

# 绿豆种质在山西省不同生态条件下表型及品质的变异分析

朱慧珺<sup>1</sup>, 么杨<sup>2</sup>, 乔嘉伟<sup>3</sup>, 张泽燕<sup>1</sup>, 闫虎斌<sup>1</sup>, 高伟<sup>1</sup>, 王茜<sup>1</sup>, 闫建俊<sup>1</sup>, 郝青婷<sup>1</sup>,  
赵雪英<sup>1</sup>, 张耀文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>山西农业大学农学院, 太原 030031; <sup>2</sup>中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部粮食作物基因资源评价利用重点实验室, 北京 100081; <sup>3</sup>山西省气象信息中心, 太原 030000)

**摘要:** 绿豆是山西省特色农作物, 探明不同种植区域的生态条件对绿豆表型及品质的影响, 对于优化种植策略、提高产量和营养品质具有重要意义。本研究对榆次、怀仁和临汾三地共 10 份绿豆种质的农艺性状及营养品质的综合分析显示, 怀仁地区绿豆平均单株荚数 (30.87 个) 明显 ( $P<0.05$ ) 高于榆次 (24.07 个) 和临汾 (20.70 个) 两地, 而临汾地区在株高方面 (66.14 cm) 明显 ( $P<0.05$ ) 高于榆次 (47.46 cm) 和怀仁地区 (42.36 cm)。就品质而言, 临汾地区平均蛋白质含量最高 (26.80%), 显著 ( $P<0.05$ ) 高于怀仁 (23.82%)、榆次 (23.19%)。榆次地区淀粉 (47.35%)、脂肪 (2.49%)、总多酚 (3.30 mg GAE/g)、总黄酮含量 (2.34 mg RE/g) 及 DPPH (55.55  $\mu\text{mol/g}$ )、ABTS 自由基清除能力 (28.75  $\mu\text{mol/g}$ ) 均明显优于怀仁 ( $P<0.05$ ) 和临汾地区 ( $P<0.05$ )。spearman 相关性分析发现绿豆株高、脂肪、总黄酮、总多酚、牡荆素和异牡荆素等含量均与产地气候条件密切相关。其中怀仁地区的相对低温可促进绿豆中总黄酮含量的积累; 榆次地区较高的相对湿度可能抑制了脂肪的合成; 该研究结果可为绿豆的品质育种提供指导, 也为高品质绿豆的种植与生产提供重要的理论支撑。

**关键词:** 绿豆; 农艺性状; 营养品质; 气候条件; 相关性

## Variation Analysis of Phenotype and Quality of Mung Bean Germplasm under Different Ecological Conditions in Shanxi Province

ZHU Huijun<sup>1</sup>, YAO Yang<sup>2</sup>, QIAO Jiawei<sup>3</sup>, ZHANG Zeyan<sup>1</sup>, YAN Hubin<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, YAN  
Jianjun<sup>1</sup>, HAO Qingting<sup>1</sup>, ZHAO Xueying<sup>1</sup>, ZHANG Yaowen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031; <sup>2</sup>Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Food Crop Gene Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081; <sup>3</sup>Shanxi Meteorological Information Center, Taiyuan 030000)

**Abstract:** Mung bean (*Vigna radiata*) is a characteristic crop in Shanxi Province. Exploring the impact of ecological conditions in

<sup>1</sup> 收稿日期: 2024-11-01

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为食用豆种质资源鉴定利用与新品种选育, Email: [zhuzhu2005024@163.com](mailto:zhuzhu2005024@163.com)

通信作者: 张耀文, 研究方向为食用豆育种与栽培, Email: [zyw8118571@126.com](mailto:zyw8118571@126.com)

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2021YFD1600601-06); 山西农业大学生物育种工程项目(YZGC098); 国家重点研发计划(2021YFD1600102); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2022C010); 山西农业大学农学院育种工程专项(YZ2021-07); 国家食用豆产业技术体系(CARS-08-G10、CARS-08-G20); 山西省后稷实验室自主立项课题(202304010930003-09)

Foundation projects: Subproject of National Key Research and Development Plan (2021YFD1600601-06); Biological Breeding Project of Shanxi Agricultural University (YZGC098); National Key Research and Development Plan(2021YFD1600102); Central Guide to Local Science and Technology Development Fund Project (YDZJSX2022C010); Shanxi Agricultural University Agricultural College Breeding Engineering Project (YZ2021-07); The Earmarked Fund for CARS-Food Legume (CARS-08-G10, CARS-08-G20); Shanxi Houji Laboratory Independent Project (202304010930003-09)

different planting areas on the phenotype and quality of green bean germplasm resources is of great significance for optimizing planting strategies, improving green bean yield and nutritional quality. The comprehensive analysis of agronomic traits and nutritional quality of 10 mung bean germplasm from Yuci, Huairen, and Linfen in this study showed that the average number of pods per plant in Huairen area (30.87) was significantly ( $P<0.05$ ) higher than that in Yuci (24.07) and Linfen (20.70), while the plant height in Linfen area (66.14 cm) was significantly ( $P<0.05$ ) higher than that in Yuci (47.46 cm) and Huairen (42.36 cm). In terms of quality, the average protein content in Linfen area is the highest (26.80%), significantly ( $P<0.05$ ) higher than that in Huairen (23.82%) and Yuci (23.19%). The starch (47.35%), fat (2.49%), total polyphenols (3.30 mg GAE/g), total flavonoid content (2.34 mg RE/g), DPPH (55.55  $\mu\text{mol/g}$ ), and ABTS free radical scavenging ability (28.75  $\mu\text{mol/g}$ ) in Yuci area were significantly better than those in Huairen area ( $P<0.05$ ) and Linfen area ( $P<0.05$ ). Spearman correlation analysis found that the height, fat, total flavonoids, total polyphenols, vitexin, and isovitexin content of mung beans are closely related to the climatic conditions of the production area. The relatively low temperature in Huairen area can promote the accumulation of total flavonoids in mung beans; The higher relative humidity in Yuci area may inhibit fat synthesis; The research results can provide guidance for the quality breeding of mung beans, as well as important theoretical support for the cultivation and production of high-quality mung beans.

**Keywords:** mung bean; agronomic traits; nutritional quality; climatic conditions; correlation

绿豆 (*Vigna radiata*) 是一年生自花授粉植物, 为菜豆族豇豆属的栽培豆种, 具有生长期短、广适抗逆的特点<sup>[1,2]</sup>。除淀粉、蛋白质、膳食纤维等基本营养成分含量多以外, 绿豆中植物次级代谢产物的含量也非常丰富, 尤其是牡荆素和异牡荆素<sup>[3,4]</sup>。绿豆因其抗氧化、改善糖代谢、抗癌和保肝等健康效益, 以及易于消化且儿童耐受性好的特点, 正逐渐成为婴儿和儿童重要的膳食来源<sup>[5,6]</sup>。

研究表明, 农作物地理区域、气候条件等都会影响作物产量和营养品质。例如, Zhu 等<sup>[7]</sup>研究发现大豆中活性肽 lunasin 含量与日照时长、日温差成显著正相关, 与降水量成负相关。还有报道称种植区气候和环境条件显著影响大豆蛋白质和油分含量<sup>[8,9]</sup>。曹秀清等通过对大豆干旱胁迫处理发现其蛋白质含量在生长期呈先上升后下降的趋势, 脂肪含量在生长期内保持上升趋势, 且不同生育期内干旱胁迫处理对大豆产量有不同的影响<sup>[10]</sup>。在食用豆中也有相关研究, Oikawa 等人也发现收获前气候条件对毛豆营养成分具有显著的影响<sup>[11]</sup>。此外, 绿豆生长期环境水分含量过高或气温过高均会导致明显减产<sup>[12]</sup>。豇豆中所含 VC、硝酸盐和可溶性糖含量随着种植环境中水分含量的减少而升高<sup>[13]</sup>。也有文章报道了绿豆基本营养成分在地域间存在差异<sup>[14]</sup>。

山西省是我国绿豆传统产区, 种植面积和产量分别约占全国的 7%和 5%<sup>[15]</sup>。按品种特性、气候和栽培制度, 山西省的绿豆种植区可分为北部春播区、中部春播区、东部春播区、春夏兼种区及南部夏播区<sup>[16]</sup>, 这些区域地理跨度大、气候差异显著, 其中东部和中西部以山地为主, 夏季温暖湿润; 中部和南部平原、盆地较多, 夏季多雨, 气候适宜; 北部为高原地区, 夏季降水量较少<sup>[17]</sup>。因此, 为了分析气候与绿豆种质资源农艺性状、营养品质之间的相关性, 本研究利用 10 份绿豆资源在山西中部春播区 (榆次)、山西北部

春播区（怀仁）和山西西南部夏播区（临汾）三地种植，通过对成熟期农艺性状，籽粒营养成分、抗氧化成分及抗氧化能力的测定，分析气候环境对绿豆品质等重要性状的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与设备

材料为山西农业大学农学院创制的 10 份绿豆种质（表 1）。

表 1 试验材料

Table1 Test material

编号 Number	名称 Name
1	1114-8-1-1-2
2	1318-5-2
3	1116-18-3
4	1416-4-1-3
5	1416-6-3-3
6	1415-3-1-2
7	1111-3-1-2
8	1109-14
9	1496-2-5-3
10	1540-6-2-1

试剂：氯化钙、硫酸锌、冰乙酸、硫酸铜、亚铁氰化钾、硫酸、硫酸钾、硼酸、亚甲基蓝指示剂、溴甲酚绿指示剂、甲基红指示剂、乙醇（95%）、无水乙醚（ $C_4H_{10}O$ ）、石油醚（ $C_nH_{2n+2}$ ）、氢氧化钠、盐酸、海砂、甲醇（70%/50%）、冰乙酸（65%）、酒精（70%）、 $K_2S_2O_8$ 、1, 1-二苯基-2 苦肼基（DPPH）、2, 2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）、二铵盐（ABTS）、 $Na_2CO_3$  溶液、芦丁、没食子酸、福林酚、5% 亚硝酸钠溶液、10%氯化铝溶液。

设备：分析天平、JA2003A 型分析天平、FW-200 高速万能粉碎机、HHS 电热恒温水浴锅、全自动凯氏定氮仪、索氏抽提器、干燥器（内附有硅胶）、电热鼓风干燥箱、恒温水浴锅、电热恒温干燥箱、TDL-5A 离心机、超声波清洗器、真空冷冻干燥机、气浴恒温振荡器、高效液相色谱仪、旋转蒸发仪、分光光度计。

### 1.2 试验方法

1.2.1 田间种植 将参试材料于 2022~2023 年种植于临汾西芦（ $36^{\circ}14'N$ ,  $111^{\circ}54'E$ ）、榆次东阳（ $37^{\circ}54'N$ ,  $112^{\circ}68'E$ ）、怀仁毛皂（ $39^{\circ}92'N$ ,  $113^{\circ}26'E$ ）三地。各地试验均采用随机区组排列，三次重复，小区面积  $10m^2$ ，4 行区，行距 50cm，株距 12cm~15cm，生长期栽培管理措施同一般大田管理。适时收获考种，根据《绿豆种质资源描述规范和数据标准》<sup>[18]</sup>，进行株高、单株荚数、百粒重三个主要农艺性状的调查记载。收获籽粒用于品质检测。

1.2.2 种植地区气候状况调查 生长期，对三个种植区域的日平均气温、日降水量、日平均相对湿度、日

气温日较差、日日照时数等气象数据进行了详细的观测和记录。

**1.2.3 基本营养成分测定** 淀粉、蛋白质、脂肪、水分的测定分别参照 NY/T 11-1985 中的 1% 盐酸旋光法[19]、GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法[20]、GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索式抽提法[21]、GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法[22]测定。

**1.2.4 生物活性物质测定** 参照 XUN 等的方法[23]，用福林酚法测定总多酚。首先取没食子酸标准溶液来构建标准曲线。接着取 1 mL 样本溶液，依次把福林酚试剂和 7.5%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液加入其中，然后用 70%乙醇稀释至 10 mL。在室温条件下避光反应 2 h，随后以 3000 rpm 的速度离心 10 min。在 765 nm 波长下对吸光度进行测定。结果用每克样品中没食子酸的毫克等效物(mg GAE/g)来表示。

参照 LEE 等的方法[24] 测定总黄酮。以芦丁标准溶液绘制标准曲线。取样液 1 mL，接着分别将 5%亚硝酸钠溶液和 10%氯化铝溶液添加于样液中，每次添加后都应摇匀并于室温下静置 6 min。然后再添加 4% NaOH 溶液，并用 70%乙醇稀释至 10 mL 后摇匀，静置于室温下 12 min。在 510 nm 波长下对其吸光度进行测定。结果用样品中芦丁含量的毫克当量(mg RE/g)表示。

牡荆素和异牡荆素含量的测定用 HPLC 法[25,26]。利用牡荆素和异牡荆素的标准溶液分别构建标准曲线。将绿豆磨碎后，取两份样品，各加入 50%甲醇并超声处理 15 min。然后以 10000 rpm 的速度离心 10 min，收集上清液。接着，沉淀中再加入甲醇接着超声 15 min，合并上清液后得到样品溶液。通过样品溶液色谱峰面积的测定，计算出绿豆中牡荆素和异牡荆素的含量。

**1.2.5 体外抗氧化活性测定** DPPH 含量的测定参照 Jiaqi L 的研究方法，并适当调整[27]。以水溶性维生素 E (Trolox) 为标准样液，依次配制不同浓度的标准溶液，并将每份标准液定容至 1 mL。随后，向所有定容后的溶液中各加入 1 mL DPPH 溶液，摇匀待室温下避光静置 20 min。517 nm 测吸光度。利用所测吸光度数据通过标准曲线计算出绿豆中 DPPH 含量，最终结果用  $\mu\text{mol L}^{-1}$  trolox g<sup>-1</sup> 表示。

ABTS 的测定参照赵一涵的试验方法[28]。同样选用 Trolox 作为标准品，浓度梯度为 0~80  $\mu\text{g/mL}$ ，用 70%的甲醇定容至 1 mL。然后向定容后的溶液中分别加入 4 mL ABTS 溶液，摇匀待室温下避光静置 6 min。在 734 nm 的波长下测量其吸光度。将吸光度值代入到标准曲线计算 ABTS 值，结果用  $\mu\text{mol L}^{-1}$  trolox g<sup>-1</sup> 表示。

### 1.3 数据分析

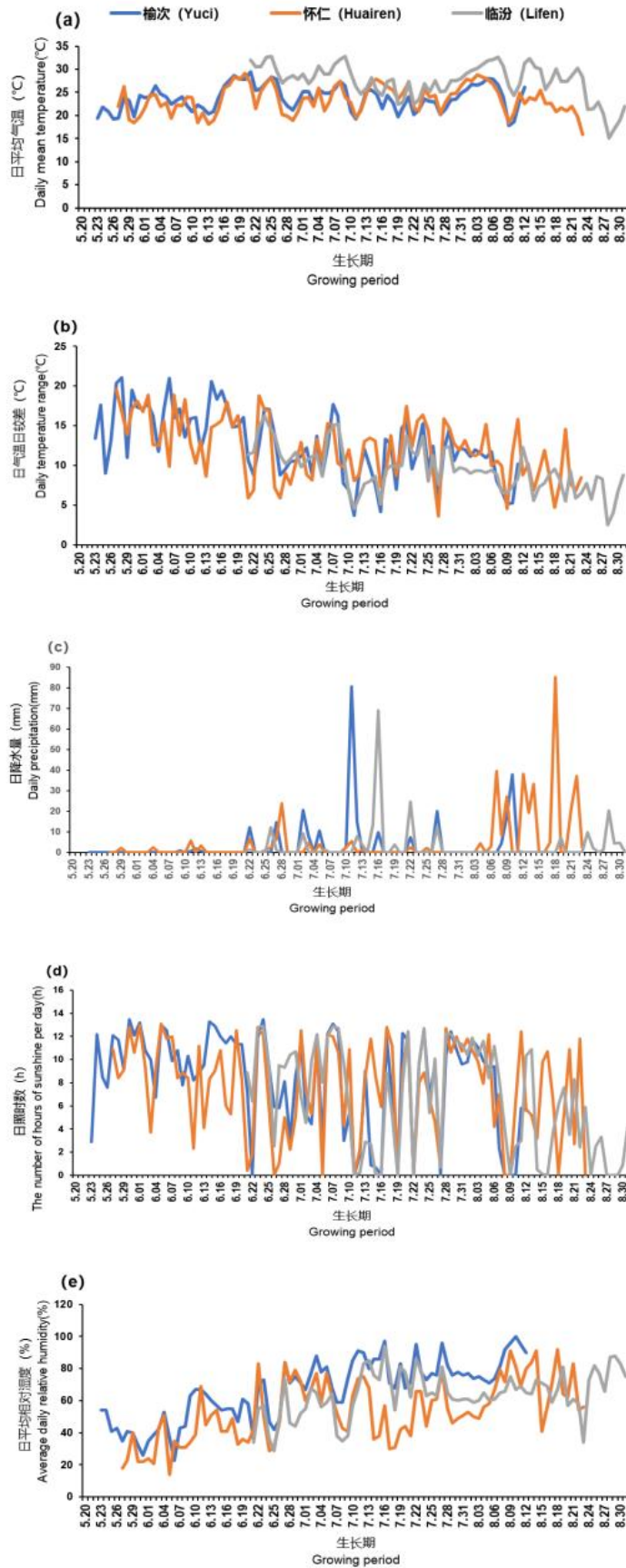
数据使用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行方差分析，采用 Duncan's 模式比较组间差异显著性 ( $P < 0.05$ )，采用 spearman 相关性分析模型，分析气候信息及品质信息相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 山西省三地区气候状况分析

气象数据的调查（图 1）显示，榆次地区（中部春播区）绿豆生长期为 5 月下旬至 8 月中旬，生长期日平均温度最高可达 29.50 °C，平均气温为 23.79 °C；日气温日较差范围在 3.70 °C~21.10 °C 之间，平均值为 12.72°C；日降水量最大为 80.70 mm，平均日降水量为 3.57 mm；日日照时数平均为 8.21 h，日平均相对湿度平均为 66.37%。怀仁地区（北部春播区）绿豆生长期为 5 月下旬至 8 月下旬，生长期日平均气温最高为 29.20 °C，平均气温为 23.50 °C；日气温日较差范围在 3.60 °C~19.60 °C 之间，平均值为 12.13 °C；日降水量最高达 85.20 mm，平均降水量为 5.05 mm；平均日日照时长为 7.56 h，平均日平均相对湿度为 53.48%。临汾地区（西南部夏播区）绿豆生长期为 6 月下旬至 8 月底 9 月初，生长期日平均气温最高达到 32.80 °C，平均为 27.39 °C；日气温日较差范围在 2.50 °C~16.30 °C 之间，平均为 9.50 °C；日降水量最高为 69.1 mm，平均为 3.21mm；平均日照时数为 6.46 h，日平均相对湿度平均值为 64.24%。

通过上述分析发现榆次地区日平均气温和日降水量较低，但日气温日较差、日日照时数和日平均相对湿度相较于其他两地最高；怀仁地区日平均气温和日平均相对湿度最低，但是日降水量最高；临汾地区日平均气温最高，但是日气温日较差、日降水量和日日照时数较于榆次和怀仁最低。



a: 绿豆生长期内三地日平均气温变化; b: 绿豆生长期内三地日气温日较差变化; c: 绿豆生长期内三地日降水量变化; d: 绿豆生长期内三地日照时数变化; e: 绿豆生长期内三地日平均相对湿度变化

a: Daily average temperature changes in three regions during the growth period of mung beans; b: The daily temperature variation in the three regions during the growth period of mung beans; c: Changes in daily precipitation in three regions during the growth period of mung beans; d: Changes in sunshine hours in three areas during the growth period of mung beans; e: Daily average relative humidity changes during the growth period of mung beans

图 1 榆次、怀仁和临汾三地区绿豆生长期内的气候状况

Fig. 1 Climate conditions during the growth period of mung beans in Yuci, Huai ren, and Linfen

## 2.2 山西省三地区不同绿豆资源农艺性状比较

农艺性状分析（表 2）表明，临汾地区绿豆的株高和百粒重均最高，平均值分别是 66.14 cm 和 6.46 g，显著大于榆次和怀仁（ $P<0.05$ ）。临汾地区单株荚数最少，平均值仅有 20.70 个。怀仁地区绿豆单株荚数较于其他两地差异显著（ $P<0.05$ ），平均值为 30.87 个，约为临汾地区的 1.5 倍，并且其最大值可达到 38.10 个。而榆次地区所种植绿豆在农艺性状方面无突出表现。基于上述分析，发现临汾地区种植的绿豆 1318-5-2 在株高和百粒重的表现最为突出，分别为 73.10 cm 和 7.30 g；怀仁地区种植的绿豆 1109-14 在参试材料中单株荚数最为突出。

表 2 山西省三地区绿豆资源农艺性状

Table 2 Agronomic traits of mung bean resources in three regions of Shanxi Province

性状	项目	榆次	怀仁	临汾
Traits	Item	Yuci	Huair en	Linfen
株高 (cm)	范围	40.70~56.50	36.80~48.10	58.00~79.00
	Plant height			
	平均值	47.46 <sup>b</sup>	42.36 <sup>c</sup>	66.14 <sup>a</sup>
	标准偏差	4.90	3.79	6.11
	变异系数 (%)	10.32	8.96	9.23
单株荚数	范围	18.20~29.70	25.30~38.10	15.50~25.30
	Number of pods per plant			
	平均值	24.07 <sup>b</sup>	30.87 <sup>a</sup>	20.70 <sup>b</sup>
	标准偏差	4.56	4.04	2.93
	变异系数 (%)	18.95	13.10	14.13
百粒重 (g)	范围	5.40~7.60	4.70~7.00	5.20~7.40
	Hundred-grain weight			
	平均值	6.42 <sup>a</sup>	5.86 <sup>a</sup>	6.46 <sup>a</sup>
	标准偏差	0.77	0.82	0.76
	变异系数 (%)	12.06	13.94	11.70

数据后不同小写字母表示不同来源绿豆种质资源在 5%水平上差异显著，下同

Different lowercase letters after the data indicate significant differences in mung bean germplasm resources from different sources at the 5% level, the same as below

## 2.3 山西省三地区不同绿豆资源基本营养成分分析

营养成分分析（表 3）结果显示三地区的蛋白质、淀粉和脂肪含量也存在一定的差异。三地种质资源蛋白质含量分析结果表明：临汾地区绿豆蛋白质含量最高且较于其他两地差异显著（ $P<0.05$ ），平均值为 26.80%，最高可达 28.65%，其蛋白质含量相比怀仁地区提高了 16.00%；榆次地区绿豆蛋白质含量在怀仁和

临汾之间，均值为 23.82%；怀仁地区绿豆蛋白质含量最低，平均值为 23.19%，蛋白质含量范围是 21.25%~25.97%。

三地种质资源淀粉含量分析结果表明：榆次地区绿豆淀粉含量较于怀仁 ( $p<0.05$ ) 和临汾地区 ( $p>0.05$ ) 最高，平均值为 47.35%，淀粉含量范围是 43.19%~51.70%；临汾地区淀粉含量在榆次和怀仁之间，均值为 45.86%，范围是 43.16%~47.74%；怀仁地区淀粉含量最低，均值为 43.66%，淀粉含量范围是 39.86%~48.33%。

三地种质资源脂肪含量分析结果表明：榆次地区绿豆脂肪含量明显 ( $p<0.05$ ) 高于怀仁和临汾地区，均值为 2.49%，脂肪含量范围是 1.55%~3.25%；怀仁地区脂肪含量位于榆次和临汾之间，平均值为 1.39%；临汾地区脂肪含量最低，平均值仅为 1.14%，范围在 0.80%~1.54%之间。

综合以上分析结果表明：榆次地区种植的绿豆 1109-14 淀粉和脂肪含量最突出，分别为 50.75%和 3.25%；临汾地区种植的绿豆 1416-4-1-3 蛋白质含量最为丰富，高达 28.65%。

表 3 山西省三个地区不同绿豆营养成分含量

Table 3 Nutrient content of mung bean in three regions of Shanxi Province

营养成分	项目	榆次	怀仁	临汾
Nutrient composition	Item	Yuci	Huairen	Linfen
水分 (%)	范围	6.94±0.02~8.90±0.02	6.41±0.03~7.79±0.03	6.13±0.02~10.28±0.07
	Hydration			
	平均值	7.77 <sup>a</sup>	6.93 <sup>ab</sup>	7.44 <sup>b</sup>
	标准偏差	0.74	0.45	1.16
	变异系数 (%)	9.54	6.42	15.61
蛋白质 (%)	范围	20.94±0.15~25.88±0.21	21.25±0.14~25.97±0.06	24.30±0.03~28.65±0.23
	Protein			
	平均值	23.82 <sup>b</sup>	23.19 <sup>b</sup>	26.80 <sup>a</sup>
	标准偏差	1.55	1.39	1.32
	变异系数 (%)	6.50	6.00	4.91
淀粉 (%)	范围	43.19±0.13~51.70±0.15	39.86±0.94~48.33±0.50	43.16±0.88~47.74±1.72
	Starch			
	平均值	47.35 <sup>a</sup>	43.66 <sup>b</sup>	45.86 <sup>a</sup>
	标准偏差	2.88	2.70	1.27
	变异系数 (%)	6.08	6.18	2.78
脂肪 (%)	范围	1.55±0.29~3.25±0.22	0.91±0.15~1.89±0.18	0.80±0.13~1.54±0.24
	Fat			
	平均值	2.49 <sup>a</sup>	1.39 <sup>b</sup>	1.14 <sup>b</sup>
	标准偏差	0.54	0.32	0.26
	变异系数 (%)	21.73	22.89	22.44

数据后不同小写字母表示不同来源绿豆种质资源在 5%水平上差异显著，下同



Different lowercase letters after the data indicate significant differences in mung bean germplasm resources from different sources at the 5% level, the same as below

## 2.4 山西省三地区不同绿豆资源抗氧化成分及抗氧化能力分析

抗氧化成分及能力的分析结果显示三地绿豆的总多酚、总黄酮、牡荆素、异牡荆素、DPPH 清除能力和 ABTS 清除能力均存在一定差异（表 4）。

三地种质资源总多酚含量分析结果表明：榆次地区绿豆的总多酚含量较于怀仁和临汾地区差异显著（ $p < 0.05$ ），总多酚平均含量为 3.30 mg GAE/g，范围在 2.37 mg GAE/g~3.77 mg GAE/g 之间；临汾地区总多酚含量介于榆次和怀仁之间，平均值为 2.54 mg GAE/g；怀仁地区绿豆总多酚含量最低，平均值为 2.49 mg GAE/g。

三地种质资源总黄酮含量分析结果表明：榆次地区绿豆的总黄酮含量较于另外两地差异显著（ $p < 0.05$ ），总黄酮平均含量为 2.34 mg RE/g，范围在 2.06 mg RE/g~2.58 mg RE/g 之间；怀仁地区总黄酮平均含量为 2.12 mg RE/g，位于榆次和临汾之间；临汾地区总黄酮含量最低，平均值为 1.95 mg RE/g。

三地种质资源牡荆素、异牡荆素含量分析结果表明：临汾地区牡荆素和异牡荆素含量为三地最高，但相比于其他两地差异不显著（ $p > 0.05$ ），平均含量分别为 0.81 mg/g、0.76mg/g，范围分别在 0.47~1.27 mg/g、0.43~1.19 mg/g 之间；榆次地区牡荆素和异牡荆素含量分别为 0.81 mg/g 和 0.74 mg/g，位于怀仁和临汾之间；怀仁地区牡荆素和异牡荆素平均含量最低，分别为 0.68 mg/g 和 0.62 mg/g。

三地种质资源 DPPH 清除能力分析结果表明：榆次地区 DPPH 清除能力较强且相比于其他两地差异显著（ $p < 0.05$ ），平均为 55.55  $\mu\text{mol/g}$ ，但该地区绿豆 DPPH 清除能力变异系数高达 7.99%，说明原数据波动较大；临汾地区 DPPH 清除能力一般，平均值为 52.39  $\mu\text{mol/g}$ ；怀仁地区绿豆 DPPH 清除能力最低，平均值为 50.54  $\mu\text{mol/g}$ 。

三地种质资源 ABTS 清除能力分析结果表明：榆次地区 ABTS 清除能力较强且相比于其他两地差异显著（ $p < 0.05$ ），平均为 28.75  $\mu\text{mol/g}$ ；怀仁地区 ABTS 清除能力为 27.41  $\mu\text{mol/g}$ ，位于榆次和临汾之间；临汾地区 ABTS 清除能力最低，为 27.25  $\mu\text{mol/g}$ 。

综合以上分析结果表明：榆次地区种植的绿豆 1116-18-3 总多酚、总黄酮提取率水平及抗氧化功能最为突出，总多酚含量为 3.77 mg GAE/g，总黄酮提取率含量为 2.58 mg RE/g，DPPH 和 ABTS 功能值依次为 61.32  $\mu\text{mol/g}$  和 29.31  $\mu\text{mol/g}$ ；怀仁地区所种植的绿豆 1540-6-2-1 牡荆素和异牡荆素含量最为丰富，分别为 1.35 mg/g 和 1.21 mg/g，和群体分析结果（临汾地区牡荆素和异牡荆素含量最高）有所不同，但是怀仁地区牡荆素和异牡荆素 CV 值大于临汾地区，说明此怀仁地区牡荆素和异牡荆素含量不稳定。

表 4 山西省三个地区不同绿豆抗氧化成分含量、抗氧化活性

Table 4 Antioxidant content and antioxidant activity of mung beans in three regions of Shanxi Province

抗氧化成分	项目	榆次	怀仁	临汾
Antioxidant component	Item	Yuci	Huairen	Linfen

总多酚 (mg GAE/g)	范围	2.37±0.17~3.77±0.21	2.01±0.18~2.96±0.13	2.12±0.15~2.90±0.25
Total polyphenols	平均值	3.30 <sup>a</sup>	2.49 <sup>b</sup>	2.54 <sup>b</sup>
	标准偏差	0.45	0.27	0.22
	变异系数 (%)	13.73	10.74	8.51
总黄酮 (mg RE/g)	范围	2.06±0.07~2.58±0.01	1.89±0.12~2.57±0.04	1.58±0.18~2.20±0.06
Total flavone	平均值	2.34 <sup>a</sup>	2.12 <sup>b</sup>	1.95 <sup>b</sup>
	标准偏差	0.16	0.24	0.17
	变异系数 (%)	6.61	11.51	8.90
牡荆素 (mg/g)	范围	0.31~1.28	0.50~1.35	0.47~1.27
Vitexin	平均值	0.81 <sup>a</sup>	0.68 <sup>a</sup>	0.81 <sup>a</sup>
	标准偏差	0.27	0.24	0.26
	变异系数 (%)	33.07	34.78	32.05
异牡荆素 (mg/g)	范围	0.29~1.26	0.49~1.21	0.43~1.19
Isovitexin	平均值	0.74 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.76 <sup>a</sup>
	标准偏差	0.26	0.21	0.24
	变异系数 (%)	34.94	33.73	31.98
DPPH 清除能力 (μmol/g)	范围	49.53~61.32	48.34~52.08	50.17~54.82
DPPH Clearing capability	平均值	55.55 <sup>a</sup>	50.54 <sup>b</sup>	52.39 <sup>b</sup>
	标准偏差	4.44	1.29	1.39
	变异系数 (%)	7.99	2.55	2.66
ABTS 清除能力 (μmol/g)	范围	26.93~30.22	26.02~29.42	25.33~28.55
ABTS Clearing capability	平均值	28.75 <sup>a</sup>	27.41 <sup>b</sup>	27.25 <sup>b</sup>
	标准偏差	1.09	1.02	0.84
	变异系数 (%)	3.78	3.73	3.09

数据后不同小写字母表示不同来源绿豆种质资源在 5%水平上差异显著, 下同

Different lowercase letters after the data indicate significant differences in mung bean germplasm resources from different sources at the 5% level, the same as below

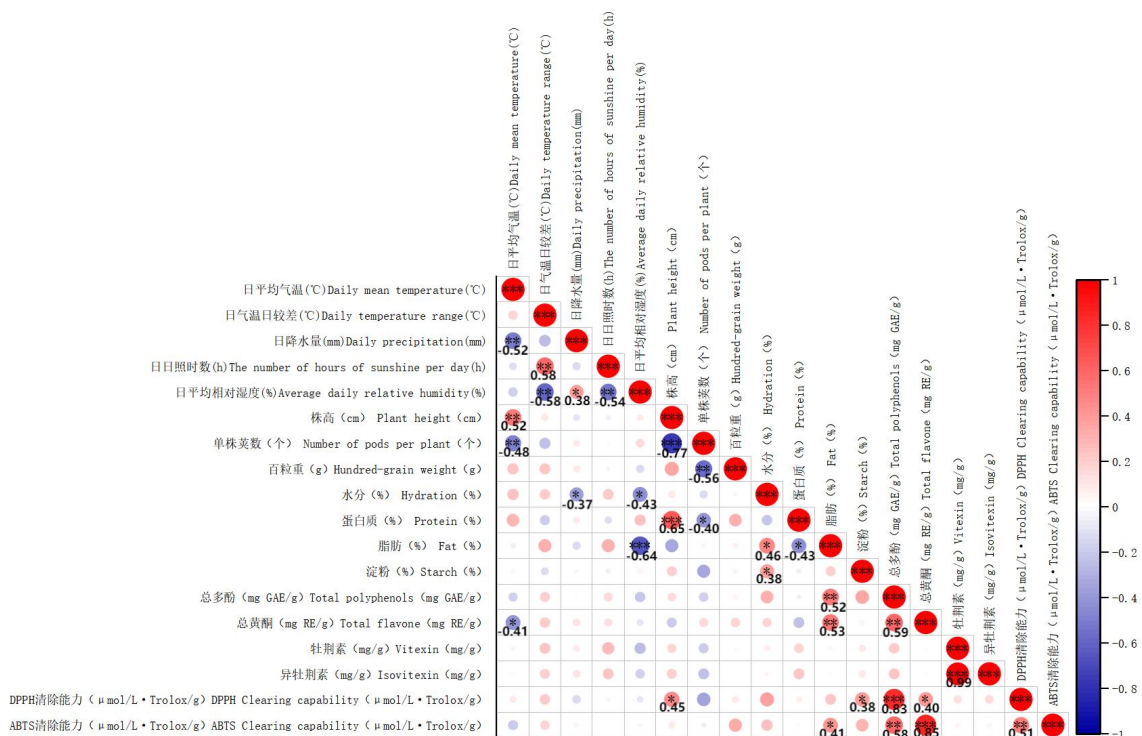
## 2.5 绿豆种质资源农艺性状、营养品质与气候条件相关性分析

采用 spearman 相关性分析模型对 30 份绿豆种质资源的株高、单株荚数和百粒重 3 个农艺性状, 淀粉、蛋白质、脂肪 3 个基本营养成分, 总多酚、总黄酮、DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力 4 个生物活性组分及抗氧化活性物质, 与三个地区的气候条件进行关联分析 (图 2)。结果表明, 种植区域气候环

境显著影响绿豆生长情况和营养品质。

从调查性状的相关性来看，株高与单株荚数呈极显著负相关 ( $R=-0.77, P<0.001$ )，但是与蛋白质含量呈极显著正相关 ( $R=0.65, P<0.001$ )。单株荚数与百粒重 ( $R=-0.56, P<0.01$ ) 和蛋白质 ( $R=-0.40, P<0.05$ ) 均呈负相关。脂肪含量与总多酚 ( $R=0.52, P<0.01$ )、总黄酮 ( $R=0.53, P<0.01$ ) 的含量及 ABTS 清除能力 ( $R=0.41, P<0.05$ ) 均表现显著的正相关，但是与蛋白质呈负相关 ( $R=-0.45, P<0.05$ )。总多酚含量与 DPPH ( $R=0.83, P<0.001$ ) 及 ABTS 清除能力 ( $R=0.58, P<0.01$ ) 均呈现显著的正相关。总黄酮含量与 ABTS 清除能力 ( $R=0.85, P<0.001$ ) 表现出极显著的正相关性，但是与 DPPH 清除能力 ( $R=0.40, P<0.05$ ) 的相关性较弱。

从调查性状与气候因子的相关性来看，脂肪含量与日平均相对湿度呈显著负相关 ( $R=-0.64, P<0.001$ )。总黄酮含量与日平均气温表现出显著负相关 ( $R=-0.41, P<0.05$ )。此外，日平均温度与绿豆株高成显著正相关 ( $R=0.52, P<0.01$ )，但是与单株荚数成显著负相关 ( $R=-0.48, P<0.01$ )。以上结果进一步验证了通过控制栽培地气候对作物农艺性状、营养成分和功效成分有不同程度的影响。



\*、\*\*、\*\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  水平上显著相关

\*, \*\*, \*\*\* respectively indicate significant correlations at the levels of  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$

图2 绿豆农艺性状、营养品质与气候条件相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of agronomic traits, nutritional quality and climatic conditions of mung bean

### 3 讨论

#### 3.1 山西省不同地区绿豆资源农艺性状及营养品质的差异

山西省是我国绿豆的主要产区之一，种植区域广泛，各区域气候变化多样，为绿豆的种植提供了较好

的条件，对绿豆的产量等农艺性状影响较大，特别是蛋白质、脂肪等品质性状，正因为如此，也形成了不同区域的各具鲜明特点的绿豆种质资源，如怀仁绿豆是国家地理标志产品，是当地农业生产的支柱产业。本论文通过对山西中部春播区（榆次）、北部春播区（怀仁）和西南部夏播区（临汾）三个区域种质资源的农艺性状及营养品质进行分析，期望能够为山西省绿豆不同种质资源的品种选育提供理论指导。研究表明，绿豆种质资源的株高、百粒重均呈现出由南向北逐渐降低的趋势，这可能是由于西南部夏播区复播绿豆生长期较高的气温有关。北部春播区绿豆资源尽管单株荚数较多，相反百粒重最低，这可能是由于北部区域在开花期到成熟期光照较低和较高的降水量相关。此外，对绿豆营养品质分析发现，西南部夏播区种植的绿豆蛋白质含量显著高于中部春播区和北部春播区，其蛋白质范围在 20.94%~28.65%之间，与 Anwar F 所测结果一致<sup>[29]</sup>。中部春播区种植的绿豆资源淀粉和脂肪含量较高，且明显高于 Huong M T N 等人所测淀粉含量（36.80%~41.20%），这也说明整体上来看山西省种植的绿豆淀粉含量高，也就是说山西的气候环境种植的绿豆淀粉含量较高，这也是山西绿豆品种的一个特点<sup>[30]</sup>。同时，中部春播区种植的绿豆资源在总多酚、总黄酮含量表现较好，这与 Singh B 和刘仙俊所测结果一致<sup>[31,32]</sup>，并且 DPPH、ABTS 清除能力较于其他两地更强，这可能与较高的日照时长和日气温日较差有关。研究结果也表明，西南部夏播区种植的绿豆资源在牡荆素和异牡荆素含量上表现较好，但是 Nan S 所测得绿豆中牡荆素和异牡荆素含量远低于本实验所测得的结果，这种差异可能是由于绿豆品种的不同造成的<sup>[33,34]</sup>。

### 3.2 山西省不同地区气候对绿豆资源的影响

对绿豆籽粒所含营养成分相关性分析表明，总多酚与脂肪含量成正相关，可能是多酚类存在会抑制脂肪氧化酶的活性，导致脂肪含量较高<sup>[35]</sup>。此外，多酚与抗氧化能力具有显著正相关，这与梁志等人的研究结果一致<sup>[36]</sup>。而总黄酮对抗氧化能力的相关性表现出一定的差异，这与杨悦等人研究结果相似<sup>[37]</sup>。

为了深入研究气候条件对绿豆种质资源农艺性状的影响，本研究在山西北部、中部和南部各设置一个试验点，三个试验点间气候差异明显，在日气温日较差、日日照时数和日平均相对湿度以及日降水量等都差异显著。进一步对三地种质资源的农艺性状与气候因子的相关性分析表明，较高的日平均气温有利于绿豆株高的增加，但会减少单株荚数；低温可促进绿豆中总多酚含量的积累，这可能是因为在低温的情况下，绿豆为抵制外界环境而发生木质化作用，造成黄酮含量增加<sup>[38]</sup>。较高的相对湿度会抑制绿豆中脂肪的产生，这可能表明在湿度较高的环境中，绿豆植株可能会减少脂肪的合成，以避免过多的水分导致的问题。这些研究结果可以指导绿豆育种和生产，为绿豆专用型新品种的选育提供理论依据，也为各种植区域种植品种的选择提供理论指导。

## 4 结论

气候环境的影响对种质资源及其性状的形成起到至关重要的作用，不同的气候环境造就特殊各异的种质资源。在绿豆中也是如此，主要农艺性状及品质性状受到气象因子不同程度的影响，在生产实践中应该

根据各地不同的气候条件选择不同的资源或品种，以保证有利气象因子对绿豆产量和品质形成向着正方向发展，起到一定的促进作用；同时，也避免不利的气候条件对绿豆生产的影响，进而促进山西省绿豆产业的健康发展。通过本研究，建议根据生产及种植户的需求对品种进行选择，比如籽粒中淀粉和脂肪含量要求较高时，可在中部春播区种植 1109-14；要想获得较高蛋白含量，可在西南部夏播区种植 1416-4-1-3；而籽粒中牡荆素和异牡荆素含量高，则在北部春播区种植 1540-6-2-1。

## 参考文献

- [1] 郑卓杰.中国食用豆类学.北京:中国农业出版社,1997:141-166  
Zheng Z J. *Food legumes in China*. Beijing:Chinese Agricultural Press, 1997: 141-166 (in Chinese)
- [2] 王丽侠,程须珍,王素华.绿豆种质资源、育种及遗传研究进展.中国农业科学.2009,42(5):1519-1527  
Wang L X, Cheng X Z, Wang S H. Progress in germplasm resources, breeding and genetics of mung bean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1519-1527
- [3] Hou D, Yousaf L, Xue Y, Hu J R, Wu J H, Hu X S, Feng N H, Shen Q. Mung Bean ( *Vigna radiata* L.): Bioactive Polyphenols, Polysaccharides, Peptides, and Health Benefits. *Nutrients*,2019, 11(6): 1238-1238
- [4] Sumi S N M, Shekappa D B. A review on nutritional composition, antinutritional components and health benefits of green gram (*Vigna radiata* (L.) Wilczek).*Journal of food biochemistry*, 2021, 45(6): e13743-e13743
- [5] Ganesan K, Xu B. A critical review on phytochemical profile and health promoting effects of mung bean ( *Vigna radiata* ). *Food Science and Human Wellness*, 2018, 7(1): 11-33
- [6] Dahiya, KumarP, Nout M J R, van Boekel, Martinus A, Khetarpaul, Neelam, Grewal, Raj Bala, Linnemann, Anita. Nutritional characteristics of mung bean foods.*British Food Journal*, 2014, 116(6): 1031-1046
- [7] Yingying Z, Wenwen S, Nadia E, Zhengxing S, Tianfu H, Guixing R. Revealing the regional distribution of soybean lunasin content in China and the effects of climate factors by sampling extensively. *Journal of the science of food and agriculture*, 2018, 99(6): 2802-2807
- [8] 闫日红,杨振宇,杨光宇,陈建,王昱.地理位置及气候条件对大豆脂肪含量的影响.大豆通报,2006,(06):41-44  
Yan R H, Yang Z Y, Yang G Y, Chen J, Wang Y. Effects of geographical location and climatic conditions on fat content of soybean. *Soybean Bulletin*, 2006, (06): 41-44
- [9] Wenwen S, Ruping Y, Tingting W, Cunxiang W, Shi S, Shouwei Z, Bingjun J, Shiyan T, Xiaobing L, Tianfu H. Analyzing the Effects of Climate Factors on Soybean Protein, Oil Contents, and Composition by Extensive and High-Density Sampling in China..*Journal of agricultural and food chemistry*, 2016, 64(20): 4121-30
- [10] 曹秀清,蒋尚明.干旱胁迫对大豆品质及产量的影响.现代农业科技,2017,(16):3-4+7  
Cao X Q, Jiang S M. Effect of Drought Stress on Yield and Quality of Soybean. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017, (16): 3-4+7
- [11] Oikawa A, Takeuchi K, Morita K, Horibe Y, Sasaki R, Murayama H. Effects of Climate Conditions before Harvest Date on Edamame Metabolome. *Plants*, 2023, 13(1): 87.<https://doi.org/10.3390/plants13010087>
- [12] Mahajan G, Wenham K, Chauhan S B. Mungbean ( *Vigna radiata* ) Growth and Yield Response in Relation to Water Stress and Elevated Day/Night Temperature Conditions. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2546
- [13] 井大炜,张红,李士平,王明友.干旱胁迫对豇豆品质与抗氧化酶活性的影响.长江蔬菜,2017,(04):71-74  
Jing D W, Zhang H, Li S P, Wang M Y. Effects of Drought Stress on Quality and Antioxidant Enzyme Activities of Cowpea. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2017, (04): 71-74
- [14] 相微微,王建武.榆林不同地区大明绿豆物理和营养成分比较研究.山西农业科学,2016,44(06):733-736+761  
Xiang W W, Wang J W. Comparative study on physical and nutritional components of mung bean in different areas of Yulin. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(06): 733-736+761
- [15] 王彩萍.山西省绿豆育种研究与生产现状分析.山西农业大学学报:自然科学版,2016,36(12):908-912  
Wang C P. Analysis of breeding research and production status of mung bean in Shanxi Province. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2016, 36(12): 908-912
- [16] 朱慧珺.山西省绿豆种质资源表型性状遗传多样性分析.山西农业大学,2015  
Zhu H J. Analysis of phenotypic traits genetic diversity of mung bean germplasm resources in Shanxi Province. *Shanxi Agricultural University*, 2015
- [17] 孙晓慧,刘国庆,唐莉.山西省不同地貌类型的极端降水时空分布变化特征.水利水电技术(中英文),1-22,2024-10-11  
Sun X H, LIU G Q, Tang L. Temporal and spatial distribution of extreme precipitation in different geomorphic types in Shanxi Province. *Water Resources and Hydropower Technology (English and Chinese)*, 1-22, 2024-10-11

- [18] 程须珍,王素华,王丽侠. 绿豆种质资源描述规范和数据标准.北京:中国农业出版社,2006  
Cheng X Z, Wang S H, Wang L X. *Descriptors and data standard for Mung bean*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2006 (in Chinese)
- [19] 蔡晓宁.不同储藏条件对绿豆品质稳定性的影响研究.河南工业大学,2016  
Cai X N. Study on effect of different storage conditions on quality stability of Mung bean. Henan University of Technology, 2016
- [20] 颜常盛.凯氏定氮法测定豆类粗蛋白含量的消解条件探究.世界核地质科学,2020,37(02):131-135  
Yan C S. Study on digestion conditions for determination of crude protein content in legumes by Kjeldahl nitrogen determination. World Nuclear Geology, 2020, 37(02): 131-135
- [21] 曹菲.绿豆热处理对绿豆挂面品质及储藏稳定性影响研究.河南工业大学,2023  
Cao F. Study on effect of heat treatment of mung bean on quality and storage stability of mung bean noodles. Henan University of Technology, 2023
- [22] 古争艳.进口大豆不同水分检测方法应用研究与分析.现代食品,2022,28(12):156-161  
Gu Z Y. Application research and analysis of different moisture detection methods for imported soybean. Modern Food, 2022, 28(12): 156-161
- [23] Xu B J, Chang S K C. Characterization of phenolic substances and antioxidant properties of food soybeans grown in the north Dakota Minnesota region. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2008, 56(19): 9102-9113
- [24] Lee H J, Jeon K J, Kim G S, Kim H S, Chun T, Imm Y J. Comparative analyses of total phenols, flavonoids, saponins and antioxidant activity in yellow soy beans and mung beans. *International Journal of Food Science and Technology*, 2011, 46(12): 2513-2519
- [25] 王雪,肖萍,王步江,王娜,黄宗海,刘金福.HPLC法测定低温烘焙绿豆中牡荆苷与异牡荆苷的含量及变化.食品研究与开发,2019,40(10):152-157  
Wang X, Xiao P, Wang B J, Wang N, Huang Z H, Liu J F. Determination of vitexin and isovitexin in low-temperature roasted mung bean by HPLC. *Food Research and Development*, 2019, 40(10): 152-157
- [26] 杨君,王涛,黄建,王金辉.HPLC法测定绿豆中牡荆素的含量.实用药物与临床,2019,22(11):1175-1177  
Yang J, Wang T, Huang J, Wang J H. Determination of vitexin in mung bean by HPLC. *Journal of Practical Medicine and Clinic*, 2019, 22(11): 1175-1177
- [27] Jiaqi L, Jiayu C, Gengsheng X, Ling C, Xiaobo G. Impact of kernel development on phenolic profiles and antioxidant activity in *Castanea henryi*. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(9): 5801-5810
- [28] 赵一涵.高牡荆素绿豆种质资源筛选及其在籽粒发育过程中代谢调控规律研究.华南理工大学,2023  
Zhao Y H. Study on Germplasm resource screening and metabolic regulation of high vitexin in mung bean during grain development. South China University of Technology, 2023
- [29] Anwar F, Latif S, Przybylski R, Sultana B. & Ashraf M. Chemical composition and antioxidant activity of seeds of different cultivars of mung bean. *Journal of Food Science*, 2007, 72, 503-510
- [30] Huong M T N, Hoa N P, Hung V P. Varying amylose contents affect the structural and physicochemical characteristics of starch in mung bean. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD PROPERTIES*, 2021, 24(1): 737-748
- [31] Singh B, Singh N, Thakur S, Kaur A. Ultrasound assisted extraction of polyphenols and their distribution in whole mung bean, hull and cotyledon. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(4): 921-932
- [32] 刘仙俊,张慧珍,王潇潇,李合,李波.5种豆类中总多酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较研究.食品研究与开发,2020,41(07):52-57  
Liu X J, ZHANG H Z, Wang X X, Li H, Li B. Comparative study on the contents of total polyphenols and total flavonoids and antioxidant activities in five legumes. *Food Research and Development*, 2020, 41(07): 52-57
- [33] 闫冲,刘红霞.UPLC法测定绿豆中牡荆苷与异牡荆苷含量.广州化工,2012,40(10):114-115  
Yan C, Liu H X. Determination of vitexin and isovitexin in mung bean by UPLC. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(10): 114-115
- [34] Nan S, Jiayan X, Jianhua X, Yi C, Xiaobo H, Qiang Y. Purification, composition and activity of bound polyphenols from mung bean coat dietary fiber. *Food Research International*, 2022, 162(PA): 111997-111997
- [35] 赵晓园.大豆脂肪氧化酶活性影响因素研究及其应用.合肥工业大学,2007  
Zhao X Y. Study on influencing factors of soybean fat oxidase activity and its application. Hefei University of Technology, 2007
- [36] 梁志,胡鑫鑫.废弃龙眼核壳多酚、黄酮含量与抗氧化性的相关性研究.山东化工,2022,51(24):132-134  
Liang Z, Hu X X. Study on the correlation between the contents of polyphenols, flavonoids and antioxidant activity of waste longan core and shell. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(24): 132-134
- [37] 杨悦,刘鸣畅,杨艳歌,吴亚君,王弘.不同品种蜂花粉总黄酮含量与自由基清除能力的相关性分析.沈阳农业大学学报,2018,49(06):671-677  
Yang Y, Liu M C, Yang Y G, Wu Y J, Wang H. Correlation analysis of total flavonoid content in bee pollen of different varieties with free radical scavenging ability. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(06): 671-677
- [38] 杨志晓,王轶,任学良,刘红峰,韩慧杰,赵杰宏.烟草多酚类化合物合成与积累影响因素研究进展.河南农业科学,2012,41(10):1-5  
Yang Z X, Wang Y, Ren X L, Liu H F, Han H J, Zhao J H. Research progress on influencing factors of synthesis and accumulation of polyphenols in tobacco. *Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(10): 1-5