

养分专家系统对吉林一季稻产量和肥料利用率的影响

王寅 刘奕 李春林 李玉玺 朱希茹 冯国忠 焉莉 高强

(吉林农业大学资源与环境学院 / 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林长春 130118)

摘要: 于 2013—2017 年在吉林省中部一季稻区的永吉县、九台市、梨树县和前郭县布置 54 个田间试验, 研究了水稻养分专家系统推荐施肥 (Nutrient Expert, NE) 和农民习惯施肥 (FP) 对稻谷产量、经济效益和肥料利用率的影响, 评估了水稻 NE 推荐施肥方法的应用效果。结果显示, NE 处理平衡了水稻的施肥量, 相比 FP 处理显著减少氮、磷肥用量, 平均分别减少 13.8 公斤 N/公顷 (7.5%) 和 6.7 公斤 P₂O₅/公顷 (8.9%)。全部试验 NE 处理的稻谷产量和收益平均分别为 9.47 吨/公顷和 26103 元/公顷, 均略高于 FP 处理 (9.36 吨/公顷和 25753 元/公顷) 但差异并不显著。NE 处理的氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥农学利用率平均分别为 17.0、42.5 和 33.4 公斤/公斤, 回收利用率平均分别为 29.2%、19.5% 和 35.6%, 偏生产力平均分别为 48.0、120.1 和 93.5 公斤/公斤。其中, NE 处理的氮肥的农学利用率和偏生产力, 磷肥的农学利用率、回收利用率和偏生产力及钾肥的农学利用率显著高于 FP 处理。多年多点研究证明, NE 养分专家推荐施肥显著减少了氮、磷肥投入, 并在小幅增加稻谷产量和经济效益的同时大幅提高了肥料利用率, 显示出良好的应用效果, 实践上可用于吉林省中部一季稻区的水稻推荐施肥。

关键词: 养分专家系统, 吉林, 水稻, 产量, 养分利用率

化肥对促进我国农业持续增产和粮食安全发挥了重要作用^[1]。但是, 化肥的不合理使用也使我国很多地区出现增肥不增产、肥料利用率偏低、生态环境污染等一系列问题, 极大阻碍了农业的可持续发展^[2-4]。为此, 农业部于 2015 年提出了“至 2020 年实现化肥零增长”战略, 推动我国科学施肥技术的研究与推广。目前, 我国常用的推荐施肥方法包括肥料效应法、测土配方施肥法、养分专家系统推荐施肥等^[5]。其中, 养分专家系统推荐施肥 (Nutrient Expert, NE) 是利用 QUEFTS 模型明确作物的养分内在效率, 基于作物产量反应和农学效率之间的关系, 综合 4R 原则而进行推荐施肥的方法^[6-7]。目前, NE 养分专家系统在我国大田作物上已有较广泛的应用, 对优化区域施肥措施、促进节肥增效发挥了重要作用^[7-10]。

吉林是我国重要的粮食主产省, 全国 10 大产粮大县

中有 7 个位于吉林省。水稻作为省内第二大粮食作物, 产量水平较高, 稻米品质优良, 经济效益较好, 水稻产业对保障省域农业发展和农民增收具有重要意义^[11]。但是, 现阶段吉林省农户的水稻养分管理措施还存在很多问题, 如施肥普遍过量、施用方式不合理、养分不平衡等^[12-13], 科学施肥的理念、方法与技术还需进一步研究推广。为此, 本研究通过设置多年多点的大田试验, 研究 NE 养分专家系统推荐施肥方法在吉林省中部一季稻区的应用效果与适用性, 以期为吉林省水稻的科学施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本研究于 2013—2017 年在吉林省中部一季稻区的 4

表 1 吉林省一季稻 NE 田间试验不同区域土壤基本理化性质与多年平均气候状况

地点	年份	试验数	pH	有机质 (克/公斤)	碱解氮 (毫克/公斤)	有效磷 (毫克/公斤)	速效钾	年均气温 (摄氏度)	年均降雨 (毫米)
前郭	2013	4	8.5	16.0	96.4	18.2	143.3	4.9	697
永吉	2013-2017	11	6.1	28.4	122.5	24.5	141.0	4.6	573
九台	2013-2017	22	6.3	26.5	118.5	20.5	137.4	5.8	544
梨树	2014-2017	17	6.5	23.4	74.2	29.9	123.3	4.5	471

个地区设置大田试验，分别为前郭县深井子镇 (n=4)、永吉县万昌镇 (n=11)、九台市兴隆镇 (n=22) 和梨树县小宽镇 (n=17) 共计 54 个试验。各研究地区田间试验的耕层土壤基本理化性质及区域多年平均气候状况详见表 1。

1.2 试验设计

所有田间试验均设计 5 个施肥处理，包括：1) 水稻养分专家系统推荐施肥 (NE)，2) 农民习惯施肥 (FP)，3) NE 推荐施肥基础上不施氮肥 (NE-N)，4) NE 推荐施肥基础上不施磷肥 (NE-P) 和 5) NE 推荐施肥基础上不施钾肥 (NE-K)。其中，FP 处理水稻的施肥量通过调查试验点周边 10 位农户的施肥情况而确定，NE 处理施肥量是通过农户调查采集的土壤、作物和施肥信息，利用水稻 NE 养分专家系统软件计算获得。各试验地区 FP 和 NE 处理的水稻氮、磷、钾肥推荐用量详见表 2。

所有试验采用的氮、磷、钾肥品种分别为尿素 (N 46%)、磷酸二铵 (N18%、P₂O₅ 46%)、氯化钾 (K₂O 60%)。FP 处理的氮肥运筹为基肥：分蘖肥：穗肥 =40%：30%：30%，钾肥运筹为基肥：穗肥 =50%：50%。NE 处理则遵循水稻养分专家系统推荐施肥运筹，氮肥分 4 次施用，比 FP 处理增加一次粒肥，NE 处理的氮肥运筹为基肥：分蘖肥：穗肥：粒肥 =30%：30%：20%：20%，钾肥运筹为基肥：穗肥 =60%：40%。所有施肥处理的磷肥均作基肥施用。除施肥量和施肥运筹外，田间试验其余管理措施均与当地农户保持一致。

所有试验的小区面积均设为 40 平方米，永吉和九台水稻种植密度为 18 万株 / 公顷，前郭和梨树水稻种植密度为 16 万株 / 公顷。试验品种均采用当地主流水稻品种，主要为吉农大系列和吉洋系列，各地区均于 4 月初育苗，5 月中下旬移栽，当年 9 月下旬收获。

1.3 测定项目与方法

所有大田试验的基础土壤样品的采集和测定均用如下方法统一进行^[14]。施基肥前在整个田块均匀布点 15 个取 0-20 cm 耕层土壤，实验室风干磨细过筛后按常规法测定：pH 按水土比 2.5:1，pH 计测定；有机质用重铬酸钾容量法；碱解氮用碱解扩散法—标准酸滴定；有效磷用 0.5 mol/LNaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法；速效钾用 1 mol/LNH₄OAc 浸提—火焰光度法。

大田试验收获前，每个小区按平均穗数取有代表性的 5 穴水稻样品脱粒考种，样品风干后粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，凯氏定氮仪测定全氮，钒钼黄比色法测定全磷，火焰光度计测定全钾^[14]。收获时，每个小区单打单收，每个小区均匀划定 3 个 1 平方米测产区进行测产。稻谷脱粒风干后测定含水量，计算得到稻谷产量。肥料成本和经济效益根据试验当年的稻谷价格、氮、磷、钾肥价格进行计算。

相关参数^[15-16]的计算公式为：

肥料农学利用率 (AE, 公斤 / 公斤) = (施肥处理稻谷产量 - 不施肥处理稻谷产量) / 施肥量

肥料回收利用率 (RE, %) = (施肥处理地上部植株养分积累量 - 不施肥处理地上部植株养分积累量) / 施肥量 × 100

肥料偏生产力 (PFP, 公斤 / 公斤) = 施肥处理稻谷产量 / 施肥量。

1.4 数据统计分析

所有试验数据均采用 Excel 软件计算，采用 SPSS17.0 软件的 T 检验方法比较处理间在 p = 0.05 水平上的差异显著性。

2 结果

表 2 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的施肥量比较

地点	施氮量 (公斤 N/ 公顷)			施磷量 (公斤 P ₂ O ₅ / 公顷)			施钾量 (公斤 K ₂ O/ 公顷)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	167.0 b	202.3 a	-35.3	68.0 b	85.3 a	-17.3	91.3 a	88.8 a	2.5
永吉	173.5 b	190.0 a	-16.5	71.6a	75.0 a	-3.4	90.7 a	76.0 b	14.7
九台	168.4a	165.5a	3.0	69.0 b	73.6 a	-4.6	89.5 a	82.2 b	7.3
梨树	171.4 b	200.0 a	-28.6	65.5 b	74.7 a	-9.2	87.8 b	105.0 a	-17.2
全部	170.3 b	184.1 a	-13.8	68.4 b	75.1 a	-6.7	89.3 a	88.6 a	0.7

注：NE 为养分专家系统推荐施肥，FP 为农民习惯施肥，ΔNE-FP 为 NE 与 FP 施肥量的差值，同一地点处理均值后不同的小写字母表示处理间差异显著，下同。

2.1 水稻 NE 养分专家系统的节肥效应

表 2 显示, 吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理施肥量差异较大。氮肥用量以九台市明显较低, 磷肥、钾肥用量则分别以前郭县和梨树县明显较高。相比之下, NE 处理的施肥量在不同区间差异较小。前郭县、永吉县和梨树县三个地区 NE 处理的氮肥用量与 FP 处理相比均显著较低, 九台市则非常接近。四个地区的磷肥用量均以 NE 处理低于 FP 处理, 除永吉县外均表现出显著差异。梨树县 NE 处理的钾肥用量显著低于 FP 处理, 其余三个地区则均相对较高。总体来看, 吉林省中部一季稻区 NE 处理的氮、磷肥用量显著低于 FP 处理, 分别降低 7.5% 和 8.9%, 钾肥用量则略高于 FP 处理, 但增幅不显著。

2.2 水稻 NE 养分专家系统的产量效应与经济效益

吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理的稻谷产量水平在 8.78 ~ 10.36 吨 / 公顷之间, 平均为 9.36 吨 / 公顷 (表 3)。NE 处理的稻谷产量水平在 8.79 ~ 10.26 吨 / 公顷之间, 平均为 9.47 吨 / 公顷, 较 FP 处理平均提高 0.11 吨 / 公顷, 但并无显著差异。成本方面, 前郭县和梨树县 NE 处理的化肥成本显著低于 FP 处理, 而永吉县和九台市则无显著差异, 总体来看 NE 处理显著低于 FP 处理, 平均减少化肥投入 91 元 / 公顷。由于前郭县 NE 处理的平均稻谷产量低于 FP 处理, 因此其收益也较低, 而其余三个地区 NE 处理的收益则高于 FP 处理。总体上, 四个地区 NE 处理与 FP 处理相比平均增收 440 元 / 公顷, 但并无显著差异。

2.3 水稻 NE 养分专家系统的氮肥利用效率

表 4 显示, 吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理的氮肥农学利用率在 14.1 ~ 16.8 公斤 / 公斤之

间, 平均为 15.3 公斤 / 公斤, 氮肥回收利用率分布在 20.3% ~ 42.1% 之间, 平均为 28.6%, 氮肥偏生产力分布在 37.7 ~ 48.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 44.1 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比, NE 处理显著提高了永吉县、九台市和梨树县的氮肥农学利用率, 并显著提高了永吉县和梨树县的氮肥回收利用率和偏生产力。由于前郭县 NE 处理的稻谷产量低于 FP 处理, 因此该地区 NE 处理的氮肥农学利用率、回收利用率和偏生产力较 FP 处理显著下降。总体来看, 四个地区 NE 处理的氮肥农学利用率和偏生产力平均分别为 17.0 和 48.0 公斤 / 公斤, 显著高于 FP 处理, 平均分别提高 11.1% 和 8.8%, 氮肥回收利用率平均为 29.2%, 与 FP 处理无显著差异。

2.4 水稻 NE 养分专家系统的磷肥利用效率

吉林省中部一季稻区 NE 处理的磷肥农学利用率、回收利用率和偏生产力总体上均显著高于 FP 处理 (表 5)。不同地区的 FP 处理的磷肥农学利用率在 7.7 ~ 16.6 公斤 / 公斤之间, 平均为 9.6 公斤 / 公斤, 磷肥回收利用率分布在 11.2% ~ 25.1% 之间, 平均为 15.9%, 磷肥偏生产力分布在 101.1 ~ 114.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 108.0 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比, NE 处理显著提高了四个地区的磷肥农学利用率和偏生产力, 并显著提高了九台市的磷肥回收利用率。不同地区的 NE 处理的磷肥农学利用率在 36.3 ~ 43.8 公斤 / 公斤之间, 平均为 42.5 公斤 / 公斤, 较 FP 处理提高 3.42 倍; 磷肥回收利用率分布在 8.3% ~ 27.0% 之间, 平均为 19.5%, 较 FP 处理提高 22.6%; 磷肥偏生产力分布在 115.4 ~ 125.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 120.1 公斤 / 公斤, 较 FP 处理提高 11.2%。

表 3 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的产量与经济效益比较

地点	产量 (吨 / 公顷)			化肥成本 (元 / 公顷)			经济效益 (元 / 公顷)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	9.63 a	10.36 a	-0.73	1493 b	1726a	-233	23110a	24855a	-1511
永吉	10.26 a	9.98 a	0.28	1603 a	1609a	-7	28606a	27916a	685
九台	9.58 a	9.31 a	0.27	1555 a	1536a	19	26584a	25817a	748
梨树	8.79 a	8.78 a	0.01	1549 b	1804a	-255	24566a	24483a	337
全部	9.47 a	9.36 a	0.11	1558 b	1649 a	-91	26103 a	25753 a	440

表 4 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的氮肥利用率比较

地点	氮肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			氮肥回收利用率 (%)			氮肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	14.8 a	15.4 a	-0.6	35.6 b	42.1 a	-6.5	49.6 a	44.2 b	5.4
永吉	16.9 a	14.2 b	2.7	23.4 a	20.3 b	3.1	51.3 a	45.2 b	6.1
九台	17.8 a	16.8 b	1.0	32.2 a	33.5 a	-1.3	49.0 a	48.5 a	0.5
梨树	16.6 a	14.1 b	2.5	27.5 a	24.5 b	3.0	44.2 a	37.7 b	6.5
全部	17.0 a	15.3 b	1.7	29.2 a	28.6 a	0.6	48.0 a	44.1 b	3.9

表 5 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的磷肥利用率比较

地点	磷肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			磷肥回收利用率 (%)			磷肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	36.3 a	16.6 b	19.7	8.3 a	11.2 a	-2.9	121.8 a	113.1 b	8.7
永吉	41.7 a	13.0 b	28.7	27.0 a	25.1 a	1.9	125.5 a	114.5 b	11.0
九台	43.8 a	7.7 b	36.1	21.6 a	14.4 b	7.2	120.8 a	109.2 b	11.6
梨树	42.6 a	8.1 b	34.5	14.4 a	13.0 a	1.4	115.4 a	101.1 b	15.3
全部	42.5 a	9.6 b	32.9	19.5 a	15.9 b	3.6	120.1 a	108.0 b	12.1

2.5 水稻 NE 养分专家系统的钾肥利用效率

吉林省中部一季稻区 NE 处理的钾肥农学利用率总体上显著高于 FP 处理，而回收利用率和偏生产力则无显著差异 (表 6)。不同地区的 FP 处理的钾肥农学利用率在 5.4 ~ 16.1 公斤 / 公斤之间，平均为 6.8 公斤 / 公斤，钾肥回收利用率分布在 23.5% ~ 42.5% 之间，平均为 30.5%，钾肥偏生产力分布在 71.9 ~ 113.4 公斤 / 公斤之间，平均为 93.3 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比，NE 处理显著提高了四个地区的钾肥农学利用率，提高了梨树县的钾肥回收利用率和偏生产力及永吉县的钾肥回收利用率。而前郭县的钾肥回收利用率和偏生产力、永吉县的钾

肥偏生产力则以 NE 处理显著低于 FP 处理。不同地区的 NE 处理的钾肥农学利用率在 27.0 ~ 34.5 公斤 / 公斤之间，平均为 33.4 公斤 / 公斤，较 FP 处理提高 3.91 倍；钾肥回收利用率分布在 24.0% ~ 53.2% 之间，平均为 35.6%，较 FP 处理提高 16.7%；钾肥偏生产力分布在 89.6 ~ 99.8 公斤 / 公斤之间，平均为 93.5 公斤 / 公斤，与 FP 处理基本一致。

3 结论

多年多点试验结果显示，吉林省中部一季稻区采用水稻养分专家系统推荐施肥方法与 FP 处理相比，在显著降

表 6 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的钾肥利用率比较

地点	钾肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			钾肥回收利用率 (%)			钾肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	27.0 a	16.1 b	10.9	24.0 b	42.5 a	-18.5	90.6 b	102.6 a	-12.0
永吉	33.2 a	8.6 b	24.6	53.2 a	40.2 b	13.0	99.8 b	113.4 a	-13.6
九台	34.5 a	5.4 b	29.1	26.9 a	23.5 a	3.4	94.0 a	98.2 a	-4.2
梨树	33.8 a	5.4 b	28.4	38.2 a	30.4 b	7.8	89.6 a	71.9 b	17.7
全部	33.4 a	6.8 b	26.6	35.6 a	30.5 a	5.1	93.5 a	93.3 a	0.2

低氮、磷肥投入的基础上小幅提高了稻谷产量和经济效益,而且显著提高氮肥的农学利用率和偏生产力、磷肥的农学利用率、回收利用率和偏生产力及钾肥的农学利用率。结果证明水稻养分专家系统推荐施肥方法在吉林省中部一季稻区具有良好的应用效果与推广前景。

参考文献

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.

[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] Peng S B, Tang Q Y, Ying Z. Current status and challenges of rice production in China.[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3-8.

[4] 李娟, 李松昊, 邬奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, (5): 23-28.

[5] 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, 18(1): 95-102.

[6] 何萍, 金继运, Pampolino, 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] Xu X P, He P, Yang F Q, et al. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice in China [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 33-42.

[8] Chuan L M, He P, Jin J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. Field Crops Research, 2013, 146: 96-104.

[9] Xu X P, He P, Zhang J J, et al. Spatial variation of attainable yield and fertilizer requirements for maize at the regional scale in China [J]. Field Crops Research, 2017, 203: 8-15.

[10] Yang F Q, Xu X P, Ma J C, et al. Experimental validation of a new approach for rice fertilizer recommendations across smallholder farms in China [J]. Soil Research, 2017, 55: 579-589.

[11] 张大瑜, 邵玺文, 凌凤楼, 等. 吉林省水稻生产省域尺度比较优势分析与建议[J]. 中国农学通报, 2011, 27(2): 289-293.

[12] 沈娟, 高强. 吉林省水稻施肥现状的调查分析[J]. 东北农业科学, 2011, 36(2): 40-43.

[13] 焉莉, 冯国忠, 兰唱, 等. 基于GIS的吉林省水稻种植区施氮效果及减排潜力分析[J]. 中国农业科学, 2017 (17): 3365-3374.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.

[16] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 934-941.

