

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19493

我国大豆最佳施肥量和种植密度评价

吕继龙¹, 何萍¹, 徐新朋¹, 魏丹², 仇少君¹, 赵士诚^{1*}

(1. 农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要: 施肥量和种植密度是影响大豆高产的重要因素。在收集了大量的大豆试验数据(1998 ~ 2017年)基础上, 通过拟合氮、磷、钾肥用量和种植密度与产量之间的二次函数, 得出最佳的施肥量和种植密度, 通过逐步回归分析了施肥量和种植密度对大豆产量的影响。结果表明, 我国春大豆和夏大豆的产量逐年增加, 平均产量分别为 2 610 和 2 724 kg/hm²。夏大豆最高产量下的氮、磷、钾肥用量分别为 N 96 kg/hm²、P₂O₅ 80 kg/hm² 和 K₂O 126 kg/hm²; 春大豆最高产量下的氮、磷、钾肥用量分别为 N 71 kg/hm²、P₂O₅ 108 kg/hm² 和 K₂O 74 kg/hm²; 实现夏、春大豆高产的最佳密度分别为 27 万和 34 万株/hm²。逐步回归分析显示, 磷用量对春大豆产量影响最大, 其次为钾肥和密度; 在夏大豆产区, 密度对产量影响最大, 其次为磷肥用量。种植密度是大豆高产的关键因素, 春、夏大豆需要提高种植密度获得高产, 同时均应注重磷肥施用。

关键词: 大豆; 产量; 土壤肥力; 施肥量; 种植密度

大豆是优质植物蛋白质和植物油的重要来源, 由于其具有生物固氮能力, 大豆也是轮作制度中培肥土壤的一种重要作物^[1]。以大豆为原料的食品如豆腐、豆浆、酱油等已被开发出来供人类食用^[2], 而榨油后的豆粕被用作动物饲料。除作为食品外, 大豆在医药、塑料、纸张、油墨、油漆、农药和化妆品生产等行业也有广泛的用途^[3]。

目前世界大豆总产量约为 3.63 亿 t^[4], 但仍不能满足世界日益增长的人口的需求。影响大豆高产的因素包括气候条件、土壤特征、大豆品种、养分管理和栽培措施等^[5]。不同气候条件(如最低和最高温度、有效积温, 日照时间和降雨等)影响作物的播种期、灌浆期和总生育期等, 进而影响作物产量^[6-7]。土壤特征能决定土壤养分供应能力, 进而影响作物的生长和产量, 因为作物生育期吸收的养分仅 1/3 来自肥料, 其余 2/3 源自土壤^[8]。氮磷钾是作物生长和高产必需的营养元素^[9-11], 平衡施肥在提高作物产量方面发挥了重要作用^[12]。高的籽粒蛋白质含量导致大豆对氮素需求较大, 适宜的氮

肥用量能增强大豆的光合作用, 提高单位面积大豆蛋白质、油分的产出量, 进而提高大豆的产量。磷素参与大豆新器官的形成及籽粒蛋白质合成过程, 也是大豆脂肪合成所必需的, 同时在大豆植株内有机质的运输与转化中起重要作用^[13]。磷素参与根瘤菌与大豆的结瘤共生过程, 并直接参与共生过程中信号物质的生成和传递, 施磷能够有效提高豆科植物-根瘤菌结瘤共生^[14-15], 同时能提高根瘤固氮酶的活性和根瘤固氮能力^[16]。钾素主要参与大豆植株内碳水化合物的运转和增加茎秆强度, 缺钾会延长大豆的成熟期, 降低大豆的品质和产量^[17]。种植密度对大豆的高产至关重要, 适宜的种植密度有利于提高大豆叶片的光能利用率, 促进大豆对养分的吸收, 提高大豆群体干物质的积累, 进而提高大豆的产量^[18]。

我国是世界上主要的大豆生产和消费国, 但其大豆产量远不能满足本国的需求, 每年需进口大豆(8 ~ 10) × 10⁷ t^[19]。大豆根据播种时期可分为春大豆和夏大豆, 种植方式分为单作和轮作。春大豆种植主要集中在东北三省, 主要是大豆单作; 夏大豆的种植区域主要为华北平原和华南地区, 主要为小麦-大豆轮作^[20]。由于中国大豆单产较低(平均 1 773 kg/hm²)^[20], 农民对大豆生产不够重视, 同时认为大豆能通过根瘤固氮, 不需要再施用肥料。但是, 生物固氮不能满足大豆生育期的全部氮需

收稿日期: 2019-10-23; 录用日期: 2019-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0201001, 2016YFD0200102)。

作者简介: 吕继龙(1993-), 男, 河南上蔡人, 在读硕士, 研究方向为养分资源管理。E-mail: 17839964170@163.com。

通讯作者: 赵士诚, E-mail: zhaoshicheng@caas.cn。

求, 特别在高产条件下。以往通过田间试验对大豆施肥和种植密度进行大量研究, 在土壤肥力和产量指标的基础上提出了提高作物产量的施肥和栽培措施^[21-22]。然而, 这些试验在单个田块进行, 其结果仅能反映此田块最佳养管理或密度, 由于中国大豆产区气候和土壤条件的变异较大, 这些单个的试验结果对于区域推广应用不具有普遍性, 需要根据这些零碎的研究结果归纳出适用于大区域范围的管理措施, 以便于推广应用。因此, 本研究收集了 1998 ~ 2017 年不同产区大豆的施肥量、种植密度、籽粒产量等试验数据, 分析了我国大豆主产区实现高产的最佳氮、磷、钾肥用量和种植密度, 以期为区域范围内的大豆生产管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于国际植物营养研究所 (IPNI) 数据库、大豆产业体系研究数据库, 以及中国知网 (CNKI) 期刊 1998 年至 2017 年发表的论文。使用以下关键词查阅文献: 大豆、产量、密度、施肥量。本研究共包括 748 个试验, 数据中所涉及的试验处理包括: “3414” 平衡施肥、密度和施肥量、施氮量、施磷量、施钾量试验 (表 1)。试验地点分布在我国大豆主产区 (图 1), 所有收集的数据均来自田间试验, 有明确的施肥量、密度以及产量数据, 试验所涉用大豆品种都是当地普遍种植的。

表 1 收集大豆试验的类型与数量

试验类型	试验数量
“3414” 和平衡施肥试验	635
密度和施肥量试验	24
氮肥用量试验	27
磷肥用量试验	20
钾肥用量试验	29
不同密度试验	15

1.2 数据分析

根据播期将所收集的大豆数据分为夏大豆和春大豆 (夏大豆 6 月初播种, 春大豆 4 月末或 5 月初播种) 进一步分析。研究排除了收获指数小于 0.4 kg/kg 的数据^[1], 以排除作物在生长季节受到

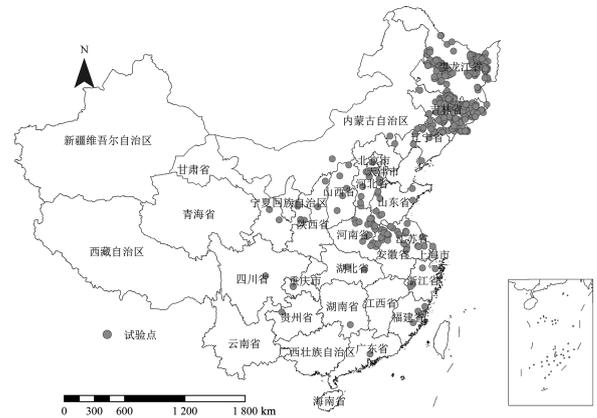


图 1 所有大豆试验点分布

非营养缺乏以外的非生物或生物胁迫。并采用各试验中的最佳施肥处理 (氮、磷、钾用量根据推荐施用) 的产量来研究 20 年内我国大豆的产量变化。大豆籽粒含水量校定为 135 g/kg。用 Excel 软件拟合不同氮、磷、钾肥施用量和种植密度与产量的二次函数, 确定最佳施肥量和种植密度。利用 SPSS 19.0 对影响产量的因素进行逐步回归分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同大豆产区的土壤养分和种植密度

在东北春大豆产区, 不同省份间土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均从小到大表现为辽宁 < 吉林 < 黑龙江 (表 2)。在夏大豆产区, 土壤养分含量在不同省市没有一致的变化趋势, 而且夏大豆产区的平均养分含量低于春大豆产区。

春大豆产区不同省份间的种植密度变化与土壤养分含量相似 (表 3)。在夏大豆产区, 河南和山西省的种植密度高于其他省市。春大豆产区的平均密度 (26.5 万株/hm²) 高于夏大豆 (21.1 万株/hm²)。

2.2 大豆产量变化

从 1998 至 2017 年, 春大豆和夏大豆的单位面积产量均逐步增加, 且夏大豆产量的增加速率高于春大豆。在 2009 年以前, 夏大豆的平均产量低于春大豆, 而此后高于春大豆。夏大豆 20 年的平均产量 (2 724 kg/hm²) 高于春大豆 (2 610 kg/hm²) (图 2)。夏大豆和春大豆的产量都主要集中在 2 000 ~ 3 000 kg/hm², 分别占产量数据的 46.4% 和 59.8%。其次是 3 000 ~ 4 000 kg/hm², 分别占产量数据的 31.4% 和 23.1% (图 3)。

表 2 不同大豆产区的土壤肥力 (1998 ~ 2017 年)

区域	有机质 (%)	总氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	
春大豆	黑龙江	4.2 ± 0.1	1.86 ± 0.11	170.5 ± 4.2	36.4 ± 1.7	168.5 ± 4.9
	吉林	2.9 ± 0.3	1.46 ± 0.09	139.5 ± 10.5	37.6 ± 4.8	146.5 ± 7.3
	辽宁	1.9 ± 0.3	1.62 ± 0.30	96.4 ± 10.8	32.1 ± 7.7	134.9 ± 23.1
	均值	3.0 ± 0.3	1.65 ± 0.27	132.1 ± 8.3	35.3 ± 5.9	150.0 ± 12.8
夏大豆	河北	1.9 ± 0.3	0.90 ± 0.16	63.6 ± 9.4	29.8 ± 3.9	116.1 ± 22.3
	河南	1.3 ± 0.1	0.86 ± 0.06	81.1 ± 5.7	21.6 ± 2.9	116.2 ± 4.5
	安徽	1.8 ± 0.2	1.21 ± 0.12	55.0 ± 2.6	13.7 ± 2.2	121.2 ± 16.0
	山东	1.1 ± 0.1	0.63 ± 0.08	67.1 ± 6.2	21.0 ± 7.5	111.9 ± 20.4
	山西	1.2 ± 0.1	0.96 ± 0.05	72.0 ± 1.8	9.3 ± 1.0	100.7 ± 28.1
	江苏	1.8 ± 0.3	1.18 ± 0.17	73.2 ± 3.6	20.2 ± 9.2	111.8 ± 4.6
	均值	1.6 ± 0.1	0.97 ± 0.90	68.7 ± 4.7	21.2 ± 6.4	112.9 ± 20.7

注: 所有值为平均值 ± 标准误差。下同。

表 3 不同区域的大豆种植密度 (万株/hm²)

春大豆	密度	夏大豆	密度
黑龙江	27.7 ± 0.2	河北	20.7 ± 0.1
吉林	23.2 ± 0.3	河南	24.7 ± 0.7
辽宁	19.3 ± 0.3	山东	20.8 ± 0.2
平均值	26.5 ± 0.2	山西	25.0 ± 0.8
		安徽	21.4 ± 0.2
		江苏	21.5 ± 0.6
		平均值	21.1 ± 0.2

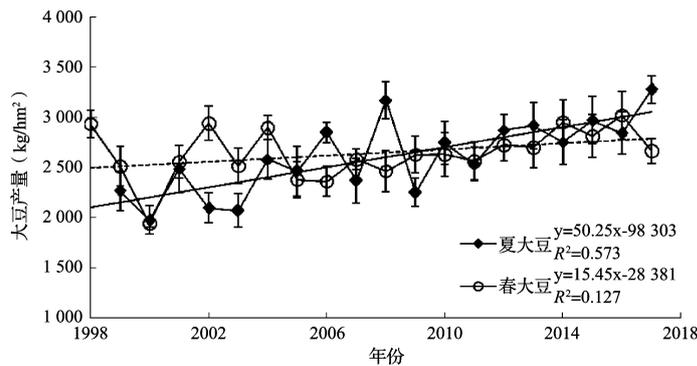


图 2 不同产区 1998 ~ 2017 年大豆产量变化

注: 产量资料来自最佳施肥处理, 实线和虚线分别表示夏大豆和春大豆产量变化趋势。

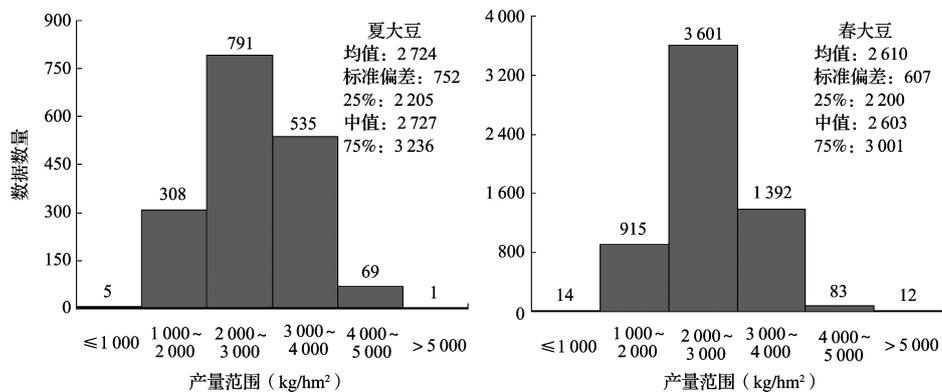


图 3 大豆产量数据在不同产量范围的分布

注: 资料来源于最佳施肥处理。

2.3 大豆产量与施肥量关系

春、夏大豆的产量均随施肥量的增加呈现先增加后下降趋势(图4)。根据施肥量和大豆产量拟合的二次方程,夏大豆在获得最高产量时氮、磷、钾肥用量分别为N 96 kg/hm²、P₂O₅ 80 kg/hm²和K₂O 126 kg/hm²,对应的产量分别为3 038、2 801和2 305 kg/hm²。春大豆在获得最高产量时氮、磷、钾肥用量分别为N 71 kg/hm²、P₂O₅ 108 kg/hm²和K₂O 74 kg/hm²,对应的产量分别为2 936、2 834和

2 678 kg/hm²。

2.4 密度与产量的关系

我国大豆生产中种植密度变化范围较大(8万~80万株/hm²),大豆产量随着密度的增加呈现先增加后减少趋势(图5)。根据曲线可知,夏、春大豆的产量分别在27万和34万株/hm²时达最高,对应产量分别为2 936和2 791 kg/hm²。随着种植密度的逐步增加,夏大豆的增产或减产速率高于春大豆,说明群体密度对夏大豆产量的影响高于春大豆。

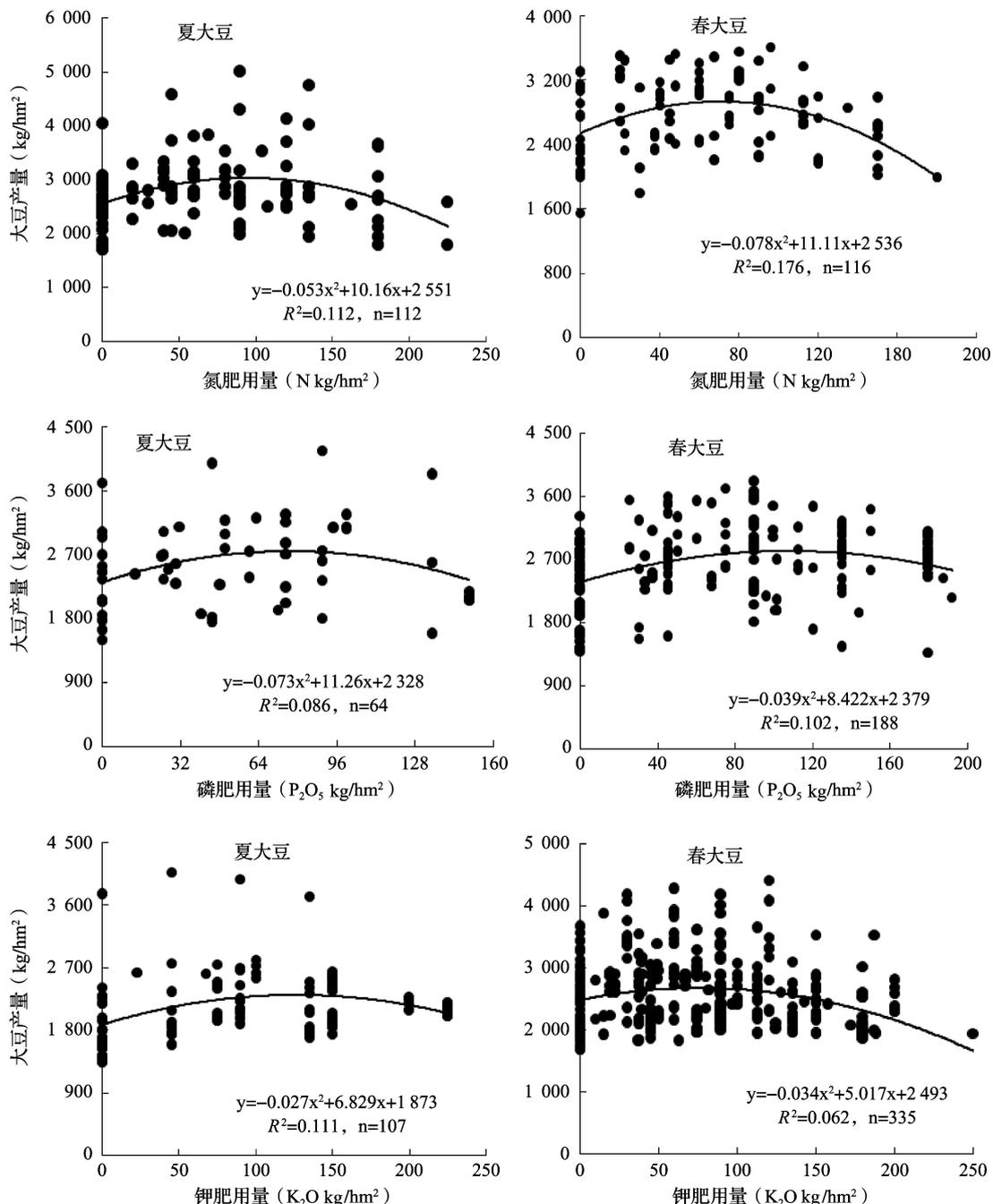


图4 大豆产量与氮磷钾肥用量的关系

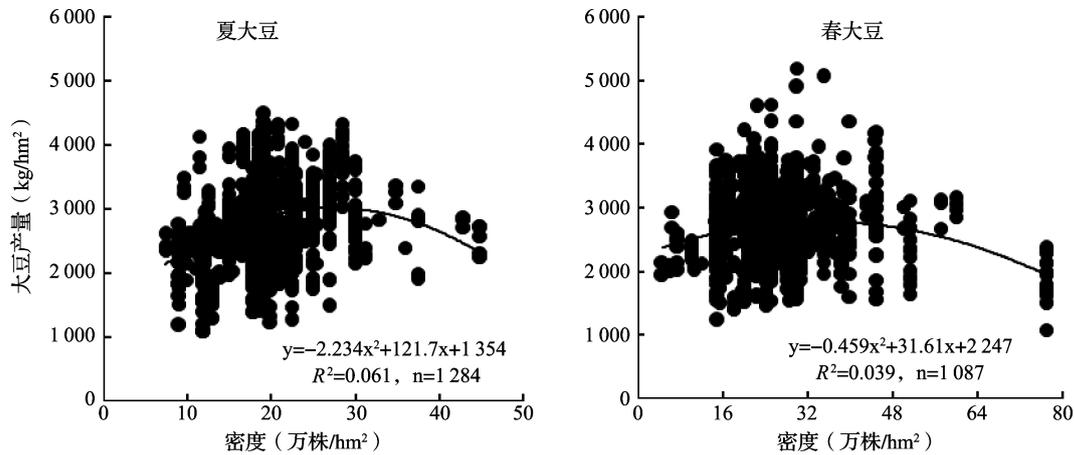


图5 大豆种植密度与产量的关系

2.5 肥料用量、种植密度对大豆产量的影响

逐步回归分析表明,密度对夏大豆产量的影响最大,其次是施磷量(表4)。对春大豆来说,施磷量对产量的影响最大,其次是施钾量、施氮量和种植密度。然而,回归曲线中密度的引入表明,在春大豆产区,磷肥和钾肥在大豆高产方面起着重要作用,其次是种植密度。

表4 大豆产量与密度和施肥量的逐步回归分析

变量	夏大豆		春大豆	
	相关系数	显著水平	相关系数	显著水平
大豆产量 (Y)				
密度 (X1)	0.578	$P=0$	0.267	$P=0.021$
氮用量 (X2)	0.061	$P=0.454$	0.331	$P=0.001$
磷用量 (X3)	0.325	$P=0$	0.426	$P=0$
钾用量 (X4)	0.041	$P=0.169$	0.343	$P=0$
回归方程	$Y=2\ 071.92+28.68X1+1.92X3, R=0.661$		$Y=2\ 341.63+11.03X1-3.86X3+6.08X4, R=0.526$	

3 讨论

自1998年以来,由于大豆的品种改良、平衡施肥等农业技术的推广,中国春、夏大豆产量均逐年增加。一般来说,同区域内作物产量与土壤肥力成正相关。夏大豆产区的土壤养分含量和种植密度均低于春大豆,而平均产量高于春大豆,说明不同区域间大豆产量的差异可能主要受气候条件、种植密度和肥料投入等影响。大豆是短日照喜温作物,对光温反应比较敏感^[23-24]。我国春大豆主要在东

北地区,在大豆生长的早期和晚期温度和降雨较低,而夏大豆产区生育期温度和降雨量均较高,更加有利于大豆的生长和高产。各区种植的品种均在本地育成,适应当地的气候条件,能充分利用本地气候资源而实现高的产量。同时,华北和华南地区农田的化肥投入量显著高于东北地区^[25],高的养分投入可弥补土壤养分的不足。本研究中的平均产量数据可能被高估,因为这些数据均来自大豆主产区试验田,试验田的肥料施用配比合理,密度适宜,田间管理也较精细,有利于作物高产,而实际大豆生产中肥料施用不足及养分不平衡、种植密度过低、管理粗放等问题广泛存在。

氮磷钾的合理配施是决定大豆高产的关键因素^[26-27]。本研究表明,实现夏大豆高产的最佳氮、磷、钾施用量分别为 $N\ 96\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 80\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 126\ kg/hm^2$,春大豆的最佳氮、磷、钾施用量分别为 $N\ 71\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 108\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 74\ kg/hm^2$ 。最高产量下夏大豆的最佳氮肥、钾肥用量均高于春大豆,因为夏大豆获得高产对养分需求更多,低的土壤养分供应下需要较多的肥料投入才可满足其养分需求。我国大部分地区土壤磷盈余,且东北地区土壤磷含量高于中北部^[28-29],但由于东北地区春季气温低,降低了土壤磷有效性,不能满足大豆早期生长发育对磷的需求。为满足大豆磷素需求,人们增加了磷肥用量,因而导致计算的春大豆最佳磷肥施用量高于夏大豆^[30-31]。因此在东北地区早春季如何激活和充分利用土壤磷也是一个重要的节肥增效的研究方向。春大豆的最佳密度高于夏大豆,因为作物的最佳密度是由品种、当地气候和环境条件等因素决定的。大豆密植可以提高光能的截留和利用,提高大豆产量。

东北地区春季气温和年有效积温较低, 要提高种植密度, 充分利用光热资源, 才能获得高产。

回归分析显示, 磷肥和密度对春、夏大豆的高产影响较大, 同时钾肥对春大豆产量影响较显著。因为磷是合成大豆籽粒蛋白质和脂肪的重要元素, 并且磷素可以促进根瘤的形成、发育和对大气氮的固定、氨的转化以及氨基酸的形成^[32-33], 磷肥还能促进大豆对氮和钾肥的吸收^[34]。在春大豆区, 低温影响土壤磷活性也是重要原因。东北地区土壤钾素含量高于华北地区, 而钾肥用量与春大豆产量的相关性高于华北夏大豆。因为华北夏大豆区多为石灰性土壤, 土壤钾丰富, 同时已普及的作物秸秆还田可返回土壤大量的钾素。而东北地区温度低, 秸秆降解慢, 秸秆还田很难推广, 大豆吸收的钾主要依靠肥料投入。适宜的密度能增加单位面积内大豆光合量, 养分的吸收量, 进而提高大豆产量^[35]。华北地区大豆多为小麦后直播, 全量小麦秸秆还田会影响大豆播种质量和出苗率, 实际生产中存在密度过低现象^[36], 因此种植密度对大豆产量影响显著。在春、夏大豆产区, 回归方程中均没有引入氮肥, 可能因为土壤氮素供应较高, 大豆生物固氮提供了大部分氮素供应, 降低了对肥料氮的依赖。

中国的农业生产主要以分散的家庭生产为主, 田块间的土壤质地和肥力变异较大, 一个固定的施肥量和种植密度不一定能在所有区域全部适合, 根据单个田块确定适宜的施肥量和种植密度更不现实。我们可以参照“大配方, 小调整”^[37-38]的思路结合不同区域的特征对施肥量和种植密度进行微调, 以实现大豆的高产高效。

4 结论

我国的大豆产量自 1998 年以来逐年增加, 夏大豆平均产量高于春大豆。实现夏大豆高产的最佳氮、磷、钾肥用量分别为 N 96 kg/hm²、P₂O₅ 80 kg/hm²、K₂O 126 kg/hm², 春大豆高产的最佳氮、磷、钾肥用量分别为 N 71 kg/hm²、P₂O₅ 108 kg/hm²、K₂O 74 kg/hm²。夏、春大豆高产的最适密度分别为 27 万和 34 万株/hm²。种植密度是大豆高产的关键因素, 春、夏大豆区域均需要增加种植密度去实现高产, 同时应该注重磷肥施用。

参考文献:

[1] Yang F Q, Xu X P, Wang W, et al. Estimating nutrient uptake

requirements for soybean using QUEFTS model in China [J]. Plos One, 2017, 12(5): e0177509.

- [2] Nishinari K, Fang Y, Guo S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 301-318.
- [3] Pratap A, Gupta SK, Kumar J, et al. Soybean [J]. Technological Innovations in Major World Oil Crops, 2012, 1: 293-321.
- [4] 蔡承智, 张建威, 梁颖. 基于 ARIMA 模型的世界大豆单产预测分析 [J]. 大豆科学, 2018, 37(3): 452-457.
- [5] Southworth J, Pfeifer R A, Habeck M, et al. Changes in soybean yields in the Midwestern United States as a result of future changes in climate, climate variability, and CO₂ fertilization [J]. Climate Change, 2002, 53: 447-475.
- [6] Liu Z J, Yang X G, Hubbard K G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China [J]. Global Change Biology, 2012, 18: 3441-3454.
- [7] Li T, Hasegawa T, Yin X Y, et al. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions [J]. Global Change Biology, 2015, 21: 1328-1341.
- [8] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822.
- [9] Boswell F C, Anderson O E. Long-term residual fertility and current N-P-K application effects on soybeans [J]. Agronomy Journal, 1976, 68: 315-318.
- [10] Scharf P C, Wiebold W J, Lory J A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level [J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 435-441.
- [11] 王秋菊, 米刚, 张劲松, 等. 不同磷肥物料培肥心土对大豆产量和品质的影响 [J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 981-986.
- [12] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. Science, 2009, 324: 1519-1520.
- [13] Jin J, Wang G, Liu X, et al. Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield, and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differing in protein concentration in grains [J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29: 1433-1449.
- [14] Hartwig U A, Drevon J J. Phosphorus deficiency increases the argon-induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa [J]. Planta, 1997, 201: 463-469.
- [15] Almeida Jose P F. Evidence that P deficiency induces N feedback regulation of symbiotic N₂ fixation in white clover (*Trifolium repens* L.) [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 1289-1297.
- [16] Tang C, Hinsinger P, Drevon J J, et al. Phosphorus deficiency impairs early nodule functioning and enhances proton release in roots of *Medicago truncatula* L. [J]. Annals of Botany, 2001, 88(1): 131-138.
- [17] Krueger K, Goggi A S, Mallarino A P, et al. Phosphorus and potassium fertilization effects on soybean seed quality and composition [J]. Crop Science, 2013, 53: 602-610.
- [18] Kawasaki Y, Tanaka Y, Katsura K, et al. Yield and dry matter

- productivity of Japanese and US soybean cultivars [J]. *Plant Production Science*, 2016, 19: 57–266.
- [19] 中国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017, 2018.
- [20] 中国农业部. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [21] 张艳, 佟斌, 吴晓秋, 等. 肥密处理对不同大豆品种产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2010, 29: 444–448.
- [22] 杨继学, 黄珊珊, 杨明亮, 等. 密度和施肥量对不同分枝类型大豆产量的影响[J]. *大豆科学*, 2012, 31: 381–386.
- [23] Mall R K, Lal M, Bhatia V S, et al. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121 (1): 113–125.
- [24] Egli D B, Bruening W. Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 62: 19–29.
- [25] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. *植物学通报*, 2007, 24: 687–694.
- [26] 许海涛, 王友华, 许波, 等. 氮磷钾优化施肥对高蛋白大豆籽粒及蛋白质产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39: 195–196.
- [27] Abbasi M K, Tahir M M, Azam W, et al. Soybean yield and chemical composition in response to phosphorus–potassium nutrition in Kashmir [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104: 1476–1484.
- [28] 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: 4207–4229.
- [29] Zhang S, Huffman T, Zhang X, et al. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus [J]. *Journal of Soil Sediment*, 2014, 14: 1775–1789.
- [30] Ma X, Wu Z, Chen L, et al. Effect of long-term fertilization on the phosphorus content of black soil in Northeast China [J]. *Acta Agr Scand*, 2014, 63: 156–161.
- [31] Ayaga G, Todd A, Brookes P C. Enhanced biological cycling of phosphorus increases its availability to crops in low-input sub-Saharan farming systems [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2006, 38: 81–90.
- [32] Drevon J J, Hartwig U A. Phosphorus deficiency increased the argon-induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa [J]. *Planta*, 1997, 201: 463–469.
- [33] Ramesh A, Sharma S K, Joshi O P, et al. Phytase, phosphatase activity and P-nutrition of soybean as influenced by inoculation of *Bacillus* [J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2011, 51: 94–99.
- [34] Miller R J, Pesek J T, Hanway J J. Soybean yields and plant composition as affected by phosphorus and potassium fertilizer [J]. *Res Bull (Iowa Agric Home Econ Exp Station)*, 1964: 52–68.
- [35] Egli D B. Plant density and soybean yield [J]. *Crop Science*, 1988, 28: 977–981.
- [36] 周春燕. 小麦秸秆还田条件下的大豆高产高效栽培技术 [J]. *现代农业科技*, 2017, 10: 35–36.
- [37] Xu X P, He P, Pampolino M F, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 115–125.
- [38] 吴良泉, 陈新平, 石孝均, 等. “大配方、小调整”区域配肥技术的应用 [J]. *磷肥与复肥*, 2013, 28 (3): 68–70.

Assessment of the optimum fertilization rates and planting density for soybean production in China

LÜ Ji-long¹, HE Ping¹, XU Xin-peng¹, WEI Dan², QIU Shao-jun¹, ZHAO Shi-cheng^{1*} (1. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097)

Abstract: Fertilization rate and planting density are important factors affecting soybean yield. A large number of soybean [*Glycine max* (L.) Merr] field experimental data (1998 ~ 2017) were collected, the rate of optimum nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) fertilizers and planting density were analyzed based on fitting quadratic function. The effect of fertilizer rates and planting density on soybean yield were analyzed by stepwise regression analysis. Results showed that the yield of spring and summer soybeans gradually increased over year, with average yield of 2 610 and 2 724 kg/hm², respectively. The optimum rate of N, P and K fertilizers for the highest yield of summer soybean was N 96 kg/hm², P₂O₅ 80 kg/hm² and K₂O 126 kg/hm², and the optimum rate of N, P and K fertilizers for the highest yield of spring soybean was N 71 kg/hm², P₂O₅ 108 kg/hm² and K₂O 74 kg/hm², respectively. The optimum planting density was 27 × 10⁴ and 34 × 10⁴ plants/hm² under the highest yield for summer and spring soybeans, respectively. Stepwise regression analysis showed that the P fertilizer had the greatest influence on the yield of spring soybean followed by K fertilizer and planting density. For summer soybean crop, planting density had the major effect on yield followed by P fertilizer. Overall, the P fertilization and planting density were critical for soybean production, the planting density need be enhanced to attain high yield for spring and summer soybeans with enhancement in phosphorus fertilizer in both seasons.

Key words: soybean; yield; soil fertility; fertilization rate; planting density