

养分专家系统推荐施肥对山西小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响

于志勇 赵萍萍 王宏庭* 朱向东

(山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 科学合理的养分管理对于保障国家粮食安全、生态环境安全具有重要意义。2010-2012年应用 Nutrient Expert 推荐施肥专家系统对山西主要作物玉米小麦进行了验证研究, 结果显示: 基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的效果相当, 与农民习惯比较, 小麦平均节氮 4-6.5 公斤/亩, 氮肥回收率提高 7.1-8.9 个百分点, 玉米节氮 4.5-4.8 公斤/亩, 氮肥回收率提高 4.4-10.1 个百分点。在不能进行测土施肥或条件有限的情况下, 养分专家系统有其独特的优势: 简单、实用、便于操作, 可实现稳产、节氮、高效、环境安全的目的, 是一种适合我省现有农业生产体制、易于掌握推广的新方法。

关键词: 养分专家系统; 玉米; 小麦; 产量; 肥料效率

玉米、小麦是山西省最重要的两大粮食作物, 也是山西粮食安全的重要保障。2011年玉米、小麦的播种面积分别为 1648.7 千公顷和 710.1 千公顷, 分别占全省总播种面积的 43.4% 和 18.7%, 玉米总产达 854.6 万吨, 小麦总产达 240.3 万吨, 分别占全省粮食总产的 71.6% 和 20.1%^[1]。肥料是作物的“粮食”, 科学施肥是农业可持续发展的重要技术保障^[2], 施用化肥在过去、现在和将来都是我国最有效的农产品增产措施之一^[3]。近年来, 我国化肥的年使用总量一直居世界首位, 2011年全国的化肥施用量(折纯)达 5704.2 万吨^[1], 约占世界化肥施用量的三分之一, 但使用不合理, 肥料回收率低, 较发达国家低 10-20 个百分点^[4]。一些学者^[3]的研究也表明, 粮田生产施肥是高投入、中产出、低资源效率。这样, 一方面表现为投入增加、生产效益低下, 造成资源浪费, 另一方面对环境产生负面效应, 影响农业的可持续发展。因此, 如何进行合理养分管理和优化施肥对于保障国家粮食安全、生态环境安全具有重要意义。

国内外在土壤养分管理和推荐施肥方面开展了大量研究, 发展了一些推荐施肥的方法。按应用方法分为肥料效应函数法、测土施肥法和营养诊断法等三大方法系统^[5]。三大类方法各有优点和技术特点, 也存在不足, 所以在实际应用中常是以一种方法为主, 配合其它方法使用。目前发达国家已发展到借助地理信息系统 GIS, 卫星定位系统 GPS, 遥感系统和计算机软件, 构成特定点养分管理系统 SSNMS, 对具体田块施肥进行精确调控^[6-7]。由于受技术、资金、人力、时效性等因素的影响, 上述方法均不能满足我国主要以小农户为主要经营单元的农业生产体系, 也很

难做到一家一户依据土壤测试结果推荐施肥, 而生产实践中迫切需要简单、实用、便于操作的施肥推荐系统。国际植物营养研究所 (IPNI) 开发的专家系统 (Nutrient Expert) 的推荐施肥方法是以改进的 SSNM 和改进的 QUEFTS 模型参数为指导的养分管理和推荐施肥为原则, 同时考虑大、中微量元素的全面平衡, 并应用计算机软件技术把复杂和综合的养分管理原则智能化形成可为当地技术推广人员掌握的 Nutrient Expert 推荐施肥专家系统^[8]。针对山西施肥现状和开展的测土施肥工作现状, 该系统在主要作物玉米、小麦应用效果如何? 能否指导农业生产实践? 本研究于 2010-2012 年应用该系统进行了相关参数的验证和校正, 以便更好地为山西农业发展提供理论依据和实践指导。

1 材料与方 法

临汾市是晋南地区重要的冬小麦/夏玉米轮作主产区, 属半干旱温带大陆性气候, 多年平均气温在 12.6℃ 左右, 年均降水量 498 毫米, 无霜期 195 天左右。2010、2011、2012 三年试验期间平均气温分别为 13.8℃、13.3℃、13.7℃, 年降雨量分别为 454.5 毫米、630.8 毫米、497.5 毫米。试验选在临汾市襄汾县西贾乡义顺村和尧都区乔李镇南

表 1 供试土壤理化特性

年份及试验数	OM %	毫克/升			
		NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	K
2010 (n=11)	0.98	28.9	21.2	29.5	111.0
2011 (n=36)	0.76	11.4	25.2	28.2	92.8
2012 (n=34)	0.64	7.8	29.0	36.1	87.2

表2 试验方案设计 (单位: 公斤/亩)

作物	年份及 试验数	OPTe	OPTe-N	OPTe-P	OPTe-K	CK	OPTs	FP
		N-P ₂ O ₅ -K ₂ O						
小麦	2011 (n=11)	9.2-4.5-5.3	0-4.5-5.3	9.2-0-5.3	9.2-4.5-0	0-0-0	12-4.5-5.3	17.5-7.3-2.1
	2012 (n=18)	11.6-5.8-4.5	0-5.8-4.5	11.6-0-4.5	11.6-5.8-0	0-0-0	14-6-5	17.1-6.9-2.3
夏玉米	2010 (n=11)	9.6-3.5-3.4	0-3.5-3.4	9.6-0-3.4	9.6-3.5-0	0-0-0	13.3-4-5	17-4.5-2.1
	2011 (n=25)	11.5-3.2-3.7	0-3.2-3.7	11.5-0-3.7	11.5-3.2-0	0-0-0	-	12.7-3.2-2.3
	2012 (n=16)	9.9-4-4.1	0-4-4.1	9.9-0-4.1	9.9-4-0	0-0-0	13.3-5-5	18.5-1.9-1.3

麻村进行, 试验设7个处理, 包括OPTe、OPTe-N、OPTe-P、OPTe-K、CK、OPTs和FP, 随机排列, 试验以农户为重复, 每个处理不再单独设置重复。其中, O_PTe为基于养分专家模型的肥料推荐, O_PTe-N、O_PTe-P、O_PTe-K是指在O_PTe基础上不施氮肥、不施磷肥和不施钾肥, CK为不施任何肥料, OPTs为基于土壤测试(ASI法^[9])的肥料推荐, FP为农民习惯施肥。供试土壤类型为石灰性褐土, 质地为中壤。试验从2010年6月-2012年10月共开展5季作物81个试验, 其中, 2010年度完成夏玉米试验11个, 试验2011年度完成了冬小麦试验11个, 夏玉米试验25个; 2012年度完成冬小麦试验18个, 夏玉米试验16个。

冬小麦试验于每年10月20日左右播种, 翌年6月中旬收获。供试品种选用当地适播高产品种(如济麦22号、舜麦1718和临麦8050), 磷钾肥和45%的氮肥于播前撒施作基肥施用, 55%的氮肥于翌年三月下旬结合中耕以条施方式施用或撒施结合灌溉施用。冬小麦生长期, 浇入冬水、返青水和抽穗水各一次, 锄草、治虫按当地习惯。夏玉米试验于小麦收获后马上播种, 也选用当地适播高产品种(如先玉335)。磷钾肥和1/2氮肥于夏玉米5-6叶期以条施方式施用, 1/2氮肥则在玉米拔节期按处理以穴施方式施用, 玉米生长期, 浇水、治虫各1-2次, 于十月中旬收获。试验所用肥料为尿素(46%N)、过磷酸钙(12%P₂O₅)和氯化钾(60%K₂O)。每季试验收获时各处理分别取植株样品和土壤样品, 用常规方法^[10]分析, 植株样品分析项目为植株全氮、全磷和全钾。土壤样品分析项目为土壤硝态氮、速效磷及速效钾。供试土壤理化性状的平均结果和试验方案设计分别见表1和表2。采用Excel和SPSS 10.0软件对试验数据进行了统计分析。纯收益、氮肥农学效率、氮肥回收率计算公式分别为:

$$\text{纯收益 (元/亩)} = \text{产量} \times \text{产品价格} -$$

肥料施用量 × 肥料价格;

$$\text{氮农学效率 (公斤/公斤)} = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量};$$

$$\text{氮肥回收率} = (\text{施氮区吸氮量} - \text{不施氮区吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

2 结果分析

2.1 不同处理对作物产量的影响

作物产量是评价肥料施用效果和土地生产能力的重要参数^[11], 由表3结果显示: 每季作物不同施肥处理均影响作物的产量, 不同农户、不同年份的产量反应也均存在一定差异。从每季作物产量的平均效果看, O_PTe、OPTs与FP处理比较, 产量差异不大, 均未达显著水平, 这表明基于养分专家系统的推荐施肥和基于土壤测试的推荐施肥在明显低于农民习惯施肥量的情况下同样可以实现作物高产, 养分专家系统和土壤测试的推荐效果也基本相当。同一作物、同一处理不同年份比较, 产量反应也存在一定的差异, 就夏玉米而言, 三季作物不同处理的平均产量表现为2010年产量最低, 2012年产量最高, 2011年产量居中, 这主要受不同年份的降雨量影响, 三季作物的CK处理产量存在差异。三季夏玉米的平均产量为: OPTs > O_PTe

表3 不同处理对作物产量的影响 (单位: 公斤/亩)

处理	2010年	2011年		2012年		夏玉米 (n=52) 平均	冬小麦 (n=29) 平均
	夏玉米 (n=11)	冬小麦 (n=11)	夏玉米 (n=25)	冬小麦 (n=18)	夏玉米 (n=16)		
OPTe	511.3a	550.7a	557.5a	577.8a	624.7a	568.3ab	567.5ab
OPTe-N	463.1a	460.1b	486.6b	490.3c	549.9c	501.1c	478.9c
OPTe-P	488.1a	520.5ab	523.9ab	541.6b	589.2b	536.4b	533.6b
OPTe-K	481.5a	513.2ab	525.5ab	548.2ab	611.7ab	542.7b	534.9b
CK	455.5a	441.6b	485.9b	498.8c	553.5c	500.3c	477.1c
OPTs	506.2a	574.7a	--	584.4a	627.7a	578.2a*	580.7a
FP	498.5a	566.5a	549.3a	587.5a	626.6a	562.3ab	579.5a

注: n为试验数, 同一列数值后不同小写字母表示差异达5%显著水平, *标注n=27。

> FP。两季小麦的平均产量表现为 2011 年的小麦产量低于 2012 年，处理产量表现为：OPTs > FP > OPTe。

与 OPTe 处理比较，无论是小麦还是玉米，OPTe-N、OPTe-P、OPTe-K 均有不同程度的减产，OPTe-N 处理减产幅度最大，其次为 OPTe-P 处理和 OPTe-K。玉米 OPTe-N 处理三季平均产量较 OPTe 处理减产 67.2 公斤 / 亩，只相当于 OPTe 产量的 88.2%，统计检验达显著水平；OPTe-P、OPTe-K 的平均产量分别相当于 OPTe 产量的 94.4% 和 95.5%，统计检验未达显著水平；CK 处理的产量较 OPTe 处理减产 68.1 公斤 / 亩，与 OPTe-N 处理产量相当，统计检验也达显著水平。小麦 OPTe-N 处理两季平均产量较 OPTe 处理减产 88.7 公斤 / 亩，相当于 OPTe 产量的 84.4%，统计检验达显著水平，OPTe-P、OPTe-K 的平均产量分别相当于 OPTe 产量的 94.0% 和 94.3%，统计检验未达显著水平，CK 处理的产量较 OPTe 处理减产 90.5 公斤 / 亩，也与 OPTe-N 处理产量相当。这表明氮仍是限制小麦、玉米产量的第一因子，其次为磷和钾。

2.2 不同处理对氮肥施用效率的影响

氮是影响环境质量的重要因子，氮肥的农学效率和回收率是评价氮肥施用有效性的重要指标，氮肥效率高，对环境的影响相对较小，反之，则影响较大。本研究计算了 OPTe 处理的农学效率和回收率，由于试验设计中没有设置基于测土推荐的减氮处理和农民习惯施肥的减氮处理，致使不能准确评价 OPTs 和 FP 处理的氮肥施用效率。由表 4 结果显示：不同年份、不同作物氮肥的施用效率存在差异，这既与试验农户的土壤养分状况和作物对氮肥施用的敏感性有关，也与不同年份气温和降雨量有关。从小麦氮肥施用的效率看，2011 年小麦的氮肥施用的农学效率和氮肥回收率均高于 2012 年，两季小麦的平均结果显示 OPTe、OPTs 的氮肥农学效率和回收率基本相当，均高于 FP 处理，OPTe 和 OPTs 氮肥农学效率较 FP 多生产 2.4 公斤 / 公斤小麦，回收率提高 7.1-8.9 个百分点；就玉米而言，三季氮肥施用的效率也存在差异，2012 > 2011 > 2010。三季玉米氮肥施用的平均效率显示 OPTe > OPTs > FP，OPTe 较 FP 多生产 1.9 公斤 / 公斤玉米，氮肥回收率提高 10.1 个百分点；OPTs 较 FP 多生产 0.7

表 4 不同处理对氮肥效率的影响

年份	小麦季			玉米季								
	氮肥农学效率 (公斤 / 公斤)			氮肥回收率 (%)								
	OPTe	OPTs*	FP*	OPTe	OPTs*	FP*						
2010	--	--	--	--	--	--	5.1	4.3	3.5	14.1	15.3	13.7
2011	10.1	11.1	7.7	35.2	38.0	25.2	6.2	--	4.5	25.7	--	14.7
2012	7.4	6.8	5.1	21.5	22.3	16.0	7.7	5.6	4.7	30.9	21.3	15.4
平均	8.5	8.5	6.1	26.7	28.5	19.6	6.3	5.1	4.4	24.8	19.1	14.7

注：* 表示各处理与 CK 处理比较，OPTe 处理的回收率计算以 OPTe-N 为比较

表 5 不同处理对纯收益的影响 (单位: 元 / 亩)

处理	2010 年	2011 年		2012 年		夏玉米	冬小麦
	夏玉米 (n=11)	冬小麦 (n=11)	夏玉米 (n=25)	冬小麦 (n=18)	夏玉米 (n=16)	(n=52) 平均	(n=29) 平均
OPTe	1012.3a	1155a	1379.1a	1195.9a	1446.2a	1322.1a	1180.3a
OPTs	957.7a	1193.3a	--	1198.3a	1422.7a	1233.2a*	1196.4a
FP	952.9a	1156.3a	1358.9a	1195.7a	1442.5a	1298.8a	1181.5a

注：* 表示 n=27，净收益计算按当年的肥料价格和农产品价格折算

公斤 / 公斤玉米，氮肥回收率提高 4.4 个百分点。由表 2 的施肥方案也可以看出，OPTe 和 OPTs 均能节省氮肥，小麦季 OPTe 和 OPTs 分别平均节省氮肥 6.5 公斤 / 亩和 4 公斤 / 亩，玉米季分别节省 4.8 公斤 / 亩和 4.5 公斤 / 亩，可见，基于养分专家系统的推荐和基于测土的推荐均较农民习惯节约氮肥和提高氮肥的施用效率，两种推荐均能达到科学施肥的目的。

2.3 不同处理对纯收益的影响

由表 5 结果显示，不同年份的小麦和玉米的 OPTe、OPTs 处理的净收益与 FP 处理的净收益相差不大，统计检验未达显著，似乎没有显示出基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的优越性，但 OPTe 和 OPTs 较 FP 处理节省了氮肥，相应增加磷钾肥施用，更有利于养分的平衡供应和可持续发展。纯收益的增加不仅受养分投入的影响，更多地受肥料价格波动的影响。可见，无论哪种肥料的推荐也应该适当考虑肥料品种及价格波动的因素，有待进一步研究。

3 讨论与结论

在农田生产条件下，作物生长发育往往受水、肥、气、热及栽培管理措施等因素的影响，在栽培管理措施相对一致的情况下，肥料投入的多少一定程度上影响作物的产量

和收益,但肥料的投入和产量的关系不是简单的正相关关系。当前农民过量和不平衡施用化肥现象严重,导致肥料回收率降低,影响到农田的可持续利用。因此,发展适合我国农业生产特点的养分管理和施肥方法尤为重要^[8]。国际植物营养研究所开发的 Nutrient Expert 推荐施肥专家系统是一种适合分散经营生产体制、易于掌握应用的新方法,具有简单、实用、便于操作的特点,经过近三年在山西晋南地区的应用,证明是一种易于推广人员掌握的新方法,可以实现稳产、节氮、高效的目的。本研究结果表明:基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的效果相当,能够达到作物高产、稳产的目标,与农民习惯施肥比较,小麦季平均节氮 4-6.5 公斤/亩,氮肥农学效率平均 8.5 公斤/公斤,与近年来国内有关专家^[12]的研究效果相当;氮肥回收率为 26.7%,较农民习惯施肥提高 7.1-8.9 个百分点;玉米季节氮 4.5-4.8 公斤/亩,氮肥农学效率平均为 6.3 公斤/公斤,氮肥回收率平均为 24.8%,与张福锁等^[11]报道我国玉米氮肥回收率分别为 26.1% 相近,较农民习惯施肥提

高 10.1 个百分点。2011 年和 2012 年冬小麦-夏玉米轮作农田化肥氮平均用量分别为 20.7 公斤/亩和 21.5 公斤/亩,远远低于华北地区平均用量已高达 36.3 公斤/亩,也低于目前全国氮肥平均用量 25.2 公斤/亩,与华北地区目前平均产量水平下作物对氮素的需求量 20.7 公斤/亩相当^[13],降低了因氮素过量施用而带来的环境风险,对促进农业的可持续发展具有重要意义。值得提出的是,该方法在优化用量的同时,还优化了其他养分管理措施,如肥料的施用次数和施肥方法等^[8]。

利用养分专家系统推荐施肥能够提高农民科学种田的水平,改变生产中普遍存在因重氮肥,轻磷、钾肥等不平衡施肥现象造成肥料回收率低、施肥成本高、经济效益下降、生态环境恶化,改变通过增加肥料投入来提高粮食产量的生产方式,优化我国特有的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^[12],能够有效地指导农业生产实践。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [2] 金继运. 我国养分资源高效利用的战略和目标 [J], 高效施肥, 2011, (27): 1.
- [3] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系 [J], 土壤与环境, 2000, 9(2): 154-157.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6
- [5] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能 - 对我国配方施肥工作的述评 [J]. 土壤通报, 1989, (1): 46-48.
- [6] Reetz HF. Site-specific nutrient management systems for the 1990s [J]. Better crops with plant food, 1994, 78(4): 14-19.
Reetz HF. Maintenance + buildup nutrient management for [J]. Better crops with plant food, 1996, 80(3): 9-11.
- [7] 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, 18(2): 499-505.
- [8] 金继运, 张宁, 梁鸣早, 等. 土壤养分状况系统研究法在土壤肥力研究及测土施肥中的应用 [J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 8-15.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [10] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料回收率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [11] 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.
- [12] 赵荣芳, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡 [J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697.