



不同施肥处理对黑河 43 农艺性状、产量及品质的影响

韩德志, 闫晓飞, 魏 然, 刁鹤楠, 姜 宇, 贾鸿昌, 鹿文成

(黑龙江省农业科学院 黑河分院/农业农村部国家农业科学土壤质量爱辉观测站, 黑龙江 黑河 164300)

摘 要:为促进黑龙江省北部大豆产业提质增效,本研究以目前国内种植面积最大的大豆品种黑河 43 为研究对象,设置 8 组不同施肥处理:常规施肥区,尿素 2 kg·666.67 m⁻²、磷酸二铵 8 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;磷处理 1 区,磷酸二铵 8 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;磷处理 2 区,磷酸二铵 10 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;磷处理 3 区,磷酸二铵 12 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;无钾区,尿素 2 kg·666.67 m⁻²、磷酸二铵 8 kg·666.67 m⁻²;无磷区,尿素 5.13 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;无氮区,磷酸钙 8 kg·666.67 m⁻²、硫酸钾 5 kg·666.67 m⁻²;空白区。研究轮作条件下氮、磷、钾对黑河 43 农艺性状、品质及产量的影响。结果表明:不同肥料处理对黑河 43 农艺性状影响存在一定差异,其中氮肥施用与株高、底荚高显著正相关,其他性状差异均不显著;肥料处理对黑河 43 籽粒大小及品质的影响差异显著,其中空白 CK 与缺氮 PK 处理区百粒重、蛋白质含量均显著低于其它处理,缺氮 PK 处理区脂肪含量均显著高于其他处理;在合理范围内增施氮肥、磷肥可显著提高黑河 43 的产量,补充钾肥可显著提高黑河 43 抗病性进而提高产量,其中 N3P3K 处理区 2 年产量均显著高于其他处理区。缺素处理区 2 年产量结果一致,效应依次: NK > NP > PK;通过相关性聚类热图分析,将黑河 43 综合农艺性状分成 2 大类,第 I 类为蛋白与产量构成因子:包含产量、单株粒重、单株粒数、单株荚数、节数、感病率、蛋白、底荚高、百粒重、株高,相邻性状两两相关性最高,第 II 类为脂肪与密度,脂肪含量与密度显著正相关。将不同肥料处理分成 2 大类,第 I 类是缺 N 区,包含空白 CK 处理区和 PK 缺氮区,第 II 类是含氮肥区,进一步说明氮肥是黑河 43 生物量形成的基础,平衡施肥对黑河 43 产量及品质具有重要促进作用。

关键词:黑河 43;施肥;农艺性状;产量;品质

Effects of Different Fertilization Treatments on Agronomic Traits, Yield, and Quality of Heihe 43

HAN Dezhi, YAN Xiaofei, WEI Ran, DIAO Henan, JIANG Yu, JIA Hongchang, LU Wencheng

(Heihe Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/National Agricultural Science Soil Quality Aihui Observation Experiment Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Heihe 164300, China)

Abstract: To promote the improvement of quality and efficiency in the soybean industry in northern Heilongjiang province, in this study, the soybean variety Heihe 43, which has the largest planting area in China, was used as the research object, and 8 groups: Conventional fertilization areas, urea 2 kg·666.67 m⁻², diammonium phosphate 8 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻²; Phosphorus treatment zone 1, diammonium phosphate 8 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻²; Phosphorus treatment zone 2, diammonium phosphate 10 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻²; Phosphorus treatment zone 3, diammonium phosphate 12 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻²; Potassium-free zone, urea 2 kg·666.67 m⁻², diammonium phosphate 8 kg·666.67 m⁻²; Phosphorus-free zone, urea 5.13 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻²; Nitrogen free zone, calcium phosphate 8 kg·666.67 m⁻², potassium sulfate 5 kg·666.67 m⁻². The effects of N, P and K on the agronomic characters, quality and yield of Heihe 43 under different fertilization treatments were studied. The results showed that there were some differences in the effects of different fertilizer treatments on the agronomic traits of Heihe 43. Nitrogen fertilizer application had significant positive correlation with plant height and bottom pod height, but no significant difference in other traits. The effects of fertilizer treatment on seed size and quality of Heihe 43 were significant. The 100-seed weight and protein content in blank CK and nitrogen-deficient PK treated areas were significantly lower than other treatments, and fat content in nitrogen-deficient PK treated areas was significantly higher than other treatments. The yield of Heihe 43 could be significantly increased by applying N and P fertilizer within a reasonable range, and the disease resistance of Heihe 43 could be significantly improved by adding K fertilizer. The 2-year yield of N3P3K treatment area was significantly higher than that of other treatment areas. The results of 2-year yield in the deficient areas were consistent, and the effect was NK > NP > PK. The comprehensive agronomic traits of Heihe 43 were divided into two categories by correlation cluster heat map analysis. The first category was protein and yield component factors, including

收稿日期:2023-09-22

基金项目:黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关(2021ZXJ05B011);北疆高寒区春大豆品种筛选及栽培技术模式示范(2021CB057);黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2021-2-C019);国家大豆产业技术体系资金资助项目(CAPS-04-05B);黑龙江省自然科学基金项目(LH2023C072)。

第一作者:韩德志(1984—),男,博士研究生,副研究员,主要从事早熟大豆遗传育种及种质创新研究。E-mail:handezhi2008@163.com。

通讯作者:鹿文成(1970—),男,研究员,主要从事大豆育种与高产栽培研究。E-mail:13845674288@163.com。

yield, seed weight per plant, seed number per plant, pods number per plant, nodes number, disease susceptibility, protein, bottom pod height, 100-seed weight and plant height, and the pin-wise correlation between adjacent traits was the highest. The second category was fat and density, and fat content and density were significantly positively correlated. Different fertilizer treatments were divided into 2 categories. The first category was N-deficient area, including blank CK treatment area and PK nitrogen deficiency area, and the second category was nitrogen-containing area, which further indicated that nitrogen fertilizer was the basis of biomass formation of Heihe 43, and balanced fertilization had an important role in promoting the yield and quality of Heihe 43.

Keywords: Heihe 43; fertilizer; agronomic traits; yield; quality

大豆(*Glycine max* L.)是原产于我国的重要粮油经济作物,是人们日常生活中重要的植物蛋白来源,具备营养与保健双重功能^[1-2]。大豆蛋白质消费占全球蛋白质总消费量的 70% 左右^[3-6]。现阶段提高大豆产量、品质和抗逆性依然是大豆研究的重要目标,品种改良是提高大豆产量和品质的有效途径之一,然而黑龙江早熟生态区品种同质化严重,突破性品种缺乏,可通过优化栽培措施提高大豆产量和品质^[7]。肥料中氮磷钾是维持大豆生长发育所必需的大量营养元素,对大豆产量与品质具有重要作用。因此,优化大豆优质高产栽培技术,必须阐明施肥对产量及品质的影响,尤其是氮磷钾对大豆产量及品质的调控作用^[8]。

针对不同施肥方式对大豆产量及品质产生的影响,前人做了大量研究。合理的施氮处理能够显著增加大豆株高、叶绿素含量,促进植株干物质的积累^[9-10]。氮含量不能满足大豆生长需要时对大豆植株和豆荚产生的负面影响,造成籽粒减产^[11];适当增施氮肥可显著提升大豆产量,有报道施氮肥产量增幅可达 12.50%^[12]。然而,孙振宁等^[13]发现,大豆产量、百粒重随施氮量的增加先增加后减小;张国正^[14]研究的菜用大豆的鲜仁产量也有类似趋势。因此,过多施用氮肥虽能提升大豆的总生物量、根冠比和冠层叶片叶绿素含量^[15-16],但也会导致大豆株高徒长倒伏,落花落荚,生殖生长受阻,土壤养分失调,养分转运降低,进而导致产量下降^[17-18]。磷肥主要是促进根系生长和籽粒营养品质的改善,适量追施磷肥可以有效改善因施氮量提高而导致的养分不协调问题,提高大豆的产量、改善农艺性状,形成合理的产量结构,有效促进养分向籽粒转移,提高养分利用率^[2,19]。然而过高的施磷肥却导致大豆根冠比降低,产量下降。说明平衡施肥对产量品质具有重要作用^[20]。钾肥则对大豆产量无显著影响,氮磷钾肥对产量的效应排序为:氮肥>磷肥>钾肥。此外,钾肥和氮肥同样是影响大豆结荚数的主导因子,对结荚数的效应排序为氮肥>钾肥>磷肥,对株高的效应排序为氮肥>磷肥>钾肥^[13]。氮肥可以显著影响主茎节数,从而影响大豆株高^[21];磷与钾均促进了成熟阶段氮向籽粒

的运转^[22]。同样不同肥料对大豆品质具有显著影响。魏丹等^[2]在黑龙江省三地耕作区进行肥料试验,结果表明磷肥显著提高了蛋白质含量,氮肥次之,钾肥对蛋白质影响最小;在不同环境下施肥对大豆脂肪含量的影响不一致,施肥对脂肪含量影响的大小是由土壤基础条件所决定的,土壤基础肥力较高,营养结构稳定,施肥对脂肪含量的影响较小^[23-25]。宁海龙等^[8]以绥农 14 为研究对象,结果表明氮肥对脂肪含量的影响均为增加效应,含量增加速度随着氮肥增加而加快,磷肥和钾肥对脂肪含量的作用有正有负,氮磷钾肥料总量严重不足或超量都使含油量降低,中等偏低水平肥料处理脂肪含量多数较高,影响黑龙江大豆脂肪含量的重要养分因子是氮,影响蛋白质和蛋脂总和含量的重要养分因子是磷^[2]。因此,受不同生态区域、研究对象影响,氮磷钾对大豆的调控结果不尽相同,可能受不同品种基因型及环境互作影响,应针对生态区及品种有针对性地研究,才能有效解释以上规律。

因此,不同的肥料处理对大豆农艺性状、品质及产量的影响只能作为试验的参考,无法针对具体区域及品种提出准确施肥指导意见。因此,本研究以国内种植面积最大的品种黑河 43 为研究对象,以黑龙江省北部主流轮作模式玉米大豆轮作栽培为基础,探索不同肥料处理对黑河 43 产量构成及品质的调控作用,保证研究的针对性和实用性。研究旨在优化轮作模式下肥料施用技术,为大面积推广黑河 43 的科学施肥技术提供理论基础,促进黑龙江省北部大豆产业提质增效。

1 材料与方法

1.1 材料

以黑河 43 作为研究材料,该品种是黑龙江省早熟区主栽大豆品种,十三五至今一直是我国大豆种植面积第一的品种,累计推广超过一亿亩^[26]。该品种高抗炸荚,紫花、披针叶、灰色茸毛,亚有限结荚习性,株高约 75 cm,无分枝,生育期 115 d。2016 年和 2017 年分别由黑龙江省(黑审豆 2007011)、内蒙古(蒙认豆 2016003 号)和新疆(新审豆 2017 年第 67 号)审定(认定)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于2020—2021年在黑龙江省农业科学院黑河分院试验基地玉米-大豆长期轮作定位地块进行。土壤为草甸暗棕壤,试验地平整肥力均匀,田间水利设施完备。土壤 pH6.08,有机质含量 $39.70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $266.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $15.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $102.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试氮肥为尿素(含 N 46%),磷酸二铵(含 N 18%、

P_2O_5 46%),重过磷酸钙(含 P_2O_5 46%),钾肥为硫酸钾(含 K_2O 54%)。设8个肥料处理(表1)。试验采用随机区组大区设计,2次重复,4行区,10 m行长,行距 0.65 m,小区面积 26 m^2 ,采用人工精量点播,双行,株距 4 cm,设计保苗密度 $38\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$,按设计施肥量将肥料混合均匀后施入种下 8 cm,试验地四周设保护行,田间管理同一般生产田。

表 1 肥料处理设置情况
Table 1 Fertilizer treatment settings

| 序号 Serial number | 处理 Treatment | 处理编号 Handling number | 配方 Formula/($\text{kg}\cdot 666.67\text{ m}^{-2}$) | 纯氮、磷、钾量 The amount of pure nitrogen, phosphorus and potassium/($\text{kg}\cdot 666.67\text{ m}^{-2}$) |
|---------------------|-----------------|-------------------------|---|--|
| 1 | 常规施肥区 | NPK | 尿素 2 kg、磷酸二铵 8 kg、硫酸钾 5 kg | N:2.36 kg; P_2O_5 :3.68 kg; K_2O :2.70 kg |
| 2 | 磷处理 1 区 | N1P1K | 磷酸二铵 8 kg、硫酸钾 5 kg | N:1.44 kg; P_2O_5 :3.68 kg; K_2O :2.70 kg |
| 3 | 磷处理 2 区 | N2P2K | 磷酸二铵 10 kg、硫酸钾 5 kg | N:1.80 kg; P_2O_5 :4.60 kg; K_2O :2.70 kg |
| 4 | 磷处理 3 区 | N3P3K | 磷酸二铵 12 kg、硫酸钾 5 kg | N:2.16 kg; P_2O_5 :5.52 kg; K_2O :2.70 kg |
| 5 | 无钾区 | NP | 尿素 2 kg、磷酸二铵 8 kg | N:2.36 kg; P_2O_5 :3.68 kg |
| 6 | 无磷区 | NK | 尿素 5.13 kg、硫酸钾 5 kg | N:2.36 kg; K_2O :2.70 kg |
| 7 | 无氮区 | PK | 磷酸钙 8 kg、硫酸钾 5 kg | P_2O_5 :3.68 kg; K_2O :2.70 kg |
| 8 | 空白区 | CK | | |

1.2.2 测定项目及方法 大豆成熟后小区中去除边行,取任意中间行的连续均匀一致 5 株进行考种,考种产量计入原小区产量,考种项目包括株高、底荚高度、节数、单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重;全区实收测产;品质采用波通 DA7200 近红外分析仪,测定蛋白质和脂肪含量。

1.3 数据分析

采用 WPS Office 2019 进行数据汇总整理,使用 SPSS 23.0 进行显著性分析及多重比较,结果以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同施肥对黑河 43 农艺性状的影响

分别对 2 年不同施肥处理下黑河 43 的农艺性状的 2 次重复数据进行方差显著性分析及多重比较(表 2),表明不同施肥处理对黑河 43 农艺性状的影响存在显著差异。2020 年株高效应: $\text{N2P2K} > \text{NK} > \text{N1P1K} > \text{NP} > \text{NPK} > \text{N3P3K} > \text{PK} > \text{CK}$ 。2021 年株高效应: $\text{N2P2K} > \text{N1P1K} > \text{NK} > \text{NP} > \text{NPK} > \text{N3P3K} > \text{PK} > \text{CK}$ 。2 年数据中,CK、PK 处理与其他肥料处理相比株高显著减低,其他肥料处理对黑河 43 株高

影响差异不显著。底荚高与株高变化趋势相似;肥料处理对其他农艺性状影响存在一定差异,但均不显著。综上,黑河 43 农艺性状受肥料处理影响相对较小,仅株高、底荚高受氮肥影响差异显著,证明黑河 43 具有较好的稳产性。

2.2 不同施肥处理对黑河 43 籽粒的影响

对 2 年不同施肥处理下黑河 43 籽粒性状进行统计的结果如表 3 所示,2 年空白 CK 与缺氮区(PK)百粒重均显著低于其他肥料处理区,说明氮肥对黑河 43 百粒重起到关键影响;2 年空白区(CK)、缺素区蛋白含量均显著低于其他肥料处理区,其他肥料处理区之间不同年份间存在一定差异,可能受年际间环境影响,说明氮肥对黑河 43 蛋白形成具有重要促进作用;2 年缺氮区(PK)黑河 43 脂肪含量均显著高于其他肥料处理区,其他肥料处理区之间脂肪含量差异均不显著,说明减少氮肥使用量可显著提高黑河 43 油分含量。2 年空白 CK 区与缺素区的蛋脂总和显著低于其他肥料处理区,与蛋白含量规律基本一致,仅 2021 年缺氮 PK 处理区总和相对较高,推测可能是不同年份环境与肥料处理互作或试验误差所致,有待进一步研究验证。

表 2 不同施肥对黑河 43 农艺性状的影响

Table 2 Effects of different fertilization on agronomic characters of Heihe 43

| 年份 Year | 处理 Treatment | 株高 Plant height/g | 底荚高 Bottom pod height/cm | 主茎节数 Number of nodes in main stem | 单株荚数 Pods number per plant | 单株粒数 Seeds number per plant | 单株粒重 Seeds weight per plant/g |
|------------|-----------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 2020 | CK | 54.90 ± 4.48 B | 14.00 ± 3.20 C | 12.40 ± 3.20 AB | 19.50 ± 8.29 A | 45.20 ± 17.76 A | 8.38 ± 3.29 A |
| | PK | 60.10 ± 3.84 B | 17.30 ± 2.36 BC | 12.50 ± 2.36 AB | 20.20 ± 3.85 A | 49.40 ± 13.30 A | 9.11 ± 2.45 A |
| | NK | 99.20 ± 4.94 A | 19.50 ± 4.65 ABC | 12.30 ± 4.65 B | 17.50 ± 4.72 A | 43.80 ± 11.11 A | 8.76 ± 2.21 A |
| | NP | 95.70 ± 4.83 A | 22.70 ± 5.44 AB | 14.40 ± 5.44 A | 23.80 ± 5.79 A | 55.50 ± 13.53 A | 11.06 ± 2.70 A |
| | NPK | 94.70 ± 11.01 A | 18.20 ± 4.54 BC | 12.10 ± 4.54 B | 19.10 ± 11.47 A | 40.80 ± 27.20 A | 7.97 ± 5.31 A |
| | N1P1K | 96.30 ± 10.52 A | 26.60 ± 11.33 A | 12.30 ± 11.33 B | 16.20 ± 5.87 A | 41.10 ± 16.92 A | 8.52 ± 3.51 A |
| | N2P2K | 99.90 ± 4.09 A | 22.30 ± 5.54 AB | 13.60 ± 5.54AB | 22.10 ± 5.93 A | 53.90 ± 15.73 A | 10.71 ± 3.12 A |
| | N3P3K | 91.40 ± 10.76 A | 22.80 ± 4.61 AB | 13.60 ± 4.61 AB | 22.20 ± 4.29 A | 53.80 ± 10.03 A | 10.69 ± 1.99 A |
| 2021 | CK | 55.60 ± 2.22 C | 16.20 ± 3.91 B | 12.50 ± 0.53 B | 17.90 ± 3.00 B | 43.50 ± 8.05 B | 8.09 ± 1.50 B |
| | PK | 65.70 ± 5.27 C | 19.10 ± 3.93 AB | 12.90 ± 1.52 AB | 18.10 ± 3.76 B | 44.80 ± 10.63 B | 8.14 ± 1.93 B |
| | NK | 99.20 ± 4.94 A | 22.00 ± 7.72 AB | 12.70 ± 1.42 AB | 19.60 ± 4.74 AB | 49.60 ± 10.78 AB | 9.84 ± 2.14 AB |
| | NP | 96.30 ± 11.23 A | 22.70 ± 5.44 AB | 14.00 ± 1.56 AB | 24.30 ± 5.62 AB | 59.20 ± 14.53 AB | 11.82 ± 2.90 A |
| | NPK | 94.70 ± 11.01 AB | 21.10 ± 4.31 AB | 13.40 ± 0.84 AB | 22.80 ± 5.33 AB | 52.80 ± 13.41 AB | 10.48 ± 2.66 AB |
| | N1P1K | 101.00 ± 4.37 A | 24.10 ± 6.95 A | 13.80 ± 1.62 AB | 23.60 ± 6.47 AB | 61.20 ± 19.85 AB | 11.21 ± 3.82 AB |
| | N2P2K | 102.20 ± 5.47 A | 22.80 ± 5.59 AB | 14.30 ± 1.06 A | 25.80 ± 4.76 A | 63.90 ± 12.05 A | 12.16 ± 2.29 A |
| | N3P3K | 85.50 ± 8.15 A | 23.40 ± 5.17 AB | 13.30 ± 0.67 AB | 22.10 ± 4.07 AB | 52.60 ± 12.65 AB | 10.82 ± 2.60 AB |

注:每列中不同大写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note; Different capital letters in each column indicate the significant difference between treatments ($P < 0.05$), the same below.

表 3 不同施肥处理对黑河 43 籽粒特性的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on grain characteristics of Heihe 43

| 年份 Year | 处理 Treatment | 百粒重 100-seed weight/g | 蛋白含量 Protein content/% | 脂肪含量 Fat content/% | 油脂总和 Total protein and fat content/% |
|------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---|
| 2020 | CK | 18.47 ± 0.15 C | 37.34 ± 0.16 C | 19.72 ± 0.23 B | 57.06 ± 0.06 D |
| | PK | 18.44 ± 0.15 C | 38.72 ± 0.23 B | 20.51 ± 0.07 A | 59.23 ± 0.30 AB |
| | NK | 20.54 ± 0.41 A | 38.78 ± 0.28 B | 19.39 ± 0.07 B | 58.17 ± 0.21 BC |
| | NP | 19.95 ± 0.50 AB | 38.16 ± 0.39 BC | 19.73 ± 0.23 B | 57.88 ± 0.62 CD |
| | NPK | 19.51 ± 0.35 B | 40.43 ± 0.14 A | 19.84 ± 0.07 B | 60.27 ± 0.07 A |
| | N1P1K | 19.88 ± 1.06 AB | 39.77 ± 0.14 A | 19.81 ± 0.07 B | 59.58 ± 0.21 A |
| | N2P2K | 19.89 ± 0.23 AB | 40.15 ± 0.05 A | 19.88 ± 0.01 B | 60.02 ± 0.06 A |
| | N3P3K | 19.92 ± 0.33 AB | 40.24 ± 0.02 A | 19.85 ± 0.03 B | 60.09 ± 0.01 A |
| 2021 | CK | 18.95 ± 0.09 C | 38.03 ± 0.21 C | 19.83 ± 0.07 B | 57.86 ± 0.14 B |
| | PK | 19.10 ± 0.09 C | 38.84 ± 0.07 BC | 20.76 ± 0.14 A | 59.60 ± 0.07 A |
| | NK | 19.86 ± 0.20 B | 38.53 ± 0.07 C | 19.79 ± 0.07 B | 58.33 ± 0.01 B |
| | NP | 20.32 ± 0.13 B | 37.83 ± 0.85 C | 19.72 ± 0.04 B | 57.55 ± 0.81 B |
| | NPK | 20.20 ± 0.23 B | 40.46 ± 0.14 A | 20.02 ± 0.06 B | 60.48 ± 0.08 A |
| | N1P1K | 21.02 ± 0.47 A | 39.99 ± 0.17 AB | 19.70 ± 0.07 B | 59.74 ± 0.17 A |
| | N2P2K | 21.10 ± 0.49 A | 40.26 ± 0.21 A | 19.88 ± 0.14 B | 60.14 ± 0.07 A |
| | N3P3K | 20.36 ± 0.15 B | 40.68 ± 0.28 A | 19.66 ± 0.28 B | 60.35 ± 0.01 A |

2.3 不同施肥处理对黑河 43 产量的影响

对 2 年不同施肥处理的 2 次重复感病率、产量进行总方差分析的结果如表 4 所示,黑河 43 田间感病率在不同肥料处理下差异显著,而不同年份间黑河 43 发病率差异不显著,肥料×年份交互效应差异显著,说明肥料处理试验达到预期试验效果,肥料处理试验显著影响黑河 43 的田间感病进而影响小

区产量。而不同年份发病情况相对稳定,进一步说明黑河 43 品种自身的抗病性相对稳定;黑河 43 产量在不同肥料处理、不同年份间差异均显著,而肥料×年份交互效应差异不显著,说明黑河 43 具有较好的适应肥料及环境条件的互作影响,通过自身超强广适应性进行调节,进而达到高产、稳产的目标。试验结果进一步证明黑河 43 具有高产稳产特性。

表 4 总方差分析表
Table 4 Total variance analysis table

| 序号 Serial number | 变异来源 Source of variation | 肥料处理 Fertilizer treatment | | 年份 Year | | 交互 Between | | 误差 Error | |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| | | 感病率 Incidence rate/% | 小区产量 Plot-yield/kg | 感病率 Incidence rate/% | 小区产量 Plot-yield/kg | 感病率 Incidence rate/kg | 小区产量 Plot-yield/kg | 感病率 Incidence rate/% | 小区产量 Plot-yield/kg |
| | | | | | | | | | |
| 1 | DF | 7 | 7 | 1 | 1 | 7 | 7 | 16 | 16 |
| 2 | 平方和 | 1981.812 | 10.430 | 0.932 | 1.026 | 705.238 | 0.922 | 511.380 | 2.004 |
| 3 | 均方 | 283.116 | 1.490 | 0.932 | 1.026 | 100.748 | 0.132 | 31.961 | 0.125 |
| 4 | F 值 | 8.858 | 11.893 | 0.029 | 8.190 | 3.152 | 1.051 | | |
| 5 | P 值 | 0.000 * | 0.000 * | 0.867 | 0.011 * | 0.027 * | 0.436 | | |

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: * indicates significant difference at 0.05 level.

通过 2 年不同施肥处理对黑河 43 感病率、产量进行多重比较的结果如表 5 所示,2 年空白区(CK)与其他肥料处理区相比发病率最低,缺钾区(NP)发病率与其他处理区相比发病率最高,且 2021 年缺钾区(NP)与含钾缺素处理区相比发病率差异在 0.05 水平上达到显著水平。通过以上结论初步判断钾肥对黑河 43 田间抗病具有重要促进作用。为提高黑河 43 产量而增施 N 肥、P 肥的同时,要适当补充 K 肥,以确保增加其抗病性,减少田间病害发生,增加收获群体量进而提高产量。

通过 2 年不同施肥处理对产量比较分析表明:2020 年产量排序为 N3P3K>NK>NP>N2P2K>PK>N1P1K>NPK>CK;2021 年产量排序为 N3P3K>N1P1K>NK>NP>N2P2K>NPK>PK>CK。产量最高的处理均为 N3P3K 处理区,产量最低均为空白 CK 处理区,N3P3K 处理区 2 年产量均显著高于其他处理区。缺素处理区产量效应存在一致性规律,NK>NP>PK,说明 N、P、K 元素对黑河 43 产量的形成的重要性程度依次为 N>K>P。综上,N 肥是黑河 43 产量形成的基础,K 肥提高黑河 43 抗逆性,P 肥是黑河 43 进一步提高产量的限制因子,氮磷钾

平衡施肥是黑河 43 高产稳产的关键综合因子。

2.4 黑河 43 产量构成因子相关性聚类分析

2 年不同施肥处理的农艺性状及产量品质的聚类热图如图 1 所示,黑河 43 综合农艺性状分成 2 大类:第 I 类为产量构成因子及蛋白含量,蛋白与产量相关性状呈显著正相关,此类包含小区产量、单株粒重、单株粒数、单株荚数、节数、感病率、蛋白质含量、底荚高度、百粒重、株高,两两相邻性状相关性最密切,如株高越高,百粒重越高,底荚越高,且 N 肥施用量较大时蛋白含量也随之提高;第 II 类包含脂肪与密度,脂肪含量与密度呈显著正相关,脂肪含量高时密度较大,说明肥料消耗过高时,氮素相对降低,造成脂肪含量提高,间接说明密植有助于提高大豆的含油量。

通过聚类分析将试验施肥处理分成 2 大类:第 I 类是缺 N 区,包含空白处理区(CK)和缺氮区(PK);第 II 类是含氮肥区,将其他肥料处理全部聚类到一类。对黑河 43 农艺相关性状分析结果表明,聚类结果可信度高,缺氮区黑河 43 的株高、产量、品质均存在显著差异,也再次说明,氮肥是黑河 43 高产优质形成的关键因子。

表 5 不同年份不同施肥处理下黑河 43 感病率、产量比较

Table 5 Comparison of disease susceptibility and yield of Heihe 43 under different fertilization treatments in different years

| 年份 | 肥料处理 | 感病率 | 小区产量 |
|------|----------------------|-------------------|------------------|
| Year | Fertilizer treatment | Incidence rate/% | Plot-yield/kg |
| 2020 | CK | 3.88 ± 1.77 BC | 6.79 ± 0.18 D |
| | PK | 5.13 ± 0.18 BC | 7.87 ± 0.09 BCD |
| | NK | 17.96 ± 0.65 ABC | 8.21 ± 0.02 ABCD |
| | NP | 22.57 ± 22.16 ABC | 8.10 ± 0.66 BCD |
| | NPK | 19.18 ± 0.37 ABC | 7.64 ± 0.00 BCD |
| | N1P1K | 14.40 ± 3.22 BC | 7.69 ± 1.18 BCD |
| | N2P2K | 23.38 ± 0.42 AB | 8.03 ± 0.04 BCD |
| | N3P3K | 10.82 ± 0.41 BC | 8.89 ± 0.04 AB |
| 2021 | CK | 0.00 ± 0.00 C | 7.31 ± 0.18 CD |
| | PK | 12.50 ± 0.00 BC | 7.69 ± 0.15 BCD |
| | NK | 10.40 ± 0.19 BC | 8.42 ± 0.06 ABC |
| | NP | 37.75 ± 2.32 A | 8.35 ± 0.07 ABC |
| | NPK | 24.00 ± 0.45 AB | 7.88 ± 0.09 BCD |
| | N1P1K | 11.60 ± 0.23 BC | 8.72 ± 0.09 ABC |
| | N2P2K | 5.65 ± 0.33 BC | 8.19 ± 0.17 ABCD |
| | N3P3K | 12.70 ± 0.28 BC | 9.52 ± 0.15 A |

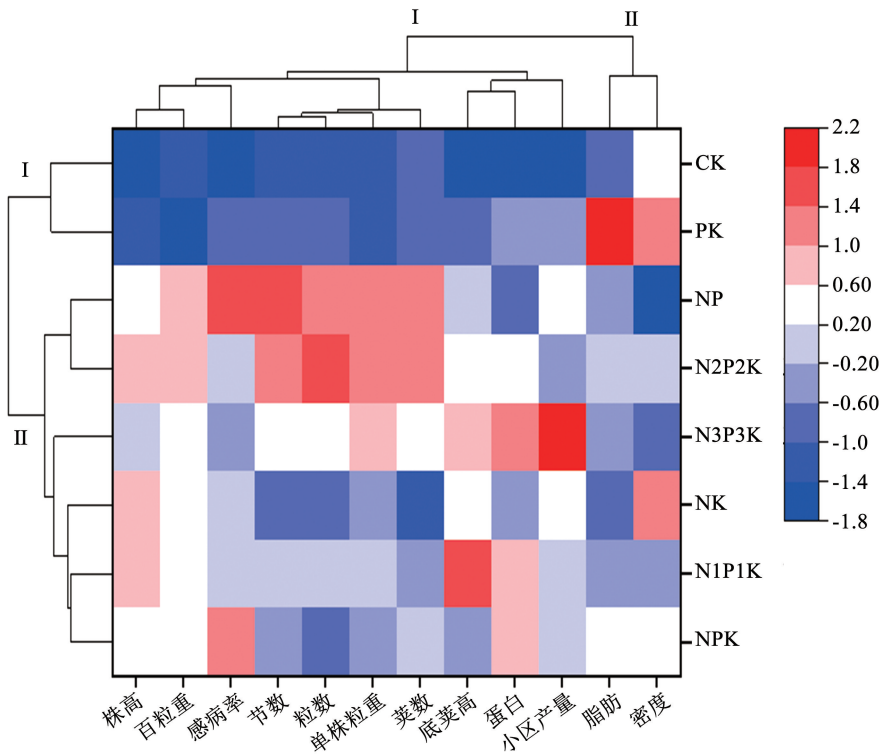


图 1 不同处理及综合性状相关性聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of correlation between different treatments and comprehensive traits

3 讨论

3.1 肥料施用方式对大豆农艺性状的影响

前人研究表明,氮磷钾肥对大豆株高的影响效应依次为 $N > P > K$ 。氮肥、磷肥是影响大豆株高的主效因子,钾肥对大豆株高影响相对较小。氮肥能够显著提升大豆株高、叶绿素含量,促进大豆植株干物质积累,株高随着施 N 量的增加先增加后减小^[9-10,13]。磷肥影响大豆根系发育并改善大豆品质,配合施磷肥可以解决增氮导致的养分不协调问题,氮磷配合使用可改善田间综合农艺性状,形成合理的群体结构^[2,19]。钾肥对大豆农艺性状影响较小,主要是提高大豆抗逆性、促早熟,提高收获品质。本研究的观点与前人研究结论基本一致,因此,科学平衡施肥对改善大豆田间综合农艺性状、提供大豆产量品质具有重要意义。

3.2 肥料施用方式对大豆产量和品质的影响

前人研究表明,氮磷钾肥对不同大豆品种产量和品质有较大影响,科学平衡施肥可保持和改善土壤的良好供养能力,促进作物生长,提高作物产量和品质^[26]。合理配施氮磷钾肥可促进大豆产量显著增加^[27]。不同大豆品种对氮肥的需求不同,因此,可根据品种和土壤情况合理地施用氮肥,使产量显著提高。磷同氮素一样,都是大豆细胞组成和各种酶的重要组成成分,且与籽粒百粒重、蛋白质、脂肪和碳水化合物形成有密切关系,在提高作物品质上有重要影响^[2]。氮、磷、钾肥对产量的影响是通过调节大豆生理生化过程实现的,蛋白质和脂肪是生理代谢的产物,氮、磷、钾肥会直接影响大豆的内在品质。本研究结果也进一步说明科学平衡施肥可显著提高大豆籽粒百粒重、蛋白质、脂肪及产量。

在大豆玉米轮作时,氮、磷表现出显著的互作效率^[28],通过大豆-玉米轮作均衡施肥可有效提高肥料利用。不同研究结果表明,不同环境不同品种对肥料响应有差异,通过轮作和平衡施肥可有效利用土壤养分,对增产效果显著^[29-30]。本研究依托黑龙江省北部大豆玉米主产区,基于轮作模式条件下进行的试验,具有一定区域代表性,并且研究对象为国内种植面积最大的大豆品种。本研究表明缺素处理对黑河 43 的百粒重、品质以及产量均有显著的影响,氮肥是黑河 43 形成基本生物量的基础,适当增施磷肥可显著提高其产量。缺钾可显著影响黑河 43 的田间综合抗逆性,与病害直接相关。研究结果具有一定的针对性及实用性,为提倡合理轮作,科学平衡施肥提供理论依据。

4 结论

通过 2 年肥料试验总结氮磷钾对黑河 43 综合性状的影响:(1)黑河 43 农艺性状受肥料处理影响相对较小,仅株高受氮肥影响差异显著;(2)空白 CK 与缺氮 PK 处理区百粒重均显著低于其他处理,其他处理区之间差异均不显著,空白 CK、缺素处理区蛋白质含量均显著低于其他处理区,缺氮 PK 处理区脂肪含量均显著高于其他处理区;(3)黑河 43 具有稳产、高产的特性,合理范围内增施 N 肥、P 肥可显著提高黑河 43 产量,但需适当补充 K 肥以提高黑河 43 抗病性,其中 N3P3K 处理区 2 年产量均显著高于其他处理区,缺素处理区 2 年产量效应一致表现为 $NK > NP > PK$,说明黑河 43 产量形成中氮磷钾重要程度依次为 $N > K > P$;(4)聚类分析将黑河 43 综合农艺性状分成 2 大类,第 1 类为蛋白及产量相关性状,其中黑河 43 蛋白含量与产量构成因子成显著正相关,第 2 类为脂肪与密度,其中脂肪含量与密度呈显著正相关;将施肥处理聚类为 2 大类,第 I 类是缺氮肥区,第 II 类是含氮肥区,氮肥是黑河 43 高产优质的关键因子。

参考文献

[1] 王金陵. 中国东北大豆[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999. (WANG J L. Soybean in northeast China[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1999.)

[2] 魏丹, 李艳, 李玉梅, 等. 氮磷钾元素对黑龙江不同地区大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 87-91. (WEI D, LI Y, LI Y M, et al. Effect of N, P, K fertilization on yield and quality of soybean in Heilongjiang Province[J]. Soybean Science, 2017, 36(1): 87-91.)

[3] 宋雯雯. 中国大豆功能性成分地理分布规律及环境影响因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. (SONG W W. Studies of soybean functional component distribution across China and analysis on the environmental influences [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.)

[4] 魏荷, 王金社, 卢为国. 大豆籽粒蛋白质含量分子遗传研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(3): 394-400. (WEI H, WANG J S, LU W G. Molecular genetic advances in soybean seed protein[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(3): 394-400.)

[5] 姚振纯. 大豆蛋白质的氨基酸组分与改良[J]. 黑龙江农业科学, 1997(1): 39-40. (YAO Z C. Amino acid composition and improvement of soybean protein[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1997(1): 39-40.)

[6] ZHANG J, WANG X, LU Y, et al. Genome-wide scan for seed composition provides insights into soybean quality improvement and the impacts of domestication and breeding[J]. Molecular Plant, 2018, 11(3): 460-472.

[7] 吴润之, 傅蒙蒙, 齐波, 等. 大豆籽粒蛋白质积累及其影响因

素[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(19): 1-4. (WU R Z, FU M M, QI B, et al. Protein accumulation in soybean seeds and its influencing factors[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(19): 1-4.)

[8] 宁海龙, 宋秀吉, 王雪依, 等. 氮磷钾肥对大豆脂肪含量的效应[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 302-307. (NING H L, SONG X J, WANG X Y, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on oil content in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(3): 302-307.)

[9] 姬月梅, 罗瑞萍, 赵志刚, 等. 不同施氮量及施氮方式对大豆根瘤生长及产量的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 887-893. (JI Y M, LUO R P, ZHAO Z G, et al. Effects of different nitrogen application and methods on nodule growth and yield of soybean(*Glycine max* L.)[J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 887-893.)

[10] 司玉坤, 齐欣, 武庆慧, 等. 氮、磷肥用量对豫中地区大豆产量、干物质及经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 30-34. (SI Y K, QI X, WU Q H, et al. Nitrogen and phosphorus fertilizer rate affect yield, dry matter and economic benefits of soybean in central Henan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(15): 30-34.)

[11] 王冬群, 成美玲, 王立, 等. 氮磷钾肥用量对菜用大豆产量及养分吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(5): 129-132. (WANG D Q, CHENG M L, WANG L, et al. Impacts of N, P, K application on yield and nutrient absorption of vegetable soybean[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 129-132.)

[12] 申晓慧. 不同氮肥施用量对大豆根际土壤微生物数量及产量的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(2): 284-286. (SHEN X H. Effect of nitrogen amount on rhizosphere soil microorganisms and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2014, 33(2): 284-286.)

[13] 孙振宁, 李晶, 段兴武, 等. 氮磷钾施肥水平对大豆产量及性状的影响[J]. 作物杂志, 2012(5): 135-139. (SUN Z N, LI J, DUAN X W, et al. Effects of combined fertilization of N, P and K on soybean yield and yield traits[J]. Crops, 2012(5): 135-139.)

[14] 张国正, 周琴, 何小红, 等. 氮、磷和钾肥对菜用大豆籽粒产量和主要矿质元素积累的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(6): 1034-1039. (ZHANG G Z, ZHOU Q, HE X H, et al. Effects of N, P and K fertilizer on grain yield and mineral element content in grain of vegetable soybean[J]. Soybean Science, 2009, 28(6): 1034-1039.)

[15] 张含彬, 伍晓燕, 杨文钰. 氮肥对套作大豆干物质积累与分配的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(4): 404-409. (ZHANG H B, WU X Y, YANG W Y. Effect of nitrogen fertilizer on the accumulation and distribution of dry matter in relay-planting soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(4): 404-409.)

[16] 申晓慧, 姜成, 张敬涛, 等. 不同氮肥水平下大豆叶片光谱反射率与叶绿素含量的相关性研究[J]. 大豆科学, 2012, 31(1): 73-75, 80. (SHEN X H, JIANG C, ZHANG J T, et al. Correlation between spectrum reflectance and chlorophyll content of soybean leaves under different nitrogen level[J]. Soybean Science, 2012, 31(1): 73-75, 80.)

[17] 关大伟, 李力, 姜昕, 等. 长期施肥对黑土大豆根瘤菌群体结构和多样性的影响[J]. 生物多样性, 2015, 23(1): 68-78. (GUAN D W, LI L, JIANG X, et al. Influence of long-term fertilization on the community structure and diversity of soybean rhizobia in black soil[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(1): 68-78.)

[18] 唐利忠, 朱旺冲, 谢宜芝, 等. 春大豆施钼条件下最适氮磷钾施用量研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 163-168. (TANG L Z, ZHU W C, XIE Y Z, et al. Study on optimum rates of nitrogen and phosphorus under the condition of molybdenum application in spring soybean[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(5): 163-168.)

[19] 孙铭婕, 诸葛玉平, 娄燕宏, 等. 追施磷肥对大豆产量及养分富集特性的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(4): 20-24. (SUN M J, ZHUGE Y P, LOU Y H, et al. Effects of phosphate fertilizer topdressing on yield and nutrient enrichment of soybean[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(4): 20-24.)

[20] 吴俊江, 王金生, 刘丽君, 等. 供磷水平对不同磷效率基因型大豆生物量积累及分配影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(6): 1020-1023, 1028. (WU J J, WANG J S, LIU L J, et al. Effect of phosphorous application rate on biomass accumulation and its distribution of soybean with different phosphorus efficient genotype[J]. Soybean Science, 2015, 34(6): 1020-1023, 1028.)

[21] 吕继龙, 何萍, 徐新朋, 等. 我国大豆最佳施肥量和种植密度评价[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 174-180. (LYU J L, HE P, XU X P, et al. Assessment of the optimum fertilization rates and planting density for soybean production in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 174-180.)

[22] 姜磊, 王路路, 沈维良, 等. 宿州地区周年肥料运筹对复播大豆农艺性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(6): 919-925. (JIANG L, WANG L L, SHEN W L, et al. Effects of annual fertilizer management on agronomic characters and yield of multiple cropping soybean in Suzhou area[J]. Soybean Science, 2020, 39(6): 919-925.)

[23] HAM G E, NELSON W W, EVANS S D, et al. Influence of fertilizer placement on yield response of soybeans[J]. Agronomy Journal, 1973, 65(1): 81-84.

[24] WESLEY T L, LAMOND R E, MARTIN V L, et al. Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition[J]. Journal of Production Agriculture, 1998, 11(3): 331-336.

[25] HAQ M U, MALLARINO A P. Response of soybean grain oil and protein concentrations to foliar and soil fertilization[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(3): 910-918.

[26] 韩德志. 黑河 43 号遗传背景分析[J]. 中国种业, 2014(9): 60-61. (HAN D Z. Genetic background analysis of Heihe 43[J]. China Seed Industry, 2014(9): 60-61.)

[27] LI F, LIANG J, KANG S, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize[J]. Plant and Soil, 2007, 295(1): 279-291.

[28] 蒋龙刚, 史建硕, 郭丽, 等. 不同氮磷钾水平对夏大豆产量与品质的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(2): 220-227. (JIANG L G, SHI J S, GUO L, et al. Effects of different N, P, K levels on yield and quality of summer soybean[J]. Soybean Science, 2023, 42(2): 220-227.)

[29] VANDAMME E, PYPERS P, VANLAUWE B, et al. Residual phosphorus effects and nitrogen × phosphorus interactions in soybean - maize rotations on a P-deficient Ferralsol[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 98(2): 187-201.

[30] GENTRY L E, BELOW F E, DAVID M B, et al. Source of the soybean N credit in maize production[J]. Plant and Soil, 2001, 236(2): 175-184.