻, 生育期长, NE推荐的氮肥量远低于FP的缘故。总体上, 50%试验NE对FP的增产率超过10%, 说明NE较FP具有很大的增产优势, 尽管NE的施肥量特别是氮磷用量低于FP处理。

3. 小结

3.1 水稻养分专家系统NE氮肥投入量大幅度降低, 4年40户试验, 相较于农民习惯施肥FP和当地农技术部门推荐施肥ST, 总平均用量分别减少19.99%和13.72%。磷肥投入, NE较ST减少6.36%但比FP增加6.60%, 差异不大; 钾肥用量, NE比ST降低17.15%而

较FP增长20.78%, 总体上NE既大幅度减少氮肥用量, 同时较FP增加磷钾供应, 又较ST减少磷钾用量避免奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例较为合适。

3.2 水稻养分专家系统NE推荐的氮磷钾施肥量对安徽省一季中稻具有较为明显的增产效应。4年40地试验, NE较不施氮的对照增产28.14%~111.24%, 施磷产量相对提高2.33%~21.15%, 施钾增产0.17%~19.87%, 总平均增产率分别为42.45%、10.53%和11.38%, 总体上施氮的增产率很大, 部分地块施磷、施钾的增产效应也较明显, 但磷钾的增产率远低于氮, 氮磷钾的增产效应顺序为N>>K>=P。

3.3 当地农技术部门推荐施肥ST水稻产量与养分专家系统NE相近, 农民习惯施肥FP表现较差、籽粒产量明显低于NE和ST。4年40地试验, NE较ST和FP分别增产-9.28%~14.96%和-3.31%~19.36%, 总体平均产量提高-0.76%和9.32%, NE与ST产量基本持平, NE与FP相比增产效应较为明显, NE具有很好的应用效果和技术优势。

参考文献

- [1] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 黄厚宽, 蒋荫锡. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- [2] 国家统计局. 2016年全国农作物生产统计调查资料[M]. 2016.
- [3] 安徽省统计局. 安徽农村统计调查资料[M]. 2017.
- [4] 中国土壤与肥料, 2014.
- [5] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1458-1467.

