

大豆种子油酸含量研究进展

曹永强^{1,2}, 谢甫第², 董丽杰¹, 王雅珍¹, 宋书宏¹, 王文斌¹

(1. 辽宁省农业科学院 作物研究所, 辽宁 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学 农学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要:大豆种子脂肪酸中油酸含量是评价大豆油脂品质的重要指标之一。油酸含量受隐性等位基因 *ol* 控制, 在种间和品种间存在显著差异, 环境条件及栽培措施亦对其影响明显。本文对大豆油酸含量的不同种质间差异、遗传特点、性状间相关性以及环境因子对其影响等研究进展进行了较为全面的回顾与总结, 以期为大豆科技工作者开展高油酸大豆遗传改良、区域规划及栽培管理等相关研究提供理论参考, 进一步促进大豆油脂品质的提高。

关键词:大豆; 油酸含量; 研究进展

中图分类号: S565. 1 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 11861/j. issn. 1000-9841. 2015. 02. 0329

Research Advancement on Oleic Acid Content in Soybean Seed

CAO Yong-qiang^{1, 2}, XIE Fu-ti², DONG Li-jie¹, WANG Ya-zhen¹, SONG Shu-hong¹, WANG Wen-bin¹

(1. Crop Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161, China; 2. College of Agriculture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Oleic acid content is one of the essential traits to evaluate quality of oil and fat of soybean. Oleic acid conten is controlled by the recessive allele *ol*, is significant variant between interspecific lines and between varieties, and is affected by planting environment and cultivation measures. This paper comprehensively discuss oleic acid content difference between soybean germplasms, hereditary rule, correlation with other traits, and effect of environmental factors. The information of this paper will provide theoretical reference for researchers to carry out genetic improvement on oleate, regional planning, and cultivation and management in a bid to improve oil and fat quality of soybean.

Key words: Soybean; Oleic acid content; Research Advancement

大豆油是人类最重要的食用植物油之一, 用量约占世界食用油总量的 1/3^[1], 其品质的优劣直接关系到食用者的身体健康, 因此越来越受到广大学者的关注。大豆油中各脂肪酸组分配比对油的营养价值、耐储性及加工工艺等都有很大影响。油酸含 1 个双键, 系统命名为十八碳烯酸(C_{18:1}), 是大豆油脂中含量丰富的单不饱和脂肪酸, 具有降低血液总胆固醇和有害胆固醇含量, 但不降低有益胆固醇含量的作用, 被称为“安全脂肪酸”, 对身体健康十分有益, 故其含量的高低是评价大豆油食用品质的指标之一。油酸含量高的大豆种子抗氧化能力强、稳定性高^[2-3], 加工出的大豆油也具有较好的热稳定性, 可以减少或免除化学加氢过程, 降低加工成本。此外, 大豆油中油酸含量高可显著减少反式脂肪酸的产生, 而反式脂肪酸的摄入与冠心病等心血管疾病的发病率增加有关^[4]。近年来, 大豆育种工作者愈加重视大豆脂肪酸组分的遗传改良, 即在提高油脂总量的基础上, 兼顾脂肪酸组分及配比的合理性, 进一步拓展了大豆优质育种的内涵。本文就大豆油脂中重要脂肪酸组分之一的油酸研究

进展进行了概述, 旨在为大豆高油酸育种奠定理论基础。

1 不同大豆种质间油酸含量的差异

常规大豆品种脂肪酸各组分含量趋势一般表现为: 亚油酸 > 油酸 > 棕榈酸 > 亚麻酸 > 硬脂酸, 其中绝大多数品种油酸含量在 20% 左右^[5], 但不同基因型间存在着一定差异。早期有学者对日本和朝鲜的 172 份大豆品种脂肪酸含量进行分析, 发现品种间油酸含量差异较大, 含量变化范围在 14. 2% ~ 58. 0%, 其中部分品种的含量在 50% 以上。20 世纪末, 美国通过 X 射线诱导品种 Bay 获得了油酸含量达到 50% 以上的突变系 M23^[6]。目前, 我国还未有此类高油酸含量种质的报道。1986 年胡明祥等^[7]测定了我国 163 份大豆品种脂肪酸含量, 其中油酸含量变幅在 12. 39% ~ 39. 83%。1998 年刘兴媛等^[8]对来源于我国 22 个省(区、市)的 8 924 份栽培大豆种质资源的脂肪酸含量进行测定, 发现来源不同地区的大豆种质平均油酸含量差异明显, 变异系

收稿日期: 2014-02-18
基金项目: 辽宁省科学事业公益研究基金项目; 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD35B06-2); 辽宁省科技攻关项目(2011201020)。
第一作者简介: 曹永强(1977-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培生理研究。E-mail: yognqiangcao@ hotmail. com。
通讯作者: 王文斌(1968-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培生理研究。E-mail: wbwang@ 163. com。

数 19.3%, 变幅为 18.94% (湖北) ~ 27.58% (广东), 春大豆的油酸含量高于夏大豆和秋大豆。2001 年李楠^[9]研究了东北 2 501 份春大豆种质资源主要品质性状, 其中油酸含量最高值为 39.1%, 平均值 20.7%, 不同地区的种质间油酸含量存在一定差异, 黑龙江省品种油酸含量最高值 37.2%, 平均值 20.7%, 吉林省品种最高值 33.3%, 平均值 21.3%, 辽宁省品种最高值 39.1%, 平均值 20.9%, 三省大豆品种油酸含量的平均值高低趋势与刘兴媛的研究结果一致, 即吉林省高于辽宁省和黑龙江省。由于研究对象的来源和数量存在较大差异, 不同研究的结果差异也较大, 2011 年苗兴芬等^[10]对东北地区 172 个大豆品种脂肪酸各组分含量进行分析, 油酸含量的分布趋势为: 黑龙江 (26.01%) > 吉林 (24.48%) > 辽宁 (24.40%), 其中黑龙江省品种油酸含量的差异最大 (CV: 53.15%), 油酸含量超过 30% 的品种有 18 个, 最高为 37.74%。宋晓昆等^[11]研究认为, 我国不同生态类型大豆种质的油酸含量差异较大, 南方春大豆平均油酸含量最高 (23.52%), 变异也较丰富 (CV: 26.74%)。

即使试验材料来源于相同省区, 不同种质间油酸含量也存在较大差异。2006 年徐冉等^[12]对 727 份山东省夏大豆品种的脂肪酸含量进行了分析, 结果表明: 山东省夏大豆品种间油酸含量存在较大差异, 变化范围在 14.2% ~ 34.4%, 极差为 20.2%。2007 年王颢^[13]对甘肃省 168 份地方种质资源的脂肪酸组分进行分析, 油酸含量变幅为 14.8% ~ 29.4%, 没有超过 30.0% 的品种, 变异系数为 13.3%, 油酸含量区域分布特点明显, 表现为中部 > 陇东 > 河西 > 陇南。王晓燕等^[14]对河北省近 30 年来审定的 41 个大豆品种进行分析发现油酸含量的变幅为 19.52% ~ 30.05%, 其变异系数达到 31.2%, 品种间差异极显著。

野生大豆的油酸含量显著低于栽培大豆。王连铮等^[15]、徐豹等^[16]对不同进化类型大豆的脂肪酸组分进行了研究, 发现不同类型大豆几种脂肪酸的含量因进化程度的不同而呈连续性变异, 野生大豆的油酸含量低而亚麻酸含量高, 栽培大豆则相反; 半野生大豆界于两者之间。野生、半野生和栽培大豆脂肪酸含量之间的差异主要体现在不饱和脂肪酸含量的差异, 尤其是油酸和亚麻酸。1984 年庄无忌等^[17]的分析结果也表明, 大豆不同类型间油酸含量的差异达到极显著水平。2008 年郑永战等^[18]对来自全国 6 个大豆生态区 24 个省份 265 份栽培资源和来自 5 个生态区 23 个省份 141 份野生

资源的脂肪酸组分进行了研究, 结果表明: 我国栽培大豆油酸平均含量 23.25%, 变幅在 16.45% ~ 37.74%, 而野生大豆油酸平均含量为 15.5%, 变幅为 11.04% ~ 34.40%, 二者差距较大。同时, 不同区域间栽培大豆油酸平均含量差异较大, 北方一熟制春作大豆品种生态区含量最高, 变异系数最大; 不同区域间野生大豆油酸平均含量差异较小, 而区域内存在一定差异, 变异系数均在 10% 以上。

2 大豆油酸含量的遗传特点

大豆高油酸含量主要受隐性等位基因 *ol* 控制^[6], 隐性纯合体 (*olol*) 油酸含量高于杂合体 (*Olol*) 和显性纯合体 (*OlOl*)^[19]。同时, 受编码脂肪酸去饱和酶 2 (*FAD2*) 基因调控, 其具有提高油酸含量的作用, 而发现的 2 个 *FAD2* 突变体 *FAD2-1A* 和 *FAD2-1B* 基因及 1 个新的 *FAD2-1A* 的等位基因 (缺失 1 个核苷酸), 均对油酸含量的调控起重要作用, 如: *FAD2-1A* 的等位基因 (缺失 1 个核苷酸) 可将大豆油酸含量提高到 80% 以上^[21]。然而, 有研究发现含有隐性 *FAD2-1A* 突变基因和隐性 *FAD2-1B* 突变等位基因的高油酸材料虽在不同试验点的油酸含量较高, 但变异幅度较大, 说明调控油酸含量的基因受环境影响较大^[22]。同时, 来源于美国不同生育期组的高油酸材料油酸含量对环境的稳定性不同^[23], 说明除了调控油酸的基因外, 其他基因对油酸稳定性也有一定影响。

通过 QTL 定位, Orf 等^[24]定位到 3 个控制油酸含量的 QTL, 可解释总表型变异 10% 以上; 郑永战等^[25]利用 CIM 和 MIM 法分别检测到 3 个和 2 个油酸含量 QTL, 认为位于 D2 和 D1b-1 连锁群上的 *ole-1*、*ole-2* (*ole-4*) 位点对提高油酸含量具有重要作用。而对油酸含量的遗传分析也表明其遗传符合 3 对加性主基因遗传模型, 其中 2 对主基因效应为等加性, 主基因遗传率为 74.66%^[26]。李侠等研究也得出相似结果^[27]。油酸含量的遗传主效应和基因型 × 环境互作效应相近, 遗传主效应中以细胞质效应为主, 在基因型 × 环境互作方差中, 以基因的显性和显性 × 环境互作效应为主; 油酸含量以细胞质普通遗传率和母体普通遗传率为主, 在后代油酸遗传选择中, 以细胞质及母体选择响应和互作选择响应为主, 具有较好的选择效果和遗传进展^[28]。

3 大豆油酸含量与其他性状间的关系

大豆油酸含量与某些农艺性状、产量性状及品质

性状存在着不同程度的关联性。Scherder 等^[29]以油酸含量为考察指标构建分离群体,筛选出中等油酸含量($>500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)植株和正常油酸($<280 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量的植株,发现中等油酸含量的植株产量明显偏低,而生育期、株高、百粒重等性状也存在一定差异。2009 年师臣等^[30]的研究得到相近结论,认为油酸与主茎荚数、荚比(主茎荚数/分枝荚数)均呈显著正相关,而与单株粒重呈显著负相关。2006 年胡超越等^[31]研究认为大豆油酸含量与株高呈显著遗传负相关,与主茎节数、分枝数呈不显著负相关,而与单株荚数、粒数、粒重呈正相关,与百粒重呈弱正相关;油酸对单株粒重的直接效应为 0.846 7,对百粒重的直接效应是负值,这主要是被亚油酸的正向效应所掩盖。也有学者认为油酸含量与主要农艺性状间的相关性未达显著水平,遗传关系不密切^[27]。

多数学者研究认为大豆油酸含量与亚油酸、亚麻酸呈极显著负相关^[26-27,30,32-34],相关系数分别为 -0.87 和 -0.49 ^[30],与棕榈酸呈极显著负相关^[30,33,35],这与胡明祥等^[7]研究结果一致,大豆油酸含量与脂肪和硬脂酸呈不显著正相关关系^[7,26]。万超文等^[35]研究认为油酸含量还与 IUFA(脂肪酸不饱和指数)、蛋白质含量分别呈极显著和显著负相关关系。

4 环境因子对大豆油酸含量的影响

国外学者对大豆油酸含量的稳定性进行了相关研究,认为温度是影响大豆品系油酸含量的重要环境因素之一。1986 年 Martin 等^[36]发现温度变化对高油酸大豆品系 N78-2245 的油酸含量影响比对普通品系 Dare(油酸含量 20% 左右)更加显著。将 N78-2245 的生长环境温度控制在白天 30°C 晚间 26°C 时,开花后 60 d 籽粒油酸含量为 $645 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;当生长环境温度设定为白天 22°C 晚间 18°C 时,开花后 60 d 籽粒油酸含量仅有 $323 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,二者差异极大,达到 $322 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而普通品系 Dare 在以上 2 个温度环境中的籽粒油酸含量则分别为 189 和 $171 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,差异较小。2006 年 Oliva 等^[37]在美国南部地区 5 个试验点,每试验点 2 个播期,对 5 个具有高油酸含量的大豆品系进行了稳定性评价,研究认为各品系油酸含量的环境稳定性取决于各品系在各试验点的平均油酸含量对鼓粒期最后 30 d 的日平均温度的回归系数,5 个品系的回归系数变化在 $0.13 \sim 3.28$,此期间温度对大豆油酸含量具有一定影响,且在品系间存在明显差异,其中 M23 品系的回归系数

最小,其油酸含量的稳定性最高。大豆基因型与环境、年份三者对油酸含量存在显著的互作效应,环境对高油酸含量大豆的影响大于对低油酸含量大豆影响,鼓粒期间温度高可促进油酸积累,生产中采用稍早熟品种并适当早播有利于提高大豆油酸含量^[29]。

谢冬微等^[32]在黑龙江省 3 个地区分别对合丰 25 × 父本 L-5 的 126 个 F_6 代重组自交系的脂肪酸组分含量进行测定,油酸含量在哈尔滨、呼兰和绥化的变异系数分别为 16.41%、15.30% 和 11.38%,表明自交系油酸含量因环境变化而有所变化,且变化幅度存在差异。大豆种植区生长季平均温度高有利于油酸含量的增加^[38-39]。年海等^[40]的研究表明,大豆油脂中 5 种脂肪酸均存在地点间和品系 × 地点的极显著差异,油酸含量表现出北低南高的趋势,即符合温度对油酸影响的趋势。2006 年王雪峰等^[41]的研究结果表明东农 44 在低纬度温度较高试验点的油酸含量高于高纬度温度偏低试验点,特别是 8、9 月份日照时数多、温度高、降雨量较少的试验点或年份大豆油酸含量较高,同时,6 月份温度高、降雨多也利于油酸的形成与累积。1999 年马淑英等^[42]研究了超早熟大豆脂肪酸组分与气象因子的相关性,发现 Polan 的油酸含量与平均降水量呈极显著负相关($r = -0.85^{**}$),而 Aldana 则呈不显著的负相关($r = -0.49$);平均相对湿度与 Polan 的油酸呈极显著负相关($r = -0.65^{**}$),与 Aldana 呈不显著的负相关($r = -0.41$)。这种相关程度在品系间存在一定差异,但总体趋势一致,即平均降水量、相对湿度与大豆油酸含量均呈负相关关系。在自然雨养条件下,水分亏缺往往导致发育种子中油酸含量增加,有研究发现水分亏缺条件下大豆植株最后开放的花序开花后 20 d,种子油酸含量增加 $3.03\% \sim 3.53\%$ ^[38]。当大豆开花结荚期和鼓粒期干旱或其中某一时期干旱,均会使油酸含量增加,并达极显著水平^[43],这可能与干旱一般伴随着光照充足、温度升高有关。何志鸿等^[44]研究认为大豆油酸含量在不同海拔高度间差异不显著。

刘波等^[45]研究了氮、磷肥对高油、高蛋白大豆品种化学品质的影响,认为适当施用氮肥有利于提高大豆油酸含量,而施磷肥仅有利于高蛋白品种的油酸积累。微量元素对大豆油酸含量的影响不尽相同。在缺钼条件下,大豆种子的总脂肪含量和油酸含量均有所下降^[46];施用硒肥也能够降低种子油酸含量^[47];施用硫肥可提高某些品种的油酸含量^[48]。Boswell 等^[49]认为,在富含锰的土壤上,额外施用锰

对大豆脂肪酸各组分含量基本没有影响。Wilson等^[50]认为锰缺乏时(叶片锰含量正常值为15 mg·kg⁻¹),籽粒油酸含量降低,当叶片锰含量严重低于正常值时,油酸含量的降低非常明显,而高于正常锰浓度(15~20 mg·kg⁻¹)时,各脂肪酸组分与正常条件下相比含量基本一致。一定程度的盐胁迫可使大豆籽粒油酸含量显著降低,在高浓度盐胁迫下,脂肪酸组分变化不显著^[51]。而万超文等^[35]研究表明,低盐和高盐浓度胁迫下,耐盐和盐敏感品种的油酸含量均提高,尤其盐敏感品种在高盐浓度胁迫下油酸含量呈极显著增加,可见大豆油酸含量受盐胁迫影响较大。同时,大豆油酸含量还与栽培条件有一定关系,高油大豆品种在中等密度(43×10⁴株·hm⁻²)条件下油酸含量较高,且在一定密度下,油酸含量随施肥水平的提高而增加^[52]。

5 结 论

由于基因型、产地来源及品种类型等不同,大豆种质间油酸含量存在明显差异。整体而言,大豆油酸含量呈现出北低南高,春大豆高于夏大豆、秋大豆;不同区域间及相同区域内由于种质遗传背景不同而存在一定差异;不同类型大豆油酸含量随遗传进化改良而呈显著递增趋势,即栽培大豆>半野生大豆>野生大豆,同一区域内野生种质资源间油酸含量也存在一定差异。

大豆油酸含量受隐性等位基因 *ol* 控制,已定位到2~3个主效QTL位点,并符合3对加性主基因遗传模型;油酸含量的遗传主效应和基因型×环境互作效应相近,以细胞质效应及基因的显性和显性×环境互作效应为主;在后代选择中,以细胞质和母体选择响应及互作选择响应为主。

多数研究表明,大豆油酸与亚油酸、亚麻酸和棕榈酸呈极显著负相关,与脂肪、硬脂酸呈不显著正相关;与其他主要性状的相关性,各学者研究结果不尽一致,还不够明确,需进一步探讨。

低纬度地区大豆鼓粒期间温度较高,有利于油酸含量的提高;温度变化对高油酸大豆品种的油酸含量影响更加显著;大豆油酸含量存在年份间、试验地点间、年份×地点×品种的极显著差异;在大豆结荚、鼓粒期遇干旱可导致油酸含量有所增加。肥料施用以及土壤盐碱性均对大豆油酸含量有所影响,合理施用氮、磷肥和硫、钼、锰微肥有利于提高油酸含量。同时,种植密度也对油酸含量有一定影响。

6 展 望

大豆油脂改良是大豆化学品质改良的重要内容之一,其本质就是根据不同需求对一种或几种脂肪酸组分含量进行优化,使之更趋合理。基于油酸具有抗氧化性强、营养价值高等特点,高油酸含量对于提高大豆食用油的稳定性及营养品质都具有显著作用。美国、日本等国家采用辐射诱变、转基因等育种技术获得了许多具有较高商业价值的高油酸大豆品种,而我国在此方面的研究与应用还较落后,因此,培育高油酸品种将成为未来我国大豆优质育种的重要方向之一。培育高油酸大豆品种首先要加强相应资源的筛选与创新利用,并通过遗传基础研究,明确其遗传机理和基因定位,进而采用常规与分子生物学技术进行基因聚合获得优良品系。同时,还要加强高油酸大豆的区域规划与配套栽培技术研究,为实现良种、良法有机结合奠定基础。

参考文献

[1] Kim W S, Krishnan H B. Expression of an 11 kDa methionine-rich delta-zein in transgenic soybean results in the formation of two types of novel protein bodies in transitional cells situated between the vascular tissue and storage parenchyma cells[J]. Plant Biotechnology Journal, 2004, 2:199-210.

[2] Su C, White P. Frying stability of high-oleate and regular soybean oil blends[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2004, 81(8):783-788.

[3] Warner K, Gupta M. Potato chip quality and frying oil stability of high oleic acid soybean oil[J]. Journal of Food Science, 2005, 70:395-400.

[4] Hu F B, Willett W C. Optimal diets for prevention of coronary heart disease[J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 288(20):2569-2578.

[5] Wilson R F. Seed composition[M]//Boerma H R, Specht J T. Soybeans: Improvement, production, and uses. 3rd ed. ASA Monogr. 16. ASA, Madison, WI. 2004:621-669.

[6] Takagi Y, Rahman S M. Inheritance of high oleic acid content in the seed oil of soybean mutant M23[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1996, 92(2):179-182.

[7] 胡明祥,梁歧,孟祥勋. 我国大豆品种脂肪酸组成的分析研究[J]. 吉林农业科学,1986(1):12-17. (Hu M X, Liang Q, Meng X X. Analysis of fatty acid profile of soybean varieties in China [J]. Jiling Agricultural Sciences, 1986(1):12-17.)

[8] 刘兴媛,胡传璞,季玉玲. 中国大豆种质资源的脂肪酸组成分析[J]. 作物品种资源,1998(2):40-42. (Liu X Y, Hu C P, Ji Y L. Analysis of fatty acid profile of soybean germplasm resources in China [J]. China Seeds, 1998(2):40-42.)

[9] 李楠. 东北春大豆主要品质性状的改良潜力[J]. 大豆通报,

- 2001(2):12-13. (Li N. Improvement potential on main quality trait of spring soybean varieties in Northeast China[J]. Soybean Bulletin, 2001(2):12-13.)
- [10] 苗兴芬,徐文平,李灿东,等. 东北地区大豆品种脂肪酸组成与含量分析[J]. 大豆科学,2011,30(3):529-531. (Miao X F, Xu W P, Li C D, et al. Analysis of the fatty acid composition of soybean varieties in Northeast China[J]. Soybean Science, 2011, 30(3):529-531.)
- [11] 宋晓昆,张颖君,闫龙,等. 大豆脂肪酸组份相关、变异特点分析[J]. 华北农学报,2010,25(S):68-73. (Song X K, Zhang Y J, Yan L, et al. A study on correlation and variability of fatty acid composition contents of soybean cultivars[J]. Acta Agricultural Boreali-Sinica, 2010,25(S):68-73.)
- [12] 徐冉,张礼凤,王彩洁,等. 山东夏大豆品种的脂肪品质及其遗传改良途径分析[J]. 大豆科学,2006,25(4):385-388. (Xu R, Zhang L F, Wang C J, et al. Analysis on quality and genetic improvement of fat in summer soybean cultivars of Shandong province[J]. Soybean Science, 2006,25(4):385-388.)
- [13] 王颢. 甘肃省大豆种质资源脂肪酸组成及评价[J]. 甘肃科技,2007,23(7):211-212. (Wang H. Analysis and evaluation on fatty acid profile of soybean germplasm resource in Gansu province [J]. Gansu Science and Technology, 2007,23(7):211-212.)
- [14] 王晓燕,张彩英,贾晓艳. 河北省大豆品种脂肪酸组成与含量分析[J]. 河北农业大学学报,2007,30(2):15-18. (Wang X Y, Zhang C Y, Jia X Y. Analysis of fatty acids composition and content in soybean varieties in Hebei province[J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2007,30(2):15-18.)
- [15] 王连铮,吴和礼,姚振纯,等. 黑龙江省野生大豆的考察和研究[J]. 植物研究,1983(3):116-129. (Wang L Z, Wu H L, Yao Z C, et al. Investigation of wild soybean in Heilongjiang province[J]. Bulletin of Botanical Research, 1983(3):116-129.)
- [16] 徐豹,路勤华,胡传璞,等. 野生大豆脂肪酸组成的初步研究[J]. 吉林农业科学,1984(2):98. (Xu B, Lu Q H, Hu C P, et al. Preliminary research on fatty acid profile in wild soybean[J]. Jiling Agricultural Sciences, 1984(2):98.)
- [17] 庄无忌,韩华琼,谢发明,等. 栽培、野生和半野生大豆脂肪酸组成的初步研究[J]. 大豆科学,1984,3(3):223-230. (Zhang W J, Han H Q, Xie F M, et al. Preliminary research on fatty acid profile in cultivated soybean, wild soybean and semi-wild soybean [J]. Soybean Science,1984,3(3):223-230.)
- [18] 郑永战,盖钧镒,赵团结,等. 中国大豆栽培和野生资源脂肪性状的变异特点研究[J]. 中国农业科学,2008,41(5):1283-1290. (Zheng Y Z, Gai J Y, Zhao T J, et al. A study on variability of fat-related traits in cultivated and wild soybean germplasm in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(5):1283-1290.)
- [19] Alt J L. Phenotypic and molecular analysis of oleate content in soybean[D]. Iowa: Iowa State University,2005.
- [20] Pham A T, Lee J D, Shannon J G, et al. A novel FAD2-1 A allele in a soybean plant introduction offers an alternate means to produce soybean seed oil with 85% oleic acid content[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2011, 123:793-802.
- [21] Pham A T, Shannon J G, Bilyeu K D. Combinations of mutant *FAD2* and *FAD3* genes to produce high oleic acid and low linolenic acid soybean oil [J]. Theoretical And Applied Genetics, 2012, 125:503-515.
- [22] Lee J D, Bilyeu K D, Pantalone V R, et al. Environmental stability of oleic acid concentration in seed oil for soybean lines with *FAD2-1A* and *FAD2-1B* mutant genes[J]. Crop Science, 2012, 52(3): 1290-1297.
- [23] Lee J D, Woolard M, Slepner D A, et al. Environmental effects on oleic acid in soybean seed oil of plant introductions with elevated oleic concentration[J]. Crop Science, 2009, 49(5):1762-1768.
- [24] Orf J H, Diers B W, Boerma H R. Genetic improvement: Conventional and molecular based strategies[M]// Boerma H R, Specht J E. Soybeans: Improvement, production, and uses. 3rd ed. USA. American Society of Agronomy. Inc. ,2004:417-450.
- [25] 郑永战,盖钧镒,卢为国,等. 大豆脂肪及脂肪酸组分含量的 QTL 定位[J]. 作物学报,2006,23(12):1823-1830. (Zheng Y Z, Gai J Y, Lu W G, et al. QTL mapping for fat and fatty acid composition contents in soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006,23(12):1823-1830.)
- [26] 郑永战,盖钧镒,周瑞宝,等. 大豆脂肪及脂肪酸组分含量的遗传分析[J]. 大豆科学,2007,26(6):801-806. (Zheng Y Z, Gai J Y, Zhou R B, et al. Inheritance of fat and fatty acid composition contents in soybean[J]. Soybean Science, 2007,26(6):801-806.)
- [27] 李侠,常玮,韩英鹏,等. 大豆种子脂肪酸含量的遗传分析[J]. 大豆科学,2009,28(3):403-408. (Li X, Chang W, Han Y P, et al. Genetic analysis on fatty acid composition contents in soybean seed[J]. Soybean Science, 2009,28(3):403-408.)
- [28] 宁海龙,李文霞,李文滨. 大豆脂肪酸组分的胚、细胞质和母体遗传效应分析[J]. 作物学报,2006,32(12):1873-1877. (Ning H L, Li W X, Li W B. Analysis of embryo, cytoplasmic and maternal effects on fatty acid components in soybean(*Glycine max* Merrill) [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006,32(12):1873-1877.)
- [29] Scherder C W, Fehr W R, Shannon J G. Stability of oleate content in soybean lines derived from M23[J]. Crop Science, 2008, 48:1749-1754.
- [30] 师臣,杨柳. 大豆脂肪酸组分与主要农艺性状的相关分析[J]. 黑龙江农业科学, 2009(6):36-37. (Shi C, Yang L. Correlation analysis between fatty acid composition and the main agronomic traits in soybean[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2009(6):36-37.)
- [31] 胡超越,王振民. 大豆油脂脂肪酸含量与主要农艺性状的遗传相关及通径分析[J]. 大豆科学,2006,25(1):18-22. (Hu C Y, Wang Z M. Genetic correlation and path-coefficient of important oil fatty acid content with the major agronomic characters in soybean[J]. Soybean Science, 2006,25(1):18-22.)
- [32] 谢冬微,韩英鹏,李文滨. 不同环境条件下大豆脂肪酸含量与主要农艺性状相关性通径分析[J]. 大豆科学,2010,29(3):403-407. (Xie D H, Han Y P, Li W B. Correlation of fatty acid with major agronomic characters of soybean in different environments[J]. Soybean Science, 2010,29(3):403-407.)
- [33] 李文滨,郑宇宏,韩英鹏,等. 大豆种质资源脂肪酸组分含量

- 及品质性状的相关性分析[J]. 大豆科学, 2008, 27(5): 740-745. (Li W B, Zheng H W, Han Y P. Analysis of fatty acid composition and other quality traits in soybean varieties developed in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2008, 27(5): 740-745.)
- [34] 陈相艳, 李伟, 戴海英, 等. 黄淮海地区主栽夏大豆品种品质研究[J]. 山东农业科学, 2008(5): 6-8, 13. (Chen X Y, Li W, Dai H Y, et al. Research on quality of main summer soybean cultivars in Huanghe-Huaihe—Haihe region of China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(5): 6-8, 13.)
- [35] 万超文, 邵桂花, 陈一舞, 等. 盐胁迫下大豆耐盐性与籽粒化学品质的关系[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(2): 67-72. (Wan C W, Shao G H, Chen Y W, et al. Relationship between salt tolerance and chemical quality of soybean under salt stress[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(2): 67-72.)
- [36] Martin B A, Wilson R F, Rinne R W. Temperature effects upon the expression of a high oleic acid trait in soybean [J]. Journal of American Oil Chemists Society, 1986, 63: 346-352.
- [37] Oliva M L, Shannon J G, Sleper D A, et al. Stability of fatty acid profile in soybean genotypes with modified seed oil composition [J]. Crop Science, 2006, 46: 2069-2075.
- [38] 王金陵, 许忠仁, 杨庆凯. 中国东北大豆种质资源拓宽与改良[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994. (Wang J L, Xu Z R, Yang Q K. Broadening and improvement of soybean germplasm resources in Northeast China[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1994.)
- [39] 宁海龙, 杨庆凯. 环境条件对大豆化学品质影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(1): 81-85. (Ning H L, Yang Q K. Development of the study on effect of environment on the chemical qualities of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2003, 34(1): 81-85.)
- [40] 年海, 王金陵, 杨庆凯, 等. 生态环境对大豆子粒脂肪酸含量的影响[J]. 大豆科学, 1996, 15(1): 35-41. (Nian H, Wang J L, Yang Q K, et al. Effect of ecology environment on fatty acid content of soybean seed[J]. Soybean Science, 1996, 15(1): 35-41.)
- [41] 王雪峰, 陈胜勇, 王继安. 不同纬度气象因子对大豆品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(6): 739-744. (Wang X F, Cheng S Y, Wang J A. The correlation analysis of weather factor of different latitude and quality of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(6): 739-744.)
- [42] 马淑英, 梁歧, 宋慧, 等. 超早熟大豆脂肪酸形成及其与气象因子的相关分析[J]. 中国农业科学, 1999, 32(S): 69-76. (Ma S Y, Liang Q, Song H, et al. The formation of fatty acid of extra early soybean and correlation with meteorological element[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(S): 69-76.)
- [43] 张敬荣, 高继国, 李辰仁, 等. 开花至鼓粒期干旱对大豆籽粒化学品质的影响[J]. 大豆科学, 1996, 15(1): 84-90. (Zhang J R, Gao J G, Li C R, et al. Effect of drought on chemical quality of soybean seed during flowering to seed filling period[J]. Soybean Science, 1996, 15(1): 84-90.)
- [44] 何志鸿, 徐永华, 林凤英. 世界不同纬度与海拔大豆蛋白质和脂肪分布概势[J]. 大豆科学, 1990, 9(1): 65-69. (He Z H, Xu Y H, Lin F Y. Distribution of protein and fatty content of soybean at different latitude and elevation area in the world [J]. Soybean Science, 1990, 9(1): 65-69.)
- [45] 刘波, 苗保河, 李向东, 等. 氮磷肥对两种品质类型大豆脂肪及其组分含量的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(5): 736-739. (Liu B, Miao B H, Li X D, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on fat and fatty composition content in two varieties of soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(5): 736-739.)
- [46] 吴明才, 肖昌珍. 大豆钼素研究[J]. 大豆科学, 1994, 13(3): 245-251. (Wu M C, Xiao C Z. Study on effect of molybdenum element on soybean[J]. 1994, 13(3): 245-251.)
- [47] 李志玉, 郭庆元, 涂学文, 等. 大豆施硒效应和硒素积累特性的初步研究[J]. 中国油料, 1994, 16(1): 41-44. (Li Z Y, Guo Q Y, Tu X W, et al. Preliminary research on effect and accumulation of selenium in soybean[J]. China Oil Plants, 1994, 16(1): 41-44.)
- [48] 白莉, 李子靖, 蔡柏岩. 硫素对不同基因型大豆脂肪酸含量的影响. 中国农学通报, 2013, 29(36): 236-240. (Bai L, Li Z J, Cai B Y. Effect of sulfur on the accumulation of fatty acid in different soybean varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 236-240.)
- [49] Boswell F C, Worthington R E. Boron and manganese effects on protein, oil, and fatty acid composition of oil in soybeans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1971(19): 765-768.
- [50] Wilson D O, Boswell F C, Ohki K, et al. Changes in soybean seed oil and protein as influenced by manganese nutrition [J]. Crop Science, 1982(22): 948-952.
- [51] Huang C Y. Salt stress induces lipid degradation and lipid phase transition in plasma membrane of soybean plants [J]. Taiwan, 1996, 41(2): 96-104.
- [52] 朱洪德, 冯丽娟, 于洪久, 等. 种植密度和施肥水平对高油大豆品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 232-236. (Zhu H D, Feng L J, Yu H J, et al. Effects of different planting densities and fertilizer levels on quality traits of high-oil soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 232-236.)