

养分专家系统在双季稻中的应用和评价

柳开楼¹, 李大明¹, 胡志华¹, 胡惠文¹, 余喜初^{1*}, 杨富强²,
叶会财¹, 杨旭初¹, 徐小林¹, 黄庆海¹

(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,
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: 为合理评估养分专家 (NE) 系统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 (FP) 处理、当地农技部门的测土配方推荐施肥 (ST) 处理下水稻产量、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) NE 处理可以显著提高早、晚稻的籽粒产量和养分吸收量 (除了 2014 年)。2015 和 2016 年, NE 处理的早、晚稻产量分别比 FP 处理增加了 15.17% ~ 32.74% 和 14.33% ~ 19.25%; 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%。2) 与 FP 处理相比, 3 年间 NE 处理的早、晚稻季氮肥用量分别降低了 24.86% ~ 29.15% 和 28.15% ~ 34.43%, 磷肥的降幅分别为 15.97% ~ 37.05% 和 31.72% ~ 44.75%, 钾肥的降幅分别为 60.35% ~ 66.22% 和 72.29% ~ 74.02%。3) 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 系统可以在双季稻实现化肥减施增效的目标。

关键词: 养分专家系统; 双季稻; 化肥减施增效; 偏生产力

南方地区的双季稻在我国粮食生产上占据重要地位^[1-4], 但是, 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^[5-6]。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^[7]。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^[8-10]。以双季稻区的江西省为例, 2011 年氮、磷、钾、复合肥消费量比 1995 年分别增长了 42.1%、87.9%、141.8% 和

204.2%^[5, 10-12]。但仅有 15% 的农户可以实现高产和氮肥的高效利用^[10]。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。

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^[13-15]。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等问题^[16-17], 从而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^[18], 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^[18-20]。同时结合计算机技术, 建立问答式界

收稿日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-07-20

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(201503122)。

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

通讯作者: 余喜初, E-mail: yxchu@163.com。

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^[21]。NE系统可以通过了解过去3~5年的产量水平和施肥历史完成施肥推荐,既适合指导农户,也适合大面积区域推荐施肥^[21]。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,增加肥料利用率和化肥减施的目标^[18-24]。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NE系统的化肥减施效果还缺乏有效评估^[16, 25]。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

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,该地处中亚热带,年均气温18.1℃,≥10℃积温6480℃,年降水量1537mm,年蒸发量1150mm,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。

表1 试验前土壤肥力情况

地点	pH值	有机质 (%)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (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

1.2 试验设计

试验处理分别为:农民习惯施肥处理(FP);当地农技部门推荐的测土配方施肥处理(ST);基于NE系统的推荐施肥处理(NE)。小区面积60m²,1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位置。具体方法见文献[21]。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(N46.2%)、钙镁磷肥(P₂O₅12.5%)和氯化钾(K₂O60%)。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

水稻产量:在早、晚稻成熟期每个小区实打实收,晒干称重,从而获得实际产量。

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法^[26]。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:

$$N_{\text{uptake}} = G_{\text{rain}} \times N_{\text{grain}} + S_{\text{straw}} \times N_{\text{straw}} \quad (1)$$

$$P_{uptake}=Grian \times P_{grain}+Straw \times P_{straw} \tag{2}$$

$$K_{uptake}=Grian \times K_{grain}+Straw \times K_{straw} \tag{3}$$

式(1)~(3)中, N_{uptake} 、 P_{uptake} 和 K_{uptake} 分别为水稻氮、磷、钾养分吸收量(kg/hm^2), Grain和Straw分别为水稻籽粒和秸秆干物质(kg/hm^2), N_{grain} 、 P_{grain} 和 K_{grain} 分别为水稻籽粒氮、磷、钾含量(%), N_{straw} 、 P_{straw} 和 K_{straw} 分别为水稻秸秆氮、磷、钾含量(%)。

化肥偏生产力(PFP)计算公式:

$$PFP-N=\frac{Yield}{Amount-N} \tag{4}$$

$$PFP-P=\frac{Yield}{Amount-P} \tag{5}$$

$$PFP-K=\frac{Yield}{Amount-K} \tag{6}$$

式(4)~(6)中, PFP-N、PFP-P和PFP-K分别为氮、磷、钾肥的偏生产力(kg/kg), Yield为水稻籽粒产量(kg/hm^2), Amount-N、Amount-P和Amount-K分别为N、 P_2O_5 和 K_2O 的施肥量(kg/hm^2)。

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异法(LSD)于 $P < 0.05$ 水平上进行, 制图采用Origin 8.1 软件完成。

2 结果与分析

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)。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)(图1)。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处理的增幅分别为13.04%和21.74%, 晚稻季的增幅分别为11.26%和10.54%。且2015和2016年, NE处理的增产结果均呈现出早稻季高于晚稻季。

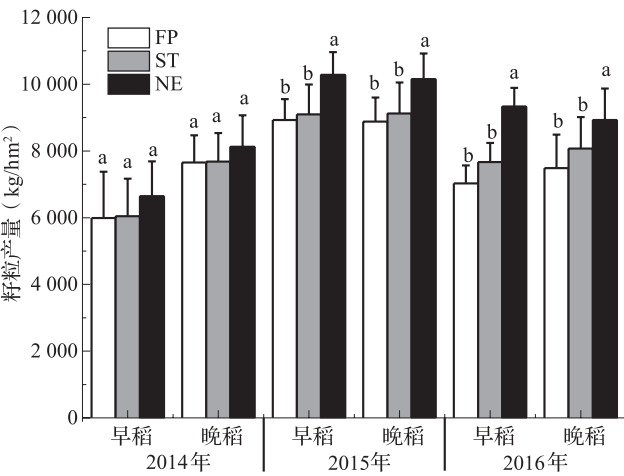


图1 不同处理早、晚稻产量变化

注: 不同的小写字母表示不同处理在同一年份同一种植季存在显著差异($P < 0.05$)。下表和图同。

2.2 双季稻氮磷钾养分吸收

3年6季中氮磷钾的养分吸收规律与产量的结果相似(表2)。在不同处理间呈现出2015和2016年中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、晚稻的磷素吸收量分别增加了27.45%~29.57%和27.02%~38.60%, 钾素吸收量分别增加了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。

表2 不同处理早、晚稻养分吸收变化 (kg/hm^2)

养分	处理	2014 年		2015 年		2016 年	
		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

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 处理的早稻季氮肥用量分别降低了 29.15%、24.86% 和 27.63%, 晚稻季的降幅分别为 28.63%、28.15% 和 34.43%; 早、晚稻磷肥用量的降幅分别为 15.97% ~ 37.05% 和 31.72% ~ 44.75%; 钾肥用量的降幅分别为 60.35% ~ 66.22% 和 72.29% ~ 74.02%。且 NE 处理的钾肥用量也显著低于 ST 处理。

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 59.97、137.91 和 101.26 kg/kg (表 3), 显著高于 FP 处理 (36.71、78.32 和 39.60 kg/kg)。对于氮肥偏生产力, 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%; 磷肥和钾肥偏生产力也呈现出

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%。

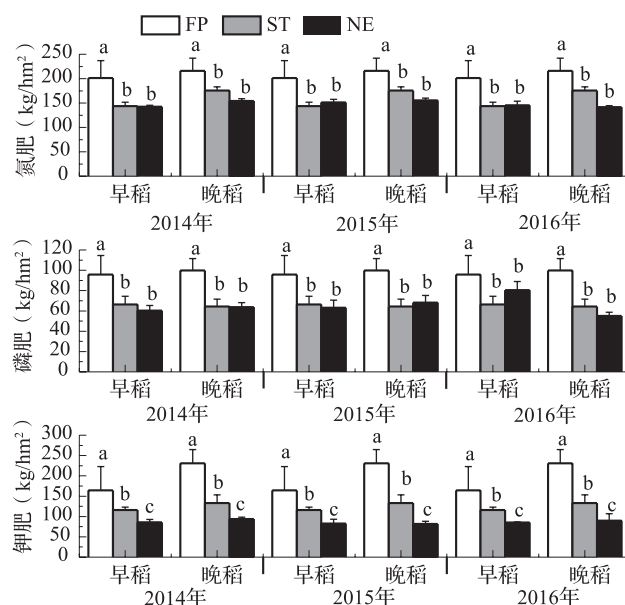


图 2 不同处理早、晚稻化肥施用量变化

表 3 不同处理早、晚稻化肥偏生产力变化

(kg/kg)

PFP	处理	2014 年		2015 年		2016 年	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
PFP-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
PFP-P	FP	62.57 ± 14.50b	76.67 ± 8.16b	93.27 ± 6.56c	88.97 ± 7.22b	73.46 ± 5.57b	74.99 ± 10.10c
	ST	91.03 ± 16.91ab	119.44 ± 13.36a	136.92 ± 13.48b	141.94 ± 14.43a	115.41 ± 8.68a	125.60 ± 14.64b
	NE	110.32 ± 17.25a	127.46 ± 14.75a	162.82 ± 10.82a	148.98 ± 11.31a	116.04 ± 6.97a	161.85 ± 17.10a
PFP-K	FP	36.45 ± 8.45c	33.13 ± 3.53c	54.34 ± 3.82c	38.45 ± 3.12c	42.80 ± 3.25c	32.41 ± 4.37c
	ST	52.26 ± 9.71b	57.79 ± 6.46b	78.60 ± 7.74b	68.68 ± 6.98b	66.25 ± 4.98b	60.77 ± 7.08b
	NE	77.74 ± 12.16a	86.44 ± 10.01a	124.08 ± 8.25a	110.52 ± 8.39a	109.61 ± 6.58a	99.16 ± 10.48a

3 讨论

3.1 NE 系统可以提高双季稻产量

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, 其早、晚稻的产量增幅分别为 15.17% ~ 32.74% 和 14.33% 和 19.25%。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^[21], 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, 其系统内的氮磷钾养分会存在累积效应^[27-28]。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结果相似^[18-24]。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^[16, 25]。另一方面的原因是NE系统依据4R养分原理优化了肥料运筹^[25],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,与农民习惯施肥相比,早、晚稻季NE系统中氮肥的减施比例分别为24.86%~29.15%和28.15%~34.43%,磷肥的减施比例分别为15.97%~37.05%和31.72%~44.75%,钾肥的减施比例分别为60.35%~66.22%和72.29%~74.02%。这与其他人的研究结果相似^[18-24],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^[27-28]。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^[29]、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^[30],同时,全量还田下的秸秆腐解等问题可能会影响水稻苗期的生长^[31]。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。

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%。同时,NE系统下氮磷钾肥分别比农民习惯施肥降低了24.86%~34.43%、15.97%~44.75%和60.35%~74.02%。

参考文献:

- [1] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 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[J]. 中国农业科学, 2011, 45(2): 218-227.
- [3] 肖丽萍,何秀文,刘木华,等. 我国南方双季稻区水稻生产机械化发展现状分析[J]. 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[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254-262.
- [5] 吴建富,潘晓华,石庆华,等. 江西双季水稻施肥中存在的问题及对策[J]. 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[J]. 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[J]. 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[J]. 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[J]. 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[D]. 南京: 南京农业大学, 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[J]. 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1477-1483.
- [13] 赵海东,赵小敏,谢林波,等. 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[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 22-31.
- [14] 赵亮,张贺翠,廉小平,等. 喀斯特地形区水稻测土配方施肥指标体系研究[J]. 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[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 52-56.
- [16] Xu X, Xie J, Hou Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 37-45.
- [17] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363-367.
- [18] 王宜伦,苏瑞光,刘举,等. 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[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 563-569.

- [19] 王宜伦, 白由路, 王磊, 等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (22): 4483-4492.
- [20] 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.
- [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 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [22] Chuan L, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crops Research, 2013, 140: 1-8.
- [23] Xu X, He P, Pampolino M F, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crops Research, 2014, 157: 27-34.
- [24] Xu X, He P, Qiu S, et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China [J]. Field Crops Research, 2014, 163: 10-17.
- [25] Yang F, Xu X, Ma J, et al. Experimental validation of a new approach for rice fertiliser recommendations across smallholder farms in China [J]. Soil Research, 2017, 55 (6): 579-589.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] 张仕祥, 李辉信, 胡锋, 等. 早稻磷肥残效对当年晚稻产量的影响 [J]. 土壤学报, 2006, 43 (4): 611-616.
- [28] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 等. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研究 [J]. 中国水稻科学, 2012, 26 (5): 555-562.
- [29] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果 [J]. 中国农业科学, 2013, 47 (2): 292-302.
- [30] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究 [J]. 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 [J]. 中国稻米, 2016, 22 (3): 85-86.

Application and evaluation of Nutrient Expert in double-cropping rice

LIU Kai-lou¹, LI Da-ming¹, HU Zhi-hua¹, HU Hui-wen¹, YU Xi-chu^{1*}, YANG Fu-qiang², YE Hui-cai¹, YANG Xu-chu¹, XU Xiao-lin¹, HUANG Qing-hai¹ (1. Jiangxi Institute of Red Soil, Jiangxi Provincial Key Laboratory for Arable Land Conservation of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang Jiangxi 330046; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to reasonably evaluate the effect of Nutrient Expert (NE) on double-cropping rice in China, a series of field experiments were conducted in Jinxian county, Jiangxi Province from 2014 to 2016. There treatments were NE, farmer habits (FP) and soil testing from the local agricultural technical department (ST). Rice yield, nutrient uptake, fertilizer amounts and partial factor productivity (PFP) were analyzed. The results showed that: 1) NE treatment significantly increased grain yield and nutrients uptake of early and late rice (except for 2014). In 2015 and 2016, the yield of NE treatment was increased by 15.17% ~ 32.74% and 14.33% ~ 19.25% than FP treatment in early and late rice, respectively. Compared with FP, the nitrogen uptake of NE treatment was increased by 25.16% ~ 33.21% and 22.09% ~ 26.82% in early and late rice, respectively. The phosphorus uptake were increased by 27.45% ~ 29.57% and 27.02% ~ 38.60%, potassium uptake were increased by 16.59% ~ 22.34% and 14.24% ~ 16.21%. 2) Compared with FP treatment, the nitrogen fertilizer of NE were decreased by 24.86% ~ 29.15% and 28.15% ~ 34.43% in early and late rice, respectively. The phosphate fertilizer were decreased by 15.97% ~ 37.05% and 31.72% ~ 44.75%. The potassium fertilizer was decreased by 60.35% ~ 66.22% and 72.29% ~ 74.02%, respectively. 3) Compared with FP treatment, the PFP of nitrogen fertilizer in NE treatment was increased by 53.26% ~ 83.41% and 48.77% ~ 81.86%, respectively. The PFP of phosphorus fertilizer were increased by 57.97% ~ 76.31% and 66.24% ~ 115.83% respectively. The PFP of potassium productivity were increased by 113.25% ~ 156.13% and 160.88% ~ 206.00%, respectively. Therefore, NE could achieve the goal of chemical fertilizer reduction and synergism in double cropping rice.

Key words: Nutrient Expert; double-cropping rice; chemical fertilizer reduction and synergism; partial factor productivity