

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

徐新朋^{1,2}, 魏丹³, 李玉影³, 谢佳贵⁴, 刘双全³, 侯云鹏⁴, 周卫², 何萍^{2*}

(1 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 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 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】针对当前我国玉米生产中肥料不合理施用带来的肥料利用率低的现状, 以及我国小农户经营、测土施肥实现困难等问题, 建立基于产量反应和农学效率的玉米推荐施肥方法, 玉米养分专家系统 (Nutrient Expert for Hybrid Maize, NE), 研究其在东北春玉米上的应用效果。【方法】于 2010~2014 年共布置了 193 个田间试验, 从产量、经济和环境方面在东北春玉米种植区对玉米养分专家系统进行校正和改进, 包括肥料用量, 产量, 经济效益, 氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 肥利用率和氮素损失等方面。试验包括 5 个处理, 分别为农民习惯施肥 (FP), 玉米养分专家系统的推荐施肥 (NE), 以及基于 NE 处理的减氮、减磷和减钾处理。【结果】NE 平衡了肥料用量, 显著降低了氮肥和磷肥施用量, 与 FP 相比分别降低了 43.5 ($P < 0.001$) 和 23.6 kg/hm^2 ($P < 0.001$), 降幅分别达到了 21.0% 和 27.0%, 但增加了钾肥用量 ($8.3 \text{ kg}/\text{hm}^2$, $P = 0.001$)。全部试验 NE 处理产量显著高于 FP 处理 $0.6 \text{ t}/\text{hm}^2$, 增产率为 5.2% ($P < 0.001$)。5 年平均经济效益 (GRF) NE 处理比 FP 处理增加 $1466 \text{ yuan}/\text{hm}^2$, 增幅为 7.2% ($P < 0.001$), 其中 $1192 \text{ yuan}/\text{hm}^2$ 是通过产量增加带来的, 占总增加量的 81.3%。NE 处理的氮素农学效率 (AEN)、氮素吸收利用率 (REN) 和氮素偏生产力 (PFNP) 比 FP 处理平均分别增加了 5.8 kg/kg 、11.0 个百分点和 16.8 kg/kg , 增幅分别达到了 53.8%、47.8% 和 29.6%; 磷素农学效率 (AEP)、磷素吸收利用率 (REP) 和磷素偏生产力 (PFPP) 平均分别增加了 12.3 kg/kg 、13.5 个百分点和 44.0 kg/kg , 增幅分别达到了 125.9%、87.5% 和 29.6%; 钾素农学效率 (AEK) 和钾素吸收利用率 (REK) 平均分别增加了 4.0 kg/kg 和 13.8 个百分点, 增幅分别达到了 30.2% 和 36.1%, 但钾素偏生产力 (PFPK) 降低了 22.4 kg/kg 。三年定位试验氮肥施用量 NE 处理比 FP 处理共减少 $102.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 地上部氮素吸收量却增加了 $38.7 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 氮素表观损失降低了 $78.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 收获期土壤氮素残留降低了 $63.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 但 NE 处理的三年平均产量达到了 $12.3 \text{ t}/\text{hm}^2$, 比 FP 处理平均高 $0.9 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。【结论】近 5 年, 共 193 个田间试验结果证明, 采用基于玉米产量反应和农学效率的推荐施肥方法不仅增加了产量和经济效益, 提高了肥料利用率, 而且降低了氮素损失, 在实践上可以用于我国东北春玉米的施肥推荐。

关键词: 养分专家系统; 产量反应; 农学效率; 养分利用率; 氮素损失

中图分类号: S143; S513.01 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)06-1458-10

Availability of fertilizer recommendation for spring maize based on yield response and agronomic efficiency in Northeast China

XU Xin-peng^{1,2}, WEI Dan³, LI Yu-ying³, XIE Jia-gui⁴, LIU Shuang-quan³, HOU Yun-peng⁴, ZHOU Wei², HE Ping^{2*}

(1 Institute of Plant Nutrient and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-Release Fertilizer, Beijing 100097, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3 Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 4 Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

收稿日期: 2016-01-14 接受日期: 2016-03-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200101); 国家自然科学基金项目 (31272243); 国家重点基础研究发展计划 (2013CB1274 05); 国际植物营养研究所 (IPNI); 中国农业科学院-国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室 (IARRP-2016-10) 资助。

作者简介: 徐新朋 (1984—), 男, 河北承德人, 博士, 主要从事养分管理研究。E-mail: xinpengxu@163.com

* 通信作者 E-mail: phe@ipni.net

Abstract: [Objectives] Low nutrient use efficiency is mainly caused by irrational fertilization. Present fertilizer recommendation technologies based on soil test or plant diagnose are difficult to be used for smallholder farms due to constraints such as access, cost and timeliness in multiple cropping systems. A fertilizer recommendation method, Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE), is established in base of yield response and agronomic efficiency.

[Methods] In this paper, 193 on-farm experiments were conducted in 2010–2014 to validate and optimize the effects of Nutrient Expert for Hybrid Maize from agronomic, economic and environmental aspects on spring maize in the Northeast China. Five treatments were designed in the maize field experiments, including (1) farmers' practices (FP), (2) nitrogen, phosphorous and potassium fertilizer input calculated using NE, (3–5) eliminating nitrogen, phosphorous or potassium input in the NE treatment, which were used for the calculation of nutrient use efficiencies. The grain yield, fertilizer cost, net profit, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) use efficiency and N loss were investigated at harvest. **[Results]** N and P fertilizer input in NE treatment were significantly decreased by 43.5 and 23.6 kg/hm² than in FP, about 21.0% and 27% of decrease ($P < 0.001$), while K fertilizer input was increased by 8.3 kg/hm² ($P = 0.001$). The grain yields in all the experimental sites were in average 0.6 kg/hm² higher in NE than in FP, with the increase rate of 5.2% ($P < 0.001$), the averaged gross return was increased by 1466 yuan/hm² ($P < 0.001$), of which, 1192 yuan/hm² was from grain increases, accounting for 81.3%. As compared to FP, NE increased agronomic efficiency (AE), recovery efficiency (RE) and partial factor productivity (PFP) of applied to N by 5.8 kg/kg (+ 53.8%)、11.0% (+ 47.8%) and 16.8 kg/kg (+ 29.6%), increased AE, RE and PFP of applied to P by 12.3 kg/kg (+ 125.9%)、13.5% (+ 87.5%) and 44.0 kg/kg (+ 29.6%), increased AE and RE of applied to K by 4.0 kg/kg (+ 30.2%) and 13.7% (+ 36.1%), but decreased PFPK by 22.4 kg/kg. Given to three-year total calculated N balance, N fertilizer application in NE was lower than in FP, decreased by 102.8 kg/hm², but N uptake in the above-ground in NE was above 38.7 kg/hm² than in FP, the high N fertilizer input also led to N accumulation in the soil, the results indicated that the residual N at harvest in 2014 with NE significantly less than with FP, decreased by 63.0 kg/hm². Furthermore, totaled 78.5 kg/hm² of apparent N loss was reduced by using NE than with FP across three-year. However, the yield in NE attained 12.3 t/hm², increased by 0.9 t/hm² compared with FP. **[Conclusions]** In summary, using Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) for fertilizer recommendation not only increased grain yield, profit and nutrient use efficiency, but also reduced apparent N loss. The Nutrient Expert for Hybrid Maize, which based on yield response and agronomic efficiency, has proved to be a science-based, reliable and feasible method and can be used to make fertilizer recommendation for spring maize in the Northeast China.

Key words: Nutrient Expert system; yield response; agronomic efficiency; nutrient use efficiency; nitrogen loss

化肥施用量的增加大幅度提高了我国玉米产量, 但过量施肥也导致了土壤养分累积、肥料利用率低下, 并带来了严重的环境污染问题^[1-3]。我国不同区域单位种植面积耕地氮和磷素均有盈余, 其中氮素平均盈余率达到了 27.6%^[4]。李红莉等^[5]的调查显示, 我国玉米单位面积化肥施用量 2007 年比 2001 年增加了 29%, 平均氮肥施用量达到了 N 273 kg/hm²。虽然目前推广了一些推荐施肥技术来提高玉米产量和养分利用率, 例如, 依据土壤养分测试值和目标产量计算施肥量^[6-7], 优化种植密度、水分和养分管理措施^[8-9], 借助叶色卡和 SPAD 仪对玉米实施无损养分检测^[10-12]等。然而, 如何更简便、快捷地

推荐施肥和养分管理, 并易于被农民接受仍是当前我国养分管理所面临的挑战。

许多国家都在开始研究并更换当前作物大面积地毯式的推荐施肥方法。Nutrient Expert (NE) 推荐施肥系统就是为了适应当前推荐施肥需求的背景下提出的一种定点的适应小农户生产管理方式的推荐施肥和养分管理方法。NE 系统是在实地养分管理原则基础上由国际植物营养研究所 (IPNI) 提出, 其原理是基于产量反应和农学效率进行推荐施肥^[13], 该方法已在东南亚一些国家得到应用^[14-15]。在印度尼西亚和菲律宾的试验结果显示, 应用 NE 系统可显著提高玉米产量和经济效益^[5]。NE 系统于 2009 年由 IPNI 中国项目部引入中国, 是在分析大量试验数据基础上结合

QUEFTS 模型将中国的试验数据加入到该系统中^[16], 通过分析并建立作物产量反应、农学效率、相对产量和基础土壤养分供应等参数的内在联系, 根据中国的作物生长规律、以及土壤和气候特征发展而来的推荐施肥和养分管理方法^[17-18]。NE 系统在国内已经建立了小麦和玉米养分专家系统^[17, 19], 并进行了大量田间试验, 现已发布汉语版^[3]。

NE 系统采用地上部产量反应来表征土壤基础养分供应能力和作物生产能力, 将土壤养分供应看作一个“黑箱”, 采用不施该养分地上部的产量或养分吸收来表征^[20], 其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, 在保持土壤肥力的同时, 使养分胁迫降到最低并最终达到高产、高效的目的。如该系统中将玉米分为春玉米和夏玉米两种不同生态类型, 形成两组不同的施肥参数, 因为二者养分吸收、轮作制度等都存在着很大差异。为此, 本研究从 2010 年开始在东北进行了多年多点的田间试验对玉米养分专家系统中春玉米部分进行验证和改进, 旨在土壤测试不及时或条件不具备情况下建立一种简便、易懂、适合我国小农户为经营主体的玉米推荐施肥和养分管理方法。

1 材料与方法

1.1 玉米养分专家系统施肥原则

玉米养分专家系统中各参数数据来源于我国 2001~2012 年期间多点的田间试验。地上部和子粒的养分吸收量是应用 QUEFTS 模型对产量和养分吸收数据进行模拟, 得出我国不同种植类型玉米(春玉米和夏玉米)在不同潜在产量和目标产量下的养分吸收曲线^[16]。产量反应由氮磷钾全施处理和不施某种养分处理的产量差求得。相对产量由不施某种养分处理作物子粒产量与氮磷钾全施的子粒产量比值获得。土壤基础养分供应使用不施某种养分而其他养分供应充足条件下该养分地上部的养分吸收量表示。在养分专家系统中应用相对产量的第 25 百分位数、中位数和第 75 百分位数所对应的数值分别表示土壤肥力的低、中和高, 进而求得产量反应^[15]。通过分析产量反应、农学效率、土壤基础养分供应以及相对产量的分布特征并建立它们之间的内在联系, 为养分专家系统提供数据支撑。

在玉米养分专家系统中, 氮肥推荐主要是依据氮素产量反应(目标产量与不施氮小区的产量差)和氮素农学效率确定, 在有产量反应相关试验时可将

产量反应数据直接填入系统, 系统会根据已有的关系式进行氮肥推荐。在无氮素产量反应数据时, 系统会依据相应的参数如可获得产量、土壤质地、有机质含量和土壤障碍因子等信息确定土壤肥力和相对产量, 再由可获得产量得到产量反应, 并计算氮肥施用量。即无论目标产量为多少, 施氮量 = 产量反应/农学效率。

磷肥推荐除了产量反应外, 还考虑了养分平衡, 如果有土壤磷素测试值, 则根据磷素分级确定产量反应。土壤磷为高时, 产量反应为低; 土壤磷为中时, 产量反应为中; 土壤磷为低时, 产量反应为高。如果没有土壤磷素测试值时, 则根据土壤肥力分级确定土壤磷素分级。土壤肥力确定同氮。如果土壤磷素分级为低, 且前茬作物磷素平衡为高, 磷产量反应因素为中等; 如果土壤磷素分级为中, 且前茬作物磷素平衡为高, 磷产量反应因素为高等; 如果土壤磷素分级为高, 且前茬作物磷素平衡为低, 磷产量反应因素为中等, 通过一系列的土壤磷素水平与前茬作物磷素平衡组合对磷素产量反应等级进行判定。不考虑前季作物残留时, 土壤磷素产量反应因素等级同土壤磷素分级。在没有磷素产量反应数据时根据以上步骤估算, 如果有产量反应数据直接输入。此时磷产量反应:

磷素产量反应 = 可获得产量 × 磷产量反应因素;

磷素产量反应因素 = 1 - 磷素相对产量。

磷肥推荐中的养分平衡部分是依据 QUEFTS 模型得出的地上部和籽粒中的磷素吸收进行计算, 即维持土壤磷素平衡部分相当于需要归还一定目标产量下籽粒的养分移走量。因此, 施磷量计算公式:

施磷量 = 产量反应部分吸磷量 + 作物收获移走磷量(维持土壤肥力部分)

当上季和当季作物的综合磷素平衡大于零时需要考虑磷素盈亏平衡, 即:

施磷量 = 维持土壤磷素平衡部分 - 磷素综合平衡(上季作物磷素平衡 + 当季作物磷素平衡) + 产量反应部分

其中, 如果维持土壤磷素平衡部分与磷素综合平衡之差大于 0, 施磷量则依据上述公式计算, 如果维持土壤磷素平衡部分与磷素综合平衡之差小于 0, 施磷量则只为产量反应部分。

施钾量计算原理同磷。

1.2 试验设计

试验于 2010~2014 年于东北春玉米主产区吉林、辽宁和黑龙江省三个省份进行, 5 年共计 193 个

田间试验从产量、经济、农学和环境效益对玉米养分专家系统进行校正和改进(图 1 和表 1)。为验证 NE 的持续效益, 从 2012 年试验中随机挑选出 20 个进行定位试验, 吉林和黑龙江省各 10 个试验点。玉

米品种使用农民所采用的品种, 如郑单 958、先玉 335、吉单 27 等, 与农民设置相同的种植密度, 密度设置来自玉米养分专家系统推荐, 其设置范围为 65000~75000 plant/hm²。

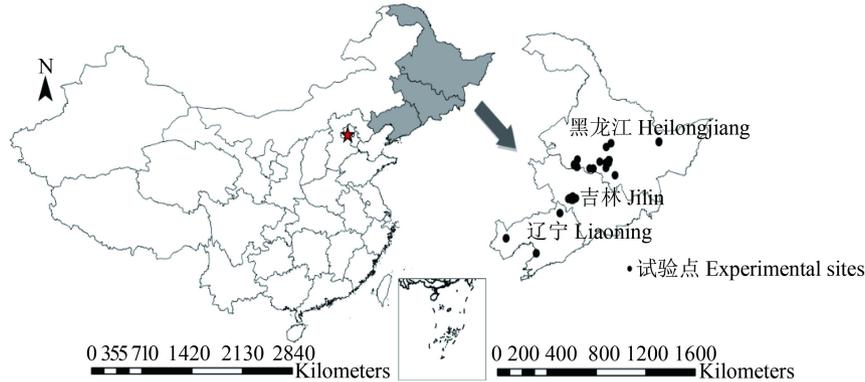


图 1 试验点分布图

Fig. 1 Distribution of experimental sites

表 1 田间试验点信息

Table 1 Site characteristics of the field experiments

| 省份 Province | 年份 Year | 试验数 Farm No. | 村庄数 Village No. | pH | 有机质 OM (g/kg) |
|---------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------|------------------|
| 吉林 Jilin | 2010 | 9 | 2 | 4.65~7.78 | 11.8~32.5 |
| | 2011 | 28 | 5 | | |
| | 2012 | 24 | 4 | | |
| | 2013 | 15 | 4 | | |
| | 2014 | 10 | 4 | | |
| 辽宁 Liaoning | 2011 | 21 | 4 | 4.73~8.34 | 1.0~14.3 |
| | 2012 | 20 | 2 | | |
| 黑龙江 Heilongjiang | 2011 | 26 | 8 | 5.12~8.88 | 4.4~66.7 |
| | 2012 | 17 | 6 | | |
| | 2013 | 12 | 3 | | |
| | 2014 | 11 | 3 | | |

每个试验处理包含: 处理 1, 玉米养分专家系统推荐施肥处理 (NE) 首先进行农户问卷调查, 包括试验地块过去 3~5 年的产量、施肥量、施肥措施、秸秆处理, 是否施用有机肥和地块的质地、颜色等, 将调查内容输入玉米养分专家系统形成施肥套餐; 处理 2, 农民习惯施肥处理 (FP) 依据农民自己的措施进行管理, 在农民地里直接进行, 不单独设置小区, 记录农民所使用的肥料品种、施肥量、施肥次数等信息, 收获时采集样品测定产量和养分含量等; 处理 3、4、5 基于 NE 处理的不施氮、不施磷和不施钾处理。NE 处理肥料使用尿素、过磷酸钙

和氯化钾, FP 处理肥料为复合肥或掺混肥, 具体依据农民习惯而定。NE 处理的氮肥分两次施用 (追肥时期在拔节期), 磷肥和钾肥做基肥一次性施用, 而 FP 处理的氮、磷和钾肥为一次性施用。NE 和 FP 处理的病虫害和草害控制使用相同标准。每个试验点布置多个处理, 每个处理不另设重复。定位试验中 NE 和 FP 处理的面积大于 667 m², 减素小区的面积为 60 m², 减素小区位置在 NE 处理的基础上每年变化位置, 用于计算当季肥料利用效率。

1.3 养分测定及数据分析

每个试验点的样品采集采用相同标准, 在每个小区的中央位置随机选取 3 个 10 m² 的区域测定产量, 并选取均匀的玉米 5~10 株测定水分含量, 最终折合成含水量为 15.5% 的产量。取 3~10 株长势均匀的植株烘干测定子粒和秸秆的干物质重, 用于计算收获指数, 并选取一部分烘干样品粉碎测定子粒和秸秆中 N、P 和 K 养分含量。秸秆和子粒中的全量氮、磷和钾含量采用 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。

在定位试验中, 于播种前采集 0—30、30—60 和 60—90 cm 土壤测定土壤硝态氮和铵态氮含量, 使用 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 浸提, 土与浸提液的比例为 1:10, 使用流动分析仪测定。土壤含水量在 105℃ 烘干测定。计算总体养分平衡, 用于评估施肥的合理性。

氮素吸收利用率 (N recovery efficiency, REN) = (施氮区植株地上部氮累积量 - 空白区地上部植株氮累积量) / 施氮量 × 100%;

氮素农学利用率 (agronomic efficiency of applied N, AEN) = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量;

氮素偏生产力 (partial factor productivity of applied N, PFPN) = 施氮区产量 / 施氮量;

肥料花费 (total fertilizer cost, TFC) 为氮磷钾肥料花费总和;

净效益 (gross return above fertilizer cost, GRF) 为收获后的产量利润减去肥料成本。

氮素表观损失的计算公式为:

氮素表观损失 = 施氮量 + 土壤起始氮 + 土壤氮素净矿化 - 作物地上部吸氮量 - 收获后土壤残留氮;

土壤氮矿化量 = 不施氮小区地上部吸氮量 + 不施氮小区土壤氮残留 - 不施氮小区起始氮;

磷和钾养分利用率计算同氮。

数据采用 Excel 2007 和 SAS 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 节肥效益

施肥量结果显示 (表 2), FP 处理的施肥量非常不平衡。就每省的平均施氮量而言, 辽宁和吉林的 FP 施氮量显著高于黑龙江, 但三省的平均施氮量都要高于 NE 处理。辽宁、吉林和黑龙江三省的平均施氮量 FP 处理比 NE 处理分别高 51.0 ($P < 0.001$)、66.4 ($P < 0.001$) 和 8.7 kg/hm² ($P = 0.072$)。就三省年均施氮量而言, NE 处理都显著低于 FP 处理, 施氮量降

低范围为 26.3~57.1 kg/hm², 平均降低了 43.5 kg/hm², 降幅达到了 21.0%。所有试验中有 73.5% 的农户施氮量大于 180 kg/hm², 而大于 250 kg/hm² 的占到了 10.0%, 最高施氮量达到了 280 kg/hm²。对于施磷量而言, 辽宁和吉林的施磷量 NE 处理显著低于 FP 处理, 分别低 13.0 和 49.2 kg/hm², 而黑龙江两处理间施磷量无显著差异。FP 处理中施磷量大于 90 kg/hm² 的占到了全部试验的 50.0%, 而高于 120 kg/hm² 的占到了 11.0%, 最高施磷量则达到了 189 kg/hm²。FP 处理每年的平均施磷量范围为 82.7~92.4 kg/hm², 平均为 87.1 kg/hm², 而 NE 比 FP 处理年均降低范围为 11.1~31.2 kg/hm², 平均低 23.6 kg/hm², 降低幅度达到了 27.0%。对于施钾量而言, 吉林省 FP 处理高于 NE 处理, 辽宁和黑龙江则相反。每年的平均钾肥用量 FP 处理的施用范围为 64.9~75.6 kg/hm², 其中有 24.0% 的农户施钾量低于 50 kg/hm², 而 NE 处理的年均钾肥用量范围为 64.9~87.9 kg/hm²。就所有试验而言, NE 处理的施钾量显著高于 FP 处理 ($P = 0.001$), 增加了 8.3 kg/hm², 增幅为 12.2%。

2.2 产量和经济效益

产量结果显示 (表 3), 三省的产量 NE 处理都显著高于 FP 处理 ($P < 0.001$), 增加了 0.4~0.8 t/hm², 提高了 3.5%~7.2%, 其中黑龙江省增产最高, 为 0.8 t/hm²。玉米养分专家系统中, 在下一季试验开始前, 应用上一季的田间试验结果对系统进行校正和

表 2 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的施肥量比较

Table 2 Comparison of fertilizer use between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 省份和年份 Province and year | 施氮量 N rate (kg/hm ²) | | | | 施磷量 P ₂ O ₅ rate (kg/hm ²) | | | | 施钾量 K ₂ O rate (kg/hm ²) | | | |
|----------------------------|----------------------------------|-------|--------|---------|--|-------|--------|---------|---|------|--------|---------|
| | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] |
| 辽宁 Liaoning | 178.0 | 229.0 | -51.0 | <0.001 | 63.0 | 76.0 | -13.0 | <0.001 | 79.0 | 48.0 | 31.0 | <0.001 |
| 吉林 Jilin | 152.7 | 219.1 | -66.4 | <0.001 | 62.0 | 111.2 | -49.2 | <0.001 | 73.9 | 91.2 | -17.3 | <0.001 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 169.1 | 177.8 | -8.7 | 0.072 | 65.9 | 61.3 | 4.6 | 0.137 | 79.3 | 51.7 | 27.6 | <0.001 |
| 2010 | 126.0 | 168.7 | -42.7 | 0.014 | 51.5 | 82.7 | -31.2 | 0.001 | 64.9 | 75.0 | -10.1 | 0.030 |
| 2011 | 165.4 | 202.5 | -37.1 | <0.001 | 57.3 | 84.0 | -26.7 | <0.001 | 70.6 | 64.9 | 5.7 | 0.138 |
| 2012 | 161.5 | 218.4 | -57.1 | <0.001 | 61.0 | 87.6 | -26.6 | <0.001 | 78.3 | 66.6 | 11.7 | 0.033 |
| 2013 | 168.3 | 213.6 | -45.3 | <0.001 | 81.3 | 92.4 | -11.1 | 0.122 | 87.9 | 75.6 | 12.3 | 0.003 |
| 2014 | 177.8 | 204.0 | -26.3 | 0.028 | 77.7 | 92.2 | -14.5 | 0.117 | 84.8 | 72.5 | 12.3 | 0.008 |
| All | 163.9 | 207.4 | -43.5 | <0.001 | 63.5 | 87.1 | -23.6 | <0.001 | 76.5 | 68.2 | 8.3 | 0.001 |

注 (Note): NE—养分专家系统 Nutrient Expert; FP—农民习惯措施 Farmers' Practices; P > [T]—NE 和 FP 在 0.05 水平的配对法 *t* 检验 Probability of a significant mean difference between NE and FP at 0.05 level used paired *t*-test; 每个省份所对应的数据表示每个省所有试验的平均值, 年份所对应的数据表示该年份三省的平均值, All 所对应的数据表示所有试验数据的平均值 The values for each province is average of all experiments for this province, the values for each year is average of all experiments for three provinces in this year, the values for all is average of all experiments.

表 3 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的产量和经济效益比较

Table 3 Comparison of grain yield and economic benefit between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 省份和年份 Province and year | 产量 Yield (t/hm ²) | | | | 化肥消耗 TFC (yuan/hm ²) | | | | 经济效益 GRF (yuan/hm ²) | | | |
|----------------------------|-------------------------------|------|--------|---------|----------------------------------|------|--------|---------|----------------------------------|-------|--------|---------|
| | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] | NE | FP | ΔNE-FP | P > [T] |
| 辽宁 Liaoning | 12.2 | 11.5 | 0.7 | <0.001 | 1748 | 1916 | -168 | <0.001 | 24465 | 22754 | 1711 | <0.001 |
| 吉林 Jilin | 12.0 | 11.6 | 0.4 | <0.001 | 1429 | 2098 | -669 | <0.001 | 22419 | 20917 | 1502 | <0.001 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 11.6 | 10.8 | 0.8 | <0.001 | 1911 | 1727 | 184 | <0.001 | 19283 | 17942 | 1341 | <0.001 |
| 2010 | 11.0 | 10.8 | 0.2 | 0.29 | 1175 | 1590 | -415 | 0.006 | 15976 | 15276 | 700 | 0.014 |
| 2011 | 11.7 | 11.3 | 0.4 | <0.001 | 1571 | 1863 | -292 | <0.001 | 20100 | 19058 | 1042 | <0.001 |
| 2012 | 12.2 | 11.5 | 0.7 | <0.001 | 1682 | 2025 | -343 | <0.001 | 24106 | 22150 | 1956 | <0.001 |
| 2013 | 12.4 | 11.6 | 0.8 | <0.001 | 1837 | 2004 | -167 | 0.129 | 23333 | 21698 | 1635 | <0.001 |
| 2014 | 11.6 | 10.8 | 0.8 | <0.001 | 1913 | 1994 | -81 | 0.526 | 22562 | 20780 | 1782 | <0.001 |
| All | 11.9 | 11.3 | 0.6 | <0.001 | 1658 | 1932 | -274 | <0.001 | 21831 | 20364 | 1466 | <0.001 |

注 (Note): TFC—肥料消耗 Total fertilizer cost; GRF—经济效益 Gross return above fertilizer cost; $P > |T|$ —NE 和 FP 在 0.05 水平的配对法 t 检验 Probability of a significant mean difference between NE and FP at 0.05 level used paired t -test. 每个省份所对应的数据表示每个省所有试验的平均值, 年份所对应的数据表示该年份三省的平均值, All 所对应的数据表示所有试验数据的平均值 The values for each province is average of all experiments for this province, the values for each year is average of all experiments for three provinces in this year, the values for all is average of all experiments.

改进。随着玉米养分专家系统的不断优化, NE 处理和 FP 处理的产量差从 2010 年的 0.2 t/hm² 增长到了 2014 年的 0.8 t/hm²。而 2012、2013 和 2014 三年的产量差相近, 分别为 0.7、0.8 和 0.8 t/hm², 说明玉米养分专家系统(NE)与农民习惯施肥处理(FP)相比可以稳定增加产量。就全部试验而言, NE 处理产量显著高于 FP 处理产量 ($P < 0.001$), 产量差为 0.6 t/hm², 增幅达到了 5.2%。

表 3 显示, 在黑龙江 NE 处理的化肥花费要高于 FP 处理 ($P < 0.001$), 因为 NE 处理的磷肥和钾肥施用量高于 FP 处理, 但辽宁和吉林 NE 处理的 TFC 要远低于 FP 处理 ($P < 0.001$), 分别低 168 和 669 yuan/hm²。虽然辽宁省 NE 处理的施钾量高于 FP 处理, 但后者的氮肥和磷肥用量都显著高于前者。NE 处理年均 TFC 都低于 FP 处理, 低 81~415 yuan/hm², 五年平均降低 274 yuan/hm²。NE 与 FP 处理相比, 辽宁、吉林和黑龙江的平均 GRF 都显著增加 ($P < 0.001$), 分别高 1711、1502 和 1341 yuan/hm², 5 年增加了 700~1956 yuan/hm², 平均增加了 1466 yuan/hm², 增幅为 4.6%~8.8%, 平均增幅为 7.2%, 其中由增产带来的 GRF 为 1192 yuan/hm², 占总增加 GRF 的 81.3%。

2.3 肥料利用率

2.3.1 氮肥利用率 与 FP 处理相比, 三省 NE 处理都显著地提高了氮肥利用率 (表 4), 辽宁、吉林和黑龙江

的氮素农学效率 (AEN) 分别提高了 6.0、6.6 和 5.0 kg/kg, 氮素回收率 (REN) 分别提高了 18.3、10.7 和 6.7 个百分点, 氮素偏生产率 (PFPN) 分别提高了 19.0、23.9 和 6.4 kg/kg。NE 处理的年均 AEN 变化范围为 11.7~21.5 kg/kg (平均 16.7 kg/kg), REN 变化范围为 30.8%~38.5% (平均 34.1%), PFPN 变化范围为 66.4~88.2 kg/kg (平均 73.6 kg/kg)。FP 处理的年均 AEN 变化范围为 7.1~14.7 kg/kg (平均 10.9 kg/kg), REN 为 17.6%~27.5% (平均 23.1%), PFPN 为 54.6~68.2 kg/kg (平均 56.8 kg/kg)。与 FP 处理相比, 全部试验 NE 处理的 AEN、REN 和 PFPN 分别增加了 5.8 kg/kg、11.0 个百分点和 16.8 kg/kg, 增幅分别达到了 53.8%、47.8% 和 29.6%。

2.3.2 磷肥利用率 与 FP 处理相比, 辽宁、吉林和黑龙江 NE 处理的磷素农学效率 (AEP) 分别高 13.3、12.8 和 10.8 kg/kg, 磷素回收率 (REP) 分别高 21.9、11.6 和 10.8 个百分点 (表 5)。辽宁和吉林 NE 处理的磷素偏生产力 (PFPP) 显著高于 FP 处理, 分别高 40.7 和 88.1 kg/kg, 而黑龙江 NE 处理的 PFPP 低于 FP 处理, 低 15.0 kg/kg, 但二者差异不显著 ($P = 0.067$)。对每年磷肥利用率的平均值而言, NE 处理年均 AEP 变化范围为 5.0~27.6 kg/kg (平均 22.0 kg/kg), REP 变化范围为 15.7%~35.7% (平均 29.0%), PFPP 变化范围为 152.1~213.7 kg/kg (平均

表 4 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的氮肥利用率比较
Table 4 Comparison of use efficiency of applied N between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 省份和年份 Province and year | 氮素农学效率 (grain kg/kg, N) Agronomic efficiency | | | | 氮素回收率 (%) Recovery efficiency | | | | 氮素偏生产力 (grain kg/kg, N) Partial factor productivity | | | |
|----------------------------|---|------|----------|-----------|----------------------------------|------|----------|-----------|--|------|----------|-----------|
| | NE | FP | Δ | $P > [T]$ | NE | FP | Δ | $P > [T]$ | NE | FP | Δ | $P > [T]$ |
| 辽宁 Liaoning | 13.1 | 7.1 | 6.0 | <0.001 | 34.6 | 16.3 | 18.3 | <0.001 | 69.5 | 50.5 | 19.0 | <0.001 |
| 吉林 Jilin | 16.5 | 9.9 | 6.6 | <0.001 | 36.0 | 25.3 | 10.7 | <0.001 | 79.2 | 55.3 | 23.9 | <0.001 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 20.0 | 15.0 | 5.0 | <0.001 | 32.6 | 25.9 | 6.7 | <0.001 | 68.9 | 62.5 | 6.4 | <0.001 |
| 2010 | 11.7 | 7.1 | 4.6 | 0.009 | 30.8 | 17.6 | 13.2 | 0.017 | 88.2 | 68.2 | 20.0 | 0.033 |
| 2011 | 16.0 | 11.2 | 4.8 | <0.001 | 34.0 | 26.2 | 7.8 | <0.001 | 71.8 | 57.6 | 14.2 | <0.001 |
| 2012 | 15.5 | 8.7 | 6.8 | <0.001 | 33.2 | 18.9 | 14.3 | <0.001 | 76.0 | 54.6 | 21.4 | <0.001 |
| 2013 | 19.8 | 13.3 | 6.5 | <0.001 | 34.4 | 22.4 | 12.0 | <0.001 | 73.4 | 56.9 | 16.5 | <0.001 |
| 2014 | 21.5 | 14.7 | 6.8 | <0.001 | 38.5 | 27.5 | 11.0 | <0.001 | 66.4 | 54.7 | 11.7 | 0.001 |
| All | 16.7 | 10.9 | 5.8 | <0.001 | 34.1 | 23.1 | 11.0 | <0.001 | 73.6 | 56.8 | 16.8 | <0.001 |

注 (Note): $P > [T]$ —NE 和 FP 在 0.05 水平的配对法 t 检验 Probability of a significant mean difference between NE and FP at 0.05 level used paired t -test. 每个省份所对应的数据表示每个省所有试验的平均值, 年份所对应的数据表示该年份三省的平均值, All 所对应的数据表示所有试验数据的平均值 The values for each province is average of all experiments for this province, the values for each year is average of all experiments for three provinces in this year, the values for all is average of all experiments.

表 5 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的磷肥利用率比较
Table 5 Comparison of P use efficiency of applied P_2O_5 between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 省份和年份 Province and year | 磷素农学效率 (grain kg/kg, P_2O_5) Agronomic efficiency | | | | 磷素回收率 (%) Recovery efficiency | | | | 磷素偏生产力 (grain kg/kg, P_2O_5) Partial factor productivity | | | |
|----------------------------|---|------|----------|-----------|----------------------------------|------|----------|-----------|--|-------|----------|-----------|
| | NE | FP | Δ | $P > [T]$ | NE | FP | Δ | $P > [T]$ | NE | FP | Δ | $P > [T]$ |
| 辽宁 Liaoning | 23.5 | 10.1 | 13.3 | <0.001 | 31.7 | 9.9 | 21.9 | <0.001 | 196.5 | 155.8 | 40.7 | <0.001 |
| 吉林 Jilin | 20.0 | 7.2 | 12.8 | <0.001 | 23.1 | 11.5 | 11.6 | <0.001 | 200.4 | 112.3 | 88.1 | <0.001 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 23.7 | 12.9 | 10.8 | <0.001 | 35.2 | 24.4 | 10.8 | <0.001 | 180.4 | 195.4 | -15.0 | 0.067 |
| 2010 | 5.0 | 1.3 | 3.7 | 0.067 | 15.7 | 7.9 | 7.8 | 0.204 | 213.7 | 143.1 | 70.6 | 0.003 |
| 2011 | 21.5 | 11.2 | 10.3 | <0.001 | 29.5 | 17.3 | 12.2 | <0.001 | 205.3 | 147.9 | 57.4 | <0.001 |
| 2012 | 27.6 | 10.6 | 17.0 | <0.001 | 35.7 | 17.3 | 18.4 | <0.001 | 204.7 | 150.8 | 53.9 | <0.001 |
| 2013 | 16.5 | 7.7 | 8.8 | <0.001 | 17.6 | 11.0 | 6.6 | 0.008 | 152.1 | 154.9 | -2.8 | 0.837 |
| 2014 | 22.4 | 9.5 | 12.9 | <0.001 | 28.7 | 12.6 | 16.1 | <0.001 | 153.3 | 141.6 | 11.7 | 0.469 |
| All | 22.0 | 9.7 | 12.3 | <0.001 | 29.0 | 15.5 | 13.5 | <0.001 | 192.9 | 148.9 | 44.0 | <0.001 |

注 (Note): $P > [T]$ —NE 和 FP 在 0.05 水平的配对法 t 检验 Probability of a significant mean difference between NE and FP at 0.05 level used paired t -test. 每个省份所对应的数据表示每个省所有试验的平均值, 年份所对应的数据表示该年份三省的平均值, All 所对应的数据表示所有试验数据的平均值 The values for each province is average of all experiments for this province, the values for each year is average of all experiments for three provinces in this year, the values for all is average of all experiments.

192.9 kg/kg)。FP 处理的年均 AEP 变化范围为 1.3~11.2 kg/kg (平均 9.7 kg/kg), REP 变化范围为 7.9%~17.3% (平均 15.5%), PFPP 变化范围为 141.6~154.9 kg/kg (平均 148.9 kg/kg)。就全部试验而言, 与 FP 处理相比, NE 处理的 AEP、REP 和 PFPP

分别增加了 12.3 kg/kg、13.5 个百分点和 44.0 kg/kg, 增幅分别达到了 125.9%、87.5% 和 29.6%。

2.3.3 钾肥利用率 三个省份 NE 处理的钾素回收率 (REK) 都显著高于 FP 处理 (表 6), 辽宁、吉林和黑龙江分别高 20.7、15.1 和 8.0 个百分点; 吉林和黑龙江

表 6 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的钾肥利用率比较
Table 6 Comparison of applied K₂O use efficiency between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 省份和年份 Province and year | 钾素农学效率 (grain kg/kg, K ₂ O) Agronomic efficiency | | | | 钾素回收率 (%) Recovery efficiency | | | | 钾素偏生产力 (grain kg/kg, K ₂ O) Partial factor productivity | | | |
|----------------------------|--|------|------|--------|----------------------------------|------|------|--------|---|-------|-------|--------|
| | NE | FP | Δ | P>[T] | NE | FP | Δ | P>[T] | NE | FP | Δ | P>[T] |
| 辽宁 Liaoning | 18.0 | 24.2 | -6.2 | 0.457 | 54.0 | 33.3 | 20.7 | 0.002 | 161.9 | 256.5 | -94.6 | 0.002 |
| 吉林 Jilin | 14.7 | 7.5 | 7.2 | <0.001 | 51.7 | 36.6 | 15.1 | <0.001 | 167.0 | 132.2 | 34.8 | <0.001 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 20.1 | 15.8 | 4.3 | <0.001 | 50.5 | 42.5 | 8.0 | 0.004 | 148.4 | 216.5 | -68.1 | <0.001 |
| 2010 | 7.3 | 4.2 | 3.1 | 0.205 | 30.3 | 11.9 | 18.4 | 0.039 | 169.7 | 148.5 | 21.2 | 0.031 |
| 2011 | 15.3 | 12.3 | 3.0 | 0.025 | 62.0 | 45.6 | 16.4 | <0.001 | 168.4 | 169.8 | -1.4 | 0.611 |
| 2012 | 21.5 | 18.8 | 2.7 | 0.738 | 50.6 | 37.1 | 13.5 | <0.001 | 161.4 | 214.2 | -52.8 | 0.007 |
| 2013 | 15.9 | 9.3 | 6.6 | <0.001 | 44.7 | 41.1 | 3.6 | 0.289 | 142.6 | 174.9 | -32.3 | 0.003 |
| 2014 | 18.5 | 11.0 | 7.5 | <0.001 | 36.7 | 23.9 | 12.8 | 0.037 | 139.4 | 164.7 | -25.3 | 0.017 |
| All | 17.3 | 13.3 | 4.0 | 0.036 | 51.8 | 38.0 | 13.8 | <0.001 | 159.8 | 182.2 | -22.4 | 0.019 |

注 (Note): P>|T|—NE 和 FP 在 0.05 水平的配对法 *t* 检验 Probability of a significant mean difference between NE and FP at 0.05 level used paired *t*-test. 每个省份所对应的数据表示每个省所有试验的平均值, 年份所对应的数据表示该年份三省的平均值, All 所对应的数据表示所有试验数据的平均值 The values for each province is average of all experiments for this province, the values for each year is average of all experiments for three provinces in this year, the values for all is average of all experiments.

江 NE 处理的钾素农学效率 (AEK) 比 FP 处理分别高 7.2 和 4.3 kg/kg, 而辽宁则是前者低于后者, 但二者差异不显著 ($P = 0.457$); 吉林 NE 处理的钾素偏生产力 (PFPK) 比 FP 处理高 34.8 kg/kg, 但辽宁和黑龙江则是前者要低于后者, 分别低 94.6 和 68.1 kg/kg, 主要是因为二省 FP 处理的施钾量较低。NE 处理的年均 AEK 变化范围为 7.3~21.5 kg/kg (平均 17.3 kg/kg), REK 变化范围为 30.3%~62.0% (平均 51.8%), PFPK 变化范围为 139.4~169.7 kg/kg (平均 159.8 kg/kg)。FP 处理的年均 AEK 变化范围为 4.2~18.8 kg/kg (平均 13.3 kg/kg), REK 变化范围为 11.9%~45.6% (平均 38.0%), PFPK 变化范围为 148.5~214.2 kg/kg (平均 182.2 kg/kg)。就全部试验而言, 与 FP 处理相比, NE 处理的 AEK 和 REK 分别增加了 4.0 kg/kg 和 13.8 个百分点, 增幅分别达到了 30.2% 和 36.1%, 但 PFPK 降低了 22.4 kg/kg。

2.4 氮素表观损失

对玉米养分专家系统的持续环境效益研究结果显示 (表 7), 氮肥用量 NE 处理比 FP 处理三年共少施 102.8 kg/hm², 但地上部氮素吸收却增加了 38.7 kg/hm²。NE 处理显著地降低了土壤氮素残留, 在 2014 年收获时 0~90 cm 土壤硝态氮和铵态氮累积量为 86.2 kg/hm², 而 FP 处理的则为 149.2 kg/hm², 对不同土壤剖面土壤硝态氮和铵态氮累积量的研究

显示, 有 57.5% 的氮素残留位于 30 cm 以下, 而如今我国东北玉米种植区的土壤耕层一般都低于 30 cm, 这部分养分容易淋洗到更深层作物根系达不到的土壤或者地下水中, 造成环境污染。虽然 NE 处理施氮量与作物氮吸收量之差表现为负值, 3 年总和为 -49.5 kg/hm², 但较高的土壤氮素矿化量使得氮素供应远远超过作物需求, 如果加上大气干湿沉降等环境带入的养分, NE 现有的施肥量足以维持土壤平衡和保持高产。FP 处理的施氮量比作物氮素吸收量高 92.0 kg/hm², 超出了 17.3%, 较高的氮肥用量导致了 FP 处理氮素残留比 NE 处理高 63.0 kg/hm², 3 年

表 7 玉米养分专家系统与农民习惯施肥的氮素平衡比较
Table 7 Comparison of nitrogen balances between Nutrient Expert for Hybrid Maize (NE) and farmers' practices (FP)

| 参数 Parameter | 处理 Treatment | | |
|---|--------------|-------|--------|
| | NE | FP | NE-FP |
| 初始氮 N _{initial} (kg/hm ²) | 176.8 | 176.8 | |
| 矿化氮 N _{min} (kg/hm ²) | 275.7 | 275.7 | |
| 施氮量 N _{fertilizer} (kg/hm ²) | 519.2 | 622.0 | -102.8 |
| 氮素吸收 N _{uptake} (kg/hm ²) | 568.7 | 530.0 | 38.7 |
| 氮素残留 N _{residual} (kg/hm ²) | 86.2 | 149.2 | -63.0 |
| 氮素损失 N _{loss} (kg/hm ²) | 316.8 | 395.3 | -78.5 |
| 子粒产量 Grain yield (t/hm ²) | 12.3 | 11.4 | 0.9 |

总的氮素表现损失 FP 处理比 NE 处理高 78.5 kg/hm²。NE 处理的三年平均产量达到了 12.3 t/hm²，比 FP 平均高 0.9 t/hm²，说明 NE 系统具有显著的持续效应。

3 讨论

日益增长的人口对粮食需求不断增加，使我国农业生产面临严重挑战。随着各种技术融入到农业生产中，各种依据土壤和植株测试进行推荐施肥和养分管理的方法应运而生^[11,21]，我国政府对测土配方施肥也给予支持。依据玉米主要生育期土壤氮素含量进行根层养分调控，以及依据土壤测试和目标产量法进行养分管理等方法，在不增加氮肥施用量的情况下能够显著增加作物产量和养分利用率^[7,22]。NE 系统中的推荐施肥和养分管理采用的是“4R”养分管理策略，最大限度的优化养分供给和作物需求间的关系，以达到养分平衡^[23-25]。相对依据土壤测试的推荐施肥方法，NE 系统在没有土壤测试值情况下可以依据作物地上部产量反应或相对产量来表征土壤肥力进行推荐施肥，并且根据目标产量和气候类型如春玉米和夏玉米、灌溉和降雨等条件给出不同施肥推荐量。NE 系统可以依据前季土壤养分残留、土壤基础养分供应、产量与养分吸收关系，以及产量反应和农学效率关系等对施肥量进行调整。

NE 假定在相同的气候条件下，基础养分供应(或土壤基础肥力)将决定缺素区产量的高低^[15]。当前，高量化肥投入导致了较高土壤基础养分供应^[26]，并对环境安全构成了潜在威胁^[1]。土壤基础养分供应来自于土壤矿化、灌溉水、大气沉降、降雨、前季作物残留和豆科植物固定等，可以通过不施某种养分小区测得^[27]。NE 系统可以依据作物需求动态的调整施肥量，其调整施肥量的依据是每年或每季的产量反应、农学效率和养分平衡，而不是一个恒定的施肥量。气候的差异表明，应该依据每个气候区域特征形成不同的养分管理策略，这也是 NE 系统所考虑的主要方面之一。与 FP 处理相比，NE 平衡了肥料用量，提高了产量和净效益，并降低了化肥消耗。前期的验证试验显示，NE 处理与 FP 处理间的产量差呈逐年增加趋势，而三年定位试验(2012~2014)表明，NE 处理具有长期的增产效果，产量平均增加了 0.9 t/hm²。虽然 NE 处理的施钾量要高于 FP 处理(8.3 kg/hm²， $P = 0.001$)，但 NE 处理的高产和较低氮肥(43.5 kg/hm²， $P < 0.001$)和磷肥(23.6 kg/hm²， $P < 0.001$)施用量必然增加经济效益。

平衡施肥不仅增加了产量，并且显著增加了肥

料利用率。本研究中，NE 处理的肥料利用率要高于 FP 处理，也高于一些研究中土壤养分测试结果^[7]。Dobermann 等^[28]的报道称，在低施氮量和优化管理条件下，AEN 可达到 20~30 kg/kg。Gao 等^[29]依据土壤肥力和目标产量的方法在吉林省 737 个玉米试验得出，平均 AEN 为 13 kg/kg。本研究中吉林省 AEN 平均达到了 16.5 kg/kg，而黑龙江省的 AEN 平均已达到了 20 kg/kg。玉米养分专家系统中的平衡施肥降低了氮肥施用量，平衡了磷肥和钾肥施用，提高了作物地上部作物养分吸收，NE 处理比 FP 处理地上部 N、P 和 K 养分吸收量平均分别增加了 5.0%、6.6% 和 8.1%，也是提高肥料利用效率的原因之一。本研究中 NE 处理的 AEN 和 REN 与 FP 处理相比增幅分别达到了 53.8% 和 47.8%，而 AEP 和 REP 增幅分别达到了 125.9% 和 87.5%。说明根据该玉米养分专家系统进行推荐施肥可以显著提高肥料利用效率。

当施氮量超过作物需求时，氮素向环境中的损失就会增加，高量的氮肥投入已经对环境构成威胁^[30]。大量的残留氮在土壤中累积并逐渐地淋洗到根部以下，是氮素损失的重要途径之一^[1]。充分利用残留在土壤中的氮素不仅可以提高氮肥利用率并且有助于评估和优化玉米施氮量^[31-32]。本研究中具有较高的潜在土壤氮素供应能力，包括土壤矿化氮、较高的土壤氮素残留($\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$)、以及大气沉降中的氮素。推荐施肥时必须考虑环境带入的氮，而玉米养分专家系统将土壤养分供应看作一个“黑箱”，而不考虑养分来源，在 NE 推荐施肥中是非常重要的考虑因素之一。因此，NE 根据特定的地块条件，综合考虑气候、土壤和管理因素可以给出合理的施肥量，并达到高产、高效的目的。

参 考 文 献:

- [1] Ju X T, King 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(9): 3041-3046.
- [2] 黄绍文, 金继运, 左余宝, 等. 黄淮海平原玉田县和陵县试区良田土壤养分平衡现状评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 137-143.
Huang S W, Jin J Y, Zuo Y B, *et al.* Evaluation of agricultural soil nutrient balance for Yutian County and lingxian experimental area in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 137-143.
- [3] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 492-497.
Zhao S C, Pei X X, He P, *et al.* Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization

- of summer maize [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 492–497.
- [4] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [5] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- Li H L, Zhang W F, Zhang F S, *et al.* Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- [6] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China [J]. *AMBIO*, 2010, 39: 376–384.
- [7] He P, Li S T, Jin J Y, *et al.* Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-central China [J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101: 1489–1496.
- [8] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, *et al.* Closing yield gaps through nutrient and water management [J]. *Nature*, 2012, 490: 254–257.
- [9] Pasuquin J M, Pampolino M F, Witt C, *et al.* Closing yield gaps in maize production in Southeast Asia through site-specific nutrient management [J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 219–230.
- [10] 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 266–273.
- Yu H, Yang G H, Wang Z J. Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 266–273.
- [11] 赵士诚, 何萍, 仇少君, 等. 相对SPAD值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1091–1098.
- Zhao S C, He P, Qiu S J, *et al.* Application of relative SPAD values for nitrogen fertilizer management of different cultivars of summer maize [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1091–1098.
- [12] Pasuquin J M, Saenong S, Tan P S, *et al.* Evaluating N management strategies for hybrid maize in Southeast Asia [J]. *Field Crops Research*, 2012, 134: 153–157.
- [13] 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.
- [14] Satyanarayana T, Majumdar K, Biradar D P. New approaches and tools for site-specific nutrient management with reference to potassium [J]. *Karnataka Journal of Agriculture Science*, 2011, 24(1): 86–90.
- [15] Pampolino M F, Witt C, Pasuquin J M, *et al.* Development and evaluation of Nutrient Expert decision support tool for cereal crops [J]. *Better Crops*, 2014: 4–6.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Xu X P, 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.
- [19] Xu X P, He P, Qiu S J, *et al.* Estimating a new approach of fertilizer recommendation across smallholder farms in China [J]. *Field Crops Research*, 2014, 163: 10–17.
- [20] 何萍, 金继运, Pampolino M F, Johnston A M. 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.
- He P, Jin J Y, Pampolino M F, Johnston A M. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 499–505.
- [21] 陈蓉蓉, 周治国, 曹卫星, 等. 农田精准施肥决策支持系统的设计和实现[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 516–521.
- Chen R R, Zhou Z G, Cao W X, *et al.* Designing and implementation of a decision supporting system for precision fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 516–521.
- [22] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, *et al.* Integrated soil-crop system management for food security [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108: 6399–6404.
- [23] Buresh R J. The SSNM concept and its implementation in rice [M]. Kota Kinabalu, Malaysia: IFA Crossroad Asia-Pacific Conference, 2009.
- [24] Dobermann A, Cassman K G, Mosier A R, *et al.* Environmental dimensions of fertilizer N: what can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security?[M]. Washington D C, USA: Island Press, 2004. 261–278
- [25] Dobermann A, Cassman K G, Mamaril C P, Sheehy J E. Management of phosphorus, potassium and sulfur in intensive, irrigated lowland rice [J]. *Field Crops Research*, 1998, 56: 113–138.
- [26] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, *et al.* On farm estimation of an in season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test [J]. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48–55.
- [27] Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, *et al.* Estimating indigenous nutrient supplies for site-specific nutrient management in irrigated rice[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 924–935.
- [28] Dobermann A. Nutrient use efficiency – measurement and management[A]. Krauss A, *et al.* Fertilizer Best Management Practice: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations[M]. Brussels, Belgium: IFA Int. Worksh. on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [29] Gao Q, Li C L, Feng G Z, *et al.* Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and nitrogen use efficiency in rainfed corn [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104: 165–168.
- [30] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X, *et al.* On-farm evaluation of the improved soil N_{min} -based nitrogen management for summer maize in North China Plain [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 517–525.
- [31] Setiyono T D, Yang H, Walters D T, *et al.* Maize-N: A decision tool for nitrogen management in maize [J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103: 1276–1283.
- [32] Chen X P, Zhang F S, Cui Z L, *et al.* Optimizing soil nitrogen supply in the root zone to improve maize management [J]. *Nutrient Management & Soil & Plant Analysis*, 2010, 74: 1367–1373.