

# 养分专家系统推荐施肥对山东小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响

魏建林<sup>1</sup> 崔荣宗<sup>1\*</sup> 肖建军<sup>2</sup> 杨果<sup>1</sup>

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100; 2. 平原县农业局土壤肥料工作站, 山东 平原 253100)

**摘要:** 在山东省平原县小麦、玉米生产上以农户地块为重复, 对 Nutrient Expert 专家推荐系统施肥方法 (OPT-NE) 进行田间试验验证, 同时以农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 (OPT-Local) 为对照。结果表明, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥及当地推荐施肥处理产量无明显差异。扣除肥料投入成本分析生产收益显示, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥相比增收效果明显, 并优于当地推荐施肥处理。基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理减少了氮养分投入, 平衡了磷钾养分投入, 实现了与农民习惯施肥及当地推荐施肥相持平的产量, 提高了生产收益, 降低了过量投入化肥带来的环境风险。

## 前言

建国以来尤其是改革开放以来, 我国在各个领域都取得了举世瞩目的成就。在农业上我们创造了用世界 9% 的耕地养活全球五分之一人口的奇迹, 粮食产量大幅增加, 肥料的贡献功不可没。据估计, 1978-2006 年间化肥投入对中国粮食产量的贡献率达 56.81%<sup>[1]</sup>。但相关资料和大量的研究表明, 我国农户在农业生产中的许多施肥行为是不合理的, 比较突出的有: 施肥强度大, 化肥利用率不高; 化肥投入的养分比例不平衡, 氮素过量施用, 磷、钾素及中、微量元素肥料施用比例偏低等<sup>[2-5]</sup>。人多地少的基本国情和人们对于粮食需求日益增长, 形成了我国特有的依靠化肥的大量投入来增加单产的农田高强度利用生产体系<sup>[6-7]</sup>。由此带来的土壤板结、地力下降、面源污染、环境恶化和食品安全问题日趋凸显<sup>[8-13]</sup>, 因而在党的十八大报告上把生态文明建设摆在总体布局的高度来论述。坚持以生态文明引领农业农村可持续发展, 建设生态化现代农业农村, 是我国农业走出困境、步入可持续发展良性循环的根本出路。

土壤肥料研究工作者一直为合理利用肥料、培肥土壤地力、提高粮食产量而努力, 在土壤养分管理和推荐施肥方面做了大量研究<sup>[14-19]</sup>。传统施肥推荐方法大多以土壤测试为基础, 根据土壤的物理性状、养分含量和作物的目标产量来确定施肥, 这种方法能够做到肥料施用较为科学、合理。但土壤测试的成本较高, 需要的时间也长, 同时我国幅员辽阔, 目前还是主要以分散的小农户为经营单位, 地块间地力存在一定差异, 要实现一家一户依据土壤测试结果推荐施肥是相当困难的。国际植物营养研究所 (IPNI)

开展了基于作物产量反应和农学效率的作物养分管理和推荐施肥方法 (Nutrient Expert) 研究<sup>[20-22]</sup>, 该推荐方法的原理是把土壤养分供应看作一个“黑箱”, 用不施该养分地上部的产量或养分吸收来表征, 利用大量已有的作物养分吸收和产量的关系数据, 结合当地的气候、环境及种植习惯等, 确定施肥推荐相关参数, 根据目标产量给出施肥数量和施肥方法。山东省自 2010 年开始已经开展了 3 年多的 Nutrient Expert 专家推荐系统在小麦、玉米上田间验证试验研究 (小麦 2 季, 玉米 3 季), 以下是验证试验情况的简要总结。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区域概况

试验地点位于山东省德州市平原县境内, 该区域属于鲁西北黄河冲积平原, 土壤类型为潮土, 质地为轻壤土。处于暖温带半湿润季风气候区, 年平均气温 13.1℃, 年平均降水量 641.5 毫米, 当地农田水浇条件良好。小麦玉米轮作是当地的主要种植模式, 小麦产量一般在 550 公斤/亩左右, 玉米产量一般在 650 公斤/亩左右。

### 1.2 试验地块土壤基本理化性状

试验前取试验地块耕层土壤分别用 ASI 法和常规法进行理化性状分析。ASI 法土壤测试结果显示, 当地土壤有机质含量在 0.38-0.64%, 平均为 0.49%, 变异系数 14.1%, 铵态氮含量在 1-14.1 毫克/升, 平均 5.29 毫克/升, 变异系数为 63.1%。硝态氮含量在 14.8-71.5 毫克/升,

平均 39.26 毫克 / 升, 变异系数为 37.9%。速效磷含量在 15.9-73.4 毫克 / 升, 平均 39.73 毫克 / 升, 变异系数为 33.1%。速效钾含量在 36.8-148 毫克 / 升, 平均 83.12 毫克 / 升, 变异系数为 24.3%。常规法土壤测试结果显示, 当地土壤有机质含量在 1.14-1.53%, 平均 1.35%, 变异系数 6.9%。碱解氮含量在 66.4-112.7 毫克 / 公斤, 平均 86.27 毫克 / 公斤, 变异系数为 12.2%。速效磷含量在 19.7-57.3 毫克 / 公斤, 平均 40.48 毫克 / 公斤, 变异系数为 22.2%。速效钾含量在 82.2-236.3 毫克 / 升, 平均为 138.69 毫克 / 公斤, 变异系数为 28.1%。

### 1.3 试验设计

以农户为重复, 每户设 7 个处理, 每户试验前进行农户施肥情况调查, 根据调查结果, 由 Nutrient Expert 施肥推荐系统进行分析, 提出当季作物生产上的推荐施肥处理 (OPT-NE), 据 Nutrient Expert 进行施肥推荐。各处理如下:

OPT-NE: 基于 Nutrient Expert 推荐量

OPT-Local: 由当地农技推广部门提供优化施肥方案

OPT-N: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不施氮肥

OPT-/+P: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不 / 增施磷肥

OPT-/+K: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不 / 增施钾肥

CK: 不施任何肥料

FP: 农民习惯施肥, 在农民地里进行, 不单独划小区做试验。

每个种植季节根据研究需要, 小区设计和布置上不尽一致。本文中主要分析 Nutrient Expert 推荐施肥方式与农民习惯施肥方式及当地推荐方式间的差异, 因此只对 OPT-NE、FP、OPT-Local 三个处理的结果进行对比分析。2010 年、2011 年夏玉米季及 2011 年小麦季 (2010 年 10 月播种, 2011 年 6 月收获) 小区面积为 40 平方米, 2012 年夏玉米季和 2012 年小麦季 (2011 年 10 月播种, 2012 年 6 月收获) 小区面积为 60 平方米。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米试验结果

2010 年 25 户试验结果显示, 农民习惯施肥 (FP) 处理玉米产量 376.7-538.3 公斤 / 亩,

平均 431.2 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 393.3-580.0 公斤 / 亩, 平均 433.4 公斤 / 亩, 比 FP 平均增产 0.6%。OPT-Local 处理产量 393.3-545.0 公斤 / 亩, 平均 438.5 公斤 / 亩, 比 FP 平均增产 1.9%。从产量增减分布情况看, 相对于 FP 处理, 有 58% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增产, 增产幅度在 5% 以上占总农户的 24%。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 60%, 其中有 32% 的农户增产幅度超过 5%。

2011 年 20 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理 (FP) 玉米产量 453.3-618.3 公斤 / 亩, 平均 545.5 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 457.8-606.5 公斤 / 亩, 平均 540.1 公斤 / 亩, 比 FP 平均减产 0.9%。OPT-Local 处理产量 440.0-630.0 公斤 / 亩, 平均 544.8 公斤 / 亩, 比 FP 平均减产 0.1%。从产量增减分布情况看, OPT-Local 增产效果优于 OPT-NE 处理, 相对于 FP 处理, 有 60% 的农户的 OPT-NE 处理表现为减产, 其中有 1 户减产幅度在 5% 以上。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 60%, 其中有 1 户增产幅度在 5% 以上。

2012 年 18 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理 (FP) 玉米产量 540.0-727.2 公斤 / 亩, 平均 637.0 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 552.6-676.0 公斤 / 亩, 平均 614.8 公斤 / 亩, OPT-NE 处理相对 FP 平均减产 3.3%。OPT-Local 处理产量 572.4-711.0 公斤 / 亩, 平均 623.3 公斤 / 亩, 相对于 FP 处理 OPT-Local 平均减产 2.0%, 从产量增减分布情况看, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理相对于 FP 处理表现一致, 均是有 66.7% 的农户表现为减产。

从三个年度试验结果看, 同一年度不同处理间产量统计分析均未达到显著性水平 (图 1)。

2010 年玉米生产中农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 649.5-979.5 元 / 亩, 平均 760.4 元 / 亩, OPT-NE 处理纯

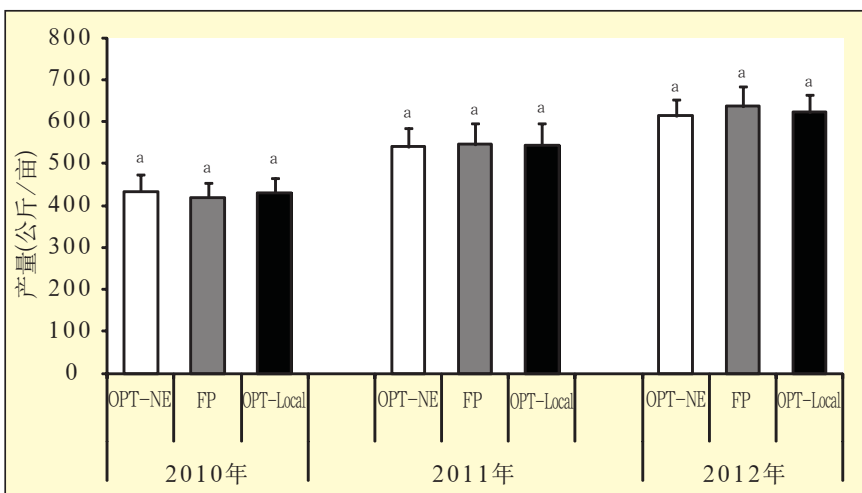


图 1 历年玉米产量比较



收入 714.1-1086.8 元/亩，平均 794.0 元/亩，比 FP 平均增收 4.6%。OPT-Local 处理纯收入 687.8-990.1 元/亩，平均 777.6 元/亩，比 FP 平均增收 2.6%。2011 年农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 946.1 -1287.9 元/亩，平均 1146.1 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 983.2-1348.7 元/亩，平均 1188.1 元/亩，比 FP 平均增收 3.76%。OPT-Local 处理纯收入 881.4-1306.6 元/亩，平均 1116.4 元/亩，比 FP 平均减收 2.56%。2012 年农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 1091.5-1499.5 元/亩，平均 1290.0 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 1138.1-1395.5 元/亩，平均 1271.9 元/亩，比 FP 平均减收 1.4%。OPT-Local 处理纯收入 1169.5-1472.4 元/亩，平均 1278.2 元/亩，比 FP 平均增收 0.9%。

从三个年度试验结果看，2010 年度、2011 年度种植玉米收益 OPT-NE 处理均高于其他两个处理，与 FP 处理相比差异均达到显著性水平。2012 年度不同处理间种植玉米收益差异未达到显著性水平 (图 2)。

养分表观平衡计算结果 (表 1) 显示，除 2011 年度 OPT-NE 处理磷钾略有亏缺外，各年份其它处理氮磷钾养分均表现为盈余，其中氮盈余量最大，磷钾养分盈余相对较小。OPT-NE 处理氮盈余 3.6-4.7 公斤/亩，平均 4.1 公斤/亩；磷盈余 -1.4-1.9 公斤/亩，平均 0.5 公斤/亩；钾盈余 -0.1-2.8 公斤/亩，平均 1.3 公斤/亩。FP 处理氮盈余 8.2-13.4 公斤/亩，平均 10.1 公斤/亩；磷盈余 1.2-2.3 公斤/亩，平均 1.9 公斤/亩；钾盈余 1.6-2.2 公斤/亩，

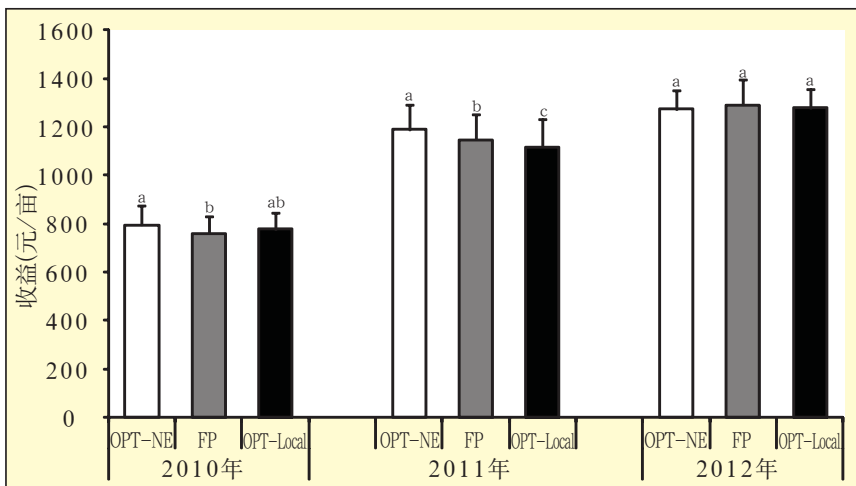


图 2 历年玉米生产效益比较

平均 1.8 公斤/亩。OPT-Local 处理氮盈余 5.3-11.2 公斤/亩，平均 8.3 公斤/亩；磷盈余 1.0-3.5 公斤/亩，平均 2.0 公斤/亩；钾盈余 2.4-5.6 公斤/亩，平均 3.5 公斤/亩。从不同处理来看，各年度中均以 OPT-NE 处理氮盈余量最小，习惯施肥处理的氮盈余量最大。

## 2.2 小麦试验结果

2011 年 30 户试验结果显示，农民习惯施肥处理 (FP) 小麦产量 503.1-623.1 公斤/亩，平均 551.0 公斤/亩，OPT-NE 处理产量

表 1 各年份玉米生产上 OPT-NE、FP、OPT-Local 处理养分表观平衡情况

年份	农户数	处理	施肥量 (公斤/亩)			养分移走量 (公斤/亩)			养分平衡 (公斤/亩)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2010	25	OPT-NE	9.3	3.4	4.0	4.6	2.4	1.2	4.7	1.0	2.8
		FP	18.1	3.5	2.8	4.7	2.3	1.2	13.4	1.2	1.6
		OPT-Local	16.0	3.4	4.0	4.8	2.4	1.4	11.2	1.0	2.7
2011	20	OPT-NE	10.1	0.1	1.3	6.5	1.5	1.4	3.6	-1.4	-0.1
		FP	15.3	3.8	3.1	6.5	1.5	1.4	8.8	2.2	1.7
		OPT-Local	15.0	5.0	7.0	6.6	1.5	1.4	8.4	3.5	5.6
2012	18	OPT-NE	10.6	3.0	2.3	6.5	1.2	1.2	4.1	1.9	1.1
		FP	14.9	3.6	3.4	6.7	1.2	1.3	8.2	2.3	2.2
		OPT-Local	12.0	2.6	3.6	6.8	1.2	1.2	5.3	1.4	2.4

483.2-650.3 公斤/亩, 平均 556.9 公斤/亩, 比 FP 平均增产 1.14%。OPT-Local 处理产量 509.9-652.3 公斤/亩, 平均 572.3 公斤/亩, 比 FP 平均增产 3.96%。从产量增减分布情况看, 相对于 FP 处理, 有 53.3% 农户的 OPT-NE 处理表现为增产, 增产幅度在 5% 以上占总农户的 23.3%。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 76.7%, 其中有 43.3% 的农户增产幅度超过 5%。

2012 年 29 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理小麦产量 443.6-574.9 公斤/亩, 平均 500.7 公斤/亩, OPT-NE 处理产量 452.6-596.6 公斤/亩, 平均 504.8 公斤/亩,

相对 FP 平均增产 0.9%。OPT-Local 处理产量 448.3-581.3 公斤/亩, 平均 506.9 公斤/亩, 相对 FP 平均增产 1.4%。从产量增减分布情况看, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理相对于 FP 处理表现一致, 均有 65.5% 的农户表现为增产。

从两个年度试验结果看, 2011 年度 OPT-Local 处理相对于 FP 处理增产达到显著性水平, 而 OPT-NE 处理与 FP 处理之间产量无显著性差异, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理之间产量也无显著性差异。2012 年度三个处理间产量未达显著差异 (图 3)。



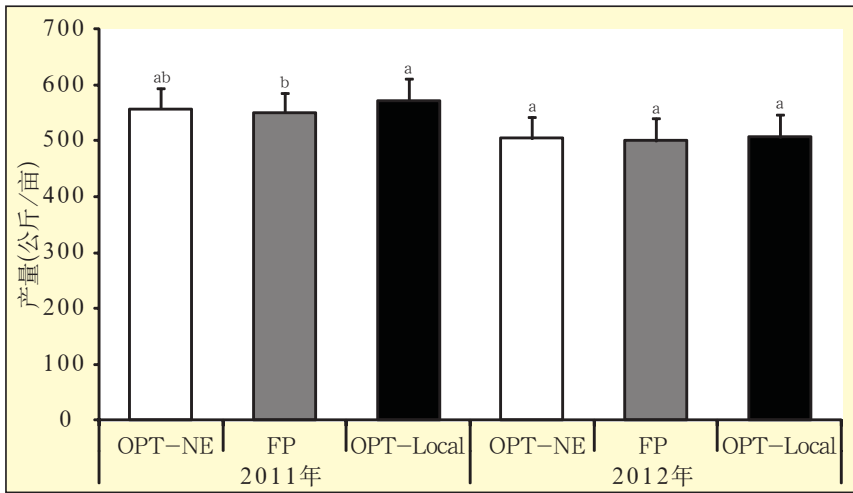


图3 历年小麦产量结果

从小麦种植经济效益结果分析看，2011年农民习惯施肥处理（FP）纯收入 907.4-1190.6 元/亩，平均 1019.6 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 930.2-1291.7 元/亩，平均 1090.0 元/亩，比 FP 平均增收 7.1%。OPT-Local 处理纯收入 941.4-1243.2 元/亩，平均 1073.6 元/亩，比 FP 平均增收 5.4%。从增收幅度分布看，OPT-NE 增收效果优于 OPT-Local 处理，相对于 FP 处理，有 93.3% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增收，而 OPT-Local 处理表现为增

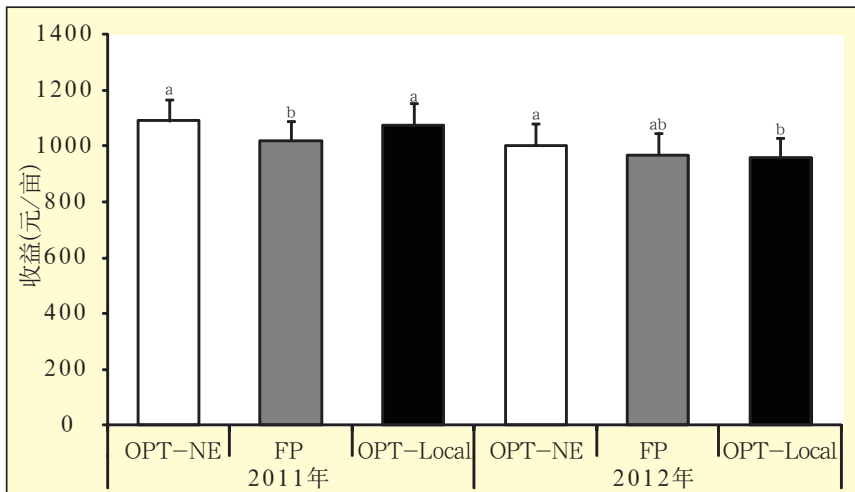


图4 历年小麦生产效益比较

收的比例为 83.3%。

2012年农民习惯施肥处理（FP）纯收入 851.1-1147.4 元/亩，平均 968.0 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 896.2-1201.8 元/亩，平均 1003.6 元/亩，比 FP 平均增收 4.9%。OPT-Local 处理纯收入 847.8-1095.4 元/亩，平均 957.5 元/亩，比 FP 平均减收 1.1%。从增收幅度的分布看，OPT-NE 增收效果优于 OPT-Local 处理，相对于 FP 处理，有 90% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增收。

从两个年度试验结果看，在小麦生产上 OPT-NE 处理收益高于其他两个处理，2011 年度相对于 FP 处理增收达到显著性差异水平，与 OPT-Local 相比无明显差异。2012 年度 OPT-NE 处理收益与 FP 处理差异不显著，与 OPT-Local 相比差异显著（图 4）。

养分表观平衡计算结果（表 2）显示，2011 年度 OPT-NE 处理氮磷养分亏缺，钾养分盈余，FP 和 OPT-Local 氮磷钾养分均表现为盈余，其中 FP 处理氮盈余最多，盈余量为 13.7 公斤/亩，OPT-Local 磷盈余量最大，盈余量为 3.7 公斤/亩。2012 年除 FP 处理钾养分略有亏缺外，其他养分均表现为盈余。FP 处理、OPT-Local 处理氮盈余量较大，盈余量分别为 9.6、9.0 公斤/亩。OPT-NE 处理氮盈余相对较小，仅为 1.3 公斤/亩。从不同处理养分盈余量两年试验结果看，OPT-NE 处理平均氮亏缺 1 公斤/亩，磷盈余 1 公斤/亩，钾盈余 2.6 公斤/亩。FP 处理平均氮盈余 11.6 公斤/亩，磷盈余 3.3 公斤/亩，钾收支平衡。OPT-Local 处理平均氮盈余 6.9 公斤/亩，磷盈余 5.7 公斤/亩，钾盈余 1.7 公斤/亩。FP 处理相比 OPT-NE 处理氮平均盈余 10 公斤/亩以上。

表2 各年份小麦生产上 OPT-NE、FP、OPT-Local 处理养分表观平衡情况

年份	农户数	处理	施肥量 (公斤/亩)			养分移走量 (公斤/亩)			养分平衡 (公斤/亩)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2011	30	OPT-NE	9.3	5.2	4.0	12.5	6.8	2.1	-3.2	-1.6	1.9
		FP	24.8	8.0	2.4	11.1	5.8	2.0	13.7	2.2	0.4
		OPT-Local	16.1	10.0	4.0	11.3	6.3	2.2	4.8	3.7	1.8
2012	29	OPT-NE	11.4	5.1	4.5	10.1	1.6	1.3	1.3	3.5	3.2
		FP	19.6	6.1	0.9	10.1	1.5	1.2	9.6	4.5	-0.3
		OPT-Local	19.1	9.3	2.9	10.1	1.6	1.2	9.0	7.7	1.6

### 3 结论

基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥方法在山东省小麦、玉米生产上 2-3 年的田间验证试验可得出如下结论:

1) 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥及当地推荐施肥处理产量无明显差异。从增产幅度的分布看当地推荐施肥方案增产效果略优于专家系统推荐施肥方案。

2) 从粮食生产效益分析结果看, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在小麦、玉米生产上与农

民习惯施肥相比增收效果明显, 且优于当地推荐处理。

3) 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理减少了氮养分投入, 平衡了磷钾养分投入, 实现了与农民习惯施肥及当地推荐施肥相持平的产量, 提高了生产收益, 并且减小了农业生产中氮素养分在土壤中的盈余, 降低了过量投入化肥带来的环境风险, 因此具有较高的生态效益和社会效益。

实践证明基于 Nutrient Expert 专家系统推荐是一种可以实现稳产增收、保护生态环境的推荐施肥方法, 而且成本低廉、简便易行, 值得推广。

### 参考文献

- [1] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析 [J]. 农业经济问题, 2008, (8): 65-68.
- [2] 高祥照, 马文奇, 杜森, 等. 我国施肥中存在问题的分析 [J]. 土壤通报, 2001, (6): 258-261.
- [3] 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, (3): 387-392, 469-470.
- [4] 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, (5): 915-924.
- [5] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, (2): 450-459.
- [6] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦 / 夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285-293.
- [7] Liu X Y, He P, Jin J Y et al. Yield gaps, soil indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China [J]. Agron. J., 2011, (103): 1452-1463.
- [8] 曹志洪. 施肥与水体环境质量 - 论施肥对环境的影响 (2) [J]. 土壤, 2003, (5): 353-363.
- [9] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境, 2004, (4): 656-660.
- [10] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初中国面源污染的形势估计 [J]. 中国农业科学, 2004, (7): 1008-1017.
- [11] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究 [J]. 土壤, 2005, (1): 48-51.
- [12] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征 [J]. 农业环境科学学报, 2005, (6): 1186-1191.
- [13] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省 (市) 地下水硝酸盐含量调查 [J]. 农业环境科学学报, 2007, (2): 779-783.
- [14] 杨守春. 推荐施肥研究方法的几个问题 [J]. 土壤通报, 1986, (3): 103-106.
- [15] 黄德明. 土壤测试推荐施肥技术中几个问题的探讨 [J]. 土壤肥料, 1990, (2): 11-13.
- [16] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 495-499.
- [17] 侯彦林, 陈守伦. 施肥模型研究综述 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (4): 493-501.
- [18] 白由路, 杨俐苹, 金继运. 测土配方施肥原理与实践 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [19] 张福锁. 测土配方施肥技术要览 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [20] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 等. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, (4): 402-407.
- [21] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [22] 何萍, 金继运, Mirasol F. 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, (2): 499-505.