

# 养分专家系统对江西双季稻产量和养分利用率的影响<sup>1</sup>

柳开楼<sup>1</sup>, 李大明<sup>1</sup>, 吴昌强<sup>1</sup>, 万国<sup>1</sup>, 胡惠文<sup>1</sup>, 余喜初<sup>1\*</sup>, 杨富强<sup>2</sup>, 叶会财<sup>1</sup>

(1 江西省红壤研究所 / 江西省红壤耕地保育重点实验室 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 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:** 为合理评估养分专家系统 (NE) 在双季稻区的化肥减施效果, 本研究于 2014–2016 年在江西省进贤县开展了 3 年 6 季的田间试验, 并分析了 NE 系统与农民习惯处理 (FP)、当地农技部门的测土配方推荐施肥处理 (ST) 下水稻产量、氮磷钾养分吸收量、化肥施用量和肥料偏生产力变化。结果表明: 1) 与 FP 和 ST 相比, NE 处理可以显著提高早晚稻的籽粒产量 (除了 2014 年), 2015 和 2016 年, NE 处理的早晚稻产量分别增加了 15.17%–32.74% 和 14.33%–19.25%。2) NE 处理可以显著促进双季稻对氮磷钾养分的吸收 (除了 2014 年), 在 2015 和 2016 年, NE 处理的早晚稻氮素吸收量分别比 FP 处理增加了 25.16%–33.21% 和 22.09%–26.82%; 磷素吸收量增加了 27.45%–29.57% 和 27.02%–38.60%, 钾素吸收量增加了 16.59%–22.34% 和 14.24%–16.21%。3) 与 FP 处理相比, 3 年间 NE 处理的早稻季和晚稻季氮肥用量分别减少 24.86%–29.15% 和 28.15%–34.43%; 磷肥用量分别减少 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%, 钾肥用量分别减少 60.35%–66.22% 和 72.29%–74.02%。4) 与 FP 处理相比, 3 年间 NE 处理的早、晚稻氮肥偏生产力分别提高了 53.26%–83.41% 和 48.77%–81.86%; 磷肥偏生产力分别增加了 57.97%–76.31% 和 66.24%–115.83%, 钾肥偏生产力分别增加了 113.25%–156.13% 和 160.88%–206.00%。因此, NE 系统可以在双季稻区实现化肥减施增效的目标, 且当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg 时, 氮磷钾的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

**关键词:** 养分专家系统, 双季稻, 化肥减施增效, 偏生产力

水稻尤其双季稻在我国粮食生产上占据重要地位<sup>[1–2]</sup>。据统计, 我国南方双季稻区水稻种植面积和产量占全国水稻种植面积和总产量的 40% 左右, 是我国重要的水稻生产区域<sup>[3–4]</sup>, 但是, 由于高产品种的养分需求和稻农知识水平不高等因素的影响, 该地区的双季稻种植普遍存在化肥施用不合理和肥料利用率偏低等现象, 进而导致双季稻收益下降, 从而严重阻挫了稻农种植双季稻的积极性<sup>[5–6]</sup>。

化肥是重要的农业生产资料, 是粮食的“粮食”。自新中国成立以来, 化肥在促进我国粮食和农业生产发展中起了不可替代的作用<sup>[7]</sup>。有研究表明, 虽然双季稻区 (江西、湖南等) 的化肥施用量明显低于稻麦轮作种植区 (江苏、浙江等发达省份), 但也存在化肥过量施用、盲目施用、种类搭配不合理等问题, 其化肥总体利用率也不高<sup>[8–10]</sup>。以双季稻区的江西省为例, 调查资料显示, 其化肥施用量与全国趋势基本一致, 2011 年氮、磷、钾、复合

肥消费量比 1995 年消费量分别增长了 42.1%、87.9%、141.8% 和 204.2%; 化肥消费结构以氮肥和复合肥为主。其中, 早稻季氮磷钾肥的施用量分别为 197.93kg/ha、93.34kg/ha、117.41kg/ha, 晚稻季氮磷钾肥用量则分别为 226.49kg/ha、84.96kg/ha 和 100.3kg/ha<sup>[10–12]</sup>。但是, 在该区域的所有稻农中, 仅有 15% 的农户可以实现高产和氮肥的高效利用<sup>[10]</sup>。因此, 研究如何提高双季稻区的化肥利用率就显得非常重要。

科学的推荐施肥方法是实现水稻高产高效生产的重要技术措施, 长期以来, 国内外围绕科学施肥研究提出了很多推荐施肥方法, 比如以土壤测试为基础的测土配方施肥技术, 该技术在双季稻区的大面积示范推广基本实现了平衡施肥, 提高了化肥利用率, 维持了水稻高产稳产<sup>[13–15]</sup>。但是, 由于土壤测试耗时耗力、周期性较长, 且某些土壤速效养分不稳定、其与水稻需肥量和产量相关性不强

基金项目: 国家重点研发计划“肥料养分推荐方法与限量标准”(2016YFD0200101); 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300901); 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201503122)。

作者简介: 柳开楼(1984—), 男, 河南滑县人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤肥料方面的研究。手机: 15070822925, Email: liukailou@163.com。

\* 通讯联系人: 余喜初, E-mail: yxchu@163.com。

等问题<sup>[16-17]</sup>，影响了测土配方施肥技术的进一步推广。再加上我国的农业主要以农户经营为主体<sup>[18]</sup>，复种指数高，作物种植茬口紧，依据土壤测试指导施肥存在测试推荐不及时和成本高等难题。因此，研究开发适应我国国情的推荐施肥技术就显得十分迫切。

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所与国际植物营养研究所合作研创了小麦、玉米和水稻等主要作物基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法<sup>[18-20]</sup>。同时结合计算机技术，建立问答式界面，把复杂的施肥原理简化为农技推广部门和农民方便使用的养分专家系统（Nutrient Expert），简称 NE 系统<sup>[21]</sup>。NE 系统可以通过了解过去 3 至 5 年的产量水平和施肥历史完成施肥推荐，其既适合指导农户，也适合大面积区域推荐施肥<sup>[21]</sup>。前期的大量研究已经表明，该方法可以同时实现小麦玉米等作物的高产和化肥减施目标<sup>[18-24]</sup>。但是，在双季稻区，关于 NE 系统下水稻的产量和养分吸收变化还有待进一步研究，且对 NE 系统的化肥减施效果还缺乏有效评估<sup>[16,25]</sup>。因此，本研究拟以 NE 系统为切入点，结合农民习惯施肥和当地农技部门推荐施肥，于 2014-2016 年开展了 3 年 6 季的田间试验，并通过分析不同处理的水稻产量、氮磷钾养分吸收量、化肥施用量和肥料偏生产力变化，从而为该地区的化肥减施增效提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

2014-2016 年，本研究在江西省进贤县开展了 3 年 6 季的田间试验，该地处中亚热带，年均气温 18.1℃，≥ 10℃ 积温 6480℃，年降雨量 1537 mm，年蒸发量 1150 mm，无霜期约为 289d，年日照时数 1950h。试验地分别位于进贤县张公镇马家村（116° 10' 48.04" E，28° 21' 18.54" N）、颜家村（116° 9' 23.22" E，28° 21' 56.37" N）

和温圳镇何家村（116° 6' 12.93" E，28° 20' 14.98" N），其中马家村为 3 块田，颜家村和何家村各 2 块田。试验地土壤均为红壤性水稻土，成土母质为第四纪红粘土。2014 年试验开始前耕层土壤肥力情况见表 1。

### 1.2 试验设计

试验处理分别为：FP：农民习惯施肥处理；ST：当地农技部门推荐的测土配方施肥处理；NE：基于 NE 系统的推荐施肥处理。小区面积 60 m<sup>2</sup>，1 次重复。

FP 处理的施肥量来源于农户调查，肥料运筹为：磷肥全部作为基肥，氮肥 40% 做基肥，60% 做分蘖肥施用。钾肥 50% 做基肥，50% 做分蘖肥施用。ST 处理的施肥量来源于当地农技站，肥料运筹与 FP 一致。NE 处理的施肥量来源于 NE 系统，NE 系统的原理是，用不施肥区的养分吸收或产量水平表征土壤基础肥力，即地块施肥后作物产量反应越小，则土壤基础肥力越高，肥料推荐量越低；反之则肥料推荐量越高。该方法在汇总过去十几年全国范围的水稻肥料田间试验的基础上，建立了基于产量反应和农学效率的推荐施肥模型。此外，NE 系统还基于 4R 的养分管理原则，推荐合适的肥料品种和适宜的肥料用量，以及合适的施肥时间和恰当的施肥位置。具体方法见文献<sup>[22]</sup>，每季开始前，NE 处理的施肥量均要根据上季的产量反应等数据进行调整和优化。NE、NE-N、NE-P 和 NE-K 处理的肥料运筹为：磷肥全部作为基肥，氮肥 40% 做基肥，30% 做分蘖肥，30% 做穗肥施用。钾肥 50% 做基肥，50% 做分蘖肥施用。氮磷钾的肥料种类为尿素（N 为 46.2%）、钙镁磷肥（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 12.5%）和氯化钾（K<sub>2</sub>O 为 60%）。种植制度为早稻-晚稻-冬闲。稻田病虫害按当地习惯采用农药进行防治。

### 1.3 测定指标

1) 水稻产量：在早晚稻成熟期每个小区实打实收，

表 1 试验前土壤肥力情况

地点	pH	有机质 %	全 N g/kg	全 P g/kg	全 K g/kg	碱解氮 mg/kg	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
马家 1	5.33	2.12	1.45	0.73	11.59	119.41	44.55	100.80
马家 2	5.12	2.21	1.57	0.82	11.46	153.20	61.70	143.70
马家 3	4.93	2.51	1.51	0.76	12.77	107.24	21.00	76.16
颜家 1	5.49	1.67	2.11	0.58	11.18	132.21	35.85	71.67
颜家 2	5.26	1.77	2.14	0.82	11.11	118.15	33.25	49.84
何家 1	5.14	2.02	2.47	1.17	11.11	108.92	66.00	60.33
何家 2	5.13	1.68	2.04	0.69	11.93	119.41	49.15	53.77



晒干称重, 从而获得实际产量。

2) 氮磷钾养分吸收量: 在早晚稻成熟期每个小区采集 5 穴植株样品, 带回室内分成籽粒和秸秆, 烘干称重, 研磨后测定籽粒和秸秆中的氮磷钾含量, 氮磷钾含量的测定方法分别为凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰分光光度计法<sup>[26]</sup>。并根据籽粒和秸秆的干物质计算氮磷钾养分吸收量。具体公式如下:

$$Nuptake = Grain \times N_{Grain} + Straw \times N_{Straw} \quad (1)$$

$$Puptake = Grain \times P_{Grain} + Straw \times P_{Straw} \quad (2)$$

$$Kuptake = Grain \times K_{Grain} + Straw \times K_{Straw} \quad (3)$$

式 (1) - (3) 中, Nuptake、Puptake 和 Kuptake 分别为水稻 N、P 和 K 养分吸收量 (kg/ha), Grain 和 Straw 分别为水稻籽粒和秸秆干物质 (kg/ha), Ngrain、Pgrain 和 Kgrain 分别为水稻籽粒 N、P 和 K 含量 (%), NStraw、PStraw 和 KStraw 分别为水稻秸秆 N、P 和 K 含量 (%)。

3) 化肥偏生产力: 计算公式如下:

$$PFP - N = \frac{Yield}{Amount - N} \quad (4)$$

$$PFP - P = \frac{Yield}{Amount - P} \quad (5)$$

$$PFP - K = \frac{Yield}{Amount - K} \quad (6)$$

式 (4) - (6) 中, PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 分别为 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 肥料的偏生产力 (kg/kg), Yield 分别为水稻籽粒产量 (kg/ha), Amount-N、Amount-P 和 Amount-K 分别为 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的施用量 (kg/ha)。

4) 养分平衡: 计算公式如下:

$$N_{balance} = N_{input} - N_{uptake} \quad (7)$$

$$P_{balance} = P_{input} - P_{uptake} \quad (8)$$

$$K_{balance} = K_{input} - K_{uptake} \quad (9)$$

式 (7) - (9) 中, N<sub>balance</sub>、P<sub>balance</sub> 和 K<sub>balance</sub> 分别为 N、P 和 K 的养分平衡 (kg/ha), N<sub>input</sub>、P<sub>input</sub> 和 K<sub>input</sub> 分别为 N、P 和 K 的投入量 (kg/ha), N<sub>uptake</sub>、P<sub>uptake</sub> 和 K<sub>uptake</sub> 分别为水稻 N、P 和 K 吸收量 (kg/ha), 本研究主要考虑肥料投入, 忽略了降水、灌溉等的投入。

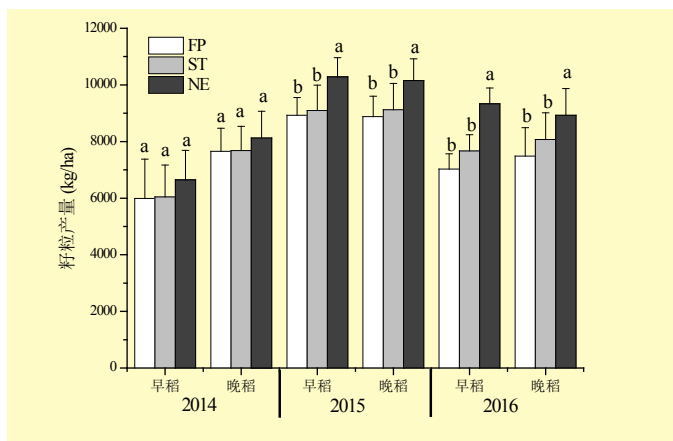
所有数据均采用 Excel 2003 进行处理, 统计分析采

用 SPSS 16.0 软件进行, 差异显著性检验采用最小显著差法 (Fisher's LSD) 于  $P < 0.05$  水平上进行, 图件采用 Origin 8.1 软件完成。

## 2 结果分析

### 2.1 双季稻籽粒产量

在 2014–2016 年间, 3 年 6 季的水稻产量波动较大 (图 1), 除了 2014 年早稻产量低于晚稻之外, 2015 和 2016 年的早晚稻产量则不存在显著差异。与 FP 和 ST 相比, NE 处理可以显著提高早晚稻的籽粒产量 (2014 年除外), 但 FP 和 ST 处理间不存在显著差异 (图 1)。在 2014 年, 虽然 NE 处理的早晚稻产量高于 FP 和 ST 处理, 但差异不显著。与 FP 处理相比, 在 2015 和 2016 年 NE 处理的早稻产量分别增加了 15.17% 和 32.74%, 晚稻产量增加 14.33% 和 19.25%。与 ST 处理相比, 2015 和 2016 年早稻季 NE 处理的增幅为 13.04% 和 21.74%, 晚稻季的增幅为 11.26% 和 10.54%。且 2015 和 2016 年的 NE 处理的增



产结果均呈现出早稻季的增幅高于晚稻季。

注: 同一年份同一种植季柱上不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同处理早晚稻产量变化

### 2.2 双季稻氮磷钾养分吸收量

与产量的结果相似, 3 年 6 季中氮磷钾素的养分吸收也呈现出 2014 年晚稻季高于早稻季, 但 2015 和 2016 年则不存在显著差异 (表 2)。在不同处理间, NE 处理可以显著促进双季稻对氮磷钾素养分的吸收 (除了 2014 年), 2015 和 2016 年 NE 处理的早晚稻养分吸收量均显著高于 FP 和 ST 处理。对于氮素吸收量, 早稻季 NE 处理分别比 FP 处理增加了 33.21% 和 25.16%, 晚稻季的增幅为 26.82% 和 22.09%; 磷素吸收量和钾素吸收量也呈现出相似的规律, 与 FP 处理相比, NE 处理在早晚稻的磷素吸收量增加了 27.45%–29.57% 和 27.02%–38.60%, 钾素吸收量增加了 16.59%–22.34% 和 14.24%–16.21%。但是, 与 NE 处理的增产结果不同, 养分吸收量则呈现出氮素为早稻高于晚稻, 而磷钾则为早稻低于晚稻。

### 2.3 双季稻化肥减施潜力分析

在本研究中, FP 和 ST 的化肥施用量在 3 年 6 季均相同, 而 NE 处理则由于每季均会根据上季的结果进行调整和优化, 所以其化肥施用量每季均不同。图 2 显示, NE 系统可以显著降低氮磷钾肥的施用量。与 FP 处理相比, 在 2014、2015 和 2016 年 NE 处理的早稻季氮肥 (N) 用量分别降低了 29.15%、24.86% 和 27.63%, 晚稻季分别降低 28.63%、28.15% 和 34.43%; 早晚稻磷肥 ( $P_2O_5$ )

表 2 不同处理早晚稻养分吸收量 (kg/ha) 变化

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	95.78 ± 23.07a	120.24 ± 17.99a	104.78 ± 15.41b	115.42 ± 10.37b	99.93 ± 12.05b	115.78 ± 14.59b
	ST	107.88 ± 23.26a	102.60 ± 14.71a	113.20 ± 24.04ab	124.57 ± 22.28ab	110.99 ± 24.08ab	133.52 ± 10.94a
	NE	117.28 ± 16.35a	135.51 ± 29.52a	139.58 ± 31.38a	146.37 ± 29.67a	125.07 ± 19.47a	141.35 ± 31.85a
P	FP	21.92 ± 4.72a	43.52 ± 6.54a	32.06 ± 2.56b	32.35 ± 3.27b	36.36 ± 4.90b	31.61 ± 8.47b
	ST	31.49 ± 7.49a	27.65 ± 8.55a	37.01 ± 8.28ab	37.18 ± 7.90ab	44.63 ± 8.63a	33.98 ± 6.50b
	NE	32.70 ± 11.49a	29.00 ± 6.24a	40.86 ± 14.58a	41.09 ± 7.98a	47.11 ± 10.59a	43.81 ± 6.68a
K	FP	153.50 ± 43.28a	162.78 ± 40.41a	141.34 ± 15.31b	172.16 ± 16.92b	153.48 ± 15.87b	169.97 ± 12.55b
	ST	199.32 ± 64.22a	160.14 ± 33.66a	151.42 ± 16.50ab	185.49 ± 20.05ab	175.09 ± 24.13ab	184.18 ± 21.38ab
	NE	169.30 ± 63.11a	174.62 ± 47.43a	164.79 ± 12.11a	196.67 ± 18.14a	187.78 ± 21.18a	197.52 ± 42.01a

注: 同一年份同一种植季同一养分下不同处理数据后不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下表同。氮磷钾养分含量指 N、P 和 K 的含量。

的降幅分别为 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%，钾肥 (K<sub>2</sub>O) 的降幅分别为 60.35%–66.22% 和 72.29%–74.02%。且 NE 处理的氮磷钾肥也明显低于 ST 处理，但

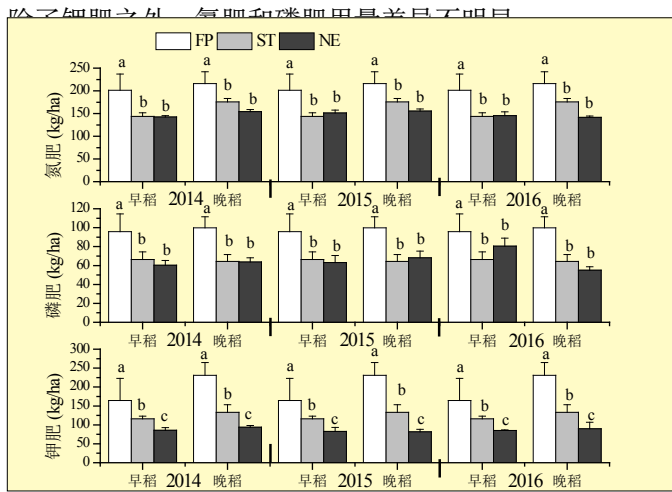


图 2 不同处理早晚稻化肥施用量变化

注：氮磷钾肥施用量指 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的用量。

## 2.4 双季稻氮磷钾肥偏生产力

在双季稻区，3 年 6 季中 NE 处理下氮磷钾肥的偏生产力分别为 59.97kg/kg、137.91kg/kg 和 101.26kg/kg (表 3)，显著高于 FP (36.71 kg/kg、78.32 kg/kg 和 39.60 kg/kg) 和 ST 处理 (50.07 kg/kg、121.72 kg/kg 和 64.06 kg/kg)。对于氮肥 (N) 偏生产力，在 2014、2015 和 2016 年 NE 处理的早稻季分别比 FP 提高了 56.65%、53.26% 和 83.41%，晚稻季的增幅分别为 48.77%、59.12% 和 81.86%；磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和钾肥 (K<sub>2</sub>O) 偏生产力也呈现出相似的规律，与 FP 相比，3 年间早晚稻季 NE 处理的磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 偏生产力分别增加了 57.97%–76.31% 和 66.24%–115.83%，钾肥 (K<sub>2</sub>O) 偏生产力分别增加了 113.25%–156.13% 和 160.88%–206.00%。

## 2.5 双季稻的养分平衡及其与化肥偏生产力的关系

不同施肥处理可以显著影响早晚稻的养分平衡，在 2014–2016 年，氮磷养分基本上均为盈余状态。对于氮素

表 3 不同处理早晚稻化肥偏生产力 (kg/kg) 变化

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	29.77 ± 6.90b	35.41 ± 3.77b	44.38 ± 3.12b	41.09 ± 3.33c	34.95 ± 2.65c	34.63 ± 4.66c
	ST	42.12 ± 7.82a	43.70 ± 4.89ab	63.35 ± 6.24a	51.93 ± 5.28b	53.40 ± 4.02b	45.95 ± 5.36b
	NE	46.64 ± 7.29a	52.68 ± 6.10a	68.02 ± 4.52a	65.38 ± 4.96a	64.11 ± 3.85a	62.98 ± 6.66a
P	FP	62.57 ± 14.50b	76.67 ± 8.16b	93.27 ± 6.56c	88.97 ± 7.22b	73.46 ± 5.57	74.99 ± 10.10c
	ST	91.03 ± 16.91ab	119.44 ± 13.36a	136.92 ± 13.48b	141.94 ± 14.43a	115.41 ± 8.68	125.60 ± 14.64b
	NE	110.32 ± 17.25a	127.46 ± 14.75a	162.82 ± 10.82a	148.98 ± 11.31a	116.04 ± 6.97	161.85 ± 17.10a
K	FP	36.45 ± 8.45c	33.13 ± 3.53c	54.34 ± 3.82c	38.45 ± 3.12c	42.80 ± 3.25	32.41 ± 4.37c
	ST	52.26 ± 9.71b	57.79 ± 6.46b	78.60 ± 7.74b	68.68 ± 6.98b	66.25 ± 4.98	60.77 ± 7.08b
	NE	77.74 ± 12.16a	86.44 ± 10.01a	124.08 ± 8.25a	110.52 ± 8.39a	109.61 ± 6.58	99.16 ± 10.48a

注：氮磷钾肥的偏生产力指 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的偏生产力。

表 4 不同处理早晚稻的养分平衡 (kg/ha)

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	105.36 ± 12.86a	95.87 ± 17.90a	106.36 ± 20.51a	100.70 ± 25.53a	81.21 ± 13.87a	76.34 ± 1.31a
	ST	35.69 ± 15.24b	73.11 ± 7.39a	20.37 ± 16.02b	51.14 ± 14.96b	-37.41 ± 16.06c	42.20 ± 3.62b
	NE	25.22 ± 13.57b	18.74 ± 5.15b	21.56 ± 4.86b	8.92 ± 4.78c	20.50 ± 11.46b	0.36 ± 0.12c
P	FP	73.79 ± 14.22a	56.28 ± 5.17a	73.66 ± 16.37a	57.45 ± 8.43a	69.36 ± 14.04a	52.19 ± 3.24a
	ST	34.94 ± 10.53b	36.64 ± 1.24b	29.42 ± 0.26b	27.11 ± 0.58b	21.79 ± 4.62b	26.30 ± 0.82b
	NE	27.55 ± 6.34b	34.75 ± 1.80b	32.28 ± 7.13b	37.05 ± 0.83b	43.32 ± 2.07a	21.34 ± 3.11b
K	FP	10.78 ± 5.41a	18.17 ± 6.81a	12.95 ± 3.37a	-1.21 ± 0.31a	10.80 ± 5.81a	20.97 ± 1.06a
	ST	-83.61 ± 56.90b	-27.29 ± 13.48b	-135.70 ± 59.18b	-62.63 ± 19.87b	-189.37 ± 66.81b	-51.32 ± 10.20b
	NE	-113.80 ± 55.76b	-170.62 ± 43.03c	-101.93 ± 31.78b	-124.82 ± 31.59c	-102.63 ± 39.72b	-127.52 ± 25.01c

注：氮磷钾养分平衡指 N、P 和 K 的平衡。

平衡, NE 和 ST 处理的盈余量均显著低于 FP 处理, 且 NE 处理表现最低。磷平衡也表现出相似的规律。而钾素则除了 FP 为盈余之外, ST 和 NE 均为亏缺。

通过肥料偏生产力与养分平衡的量化关系 (图 3) 发

现, 氮磷钾的养分平衡量均随着肥料偏生产力的增加而降低, 且均可以用线性方程进行拟合。拟合方程表明, 当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg 时, 氮磷钾素的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

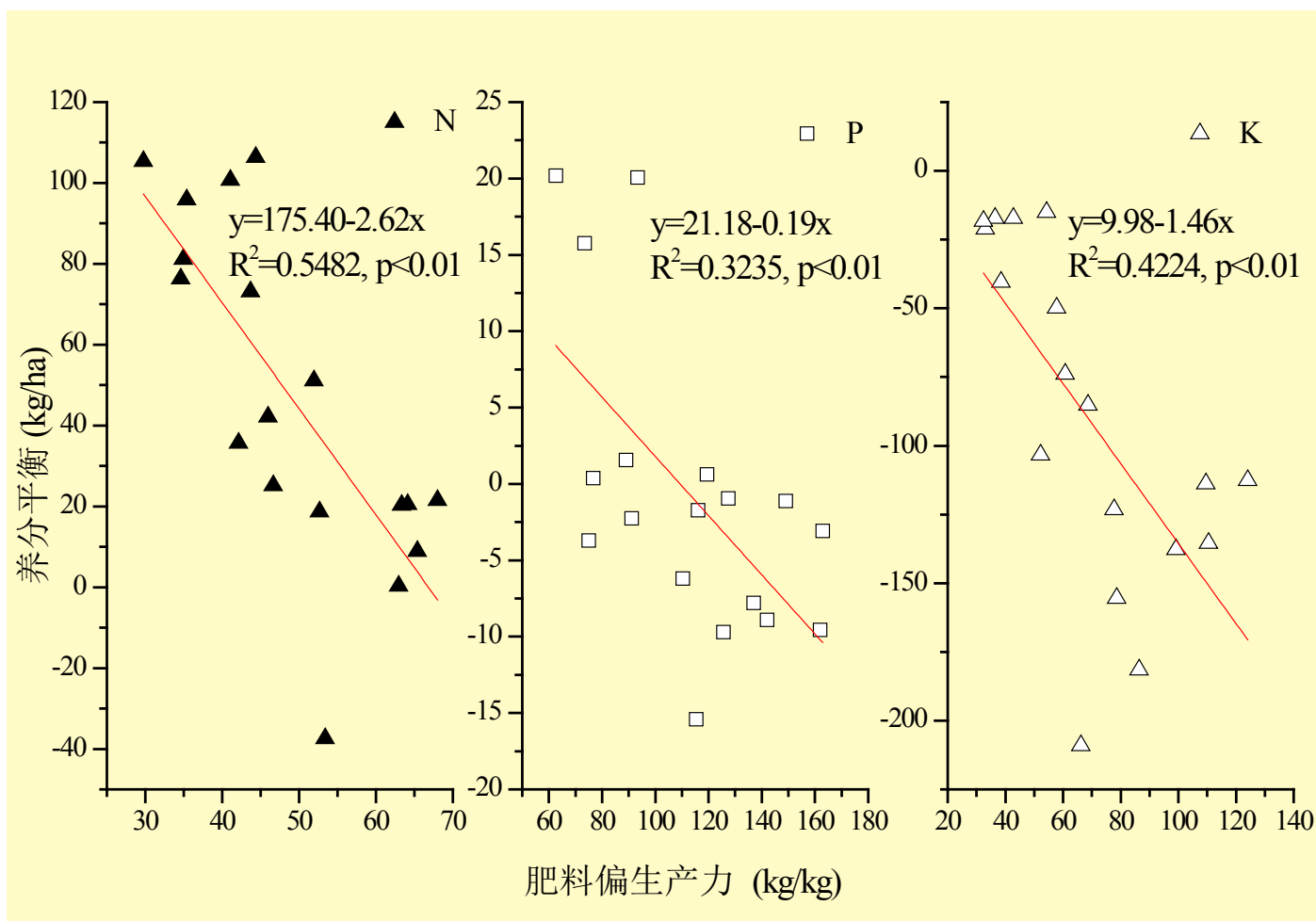


图 3 肥料偏生产力与养分平衡的相互关系

注: 氮磷钾肥的偏生产力指 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的偏生产力; 氮磷钾养分平衡指 N、P 和 K 的平衡。

### 3 讨论

#### 3.1 NE 系统可以提高双季稻产量

南方丘陵的双季稻区是我国主要的粮食供应地区之一, 在该地区的双季稻种植中, 化肥在维持水稻高产中起着至关重要的作用<sup>[7]</sup>。然而, 近年来, 随着农村劳动力的流失, 水稻种植中的化肥施用呈现出随意性和盲目性, 进而导致该地区的肥料利用率不高, 造成化肥资源的大量浪费<sup>[8-10]</sup>。因此, 在该地区开展化肥减施增效研究就显得十分迫切。在本研究中, NE 系统可以在农民习惯施肥的基础上, 根据目标产量和土壤基础肥力高低确定具体的氮磷钾产量反应, 并结合氮磷钾肥的农学效率, 在考虑秸秆还田等措施的基础上进行推荐施肥, 再结合 4R 养分管

理进行肥料运筹。因此, 与农民习惯施肥相比, NE 系统可以显著提高双季稻产量, 早晚稻产量增幅为 15.17%–32.74% 和 14.33% 和 19.25%; 且 NE 系统的产量也显著高于当地农技部门的测土配方处理。同时, 在考虑氮磷钾肥的产量反应和农学效率进行施肥量推荐的基础上, NE 系统也对测土配方数据进行了兼容<sup>[21]</sup>, 即当有土壤测试数据时, NE 系统会在推荐施肥时进行养分丰缺的精准判断, 从而更为准确地推荐施肥量, 因此, NE 系统的水稻产量也显著高于测土配方处理。但是, NE 系统在早稻和晚稻上增产效果略有不同, 原因可能与早晚稻季的温光条件存在差异有关, 且早晚稻连续种植下, 其系统内的氮磷钾等养分会存在累积效应<sup>[27-28]</sup>。同时, 在 3 年 6 季中, 随着 NE 系统的持续应用, 双季稻的养分吸收量也呈现出



NE 处理显著高于农民习惯施肥处理。这与 NE 系统在小麦和玉米上的应用效果相似<sup>[18-24]</sup>。但与作物对养分的奢侈吸收规律相反,原因之一是 NE 系统针对具体田块,根据氮磷钾肥的农学效率和产量反应进行施肥量推荐,且每年每季均为根据上季的产量反应等信息进行调整和优化,其施肥量与当季水稻养分需求高度吻合<sup>[16, 25]</sup>。另一原因是 NE 系统依据 4R 养分原理优化了肥料运筹<sup>[25]</sup>,增加了氮肥中的穗肥施用,从而有效满足了水稻开花后的养分需求。此外,NE 系统的养分吸收量增加还可能与良好的根系生长和开花后的养分吸收转运有关,但具体原因还有待进一步研究。

### 3.2 双季稻区的化肥减施潜力

在双季稻区,由于氮磷养分存在较高的盈余量,因此,与农民习惯施肥相比,早晚稻季 NE 系统中氮肥(N)的减施比例为 24.86%–29.15% 和 28.15%–34.43%;磷肥( $P_2O_5$ )的减施比例分别为 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%,钾肥( $K_2O$ )的减施比例分别为 60.35%–

66.22% 和 72.29%–74.02%。这与其他人的研究结果相似<sup>[19-25]</sup>,且晚稻季的化肥减施比例明显高于早稻季,这可能与早稻季的养分残效有关<sup>[27-28]</sup>。但氮磷钾肥的减施比例差异较大,原因可能与土壤养分供应能力<sup>[29]</sup>、水稻品种和种植模式有关。其中钾肥的减施比例较高的原因还与本研究充分考虑了秸秆全量还田带入的钾和土壤养分平衡有关,但是,也有研究表明,在田间水源充足的情况下,释放出来的秸秆钾从土壤进入水体比化肥钾进入水体有滞后性。从而可能影响了水稻对秸秆钾素的吸收利用<sup>[30]</sup>,同时,全量还田下的秸秆腐解等可能会影响水稻苗期的生长<sup>[31]</sup>。因此,根据秸秆全量还田背景下推荐的钾肥减施效果还有待进一步研究。此外,NE 系统在提高水稻产量的同时可以显著降低氮磷钾肥施用量的原因还与本研究中 NE 系统可以提高氮磷钾肥的偏生产力有关。然而,由于本研究的化肥减施比例是根据 3 年 6 季的结果得出的,化肥长期减施下的水稻产量变化还有待进一步跟踪研究,以期更为客观地指导该地区的化肥减施增效策略。此外,本研究还发现,在不考虑秸秆还田下,NE 处理下早晚稻季的钾素平

衡处于匮乏状态, 因此, 钾肥的减施比例还有待进一步深入探讨。

## 4 结论

在双季稻区, NE 系统可以通过优化肥料运筹进一步提升水稻产量、养分吸收量和氮磷钾肥的偏生产力。与农民习惯施肥相比, NE 系统下产量增加 14.33%–32.74%, 氮磷钾素吸收量分别增加了 22.09%–33.21%、27.02%–38.60% 和 14.24%–22.34%; 氮磷钾肥的偏生产力分别增加了 48.77%–83.41%、57.97%–115.83% 和 113.25%–206.00%。且显著优于当地农技部门的测土配方处理。同时, NE 系统可以显著降低氮磷钾肥的施用量。与农民习惯施肥相比, 氮磷钾肥的减施比例分别为 24.86%–34.43%、15.97%–44.75% 和 60.35%–74.02%。且当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg, 氮磷钾素的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

## 参考文献

[1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404–3414.

[2] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究. 中国农业科学, 2011, 45(2): 218–227.

[3] 肖丽萍, 何秀文, 刘木华, 蔡金平, 石庆华, 潘晓华. 我国南方双季稻区水稻生产机械化发展现状分析. 江西农业大学学报, 2013, 35(4): 682–686.

[4] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254–262.

[5] 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 王苏影, 李涛, 李强. 江西双季水稻施肥中存在的问题及对策. 中国稻米, 2012, 18(5): 33–35.

[6] 任万军. 杂交稻高产高效施氮研究进展与展望. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1505–1513.

[7] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. 土壤, 2017, 49(6): 1067–1077.

[8] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1416–1432.

[9] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221.

[10] 陈琦. 农户水稻施肥现状调查与分析, 南京农业大学博士学位论文. 2013

[11] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响. 中国农业科学, 2004: 37(3), 387–392..

[12] 刘钦普. 江苏氮磷钾化肥使用地域分异及环境风险评价. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1477–1483.

[13] 赵海东, 赵小敏, 谢林波, 郭熙. 江西上饶市水稻肥料利用率的空间差异及其影响因素研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 22–31.

[14] 赵亮, 张贺翠, 廉小平, 陆广涛, 朱利泉. 喀斯特地形区水稻测土配方施肥指标体系研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1056–1065.

[15] 张德军. 利用 "3414" 试验设计进行水稻测土配方施肥研究. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 52–56.

[16] Xu X., Xie J., Hou Y., He P., Pampolino M. F., Zhao S., Zhou W. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. Field Crops Research, 2015, 180: 37–45.

[17] Cui Z., Zhang H., Chen X., Zhang C., Ma W., Huang C., Gao Q. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature, 2018, 555(7696): 363

[18] 王宜伦, 苏瑞光, 刘举, 韩燕来, 卢艳丽, 白由路, 谭金芳. 养分专家系统推荐施肥对潮土夏玉米产量及肥料效率的影响. 作物学报, 2014, 40(3): 563–569.

[19] 王宜伦, 白由路, 王磊, 刘举, 韩燕来, 谭金芳. 基于养分专家系统的小麦–玉米推荐施肥效应研究. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483–4492.

[20] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 谢佳贵, 刘双全, 侯云鹏, 何萍. 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. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1458–1467.

[21] 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, 中国农业科学院博士学位论文, 2015

[22] Chuan L., He P., Pampolino M. F., Johnston A. M., Jin J., Xu X., Zhou W. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency. Field Crops Research, 2013, 140: 1–8.

[23] Xu X., He P., Pampolino M. F., Johnston A. M., Qiu S., Zhao S., Zhou W. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. Field Crops Research, 2014, 157: 27–34.

[24] Xu X., He P., Qiu S., Pampolino M. F., Zhao S., Johnston A. M., Zhou W. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China. Field Crops Research, 2014, 163: 10–17.

[25] Yang F., Xu X., Ma J., He P., Pampolino M. F.,



Zhou W. Experimental validation of a new approach for rice fertiliser recommendations across smallholder farms in China. *Soil Research*, 2017, 55(6): 579–589.

[26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000

[27] 张仕祥, 李辉信, 胡锋, 黄发泉, 黄花香. 早稻磷肥残效对当年晚稻产量的影响. *土壤学报*, 2006, 43(4): 611–616.

[28] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 刘益仁, 刘秀梅, 程正新, 杨俊成, 文石林. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研

究. *中国水稻科学*, 2012, 26(5): 555–562.

[29] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 李小坤, 周鹏, 杨文兵, 戴志刚. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果. *中国农业科学*, 2013, 47(2): 292–302.

[30] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 丛日环, 李小坤, 马晓晓. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究. *土壤*, 2013, 45(6): 1017–1022.

[31] 石广跃, 方书亮, 王兴龙. 苏北地区稻麦秸秆持续全量还田下机插秧苗促早发技术. *中国稻米*, 2016, 22(3): 85–86.

