

蔡海荣, 宋文静, 林建奔, 等. 花生品质性状近红外光谱分析模型构建及应用 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(4): 450-458.  
CAI Hairong, SONG Wenjing, LIN Jianben, et al. Construction and application of near-infrared spectroscopy analysis model for peanut quality traits[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(4): 450-458.

# 花生品质性状近红外光谱分析模型构建及应用

蔡海荣<sup>1</sup>, 宋文静<sup>1</sup>, 林建奔<sup>1</sup>, 刘佳伟<sup>1</sup>, 郭圆圆<sup>1</sup>, 李博纹<sup>1</sup>, 杨海洋<sup>1</sup>,  
卢家毅<sup>1</sup>, 石翰峰<sup>1</sup>, 王键宽<sup>2</sup>, 李方铭<sup>2</sup>, 郭 涛<sup>1</sup>

(1 华南农业大学 国家植物航天育种工程技术研究中心, 广东 广州 510642;

2 广东万绿智慧农业科技有限公司, 广东 河源 517500)

**摘要:**【目的】开发集合花生主要品质性状的近红外光谱分析模型, 为花生品质性状突变体的筛选提供一种高效、便捷的鉴定手段, 缩短育种进程, 提升育种效率。【方法】在中国主要花生产区收集 115 份花生种质材料, 100 份作为定标集, 15 份作为验证集, 使用瑞典波通 DA7200 近红外光谱分析仪采集光谱信息。分别采用索氏抽提法测定脂肪含量, 凯氏定氮法测定蛋白质含量, 酸水解-莱因-埃农氏法测定总糖与蔗糖含量以及气相色谱法测定各脂肪酸含量。选用全波长光谱范围, 采用偏最小二乘回归法构建模型, 对比单一和复合预处理方法, 比较不同模型的决定系数 ( $R^2$ ) 和校准均方根误差 (Root mean square error of calibration, RMSEC), 选择最佳模型。使用验证集 15 份花生种质材料对每个性状的最佳模型进行外部验证。利用构建的最佳模型在航天诱变材料后代中筛选突变体, 考察模型的应用价值。【结果】构建了 12 个花生品质性状的近红外光谱分析模型, 除脂肪与花生酸含量外, 其余性状的  $R^2$  均高于 0.85; 同时外部验证也显示, 除脂肪与花生酸含量外, 模型  $R^2$  均大于 0.85。利用该模型的油酸近红外分析模型, 从 805 份航天诱变  $SP_3$  材料中筛选出 12 份花生油酸突变体材料, 油酸含量均极显著高于野生型 ( $P<0.001$ )。【结论】构建的模型可有效预测花生各品质性状, 适用于突变体、种质资源以及杂交后代等群体花生籽仁品质的高效检测。

**关键词:** 花生; 近红外光谱; 品质性状; 突变体筛选

中图分类号: S335.21

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)04-0450-09

## Construction and application of near-infrared spectroscopy analysis model for peanut quality traits

CAI Hairong<sup>1</sup>, SONG Wenjing<sup>1</sup>, LIN Jianben<sup>1</sup>, LIU Jiawei<sup>1</sup>, GUO Yuanyuan<sup>1</sup>, LI Bowen<sup>1</sup>, YANG Haiyang<sup>1</sup>,  
LU Jiayi<sup>1</sup>, SHI Hanfeng<sup>1</sup>, WANG Jiankuan<sup>2</sup>, LI Fangming<sup>2</sup>, GUO Tao<sup>1</sup>

(1 National Engineering Technology Research Center of Plant Space Breeding, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Wanlu Smart Agricultural Technology Co., Ltd., Heyuan 517500, China)

**Abstract:** 【Objective】To develop a near-infrared spectroscopy analysis model integrating the main quality traits of *Arachis hypogaea* L. (peanut), provide an efficient and convenient identification method for screening of peanut quality trait mutants, shorten the breeding process, and improve the breeding efficiency. 【Method】A

收稿日期: 2024-11-07 网络首发时间: 2025-06-16 10:06:56

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20250613.1716.004>

作者简介: 蔡海荣, E-mail: [amumumu233@163.com](mailto:amumumu233@163.com); 通信作者: 郭 涛, 主要从事水稻遗传育种研究, E-mail: [guoguoat@scau.edu.cn](mailto:guoguoat@scau.edu.cn)

基金项目: 河源市科技计划重大项目 (河科 2021010)

total of 115 peanut germplasm materials were collected from major peanut-producing areas in China, 100 of which were utilised as a calibration set and the remaining 15 as a validation set. The Swedish Broadcom DA7200 near-infrared analyzer was used to collect spectral information. The fat content was determined by using the Soxhlet extraction method, the protein content by Kjeldahl determination, the total sugar and sucrose contents by acid hydrolysis-Rein-Einon's method, and the content of each fatty acid by gas chromatography. The full wavelength spectral range was selected, and models were constructed by using partial least squares regression. The single and composite preprocessing methods were compared to select the best model that performed optimally under this spectral preprocessing by comparing the determination coefficients ( $R^2$ ) and root mean square errors of calibration (RMSEC) of different models. The 15 peanut germplasm materials in validation set were used for external validation of the optimal model for each trait. The mutants in the offspring of aerospace mutagenesis materials were screened by the best model to investigate the application value of the model. 【Result】 A near-infrared spectral analysis model for 12 peanut quality traits was constructed. The  $R^2$  of the traits was higher than 0.85, with the exception of fat and arachidic acid contents. External validation also demonstrated that the  $R^2$  of the constructed model was greater than 0.85, with the exception of fat and arachidic acid contents. Furthermore, the oleic acid near-infrared analysis model screened 12 peanut oleic acid mutants from 805 aerospace mutagenic materials, with the oleic acid contents significantly higher than that of the wild type ( $P<0.001$ ). 【Conclusion】 The constructed model is an effective predictor of quality traits in peanuts and is suitable for the efficient detection of peanut kernel quality in mutants, germplasm resources and hybrid offspring populations.

**Key words:** *Arachis hypogaea* L.; Near-infrared spectroscopy; Quality trait; Mutant screening

花生 *Arachis hypogaea* L. 是我国重要的油料作物与经济作物。中国是世界上最大的花生生产国, 自 2010 年起, 花生年均种植面积超 460 万  $\text{hm}^2$ , 约占世界花生种植总面积的 20%, 年均产量超 1 600 万 t, 占全球总产量的 40%<sup>[1]</sup>。当下我国花生主要用于生产食用油, 其加工量约占花生总产量的 50%<sup>[2]</sup>。花生油的品质与脂肪酸组成紧密相关, 其中油酸和亚油酸为主要的饱和和脂肪酸, 二者总和约占脂肪酸总量的 80%。其中, 油酸不但有助于降低低密度脂蛋白、维持高密度脂蛋白水平, 而且能够保护心脑血管健康<sup>[3]</sup>。因此, 培育高油酸花生品种对于推动花生产业发展至关重要。此外, 花生籽仁中富含优质蛋白, 含有人体必需的 8 种氨基酸, 消化系数高达 90% 以上<sup>[4]</sup>; 因此, 提高花生蛋白质含量对于花生品质改良具有深远意义。近年来, 花生消费呈现多元化趋势, 花生食品加工产品的需求量不断增加<sup>[5]</sup>, 国内外对花生的食用需求亦有所不同。我国鲜食和烘烤花生的消费比例由 30% 左右逐渐提升至 40%<sup>[6]</sup>, 而欧美发达国家鲜食和用作食品加工原料的花生比例高达 70% 以上, 仅有 13% 用于榨油<sup>[7]</sup>。花生籽仁的甜度与食味品质密切相关, 其中蔗糖是主要的甜味成分<sup>[8]</sup>。当蔗糖含量超过 5% 时, 烘烤花生的口感显著改善; 而当蔗糖含

量超过 6% 时, 水煮鲜食花生更受欢迎<sup>[9-10]</sup>。提升蔗糖含量和选育高糖花生品种已成为食用花生品质改良的新方向, 以适应多样化的加工需求。

在花生品质性状检测中, 传统化学分析方法存在过程繁琐、耗时耗力, 且成本较高等不足。这些方法需要破坏性地处理样本, 如磨碎种子。在育种早期, 材料有限, 这种方法既不经济也不实用, 检测效率低, 而且会延迟育种工作, 不利于快速、高效且无损的品质性状初步评估和筛选。因此, 实现对育种材料品质性状高通量、规模化的检测是选育优质花生品种的关键<sup>[7]</sup>。目前, 检测花生脂肪、蛋白质、蔗糖、脂肪酸含量的方法分别为索氏抽提法、凯氏定氮法、比色法和气相色谱法, 均是传统化学分析方法, 均存在上述缺点。而近红外分析技术具有无损检测、结果准确、分析速度快、高通量检测、样品不需预处理等优点。在近红外光波长范围内, 样品间分子高能振动, 吸收光谱产生光谱信息, 主要为含氢基团, 这些优势基团能量跃迁产生倍频、组合频和共振, 据此获取样品的化学信息。

目前近红外分析技术已在不同作物和行业广泛应用<sup>[7, 11-19]</sup>。花生蔗糖、蛋白质、油酸和亚油酸等品质性状的近红外光谱分析模型已经建立; 然而, 大多数模型仅针对单一性状<sup>[20-24]</sup>。如果能构建

一个集合多种重要品质性状的近红外光谱分析模型, 将能满足早期育种材料的高效筛选需求。

结合广东花生产业的需求, 高品质花生品种选育尤为重要, 亟需构建一种高效的花生营养品质检测方法, 切实地缩短育种周期、推动育种进程。本研究旨在构建一个涵盖花生主要品质性状的近红外光谱分析模型, 为花生品质性状突变体的筛选提供一种便捷且高效的鉴定手段, 并为花生育种及品质研究工作提供技术支撑与保障。



图 1 不同种皮颜色 (A) 和果仁大小 (B) 的部分花生样品  
Fig. 1 Partial peanut samples with different seed coat colors (A) and kernel sizes (B)

1.2 花生光谱采集

采用瑞典波通公司生产的近红外光谱品质分析仪 (DA7200) 采集定标集样品的光谱数据, 扫描波长范围为 950~1 650 nm。由于温度对光谱采集有明显影响, 为保障光谱准确性, 确保样品温度恒定在 25 ℃。采集前先经 40 ℃ 烘干样品 (100 g), 然后置于 25 ℃ 环境下静置 48 h 后上机, 以稳定样品状态, 减少温度因素干扰<sup>[25]</sup>。

上机检测时样品盘需尽可能装满, 由于定标集花生籽仁大小来源丰富, 因此每份材料上机的籽仁数量会有所不同, 约 15~28 粒。

1.3 花生品质性状的传统化学分析方法

将采集好光谱信息的花生籽仁, 取约 50 g 研磨成粉末状, 用于后续不同品质指标检测。

1.3.1 药品和试剂 石油醚、硫酸、过氧化氢、氢氧化钠、乙酸锌、亚铁氰化钾、盐酸、硼酸、乙酸锌、亚铁氰化钾、硫酸铜、酒石酸钾钠、脂肪酸标品 (Sigma-Aldrich)、甲醇、正己烷、氢氧化钾、乙醚

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究的花生材料由 2 部分构成。第 1 部分为近红外光谱模型建模材料, 为来自全国各地的 115 份育成品种, 涵盖不同粒型、种皮颜色 (图 1) 和丰富的品质性状变异。从中随机挑选 100 份作为定标集样本, 剩余的 15 份作为验证集样本。第 2 部分为“神舟十三号”航天诱变材料, 野生型为广东省河源市的地方品种‘火豆’。

石油醚混合液 (体积比 1:1)。

1.3.2 试验仪器 索氏抽提器、鼓风干燥箱、石墨消解仪、全自动凯氏定氮仪、恒温水浴锅、可调温电炉、气质联用仪。

1.3.3 脂肪含量测定 参考《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2016)<sup>[26]</sup> 第一法索氏抽提法进行脂肪含量测定, 即用低沸点有机溶剂石油醚回流抽提, 除去样品中的粗脂肪, 以样品与残渣质量之差, 计算脂肪含量。计算公式如下:

$$\text{脂肪含量} = \frac{(m_2 - m_0)}{m_1} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:  $m_0$  为抽提前抽提瓶和滤纸套干燥后的质量;  $m_1$  为每次称取样品的质量, 8.000 g, 记录好每份样品称取的质量 (精确至 0.001 g), 分多次称取;  $m_2$  为抽提后, 含有石油醚的抽提瓶干燥后的质量。

1.3.4 蛋白质含量测定 参考《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2016)<sup>[27]</sup> 第一法凯氏定氮法进行蛋白质含量测定。称取 0.200 g



(精确至 0.001 g) 花生样品, 加入浓硫酸消煮得到样品消解液, 将消解液加入全自动凯氏定氮仪测定。仪器在使用前加入氢氧化钠溶液、盐酸标准溶液以及含有混合指示剂的硼酸溶液, 在全自动仪器上实现蒸馏、滴定和记录滴定数据。计算公式如下:

$$\text{蛋白质含量} = \frac{c \times (V - V_0) \times 14 \times D}{m_3} \times 6.25 \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $c$  为盐酸标准溶液的浓度, mol/L;  $V$  为滴定试样所用盐酸标准溶液的体积, mL;  $V_0$  为滴定空白处理所用盐酸标准溶液的体积, mL; 14 为氮元素的摩尔质量, g/mol;  $m_3$  为样品质量, g;  $D$  为分取倍数; 6.25 为氮含量换算为蛋白质含量的换算系数。

1.3.5 总糖和蔗糖含量测定 参考《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》(GB 5009.8—2016)<sup>[28]</sup> 第二法酸水解-莱因-埃农氏法进行总糖与蔗糖含量的测定。称取样品 3.000 g (精确到 0.001 g), 加入乙酸锌和亚铁氰化钾溶液去除蛋白质, 过滤后进行酸水解将蔗糖转化为具有还原性的单糖。分别测定总糖与蔗糖含量, 其中蔗糖经盐酸水解转化为还原糖, 以水解转化前后的差值乘以相应的系数 0.95 即为蔗糖含量。计算公式如下:

$$R = \frac{A}{m_4 \times \frac{50}{250} \times \frac{V_1}{100} \times 1\,000} \times 100\%, \quad (3)$$

$$X = (R_2 - R_1) \times 0.95, \quad (4)$$

式中:  $R_1$  为样品转化前转化糖的质量分数, %;  $R_2$  为样品转化后转化糖的质量分数, %;  $A$  为碱性酒石酸铜溶液相当于葡萄糖的质量, mg;  $m_4$  为样品质量, g; 50 为酸水解时吸取样品溶液的体积, mL; 250 为样品去除蛋白质时定容体积, mL;  $V_1$  为滴定时消耗试样溶液体积, mL; 100 为酸水解时定容体积, mL; 1 000 为换算系数;  $X$  为试样中蔗糖质量分数; 0.95 为转化糖 (以葡萄糖计) 换算为蔗糖的系数。由此先求出转化后转化糖的质量分数即为总糖的质量分数, 再根据公式求出蔗糖的质量分数  $X$ 。

1.3.6 脂肪酸含量测定 参考《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》(GB 5009.168—2016)<sup>[29]</sup> 第三法归一化法进行脂肪酸含量的测定, 样品经水解、乙醚溶液提取其中的脂肪后, 在碱性条件下皂化和甲酯化, 生成脂肪酸甲酯, 经毛细管柱气相色谱分析, 采用面积归一法定量测定脂肪酸百分含量。第一步为样品水解及提取。称取样品 0.2000 g (精确至 0.000 1 g) 至烧瓶中, 加入盐酸进行酸水解提取, 水解后加入 10 mL 的 95%( $\varphi$ ) 乙醇溶液混匀,

将烧瓶中的水解液转移到分液漏斗中, 用 50 mL 乙醚石油醚混合液冲洗烧瓶和塞子, 冲洗液并入分液漏斗中, 加盖; 振摇匀 5 min, 静置 10 min; 将醚层提取液收集到 250 mL 烧瓶中; 按照以上步骤重复提取水解液 3 次, 最后用乙醚石油醚混合液冲洗分液漏斗, 并将清洗液收集到 250 mL 烧瓶中。旋转蒸发仪浓缩至干, 残留物为脂肪提取物。第二步进行甲酯化。加入 1 mL 正己烷复溶, 加入 1 mL 20 g/L 氢氧化钾甲醇溶液为甲酯化试剂; 涡旋振荡, 静止反应 1 h; 再次涡旋振荡, 加入 2 mL 去离子水, 静置 30 min 分层, 以 4 500 r/min 离心 2 min, 取上清液稀释 20 倍后, 用气相色谱-质谱联用仪测定。各脂肪酸含量计算公式如下:

$$Y_i = \frac{A_i \times F_{\text{FAME}_i-\text{FA}_i}}{\sum (A_i \times F_{\text{FAME}_i-\text{FA}_i})} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:  $Y_i$  为样品中某个脂肪酸含量占总脂肪酸含量的比例, %;  $A_i$  为样品测定溶液中各脂肪酸甲酯的峰面积;  $F_{\text{FAME}_i-\text{FA}_i}$  为脂肪酸甲酯  $i$  转化成脂肪酸的系数。

1.4 花生品质性状近红外光谱分析模型的构建 利用近红外光谱分析仪自带的建模软件 The Unscrambler X 10.4 构建模型, 将各个建模指标的光谱数据与化学测定结果输入分析软件中进行拟合。在此过程中, 选择用于模型构建的光谱波段, 排除异常波段。此外, 对模型进行精细化调整, 以减少噪声干扰, 并剔除无显著吸收特征或吸收饱和的波段。为最大程度从光谱中获取与化学成分有关的信息, 采用标准正态变量 (Standard normal variate, SNV)、Savitzky-Golay 滤波拟合法 (Savitzky-Golay derivative)、基线化 (Baseline) 和去趋势 (Detrending) 的预处理方法, 分别对光谱进行单一和组合预处理, 利用偏最小二乘回归法进行模型构建。通过剔除异常值后反复计算, 对比模型的决定系数 ( $R^2$ ) 和校准均方根误差 (Root mean square error of calibration, RMSEC) 筛选最优模型<sup>[30]</sup>。

1.5 近红外光谱模型的外部验证

本研究选取了 15 个未参与模型构建的花生样本作为验证集, 利用已建立的模型, 对 15 个验证样本的品质性状进行预测。同时, 利用传统化学分析方法测定验证集样本的品质指标, 通过比较模型预测值和化学测定值, 评估模型的准确性。

1.6 近红外光谱分析模型的应用

为了改善现有花生品种的品质, 2021 年搭载“神舟十三号”对花生种子进行空间诱变处理, 诱变后的种子为航天诱变一代 (SP<sub>1</sub>)。将 SP<sub>1</sub> 发育良

好的种子单粒播种、单株收获得到 SP<sub>2</sub> 种子, 对 SP<sub>2</sub> 单粒播种、单株收获得到 805 份 SP<sub>3</sub> 单株材料, 采用构建的近红外光谱分析模型对其品质性状指标进行检测, 参照《高油酸花生》(NY/T 3250—2018)<sup>[31]</sup>, 以籽粒油酸含量>60% 为初步筛选标准得到 SP<sub>3</sub> 种植材料, 收获后再次通过模型检测进行筛选。

2 结果与分析

2.1 花生定标样品光谱特征

如图 2 所示, 定标样品的光谱在 950~1 640 nm 整体一致, 且样品在多个波段表现出不同的吸收峰; 在 1 160~1 230 nm 存在 1 处明显的吸收峰, 吸光度为 0.17~0.27, 说明不同样品的成分含量存在差异, 适于近红外光谱分析模型的构建。

2.2 花生定标样品品质性状化学测定值

定标集花生样品各品质性状指标测定结果如表 1 所示。其中, 变异系数排名前 5 的指标分别为亚油酸、花生一烯酸、蔗糖、总糖、油酸含量。亚油酸含

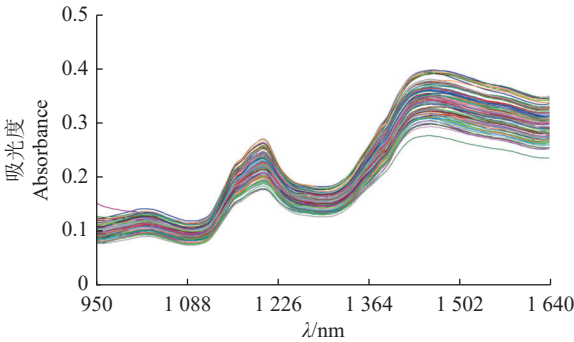


图 2 花生定标集样品近红外光谱

Fig. 2 Near-infrared spectra of peanut calibration set samples

量的分布范围为 2.43%~42.29%, 平均 23.29%; 花生一烯酸含量分布范围为 0.49%~1.75%, 平均 0.96%; 蔗糖含量分布范围为 2.50%~10.00%, 平均 4.07%; 总糖含量分布范围为 3.00%~11.00%, 平均 4.48%; 油酸含量分布范围为 34.73%~80.62%, 平均 55.24%。以上结果表明, 本研究定标集花生样品不同营养成分含量存在广泛的分布和明显差异, 满足近红外光谱分析模型的构建要求。

表 1 定标集花生籽仁营养组分含量化学测定值

Table 1 Chemical determination values of nutrient component contents for peanut seed kernels in calibration set

特征 Characteristic	脂肪 Fat	蛋白质 Protein	蔗糖 Sucrose	总糖 Total sugar	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	山嵛酸 Behenic acid	花生酸 Arachidic acid	花生一烯酸 Eicosenoic acid	二十四烷酸 Tetracosanoic acid
最大值 Maximum value	52.70	27.70	10.00	11.00	80.62	42.29	17.31	4.58	10.60	3.48	1.75	2.20
最小值 Minimum value	40.50	18.10	2.50	3.00	34.73	2.43	6.08	1.81	1.95	1.07	0.49	0.82
平均值 Average value	47.15	22.98	4.07	4.48	55.24	23.29	10.19	2.60	4.19	1.69	0.96	1.37
标准差 Standard deviation	2.74	1.93	1.40	1.51	0.17	0.15	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
变异系数/% Coefficient of variation	5.80	8.39	34.36	33.74	30.61	62.15	27.42	18.07	26.85	17.43	34.38	19.98

2.3 花生品质性状近红外光谱分析模型构建

2.3.1 光谱预处理方法的选择 由于近红外光谱分析仪在工作过程中对环境等因素敏感, 需对采集的原始光谱信息进行预处理, 以减少环境干扰。最佳预处理方法下各指标模型的 RMSEC 和 R<sup>2</sup> 如表 2 所示。

2.3.2 花生品质性状指标模型预测值验证 将 15 份验证集样品的近红外光谱分析模型预测值与化学测定值进行拟合并计算两者的 R<sup>2</sup>, 以验证所构建近红外光谱分析模型的置信水平, 结果如图 3 所

示。除脂肪与花生酸含量外, 其余性状的 R<sup>2</sup> 均大于 0.85, 表明构建的模型可用于预测花生材料各营养品质性状含量, 且准确度较高。

2.3.3 近红外光谱预测模型在花生品质性状突变体筛选中的应用 以“神舟十三号”搭载花生种子进行诱变处理, 共获得 805 份 SP<sub>3</sub> 单株材料, 采用近红外光谱模型预测其品质性状指标, 结果如图 4 所示。野生型对照组的油酸含量为 43.40%。805 份 SP<sub>3</sub> 单株材料的油酸含量呈正态分布, 分布范围为 27.20%~71.40%, 平均 44.37%, 略高于对照

表 2 定标集花生籽仁各品质性状最佳光谱预处理方法

品质性状 Quality trait	预处理方法 Preprocessing method	校准均方根误差 RMSEC	决定系数 $R^2$
脂肪含量 Fat content	去趋势+基准化	1.512	0.609
蛋白质含量 Protein content	去趋势+基准化	0.340	0.968
蔗糖含量 Sucrose content	基准化	0.307	0.952
总糖含量 Total sugar content	去趋势	0.321	0.955
油酸含量 Oleic acid content	原始光谱	0.026	0.977
硬脂酸含量 Stearic acid content	标准正态变量(SNV)	0.001	0.895
亚油酸含量 Linoleic acid content	Savitzky-Golay 滤波拟合法+SNV+去趋势	0.033	0.950
棕榈酸含量 Palmitic acid content	SNV+去趋势+基准化	0.008	0.906
山嵛酸含量 Behenic acid content	SNV+去趋势	0.003	0.859
花生酸含量 Arachidic acid content	SNV+去趋势	0.001	0.803
花生一烯酸含量 Eicosenoic acid content	SNV+去趋势+基准化	0.001	0.923
二十四烷酸含量 Tetracosanoic acid content	SNV+去趋势	0.001	0.881

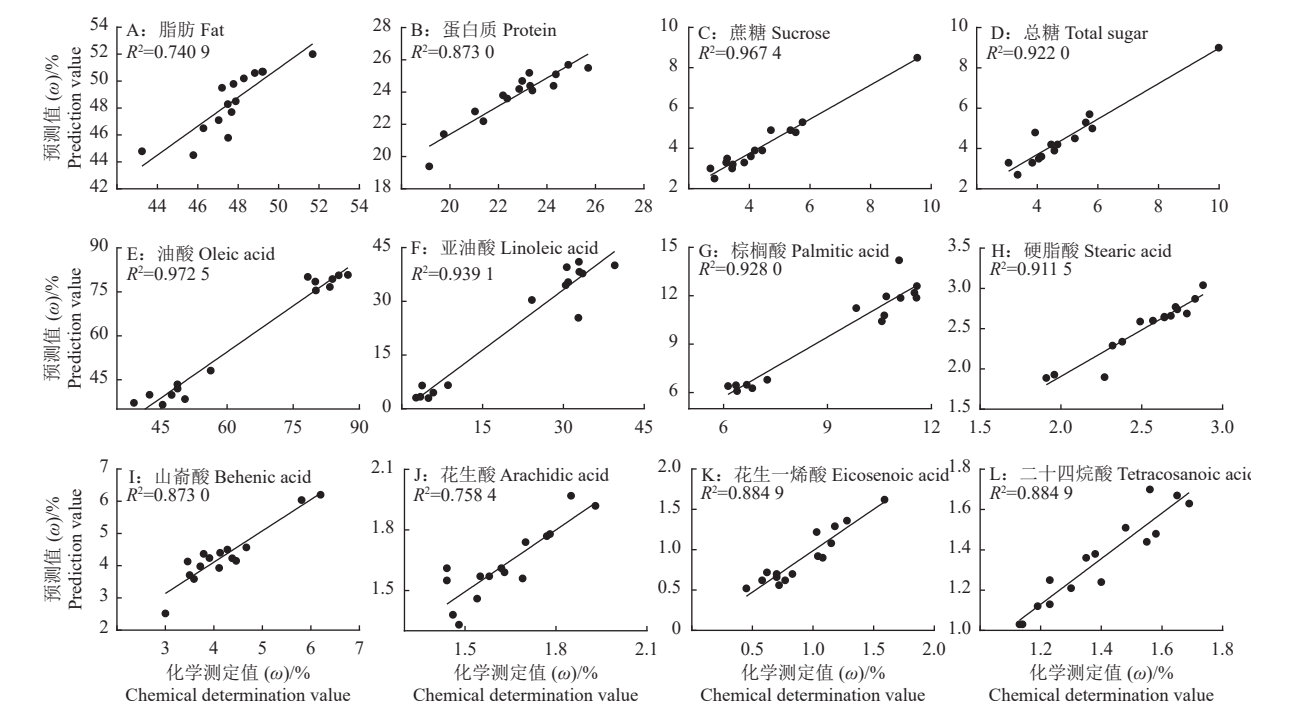


图 3 验证集花生品质性状近红外模型预测值的验证

Fig. 3 Validation of near-infrared model prediction values for quality traits of peanuts in validation set

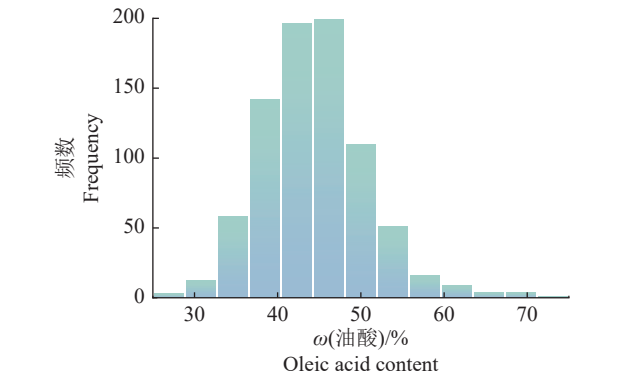


图 4 SP<sub>3</sub> 油酸含量近红外光谱模型预测值分布

Fig. 4 Distribution of near-infrared spectral model predicted values for oleic acid content in SP<sub>3</sub>

组。其中，油酸含量大于 43.40% 的 SP<sub>3</sub> 材料有 350 份，油酸含量大于 60% 的有 16 份。本研究选取油酸含量大于 60% 的 16 份花生材料为突变体，作为 SP<sub>3</sub> 种植材料进行单株播种、单株收获，利用近红外光谱模型对 SP<sub>3</sub> 收获的花生材料再次进行模型预测筛选，结果如图 5 所示。16 份材料的油酸含量与对照组存在极显著差异 ( $P<0.001$ )，其中 4 份材料油酸含量极显著降低，可能由环境因素导致。上述结果表明，在育种实践中，本研究构建的模型适用于花生突变体、种质资源以及杂交后代等材料籽仁品质性状检测筛选工作，可以提高优质花生品种的育种效率。



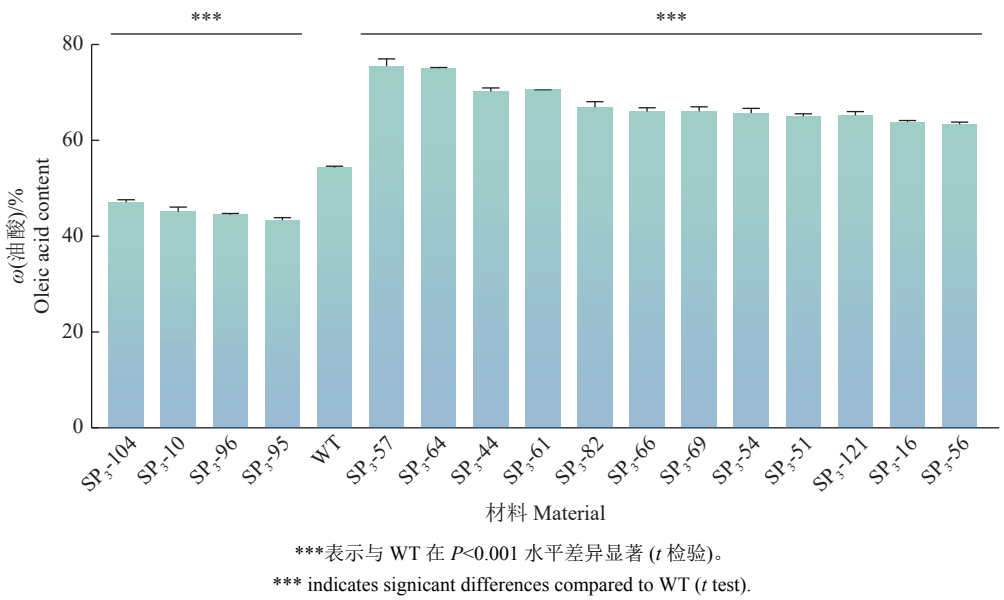


图 5 花生 SP<sub>3</sub> 突变体与野生型 (WT) 油酸含量的差异

Fig. 5 Difference in oleic acid content between peanut SP<sub>3</sub> mutant and wild type (WT)

3 讨论与结论

花生作为重要的经济作物，品质直接影响市场价值。目前花生品质育种的主要方向集中在高含油量、高蛋白质含量、优质脂肪酸组成、良好风味和低黄曲霉毒素含量等方面。传统花生品质检测基于化学分析法，为了克服化学分析法的缺点，针对花生早期育种材料样品数量多、单个样品样本量少的特点，建立一种无损、高效且高通量的花生品质性状分析方法具有重要的研究和应用价值。近年来，花生品质性状检测的研究逐渐集中于近红外光谱技术领域，许多研究已经建立了单一品质性状的分析模型。例如，韩宏伟等<sup>[23]</sup>利用 80 份单粒花生材料构建了 9 种脂肪酸含量分析模型；李振等<sup>[32]</sup>利用 290 份花生材料构建了黄酮近红外光谱分析模型，为 μg/g 级物质含量近红外光谱模型的构建提供了参考；赵星等<sup>[20]</sup>利用 325 份花生材料建立了蔗糖含量近红外光谱分析模型；王志伟等<sup>[33]</sup>用 31 份花生材料建立了食用感官品质近红外光谱分析模型；吕建伟等<sup>[22]</sup>用 50 份花生材料构建了花生油酸和亚油酸含量近红外光谱分析模型，且利用该模型成功选育了高油酸含量品系。但目前所构建的近红外模型大多针对单一性状，本研究利用同一定标集材料同时检测花生 12 种不同品质性状指标并构建相应的近红外光谱分析模型。其中，脂肪和花生酸含量模型的  $R^2$  未能达到预期，无法满足检测需求，需要进一步完善。造成该结果的原因可能是定标集脂肪含量变异系数 (5.80%) 过低导致其所涵盖的范围过于狭小；但可通过增加定标集样品数量或通过二进制

蜻蜓算法 (Binary dragonfly algorithm, BDA)<sup>[34]</sup> 挑选代表性样品来提高模型的准确度。除了变异系数过低会对模型结果造成影响之外，还会有其他影响因素，如尽管花生酸变异系数已经达到 17.43%，但花生酸含量较低，最小值只有 1.07%，对于含量过低的物质，近红外光谱技术受信号自身灵敏度较低这一固有特性影响，检测时会存在一定的局限性<sup>[35]</sup>。有研究将预浓缩技术与近红外光谱技术结合，能够检测到含量低至  $10^{-6}$  甚至接近  $10^{-9}$  级别的物质<sup>[36]</sup>。这表明通过适当的样品预处理和分析方法，近红外光谱技术可以检测低含量的化学物质，进一步提高近红外光谱分析模型的工作效率。为了校正颜色对模型的影响，提高近红外分析模型的稳定性，在模型定标集中引入了多种颜色的花生样本。

花生作为一种重要油料作物，其脂肪酸组成是影响花生油品质的重要因素，增加油酸含量、降低亚油酸含量不仅可以维护人体健康，而且可以延长花生制品货架期<sup>[37]</sup>。本研究针对育种需求所建立的近红外光谱分析模型的分析指标包含脂肪、蛋白质、蔗糖、总糖与 8 种常见脂肪酸含量，以满足花生不同品质性状检测需求以及花生突变体的快速筛选。另外，花生还包含其他 29 种含量较低的脂肪酸，由于这些脂肪酸在花生籽仁中含量较低，对建模定标样品的要求较高，需选择该脂肪酸含量变异丰富的材料或对样品进行预处理 (物质富集技术、粉碎和混合)<sup>[38]</sup>，以满足该类型脂肪酸近红外光谱模型的构建需求，其他低含量的性状亦是如此。花生还有许多有价值的品质性状，如花青素、白藜芦醇、氨基酸、维生素含量等<sup>[39]</sup>，后续可以针对这些品质

性状开发对应的近红外光谱分析模型, 更加全面地满足花生品质性状的检测需求。随着时间的推移和条件的变化, 模型还需要更新和验证, 未来研究中可以通过增加样本数量, 使模型充分学习不同样品的特征信息, 从而提高模型准确性和可靠性<sup>[40]</sup>。

本研究利用所构建模型对搭载“神舟十三号”进行诱变处理的花生材料进行品质性状预测, 在 SP<sub>3</sub> 代快速筛选出 12 份油酸含量极显著高于野生型的突变体, 已知花生高油酸性状由位于 A09 染色体的 *ah FAD2A* 和 B09 染色体的 *ah FAD2B* 控制<sup>[41-42]</sup>; 常规杂交育种中高油酸性状 (aabb) 与普通油酸性状 (AABB) 杂交后代 (AaBb) 的分离后代在理论上会产生 9 种基因型<sup>[43]</sup>, 这 9 种基因型隐性基因位点的个数分别为 0~4 个。当隐性基因位点数量逐步增加时, 与之相对应基因型个体的油酸含量呈上升趋势。这种现象表明, 隐性基因位点数量在油酸含量的调控方面具有基因加性效应<sup>[44-45]</sup>, 由此推断出含 *ah FAD2A* 和 *ah FAD2B* 这 2 对基因的隐性位点越多, 个体油酸含量就越高, 其中基因型为 aabb 个体的油酸含量最高。当检测到油酸含量为 60%~75% 时, 推测其油酸性状基因型应为杂合型 (AaBb、Aabb、aaBb), 将这些基因型个体自交, 后续通过花生单粒检测还有机会筛选出高油酸含量后代 (aabb)<sup>[46]</sup>。因此在育种过程中, 对于 F<sub>4</sub> 以下低世代, 应予以保留, 避免淘汰综合性状好的个体, 以推进后续育种进程。

本研究构建的花生近红外光谱分析模型在对 12 个花生品质性状的检测中, 有 10 个性状的定标集  $R^2$  大于 0.85, 预测效果较好, 在花生突变体、种质资源及杂交后代筛选中具备应用潜力。利用该模型从 SP<sub>3</sub> 诱变后代中筛选 12 个油酸含量>60%、极显著高于野生型的突变体材料, 有望为高油酸含量品种花生选育工作提供候选材料, 提高高品质花生的育种效率, 并为未来花生品质育种工作提供有效的技术手段。

参考文献:

[1] 刘娟, 汤丰收, 张俊, 等. 国内花生生产技术现状及发展趋势研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(22): 13-18.

[2] 廖伯寿, 殷艳, 马霓. 中国油料作物产业发展回顾与展望[J]. *农学学报*, 2018, 8(1): 107-112.

[3] VASSILIOU E K, GONZALEZ A, GARCIA C, et al. Oleic acid and peanut oil high in oleic acid reverse the inhibitory effect of insulin production of the inflammatory cytokine TNF- $\alpha$  both *in vitro* and *in vivo* systems[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2009, 8: 25. doi: 10.1186/1476-511X-8-25.

[4] 金华丽, 李琳琳. 近红外光谱技术测定花生蛋白质含量研究[J]. *河南工业大学学报 (自然科学版)*, 2014, 35(1): 26-29.

[5] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选[J]. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 865-874.

[6] 房元瑾, 孙子淇, 苗利娟, 等. 花生籽仁外观和营养品质特征及食用型花生育种利用分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 875-886.

[7] 雷永, 王志慧, 淮东欣, 等. 花生籽仁蔗糖含量近红外模型构建及在高糖品种培育中的应用[J]. *作物学报*, 2021, 47(2): 332-341.

[8] PATTEE H E, ISLEIB T G, GIESBRECHT F G, et al. Investigations into genotypic variations of peanut carbohydrates[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(3): 750-756.

[9] COLEMAN W M, WHITE J L, PERFETTI T. Characteristics of heat-treated aqueous extracts of peanuts and cashews[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994, 42(1): 190-194.

[10] 王传堂, 王秀贞, 吴琪, 等. 鲜食花生感官品质主导分析、优异品系筛选与遗传力估算[J]. *花生学报*, 2018, 47(4): 71-74.

[11] 常莉, 钱承敬, 史晓梅, 等. 基于近红外光谱技术的主产区玉米品质分析[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(6): 36-42.

[12] 孙晓荣, 张晨光, 刘翠玲, 等. 近红外光谱技术对小麦粉品质定量快速检测[J]. *食品科技*, 2023, 48(11): 246-252.

[13] 朱文博, 高锦红, 晁雨蕊, 等. 近红外光谱技术在茶品质及鉴别分析中的应用进展[J]. *山东化工*, 2023, 52(17): 80-82.

[14] 何代弟, 张晓, 张楠楠, 等. 苹果内部品质近红外光谱无损检测研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2023, 29(16): 136-139.

[15] 丁坤, 项安. 近红外高光谱成像技术结合偏最小二乘-判别分析所建模型快速鉴定核桃仁的品质[J]. *理化检验: 化学分册*, 2023, 59(7): 844-848.

[16] 黎海华, 陈文亮, 罗尔伦, 等. 基于近红外技术的快速酒精仪在乙醇浓度分析中的应用[J]. *现代食品*, 2023, 29(12): 205-208.

[17] 乔继红, 苑希岩, 吴静珠, 等. 近红外光谱技术结合宽度学习系统识别国外奶粉产地[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(5): 9-15.

[18] 袁洁, 朱亚雯, 屯妮萨古丽·艾买提江, 等. 管花肉苁蓉饮片中主要苯乙醇苷近红外快检技术的建立及应用[J]. *分析试验室*, 2023, 42(6): 767-774.

[19] 黄子淇, 吴玉章, 刘彝, 等. 近红外技术在含能材料领域的应用研究进展[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(7): 58-66.

[20] 赵星, 张嘉楠, 张一鸣, 等. 花生籽仁蔗糖含量近红外光谱快速测定方法研究[J]. *中国油料作物学报*, 2025, 47(1): 226-233.

[21] 胡美玲, 邹晨阳, 薛晓梦, 等. 单粒花生蔗糖含量近红外预测模型的建立[J]. *作物学报*, 2023, 49(9): 2498-2504.

[22] 吕建伟, 饶庆琳, 姜敏, 等. 花生籽仁油酸、亚油酸含量近红外模型构建及育种应用[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(2): 399-406.



- [23] 韩宏伟, 王传堂, 符明联, 等. 11 个单粒花生脂肪酸近红外定量分析模型构建[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(2): 407-412.
- [24] 纪红昌, 邱晓臣, 柳文浩, 等. 花生籽仁含油量近红外模型的构建及其应用[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(5): 1089-1097.
- [25] 汪志强, 李大鹏, 刘强, 等. 基于温度修正和可见/近红外光谱的油籽含水率检测[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 127-132.
- [26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定: GB 5009.8—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 郑咏梅, 张铁强, 张军, 等. 平滑、导数、基线校正对近红外光谱 PLS 定量分析的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(12): 1546-1548.
- [31] 中华人民共和国农业农村部种植业管理司. 高油酸花生: NY/T 3250—2018[S]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [32] 李振, 侯名语, 崔顺立, 等. 花生籽仁黄酮含量近红外分析检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 1112-1116.
- [33] 王志伟, 王秀贞, 马浪, 等. 花生籽仁食用感官品质近红外分析模型构建[J]. 花生学报, 2022, 51(3): 77-82.
- [34] 胡云超, 刘智健, 汪莹, 等. 蜻蜓算法优选小麦粉蛋白质近红外建模校正集[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 9-15.
- [35] 杜一平, 张璇, 陈贵平, 等. 近红外光谱分析低含量组分的能力评价[C]//全国第四届近红外光谱学术会议. 2012.
- [36] ZHANG X, REN Y L, DU Y P, et al. Assessment of ability to detect low concentration analyte with near-infrared spectroscopy based on pre-concentration technique[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2013, 124: 1-8.
- [37] 郑畅, 杨湄, 周琦, 等. 高油酸花生油与普通油酸花生油的脂肪酸、微量成分含量和氧化稳定性[J]. 中国油脂, 2014, 39(11): 40-43.
- [38] 严寒, 郭平, 骆鹏杰, 等. 近红外光谱结合膜富集技术测定大米中毒死蜥农药残留[J]. 现代食品科技, 2017, 33(4): 289-294.
- [39] 李先宽, 李赫宇, 李帅, 等. 白藜芦醇研究进展[J]. *中草药*, 2016, 47(14): 2568-2578.
- [40] SCHOOT M, KAPPER C, VAN KESSEL G, et al. Cost-benefit analysis of calibration model maintenance strategies for process monitoring[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2021, 1180: 338890. doi: 10.1016/j.aca.2021.338890.
- [41] NAWADE B, BOSAMIA T C, THANKAPPAN R, et al. Insights into the Indian peanut genotypes for *ahFAD2* gene polymorphism regulating its oleic and linoleic acid fluxes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1271. doi: 10.3389/fpls.2016.01271.
- [42] MOORE K M, KNAUFT D A. The inheritance of high oleic acid in peanut[J]. *Journal of Heredity*, 1989, 80(3): 252-253.
- [43] BARKLEY N A, ISLEIB T G, WANG M L, et al. Genotypic effect of *ahFAD2* on fatty acid profiles in six segregating peanut (*Arachis hypogaea* L.) populations[J]. *BMC Genetics*, 2013, 14: 62. doi: 10.1186/1471-2156-14-62.
- [44] BARKLEY N A, CHENAULT CHAMBERLIN K D, WANG M L, et al. Genotyping and fatty acid composition analysis in segregating peanut (*Arachis hypogaea* L.) populations[J]. *Peanut Science*, 2011, 38(1): 11-19.
- [45] 张照华, 王志慧, 淮东欣, 等. 利用回交和标记辅助选择快速培育高油酸花生品种及其评价[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(9): 1641-1652.
- [46] 李建国, 薛晓梦, 张照华, 等. 单粒花生主要脂肪酸含量近红外预测模型的建立及其应用[J]. 作物学报, 2019, 45(12): 1891-1898.

【责任编辑 李庆玲】