

吴谷丰, 张晓燕, 黄璐, 等. 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜营养品质与抗氧化活性分析[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 186-198.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.020

不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜营养品质与抗氧化活性分析

吴谷丰^{1,2}, 张晓燕², 黄璐², 戴冬青², 袁星星², 薛晨晨^{1,2}, 陈新^{1,2}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院经济作物研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 本研究以 20 份不同种皮颜色的大豆种质资源为材料, 系统分析其籽粒和芽菜的营养成分、功能性成分含量与抗氧化活性。结果表明, 随着萌发时间的延长, 大豆芽菜的总糖和可溶性糖含量下降, 总酚、类黄酮含量上升, γ -氨基丁酸含量呈先上升后下降的变化趋势。绿色种皮和黄色种皮大豆籽粒中总糖和可溶性糖含量较高。培养 7 d 的黑色种皮大豆芽菜总酚含量最高, 培养 7 d 的褐色种皮大豆芽菜类黄酮含量最高, 培养 3 d 的黑色种皮大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量最高。相关性分析结果表明, 总酚含量和类黄酮含量均与 1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 清除率、2, 2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐 (ABTS) 清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。综上, 绿色和黄色种皮大豆籽粒适宜作为糖类膳食来源, 培养 3 d 的黑色种皮大豆芽菜可作为 γ -氨基丁酸膳食来源, 培养 7 d 的黑皮大豆芽菜的总体抗氧化活性最高, 具有开发为功能性食品的潜力。

关键词: 大豆; 芽菜; 种皮颜色; 功能性成分; 抗氧化活性

中图分类号: S529 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0186-13

Analysis of nutritional quality and antioxidant activity in soybean seeds and sprouts with different seed coat colors

WU Gufeng^{1,2}, ZHANG Xiaoyan², HUANG Lu², DAI Dongqing², YUAN Xingxing², XUE Chenchen^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study used 20 soybean germplasm resources with different seed coat colors as materials to systematically analyze the contents of nutritional components, functional components, and antioxidant activity in their seeds and sprouts. The results showed that with the extension of germination time, the contents of total sugar and soluble sugar in soybean sprouts decreased, the contents of total phenols and flavonoids increased, and the content of γ -aminobutyric acid (GABA) showed a trend of first increasing and then decreasing. The seeds of soybeans with green and yellow seed coats exhibited higher contents of total sugar and soluble sugar. Among the soybean sprouts, the black-seeded soybean sprouts cultured for seven days had the highest total phenol content, the brown-seeded soybean sprouts cultured for seven days had the highest flavonoid content, and the black-seeded soybean sprouts cultured for three days had the highest GABA content. The results of correlation analysis indicated that both total phenol content and flavonoid content showed an extremely significant positive correlation with the scavenging rates of 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH)

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 江苏省种业振兴揭榜挂帅项目 (JBGS-2021-014); 生物育种钟山实验室项目 (ZSBBL)

作者简介: 吴谷丰 (1999-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为大豆芽菜营养品质与应用。(E-mail) wgf991103@163.com

通讯作者: 薛晨晨, (E-mail) xuecc@jaas.ac.cn; 陈新, (E-mail) cx@jaas.ac.cn

cultured for seven days had the highest total phenol content, the brown-seeded soybean sprouts cultured for seven days had the highest flavonoid content, and the black-seeded soybean sprouts cultured for three days had the highest GABA content. The results of correlation analysis indicated that both total phenol content and flavonoid content showed an extremely significant positive correlation with the scavenging rates of 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH)

and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) ($P < 0.01$). In conclusion, the seeds of soybeans with green and yellow seed coats are suitable as dietary sources of carbohydrates; the black-seeded soybean sprouts cultured for three days can be used as a dietary source of GABA; and the black-seeded soybean sprouts cultured for seven days have the highest overall antioxidant activity, exhibiting potential for development into functional foods.

Key words: soybeans; sprouts; seed coat color; functional components; antioxidant activity

大豆 (*Glycine max* L.) 是世界上重要的豆类经济作物,是植物性蛋白质和脂肪的主要来源^[1-4]。大豆富含糖类、酚类物质和 γ -氨基丁酸等生物活性成分,这些成分具有较高的抗氧化活性,能够帮助植物体清除自由基,减少氧化应激损伤^[5-6]。大豆芽菜作为大豆种子萌发出的幼苗,在其萌发过程中经历了一系列复杂的生理生化变化,导致大豆种子和芽菜的化学成分存在差异^[7]。此外,大豆种皮颜色与类黄酮和花青素等物质的含量密切相关,因此不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的化学成分也存在差异^[8-10]。中国大豆种质资源丰富,大豆种皮颜色多样,包括黄色、绿色、黑色、褐色和双色等^[11]。然而,目前关于不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜营养品质与抗氧化特性的研究较少。

本研究拟以褐色、黄色、黑色和绿色种皮大豆种质资源为试验材料,系统比较其籽粒和芽菜的总糖、可溶性糖、酚类物质、 γ -氨基丁酸等营养成分含量,并综合评价其抗氧化特性,以期为大豆的加工和芽菜产品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验于 2024 年 3 月在江苏省农业科学院经济作物研究所进行。供试大豆种质资源信息如表 1 所示。

所用试剂包括无水乙醇、碳酸钠均为南京寿德生物科技有限公司产品;福林酚、没食子酸标准品、GABA 标准品、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基清除能力检测试剂盒、[2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐] (ABTS) 自由基清除能力试剂盒均为北京索莱宝科技有限公司产品;氯化铝为北京盛科瑞达科技有限公司产品;亚硝酸钠、芦丁标准品均为国药集团化学试剂有限公司产品;氢氧化钠、硼酸、次氯酸钠均为南京荣胜达实验仪器有限公司产品;浓硫酸为福晨(天津)化学试剂有限公司产品;总花青素含量检测试剂盒为北京浦若昇技术有限公司产品;总糖含量检测试剂盒、植物可溶性糖含量检测试剂盒均为北京盒子生工科技有限公司产品。

1.2 仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱(上海新苗医疗器械制造有限公司产品);数字式水浴锅[科尔帕默仪器(上海)有限公司产品];微量高速离心机(上海玮驰仪器有限公司产品);台式高速冷冻微量离心机[天美仪拓实验室设备(上海)有限公司产品];普通多歧管型冻干机冻干机、超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司产品);植物组织研磨仪(南京百思禾生物科技有限公司产品);多功能酶标仪[帝肯(上海)实验器材有限公司]。

表 1 供试大豆种质资源信息

Table 1 Information on soybean germplasm resources used in the study

序号	大豆编号	品种名称	百粒重(g)	种皮颜色	序号	大豆编号	品种名称	百粒重(g)	种皮颜色
1	S014	泰兴乌豆	11.19	褐色	11	S019	涟水小白花	12.31	黑色
2	S072	铜山柳辛天鹅蛋	14.07	褐色	12	S044	丰县大西河糙乙	16.17	黑色
3	S428	沙洲牛蹄扁	30.12	褐色	13	S064	铜山小平顶黄	10.88	黑色
4	S515	ZDD 1895	29.26	褐色	14	S092	邳县狼子尾	13.37	黑色
5	S526	ZDD 19942	15.15	褐色	15	S519	ZDD 4428	18.67	黑色
6	S394	高淳黄豆	23.07	黄色	16	S128	射阳豌豆黄甲	12.86	绿色
7	S409	句容竹镇豆	31.24	黄色	17	S137	东台八月拔甲	13.01	绿色
8	S416	江都九月桔	29.18	黄色	18	S138	东台七月青	15.16	绿色
9	S420	73(1,3)	18.65	黄色	19	S158	海门白油果子	14.97	绿色
10	S494	西豆 3 号	19.16	黄色	20	S170	启东小安黄甲 2	16.72	绿色

1.3 试验方法

1.3.1 试验材料处理 选取籽粒饱满的大豆种子,于 60 ℃ 烘箱中烘干 8 h,用研磨仪研磨成粉末,于 4 ℃ 条件下密封干燥保存(T1 处理)。另取大豆籽粒,将种皮取下,用研磨仪研磨成粉末,于 4 ℃ 条件下密封干燥保存,用于测定种皮花青素、总酚和类黄酮含量。

挑选大小均匀、饱满且无破损的大豆种子,用 0.1% 次氯酸钠溶液浸泡 10 min,用去离子水冲洗 3~5 遍,在去离子水中浸泡 12 h。随后将大豆种子播种于盛有 1 200 mL 去离子水的育苗盒中,在室内 25 ℃ 条件下,黑暗环境中进行培养。育苗盒每天更换 1 次去离子水。分别取浸水 12 h 的大豆种子(T2 处理)、育苗盒中培养 1 d(T3 处理)、育苗盒中培养 3 d(T4 处理)、育苗盒中培养 5 d(T5 处理)、育苗盒中培养 7 d(T6 处理)的大豆芽菜,擦干表面水分,冷冻后研磨成粉末,置于 4 ℃ 下密封干燥保存。

1.3.2 总糖含量的测定 称取 0.1 g 待测样品冻干粉,加入 1 mL 提取液 A 和 1.5 mL 蒸馏水,充分匀浆后沸水浴处理 30 min(密封防止水分蒸发),冷却至室温。加入 1 mL 提取液 B 充分混匀,用蒸馏水定容至 10 mL,充分匀浆后吸取 1 mL 溶液至离心管中,8 000 g 离心 10 min,取上清液。使用酶标仪在 540 nm 波长处读取测定管、标准管和空白管的吸光度,每个样品设 3 个重复。将葡萄糖标准品溶液用蒸馏水进行梯度稀释,以测得的吸光度和对应的已知浓度绘制标准曲线,根据标准曲线计算样品中总糖含量,计算公式如下:

$$\text{总糖含量}(\text{mg/g}) = (\rho \times V \times D) / W \quad (1)$$

式中, ρ 为样品总糖质量浓度,单位 mg/mL; V 为样品体积,取 10 mL; D 为稀释倍数; W 为样品重量,取 0.1 g。

1.3.3 可溶性糖含量的测定 利用蒽酮比色法^[12-13]测定可溶性糖含量。称取 0.1 g 待测样品,加入 1 mL 蒸馏水,研磨至匀浆,95 ℃ 水浴加热处理 10 min(密封防止水分散失),冷却至室温,8 000 g 离心 10 min,取上清液。使用酶标仪在 620 nm 波长处读取测定管、标准管和空白管的吸光度,每个样品设 3 个重复。将葡萄糖标准品溶液用蒸馏水进行梯度稀释,以测得的吸光度和对应的已知浓度绘制标准曲线,根据标准曲线计算样品中可溶性糖含量,计算公式如下:

$$\text{可溶性糖含量}(\text{mg/g}) = (\rho \times V \times D) / W \quad (2)$$

式中, ρ 为样品可溶性糖质量浓度,单位 mg/mL;

V 为样品体积,取 1 mL; D 为稀释倍数; W 为样品重量,取 0.1 g。

1.3.4 总酚含量的测定 利用福林酚法^[14]测定总酚含量。称取 0.1 g 待测样品,加入 1 mL 75% 的乙醇溶液充分混匀,30 ℃ 条件下超声提取 30 min,12 000 r/min 离心 15 min,取上清液。将上清液稀释 2 倍,取 20 μ L 加入 96 孔酶标板中,加入 100 μ L 稀释 4 倍后的福林酚试剂,混匀后加入 75 μ L 10% 碳酸钠溶液,混匀后于室温黑暗环境中静置反应 2 h,使用酶标仪在 750 nm 波长处读取测定管的吸光度,每个样品设 3 个重复。将没食子酸标准品溶液用蒸馏水进行梯度稀释,以测得的吸光度和对应的已知浓度绘制标准曲线。总酚含量以干重计。

1.3.5 类黄酮含量的测定 利用氯化铝法^[14]测定类黄酮含量。类黄酮提取方法与总酚的提取方法相同。将上清液稀释 2 倍,取 150 μ L 加入 2 mL 离心管中,加入 30 μ L 5% 亚硝酸钠溶液,充分混匀后室温下静置 5 min,加入 30 μ L 10% AlCl_3 溶液,充分混匀后室温下静置 5 min,加入 80 μ L 1 mol/L NaOH 溶液充分混匀。使用酶标仪在 510 nm 波长处读取测定管的吸光度,每个样品设 3 个重复。将芦丁标准品溶液用蒸馏水进行梯度稀释,以测得的吸光度和对应的已知浓度绘制标准曲线。类黄酮含量以干重计。

1.3.6 γ -氨基丁酸含量的测定 参考 Sharma 等^[15]的方法测定 γ -氨基丁酸含量。 γ -氨基丁酸提取方法与总酚提取方法相同。取 0.1 mL 上清液,加入 0.2 mL 0.2 mol/L 硼酸缓冲液(pH=9.0)、1.0 mL 6% 酚试剂、0.4 mL 7.5% 次氯酸钠溶液,沸水浴反应 10 min,冰浴冷却,使用酶标仪在 630 nm 波长处读取测定管的吸光度,每个样品设 3 个重复。将 γ -氨基丁酸标准品溶液用蒸馏水进行梯度稀释,以测得的吸光度和对应的已知浓度绘制标准曲线。 γ -氨基丁酸含量以干重计。

1.3.7 抗氧化能力的测定 利用 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除法测定样品的抗氧化能力。称取 0.1 g 待测样品,加入 1 mL 75% 的乙醇溶液充分混匀,在 30 ℃ 条件下超声提取 30 min,12 000 r/min 离心 15 min,取上清液。按照检测试剂盒说明书配制测定管、对照管、阳性对照管(以维生素 C 作为阳性对照)和空白管中的溶液。各管中的溶液充分混匀后,与室温条件下避光静置(DPPH 静置 30 min,ABTS 静置 6 min)。使用酶标仪分别在

515 nm波长处读取 DPPH 反应体系测定管的吸光度、在 405 nm 波长下 ABTS 反应体系测定管的吸光度,每个样品设 3 个重复。按照公式(3)、公式(4)分别计算 DPPH 和 ABTS 的清除率,按照公式(5)、公式(6)计算阳性对照维生素 C 清除率。按照公式(9)计算抗氧化活性综合指数(APC)。

$$D_{\text{DPPH-样品}} = [A_{\text{空白}} - (A_{\text{DPPH-样品}} - A_{\text{对照}})] / A_{\text{空白}} \times 100\% \quad (3)$$

$$D_{\text{ABTS-样品}} = [A_{\text{空白}} - (A_{\text{ABTS-样品}} - A_{\text{对照}})] / A_{\text{空白}} \times 100\% \quad (4)$$

$$D_{\text{DPPH-维生素C}} = [(A_{\text{空白}} - A_{\text{DPPH-维生素C}}) / A_{\text{空白}}] \times 100\% \quad (5)$$

$$D_{\text{ABTS-维生素C}} = [(A_{\text{空白}} - A_{\text{ABTS-维生素C}}) / A_{\text{空白}}] \times 100\% \quad (6)$$

$$APC_{\text{DPPH-样品}} = (D_{\text{DPPH-样品}} / D_{\text{DPPH-样品max}}) \times 100\% \quad (7)$$

$$APC_{\text{ABTS-样品}} = (D_{\text{ABTS-样品}} / D_{\text{ABTS-样品max}}) \times 100\% \quad (8)$$

$$APC = (APC_{\text{DPPH-样品}} + APC_{\text{ABTS-样品}}) / 2 \quad (9)$$

$A_{\text{空白}}$:空白管的吸光度; $A_{\text{对照}}$:对照管的吸光度; $A_{\text{DPPH-样品}}$:样品在 515 nm 波长处读取 DPPH 反应体系测定管的吸光度; $A_{\text{ABTS-样品}}$:样品在 405 nm 波长处读取 ABTS 反应体系测定管的吸光度; $A_{\text{DPPH-维生素C}}$:维生素 C 在 515 nm 波长处读取 DPPH 反应体系阳性对照管的吸光度; $A_{\text{ABTS-维生素C}}$:维生素 C 在 405 nm 波长处读取 ABTS 反应体系阳性对照管的吸光度; $D_{\text{DPPH-样品}}$:样品的 DPPH 清除率; $D_{\text{DPPH-样品max}}$:所有样品中最高的 DPPH 清除率; $D_{\text{ABTS-样品}}$:样品的 ABTS 清除率; $D_{\text{ABTS-样品max}}$:所有样品中最高的 ABTS 清除率。

1.3.8 花青素含量测定 利用 pH 示差法^[16]测定花青素含量。称取 0.05 g 大豆种皮,加入 1 mL 提取液,

75 °C 振荡 25 min,12 000 r/min 离心 10 min,取上清液。按照试剂盒说明书配制测定管和对照管中的溶液,使用酶标仪分别在 530 nm 和 700 nm 波长处读取测定管吸光度,每个样品设 3 个重复。测定管吸光度 $A_{\text{测定}} = A_{530} - A_{700}$,对照管吸光度 $A_{\text{对照}} = A_{530} - A_{700}$, $\Delta A = A_{\text{测定}} - A_{\text{对照}}$ 。大豆种皮花青素含量计算公式如下:

$$\text{花青素含量 (mg/g)} = (\Delta A \div \varepsilon \times V_2 \times 10^3 \times Mr) \div (W \times V_1 \div V) \times D \quad (10)$$

式中, ε 为矢车菊-3-葡萄糖苷消光系数,取 26 900 L/(mol · cm); Mr 为矢车菊素-3-葡萄糖苷分子量,取 449.2; D 为稀释倍数; V 为提取液体积,取 1 mL; W 为样品重量,取 0.05 g; V_1 为待测样品体积,取 200 μL ; V_2 为总体积,取 800 μL 。

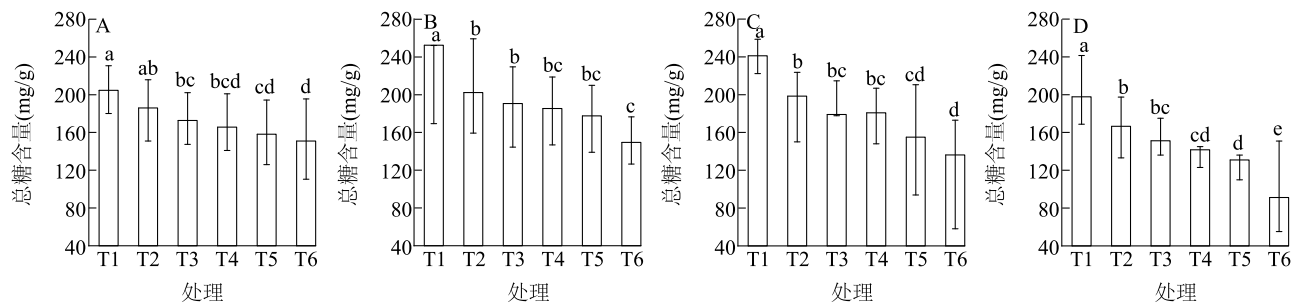
1.4 数据分析

利用软件 Excel 2016 进行数据整理,利用软件 SPSS 26.0 进行统计分析,利用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验,利用软件 Origin 2021 进行绘图。PCA 和 K-means 聚类分析使用联川生物云平台完成。

2 结果与分析

2.1 不同种皮颜色大豆籽粒及芽菜的总糖和可溶性糖含量分析

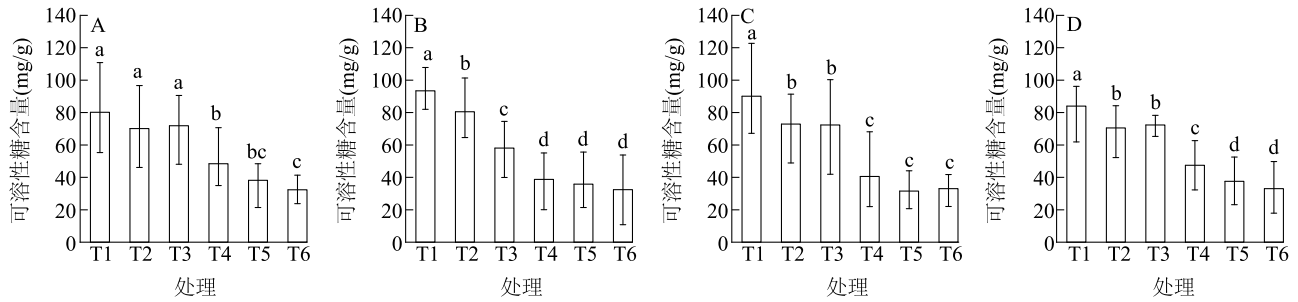
如图 1 和图 2 所示,绿皮大豆籽粒的总糖和可溶性糖含量高于黑皮大豆籽粒、褐皮大豆籽粒、黄皮大豆籽粒,黑皮大豆籽粒总糖含量最低,褐皮大豆籽粒可溶性糖含量最低。随着萌发时间的延长,4 种种皮颜色大豆芽菜的总糖含量和可溶性糖含量均呈降低的趋势。



A:褐色种皮大豆;B:绿色种皮大豆;C:黄色种皮大豆;D:黑色种皮大豆。T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的总糖含量

Fig.1 Total sugar content in seeds and sprouts of soybeans with different seed coat colors



A:褐色种皮大豆;B:绿色种皮大豆;C:黄色种皮大豆;D:黑色种皮大豆。T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的可溶性糖含量

Fig.2 Soluble sugar content in seeds and sprouts of soybeans with different seed coat colors

如表 2 和表 3 所示,绿皮大豆 S158 籽粒的总糖含量最高,黑皮大豆 S092 籽粒的总糖含量最低,黄皮

大豆 S394 籽粒的可溶性糖含量最高,褐皮大豆 S072 籽粒的可溶性糖含量最低。

表 2 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的总糖含量

Table 2 Total sugar content in seeds and sprouts of different soybean germplasm resources

大豆编号	总糖含量(mg/g)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S014	199.46±4.13a	162.56±9.48b	150.95±2.92c	144.29±2.63c	127.14±0.97d	122.38±4.37d
S072	201.55±6.32a	180.71±0.97b	163.75±0.73c	144.11±2.19d	140.24±2.92d	113.45±2.43e
S428	215.24±4.86a	203.04±5.59b	183.69±5.35c	180.42±5.10cd	172.38±1.46d	172.68±0.73d
S515	181.31±0.97a	170.3±6.08ab	163.75±0.24bc	160.18±13.37bc	149.29±8.81bc	157.50±2.43c
S526	225.65±4.13a	213.45±1.94b	201.25±0.73c	199.17±1.46c	191.43±2.43d	189.05±5.35d
S394	248.27±2.19a	194.11±4.13b	184.88±5.83b	171.79±4.37c	164.05±4.37cd	156.31±7.29d
S409	233.69±9.23a	219.11±1.22b	209.88±3.89bc	203.93±2.43c	201.25±7.53c	172.08±0.73d
S416	247.38±9.23a	213.15±0.73b	193.81±6.32c	183.81±1.85cd	173.21±2.43de	163.21±3.60e
S420	183.69±5.83a	150.06±3.65b	115.54±0.73c	106.69±2.51d	98.57±3.89e	56.90±0.97f
S494	242.62±5.35a	216.13±6.08b	191.01±5.01c	161.07±10.69d	138.15±3.65e	132.50±7.29e
S019	195.30±1.70a	167.62±0.97b	145.65±2.19c	132.44±2.75d	112.56±2.19e	57.80±2.19f
S044	185.77±1.70a	149.17±1.94b	138.75±2.19c	136.67±0.97c	123.57±3.40d	85.18±2.19e
S064	203.33±3.40a	189.64±6.32b	175.06±2.67c	170.3±3.65cd	165.83±0.97d	146.79±3.40e
S092	170.00±0.97a	147.98±12.15b	144.11±1.22bc	139.05±4.86bc	132.50±2.92c	58.69±1.46d
S519	234.58±5.59a	178.04±4.62b	152.44±2.67c	129.64±5.76d	120.00±0.97d	107.80±2.19e
S128	245.60±2.92a	170.89±1.70b	167.92±2.67b	161.37±0.73c	158.99±0.73cd	156.61±0.73d
S137	216.13±5.10a	200.65±2.67b	197.38±1.26bc	192.32±1.34c	183.39±2.19d	152.44±4.62e
S138	173.57±3.40a	160.18±0.73b	149.90±5.55c	149.17±1.94c	142.02±2.43d	131.31±2.92e
S158	383.99±5.59a	252.44±5.59b	217.62±9.23c	206.61±4.13c	204.23±4.62c	175.36±0.97d
S170	243.21±7.29a	227.14±3.40b	220.89±7.05b	217.62±0.97b	199.17±0.97c	131.61±4.13d

T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 3 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的可溶性糖含量

Table 3 Soluble sugar content in seeds and sprouts of different soybean germplasm resources

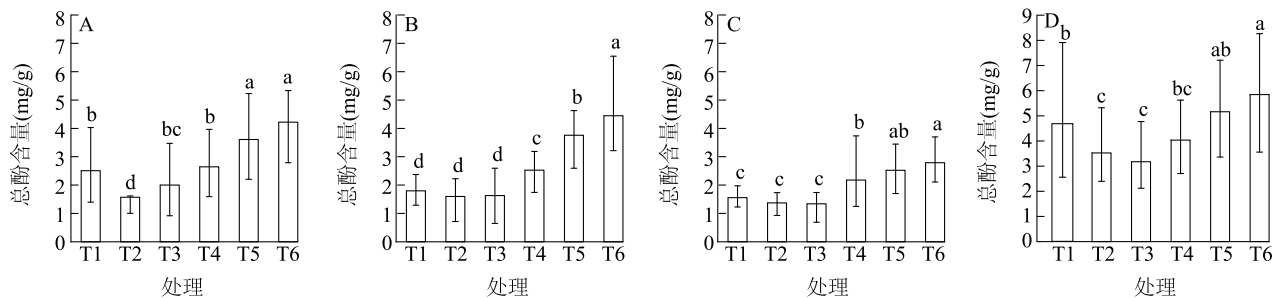
大豆编号	可溶性糖含量(mg/g)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S014	66.86±2.67b	48.43±1.67c	79.84±4.47a	51.16±1.56c	37.81±2.44d	26.79±1.65e
S072	56.83±1.80a	59.82±2.59a	51.42±2.63b	41.78±1.28cd	42.67±1.60c	37.86±1.41d
S428	113.44±3.67a	94.23±2.81b	88.01±2.55c	40.53±2.59d	40.71±1.22d	25.73±1.65e
S515	82.71±2.71a	71.60±2.22b	56.03±2.75c	36.18±1.40d	23.33±1.72e	36.80±3.40d
S526	80.91±2.49ab	76.58±2.71bc	84.09±2.51a	72.33±2.40c	46.57±1.87d	34.36±3.09e
S394	113.45±7.24a	72.75±4.82c	97.67±3.27b	54.39±5.90d	22.77±1.92e	36.43±1.16f
S409	71.40±3.18a	53.16±3.79b	45.80±3.49c	23.34±0.95e	33.57±1.61d	29.51±3.80de
S416	84.02±2.42a	77.85±2.23b	70.66±2.75c	37.41±1.13d	39.8±3.21d	34.75±1.55d
S420	95.15±2.71a	87.26±2.92b	82.19±2.37b	64.84±2.96c	36.95±2.21d	39.87±1.33d
S494	86.59±2.44a	73.25±2.25b	65.35±4.04c	22.86±0.72d	24.43±1.24d	24.55±2.44d
S019	87.74±5.29a	80.21±2.84b	75.01±2.33b	42.45±2.65c	24.75±1.27d	46.73±2.30c
S044	85.67±2.45a	78.26±2.46b	70.18±3.48c	33.76±1.10e	40.84±1.23d	26.02±0.88f
S064	60.80±1.88b	53.64±1.85a	68.43±2.25c	59.91±1.96b	45.79±4.91d	34.23±1.54e
S092	93.86±2.87a	68.76±1.97b	72.96±2.36b	48.10±2.44c	41.33±3.59d	37.06±4.47d
S519	91.85±2.67a	71.87±2.51b	75.08±2.18b	53.08±8.34c	35.25±2.31d	21.01±3.42e
S128	85.90±3.71a	68.43±2.36b	48.54±1.44c	38.87±1.19d	30.17±0.92e	23.99±0.83f
S137	103.45±4.18a	68.59±3.08b	59.31±3.17c	53.80±1.74c	38.21±1.21d	28.75±3.22e
S138	87.32±4.18b	96.46±4.33a	67.64±3.01c	34.27±3.25e	49.65±4.43d	12.91±2.32f
S158	96.88±3.80a	82.20±2.65b	71.96±2.72c	45.70±1.41d	38.20±1.98e	49.23±3.50d
S170	93.32±5.19a	86.89±7.71a	42.97±2.51b	20.95±0.68c	22.69±0.92c	47.15±2.44b

T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同种皮颜色大豆籽粒及芽菜的功能性成分分析

如图 3 所示,随着发芽时间的增加,4 种种皮颜色大豆芽菜的总酚含量均呈上升趋势。黑色种皮大豆

粒总酚含量最高,黄色种皮大豆籽粒总酚含量最低。培养 7 d 的黑色种皮大豆芽菜总酚含量最高,黄色种皮大豆芽菜总酚含量最低。如表 4 所示,培养 7 d 的黑色种皮大豆 S064 芽菜的总酚含量最高(7.72 mg/g)。



A:褐色种皮大豆;B:绿色种皮大豆;C:黄色种皮大豆;D:黑色种皮大豆。T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的总酚含量

Fig.3 Total phenol content in seeds and sprouts of soybeans with different seed coat colors

表4 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的总酚含量

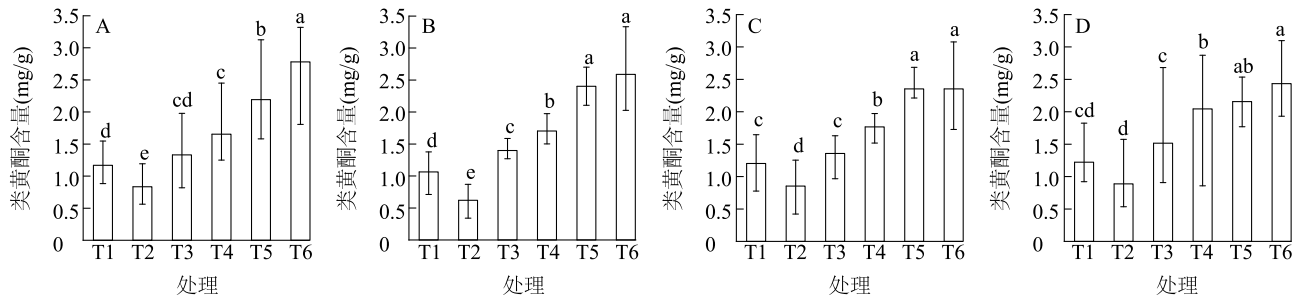
Table 4 Total phenol content in seeds and sprouts of different soybean germplasm resources

大豆编号	总酚含量(mg/g)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S014	3.93±0.17b	2.40±0.08c	2.25±0.24c	4.19±0.61b	5.83±0.37a	5.41±0.25a
S072	4.73±0.29bc	3.73±0.11d	4.11±0.26cd	4.36±0.07cd	5.17±0.53b	5.87±0.36a
S428	2.63±0.07c	2.14±0.10d	2.20±0.10d	2.64±0.03c	3.40±0.17b	3.84±0.24a
S515	2.42±0.02cd	2.02±0.01d	2.30±0.21cd	2.92±0.08c	3.97±0.54b	5.38±0.36a
S526	3.93±0.24c	2.54±0.08d	4.13±0.14c	4.12±0.15c	4.66±0.10b	5.59±0.15a
S394	2.62±0.06b	2.25±0.06b	2.53±0.25b	4.37±0.33a	3.96±0.39a	4.16±0.49a
S409	2.14±0.06d	2.32±0.10cd	2.14±0.33d	3.04±0.47bc	3.51±0.45b	4.25±0.38a
S416	2.48±0.01c	2.38±0.02c	2.23±0.15c	3.03±0.19b	3.33±0.12ab	3.58±0.19a
S420	2.94±0.04b	1.99±0.07d	2.48±0.13c	2.52±0.21c	3.57±0.18a	3.31±0.17a
S494	2.61±0.08bc	2.91±0.13bc	2.33±0.38c	2.93±0.21bc	3.23±0.41ab	3.64±0.25a
S019	4.91±0.50b	3.01±0.43c	3.62±0.08c	2.94±0.17c	5.05±0.52ab	6.09±0.89a
S044	2.76±0.14c	2.62±0.13c	2.52±0.29c	3.93±0.35b	4.42±0.55b	5.25±0.52a
S064	7.56±0.02a	5.24±0.06bc	4.31±0.60c	5.15±0.45bc	5.70±0.80b	7.72±0.41a
S092	4.81±0.17b	4.25±0.11b	3.19±0.14c	4.50±0.36b	6.77±0.51a	6.25±0.37a
S519	3.15±0.08b	2.50±0.07c	2.24±0.08c	3.64±0.30ab	3.87±0.38a	4.26±0.50a
S128	2.39±0.08d	1.95±0.18d	1.89±0.18d	3.69±0.14c	5.00±0.18b	6.95±0.51a
S137	3.09±0.23b	3.00±0.15b	3.33±0.23b	3.70±0.21b	4.69±0.40a	5.12±0.58a
S138	2.53±0.08b	2.38±0.10b	2.74±0.34b	3.00±0.18b	4.37±0.55a	4.91±0.15a
S158	3.14±0.16cd	2.88±0.13cd	2.51±0.39d	3.67±0.26c	4.80±0.87b	5.99±0.41a
S170	2.85±0.04d	2.78±0.02d	2.69±0.25d	3.72±0.39c	4.95±0.17a	4.25±0.03b

T1:干燥大豆种子;T2:浸水12 h的大豆种子;T3:育苗盒中培养1 d的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养3 d的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养5 d的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养7 d的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

如图4所示,随着发芽时间的增加,4种种皮颜色大豆芽菜的类黄酮含量均呈上升趋势。黑色种皮大豆籽粒类黄酮含量最高,绿色种皮大豆籽粒类黄酮含量最低。培养7 d时,褐色种皮大豆芽菜类黄

酮含量最高,黄色种皮大豆类芽菜黄酮含量最低。如表5所示,培养7 d的褐色种皮大豆 S072 芽菜的类黄酮含量最高(3.18 mg/g)。



A:褐色种皮大豆;B:绿色种皮大豆;C:黄色种皮大豆;D:黑色种皮大豆。T1:干燥大豆种子;T2:浸水12 h的大豆种子;T3:育苗盒中培养1 d的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养3 d的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养5 d的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养7 d的大豆芽菜。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图4 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的类黄酮含量

Fig.4 Total flavonoid content in seeds and sprouts of soybeans with different seed coat colors

如图5所示,随着发芽时间的增加,4种种皮颜色大豆芽菜的 γ -氨基丁酸含量随着萌发时间的增

加均呈先上升后降低的趋势,培养3 d的大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量显著高于其他处理。培养3 d的黑

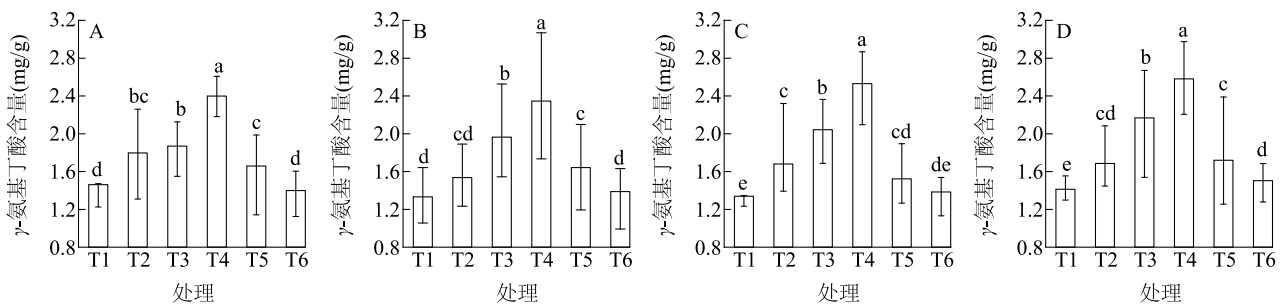
色种皮大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量最高,绿色种皮大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量最低。如表 6 所示,培养 3 d 的黑皮大豆 S019 芽菜 γ -氨基丁酸含量最高 (2.89 mg/g)。

表 5 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的类黄酮含量

Table 5 Total flavonoid content in seeds and sprouts of different soybean germplasm resources

大豆编号	类黄酮含量(mg/g)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S014	1.28±0.04c	1.00±0.01c	1.15±0.08c	2.07±0.37b	2.50±0.03a	2.77±0.02a
S072	1.49±0.04bc	1.17±0.02c	1.78±0.14b	1.81±0.07b	2.89±0.31a	3.18±0.10a
S428	0.97±0.06e	0.70±0.09f	1.45±0.07d	1.73±0.07c	2.06±0.14b	2.44±0.08a
S515	1.10±0.07d	0.60±0.04e	0.91±0.06d	1.35±0.08c	1.86±0.11b	3.10±0.20a
S526	1.00±0.03cd	0.69±0.07d	1.38±0.10bc	1.30±0.06bc	1.66±0.08b	2.41±0.43a
S394	0.81±0.03c	0.45±0.02d	0.95±0.04c	1.54±0.03b	2.31±0.07a	2.12±0.29a
S409	1.31±0.05c	1.04±0.04d	1.48±0.05c	1.90±0.02b	2.13±0.23a	2.20±0.02a
S416	1.21±0.04e	0.99±0.05f	1.36±0.01d	1.73±0.05d	2.35±0.03b	2.62±0.08a
S420	1.63±0.03bc	1.23±0.03c	1.38±0.05bc	1.75±0.04b	2.53±0.17a	2.46±0.48a
S494	1.05±0.04d	0.57±0.06e	1.61±0.02c	1.92±0.05b	2.45±0.09a	2.36±0.23a
S019	1.51±0.08bc	1.39±0.14c	1.09±0.13c	1.86±0.76abc	2.30±0.06a	2.19±0.14ab
S044	0.95±0.01d	0.71±0.04d	1.51±0.08c	1.80±0.13bc	2.22±0.24ab	2.65±0.51a
S064	1.67±0.12c	0.98±0.05d	2.29±0.28b	2.79±0.06a	1.99±0.06b	2.72±0.15a
S092	0.99±0.06c	0.68±0.17c	1.48±0.25b	2.36±0.14a	2.48±0.06a	2.40±0.24a
S519	1.00±0.05d	0.68±0.05e	1.20±0.09cd	1.42±0.10c	1.80±0.02b	2.22±0.29a
S128	0.76±0.05d	0.53±0.01e	1.54±0.04c	1.87±0.10b	2.30±0.15a	2.45±0.03a
S137	0.89±0.06d	0.63±0.01e	1.50±0.03c	1.83±0.02b	2.29±0.08a	2.42±0.17a
S138	1.33±0.06b	0.59±0.09c	1.30±0.03b	1.55±0.03b	2.40±0.02a	2.45±0.30a
S158	1.09±0.06c	0.40±0.07d	1.34±0.05c	1.71±0.08b	2.52±0.21a	2.53±0.22a
S170	1.25±0.04d	0.94±0.05e	1.32±0.06d	1.56±0.02c	2.51±0.15b	3.09±0.19a

T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。



A:褐色种皮大豆;B:绿色种皮大豆;C:黄色种皮大豆;D:黑色种皮大豆。T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜的 γ -氨基丁酸含量

Fig.5 γ -aminobutyric acid content in seeds and sprouts of soybeans with different seed coat colors

如图 6 所示,黑色种皮大豆 S519 种皮花青素含量显著高于其他大豆种质资源 ($P < 0.05$),褐色种皮大豆 S428、S515、S526、黑色种皮大豆 S019、S064、

S092、S519 种皮总酚含量显著高于其他大豆种质资源 ($P < 0.05$),黑色种皮大豆 S064 种皮类黄酮含量显著高于其他大豆种质资源 ($P < 0.05$)。

表 6 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的 γ -氨基丁酸含量Table 6 γ -aminobutyric acid content in seeds and sprouts of different soybean germplasm resources

大豆编号	γ -氨基丁酸含量(mg/g)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S014	1.35±0.10c	1.63±0.10b	1.85±0.03b	2.30±0.05a	1.41±0.10c	1.28±0.16c
S072	1.44±0.02d	2.06±0.12b	1.94±0.03bc	2.44±0.14a	1.81±0.13c	1.56±0.04d
S428	1.75±0.10bc	1.73±0.06bc	2.02±0.07b	2.47±0.11a	1.54±0.34c	1.42±0.05c
S515	1.38±0.02d	2.16±0.10b	1.95±0.11bc	2.39±0.15a	1.88±0.08c	1.44±0.07d
S526	1.39±0.01c	1.40±0.07c	1.58±0.11b	2.39±0.10a	1.66±0.08b	1.29±0.03c
S394	1.30±0.02d	1.73±0.20c	2.16±0.17b	2.49±0.04a	1.45±0.06cd	1.38±0.18d
S409	1.29±0.04d	1.43±0.01cd	1.81±0.09b	2.48±0.12a	1.49±0.06c	1.34±0.05cd
S416	1.26±0.02e	1.44±0.03d	2.00±0.05b	2.24±0.10a	1.81±0.11c	1.34±0.04de
S420	1.28±0.04c	1.90±0.30b	2.12±0.07b	2.60±0.05a	1.56±0.08d	1.45±0.02cd
S494	1.57±0.21d	1.90±0.06c	2.01±0.02b	2.84±0.03a	1.30±0.04c	1.41±0.08d
S019	1.49±0.06d	1.99±0.07c	2.51±0.12b	2.89±0.06a	2.02±0.36c	1.41±0.04d
S044	1.47±0.04c	1.53±0.02c	1.92±0.03b	2.74±0.04a	1.52±0.04c	1.42±0.10c
S064	1.39±0.04d	1.73±0.14c	2.17±0.10b	2.46±0.06a	1.71±0.01c	1.65±0.03c
S092	1.31±0.01c	1.67±0.15b	2.36±0.05a	2.51±0.10a	1.42±0.16c	1.51±0.09bc
S519	1.40±0.03c	1.50±0.04c	1.88±0.24b	2.30±0.07a	1.92±0.05b	1.53±0.10c
S128	1.39±0.07d	1.72±0.15c	2.29±0.19b	2.58±0.07a	1.70±0.09c	1.59±0.05cd
S137	1.09±0.03d	1.30±0.05cd	2.21±0.14b	2.83±0.21a	1.98±0.09b	1.40±0.01c
S138	1.21±0.06d	1.33±0.02cd	1.67±0.09b	1.83±0.08a	1.64±0.02b	1.38±0.08c
S158	1.39±0.12c	1.73±0.12b	1.90±0.08b	2.54±0.15a	1.33±0.12c	1.32±0.23c
S170	1.58±0.06c	1.61±0.10bc	1.76±0.11b	1.95±0.01a	1.56±0.04c	1.25±0.04d

T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同种皮颜色大豆籽粒及芽菜的抗氧化活性分析

黄色种皮大豆籽粒平均 DPPH 清除率最高 (65.82%)、平均 ABTS 清除率最低 (77.10%)，绿色种皮大豆籽粒 DPPH 清除率最低 (57.29%)，黑色种皮大豆籽粒 ABTS 清除率最高 (83.52%)。如表 7 所示，随着发芽时间的增加，4 种种皮颜色大豆芽菜对 DPPH 和 ABTS 的清除率整体上均呈上升趋势。培养 7 d 的黄色种皮大豆 S494 芽菜的 DPPH 清除率最高，培养 7 d 的黑色种皮大豆 S519 芽菜的 ABTS 清除率最高，培养 7 d 的黄色种皮大豆 S494 芽菜的抗氧化活性综合指数 (APC) 最高。培养 7 d 的黑皮大豆芽菜的总体抗氧化活性综合指数较高。

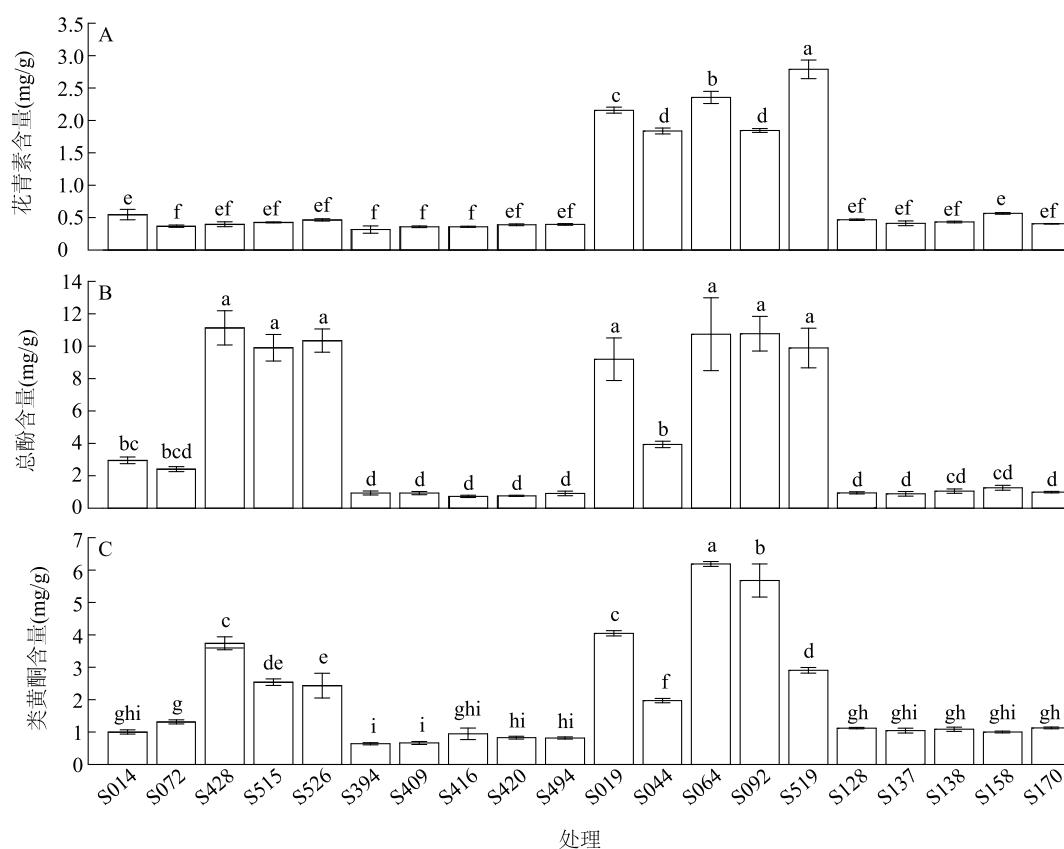
2.4 大豆营养成分含量与抗氧化活性的相关性分析

如表 8 所示，类黄酮含量与总酚含量、DPPH 清除率和 ABTS 清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与总糖含量、可溶性糖含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。总酚含量与 DPPH 清除率、ABTS 清除率呈

极显著正相关 ($P < 0.01$)，与总糖含量、可溶性糖含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。总糖含量与可溶性糖含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与 DPPH 清除率、ABTS 清除率呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。可溶性糖含量与 DPPH 清除率、ABTS 清除率呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；DPPH 清除率与 ABTS 清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.5 不同种皮颜色大豆籽粒及芽菜的营养品质分析

如图 7 所示，前两个主成分的方差贡献率分别为 96.77%、2.22%，累计贡献率达到 98.99%，黑色种皮大豆籽粒和芽菜与其他种皮颜色大豆籽粒和芽菜的营养品质差异较大。通过 K-means 算法确定不同种皮颜色大豆芽菜营养品质的最优聚类数为 4，因此将不同种皮颜色的大豆籽粒和芽菜可划分为 4 个簇，其中 S019-T6、S044-T6、S092-T6、S420-T6 聚为一类，且其总体抗氧化活性综合指数较高，可能这一簇的大豆芽菜具有较高的营养品质和较强的抗氧化活性。



大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同颜色大豆种皮的花青素 (A)、总酚 (B) 和类黄酮含量 (C)

Fig.6 Anthocyanin (A), total phenol (B), and total flavonoid (C) contents in soybean seed coats with different colors

3 讨论与结论

本研究以 20 份不同种皮颜色的大豆种质资源为材料,系统分析了其籽粒和不同萌发时间芽菜的营养成分、功能性成分含量和抗氧化活性。结果表明,浅色种皮大豆籽粒中糖类物质含量较高,且随着萌发时间的延长,大豆芽菜的总糖和可溶性糖含量呈下降趋势。这可能是因为在萌发过程中,总糖和可溶性糖转化为其他物质^[17-21]。

酚类物质作为天然的生物活性成分,具有抗氧化、抗炎、抗菌等多种作用。在萌发过程中,苯丙氨酸解氨酶的活性提高,促进酚类物质合成。同时,酚类物质参与细胞壁构建和细胞生长^[22-23]。本研究发现,随着萌发时间的延长,大豆芽菜总酚含量呈上升趋势,培养 7 d 的黑色种皮大豆芽菜总酚含量最高。类黄酮属于酚类物质,具有较强的抗氧化作用,能够中和体内的自由基、降低氧化应激对细胞的损害^[24-25]。大豆萌发过程中苯丙氨酸解氨酶和查尔

酮合成酶 (CHS) 等关键酶活性上升,促使苯类黄酮合成^[26]。本研究发现随着萌发时间的延长,大豆芽菜类黄酮含量呈上升趋势,培养 7 d 的褐色种皮大豆芽菜类黄酮含量最高。

相关性分析结果表明,总酚含量和类黄酮含量均与 DPPH 清除率、ABTS 清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。酚羟基结构能够有效清除 DPPH、ABTS 自由基并整合金属离子,从而发挥抗氧化作用^[27-28]。通过抗氧化活性综合指数 (APC) 进一步评价大豆籽粒和芽菜的抗氧化能力,发现培养 7 d 的黑色种皮大豆芽菜综合抗氧化能力较强。

γ -氨基丁酸在植物的生长发育、抗逆性中具有重要作用^[29]。本研究发现,随着萌发时间的延长,大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量呈先上升后降低的趋势,培养 3 d 的大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量达到最高。其中培养 3 d 的黑色种皮大豆芽菜 γ -氨基丁酸含量最高。在种子萌发后期,其含量下降可能与 γ -氨基丁酸转氨酶等分解酶活性增强有关^[30]。

表7 不同大豆种质资源籽粒和芽菜的抗氧化活性

Table 7 Antioxidant activity of seeds and sprouts from different soybean germplasm resources

处理	大豆编号	DPPH 清除率 (%)	ABTS 清除率 (%)	APC (%)	排名	处理	大豆编号	DPPH 清除率 (%)	ABTS 清除率 (%)	APC (%)	排名
T1	S014	69.46±0.06a	80.39±0.02c	83.23	59	T4	S014	67.46±0.02ab	84.61±0.01ab	84.25	52
	S072	66.79±0.02b	80.67±0.03ab	81.79	64		S072	73.67±0.01a	76.33±0.03bc	83.61	57
	S428	58.63±0.02b	80.87±0.03abc	77.06	84		S428	62.49±0.01b	79.37±0.02bc	78.56	76
	S515	52.99±0.02b	73.41±0.04b	69.81	107		S515	66.30±0.01a	87.28±0.02a	85.15	46
	S526	41.79±0.02d	77.88±0.03a	65.50	115		S526	59.45±0.01b	79.02±0.03a	76.58	86
	S394	59.75±0.04b	81.78±0.02a	78.20	81		S394	73.70±0.04a	84.37±0.02a	87.83	31
	S409	68.74±0.04a	55.54±0.05c	69.82	106		S409	73.53±0.02a	68.14±0.04b	79.25	72
	S416	50.79±0.13c	84.02±0.02a	74.05	94		S416	78.83±0.02a	86.55±0.02a	92.01	13
	S420	74.63±0.04ab	81.94±0.02b	87.11	39		S420	68.66±0.02b	83.86±0.02b	84.57	48
	S494	75.17±0.02b	82.23±0.02bc	87.58	36		S494	74.48±0.04b	81.27±0.02c	86.67	41
	S019	56.58±0.01c	83.15±0.02a	77.03	85		S019	69.11±0.01b	82.24±0.02ab	83.99	55
	S044	67.24±0.01b	81.24±0.02bc	82.36	63		S044	77.46±0.01a	88.31±0.01a	92.12	12
	S064	64.93±0.03bc	87.36±0.02a	84.19	53		S064	71.45±0.02ab	83.72±0.02ab	86.15	44
	S092	63.48±0.04c	83.86±0.02a	81.50	65		S092	74.15±0.01ab	83.38±0.02a	87.58	35
	S519	55.45±0.08bc	82.00±0.03b	75.76	90		S519	69.35±0.02ab	92.81±0.02a	89.66	22
	S128	48.10±0.03b	79.68±0.02b	70.18	103		S128	78.78±0.06a	87.57±0.04a	92.52	10
	S137	63.71±0.04bc	72.52±0.02c	75.71	91		S137	68.38±0.02b	77.80±0.01b	81.24	67
S138	67.79±0.04ab	83.85±0.03ab	84.05	54	S138	63.44±0.05bc	86.74±0.02a	82.98	60		
S158	51.24±0.13bc	79.65±0.02bcd	68.91	110	S158	57.70±0.06ab	84.15±0.02ab	78.22	80		
S170	55.59±0.02b	80.57±0.02c	75.09	92	S170	63.36±0.05ab	86.30±0.02b	82.70	61		
T2	S014	57.14±0.09b	81.30±0.02bc	76.40	87	T5	S014	71.44±0.03a	85.07±0.02a	86.85	40
	S072	55.17±0.02c	76.14±0.03bc	72.53	97		S072	78.10±0.01a	78.34±0.03abc	87.29	38
	S428	49.33±0.02c	76.68±0.01c	69.35	108		S428	59.16±0.03b	83.05±0.01ab	78.51	77
	S515	41.80±0.03c	72.56±0.04b	62.72	118		S515	64.59±0.06a	88.25±0.02a	84.45	49
	S526	37.14±0.01e	53.17±0.06b	49.83	120		S526	64.95±0.05a	81.73±0.03a	81.26	66
	S394	49.67±0.01c	80.07±0.03a	71.32	100		S394	77.85±0.05a	83.23±0.02a	89.70	21
	S409	53.16±0.04b	47.12±0.06c	56.18	119		S409	73.07±0.03a	72.07±0.04ab	81.03	69
	S416	39.38±0.04c	83.92±0.02a	67.22	112		S416	75.38±0.01ab	85.86±0.02a	89.61	23
	S420	38.91±0.05d	82.86±0.02b	66.39	113		S420	73.04±0.01ab	86.87±0.02ab	88.74	26
	S494	63.21±0.03c	83.62±0.02bc	81.21	68		S494	81.42±0.03a	90.34±0.02a	95.53	3
	S019	39.67±0.01d	77.83±0.03b	64.21	117		S019	68.44±0.04b	83.66±0.02a	84.34	51
	S044	48.32±0.06c	80.19±0.03c	70.58	101		S044	83.40±0.04a	87.90±0.02a	95.43	4
	S064	52.17±0.06d	80.72±0.04b	73.14	95		S064	76.09±0.04a	84.39±0.03ab	89.26	25
	S092	58.91±0.05c	83.02±0.02a	78.34	79		S092	80.82±0.02a	84.23±0.02a	91.98	14
	S519	44.34±0.12c	81.22±0.03b	68.76	111		S519	76.14±0.01a	94.89±0.01a	94.77	5
	S128	44.69±0.03b	72.30±0.02c	64.30	116		S128	76.42±0.01a	89.79±0.02a	92.28	11
	S137	53.68±0.01d	71.27±0.02c	69.10	109		S137	77.72±0.01a	79.84±0.01ab	87.85	30
S138	46.99±0.05d	80.55±0.03bc	69.98	105	S138	71.46±0.05ab	88.43±0.02ab	88.62	27		
S158	43.16±0.06c	76.88±0.01d	65.79	114	S158	57.59±0.05ab	83.14±0.02abc	77.62	83		
S170	54.69±0.04b	86.73±0.02b	77.78	82	S170	69.42±0.02a	89.01±0.02b	87.71	32		
T3	S014	68.21±0.02ab	80.24±0.02c	82.41	62	T6	S014	74.83±0.06a	86.12±0.01a	89.41	24
	S072	67.48±0.02b	73.29±0.04c	78.35	78		S072	76.26±0.03a	81.20±0.03a	87.69	33
	S428	62.25±0.03b	79.94±0.03abc	78.72	75		S428	77.35±0.01a	84.16±0.01a	89.89	20
	S515	48.90±10.06bc	78.47±0.03b	70.03	104		S515	72.01±0.02a	85.32±0.02a	87.32	37
	S526	53.43±0.01c	73.74±0.04a	70.24	102		S526	69.06±0.01a	81.33±0.03a	83.49	58
	S394	60.63±0.02b	82.29±0.02a	78.98	74		S394	74.38±0.08a	84.42±0.02a	88.26	29
	S409	75.68±0.05a	78.98±0.03a	86.19	43		S409	74.94±0.04a	79.49±0.03a	86.02	45
	S416	67.61±0.03ab	84.77±0.02a	84.42	50		S416	64.61±0.02b	86.82±0.02a	83.71	56
	S420	55.27±0.01c	82.81±0.02b	76.07	89		S420	78.48±0.01a	89.63±0.02a	93.42	8
	S494	69.29±0.01b	83.61±0.02bc	84.81	47		S494	87.26±0.03a	86.52±0.02a	97.00	1
	S019	61.37±0.01c	81.71±0.02ab	79.12	73		S019	77.91±0.03a	83.58±0.02a	89.92	18
	S044	76.58±0.05a	85.10±0.02ab	89.92	19		S044	82.82±0.02a	84.16±0.02abc	93.13	9
	S064	62.52±0.02c	82.23±0.02ab	80.08	71		S064	78.45±0.01a	84.61±0.02ab	90.77	16
	S092	70.64±0.01b	84.94±0.02a	86.31	42		S092	80.65±0.03a	83.91±0.02a	91.71	15
	S519	66.42±0.03ab	92.34±0.02a	87.67	34		S519	74.25±0.06a	95.70±0.01a	94.08	6
	S128	51.67±0.08b	79.28±0.03b	72.09	98		S128	84.23±0.03a	89.71±0.01a	96.87	2
	S137	61.35±0.01c	72.31±0.02c	74.20	93		S137	75.77±0.02a	83.01±0.01a	88.35	28
S138	54.93±0.09cd	77.05±0.04c	72.86	96	S138	76.29±0.02a	86.21±0.03ab	90.33	17		
S158	51.41±0.02abc	79.17±0.02cd	71.88	99	S158	54.49±0.10a	86.47±0.02a	80.65	70		
S170	57.37±0.07b	80.69±0.02c	76.21	88	S170	75.98±0.02ab	93.37±0.01a	93.89	7		

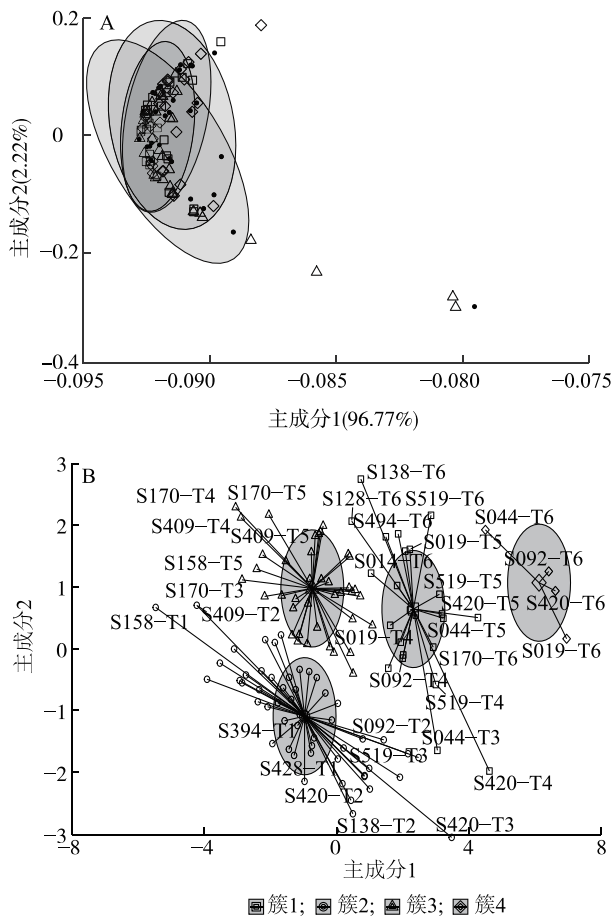
ABTS; 2,2-联氮-(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐; DPPH; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼; APC; 抗氧化活性综合指数。T1: 干燥大豆种子; T2: 浸水 12 h 的大豆种子; T3: 育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜; T4: 育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜; T5: 育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜; T6: 育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014, S072, S428, S515, S526, S394, S409, S416, S420, S494, S019, S044, S064, S092, S519, S128, S137, S138, S158, S170 信息见表 1。同一大豆种质资源同一指标不同处理数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 8 大豆功能性成分与抗氧化活性相关性分析

Table 8 Correlation analysis between functional components and antioxidant activity of soybeans

指标	类黄酮含量	总酚含量	γ -氨基丁酸含量	总糖含量	可溶性糖含量	DPPH 清除率	ABTS 清除率
类黄酮含量	1.00						
总酚含量	0.67**	1.00					
γ -氨基丁酸含量	-0.04	-0.18	1.00				
总糖含量	-0.52**	-0.41**	-0.18	1.00			
可溶性糖含量	-0.73**	-0.44**	-0.11	0.49**	1.00		
DPPH 清除率	0.73**	0.51**	0.06	-0.54**	-0.57**	1.00	
ABTS 清除率	0.41**	0.32**	0.05	-0.39**	-0.29**	0.43**	1.00

ABTS:2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐;DPPH:1,1-二苯基-2-三硝基苯肼.** :相关性极显著($P<0.01$)。



T1:干燥大豆种子;T2:浸水 12 h 的大豆种子;T3:育苗盒中培养 1 d 的大豆芽菜;T4:育苗盒中培养 3 d 的大豆芽菜;T5:育苗盒中培养 5 d 的大豆芽菜;T6:育苗盒中培养 7 d 的大豆芽菜。大豆种质资源 S014、S072、S428、S515、S526、S394、S409、S416、S420、S494、S019、S044、S064、S092、S519、S128、S137、S138、S158、S170 信息见表 1。

图 7 不同种皮颜色大豆籽粒和芽菜主成分分析 (A) 与聚类分析 (B)

Fig.7 Principal component analysis (A) and cluster analysis (B) of soybean seeds and sprouts with different seed coat colors

综上所述,绿色和黄色种皮大豆籽粒适宜作为糖类膳食来源,培养 3 d 的黑色种皮大豆芽菜可作为 γ -氨基丁酸膳食来源,培养 7 d 的黑皮大豆芽菜的总体抗氧化活性最高,具有开发为功能性食品的潜力。

致谢: 感谢中国农业科学院作物科学研究所阎哲研究员提供大豆种质资源。

参考文献:

- [1] 李 杨. 大豆全产业加工研究进展[J]. 大豆科技,2022(1): 14-26.
- [2] 聂 莹,邢亚楠,黄家章,等. 主栽大豆营养品质及加工特性初探[J]. 食品工业科技,2021,42(17):1-7.
- [3] DEL OLIVIA G, ROBINSON B E, LE POLAIN DE WAROUX Y. Impacts of agricultural commodity frontier expansion on smallholder livelihoods:an assessment through the lens of access to land and resources in the Argentine Chaco[J]. Journal of Rural Studies, 2022,93:67-80.
- [4] LIU S L, ZHANG M, FENG F. Toward a “green revolution” for soybean[J]. Molecular Plant,2020,13(5):688-697.
- [5] 李敬辰. 大豆的主要营养成分及营养价值研究进展[J]. 现代农业科技,2020(23):213-214,218.
- [6] 周 萌,马玉荣,黄惠华. 不同品种大豆中的生物活性成分及其抗氧化活性的比较分析[J]. 现代食品科技,2015,31(4): 137-143.
- [7] 于立梅,钟惠曾,于 新,等. 大豆发芽过程中营养成分变化规律的研究[J]. 中国粮油学报,2010,25(8):19-22.
- [8] LEE J, HWANG Y S, KIM S T, et al. Seed coat color and seed weight contribute differential responses of targeted metabolites in soybean seeds[J]. Food Chemistry,2017,214:248-258.
- [9] 张晓燕,薛晨晨,黄 璐,等. 不同种皮颜色小豆及其芽苗菜功能性成分与抗氧化能力分析[J]. 江苏农业科学,2021,49(7): 180-185.
- [10] CHO K M, HA T J, LEE Y B, et al. Soluble phenolics and antioxidant properties of soybean (*Glycine max* L.) cultivars with varying seed coat colours[J]. Journal of Functional Foods,2013,5

- (3):1065-1076.
- [11] 宋 健,郭 勇,于丽杰,等. 大豆种皮色相关基因研究进展[J]. 遗传,2012,34(6):687-694.
- [12] 张述伟,宗营杰,方春燕,等. 蒽酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]. 食品研究与开发,2020,41(7):196-200.
- [13] 龚春燕,苏娜娜,陈 沁,等. 不同光质对西兰花芽苗菜营养品质及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技,2018,39(23):42-49.
- [14] PAJAK P, SOCHA R, GAŁKOWSKA D, et al. Phenolic profile and antioxidant activity in selected seeds and sprouts[J]. Food Chemistry,2014,143:300-306.
- [15] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity[J]. Food Chemistry,2018,245:863-870.
- [16] LEE G S, VANCE M T, NAM T, et al. Evaluation of pH differential and HPLC methods expressed as cyanidin-3-glucoside equivalent for measuring the total anthocyanin contents of berries[J]. Journal of Food Measurement and Characterization,2016,10(3):562-568.
- [17] 王 莘,王艳梅,董 浩. 豆类萌发期矿物质元素和糖类含量变化的研究[J]. 扬州大学学报,2003(2):72-74.
- [18] 王 莘,王艳梅,闵卫红,等. 大豆萌发期功能性营养成分测定与分析[J]. 中国粮油学报,2003,18(4):30-32.
- [19] 赵天瑶,王丽云,姜宏伟,等. 豆类种子及其芽苗菜的营养品质、功能性成分及抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业,2020,46(5):83-90.
- [20] 田志刚,刘香英,范杰英,等. 小粒大豆籽粒品质与豆芽品质的关系研究[J]. 东北农业科学,2016,41(3):95-98.
- [21] 王凯欣. 浸泡过程中大豆主要成分变化及其对豆浆和腐竹品质的影响[D]. 无锡:江南大学,2024.
- [22] 陈 振,黄维娜,康玉凡. 食用豆制品萌发过程中抗氧化成分研究[J]. 中国食物与营养,2014,20(8):23-27.
- [23] 丁羽萱,王 尧,姚羿安,等. 外源 γ -氨基丁酸对发芽大豆酚类物质富集及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学,2021,42(13):72-78.
- [24] CHANG H, WANG C, GONG L L, et al. An overview of *Fructus Meliae Toosendan*: botany, traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicology[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy,2023,157:113795.
- [25] 孙 冰,郑留学,朱思齐,等. 大豆发芽过程中异黄酮、维生素C、胰蛋白酶抑制剂含量变化的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(24):147-149.
- [26] WANG M, WANG Y T, XIE C, et al. The regulation of UV-B-Triggered ABA signal on isoflavones synthesis in soybean suspension cells[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2025,222:109728. DOI:10.1016/j.plaphy.2025.109728.
- [27] SHABBIR U, TYAGI A, HAM H J. Comprehensive profiling of bioactive compounds in germinated black soybeans via UHPLC-ESI-QTOF-MS/MS and their anti-Alzheimer's activity[J]. PLoS One,2022,17(1):e0263274.
- [28] 王谢祎. 黄酮和黄酮醇结构特性、相互作用与抗氧化效应(协同、拮抗或加成)间的关系研究[D]. 南昌:南昌大学,2016.
- [29] 翟玮玮,焦宇知. 黑豆发芽过程中蛋白质及 γ -氨基丁酸的变化及发芽条件的优化[J]. 食品科学,2009,30(19):51-54.
- [30] XU J G, HU Q P. Changes in γ -aminobutyric acid content and related enzyme activities in Jindou 25 soybean (*Glycine max* L.) seeds during germination[J]. Lwt-Food Science and Technology,2014,55(1):341-346.

(责任编辑:成纾寒)