

我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析

何萍¹ 谢佳贵² 李玉影³ 王宜伦⁴ 贾良良⁵ 崔荣宗⁶ 王宏庭⁷ 邢月华⁸ 孙克刚⁹

(1. 国际植物营养研究所北京办事处, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 3. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 5. 河北省农林科学院农业资源与环境研究所, 石家庄 050051; 6. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 7. 山西省农业科学院农业资源研究所, 太原 030006; 8. 辽宁省农业科学院环境资源与农村能源研究所, 沈阳 110161; 9. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要: 2010–2012 年在我国北方玉米种植区开展了多点田间试验, 研究玉米施用氮、磷、钾肥的增产效应和经济效益。试验设置基于产量反应和农学效率的推荐施肥 (Nutrient Expert, 简称 NE), 同时在此基础上设置减素处理包括不施氮、不施磷和不施钾处理, 以农民习惯施肥为对照。结果表明, 玉米施用氮、磷和钾平均增产分别为 125.9、63.6 和 64.9 公斤/亩, 表明不施氮对产量影响最大、其次为钾, 不施磷对产量影响最小。经济效益分析结果表明, 施用氮、磷和钾平均产投比 (VCR) 分别为 2.8、7.8 和 4.6, 表明投入单位金额的氮、磷和钾养分可分别获得 2.8、7.8 和 4.6 倍的收益。通过预测不同肥料价格和玉米价格下的 VCR, 结果表明, 随着施肥增产效应的增加, 即使施肥量增加, VCR 也增加。收益多少随增产效应、施肥量、肥料和玉米价格而变化。与农民习惯施肥比较, 基于 NE 推荐施肥能够增产增收。

关键词: 玉米; 产量效应; 经济效益

玉米作为重要的粮饲兼用作物以及重要的工业原材料, 在保障粮食安全方面具有重要战略意义。2010 年玉米的种植面积达到约 4.9 亿亩, 占粮食作物种植面积的 29.5%, 使玉米成为我国第一大粮食作物^[1]。在我国东北地区种植的春玉米和在华北地区种植的夏玉米其种植面积已达到玉米总种植面积的 61%。

化学肥料在保障我国粮食安全中发挥重要作用。然而近年来化肥过量和不合理施用问题严重, 也有影响到生态环境安全^[2]。因此, 迫切需要一种优化的推荐施肥方法以保障粮食安全和提高农民收益。最近, 国际植物营养研究所和中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研创了一种新的推荐施肥方法—基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法并通过田间试验证明该方法是一种能够增产、增收并提高肥料利用率的重要的推荐施肥方法^[3-7]。以往有关施氮对玉米增产效应和施肥效益的影响较多集中在单一试验点的研究^[8-12]。我国北方玉米产区因不同试验点的土壤类型、基础土壤养分供应以及肥料施用历史不同, 氮、磷、钾施用对玉米的增产效应可能会有所不同。另外, 近年来粮食和肥料价格的波动对施肥经济效益影响也很大。因此, 本研究主要研究以下三个方面: (1) 氮、磷、钾施用对玉米的增产效应; (2) 氮、磷、钾施用的经济效益; (3) 基于给定施肥效应、肥料和玉米价格情况下玉米的经济效益变化。以期通过以上研究, 为我国北方玉米科学施肥和经济施肥提供一定的借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010–2012 年在东北和华北玉米种植区的 373 个田块上进行, 用于评价氮、磷、钾在玉米上的施肥效应以及验证 NE 专家系统。所有 373 个田块中, 分别有 43, 58, 41, 49, 112, 33 和 37 个试验是在黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西进行。黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西的供试土壤分别为黑土、黑土、棕壤、潮土、潮土、褐土和棕壤。在每个田块上 (每个处理小区面积 90–100 平方米, 不设重复) 设置以下 5 个处理: (1) NE: 基于 NE 专家系统推荐施肥, 施肥量为



10.4 (7.3–15.3) 公斤 N/亩, 3.7 (2.1–5.9) 公斤 P_2O_5 /亩, 以及 4.5 (1.9–7.2) 公斤 K_2O /亩; (2) 0–N: 不施氮, 磷钾肥用量同 NE 处理; (3) 0–P: 不施磷, 氮钾肥用量同 NE 处理; (4) 0–K: 不施钾, 氮磷肥用量同 NE 处理; (5) FP: 农民习惯施肥, 施肥量为 14.9 (3.2–30.7) 公斤 N/亩, 4.1 (0–16.8) 公斤 P_2O_5 /亩, 和 3.3 (0–11.8) 公斤 K_2O /亩。氮磷钾肥料品种分别采用尿素、过磷酸钙和氯化钾。玉米品种为当地主栽品种并保持每一地点密度一致。夏玉米在播种后灌水一次, 春玉米主要靠降雨。其他的农艺措施包括除草和病虫害防治主要按照高产玉米管理进行。成熟期, 收获中间 40–50 平方米小区按照 15.5% 的标准水分产^[6]。

1.2 数据分析

施肥产量效应采用 NE 推荐施肥小区产量减去减素小区的产量。施肥产投比为施肥效益与肥料投入的比值, 施肥效益为产量效应乘以玉米价格, 肥料投入为肥料用量乘以肥料价格。在设定不同产量效应的施肥效益分析中, 采用第 25 个、第 50 个和第 75 个百分位数观测数值作为产量效应低、中和高水平^[7, 13], 而把 2010–2012 年玉米最低价格、中间价格、最高价格以及最高价格的 125% 和最高价格的 150% 作为现在和将来的可能的价格变化。不同产量效应下的施肥量是根据 NE 专家进行推荐确定的。肥料价格和玉米价格来源于全国农产品成本收益资料汇编^[14]。

方差分析采用 SAS (1999) 统计软件, 图形采用 Sigmaplot 10.0 统计软件。相关性分析采用 Microsoft Excel 10.0。

2 结果与分析

2.1 施肥的增产效应

与农民习惯施肥比较, NE 专家系统显著提高了河南、黑龙江、吉林和辽宁四个省份籽粒产量 ($p < 0.05$), 七省平均籽粒产量也显著提高 ($p < 0.05$)^[6]。为便于讨论, 文中产量效应中主要依据 NE 小区产量与各减素小区产量差来计算。

田间多点试验表明 NE 小区的平均产量为 683.7 公斤/亩, 施用氮、磷、钾肥的产量效应分别平均为 125.9, 63.6 和 64.9 公斤/亩, 表明与 NE 推荐施肥比较, 不施氮、磷、钾分别平均减产玉米 125.9, 63.6 和 64.9 公斤/亩。然而, 各试验点产量效应变异很大, 氮、磷、钾

素产量效应变化范围分别为 22.7–526.7 公斤/亩, 0.73–358.7 公斤/亩 以及 0.6–273.1 公斤/亩。黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西各点的施氮产量效应分别为 202.3, 154.3, 154.9, 65.4, 142.6, 78.9 和 82.9 公斤/亩 (图 1), 施磷产量效应分别为 97.5, 81.1, 95.1, 42.3, 62.9, 376 和 620 公斤/亩 (图 2), 施钾产量效应分别为 1454, 1063, 1532, 877, 910, 383 和 592 公斤/亩 (图 3)。

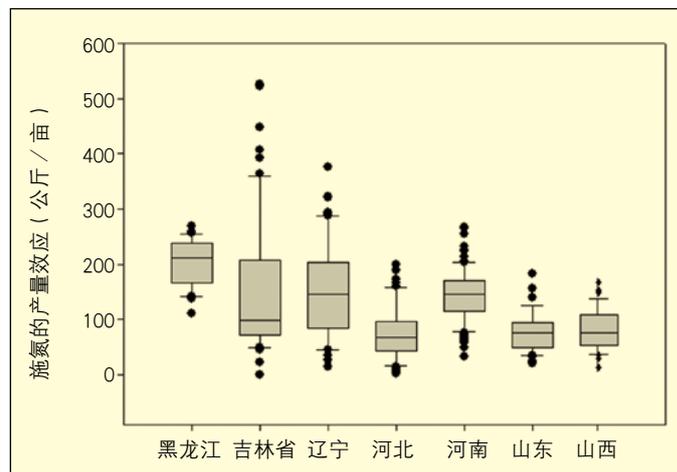


图 1 玉米七省施氮的产量效应

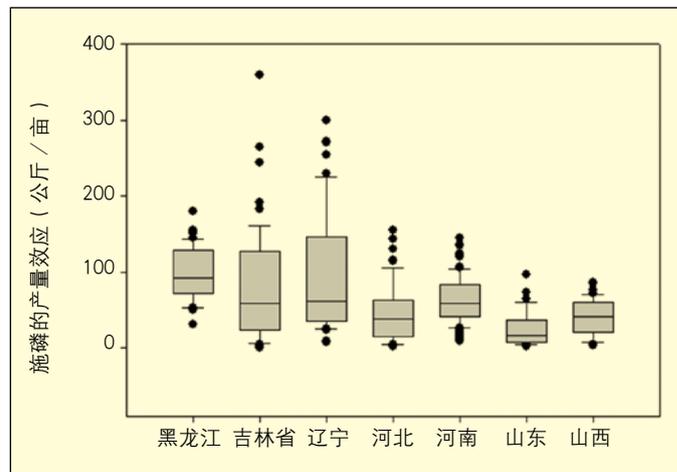


图 2 玉米七省施磷的产量效应

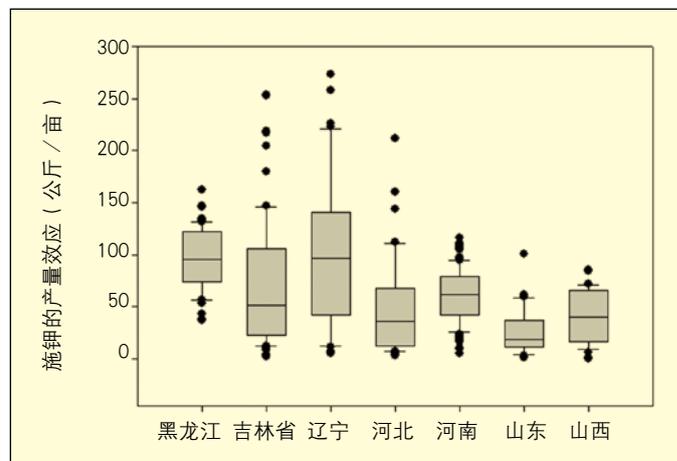


图 3 玉米七省施钾的产量效应

2.2 经济效益分析

七省 373 个试验点的经济效益分析结果表明, 肥料氮、磷、钾施用的产投比 (VCR) 分别为 2.8 (0.5-12.1), 7.8 (0.1-43.7), 和 4.6 (0-18.6), 表明每投入 1 元的氮、磷、钾肥料平均分别能够产生 2.8 元、7.8 元和 4.6 元的经济效益 (图 4-6)。虽然玉米施用氮磷钾肥料的产量效应是 $N > K > P$, 而氮磷钾施用后的经济效益则表现为施磷获得的 VCR 最大, 其次为施钾, 施氮 VCR 最低。施磷 VCR 高的原因与较低的施磷量和较低的磷肥价格有关。虽然施氮的产量效应较大, 但是较高的施氮量是施氮 VCR 低的主要原因。在 373 个试验点中, 分别有 30, 39 和 43 个试验点的 VCR 小于或等于 1.0, 其相对百分比分

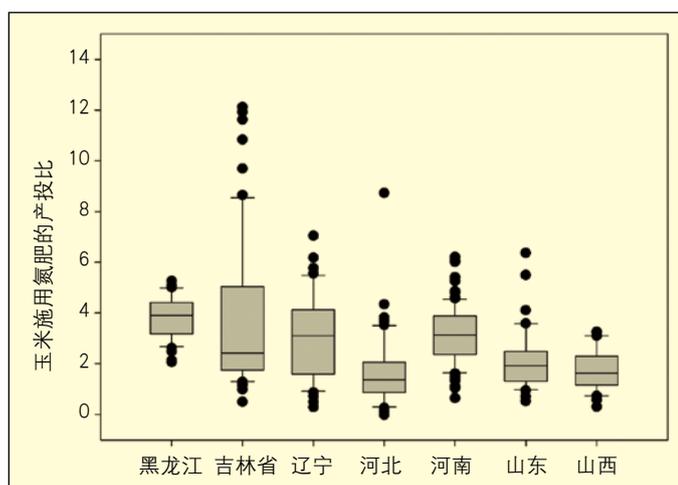


图 4 玉米施用氮肥的产投比

(氮肥价格与玉米价格以实际价格计算, 2010、2011 和 2012 年氮肥价格分别为 3.96, 4.80 和 5.28 元 / 公斤, 玉米价格分别为 1.87, 2.12 和 2.39 元 / 公斤)

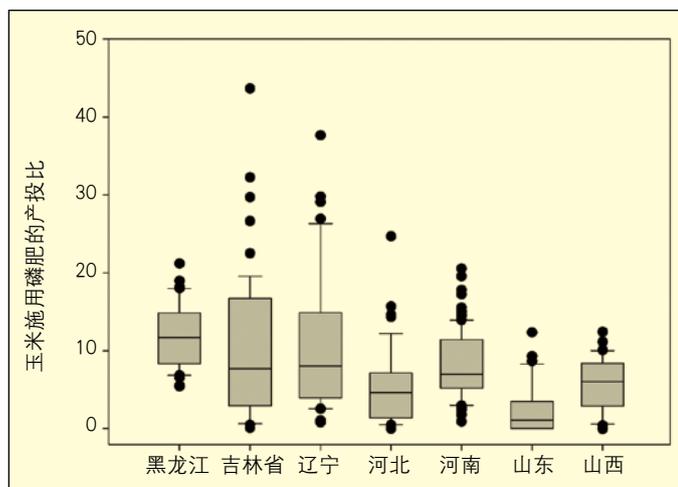


图 5 玉米施用磷肥的产投比

(磷肥价格与玉米价格以实际价格计算, 2010、2011 和 2012 年磷肥价格分别为 4.16, 4.52 和 4.91 元 / 公斤, 玉米价格同上)

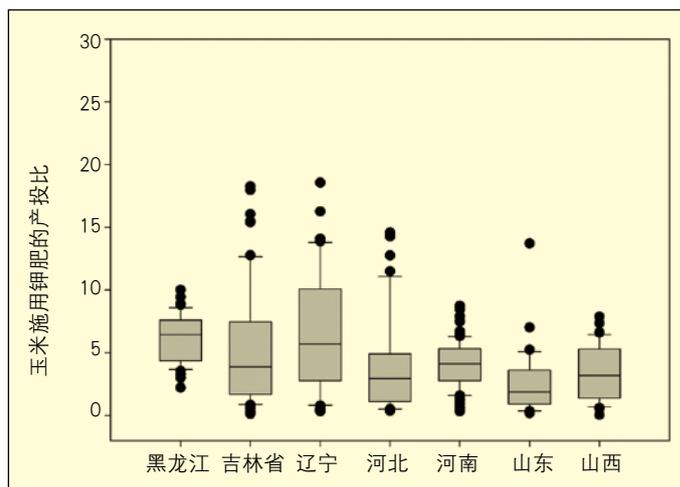


图 6 玉米施用钾肥的产投比

(2010、2011 和 2012 年钾肥价格分别为 6.43, 6.67 和 6.92 / 公斤, 玉米价格同上)

别为 8%, 10% 和 11%。表明在当前的养分管理和市场条件下, 约有 90% 的试验点施用氮、磷、钾肥料能够获得经济效益。

2.3 给定产量效应、肥料用量、肥料和玉米价格下经济效益分析

为预测将来肥料和玉米价格增加情况下玉米施肥的经济效益, 分析了不同产量效应条件下玉米的经济效益。分别用施用氮、磷、钾肥的第 25 个, 第 50 个和第 75 个百分位数下的施肥效应代表施肥的低、中、高三个施肥效应, 而相对应的施肥量则由 NE 专家系统产生, FP 施肥量则根据农民实际的施肥量确定。肥料价格分别采用 2010-2012 年的最低价格、中间价格、最高价格、最高价格的 125% 以及最高价格的 150% 来代表现在以及将来可能升高的肥料价格, 而玉米价格则采用能够覆盖当前玉米价格以及将来可能增加的玉米价格。

施氮后玉米的 VCR 变化范围为 1.9-13.5, 表明总体来讲氮肥施用能够给农民带来一定的经济效益。在 25% 的施氮产量效应和 7.3 公斤 N / 亩施氮量下, 在最高氮肥价格 (7.92 元 / 公斤) 和最低玉米价格 (1.5 元 / 公斤) 下玉米施氮的 VCR 为 1.9, 表明该条件下农民施氮能够获得 1.9 倍于肥料投入的收益。而且 VCR 随着玉米价格增加而增加。在 50% 和 75% 的施氮产量效应以及 10.0 和 12.7 公斤 N / 亩的施氮量下, 在最高氮肥价格以及最低玉米价格下的 VCR 分别为 2.2 和 2.5, 同样 VCR 随着玉米价格的增加而增加。以上结果表明, 在施氮产量效应低、

施氮产量效应 = 71.7 公斤 / 亩
施氮量 = 7.3 公斤 N / 亩

施氮产量效应 = 116.5 公斤 / 亩
施氮量 = 10.0 公斤 N / 亩

施氮产量效应 = 169.1 公斤 / 亩
施氮量 = 12.7 公斤 N / 亩

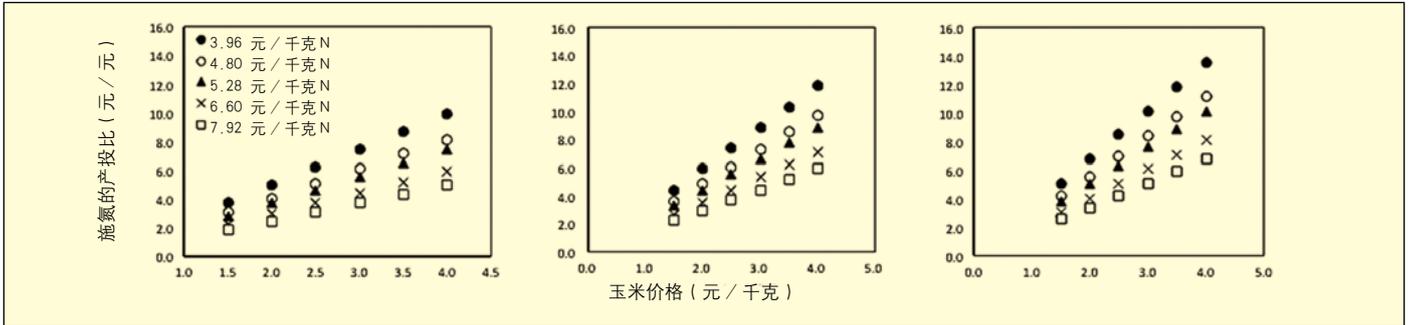


图 7 不同施氮产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施氮的产投比 (VCR)

施磷产量效应 = 30.3 公斤 / 亩
施磷量 = 3.3 公斤 P_2O_5 / 亩

施磷产量效应 = 53.7 公斤 / 亩
施磷量 = 4.0 公斤 P_2O_5 / 亩

施磷产量效应 = 86.7 公斤 / 亩
施磷量 = 4.7 公斤 P_2O_5 / 亩

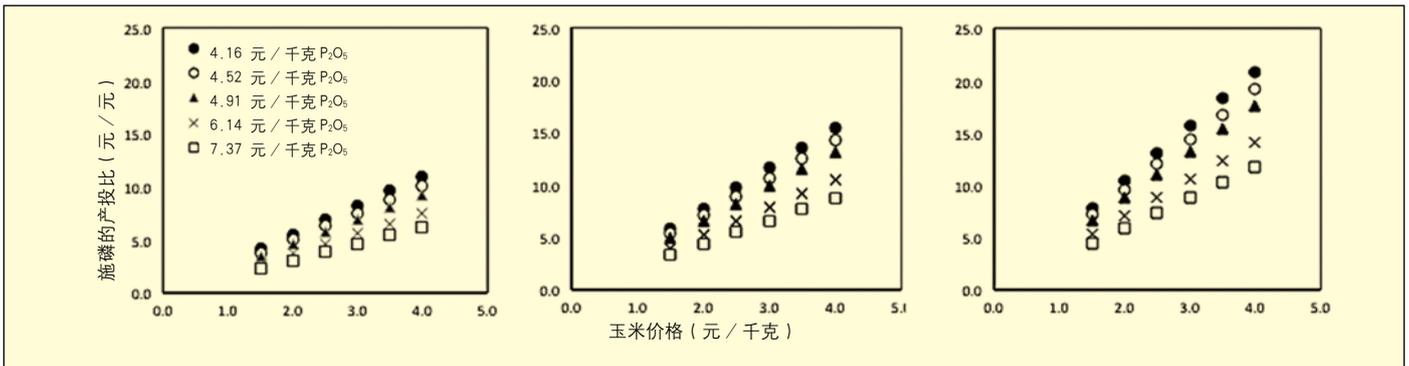


图 8 不同施磷产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施磷的产投比 (VCR)

施钾产量效应 = 26.9 公斤 / 亩
施钾量 = 4.0 公斤 P_2O_5 / 亩

施钾产量效应 = 55.7 公斤 / 亩
施钾量 = 4.7 公斤 P_2O_5 / 亩

施钾产量效应 = 88.5 公斤 / 亩
施钾量 = 5.3 公斤 P_2O_5 / 亩

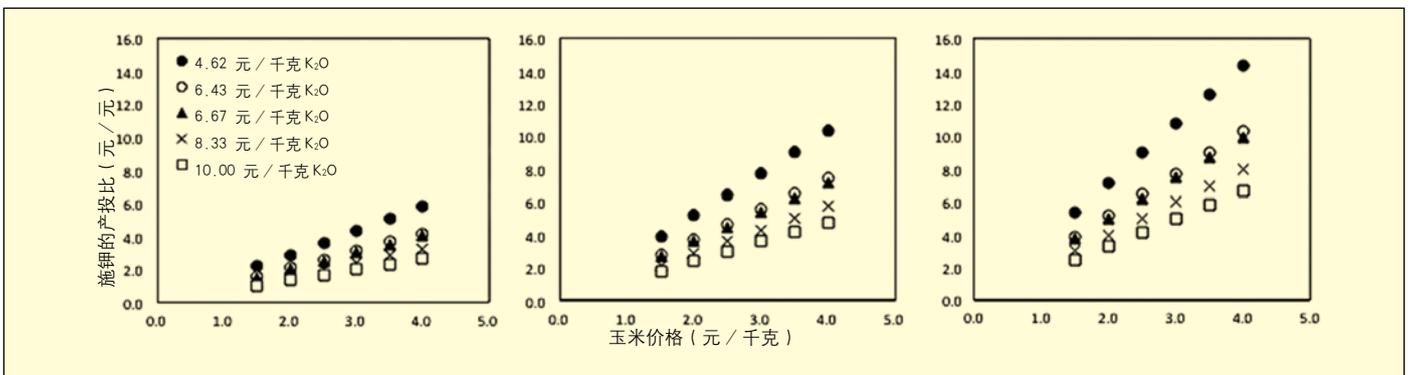


图 9 不同施钾产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施钾的产投比 (VCR)

中、高的情况下，农民施氮均能获益，而且VCR随着施氮产量效应而增加，也随着玉米价格增加而增加（图7）。

同样，在低、中、高施磷产量效应下，即在3.3公斤P₂O₅/亩对应的30.3公斤/亩产量效应，4.0公斤P₂O₅/亩对应的53.7公斤/亩产量效应，4.7公斤P₂O₅/亩对应的86.7公斤/亩产量效应下，在最高磷肥价格（7.37元/公斤）和最低玉米价格（1.5元/公斤）下的VCR分别为1.8、2.7和3.8；在低、中、高施钾产量效应下，既在4.0公斤K₂O/亩对应的26.9公斤/亩产量效应，4.7公斤K₂O/亩对应的55.7公斤/亩产量效应，5.3公斤K₂O/亩对应的88.5公斤/亩产量效应下，在最高钾肥价格（10.00元/公斤）和最低玉米价格（1.5元/公斤）下的VCR分别为1.0、1.8和2.5。表明施用磷钾肥农民可以获益，且VCR随着玉米价格增加而增加（图8和9）。

按照2010–2012年玉米最低价格（1.87元/公斤），计算了不同肥料用量和肥料价格下农民能够获得效益的施肥产量效应临界值（VCR=1）。结果显示，不同施氮量下以及不同氮肥价格下氮肥产量效应临界值变化范围为18.8–84.7公斤/亩，且其值随施氮量增加而增加。表明在施氮量较高的情况下，若想施肥获得效益其增产效应就要大。在北方玉米种植区，有些农民为盲目追求高产其施

氮量甚至达到并超过20.0公斤N/亩，这种情况下，如果按照2012年玉米价格计算则其施氮效应如果小于56.5公斤/亩则农民就不能获得收益，若按照2012年最高玉米价格基础上增长25%和增长50%情况下，若其施肥效应分别小于70.6和84.7公斤/亩则农民施氮不能获益。NE专家系统平均施氮量为10.4公斤N/亩，而农民平均施氮量为14.9公斤N/亩，而我们七省374个试验点中10%和25%的施氮效应分别为43.9公斤/亩和70.7公斤/亩，这种情况表明NE专家系统可以使90%的试验点获益，而农民习惯施肥则需要更高的施肥效应才能获益（表1）。

在不同施磷量下（2.0–10.0公斤P₂O₅/亩）施磷获益的产量效应变化范围为5.3–39.4公斤/亩。本研究中NE推荐的平均施磷量为3.7公斤P₂O₅/亩，而农民平均施磷量为4.1公斤P₂O₅/亩。由于本试验点10%的施磷产量效应为10.7公斤/亩，两种情况下均使接近90%的试验点获益。在不同施钾量下（2.0–6.0公斤K₂O/亩）获得效益的施钾产量效应变化范围为7.1–53.5公斤/亩。而试验点中25%的施钾产量反应是26.8K₂O/亩，表明若施钾量<6.0K₂O/亩，则试验中有75%的试验点施钾获益。仅从施钾量来讲，本研究中农民习惯施肥平均施钾量为3.3

表1 不同肥料用量和肥料价格下获得收益的施肥产量效应临界值（VCR=1） 公斤/亩

氮肥用量, 公斤 N / 亩	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0
氮肥价格, 元 / 公斤 N					
2012 年价格: 5.28	18.8	28.3	37.7	47.1	56.5
增加 25%: 6.60	23.5	35.3	47.1	58.8	70.6
增加 50%: 7.92	28.3	42.3	56.5	70.6	84.7
磷肥用量, 公斤 P ₂ O ₅ / 亩	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
磷肥价格, 元 / 公斤 P ₂ O ₅					
2012 年价格: 4.91	5.3	10.5	15.7	21.0	26.3
增加 25%: 6.14	6.5	13.1	19.7	26.3	32.8
增加 50%: 7.37	7.9	15.7	23.6	31.5	39.4
施钾量, 公斤 K ₂ O / 亩	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
钾肥价格, 元 / 公斤 K ₂ O					
2012 年价格: 6.67	7.1	14.3	21.4	28.5	36.7
增加 25%: 8.33	8.9	17.8	26.7	35.7	44.5
增加 50%: 10.00	10.7	21.4	32.1	42.8	53.5
注: 玉米价格按照 2010–2012 年最低价格 1.87 元 / 公斤计算					

公斤 K_2O / 亩, 与 NE 专家系统推荐的 4.5 公斤 K_2O / 亩的施钾量相比农民习惯施肥能够使更多的试验点获益。但是与农民习惯施肥比较, 专家系统推荐的 10.5–3.7–4.5 公斤 $N-P_2O_5-K_2O$ / 亩能够获得较高的籽粒产量 (683.7 公斤 / 亩) 和经济效益 (1260.2 元 / 亩), 而农民习惯施肥 (15–4.1–3.1 公斤 $N-P_2O_5-K_2O$ / 亩) 获得的产量和经济效益分别为 666.4 公斤 / 亩和 1210.3 元 / 亩。专家系统推荐施肥多获益 49.9 元 / 亩, 其中 1/3 来自节约的肥料, 2/3 来自增产带来的效益。这些效益虽然在前的小农户经营条件下不算多, 但是随着我国生产经营规模越来越大, 这种因优化的养分管理带来的规模效益将非常可观。本研究也再次证实基于 NE 养分专家系统的推荐施肥方法是一种能够增产增收提高肥料利用率的可行的推荐施肥新方法^[3-7]。其重要的施肥原则在于采用 4R 养分管理策略, 即将合适的肥料品种采用合适的肥料用量在合适的施肥时间施在了合适的施肥位置。

3 结论

玉米施用氮、磷、钾肥料的产量效应因供试土壤类型、土壤基础养分供应和施肥历史而异。本研究结果表明, 北方七省份玉米施用氮、磷、钾肥料的平均产量效应分别为 125.9 公斤 / 亩, 63.6 公斤 / 亩和 64.9 公斤 / 亩。施肥的经济效益与产量效应略有不同, 施磷肥玉米的 VCR 最大, 施钾肥的 VCR 次之, 施氮肥玉米的 VCR 最低。不施用氮、磷、钾肥料导致产量和经济效益均降低。在给定产量效应、施肥量以及肥料和玉米价格条件下, 施肥效应随产量效应增加而增加。表明在将来肥料价格增长的情况下, 施肥仍能获得收益, 该收益随施肥产量效应、玉米价格增加而增加。在北方玉米产区开展的 373 个田间试验结果表明, 与农民习惯施肥比较, 基于 NE 专家系统的推荐施肥能够增产增收, 是一种方便使用的推荐施肥方法。未来工作应该把 4R 养分管理策略与其他的农艺措施相结合以期进一步提高产量和经济效益。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴, 中国农业年鉴编委会 [M]. 北京: 2011.
- [2] He P, Li ST, Jin JY, 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.
- [3] 何萍, 金继运, Pampolino MF, 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.
- [4] Chuan LM, He P, Jin JY, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China [J]. *Field Crops Research*, 2013a, 146:96-104.
- [5] Chuan LM, He P, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2013b, 140:1-8.
- [6] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:115-125.
- [7] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157:27-34.
- [8] 郑伟, 何萍, 沙之敏, 等. 施氮对不同土壤肥力下玉米氮素吸收和利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2):301-309.
- [9] 叶东靖, 高强, 何萍. 施氮对土壤氮素供应和春玉米氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3):552-558.
- [10] 谢佳贵, 韩晓日, 王立春, 等. 不同施氮模式对春玉米产量、养分吸收剂氮肥利用率的影响 [J]. *玉米科学*, 2013, 21(2):135-138.
- [11] 苗建国, 金继运, 仇少君, 等. 生态集约化养分管理对春玉米产量和氮素利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):571-578.
- [12] 李兆君, 杨佳佳, 范菲菲, 等. 不同施肥条件下覆膜对玉米干物质积累及吸磷量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):571-577.
- [13] Majumdar K, Kumar A, Shahi V et al. Economic of potassium fertilizer application in rice, wheat and maize grown in the Indo-Gangetic Plains [J]. *Indian Journal of Fertilizers*, 2012, 8(5):44-53.
- [14] 国家发展和改革委员会价格司编. 全国农产品成本收益资料汇编 [M]. 北京, 中国统计出版社, 2010-2012.