

向日葵养分专家系统推荐施肥效应研究

段玉¹, 范霞², 安昊¹, 张君¹, 梁俊梅¹, 张婷婷¹, 景宇鹏¹, 王博¹

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院资源环境与检测技术研究所, 内蒙古 呼和浩特, 010031;

2. 呼和浩特市赛罕区农牧水利局, 内蒙古 呼和浩特, 010020)

摘要:为了更好地为生产者和技术人员提供推荐服务, 本研究汇总和分析各地试验数据, 以明确向日葵养分专家系统推荐施肥的优势, 促进向日葵养分专家系统在生产上大面积推广应用。2017–2019年在向日葵主要产区进行了84项向日葵养分专家系统田间验证试验, 分析比较了向日葵养分专家系统与当地习惯施肥的节肥效果、增产效果、肥料利用效率和经济效益。结果表明: 向日葵养分专家(NE)推荐养分用量较农民习惯(FP)减少了氮(N)投入7 kg/hm², 减少磷(P₂O₅)投入23 kg/hm², 施肥更加优化合理。NE较FP平均增产293.1 kg/hm²(增产率为8.4%), 经济效益增加1754.4元/hm², 氮和磷农学效率增加1.7和3.6 kg/kg, 氮磷钾养分回收率分别提高8.7、6.1和6.0个百分点。向日葵养分专家系统具有节约氮磷肥、增加产量、增加经济效益、提高肥料利用效率的良好效果, 向日葵产区可以根据向日葵养分专家系统进行推荐施肥。

关键词: 向日葵; 养分专家系统施肥推荐; 产量; 养分利用效率; 经济效益

中图分类号: S565.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2021)06-1108-07

Effect study on sunflower nutrient expert system for fertilization recommendation

DUAN Yu¹, FAN Xia², AN Hao¹, ZHANG Jun¹, LIANG Jun-mei¹, ZHANG Ting-ting¹, JING Yu-peng¹, WANG Bo¹

(1. *Institute of Resources Environment and Detection Technology, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China*; 2. *Agriculture, Animal Husbandry and Water Resources Bureau, Saihan District, Hohhot 010020, China*)

Abstract: To improve the Sunflower Nutrient Expert System, and to facilitate large-scale application, 84 field experiments were carried out from 2017 to 2019 which covered the main sunflower producing areas in China. The efficiency of saving fertilizer, increasing yield, nutrient recovery and economic benefits of sunflower nutrient expert system were analyzed and compared with farmer accustomed fertilization. Results showed that the recommended nutrient rate of sunflower nutrient expert (NE) were 7 kg/hm² less nitrogen (N), and 23 kg/hm² less phosphorus (P₂O₅) than farmer's practice fertilization (FP). Thus the fertilization was more optimized and reasonable. NE produced an average yield increase of 293.1 kg/hm² compared with FP fertilization, with yield increase rate of 8.4%. The yield response of NE nitrogen, phosphorus and potassium increased significantly compared with FP. Compared with FP, the economic benefit RMB of NE increased by 1754.4 yuan/hm². The agronomic efficiency of N and P recommended for NE fertilization increased by 1.7 and 3.6 kg/kg compared with FP. Compared with FP, NE improved NPK RE by 8.7, 6.1 and 6.0 percentage points, respectively. It can be seen that sunflower nutrient expert system has the good effect of saving nitrogen and phosphorus fertilizer, increasing yield, economic efficiency improvement and improving nutrient recovery. Sunflower nutrient expert system can be used to recommend fertilization in sunflower production areas.

Key words: sunflower; nutrient expert recommendation fertilizer; yield; nutrient utilization efficiency; economic benefits

收稿日期: 2020-07-08

基金项目: 国家特色油料产业技术体系(CARS-14); 内蒙古自治区科技计划项目(2019GG346)

作者简介: 段玉(1963–), 男, 硕士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥研究, E-mail: duanyu63@aliyun.com

我国是向日葵生产大国,2014–2018年种植面积平均为95万公顷,年产量为259万吨,全球排第五位,种植面积和总产占全球的3.6%和5.5%^[1]。随着品种的不断更新、高产栽培技术的不断改进,我国向日葵的产量大幅度提高^[2],单产由2001年的1454.7 kg/hm²提高到2018年的2897.7 kg/hm²,为了维持较高的产量需要通过施肥加以补充养分才能满足向日葵生长发育对养分的需求^[3]。然而,在产量不断增加的同时,农民盲目追求高产导致了肥料不合理施用和过量施肥问题日益严重^[4],重视氮、磷肥的投入,忽视钾肥的施用。肥料的过量或不合理施用不仅影响向日葵产量和品质^[5–8],还降低了养分利用率,导致资源浪费,损失的养分进入环境还将对农田生态环境造成潜在威胁,直接影响农田可持续利用。测土推荐施肥是较好的推荐施肥方法^[9,10],但由于向日葵主产区早春土壤尚未化冻,取土困难,化验需要时间和费用较多,再者化验结果还需要找专家进行推荐施肥,特别是我国以分散经营为主的小农户种植方式,因而难以推广应用^[11]。为此,本文作者研发了向日葵养分专家系统^[12,13],2018年9月5日获得中华人民共和国国家版权局软件著作权(登记号2019SR0040066)。可通过微信平台关注公众号“养分专家”注册使用^[14]。该方法是在汇总过去十几年全国向日葵主产区开展的肥料田间试验的基础上,建立了包含作物产量反应、农学效率及养分吸收与利用信息的数据库,依据土壤基础养分供应、作物农学效率与产量反应的内在关系、以及具有普遍指导意义的作物最佳养分吸收和利用特征参数,建立了基于产量反应和农学效率的推荐施肥模型^[15,16]。基于以上养分管理原则,应用计算机软件技术,把复杂的施肥原理研发成了方便科研人员和农技推广人员使用的向日葵养分专家系统,该系统采用问答式界面,只需按照操作流程回答几个简

单的问题,系统就能给出基于用户地块信息的个性化施肥方案,这一方法已在玉米^[17–19]、水稻^[20]、小麦上进行应用^[21,22]。

养分专家系统不是特意地增加和降低施肥量,而是采用“4R养分管理原则”(即选择合适的肥料品种、确定适宜养分用量,在正确的时期施在正确的位置)进行平衡施肥,于2017–2019年在向日葵主产区进行了田间验证试验,分析其优势,为进一步大面积推广应用。

1 材料与方法

1.1 试验地点

向日葵产量、地上部N、P、K养分吸收、肥料施用量等数据,来自2017–2019年各向日葵主产区进行的田间试验,包括内蒙古36项、西北22项(新疆6项、甘肃6项、宁夏5项、陕西5项)、华北11项(山西5项、河北6项)、东北15项(吉林9项、黑龙江6项),共84项,其中食葵73项,油葵11项,基本覆盖了全国向日葵种植区域(试验点土壤特性和施肥情况见表1)。

1.2 试验处理

农民习惯施肥处理(FP)、养分专家推荐施肥处理(NE)、不施氮肥(NE-N)、不施磷肥(NE-P)、不施钾肥(NE-K)。84项次试验各处理的施肥情况见表2。

1.3 参数计算方法

产量反应(yield response, YR)即全肥区产量与对应减素处理产量的产量差。

肥料农学效率(agronomic efficiency, AE):特定施肥条件下,单位肥料纯养分所能增加的经济产量,是施肥增产效应的综合体现,反映了增施某种养分对产量作用的大小。

相对产量(relative yield, RY):缺素区产量与全

表1 试验的土壤特性
Table 1 Soil characteristics of test plot (n=84)

项目 Item	范围 Range	平均值 Mean	低 25 th	中 50 th	高 75 th
pH	6.57~12.7	8.4	8.2	8.5	8.7
土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)	6.1~43.2	16.9	10.6	14.1	20.1
矿质氮 Mineral N /(mg/kg)	16.1~170.5	68.8	44.9	65.6	84.5
有效磷 Available P /(mg/kg)	5.5~44.7	14.7	9.3	13.4	18.2
速效钾 Available K /(mg/kg)	53~486	154	116	143	167

注:数据来自基本覆盖全国向日葵种植区域的84项实验。低25th、中50th、高75th分别代表四分位数中,位数从低向高依次排在第25%、50%和75%的数值

Note: Data is from the 84 experiments covered the whole sunflower planting areas in China. 25th, 50th and 75th represent values ranking at the 25%, 50% and 75% in the quartile

肥区可获得产量的比值。

$RY = \text{缺素区经济产量} / \text{全肥区可获得经济产量}$
养分回收率(RE), 即某种养分的利用率。

$RE = (\text{施肥后作物收获时的吸收总量} - \text{未施肥的作物养分吸收量}) / \text{该元素肥料总投入量}$

1.4 数据分析

试验结果用Excel表格进行计算作图分析。

2 结果与分析

2.1 养分专家系统推荐施肥的节肥效果

表2、表3结果表明, 向日葵NE(养分专家系统)推荐施氮量较FP(农民习惯施肥)施氮量增加-63~34 kg/hm², 平均氮肥用量减少7 kg/hm², 内蒙古和华北减施氮肥较多。向日葵NE推荐施P₂O₅量较FP增加-42~54 kg/hm², 平均P₂O₅用量减少23 kg/hm²。向日葵NE推荐施K₂O量较FP增加-150~65 kg/hm², 平均K₂O用量增加72 kg/hm², 内蒙古和西北地区增加较多。

油菜NE推荐增加了氮(N)用量7 kg/hm², 减少

磷肥(P₂O₅)用量13 kg/hm², 增加钾肥(K₂O)用量85 kg/hm²。食葵减施氮(N)和磷(P₂O₅)用量分别为10 kg/hm²和24 kg/hm²。

2.2 养分专家系统推荐施肥的增产效果

2.2.1 养分专家系统推荐施肥与农民习惯施肥的产量比较 养分专家推荐施肥(NE)的产量为1236.2~6554.6 kg/hm², 平均4074.3 kg/hm²; 习惯施肥(FP)的产量为1212.2~6135.7 kg/hm², 平均3783.0 kg/hm²。NE较FP平均增产293.1 kg/hm², 变化范围为-11.7~1471.4 kg/hm²。增产率平均为8.4%, 变化范围为-0.4%~30.8%(表4和图1)。

2.2.2 养分专家推荐施肥的产量反应 数据显示, 本研究中NE推荐施肥N、P和K的产量反应分别为723.2、549.6和478.9 kg/hm²(图2A), FP施肥N、P和K的产量反应分别为509.2、308.3和218.5 kg/hm²(图2B), NE三养分的产量反应较FP增加214.0、241.3和260.4 kg/hm²。

2.3 养分专家系统的施肥经济效益分析

NE处理较FP处理的产量增加, 各省区增加幅

表2 试验点NE和FP的施肥量比较

Table 2 Comparison of fertilizer application rate between NE and FP /(kg/hm²)

	NE 养分投入量 NE nutrient input			FP 养分投入量 FP nutrient input			$\Delta = \text{FP} - \text{NE}$		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
范围 Range	69~225	48~135	60~150	51~240	54~173	0~135	-63~34	-42~54	-150~65
平均值 Mean	176	95	95	183	118	23	7	23	-72
低 25 th	165	90	75	179	104	0	-4	9	-90
中 50 th	180	90	90	192	138	0	12	31	-75
高 75 th	200	107	114	192	138	45	15	48	-69

注: 数据来自基本覆盖全国向日葵种植区域的84项实验。NE代表向日葵养分专家推荐的施肥处理; FP代表农民习惯的用量或处理; 低25th、中50th、高75th分别代表四分位数中, 位数从低向高依次排在第25%、50%和75%的数值

Note: Data is from the 84 experiments covered the whole sunflower planting areas in China. NE represents nutrient expert system for sunflower; FP represents farmer accustomed fertilization; 25th, 50th and 75th represent values ranking at the 25%, 50% and 75% in the quartile

表3 养分专家推荐(NE)施肥量与农民习惯(FP)施肥量对比

Table 3 Comparison of fertilizer application rate between NE and FP

项目 Item	试验项目数 Numbers of the experiments	施氮量/(kg N/hm ²)			施磷量/(kg P ₂ O ₅ /hm ²)			施钾量/(kg K ₂ O/hm ²)		
		N application			P application			K application		
		NE	FP	Δ	NE	FP	Δ	NE	FP	Δ
内蒙古 Inner Mongolia	36	180	194	-14	94	130	-36	88	10	78
西北 Northwest	22	181	181	0	101	111	-10	103	19	84
华北 North China	11	174	183	-9	94	113	-19	90	45	45
东北 Northeast	15	160	160	0	91	103	-13	100	41	59
油菜 Oil sunflower	11	173	166	7	99	112	-13	107	22	85
食葵 Confectionary sunflower	73	176	186	-10	95	119	-24	93	23	70
所有 All	84	176	183	-7	95	118	-23	95	23	72

注: NE代表向日葵养分专家推荐的施肥处理; FP代表农民习惯的用量或处理; Δ 代表差值, 即 $\Delta = \text{NE} - \text{FP}$

Note: NE represents nutrient expert system for sunflower; FP represents farmer accustomed fertilization; $\Delta = \text{NE} - \text{FP}$

表 4 NE 推荐施肥与 FP 推荐施肥的产量比较
Table 4 Comparison of yield between NE and FP

参数 Parameter	样本数 No.	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	低 25 th	中 50 th	高 75 th	最大值 Max
NE 产量 /(kg/hm ²) Yield from NE	84	4074.3	1254.2	1236.2	2981.9	4260.0	5074.1	6554.6
FP 产量 /(kg/hm ²) Yield from FP	84	3783.0	1203.6	1212.2	2878.3	3969.4	4694.1	6135.7
Δ (FP - NE) /(kg/hm ²)	84	291.3	241.5	-11.7	134.6	231.9	385.6	1471.4
Δ (FP - NE) /%	84	8.4	6.8	-0.4	3.3	6.5	11.8	30.8

注:NE 代表向日葵养分专家推荐的施肥处理;FP 代表农民习惯的用量或处理; Δ 代表差值,即 Δ =FP - NE
Note: NE represents nutrient expert system for sunflower; FP represents farmer accustomed fertilization; Δ =FP - NE

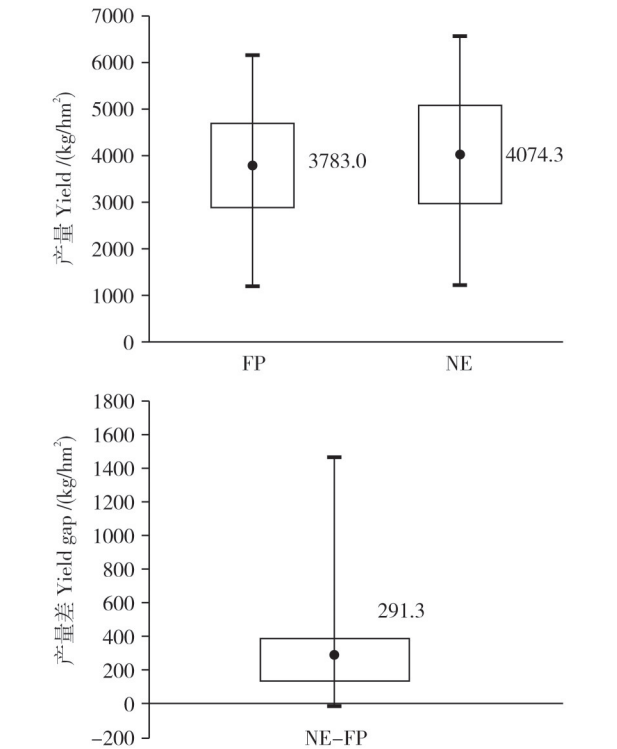


图 1 NE 推荐施肥与农民习惯施肥的产量比较
Fig. 1 Comparison of yield between NE and FP

度为 271~355 kg/hm²,西北地区增产幅度较大,油菜、食葵和全部向日葵均增产 291 kg/hm²(表 5);肥料成本 NE 与 FP 比较,由于 NE 推荐施肥减少了氮磷肥的投入,增加了钾肥的投入,因而增加了肥料成本,各省区增加幅度为 88~359 kg/hm²,西北增加最多,华北增加最少,油菜平均增加了 382 元/hm²,食葵平均增加了 183 元/hm²,所有增加 209 元/hm²(表 5);NE 与 FP 的产值进行比较,各省区 NE 均较 FP 产值显著增加,增加幅度为 1765~2195 kg/hm²,

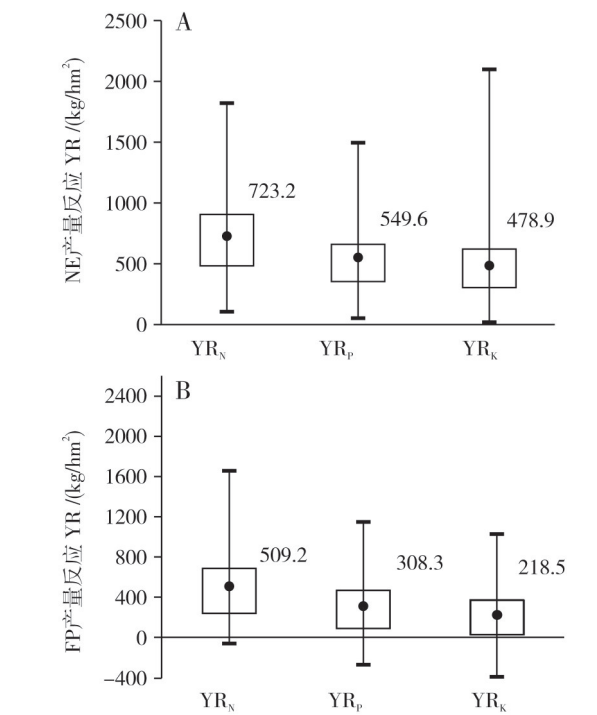


图 2 NE 推荐施肥与 FP 施肥的产量反应比较
Fig. 2 Comparison of yield response between NE and FP

西北增加较多,华北增加教少;油菜增加了 1453 元/hm²,食葵增加了 2040 元/hm²,所有向日葵增加了 1963 元/hm²;NE 与 FP 的经济效益 (GRF) 比较,各省区增收幅度为 1677~1836 元/hm²,西北和内蒙古增收更多,油菜增收 1071 元/hm²,食葵增收 1857 元/hm²,所有向日葵增收 1754 元/hm²(表 5)。可见向日葵养分专家系统具有显著增加产量和经济效益的效果。

表5 不同处理向日葵经济效益比较

Table 5 Comparison of economic benefits between NE and FP

项目 Item	产量 Yield /(kg/hm ²)			肥料成本 TFC /(yuan/hm ²)			产值 Output /(yuan/hm ²)			经济效益 GRF /(yuan/hm ²)		
	NE	FP	Δ	NE	FP	Δ	NE	FP	Δ	NE	FP	Δ
内蒙古 Inner Mongolia	4713	4442	271	1650	1502	148	32988	31093	1895	31338	29591	1747
西北 Northwest	4252	3897	355	1759	1400	359	26093	23898	2195	24334	22498	1836
华北 North China	3251	2999	252	1628	1540	88	22756	20992	1765	21128	19451	1677
东北 Northeast	2886	2610	276	1605	1381	224	20200	18267	1933	18595	16886	1709
油葵 Oil sunflower	3672	3382	291	1733	1351	382	18361	16908	1453	16628	15557	1071
食葵 Confectionary sunflower	4135	3844	291	1658	1475	183	28945	26905	2040	27287	25430	1857
所有 All	4074	3783	291	1668	1459	209	27559	25595	1963	25891	24137	1754

2.4 NE推荐施肥与农民习惯施肥的养分利用率比较

2.4.1 农学效率 施肥的农学效率(AE)是指单位肥料纯养分所能增加的籽粒产量,是施肥增产效应的综合体现,反映了增施某种养分对产量作用的大小。NE处理的氮、磷和钾农学效率分别为4.4、6.0和4.9 kg/kg,其中氮和磷农学效率较FP增加1.7和3.6 kg/kg(图3)。

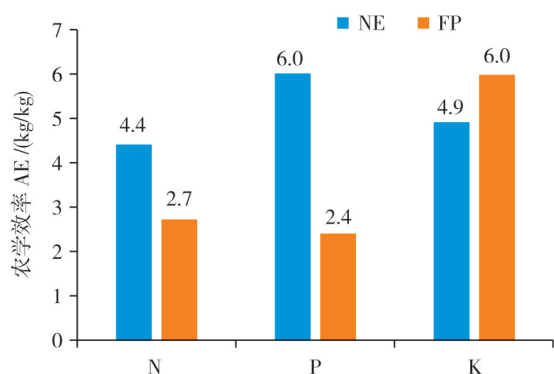


图3 NE与FP向日葵施用氮磷钾肥的农学效率对比

Fig. 3 Comparison of agronomic efficiency (AE) between NE and FP

2.4.2 养分回收率 NE养分专家推荐施肥处理的氮磷钾养分回收率(RE)分别为32.6%、17.6%和48.7%,而农民习惯施肥处理的氮磷钾养分回收率分别为23.9%、11.5%和42.7%,养分专家推荐施肥较农民习惯施肥的氮磷钾养分回收率提高8.7、6.1和6.0个百分点(图4)。

3 讨论和结论

本研究的产量数据均来自于田间试验NE优化施肥处理,通过采用优化的养分管理措施能够在农民习惯措施基础上进一步提高产量^[23]。产量反应(YR)是因施肥而增加的产量,是平衡施肥需要考虑

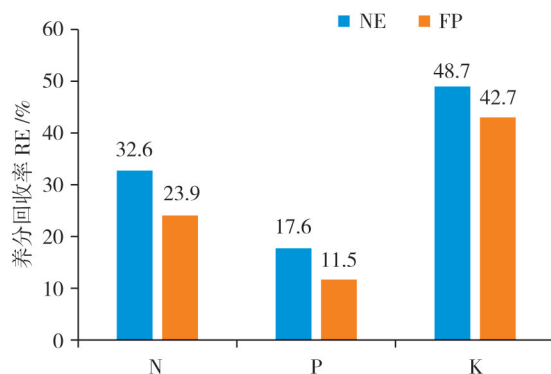


图4 向日葵NE推荐施肥与FP施肥的养分回收率比较

Fig. 4 Comparison of RE between NE and FP

的重要参数之一,不仅可以反映土壤基础养分供应状况,同时可以反映施肥效应情况,产量反应的高低反映了施肥增产效应和养分对产量的限制作用^[24,25]。NE处理N、P和K的产量反应较FP处理增加214.0、241.3和260.4 kg/hm²。向日葵产量反应平均值大小顺序为氮>磷>钾,表明氮素仍是向日葵产量的首要限制因子^[26]。

农学效率和养分回收率是表达肥料利用率的常用指标,其与产量、施肥量和土壤肥力水平关系最为密切^[27,28]。本文研究结果表明,NE处理氮磷肥的农学效率显著高于FP处理,NE处理钾肥的农学效率低于FP,主要原因是FP处理施用的钾肥较少或不施钾肥。NE处理氮磷钾肥的养分回收率均高于FP处理,说明NE处理施肥用量和施肥方法等更加优化,产量潜力和养分吸收的能力得到更大发挥^[29,30]。

综上,本团队研发的向日葵养分专家系统,具有节约氮磷肥、显著增加产量和提高经济效益的效果。向日葵养分专家(NE)推荐养分用量较农民习惯(FP)减少氮(N)、磷(P₂O₅)投入分别为7和23 kg/hm²,施肥更加优化合理。养分专家系统(NE)较农民习惯(FP)施肥平均增产291 kg/hm²,增产率为

8.4%, NE与FP的经济效益比较, 平均增收1754.4元/hm²。NE施用氮磷钾的产量反应较FP增加214.0、241.3和260.4 kg/hm², NE氮、磷和钾产量反应较FP显著增加, 说明NE氮磷钾肥的施肥效果更好, NE推荐施肥的氮和磷农学效率较FP增加1.7和3.6 kg/kg。NE推荐施肥较FP的氮磷钾养分回收率分别提高8.7、6.1和6.0个百分点。可见向日葵养分专家系统具有节约氮磷肥、增加产量、提高肥料利用效率、增加经济效益的良好效果, 向日葵主产区可以根据向日葵养分专家系统进行推荐施肥。

参考文献:

- [1] 联合国粮农组织(FAO)[DB]. (2020-05-18) <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC/visualize>.
- [2] 张莹, 张雯丽. 世界葵花籽生产、贸易结构变迁及趋势分析[J]. 世界农业, 2018(9): 119-126. DOI: 10.13856/j.cn11-1097/s.2018.09.018.
- [3] 段玉. 向日葵最佳养分管理[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2019.
- [4] 妥德宝, 安昊, 张君, 等. 国内外向日葵施肥栽培技术发展现状与发展趋势[J]. 内蒙古农业科技, 2010(6): 1-2.
- [5] Abbadi J, Gerendás J, Sattelmacher B. Effects of potassium supply on growth and yield of safflower as compared to sunflower[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2008, 171(2): 272-280. DOI: 10.1002/jpln.200700193.
- [6] Amanullah, Khan M W. Interactive effects of potassium and phosphorus on phenology and grain yield of sunflower in northwest Pakistan[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 674-680. DOI: 10.1016/S1002-0160(10)60057-4.
- [7] Hunter A H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth[M]. Florida, USA: Mimeograph Agronomy Service International, 1980.
- [8] Ahmad R, Saeed M, Mahmood T, et al. Yield potential and oil quality of two sunflower hybrids as affected by K application and growing seasons[J]. Int J Agri Biol, 2001, 3(1): 51-53.
- [9] 苏德纯. 我国现行推荐施肥方法述评[J]. 北京农业科学, 1990(4): 19-20, 13.
- [10] 陆允甫, 吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 241-252.
- [11] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 95-102. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2015.302.
- [12] 段玉, 张君, 梁俊梅, 等. 采用QUEFTS建立向日葵推荐施肥模型的养分特征参数[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1349-1359. DOI: 10.11674/zw-yf.19427
- [13] 段玉, 张君, 李书田, 等. 一种向日葵的施肥方法: CN108834525A[P]. 2018-11-20.
- [14] 徐新朋, 张佳佳, 丁文成, 等. 基于产量反应的粮食作物养分专家系统微信版应用[J]. 中国农业信息, 2019(6): 74-84.
- [15] 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.
- [16] 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, 2017.
- [17] Liu M Q, Yu Z R, Liu Y H, et al. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach[J]. Nutr Cycl Agroecosystems, 2006, 74(3): 245-258. DOI: 10.1007/s10705-006-9002-5.
- [18] Setiyono T D, Walters D T, Cassman K G, et al. Estimating maize nutrient uptake requirements[J]. Field Crop Res, 2010, 118(2): 158-168. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.05.006.
- [19] Xu X P, He P, Pampolino M F, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis[J]. Field Crop Res, 2013, 150: 115-125. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.06.006.
- [20] 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 Crop Res, 2017, 206: 33-42. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.02.011.
- [21] Chuan L M, He P, Jin J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. Field Crop Res, 2013, 146: 96-104. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.02.015.
- [22] 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 Crop Res, 2013, 140: 1-8. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.020.
- [23] 梁俊梅, 张君, 安昊, 等. 养分专家系统推荐施肥对马铃薯产量及肥料利用率的影响[J]. 作物杂志, 2019(4): 133-138. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2019.04.020.
- [24] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. PNAS, 2011, 108(16): 6399-6404. DOI: 10.1073/pnas.1101419108.
- [25] 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]. Agron J, 2009, 101(6): 1489-1496. DOI: 10.2134/agronj2009.0099.
- [26] 国世佳, 段玉, 张君, 等. 施氮量对食用向日葵产量

- 及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 126-132. DOI:10.11838/sfsc.1673-6257.18238.
- [27] Qiu S J, He P, Zhao S C, et al. Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in northeast China [J]. Agron J, 2015, 107 (1) : 305-313. DOI: 10.2134/agronj13.0567.
- [28] 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, 45 (5) : 915-924. DOI: 10.3321/j. issn: 0564-3929.2008.05.018.
- [29] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅸ. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177-3188.
- [30] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2000.02.019.

(责任编辑:郭学兰)