

# 基于养分专家系统 (NE) 的江西省双季稻化肥减施效果<sup>1</sup>

柳开楼<sup>1</sup> 胡惠文<sup>1</sup> 余喜初<sup>1</sup> 李大明<sup>1</sup> 杨富强<sup>2</sup> 叶会财<sup>1</sup> 徐小林<sup>1</sup> 周利军<sup>1</sup> 胡志华<sup>1</sup> 黄庆海<sup>1</sup>  
(1 江西省红壤研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌, 330046; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081)

**摘要:** 2015年在江西省南昌市进贤县和南昌县7个农户进行双季稻区作物养分专家系统 (Nutrient Expert) 的肥料试验, 在双季稻生产中提出优化施肥 (OPT) 处理, 在 OPT 的基础上设置减素试验, 分别是减氮 (OPT-N) 处理、减磷 (OPT-P) 处理、减钾 (OPT-K) 处理。同时根据土壤测试值进行推荐设置测土优化施肥 (OPTS) 处理, 以及当地农民习惯施肥 (FP) 处理, 对 OPT、OPTS、FP 进行产量、效益比较, 分析氮、磷、钾养分的农学效率。试验结果表明, 在增加种植密度的前提下, 相对于农民习惯施肥处理 FP, OPT 处理的产量提高了 23.6%–48.0% (早稻) 和 8.4–36.8% (晚稻)。从施肥量角度来看, 在秸秆还田的背景下, 作物养分专家系统分别比农民习惯施肥每公顷少施用 18.7–41.3 公斤 N、13.0–25.1 公斤 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 52.8–118.9 公斤 K<sub>2</sub>O。通过减素试验计算出各地水稻生产上的农学效率, 早晚稻氮肥农学效率平均值为 23.4 和 15.3 公斤 / 公斤。磷肥农学效率的平均值为 44.4 和 25.7 公斤 / 公斤。钾肥农学效率变化范围平均值为 37.4 和 29.4 公斤 / 公斤。

**关键词:** 养分专家系统 (Nutrient Expert); 江西省; 双季稻; 产量反应

江西省是我国 13 个粮食主产省之一, 又是全国仅有的两个不间断向国家提供商品粮的省份之一<sup>[1-2]</sup>, 因此大力发展水稻种植技术显得十分重要。据统计, 江西省双季稻种植面积 4600 多万亩, 占全省水稻种植总面积的 89%, 双季稻种植比例居全国前列<sup>[3]</sup>。近 50 年来, 该地区早稻和晚稻的实际单产和趋势产量均呈明显的上升趋势, 但 20 世纪 90 年代以后增幅变小<sup>[4]</sup>。因此, 研究如何提高水稻单产, 增加农民种稻积极性就显得十分迫切。

本研究针对江西双季稻区水稻生产中存在的化肥施用不合理等问题, 结合作物养分专家系统 (Nutrient Expert), 通过在双季稻主要生产区设置肥料优化和减素试验, 研究双季稻种植的肥料最佳施用量, 分析双季稻生产中的氮、磷、钾作物养分的产量反应、农学

效率, 从而为该地区双季稻的合理施肥提供理论和技术依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验于 2015 年 1 月到 2015 年 12 月在江西省南昌市进贤县和南昌县进行试验, 该地处中亚热带, 年均气温 18.1℃, ≥ 10℃ 积温 6480℃, 年降雨量 1537 毫米, 年蒸发量 1150 毫米, 无霜期约为 289 天, 年日照时数 1950 小时。

试验前采耕层土壤 (0–20 厘米) 进行养分测定, 分别测定 pH、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质, 具体肥力情况见表 1。供试水稻品种以当地主栽品种为主, 供试肥料氮肥为尿素, 磷肥为钙镁磷肥, 钾肥为氯化钾。

<sup>1</sup> 基金项目: 国际植物营养研究所项目资助; 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201503122);

作者简介: 柳开楼 (1984–), 男, 河南滑县人, 在读博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥料方面的研究 E-mail: liukailou@126.com

\* 通讯作者: 余喜初 (1973–), 男, 江西都昌人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养方面的研究 E-mail: yxchu@163.com

表 1 供试土壤基础养分

地点	农户	pH	OM (%)	全 N	全 P	全 K	速效 P	速效 K
				(克/公斤)			(毫克/公斤)	
进贤县	李国平	5.3	1.1	1.5	0.7	13.6	44.6	200.8
	王春根	5.1	1.2	1.6	0.8	16.5	61.7	243.7
	张国本	5.1	1.2	1.6	0.8	9.1	58.9	258.7
	付财根	5.1	1.3	1.4	0.9	16.5	67.6	266.9
	文有亮	5.3	1.2	1.5	0.7	14.9	47.5	230.6
南昌县	刘运保	4.7	2.3	1.4	0.5	21.5	23.0	94.1
	刘芳顺	4.5	1.4	1.6	0.5	18.5	25.2	90.2
统计	平均值	5.0	1.4	1.5	0.7	15.8	46.9	197.9
	标准差	0.3	0.4	0.1	0.2	3.9	17.5	75.3
	变异系数	6.1	29.3	5.4	22.6	24.8	37.3	38.1

## 1.2 试验方法

每个试验站点试验之前进行种植情况调查,了解往年施肥及产量情况,根据调查结果运行 NE 软件进行施肥推荐 (OPT 处理),根据当地农业技术部门根据测土配方进行推荐施肥 (OPTS 处理),同时对当地习惯性施肥 (FP 处理)进行统计记录,

试验处理:共设计 6 个处理

(1) OPT:基于 Nutrient Expert 推荐量;并进一步优化种植密度。株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(2) OPT-N:不施氮肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(3) OPT-P:不施磷肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(4) OPT-K:不施钾肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(5) OPTS:根据当地土壤测土配方施肥优化的施肥处理。当地普通种植密度,株行距为 20 厘米 × 20 厘米。

(6) FP:农民习惯施肥。当地普通种植密度,株行距为 20 厘米 × 20 厘米。

试验面积:每处理小区面积 30 平方米,1 次重复。(具体施肥量见表 2)

表 2 双季稻平衡施肥小区施肥量

农户	处理	施氮量	施磷量	施钾量	施氮量	施磷量	施钾量
		(公斤 N/亩)	(公斤 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /亩)	(公斤 K <sub>2</sub> O/亩)	(公斤 N/亩)	(公斤 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /亩)	(公斤 K <sub>2</sub> O/亩)
李国平	OPT	9.3	4.0	4.4	10.3	4.5	4.1
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	9.0	4.5	9.8	10.5	4.5	10.5
王春根	OPT	10.1	3.9	3.6	11.0	5.5	5.1
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	21.3	7.5	12.3	22.8	9.0	15.0
张国本	OPT	10.3	5.1	5.2	10.5	4.6	4.1
	OPTS	10.0	4.5	7.0	11.0	4.5	7.5
	FP	8.2	3.8	3.8	10.8	5.3	11.3
付财根	OPT	9.8	3.7	3.5	10.3	4.3	3.9
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	8.2	4.5	8.1	10.6	6.0	10.8
文有亮	OPT	10.1	4.1	3.8	10.1	4.1	3.8
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	9.9	5.3	10.1	10.6	6.0	12.0
刘运保	OPT	10.7	4.7	5.0	10.1	4.1	3.8
	OPTS	10.0	4.0	7.0	12.0	3.0	8.0
	FP	9.0	4.5	4.5	10.6	6.0	12.0
刘芳顺	OPT	10.3	3.9	3.9	10.3	4.5	4.1
	OPTS	10.0	4.0	7.0	12.0	3.0	8.0
	FP	13.7	5.5	5.5	15.9	6.7	12.7

肥料运筹和施用方法：

OPT 与 OPT 减素试验，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾。所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥按照 4:3:3 的比例施用。钾肥的基肥：穗肥按照 5:5 的比例施用。

FP 为当地农民习惯施肥，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾，所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥按照 4:6 的比例施用。钾肥的基肥、分蘖肥按照 5:5 的比例施用。

OPTS 为当地测土配方施肥的推荐施肥，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾，所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥按照 4:6 的比例施用。钾肥的基肥、分蘖肥按照 5:5 的比例施用。

### 1.3 样品采集和分析

1) 收获时测定水稻籽粒和秸秆干重。

2) 收获时各处理采取有代表性 3 株水稻植株和籽粒样品，烘干至恒重，分别测定籽粒和秸秆中测定氮磷钾养分含量。并对数据进行整理，计算出氮、磷、钾产量反应、农学效率、肥料偏生产力<sup>[7]</sup>。

3) 各指标计算公式(以氮为例)：

N 产量反应(公斤/亩)= 施氮处理 - 减氮处理产量

N 农学效率(公斤/公斤)= N 产量效应 / N 施用量

N 偏生产力(公斤/公斤)= 施氮处理产量 / 施氮量

## 2 结果与分析

### 2.1 双季稻 NE 推荐施肥系统的化肥减施潜力

在早稻季，农民习惯施肥氮肥用量(N)在 8.2 -

21.3 公斤/亩之间，平均值是 11.3 公斤/亩。磷肥施用量( $P_2O_5$ )在 4.5 - 7.5 公斤/亩，平均值是 5.1 公斤/亩。钾肥用量( $K_2O$ ) 3.7 - 12.3 公斤/亩之间，平均值是 7.7 公斤/亩。各个地区施肥量差异较大，从养分施用量上来看，以氮肥为主，钾肥居中，磷肥施用最少，从变异系数上看，变异系数分别氮肥(42.3%) > 钾肥(41.7%) > 磷肥(23.9%)。养分专家系统根据前期调查给出了推荐施肥(OPT 处理)，其中氮肥用量在 9.3 - 10.7 公斤/亩，平均值是 10.1 公斤/亩。磷肥用量是在 3.7 - 5.1 公斤/亩，平均值是 4.2 公斤/亩。钾肥用量是在 3.5 - 5.2 公斤/亩，平均值是 4.2 公斤/亩。与农民习惯施肥相比，氮肥、磷肥和钾肥用量分别降低了 11.0%、17.0% 和 45.6%。当地农业技术推广部门根据测土配方推荐施肥量(OPTS 处理)施肥，其中氮肥施用量为 10 公斤/亩。磷肥施用量在 4.0 - 5.0 公斤/亩，平均值是 4.6 公斤/亩。钾肥施用量在 7 - 8 公斤/亩，平均值是 7.6 公斤/亩。较农民习惯施肥略微降低了氮肥、磷肥和钾肥用量。

晚稻季的结果与早稻季基本一致，也呈现出 OPT 显著减低了氮肥、磷肥和钾肥用量。

### 2.2 双季稻 NE 推荐施肥系统的产量效应

从各处理水稻产量表 3 可知，OPT 施肥处理早稻产量变化范围在 489 - 591 公斤/亩，平均值为 546 公斤/亩。OPTS 施肥处理早稻产量变化范围在 384 - 487 公斤/亩，平均值为 448 公斤/亩。FP 施肥处理早稻产量变化范围在 368 - 453 公斤/亩，平均值为 411 公斤/亩。其中 OPT 施肥处理较 FP 农民习惯施肥增产 23.6% - 48.0%，这主要与该处理优化的种植密度有关。晚稻结果与早稻基本一致。

表 3 OPT、OPTS、FP 各处理水稻产量

农户	早稻产量(公斤/亩)			OPT 相对 FP	OPTS 相对 FP	晚稻产量(公斤/亩)			OPT 相对 FP	OPTS 相对 FP
	OPT	OPTS	FP	增产率(%)	增产率(%)	OPT	OPTS	FP	增产率(%)	增产率(%)
李国平	567	445	420	34.9	6.0	567	445	420	34.9	6.0
王春根	532	467	369	44.3	26.7	532	467	369	44.3	26.7
张国本	489	417	392	24.8	6.4	489	417	392	24.8	6.4
付财根	515	384	417	23.6	-8.0	515	384	417	23.6	-8.0
文有亮	591	465	450	31.3	3.3	591	465	450	31.3	3.3
刘运保	558	474	377	48.0	25.7	558	474	377	48.0	25.7
刘芳顺	569	487	454	25.4	7.4	569	487	454	25.4	7.4

注：OPT 相对 FP 增产率 % = (OPT 产量 - FP 产量) / FP 产量 × 100%；OPTS 相对 FP 增产率 % = (OPTS 产量 - FP 产量) / P 产量 × 100%。

### 2.3 双季稻 NE 推荐施肥系统的氮产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 4 可以看出, 早稻氮的产量反应为 177–320 公斤/亩, 平均值为 238 公斤/亩。氮肥农学效率变化范围在 17.3–32.7 公斤/公斤, 平均值为 23.6 公斤/公斤。氮肥偏生产力变化范围为 47.6–60.7 公斤/公斤, 平均值为 54.3 公斤/公斤。晚稻氮的产量反应效应为 114–199 公斤/亩, 平均值为 158 公斤/亩。氮肥农学效率变化范围在 11.1–19.3 公斤/公斤, 平均值为 15.3 公斤/公斤。氮肥偏生产力变化范围为 40.1–53.9 公斤/公斤, 平均值为 50.4 公斤/公斤。

### 2.4 双季稻 NE 推荐施肥系统的磷产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 5 可以看出, 早稻磷产量反应为 152–228 公斤/亩, 平均值为 183 公斤/亩。磷肥农学效率变化范围在 32.2–57.6 公斤/公斤, 平均值为 44.4 公斤/公斤。磷肥偏生产力变化范围为 96.5–147.1 公斤/公斤, 平均值为

131.3 公斤/公斤。晚稻磷的产量反应效应为 69–170 公斤/亩, 平均值为 115 公斤/亩。磷肥农学效率变化范围在 15.2–39.3 公斤/公斤, 平均值为 25.7 公斤/公斤。磷肥偏生产力变化范围为 97.7–125.1 公斤/公斤, 平均值为 115.0 公斤/公斤。

### 2.5 双季稻 NE 推荐施肥系统的钾产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 6 可以看出, 早稻钾产量反应效应为 114–202 公斤/亩, 平均值为 151 公斤/亩。钾肥农学效率变化范围在 24.2–53.3 公斤/公斤, 平均值为 37.4 公斤/公斤。钾肥偏生产力变化范围为 94.1–155.5 公斤/公斤, 平均值为 133.3 公斤/公斤。晚稻钾产量反应效应为 59–190 公斤/亩, 平均值为 119 公斤/亩。钾肥农学效率变化范围在 11.7–46.6 公斤/公斤, 平均值为 29.4 公斤/公斤。钾肥偏生产力变化范围为 106.3–136.1 公斤/公斤, 平均值为 126.8 公斤/公斤。

表 4 OPT 处理水稻氮产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	N 产量反应 (公斤/亩)	N 农学效率	N 偏生产力	N 产量反应 (公斤/亩)	N 农学效率	N 偏生产力
李国平	177	18.9	60.7	114	11.1	52.3
王春根	235	23.3	52.8	153	13.9	53.9
张国本	251	24.4	47.6	177	16.8	52.5
付财根	320	32.7	52.6	199	19.3	48.8
文有亮	286	28.4	58.7	146	14.5	40.1
刘运保	186	17.3	52.0	121	12.0	51.4
刘芳顺	209	20.3	55.4	198	19.3	53.4

注: 氮产量效应 (N response) = OPT 产量 - OPT - N 产量; AEN = (OPT 产量 - OPT - N 产量) / 施氮量; N 偏生产力 (公斤/公斤) = 施氮处理产量 / 施氮量。

表 5 OPT 处理水稻磷产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	P 产量反应 (公斤/亩)	P 农学效率	P 偏生产力	P 产量反应 (公斤/亩)	P 农学效率	P 偏生产力
李国平	163	40.9	141.7	69	15.2	118.4
王春根	172	43.6	135.2	86	15.5	107.2
张国本	167	33.0	96.5	151	32.8	120.3
付财根	215	57.6	138.0	170	39.3	115.7
文有亮	228	55.1	143.0	113	27.4	97.7
刘运保	152	32.2	117.8	89	21.5	125.1
刘芳顺	187	48.4	147.1	129	28.5	120.9

注: 磷产量效应 (P response) = OPT 产量 - OPT - P 产量; AEP = (OPT 产量 - OPT - P 产量) / 施磷量; P 偏生产力 (公斤/公斤) = 施磷处理产量 / 施磷量。

表 6 OPT 处理水稻钾产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	K 产量反应 (公斤/亩)	K 农学效率	K 偏生产力	K 产量反应 (公斤/亩)	K 农学效率	K 偏生产力
李国平	163	37.1	128.9	190	46.6	132.0
王春根	172	47.7	147.7	59	11.7	117.0
张国本	114	21.9	94.1	134	32.5	133.9
付财根	148	42.8	148.6	155	39.4	127.5
文有亮	203	53.3	155.5	103	27.2	106.3
刘运保	121	24.2	111.5	79	20.9	136.1
刘芳顺	134	34.6	147.1	113	27.7	134.8

注: 钾产量效应 = OPT 产量 - OPT - K 产量; AEK = (OPT 产量 - OPT - K 产量) / 施氮量; K 偏生产力 (公斤/公斤) = 施钾处理产量 / 施钾量。

### 3 结论

1) 在优化种植密度的基础上, NE 推荐施肥方案 (OPT) 比农民习惯施肥 (FP) 产量提高了 23.6% - 48.0% (早稻) 和 8.4 - 36.8% (晚稻)。在施肥量的角度来看, NE 推荐施肥方案相对农民习惯施肥每亩少施用 1.2 - 8.3 公斤纯 N, 少施用 0.87 - 1.67 公斤  $P_2O_5$ , 少施用 3.52 - 7.9 公斤  $K_2O$  (前提是秸秆全量还田)。

2) 通过减素试验计算出江西省水稻生产上的 NE 推荐施肥系统的农学效率, 早晚稻氮肥农学效率平均值为 23.4 和 15.3 公斤/公斤。磷肥农学效率的平均值为 44.4 和 25.7 公斤/公斤。钾肥农学效率变化范围平均值为 37.4 和 29.4 公斤/公斤。

### 参考文献

- [1] 周陈曦, 翁贞林. 农业政策相关变量对江西水稻总产的影响及其对策研究 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2), 192-197.
- [2] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(2), 254-262.
- [3] 潘晓华, 李木英, 曾勇军, 等. 江西双季稻主要种植方式及其配套栽培对策 [J]. 江西农业大学学报, 2013, (1), 1-6.
- [4] 潘晓华, 石庆华. 江西省双季水稻单产不高的原因及对策 [J]. 中国稻米, 2008, 15(4), 1-2.
- [5] Xu, X., He, P., Zhao, S., et al. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China [J]. Field Crops Research, 2016, 186, 58-65.
- [6] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2016, (1), 95-102.
- [7] 贾良良, 刘孟朝, 赵珊珊, 等. 养分专家系统推荐施肥对河北省小麦玉米产量及养分利用率的影响 [J]. 高效施肥, 2013, 30(5):21-24.