

基于产量反应的东北一季稻推荐施肥方法的可行性

徐新朋¹, 王寅², 刘双全³, 胡仁^{1,4}, 侯云鹏⁵, 雷秋良¹,
仇少君¹, 赵士诚¹, 何萍^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林长春 130118;
3 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江哈尔滨 150086; 4 长江大学农学院, 湖北荆州 434000;
5 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 【目的】推荐施肥是提高作物产量和肥料利用率的有效措施。基于产量反应的养分专家系统 (Nutrient Expert for Rice, NE) 易于操作, 便于推广。通过大量田间试验, 验证了其在东北一季稻上的应用效果。

【方法】于 2013—2018 年在东北水稻主产区黑龙江省和吉林省共开展了 115 个田间试验, 每个试验包括 6 个处理: 1) 基于水稻养分专家系统推荐施肥处理 (NE); 2) 农民习惯施肥措施处理 (FP); 3) 基于测土配方施肥或当地农技部门推荐施肥的处理 (ST); 4)~6) 分别为基于 NE 的不施氮 (N)、不施磷 (P) 和不施钾 (K) 处理, 用于计算养分利用率。水稻收获期调查产量, 依据肥料成本, 计算净效益和肥料利用率。【结果】NE、FP 和 ST 处理间的水稻产量无显著差异 ($P=0.185$), 但以 NE 处理的产量较高, 平均为 9068 kg/hm^2 , 与 FP 和 ST 处理相比, 分别增加了 344 和 196 kg/hm^2 , 其产量差随着 NE 系统不断优化趋于稳定。虽然 NE 处理的肥料成本 (TFC) 最高, 但其净效益 (GRF) 比 FP 和 ST 处理分别高 1043 和 537 元/hm^2 , 这部分效益都来自于产量的增量。养分回收率 (RE) 均以 NE 处理最高, 与 FP 和 ST 处理相比, 氮素回收率分别提高了 3.3 和 2.3 个百分点, 磷素回收率分别提高了 3.5 和 3.6 个百分点, 钾素回收率分别提高了 7.3 和 4.6 个百分点。与 FP 处理相比, NE 处理的氮和磷的农学效率 (AE) 分别显著提高 2.7 kg/kg ($P=0.022$) 和 4.1 kg/kg ($P=0.030$), 3 个处理的钾素农学效率无显著差异。肥料偏生产力 (PFP) 的大小与施肥量呈显著负相关, NE 和 ST 处理 N 的偏生产力显著高于 FP 处理 ($P=0.004$), ST 处理磷素偏生产力显著高于 NE 和 FP 处理 ($P=0.001$), 但 FP 处理钾素偏生产力高于 NE 和 ST 处理, 并与 NE 处理差异达到了显著水平 ($P=0.028$)。【结论】与以常规测土施肥为基础的推荐施肥相比, 基于产量反应的养分专家系统 (NE 系统) 的推荐施肥量和比例更符合作物对养分的需求, 在吉林和黑龙江两个省份的大田试验中均获得了相同或更高的水稻产量。由于 NE 系统无论是否进行土壤测试都可用来进行推荐施肥, 因而是更加方便和可行的一季稻施肥推荐方法。

关键词: 水稻; 养分专家系统; 产量反应; 推荐施肥

Availability and effect of fertilizer recommendation based on crop yield response for single-season rice in Northeast China

XU Xin-peng¹, WANG Yin², LIU Shuang-quan³, HU Ren^{1,4}, HOU Yun-peng⁵, LEI Qiu-liang¹,
QIU Shao-jun¹, ZHAO Shi-cheng¹, HE Ping^{1*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3 Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 4 College of Agriculture, Yangtze University, Jinzhou 434000, China; 5 Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: 【Objectives】Fertilizer recommendation is the base of obtaining high yield and nutrient efficiency. The Nutrient Expert (NE), mainly based on crop yield response, is an effective and convenient fertilizer

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200101、2018YFD0200210); 国家自然科学基金项目 (31801938); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1610132019047、1610132019022)。

联系方式: 徐新朋 E-mail: xuxinpeng@caas.cn; * 通信作者 何萍 E-mail: heping02@caas.cn

recommendation method. We studied its availability and effect in the single-season rice production in Northeast China. 【 **Methods** 】 A total of 115 on-farm experiments were conducted in Heilongjiang and Jilin Provinces from 2013 to 2018. There were six fertilizer treatments in each experiment, in which the NPK fertilizer amount and ratio were designed with NE system (NE), farmers' practices (FP), and conventional fertilizer recommendation based on soil testing (ST), and nitrogen, phosphorus and potassium omission treatments based on NE treatment were setup for the calculation of nutrient use efficiencies. The rice yield, total fertilizer cost and economic benefit were investigated at harvest of rice. 【 **Results** 】 Although the differences in grain yields among NE, FP, and ST treatments did not reach significant levels ($P = 0.185$), NE treatment had an average yield of 9068 kg/hm², which was 344 kg/hm² and 196 kg/hm² higher than those of FP and ST, and the yield gaps with FP and ST was kept stable after the optimization of NE system. Despite of the highest total fertilizer cost (TFC), the gross return above fertilizer cost (GRF) in NE treatment was 1043 and 537 yuan/hm² higher than those in FP and ST treatments, partially due to the benefit derived from yield increases. All the recovery efficiencies (RE) of N, P and K fertilizers were the highest in NE treatment, and compared with FP and ST treatments, the RE increment for N were by 3.3 and 2.3 percentage points, for P by 3.5 and 3.6 percentage points, and for K by 7.3 and 4.6 percentage points. And the agronomy efficiencies of N and P fertilizers in NE treatment were significantly higher than those in FP treatment, with increment of 2.7 kg/kg for N ($P = 0.022$) and 4.1 kg/kg for P ($P = 0.030$), while agronomy efficiency for K did not increased significantly. Partial factor productivity (PFP) of fertilizer was negatively correlated with the amount of fertilizer application. PFP of N fertilizer in NE and ST treatments were significantly higher than those in FP treatment ($P = 0.004$), PFP of P fertilizer in ST treatment was significantly higher than those in NE and FP treatments ($P = 0.001$), while PFP of K fertilizer in FP treatment was higher than in NE and ST treatments, and reached significant level compared with NE treatment ($P = 0.028$). 【 **Conclusions** 】 Using the NE fertilization recommendation system, similar or even higher grain yields and fertilizer efficiencies have been achieved compared with using the conventional fertilizer recommendation system in the large amount of field experiments in five years, which verifies the availability of the NE system in rice production. As the NE system can work with or without soil testing, it is a practical and promising fertilizer recommendation method in northeast rice growing-region.

Key words: rice; nutrient expert system; yield response; fertilizer recommendation

我国是一个水稻 (*Oryza sativa* L.) 生产和消费大国, 其水稻总产量位居世界第一, 占世界水稻总产量的 27.9%^[1]。随着品种改良、推荐施肥和病虫害防治等措施的应用, 我国水稻产量得到显著提高^[2-3], 水稻单产在过去 20 年间增加了 20%^[4], 但仍需持续增产才能满足我国人口对水稻的需求^[5-6]。肥料在提高水稻产量, 促进高产水稻品种潜力发挥上具有重要作用^[2,7]。由于农民过分追求高产, 过量或不平衡施肥现象极为普遍, 由此引起的肥料低利用率和环境污染等问题已备受关注^[8-11]。研究表明, 当前我国水稻氮肥施用量高出世界平均水平一半以上^[12-14], 水稻氮肥回收率不足 30%, 农学效率低于 10 kg/kg^[13,15]。

近年来, 诸多管理策略用于水稻生产实践, 如水肥管理、作物模型以及结合叶面积指数和 SPAD 值等的实地养分管理策略等都显著提高了水稻产量^[16-18], 传统的土壤测试和肥料效应函数法在确定

施肥量并提高肥料利用率方面发挥了积极作用。但这些方法较多是基于某一地块的单一养分吸收参数, 不能给出不同地区或不同作物的个性化合理施肥推荐, 且样品采集、处理和分析等也将消耗大量的人力、物力和财力。我国的小农户经营模式, 以及农民有限的知识水平使得许多方法难以实现, 传统的土壤测试不及时或条件不具备等因素, 很难做到一家一户依据测土进行施肥。因此, 建立一种易于操作, 且科学、可靠的肥料推荐施用方法是非常必要的。养分专家 (Nutrient Expert, NE) 支持决策系统, 是一种应用地上部养分吸收或产量反应表征土壤养分供应能力而建立的推荐施肥方法, 其避免了土壤测试值与作物养分吸收和产量之间相关性弱的问题。NE 系统在土壤测试结果不及时或条件不具备的情况下, 使用者通过简单的问答式操作就可以得出施肥方案。为此, 本研究介绍了水稻养分专

家系统的推荐施肥原理，并于 2013—2018 年在东北的吉林省和黑龙江省水稻主产区开展了多点田间试验，对 NE 系统中北方一季稻推荐施肥方法进行田间验证与优化，旨在为指导我国北方水稻高效施肥、实现高产并提高肥料利用率提供科学的养管理方法。

1 材料与方法

1.1 水稻养分专家系统

供试水稻养分专家系统是以中国水稻主产区 5556 个田间试验数据为支撑，结合 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型模拟不同生态区水稻产量与养分吸收特征关系，并依据产量反应和农学效率间的内在联系进行推荐施肥和养管理的方法。田间试验涵盖了中国水稻主要的气候类型和轮作体系 (北方的一季稻，长江中下游的中稻，以及南方的早、晚稻)。QUEFTS 模型通过考虑三大营养元素两两间的交互作用，应用线性-抛物线-平台函数，采用养分内在效率 (即单位养分所生产的籽粒产量) 计算最大累积边界和最大稀释边界参数，进而模拟作物一定目标产量下的地上部养分吸收量 (图 1)^[19-20]。然而，不同生态区或轮作制度下的养分吸收特征存在一定差异，如北方的一季稻每生产 1 t 籽粒，地上部的 N、P 和 K 的吸收量分别为 14.8、3.8 和 15.0 kg，而长江中下游的中稻和南方的早晚稻分别为 17.1、3.4 和 18.4 kg^[21]。

NE 系统采用作物施肥后的产量增量即产量反应来表征土壤某种养分的基础供应能力，同一生态区域在一定目标产量下，施用某种养分的产量反应越

高，表明该种养分的土壤供应能力越低，反之亦然^[22-24]。对于没有可计算产量反应试验的地区，NE 系统可根据目标产量和相对产量计算产量反应，相对产量即不施某种养分处理的产量与氮磷钾全施处理可获得产量的比值。在水稻养分专家系统中，早稻、中稻、晚稻和一季稻分别使用各自不同的相对产量和产量反应参数^[25]。养分专家系统中采用产量反应和农学效率间的关系确定施肥量，即施氮量 = 产量反应 / 农学效率。对于磷、钾肥的推荐除了考虑产量反应外，还要考虑维持土壤养分平衡部分，就是要从经济效益和维持土壤肥力方面考虑归还一定目标产量下作物移走的部分磷、钾的养分量，推荐施磷或施钾量 = 作物产量反应施磷或施钾量 + 维持土壤养分平衡的部分^[26]。

1.2 试验设计

于 2013—2018 年在东北一季稻种植区的黑龙江省和吉林省共计开展了 115 个田间试验，从产量、肥料成本、净效益和肥料利用率方面，对一季稻的养分专家系统进行验证与优化。每个试验包括的处理有：1) 基于水稻养分专家系统推荐施肥处理 (NE)，播前调查试验地块的质地、颜色、是否使用有机肥、施肥量、秸秆处理方式以及该地块过去 3~5 年的水稻平均产量等信息，输入 NE 系统得出施肥量和施肥措施；2) 农民习惯施肥措施处理 (FP)，按照农民自己的施肥措施进行管理；3) 基于测土配方施肥处理 (ST)，如测土结果不及时或无测土条件，使用当地农技推广部门推荐的施肥量；4)~6) 分别为基于 NE 的不施氮 (NE-N)、不施磷 (NE-P) 和不施钾 (NE-K) 处理。氮肥分为基肥、返青肥、分蘖肥和孕穗肥施用且比例为 3 : 3 : 2 : 2；磷肥作为基

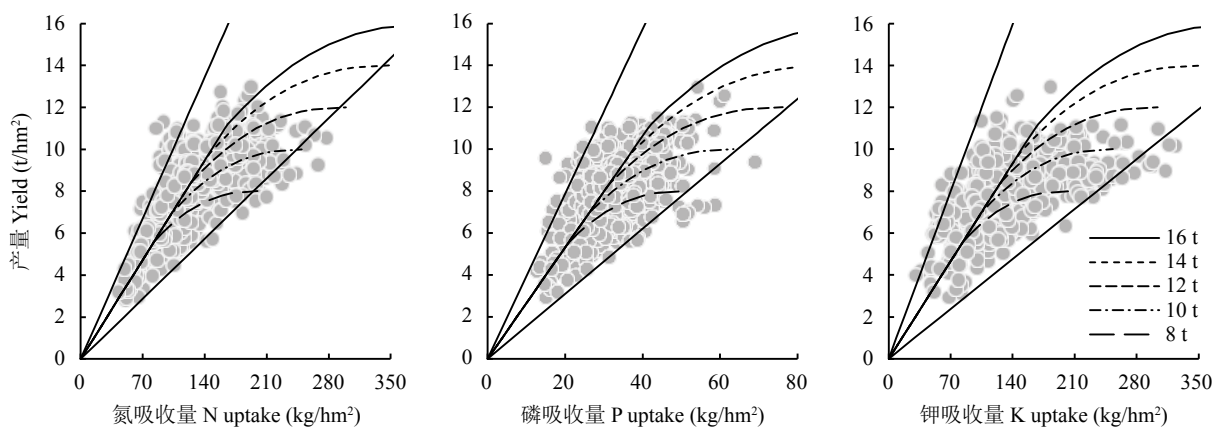


图 1 不同潜在产量水平下一季稻地上部养分需求量

Fig. 1 The nutrient requirements for single-season rice with different potential yields

肥一次性施用; 钾肥分为基肥和孕穗肥施用且比例为 5 : 5。基肥于插秧前撒施后翻耕与土混匀, 追肥为撒施。每个小区面积 30 m², 以设置多点试验为重复。水稻品种使用当地主栽品种, 如龙香稻 1 号、龙稻 18、绥粳 18、垦鉴稻 6 号和瑞丰 12 等; 肥料使用尿素、磷酸氢二铵、过磷酸钙、氯化钾、硫酸钾等, 同一个试验中各处理设置的密度相同, 且病虫害防治进行统一管理。在黑龙江省 2013—2018 年各选 2、3、2、2、3、2 个村分别开展了 8、10、10、10、6、5 个田间试验; 在吉林省 2013 年选 2 个村开展了 10 个田间试验, 2014—2018 年各

选 3 个村分别开展 10、10、10、14、12 个田间试验。具体土壤理化性状分布范围见表 1。

1.3 测定方法

水稻成熟后, 每个小区中央部分均匀划定 3 个 1 m × 1 m 测定籽粒产量和含水量。采集有代表性的植株 5 穴, 带回室内分成籽粒和秸秆, 于 60℃ 下烘干 (72 h) 至恒重称重, 计算收获指数, 并取部分烘干样品粉碎后测定氮、磷和钾养分含量。秸秆和籽粒中的全量 N、P 和 K 含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 方法消煮, 并分别采用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定。

表 1 试验土壤基础理化性质
Table 1 Soil properties of the experimental sites

省份 Province	pH	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (%)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
黑龙江 Heilongjiang	5.4~6.8	32.6~46.4	1.6~2.4	15.7~37.6	103.0~269.5
吉林 Jilin	4.5~7.7	17.8~31.2	1.0~1.5	12.2~50.9	86.4~197.3

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2010 进行分析处理, 使用 SPSS 软件在 0.05 水平上对不同处理间的产量、肥料成本、净效益和养分利用率进行 ANOVA 分析。

氮素回收利用率 = (施氮区植株地上部氮累积量 - 不施氮区植株地上部氮累积量) / 施氮量 × 100%, 磷和钾素的回收利用率计算同氮;

氮素农学效率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量, 磷和钾素农学效率计算同氮;

氮素偏生产力 = 施氮区产量 / 施氮量, 磷和钾偏生产力计算同氮;

肥料成本为氮、磷和钾肥料成本总和;

净效益为收获后的产值减去肥料成本和额外追肥成本。

2 结果与分析

2.1 不同处理施肥量比较

就全部数据而言, NE 处理的氮、磷和钾肥施用量 (N、P₂O₅ 和 K₂O, 下同) 分别为 164、66 和 91 kg/hm², 其分布范围分别处于 140~195、38~96 和 45~123 kg/hm²; FP 处理的施肥量分别为 173、67 和 82 kg/hm², 其分布范围分别处于 105~220、35~120 和 40~120 kg/hm², ST 处理的施肥量分别为 164、61 和 87 kg/hm², 其分布范围分别处于 105~194、35~80 和 45~112 kg/hm² (图 2)。虽然

3 个处理的平均施肥量比较接近, 但 FP 处理的施氮量显著高于 NE 和 ST 处理 ($P = 0.001$); NE 和 FP 处理的施磷量显著高于 ST 处理 ($P < 0.001$); NE 处理施钾量显著高于 ST 和 FP 处理 ($P < 0.001$)。黑龙江省 NE 和 FP 处理的平均施氮量相同 (158 kg/hm²), 并显著高于 ST 处理 (144 kg/hm², $P = 0.003$); 但磷肥和钾肥用量均以 NE 处理最高 (分别为 66 和 91 kg/hm²)。吉林省 FP 处理的平均施氮量和施磷量最高, 分别为 185 和 75 kg/hm², 并显著高于 NE 和 FP 处理 ($P < 0.001$), 施钾量则以 NE 处理最高 (92 kg/hm²), 与 FP 处理无显著差异 (89 kg/hm²), 但显著高于 ST 处理 (84 kg/hm², $P = 0.008$)。

2.2 不同处理的产量和经济效益

图 3 显示, 就全部数据而言, 3 个处理间的产量无显著差异 ($P = 0.185$), 但以 NE 处理的产量最高, 平均为 9068 kg/hm², 相比 FP 和 ST 处理分别高 344 和 196 kg/hm², 增幅分别为 3.9% 和 2.2%。吉林省的整体水稻产量高于黑龙江省, 吉林省 3 个处理的产量无显著差异, 但黑龙江省的 NE 处理产量显著高于 FP 处理 ($P = 0.027$), 且黑龙江省的 NE 处理与 FP 和 ST 处理的产量差要高于吉林省, 黑龙江省的产量差分别为 655 和 421 kg/hm², 增幅分别为 8.0% 和 5.0%, 吉林省的产量差分别为 114 和 28 kg/hm², 增幅分别为 1.2% 和 0.3%。随着 NE 系统的不断优化, 处理间产量差趋于稳定, NE 与 FP 处理的产量差维持在 400~600 kg/hm², NE 与 ST 处理间

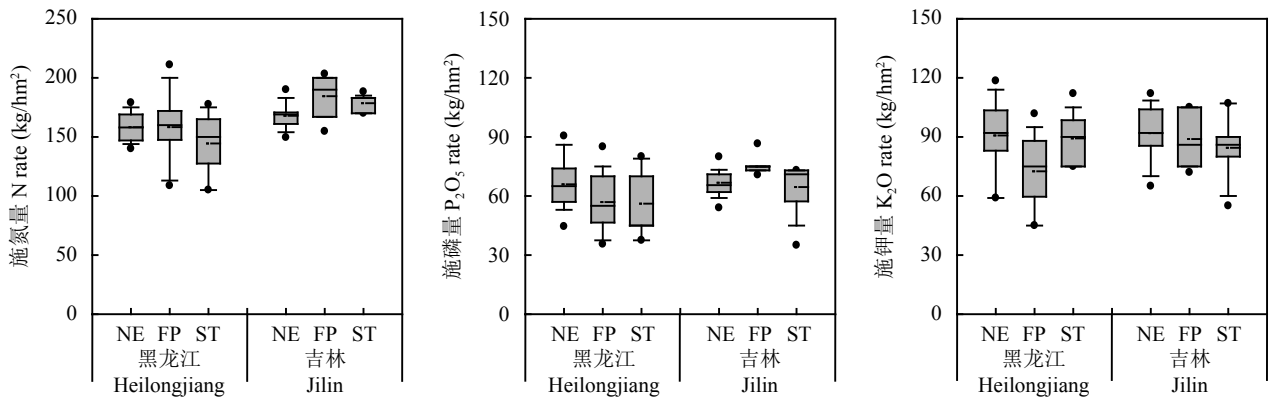


图2 不同推荐施肥方法推荐的施肥量

Fig. 2 Fertilizer application rate recommended by different methods

[注 (Note) : NE—养分专家推荐系统 Nutrient Expert system; FP—农民习惯施肥 Farmer's practice; ST—测土施肥推荐 Recommendation by soil test; 中间实线代表中值, 短线代表均值, 方框上下边缘、上下实线和实心圆圈分别代表上下 25% 的数值、90% 和 10% 的数值、95% 和 5% 的数值 The middle solid line represents the median value and the short line represents the mean value, the upper and lower edges of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circles represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values, respectively.]

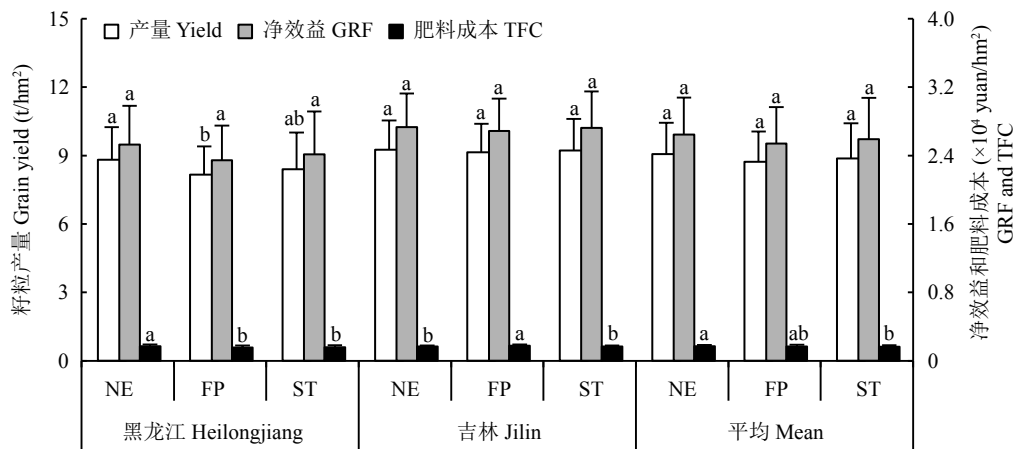


图3 不同施肥处理的籽粒产量、肥料成本和净效益

Fig. 3 Grain yields, fertilizer costs and economic benefits of different fertilization treatments

[注 (Note) : NE—养分专家推荐系统 Nutrient expert system; FP—农民习惯施肥 Farmer's practice; ST—测土施肥推荐 Recommendation by soil test; TFC—肥料消耗 Total fertilizer cost; GRF—经济效益 Gross return above fertilizer cost. 柱上不同字母表示同一指标在同一地点不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same site ($P < 0.05$).]

的产量差维持在 $150 \sim 250 \text{ kg/hm}^2$ (图 4)。全部试验平均肥料成本结果 (图 3) 显示, NE 处理的肥料成本最高, 因为其钾肥用量较高, 比 FP 和 ST 处理分别高 17 和 63 元/ hm^2 , 且与 ST 处理差异达到显著水平 ($P = 0.036$)。然而, 黑龙江和吉林的肥料成本的变化结果有所不同, 黑龙江省 NE 处理的肥料成本显著高于 FP 和 ST 处理 ($P = 0.001$), 分别高 164 和 139 元/ hm^2 ; 而吉林省的 FP 处理肥料成本显著高于 NE 和 ST 处理 ($P < 0.001$), 分别高 92 和 99 元/ hm^2 。净效益 (GRF) 以 NE 处理的最高, 但 3 个处理间无显著差异 ($P = 0.215$)。总体而言, NE 处理的

GRF 比 FP 和 ST 处理分别高 1043 和 537 元/ hm^2 , 增幅分别为 4.1% 和 2.1%, 其中黑龙江省 NE 处理的 GRF 分别高 1834 和 1149 元/ hm^2 , 增幅分别为 7.8% 和 4.8%, 吉林省 NE 处理的 GRF 分别高 456 和 84 元/ hm^2 , 增幅分别为 1.7% 和 0.3%。NE 处理的 GRF 均来自于增产, 因为 NE 处理的总体肥料成本要高于 FP 和 ST 处理。

2.3 不同处理的肥料利用率

表 2 结果显示, 两省养分回收利用率平均值以 NE 处理的最高, 与 FP 和 ST 处理相比, 氮素养分回收利用率分别提高了 3.3 和 2.3 个百分点, 磷素养分

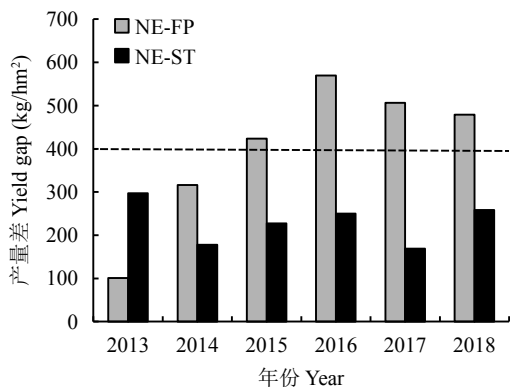


图 4 不同处理 2013—2018 年间产量差变化

Fig. 4 The yield gap from 2013 to 2018 under different fertilization treatments

回收利用率分别提高了 3.5 和 3.6 个百分点, 钾素养分回收利用率分别提高了 7.3 和 4.6 个百分点。各省 3 个处理间的养分 RE 值无显著差异, 但均以 NE 处理的最高。NE 处理的氮、磷农学效率显著高于 FP 处理, 分别高 2.7 kg/kg ($P=0.022$) 和 4.1 kg/kg ($P=0.03$), 与 ST 处理无差异; 钾素农学效率在 3 个处理间无显著差异。各省 3 个处理间 AE 均无显著差异, 除吉林省的钾的农学效率外, 与 FP 相比, 其余 AE 都有所提高, 其中黑龙江省氮、磷和钾的农学效率分别提高了 3.3、5.8 和 2.0 kg/kg, 吉林省氮和磷的农学效率分别提高了 2.3 和 2.9 kg/kg。NE 和 ST 处理氮肥偏生产力显著高于 FP 处理 ($P=0.004$), ST 处理的磷肥偏生产力显著高于 NE 和 FP 处理 ($P=0.001$), 但 FP 处理钾肥偏生产力高于 NE 和 ST 处理, 并与 NE 处理的差异达到显著水平 ($P=0.028$)。偏生产力的大小与施肥量呈显著负相关, 本研究中黑龙江省 ST 处理的施氮量和施磷量及 FP 处理施钾量最低, 吉林省 NE 处理的施氮量及 ST 处理的施磷量和施钾量最低, 其所对应的 PFP 也最高。

3 讨论

优化施肥管理在指导集约化水稻生产、提高水稻产量、发挥水稻产量潜力方面起着重要作用, 而计算目标产量下的养分需求量是推荐施肥的必需环节。采用 QUEFTS 模型估算小麦、玉米和水稻养分吸收并用于作物养分管理已有诸多报道^[27-29], 该模型通过分析大量的田间试验数据, 并考虑养分间的交互作用估算目标产量下的养分吸收量, 因此可以避免使用个别试验点数据进行推荐施肥而引起的偏差。而应用不同生态区的养分吸收参数进行养分管理可以解决由于气候条件、轮作制度等引起的差

异。研究表明, 北方一季稻的 N 和 K 的养分内在效率要高于南方早中晚稻, 但 P 的养分内在效率却相反^[21]。根据大量田间试验数据得出的养分吸收, 以及应用作物施肥后的产量反应来表征土壤的养分供应能力, 并进行推荐施肥, 可以有效地避免作物对养分的奢侈吸收或不足^[23-24]。NE 系统致力于肥料的合理施用, 是一种基于 4R 养分管理原则的平衡施肥方法, 进而提高产量和养分利用效率, 如本研究中, 黑龙江省 NE 与 FP 处理的平均氮肥用量相同, 而磷肥和钾肥用量则是 NE 处理高于 FP 处理, 但 NE 处理显著提高了水稻产量, 而 FP 处理的施氮量具有很大的变异性, 最大值和最小值相差超过 100 kg/hm²。如 2013 年 NE 和 ST 处理的产量差要高于 NE 与 FP 处理产量差, 其主要原因是 ST 处理当年的施氮量范围仅为 105~130 kg/hm², 而随着施氮量的提高产量也得到了进一步提升。因此, NE 系统的目的是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或不足, 使得施肥量更加科学进而达到高产、高效的目的。

平衡施肥通过提高水稻的产量构成因子、促进养分吸收及转运, 并且可以提升同化物的生产, 提高寒地水稻的抗病性, 进而影响产量和经济效益^[30-31]。但有些农民的习惯施肥, 氮肥和磷肥用量远高于作物对养分的需求量, 是地上部总吸收量的两倍甚至更高, 而有些施肥量则不足, 其不平衡施肥已影响到产量, 并降低了经济效益。彭显龙等^[32]的调查显示, 黑龙江省农民习惯施肥的氮、磷和钾肥用量高低相差均超过 300 kg/hm²。与农民习惯施肥 FP 处理相比, NE 处理的平均肥料成本要高, 但其产量和经济效益也分别提高了 3.9% 和 4.1%, 以黑龙江省的最为明显, 分别增加了 8.0% 和 7.8%, 说明合理施肥具有一定增加产量和经济效益的空间, 但需要根据不同的目标产量和土壤养分供应量进行合理施肥。

平衡施肥在维持高产的同时, 也要提高作物养分利用率, 其宗旨要符合 4R 原则 (选择合适的肥料种类、用量合适、在合适的时间施用在合适的位置) 以满足作物的养分需求^[33], 以达到供需同步。本研究中, 平均 RE 和 AE 均以 NE 处理最高, 但 PFP 与施肥量的高低直接相关。虽然 NE 处理的 N 的回收利用率 (32.4%) 与农民习惯施肥措施相比有所提高, 但是与世界平均水平和 50%~70% 的目标仍存在一定差距^[34-35]。过量或不平衡施肥在农民习惯措施中非常普遍, 但当肥料用量超过一定量时, 水稻产量开始下降, 养分向籽粒中的转运呈负效应^[30], 但同样的施

表 2 不同处理肥料利用率比较
Table 2 Comparison of nutrient use efficiency among fertilizer treatments

省份 Province	处理 Treatment	回收利用率 RE (%)			农学效率 AE (kg/kg)			偏生产力 PFP (kg/kg)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
黑龙江 Heilongjiang	NE	36.9 ± 14.9 a	22.0 ± 15.2 a	49.5 ± 29.4 a	24.3 ± 8.6 a	22.1 ± 16.8 a	16.1 ± 10.3 a	55.7 ± 7.8 ab	138.7 ± 37.5 b	101.2 ± 26.7 b
	FP	31.1 ± 19.6 a	19.9 ± 14.7 a	40.8 ± 28.6 a	21.0 ± 11.1 a	16.3 ± 13.8 a	14.1 ± 14.3 a	53.4 ± 13.3 b	152.6 ± 44.9 ab	121.3 ± 38.6 a
	ST	33.6 ± 15.0 a	16.7 ± 13.2 a	43.1 ± 28.6 a	24.1 ± 10.5 a	20.0 ± 16.8 a	12.4 ± 10.1 a	58.7 ± 10.8 a	158.1 ± 42.9 a	95.6 ± 21.8 b
吉林 Jilin	NE	29.1 ± 10.7 a	21.4 ± 14.7 a	36.5 ± 23.5 a	19.6 ± 7.4 a	14.7 ± 12.8 a	7.7 ± 7.4 a	55.2 ± 7.6 a	139.4 ± 19.7 a	103.4 ± 23.7 b
	FP	27.6 ± 13.0 a	16.8 ± 14.5 a	30.4 ± 18.4 a	17.3 ± 6.9 a	11.8 ± 11.5 a	8.1 ± 9.1 a	50.0 ± 8.3 b	122.7 ± 19.4 b	105.4 ± 23.2 ab
	ST	27.5 ± 12.2 a	18.9 ± 14.7 a	33.3 ± 21.2 a	18.3 ± 7.2 a	15.2 ± 13.6 a	8.8 ± 8.8 a	51.7 ± 8.0 b	149.1 ± 42.5 a	112.6 ± 27.2 a
平均 Average	NE	32.4 ± 13.2 a	21.6 ± 14.9 a	42.1 ± 27.0 a	21.6 ± 8.2 a	17.8 ± 15.1 a	11.3 ± 9.7 a	55.4 ± 7.7 a	139.1 ± 28.6 b	102.5 ± 25.0 b
	FP	29.1 ± 16.2 a	18.1 ± 14.7 a	34.8 ± 23.9 b	18.9 ± 9.1 b	13.7 ± 12.7 b	10.7 ± 12.0 a	51.5 ± 10.9 b	135.5 ± 36.0 b	112.2 ± 31.7 a
	ST	30.1 ± 13.8 a	18.0 ± 14.1 a	37.5 ± 25.1 ab	20.8 ± 9.2 ab	17.2 ± 15.2 ab	10.3 ± 9.6 a	54.7 ± 9.9 a	152.9 ± 42.9 a	105.4 ± 26.4 ab

注 (Note) : NE—养分专家推荐系统 Nutrient Expert system; FP—农民习惯施肥 Farmer's practice; ST—测土施肥推荐 Recommendation by soil test; RE—Recovery efficiency; AE—Agronomic efficiency; PFP—Partial factor productivity; 同列数值后不同字母表示同一地点处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments in the same site at the 0.05 probability level.

肥量结合相应的运筹方式可以显著提高养分累积量^[36]。然而, 基于同一组参数的养分管理方法很难在整个中国水稻生产中实施。因此, 发展针对不同地区或气候类型水稻的推荐施肥和养分管理方法是必要的, 尤其是对我国以小农户为主体的农业经营模式, 需要针对某一具体地块或操作单元给出个性化的施肥方案。

传统的推荐施肥与养分管理方法, 如土壤测试、不同肥料用量试验等结合 SPAD 值、水肥管理等措施, 可以优化根系形态, 控制产量构成因子, 促进养分吸收, 提高水稻产量和利用率^[37-39]。与传统的实地养分管理不同, NE 系统不使用 SPAD 仪或叶色图 (leaf colour chart, LCC) 等, 其依据作物地上部的产量反应或养分吸收来表征土壤养分供应能力, 在有或没有土壤测试结果的情况下都可以使用, 可节省大量的人力、物力和财力。NE 系统是一款基于计算机软件的施肥决策系统, 当前已推出适合不同群体免费使用的版本, 如电脑版、网络版及微信版等, 界面更加简洁, 操作更加简单。NE 系统现已经过多年的田间验证, 在实践上可用于我国东北水稻的推荐施肥, 但需要使用者对地块的基本信息有所了解, 如产量水平、土壤质地等, 并能够在电脑或手机上通过点菜单形式回答相关问题才能获得施肥方案, 虽然系统配有相关操作视频, 但这对于不会相关操作的农民来说是一个挑战。值得注意的是, 本研究中 NE 与 FP 处理间的产量差和养分利用率差异是在栽培措施和品种都相同的基础上得出的, 只是在施肥量、施肥次数和施肥比例上有所差异, 如果将其它措施如高产品种、移栽密度、新型肥料和病虫害管理等^[40-42]融入到水稻养分专家系统中, 其增产、增效会更加明显, 但这需要一个庞大的数据库支撑以满足不同区域的养分管理要求。

4 结论

应用作物地上部产量反应建立的水稻养分专家系统, 在有或无土壤测试结果的情况下均可以进行推荐施肥。在东北一季稻的田间验证结果显示, 与农民习惯施肥和测土施肥相比, 养分专家系统不仅可以节省土壤测试费用, 而且推荐的施肥量、施用时间和比例都更加符合作物的养分需求, 能够平衡氮、磷和钾肥料用量, 其中产量分别增加了 344 和 196 kg/hm², 经济效益分别增加了 1043 和 537 元/hm², 同时提高了肥料利用效率, 表明该方法在我国东北一季稻种植区进行施肥推荐更加方便可行。

参 考 文 献:

- [1] FAOSTAT, 2017. <http://faostat.fao.org>.
- [2] Wang Q, Huang J L, He F, *et al.* Head rice yield of “super” hybrid rice Liangyoupeijiu grown under different nitrogen rates[J]. *Field Crops Research*, 2012, 134: 71–79.
- [3] Qin J Q, Impa S M, Tang Q Y, *et al.* Integrated nutrient, water and other agronomic options to enhance rice grain yield and N use efficiency in double-season rice crop[J]. *Field Crops Research*, 2013, 148: 15–23.
- [4] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
Ministry of Agriculture. China agriculture statistical report[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [5] Shen J B, Cui Z L, Miao Y, *et al.* Transforming agriculture in China: From solely high yield to both high yield and high resource use efficiency[J]. *Global Food Security*, 2013, 2: 1–8.
- [6] Che S G, Zhao B Q, Li Y T, *et al.* Review grain yield and nitrogen use efficiency in rice production regions in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2456–2466.
- [7] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, *et al.* Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. *Nature*, 2012, 490: 254–257.
- [8] 张福锁, 崔振玲, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. *植物学通报*, 2017, 24(6): 687–694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, *et al.* Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2017, 24(6): 687–694.
- [9] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agro-ecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 270–277.
- [10] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 3041–3046.
- [11] Liu Y L, Zhou Z Q, Zhang X X, *et al.* Net global warming potential and greenhouse gas intensity from the double rice system with integrated soil-crop system management: A three-year field study[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 116: 92–101.
- [12] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37–47.
- [13] Sui B, Feng X M, Tian G L, *et al.* Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 99–107.
- [14] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level: 2006/07-2007/08[R]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, 2009.
- [15] Xu X P, He P, Zhao S C, *et al.* Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 186: 58–65.
- [16] Nhamo N, Rodenburg J, Zenna N, *et al.* Narrowing the rice yield gap in East and Southern Africa: Using and adopting existing technologies [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 131: 45–55.
- [17] Chen Y T, Peng J, Wang J, *et al.* Crop management based on multi-splittopdressing enhances grain yield and nitrogen use efficiency in

- irrigated rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 50–57.
- [18] Das D K, Maiti D, Patha K H. Site-specific nutrient management in rice in Eastern India using a modeling approach[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83: 85–94.
- [19] Janssen B H, Guiking F C T, van der Eijk D, *et al.* A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)[J]. *Geoderma*, 1990, 46: 299–318.
- [20] Smaling E M A, Janssen B H. Calibration of QUEFTS: A model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices[J]. *Geoderma*, 1993, 59: 21–44.
- [21] Xu X P, Xie J G, Hou Y P, *et al.* Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 37–45.
- [22] Dobermann A, Witt C, Abdurachman S, *et al.* Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 913–923.
- [23] Pampolino M F, Witt C, Pasuquin J M, *et al.* Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88: 103–110.
- [24] Chuan L M, 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.
- [25] 何萍, 徐新朋, 周卫. 基于产量反应和农学效率的作物推荐施肥方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
He P, Xu X P, Zhou W. Fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [26] 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.
- [27] Maiti D, Das D K, Patha K H. Simulation of fertilizer requirement for irrigated wheat in eastern India using the QUEFTS model[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2006, 52: 403–418.
- [28] Buresh R J, Pampolino M F, Witt C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems[J]. *Plant Soil*, 2010, 335: 35–64.
- [29] Setiyono T D, Walters D T, Cassman K G, *et al.* Estimating maize nutrient uptake requirements[J]. *Field Crops Research*, 2010, 118: 158–168.
- [30] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 836–845.
Hou Y P, Han L G, Kong L L, *et al.* Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 836–845.
- [31] 刘玲玲, 彭显龙, 刘元英, 王诺. 不同氮肥管理条件下钾对寒地水稻抗病性及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2258–2262.
Liu L L, Peng X L, Liu Y Y, Wang N. Effects of K on rice blast and yield under different nitrogen managements in cold area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2258–2262.
- [32] 彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2092–2100.
Peng X L, Wang W, Zhou N, *et al.* Analysis of fertilizer application and its reduction potential in paddy fields of Heilongjiang Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2092–2100.
- [33] Roberts T L. Improving nutrient use efficiency[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2008, 32: 177–182.
- [34] Ladha J K, Pathak H, Krupnik J T, *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85–156.
- [35] Dobermann A. Nutrient use efficiency—measurement and management[A]. Krauss A, Isherwood K, Heffer P. Fertilizer best management practice: General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations[M]. Brussels, Belgium: The IFA Int. Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [36] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1157–1166.
Wang Y W, Guo J X, Kong Y L, *et al.* Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1157–1166.
- [37] 李娜, 杨志远, 代邹, 等. 不同氮效率水稻根系形态和氮素吸收利用与产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2683–2695.
Li N, Yang Z Y, Dai Z, *et al.* The relationships between root morphology, N absorption and utilization and grain yield in rice with different N use efficiencies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2683–2695.
- [38] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式对寒地水稻产量及子粒灌浆的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(22): 4493–4506.
Zhao L M, Li M, Zheng D F, *et al.* Effects of irrigation regimes on yield and grain filling of rice (*Oryza sativa* L.) in cold region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4493–4506.
- [39] 李杰, 冯跃华, 牟桂婷, 等. 基于 SPAD 值的水稻施氮叶值模型构建及应用效果[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(24): 4714–4724.
Li J, Feng Y H, Mou G T, *et al.* Construction and application effect of the leaf value model based on SPAD value in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(24): 4714–4724.
- [40] Zhang Q F. Strategies for developing green super rice[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104: 16402–16409.
- [41] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1095–1103.
Ma X, Yang Y M, Liu Z L, *et al.* Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 1095–1103.
- [42] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 双季稻最佳磷肥和钾肥用量与密度组合研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 598–608.
Xu X P, Zhou W, Liang G Q, *et al.* Optimum combination of phosphorus, potassium and density for double-rice systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 598–608.