

吕重阳,张晓燕,黄璐,等. 不同绿豆品种的芽用特性评价及其专用品种筛选[J]. 江苏农业科学,2023,51(4):152–163.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.04.023

不同绿豆品种的芽用特性评价及其专用品种筛选

吕重阳^{1,2}, 张晓燕², 黄璐², 薛晨晨², 袁星星², 陈新^{1,2}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023;

2. 江苏省农业科学院经济作物研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要:为了筛选出芽用特性优良的绿豆品种,为绿豆芽菜生产及芽用绿豆品种的培育提供资源材料,以来自亚洲不同地区的 67 份绿豆种质资源为研究材料,测定了不同绿豆芽菜的外观及生长指标和营养功能品质指标等 13 项芽用特性指标,利用主成分分析和隶属函数分析等方法对各材料的芽用特性进行了综合评价。结果表明,不同绿豆芽菜的 13 项芽用特性存在较大差异。利用主成分分析将 13 个芽用特性指标转换为 4 个独立的综合指标,其累计贡献率达到 68.42%。结合隶属函数分析结果,筛选出产量、功能性成分、基本营养成分与外观品质特性较好的品种各 10 份,为芽用绿豆的品种改良提供了材料基础。依据芽用特性综合指标值筛选出南阳大绿豆、苏绿 1 号、保定 1028、苏绿 7 号和化西 2019 等芽用特性优异的绿豆品种 10 份,为绿豆芽菜的生产提供了优异种质材料。采用逐步回归分析法建立了绿豆芽用特性评价的数学模型,筛选出可食鲜质量、可溶性蛋白含量、总酚含量、DPPH 自由基清除率和下胚轴长等 5 个鉴定指标,可作为绿豆芽用特性的评价指标。

关键词:绿豆芽菜;芽用特性;主成分分析;隶属函数;综合评价

中图分类号:S643.903.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)04–0152–12

绿豆(*Vigna radiate* L.)在中国已有 2 000 多年

的栽培史,是我国种植的主要食用豆之一。绿豆营养丰富,是饮食中蛋白质、生物活性物质、矿物质和维生素等的优质来源^[1]。绿豆芽菜是绿豆种子在一定条件下萌发形成的可供食用的芽苗类蔬菜,是我国的传统蔬菜,也是日益受到青睐的“活体蔬菜”和功能食品。越来越多的研究表明,与绿豆种子相比,绿豆芽菜中的维生素 C、酚类化合物、黄酮类化合物、有机酸和氨基酸等营养物质含量显著提高,从而具有更高的营养价值^[2]。近年来,国内外在绿

收稿日期:2022–05–16

基金项目:国家自然科学基金(编号:31902001);国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS–08)。

作者简介:吕重阳(1997—),男,安徽滁州人;硕士研究生,从事绿豆芽菜营养功能品质调控研究。E-mail: chongyang2721628525@foxmail.com。

通信作者:张晓燕,博士,副研究员,主要从事豆类功能育种与应用研究。E-mail:xyzhang@jaas.ac.cn。

[54] Harumi T, Matsushima S. Separation and assay methods for melatonin and its precursors [J]. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications, 2000, 747 (1/2): 95–110.

[55] Xia H, Shen Y Q, Shen T, et al. Melatonin accumulation in sweet cherry and its influence on fruit quality and antioxidant properties [J]. Molecules, 2020, 25 (3): 753.

[56] 卞凤娥. 葡萄中的褪黑素及外源褪黑素的抗逆功能[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.

[57] Ahn H R, Kim Y J, Lim Y J, et al. Key genes in the melatonin biosynthesis pathway with circadian rhythm are associated with various abiotic stresses [J]. Plants, 2021, 10 (1): 129.

[58] Sharafi Y, Jannatizadeh A, Fard J R, et al. Melatonin treatment delays senescence and improves antioxidant potential of sweet cherry fruits during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2021,

288: 110304.

[59] Tan D X, Reiter R J. An evolutionary view of melatonin synthesis and metabolism related to its biological functions in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71 (16): 4677–4689.

[60] Li M Q, Hasan M K, Li C X, et al. Melatonin mediates selenium-induced tolerance to cadmium stress in tomato plants [J]. Journal of Pineal Research, 2016, 61 (3): 291–302.

[61] Lee K, Back K. Overexpression of rice serotonin *N*-acetyltransferase 1 in transgenic rice plants confers resistance to cadmium and senescence and increases grain yield [J]. Journal of Pineal Research, 2017, 62 (3): e12392.

[62] Ulhassan Z, Huang Q, Gill R A, et al. Protective mechanisms of melatonin against selenium toxicity in *Brassica napus*: insights into physiological traits, thiol biosynthesis and antioxidant machinery [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19 (1): 507.

豆芽菜营养成分的保健功效方面开展了大量研究,普遍认为饮食中添加绿豆芽菜有助于预防慢性病、神经退行性疾病等^[3],因此绿豆芽菜是健康饮食的重要组成部分。此外,在新冠疫情的大流行背景下,蔬菜类农产品的生产经营面临着交通物流不便和销售迟滞等难题,绿豆芽菜的生产具有生产周期短、生产不受季节限制、对生产场所的要求可塑性强和产出效率高等特点,经济效益显著,市场前景广阔。因此,生产优质绿豆芽菜对保障蔬菜供应、提高膳食优质营养及促进经济效益具有重要意义。

近年来,随着生活水平的提高,人们对于营养健康和功能食品的关注不断增加^[4-5],更加注重豆类芽菜的外观品质、营养品质和食品安全性等^[6-7]。通过品种筛选获得芽用特性优良的豆芽专用品种是生产优质绿豆芽菜的关键环节之一。目前已经开展了芽用豆类品种筛选的相关研究,其中,大豆芽菜专用品种筛选的研究较多。如王慧等研究了 17 份大豆材料籽粒与大豆芽菜的生物产量及营养成分等芽用特性,并对大豆与大豆芽菜的营养成分进行了相关性分析^[8]。李振华等研究了大豆籽粒大小对大豆芽菜营养品质的影响^[9]。肖伶俐等对不同大豆品种的芽用特性进行了比较,筛选出芽用特性优良的大豆材料 4 份^[10]。康玉凡等对 22 个大豆材料的种皮特性、百粒质量、种子生理特点及芽用特性进行了测定,综合筛选出 3 份综合性状优良的芽用大豆品种^[11]。然而,目前关于芽用绿豆品种筛选的报道较少,且前人对绿豆芽用特性的研究多以单项指标来衡量,难以客观反映芽用特性^[12-14]。此外,绿豆芽菜的芽用特性指标较多,主要包括:可食率、下胚轴长、下胚轴直径等外观及生长指标,和可溶性糖含量、酚类物质含量等营养品质指标。如何合理分析这些指标并对不同绿豆品种的芽用特性进行综合评价是亟待解决的问题。大量研究表明,利用主成分分析、隶属函数分析等多元统计方法对作物耐逆性、农产品品质差异等特性进行综合评价是一种较全面、有效的评价方法^[15-17],如在大豆芽菜的研究中,在分析 11 个主栽大豆品种的芽用特性的基础上,利用隶属函数等方法综合评定筛选出了适宜豆芽生产且富含异黄酮的大豆材料 1 份^[18]。然而绿豆芽菜方面的相关研究尚未见报道。

为筛选出芽用特性优良的绿豆品种,本研究测定了 67 份绿豆种质的芽用特性,利用多元统计方法

对不同绿豆品种的芽用特性指标进行了综合评价,初步建立了绿豆芽用特性的综合评价体系,并据此对供试绿豆材料的芽用特性进行综合排序,筛选出了适宜生产绿豆芽菜的绿豆品种,以期为绿豆芽用品种资源的发掘和豆芽生产专用优质绿豆品种的选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的 67 份绿豆材料均来自江苏省农业科学院经济作物研究所,品种名称及产地信息见表 1,种子收获后保存于 4 ℃。

挑选大小一致、健康饱满的绿豆种子,加入体积分数为 1% 的次氯酸钠溶液浸泡消毒 15 min,随后采用超纯水冲洗种子 3 遍直至溶液 pH 值为中性。将消毒后的绿豆种子平铺至豆芽机(DYJ-S6108 双层豆芽机)的育苗盘中孵育,在 25 ℃ 下恒温培养,在处理 4 d 取样,经真空冷冻干燥后用研磨仪(GallopGrinder-48/96)粉碎并贮存于 -20 ℃,用于营养功能品质指标的测定。

1.2 试验方法

1.2.1 试验时间和地点 本试验时间为 2020 年 8 月至 2021 年 6 月,地点为江苏省南京市。

1.2.2 生长指标的测定 分别采用直尺和游标卡尺测量下胚轴长和下胚轴直径,采用万分之一天平测定可食鲜质量和全株鲜质量,将样品置于 105 ℃ 杀青 15 min 后,80 ℃ 烘干至恒质量,测定全株干质量。以上所有指标均重复 10 次。

可食率 = 可食鲜质量 / 全株鲜质量 × 100% ;

含水率 = (全株鲜质量 - 全株干质量) / 全株鲜质量 × 100% 。

1.2.3 营养品质和功能品质指标的测定 采用福林酚法^[19]测定总酚含量,以没食子酸(gallic acid)当量计算,单位为 mg/g(以干质量计,下同);采用氯化铝法^[19]测定类黄酮含量,以芸香苷当量计,单位为 mg/g;采用考马斯亮蓝法^[20]测定可溶性蛋白含量;采用蒽酮法^[21]测定可溶性糖含量;参考文献[22]的方法测定类胡萝卜素含量,以 β -胡萝卜素当量计;参考文献[23]等的方法测定 DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力。以上所有指标的测定均重复 3 次。

1.3 数据分析

利用 Excel 2016 软件进行数据整理,采用 SPSS

表 1 参试绿豆品种名称和产地

名称	产地	名称	产地	名称	产地	名称	产地
辽宁 701	辽宁	吉绿 11	吉林	泰引 2015004	泰国	郑州青皮	河南
辽宁 HN023	辽宁	吉绿 14 号	吉林	泰国 KP002	泰国	周口 2016	河南
苏绿 19-013	江苏	大樱哥 945	河北	泰国 KP006	泰国	郑州豆芽豆	河南
吉绿 10 号	吉林	潍坊 535	山东	清迈 205	泰国	南阳大绿豆	河南
保定 2013	河北	白城 13 号	吉林	清迈 306	泰国	南阳粉皮青	河南
保定 6 号	河北	白城 15 号	吉林	皖资 208	安徽	南阳粉条青	河南
苑绿 5 号	山西	品绿 2018	北京	皖资 102	安徽	开封大绿豆	河南
苑绿 6 号	山西	品 132-17	北京	皖资 107	安徽	开封豆芽豆	河南
渝绿 9 号	重庆	苏绿 19-118	江苏	皖资 108	安徽	开封青籽绿豆	河南
渝绿 10 号	重庆	苏绿 336	江苏	冀绿 446	河北	河南周口绿	河南
品绿 2014	北京	苏绿 802	江苏	冀绿 9 号	河北	四川大籽绿豆	四川
冀绿 13 号	河北	皖绿 234	安徽	保定 1028	河北	重庆农家种	重庆
潍绿 5095	山东	冀绿 14 号	河北	保定 2015	河北	重庆三峡绿豆	重庆
皖绿 3 号	安徽	沧州 6 号	河北	石家庄 2 号	河北	化西 2019	江苏
辽绿 9B02	辽宁	沧州 12 号	河北	石家庄 6 号	河北	苏绿 1 号	江苏
同 11445	山西	泰引 201501	泰国	河南 302	河南	苏绿 7 号	江苏
张绿 2 号	河北	泰引 2015005	泰国	河南大绿豆	河南		

26.0 软件进行方差分析、主成分分析及隶属函数分析等。试验结果采用“平均值±标准差”表示,所有差异显著性分析均基于 $\alpha=0.05$ 水平。利用主成分分析法和模糊数学法对绿豆芽菜的芽用特性进行综合评价。在计算绿豆芽菜的芽用特性隶属值时,使用公式(1)对其进行数值化处理,分别利用公式(2)和公式(3)计算各综合指标的权重系数和综合评价价值,之后采用加权求和的方法按照公式(4)计算出绿豆芽用特性综合指标值(sprouts quality index,SQI)。

$$f(X_i) = (X_i - X_{i,\min}) / (X_{i,\max} - X_{i,\min}), i = 1, 2, 3, \dots, n. \tag{1}$$

式中: f 代表隶属函数值; X_i 表示第*i*个指标值; $X_{i,\max}$ 表示第*i*个指标的最大值; $X_{i,\min}$ 表示第*i*个指标的最小值。隶属函数值越大,表示绿豆芽菜品质越高,其对应的绿豆品种更适宜应用于生产绿豆芽菜。

$$w_i = p_i / \sum_{i=1}^4 p_i, i = 1, 2, 3, 4. \tag{2}$$

式中: w_i 表示第*i*个主成分的权重系数,即其在所有指标中的重要程度; p_i 代表第*i*个主成分的贡献率。

$$C_i = ZY_i, i = 1, 2, 3, 4. \tag{3}$$

式中: C_i 表示第*i*个主成分的综合指标值; Z 为主成分分析中载荷矩阵系数; Y_i 为 $f(X_i)$ 经标准化处理后的值。

$$SQI = \sum_{i=1}^4 C_i w_i, i = 1, 2, 3, 4. \tag{4}$$

式中: C_i 、 w_i 分别表示第*i*个主成分的综合指标值和权重系数。

2 结果与分析

2.1 不同品种绿豆芽菜的外观及生长特性分析

由表2、表3可知,不同品种绿豆芽菜的下胚轴长、下胚轴直径的差异较大,下胚轴长和下胚轴直径大于平均值的种质分别占56.72%和58.21%。下胚轴长的变幅在38.43~93.14 mm之间,平均为69.15 mm,变异系数为19.34%。其中,周口2016绿豆芽菜的下胚轴显著高于其他品种。下胚轴直径变化范围为1.50~2.51 mm,平均为2.19 mm,变异系数为9.88%,其中,吉绿14号绿豆芽菜的下胚轴直径显著高于其他品种。与李振华等研究相比,本研究测得的下胚轴长偏大、下胚轴直径偏小,这可能是由培养环境及品种差异造成的^[24]。不同品种绿豆芽菜的含水率变化范围为80.15%~93.34%,平均为86.32%,品种间变异系数较小,仅为3.24%,其中,苏绿7号绿豆芽菜的含水率最高,93.34%。供试绿豆芽菜的可食鲜质量变化范围为0.17~0.48 g,平均为0.32 g,品种间变异系数为19.97%,这可能与不同芽菜根部组织生长速度不一致有关。不同品种绿豆芽菜的可食率差异性较小,变异系数仅为2.18%,其中吉绿10号绿豆芽菜的

表 2 不同品种绿豆芽菜的生长指标分析

绿豆品种	含水率(%)		下胚轴长(mm)		下胚轴直径(mm)		全株鲜质量(g/株)		可食鲜质量(g/株)		可食率(%)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
G011	86.52	1.26	65.11	7.16	1.98	0.12	0.33	0.04	0.28	0.04	86.34	7.21
G019	90.68	2.12	69.74	6.56	1.86	0.11	0.26	0.03	0.23	0.03	87.70	3.05
G049	89.64	1.01	66.63	5.69	1.86	0.12	0.30	0.03	0.25	0.03	83.59	2.76
G051-1	92.04	2.19	68.48	5.56	1.72	0.14	0.24	0.05	0.21	0.03	93.94	5.31
G051-2	91.80	2.29	82.65	6.19	1.73	0.13	0.26	0.03	0.23	0.07	87.18	20.41
G052	85.10	2.15	77.17	9.50	2.21	0.19	0.46	0.07	0.39	0.06	85.63	2.38
G053	84.51	2.97	74.64	7.83	2.05	0.24	0.40	0.09	0.34	0.08	85.29	1.97
G054	91.42	1.85	70.85	9.23	1.50	0.12	0.20	0.02	0.17	0.02	83.99	2.44
G056	81.62	1.20	73.32	11.62	2.13	0.12	0.48	0.08	0.41	0.07	86.01	4.12
G060	82.66	1.89	71.01	13.49	2.14	0.13	0.44	0.07	0.38	0.06	85.65	3.54
G087	82.37	1.79	70.52	9.35	2.20	0.17	0.48	0.09	0.41	0.08	85.08	2.55
G090	83.86	1.56	86.07	6.13	1.88	0.17	0.37	0.04	0.30	0.03	80.11	2.71
G099-1	82.01	1.40	79.71	7.73	2.04	0.13	0.39	0.04	0.33	0.04	84.45	2.92
G099-2	85.46	2.94	80.69	6.39	1.94	0.14	0.38	0.05	0.31	0.05	83.44	4.45
G102-1	82.42	2.28	75.93	7.71	2.23	0.16	0.51	0.07	0.43	0.06	84.65	2.99
G102-2	83.68	1.51	74.02	10.71	2.17	0.39	0.50	0.06	0.43	0.05	85.94	2.60
G109	83.08	1.25	40.02	7.93	2.46	0.21	0.37	0.05	0.32	0.05	85.91	2.67
G110	81.66	1.75	56.25	6.82	2.47	0.25	0.42	0.12	0.36	0.05	88.05	13.79
G136	85.76	2.79	58.94	6.86	2.51	0.18	0.38	0.04	0.33	0.04	86.68	2.91
G137	85.72	2.25	51.13	9.49	2.31	0.26	0.41	0.05	0.35	0.04	85.74	4.45
G139	89.31	2.39	42.03	5.39	2.13	0.20	0.22	0.03	0.18	0.03	85.59	2.95
G145	84.97	2.51	51.68	5.46	2.34	0.22	0.39	0.05	0.34	0.05	86.13	2.30
G147	90.81	2.34	43.06	5.42	2.38	0.22	0.32	0.04	0.27	0.04	85.16	2.51
G150	87.51	2.98	38.43	5.40	2.36	0.16	0.35	0.05	0.30	0.05	85.92	2.32
G152	84.96	1.90	45.94	5.05	2.44	0.22	0.38	0.04	0.33	0.04	86.21	3.41
G160	85.84	1.64	56.37	7.48	2.28	0.20	0.35	0.04	0.31	0.04	89.12	1.63
G164	85.95	2.21	52.20	7.15	1.92	0.27	0.27	0.04	0.23	0.04	85.19	3.25
G165	85.98	2.50	51.12	6.01	2.20	0.22	0.31	0.04	0.28	0.03	88.99	7.37
G168	89.87	1.25	64.27	8.87	1.74	0.20	0.23	0.03	0.19	0.02	86.01	4.23
G177	86.31	2.33	62.67	5.73	2.04	0.21	0.34	0.05	0.29	0.04	85.51	2.89
G178	85.51	2.19	73.53	5.32	2.25	0.21	0.42	0.04	0.36	0.04	86.61	1.89
G179	87.56	2.94	66.20	7.57	2.12	0.17	0.41	0.04	0.35	0.04	85.24	3.43
G180-1	87.76	1.22	66.84	10.75	2.47	0.17	0.38	0.04	0.33	0.04	87.50	3.06
G180-2	86.17	2.48	65.13	7.51	2.39	0.23	0.36	0.06	0.31	0.05	86.69	1.79
G181-1	87.85	2.77	68.69	7.17	2.32	0.16	0.41	0.05	0.34	0.04	84.99	2.09
G181-2	85.91	2.62	64.18	6.84	2.41	0.18	0.40	0.04	0.34	0.04	84.57	2.31
G182	82.90	2.63	72.79	6.06	2.43	0.19	0.38	0.04	0.33	0.04	87.17	2.26
G188-1	84.53	2.73	74.37	6.12	2.40	0.12	0.37	0.04	0.33	0.03	87.85	1.42
G188-2	84.09	2.32	73.14	6.13	2.32	0.18	0.36	0.05	0.32	0.05	87.87	1.77
G308	89.74	2.53	76.12	8.23	2.43	0.18	0.40	0.06	0.35	0.05	87.35	1.40
G323	89.38	2.07	47.22	8.03	2.42	0.20	0.33	0.04	0.29	0.04	86.28	2.34
G324	86.95	2.12	57.67	8.49	2.02	0.18	0.24	0.04	0.20	0.03	85.24	1.66
G330	88.84	2.29	57.14	7.29	2.21	0.20	0.29	0.03	0.25	0.03	85.94	2.30
G349	88.78	1.67	82.69	7.55	2.01	0.15	0.35	0.03	0.30	0.03	86.89	2.40

表 2(续)

绿豆品种	含水率(%)		下胚轴长(mm)		下胚轴直径(mm)		全株鲜质量(g/株)		可食鲜质量(g/株)		可食率(%)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
G350	87.09	2.46	76.39	7.02	2.02	0.15	0.30	0.04	0.26	0.04	88.41	1.80
G364	84.65	2.18	80.76	8.15	2.26	0.17	0.44	0.07	0.38	0.06	86.79	2.46
G365	88.06	2.55	85.12	6.72	2.13	0.18	0.37	0.05	0.31	0.04	86.03	2.19
G369	88.40	1.67	85.98	7.44	2.19	0.18	0.38	0.05	0.32	0.04	84.78	7.37
G372	87.48	1.18	68.68	7.25	2.29	0.21	0.34	0.03	0.30	0.03	89.13	2.59
G376	85.55	1.01	73.51	9.71	2.33	0.19	0.42	0.04	0.37	0.04	88.87	1.86
G383	91.15	1.36	79.19	6.19	1.80	0.18	0.28	0.04	0.25	0.03	89.12	2.36
M104	85.10	1.83	77.09	6.36	2.20	0.20	0.35	0.06	0.31	0.05	87.84	1.80
M174	87.67	2.09	93.14	7.53	2.10	0.18	0.40	0.06	0.35	0.05	86.10	3.72
M322	85.51	1.57	82.27	6.96	2.13	0.21	0.35	0.05	0.31	0.05	88.88	2.48
M341	78.54	1.33	81.65	9.74	2.48	0.17	0.56	0.07	0.48	0.06	85.79	2.19
M354	85.69	1.02	67.49	10.20	2.30	0.24	0.39	0.03	0.34	0.03	86.41	3.07
M359	84.33	2.34	78.96	8.08	2.30	0.19	0.40	0.05	0.35	0.05	87.73	1.38
M367	86.02	2.14	88.08	9.42	2.20	0.16	0.42	0.04	0.36	0.04	86.18	3.36
M368	85.05	1.11	73.22	7.13	2.37	0.17	0.39	0.05	0.33	0.04	85.06	2.90
M369	83.37	2.71	71.12	6.32	2.47	0.18	0.43	0.05	0.37	0.04	85.77	1.90
M375	85.60	2.10	79.11	8.91	2.20	0.18	0.43	0.06	0.38	0.05	87.26	2.84
M402	65.93	1.80	66.80	9.42	2.15	0.19	0.41	0.07	0.36	0.06	86.80	2.85
M8055-1	50.15	2.35	41.94	12.84	2.11	0.16	0.25	0.04	0.23	0.04	90.19	7.64
M8055-2	84.97	2.06	89.00	7.11	2.20	0.18	0.39	0.06	0.35	0.05	89.51	2.17
M8056	84.59	2.09	71.11	7.34	2.34	0.15	0.45	0.05	0.39	0.04	86.00	2.01
M8061	85.85	2.73	90.90	6.02	2.28	0.13	0.51	0.05	0.44	0.04	86.48	2.26
M8071	93.34	2.99	85.37	6.17	2.31	0.15	0.47	0.06	0.41	0.05	86.83	3.08

表 3 不同品种绿豆芽菜芽用特性的变异分析

芽用特性指标	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数(%)
含水率(%)	93.34	80.15	86.32	2.80	3.24
下胚轴长(mm)	93.14	38.43	69.15	13.37	19.34
下胚轴直径(mm)	2.51	1.50	2.19	0.22	9.88
全株鲜质量(g)	0.56	0.20	0.37	0.08	20.16
可食鲜质量(g)	0.48	0.17	0.32	0.06	19.97
可食率(%)	0.94	0.80	0.86	0.02	21.85
总酚含量(mg/g)	10.86	4.04	7.31	1.28	17.48
总黄酮含量(mg/g)	2.35	0.43	1.04	0.42	40.10
可溶性糖含量(mg/g)	79.52	23.97	48.16	12.80	26.59
可溶性蛋白含量(mg/g)	17.26	8.96	13.58	2.01	14.84
类胡萝卜素含量(μg/g)	17.94	4.09	10.76	3.50	32.52
DPPH 清除能力(%)	96.42	79.12	90.78	3.10	3.41
ABTS 清除能力(%)	98.70	58.56	83.65	8.96	10.71

可食率最高,为94%。

2.2 不同品种绿豆芽菜的营养功能品质分析

2.2.1 不同品种绿豆芽菜的功能性成分分析

类物质是植物体内最重要的一类次生代谢物质之一,且种类繁多。大量研究表明,酚类物质具有多种保健作用和药理功能,如清除自由基、抗氧化、抗诱变、抑制肿瘤、提高毛细血管通透性等,并且表现出高效、低毒、高生物利用率等优点^[3]。已有研究从绿豆种子和绿豆芽菜中鉴定出12种酚酸物质^[25],且不同种皮色的绿豆其总黄酮含量不同^[26]。本研究发现,67份绿豆芽菜的总酚含量差异较大,变化范围为4.04~10.86 mg/g,平均含量为7.31 mg/g,品种间变异系数为17.49%。其中,有32份绿豆芽菜的总酚含量在平均值以上,35份绿豆芽菜的总酚含量低于平均值。此外,由4可知,苏绿7号绿豆芽菜的总酚含量最高(10.86 mg/g)。Xue 等研究表明,绿豆芽菜中总酚含量最高为5.79 mg/g^[27],而Huang 等报道绿豆芽菜的总酚含量为0.63 mg/g^[28],这可能与提取方法、取样时间及品种间差异性有关。黄酮类化合物是绿豆和绿豆芽菜中的主要生物活性成分之一^[29]。不同品种绿豆芽菜的总黄酮含量存在较

大差异,品种间变异系数较大,为 40.10%,其中,苏绿 7 号绿豆芽菜类黄酮含量为 2.35 mg/g,显著高于其他品种。以上结果表明,苏绿 7 号绿豆芽菜的功能性成分含量较高。酚类物质具有抗氧化、抗肿瘤、预防或减少疾病的发生等功效,研究表明豆类是酚类的重要来源^[30]。目前,国内对绿豆芽菜抗氧化性能的研究多聚焦在单一品种或与其他豆科植物做比较研究,而针对不同绿豆萌发后抗氧化性能差异的报道较少。本研究中以 DPPH、ABTS 自由基清除率 2 个指标作为绿豆芽菜抗氧化能力评价指标。由表 4 可知,67 份绿豆芽菜的 DPPH、ABTS 自由基清除率存在显著差异。受试品种绿豆芽菜的 DPPH、ABTS 自由基清除率变化范围分别为 79.12%~96.42%、58.56%~98.70%。参试 67 份绿豆芽菜的 DPPH 自由基清除率均较高,变异系数为 3.41%,平均含量为 90.78%,其中,G137 绿豆芽菜的 DPPH 自由基清除率最高,为 96.42%,是芽菜 DPPH 清除率最低的 G308 绿豆芽菜的 1.22 倍,且两者之间达显著差异水平。苏绿 1 号和苏绿 7 号绿豆芽菜的 DPPH、ABTS 自由基清除率均显著高于其他品种,表明苏绿 1 号、苏绿 7 号适宜生产高抗氧化能力的绿豆芽菜。

类胡萝卜素是由叶黄素、玉米黄质、番茄红素等组成的一类生物活性化合物,具有良好的抗氧化能力,食用富含类胡萝卜素的食物可以降低心血管疾病、癌症和其他退行性疾病的发病率^[31]。有研究报道,豌豆芽苗菜成熟后类胡萝卜素含量为 0.372 mg/g,绿豆萌发 6 d 后类胡萝卜素含量达 36.55 $\mu\text{g/g}$ ^[32]。但绿豆芽菜类胡萝卜素含量在不同品种间的差异还未被报道。由表 3、表 4 可知,不同品种绿豆芽菜的类胡萝卜素含量存在较大差异,平均含量为 10.76 $\mu\text{g/g}$,变异系数达 32.52%。类胡萝卜素含量大于平均含量的品种占 38.81%,其中,泰引 2015004 绿豆芽菜类胡萝卜素含量最高,为 17.94 $\mu\text{g/g}$,是类胡萝卜素含量最低的品绿 132-17 绿豆芽菜的 4.39 倍,且两者之间的差异达到极显著水平。

2.2.2 不同品种绿豆芽菜的基本营养成分分析
研究表明,萌发有利于提高绿豆的蛋白质含量及加工特性同时有利于大分子亚基的水解和多肽的生成^[33],从而提高其营养价值。据报道,不同芽菜中可溶性蛋白含量不同,萝卜芽苗菜中可溶性蛋白含量约 8 g/kg(以鲜质量计),大豆芽菜中约 15 g/kg

(以鲜质量计),绿豆芽菜中约 10 g/kg(以鲜质量计),南瓜芽菜中约 25 g/kg(以鲜质量计)^[34]。本研究发现,不同品种绿豆形成的芽菜可溶性蛋白含量有较大差异,且有些品种之间达到显著差异水平。参试绿豆芽菜的可溶性蛋白含量均值为 13.58 mg/g,其中,苏绿 7 号绿豆芽菜可溶性蛋白含量为 17.26 mg/g,显著高于其他品种(表 4)。

熊先清发现,绿豆经 50 mg/L Zn^{2+} 溶液浸种 8 h 并水培 96 h,其可溶性糖含量达 6.62 mg/kg(以鲜质量计)^[35];谭仁豪发现,绿豆萌发 7 d 后可溶性糖含量达到 0.505 mg/g(以鲜质量计)^[36]。然而,不同品种绿豆芽菜间可溶性糖含量差异的研究较少。本研究发现,不同品种绿豆芽菜可溶性糖含量存在较大差异,变化范围在 23.97~79.52 mg/g 内,平均含量为 48.46 mg/g,变异系数为 26.59%。

2.3 绿豆芽菜的芽用品质综合评价

2.3.1 主成分分析 对 67 份绿豆芽菜的 13 个芽用特性指标进行主成分分析,依据特征值 > 1 的原则提取了前 4 个主成分,分别为特征值、方差贡献率、累计方差和贡献率。由表 5 可知,4 个主成分的特征值分别为 3.520、2.340、1.700 和 1.330,4 个主成分的方差贡献率分别为 24.114%、17.915%、14.959% 和 11.435%。其中,第一主成分的方差贡献率最大,代表了绿豆芽菜芽用品质特性原始信息量的 24.114%,是最重要的主成分,其余主成分对应的方差贡献率依次减少,表示其重要性呈减弱趋势。这 4 个主成分的累计贡献率达到 68.420%,即这 4 个主成分能代表原有的 13 个芽用特性指标的大部分原始信息。因此,接下来用这 4 个独立的综合指标代替原有的 13 个单项指标对绿豆芽菜的芽用特性进行综合评价。由表 5 可知,决定第一主成分的主要指标是可食鲜质量、全株鲜质量和下胚轴直径,因此可称其为“产量因子”。决定第二主成分的指标是总酚含量、ABTS 清除能力、类胡萝卜素含量,因此,可把第二主成分称为“功能性品质因子”。决定第三主成分的指标主要是可溶性糖、可溶性蛋白含量,因此可把第三主成分称为“基本营养品质因子”。决定第四主成分的指标主要是下胚轴长,因此可称其为“外观因子”。

将 4 个独立的综合指标分别用 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 表示。由表 5 可知,它们对应的拟合方程分别如下,其中, $Y_1 \sim Y_{13}$ 分别表示将绿豆芽菜 13 个芽用特性指标的原始值先用隶属函数处理,再经过标准化处理

表 4 不同品种绿豆芽菜的营养品质分析

绿豆 品种	功能性成分						抗氧化能力				基本营养成分			
	总酚含量 (mg/g)		总黄酮含量 (mg/g)		类胡萝卜素含量 (μg/g)		DPPH 自由基 清除率(%)		ABTS 自由基 清除率(%)		可溶性糖含量 (mg/g)		可溶性蛋白 含量(mg/g)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
G011	4.04	0.57	1.38	0.45	6.18	0.39	91.35	0.65	62.14	2.08	36.11	3.59	12.56	2.79
G019	6.57	0.22	1.60	0.13	14.86	0.79	92.91	0.56	82.20	2.11	29.43	2.97	12.95	2.47
G049	6.33	0.76	0.92	0.04	12.48	0.59	91.63	1.10	82.28	2.56	41.71	2.68	12.99	2.40
G051-1	6.14	0.81	1.00	0.18	14.36	1.21	90.16	2.08	72.55	2.93	41.00	0.99	14.90	1.55
G051-2	6.88	0.21	0.76	0.12	15.11	0.97	92.54	1.46	71.70	1.87	23.97	1.83	13.01	2.40
G052	6.05	0.25	1.10	0.03	8.17	0.89	92.19	3.10	76.76	2.07	45.45	2.17	12.74	1.39
G053	6.88	0.73	0.94	0.25	6.81	0.63	92.98	2.19	72.99	1.75	41.71	1.16	12.44	1.02
G054	9.68	0.27	1.35	0.07	17.58	1.48	94.42	2.18	80.64	1.22	28.08	2.91	12.83	0.20
G056	6.60	0.13	0.87	0.22	7.24	0.82	91.27	1.46	75.30	2.00	45.62	3.35	14.24	0.46
G060	5.31	0.23	0.59	0.15	6.45	0.25	90.93	0.94	72.21	1.50	43.62	1.88	14.17	1.23
G087	6.65	0.81	1.20	0.08	5.94	0.07	90.77	3.87	76.58	1.20	50.92	4.17	13.43	1.79
G090	5.84	0.13	1.19	0.05	7.00	0.31	92.27	0.77	64.97	2.68	45.54	3.03	15.46	0.81
G099-1	5.45	0.14	0.92	0.25	7.39	0.51	92.83	0.08	78.70	2.09	36.11	3.59	11.32	0.19
G099-2	5.08	0.52	1.12	0.07	9.33	0.43	92.97	1.33	81.55	1.54	29.43	2.97	9.64	0.38
G102-1	7.06	0.98	0.75	0.05	6.71	0.08	93.81	4.21	89.32	3.88	41.71	2.68	11.00	0.60
G102-2	6.74	0.48	1.07	0.06	6.27	0.14	93.21	5.55	77.24	2.47	41.00	0.99	12.54	0.17
G109	7.04	0.75	0.88	0.11	9.43	0.71	94.01	3.40	84.60	2.33	23.97	1.83	12.90	0.47
G110	7.18	1.12	0.87	0.14	8.10	0.81	96.42	0.88	93.80	0.97	45.45	2.17	12.13	0.77
G136	7.26	1.57	0.91	0.12	6.31	0.38	95.87	0.56	80.63	4.09	41.71	1.16	10.52	1.18
G137	8.11	0.09	1.52	0.57	13.34	0.98	96.16	1.27	85.78	3.65	28.08	2.91	10.93	0.37
G139	8.77	0.32	1.79	0.42	10.47	0.40	95.62	2.27	85.66	0.55	45.62	3.35	10.07	0.98
G145	6.60	0.92	0.92	0.05	10.79	0.63	92.82	4.51	79.57	2.12	43.62	1.88	11.52	1.44
G147	8.20	0.81	0.53	0.23	16.77	3.43	92.88	1.22	79.27	1.71	50.92	0.39	11.70	1.32
G150	7.92	0.54	0.60	0.13	14.84	1.13	93.24	0.27	78.11	1.36	45.54	3.03	15.71	0.73
G152	4.07	0.60	1.22	0.06	4.09	0.30	85.86	2.17	58.56	2.15	58.50	1.29	12.76	0.54
G160	6.96	0.45	1.37	0.10	8.79	0.52	87.64	4.36	75.47	1.97	41.34	3.49	10.37	0.78
G164	8.14	1.63	0.88	0.27	9.41	0.42	90.53	1.66	70.20	3.72	38.43	1.78	9.76	0.41
G165	6.94	0.67	1.05	0.21	7.92	0.26	91.26	2.37	66.63	2.91	62.40	5.81	13.85	1.40
G168	5.97	0.26	1.37	0.06	9.20	0.44	91.04	2.69	70.06	1.34	34.75	5.23	8.96	0.72
G177	5.80	0.81	1.13	0.12	10.47	1.39	86.08	3.00	70.26	3.64	35.84	1.78	11.39	1.59
G178	6.49	0.27	0.82	0.10	6.81	0.05	81.78	2.32	77.88	2.75	37.50	1.61	12.21	1.19
G179	7.51	0.74	1.38	0.13	13.92	0.75	90.59	2.13	75.00	0.31	27.42	1.75	13.51	0.65
G180-1	7.27	0.66	0.47	0.06	12.62	1.44	91.67	0.59	91.67	0.59	43.45	4.23	16.89	1.69
G180-2	5.43	0.42	0.61	0.10	9.25	0.24	84.38	4.06	84.38	4.06	66.67	1.59	15.76	1.18
G181-1	7.61	0.51	0.88	0.27	17.94	1.37	89.59	1.27	89.59	1.27	72.83	2.84	15.29	1.25
G181-2	8.25	0.81	0.67	0.21	8.29	0.99	90.46	1.20	90.46	1.20	66.35	2.19	15.61	0.26
G182	6.21	0.73	0.99	0.06	15.78	0.96	88.43	2.59	88.43	2.59	68.99	4.21	15.16	0.62
G188-1	7.01	0.89	1.13	0.12	11.01	0.53	91.48	0.54	91.49	0.54	65.23	0.78	15.87	0.85
G188-2	6.34	0.95	1.20	0.10	6.93	0.44	91.77	0.42	91.77	0.42	51.13	2.64	14.52	1.02
G308	7.70	0.80	0.63	0.13	8.91	0.98	79.12	2.85	79.12	2.85	56.46	2.09	15.80	0.96
G323	7.16	0.18	1.77	0.57	7.90	1.16	92.95	5.98	89.61	0.22	44.62	1.61	14.85	0.69
G324	7.70	0.28	0.73	0.52	12.11	1.18	85.19	2.25	85.19	2.25	44.79	2.36	15.80	1.36
G330	7.36	0.33	0.65	0.21	10.69	0.86	90.37	0.27	90.37	0.27	44.96	4.01	16.05	1.22

表 4(续)

绿豆 品种	功能性成分						抗氧化能力				基本营养成分			
	总酚含量 (mg/g)		总黄酮含量 (mg/g)		类胡萝卜素含量 (μg/g)		DPPH 自由基 清除率(%)		ABTS 自由基 清除率(%)		可溶性糖含量 (mg/g)		可溶性蛋白 含量(mg/g)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
G349	7.19	1.37	1.30	0.22	8.57	0.23	87.68	4.44	87.68	4.44	41.18	1.57	16.03	1.69
G350	7.46	0.47	0.76	0.11	15.10	1.76	90.92	2.04	90.92	2.04	51.07	2.46	12.67	0.82
G364	7.01	1.54	0.61	0.20	17.14	0.87	85.72	5.96	89.05	0.99	79.52	1.77	13.43	1.77
G365	8.24	1.15	1.14	0.20	9.52	1.57	88.44	2.05	88.44	2.05	63.40	3.94	14.05	1.84
G369	8.73	0.52	0.46	0.13	10.57	0.29	91.61	0.99	91.61	0.99	53.93	2.36	13.13	0.54
G372	9.48	0.67	0.76	0.06	7.90	1.16	91.77	0.33	91.77	0.33	33.29	3.83	10.52	1.03
G376	8.24	0.86	1.04	0.22	12.11	1.18	86.92	1.08	86.92	1.08	53.35	2.57	16.29	2.15
G383	7.73	0.38	1.18	0.48	10.69	0.86	91.77	0.73	91.77	0.73	39.03	2.73	13.61	0.25
M104	6.95	0.33	0.80	0.16	8.57	0.23	90.94	0.32	90.94	0.32	62.46	5.54	12.91	0.57
M174	8.59	0.20	1.31	0.31	15.10	1.76	91.15	0.22	91.15	0.22	58.31	1.84	14.84	1.03
M322	7.79	0.68	0.91	0.09	17.14	0.87	91.96	0.48	91.96	0.48	54.05	4.57	14.61	1.71
M341	7.45	0.33	0.43	0.12	9.52	1.57	89.65	1.97	89.65	1.97	67.85	3.81	17.26	1.31
M354	8.85	0.50	1.10	0.23	10.57	0.29	91.68	1.08	91.68	1.08	52.24	1.91	15.08	2.34
M359	7.86	1.31	1.87	0.30	7.90	1.16	91.21	0.33	91.21	0.33	67.64	3.86	13.95	1.54
M367	7.80	0.61	0.73	0.34	12.11	1.18	90.46	0.41	90.46	0.41	57.54	2.23	13.76	3.32
M368	7.88	1.87	1.01	0.18	10.69	0.86	90.65	0.51	90.65	0.51	55.77	3.05	14.71	1.32
M369	7.20	0.70	0.51	0.05	8.57	0.23	92.63	2.01	92.63	2.01	54.85	1.25	15.54	0.95
M375	7.86	0.65	2.15	0.53	15.10	1.76	91.00	0.56	91.00	0.56	72.84	2.37	10.52	1.03
M402	9.78	0.61	0.63	0.10	17.14	0.87	90.94	0.71	90.94	0.71	50.38	4.99	16.29	2.15
M8055-1	8.41	1.58	0.83	0.43	9.52	1.57	90.14	0.54	90.14	0.54	61.99	0.91	14.61	1.65
M8055-2	8.16	0.69	0.78	0.16	10.57	0.29	88.49	0.40	88.49	0.40	54.20	1.64	12.91	0.57
化西 2019	8.16	0.69	1.08	0.22	14.32	1.58	88.49	0.40	88.49	0.40	54.20	1.64	14.84	1.03
苏绿 1 号	10.02	0.65	2.23	0.43	15.26	1.75	91.89	0.24	98.70	0.72	44.23	2.09	14.61	1.71
苏绿 7 号	10.86	0.41	2.35	0.34	13.46	1.39	93.01	0.31	97.77	2.80	35.12	4.27	17.26	1.31

表 5 不同品种绿豆芽菜芽用特性指标的主成分特征向量描述及载荷矩阵

指标	载荷			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
含水率	-0.250	0.100	-0.024	0.159
下胚轴长	-0.045	-0.026	0.038	0.623
下胚轴直径	0.267	0.115	0.047	-0.330
全株鲜质量	0.279	-0.021	-0.095	0.200
可食鲜质量	0.277	-0.008	-0.080	0.187
可食率	-0.098	0.116	0.220	-0.146
总酚含量	0.006	0.389	-0.115	-0.066
总黄酮含量	-0.018	0.116	-0.283	0.187
可溶性糖含量	0.060	0.058	0.321	-0.031
可溶性蛋白含量	-0.014	0.119	0.283	0.086
类胡萝卜素含量	-0.152	0.274	0.059	0.077
DPPH 清除能力	0.113	0.161	-0.448	-0.186
ABTS 清除能力	0.076	0.355	-0.011	-0.052
特征值	3.520	2.340	1.700	1.330
贡献率	24.114	17.915	14.959	11.435
累计贡献率	24.114	42.029	56.987	68.423

之后的值。

$$C_1 = 0.006Y_1 - 0.018Y_2 + 0.113Y_3 + 0.076Y_4 + 0.06Y_5 - 0.014Y_6 - 0.152Y_7 - 0.25Y_8 - 0.045Y_9 + 0.267Y_{10} + 0.279Y_{11} + 0.277Y_{12} - 0.098Y_{13};$$

$$C_2 = 0.389Y_1 + 0.116Y_2 + 0.161Y_3 + 0.355Y_4 + 0.058Y_5 + 0.119Y_6 + 0.274Y_7 + 0.1Y_8 - 0.026Y_9 + 0.115Y_{10} - 0.021Y_{11} - 0.008Y_{12} + 0.116Y_{13};$$

$$C_3 = -0.115Y_1 + 0.187Y_2 - 0.186Y_3 - 0.052Y_4 - 0.031Y_5 + 0.086Y_6 + 0.077Y_7 + 0.159Y_8 + 0.623Y_9 - 0.33Y_{10} + 0.2Y_{11} + 0.187Y_{12} - 0.146Y_{13};$$

$$C_4 = -0.006Y_1 + 0.187Y_2 - 0.186Y_3 - 0.052Y_4 - 0.031Y_5 + 0.086Y_6 - + 0.077Y_7 + 0.159Y_8 + 0.623Y_9 - 0.33Y_{10} + 0.2Y_{11} + 0.187Y_{12} - 0.146Y_{13}。$$

2.3.2 隶属函数分析和权重的确定 根据不同品种绿豆芽菜的主成分分析结果,由表 6、表 7 可知,分别利用公式(1)~(3)计算每种绿豆芽菜芽用特性指标的隶属函数值、权重系数和综合指标值。4 个综合指标的权重分别为 0.352、0.262、0.219 和

0.167,表明第 1 个综合指标的贡献率最高,其他综合指标的贡献率依次减小。由表 6 可知,每个品种绿豆芽菜的隶属函数值存在差异。在综合指标 C_1 条件下,M341 绿豆芽菜的 $f(X_1)$ 最大(1.000),表明其在“产量因子”指标下的表现最好。依据 $f(X_1)$ 值筛选出“产量因子”指标下排名前 10 的品种为南阳大绿豆、辽绿 9B02、吉绿 11、同 11445、品绿 2014、开封青籽绿豆、渝绿 9 号、苏绿 1 号、吉绿 14 号和泰国 KP002。类似地分析综合指标,分别得到在“功能性

成分因子”“基本营养品质因子”和“外观因子”下排名前 10 的绿豆品种(图 1)。其中,产量、基本营养品质与外观品质均较好的品种为南阳大绿豆,产量、功能性成分与外观品质均较好的品种为苏绿 1 号,而基本营养成分、功能性成分与外观品质均较好的品种为周口 2016。

2.3.3 综合评价 结合权重系数,利用公式(4)计算不同品种绿豆芽菜的芽用特性综合指标值即 SQI 值,并根据其大小对受试绿豆芽菜的芽用特性进行

表 6 不同品种绿豆芽菜芽用特性的综合指标值

品种	综合指标值				品种	综合指标值			
	C_1	C_2	C_3	C_4		C_1	C_2	C_3	C_4
辽宁 701	0.17	0.42	-0.17	0.34	泰引 2015004	0.32	1.14	0.21	0.36
辽宁 HN023	-0.09	0.95	-0.24	0.39	泰国 KP002	0.48	0.98	0.13	0.18
苏绿 19-013	0.04	0.80	-0.12	0.37	泰国 KP006	0.37	0.99	0.29	0.31
吉绿 10 号	-0.26	0.85	0.20	0.35	清迈 205	0.41	1.04	0.14	0.28
保定 2013	-0.17	0.79	-0.14	0.55	清迈 306	0.40	0.89	-0.01	0.25
保定 6 号	0.48	0.68	-0.17	0.48	皖资 208	0.29	0.81	0.40	0.44
苑绿 5 号	0.37	0.63	-0.21	0.39	皖资 102	0.32	1.03	-0.20	0.01
苑绿 6 号	-0.28	1.11	-0.37	0.45	皖资 107	-0.01	0.88	0.28	0.19
渝绿 9 号	0.55	0.64	-0.08	0.45	皖资 108	0.15	0.99	0.12	0.08
渝绿 10 号	0.47	0.51	-0.01	0.37	冀绿 446	0.15	0.87	0.08	0.60
品绿 2014	0.58	0.65	-0.13	0.42	冀绿 9 号	0.08	1.03	0.07	0.33
冀绿 13 号	0.26	0.49	-0.12	0.66	保定 1028	0.37	0.98	0.40	0.51
潍绿 5095	0.40	0.56	-0.26	0.43	保定 2015	0.26	0.96	0.11	0.54
皖绿 3 号	0.27	0.59	-0.39	0.51	石家庄 2 号	0.31	1.01	-0.02	0.44
辽绿 9B02	0.67	0.77	-0.33	0.38	石家庄 6 号	0.29	1.02	-0.21	0.11
同 11445	0.59	0.68	-0.28	0.45	河南 302	0.37	1.03	0.23	0.41
张绿 2 号	0.46	0.87	-0.30	-0.20	河南大绿豆	-0.03	1.02	-0.08	0.46
吉绿 11	0.61	0.98	-0.26	-0.08	郑州青皮	0.34	0.89	0.09	0.29
吉绿 14 号	0.49	0.81	-0.35	-0.05	周口 2016	0.27	1.15	-0.01	0.69
大樱哥 945	0.41	1.05	-0.54	0.07	郑州豆芽豆	0.21	1.15	0.08	0.42
潍坊 535	0.07	1.07	-0.44	-0.16	南阳大绿豆	0.82	0.91	0.25	0.46
白城 13 号	0.42	0.80	-0.20	0.03	南阳粉皮青	0.39	1.10	-0.04	0.25
白城 15 号	0.18	1.04	-0.09	-0.12	南阳粉条青	0.45	1.02	-0.05	0.42
品绿 2018	0.28	1.02	-0.01	-0.13	开封大绿豆	0.38	0.98	0.06	0.54
品绿 132-17	0.42	0.37	0.15	0.06	开封豆芽豆	0.42	1.01	0.02	0.31
苏绿 19-118	0.26	0.72	-0.07	0.13	开封青籽绿豆	0.58	0.95	0.05	0.20
苏绿 336	0.08	0.67	-0.21	0.06	河南周口绿	0.39	1.12	-0.17	0.54
苏绿 802	0.23	0.70	0.10	0.00	四川大籽绿豆	0.42	1.20	0.10	0.24
皖绿 234	-0.12	0.56	-0.28	0.30	重庆农家种	0.27	0.99	0.22	-0.27
冀绿 14 号	0.14	0.54	-0.02	0.35	重庆三峡绿豆	0.32	0.95	0.13	0.49
沧州 6 号	0.36	0.58	0.08	0.43	化西 2019	0.44	1.05	0.07	0.41
沧州 12 号	0.25	0.86	-0.24	0.44	苏绿 1 号	0.51	1.37	-0.32	0.77
泰引 201501	0.35	1.07	0.14	0.17	苏绿 7 号	0.36	1.48	-0.35	0.73
泰引 2015005	0.32	0.72	0.47	0.25					

表 7 不同品种绿豆芽菜芽用特性的隶属函数值

品种	隶属函数值				品种	隶属函数值			
	$f(X_1)$	$f(X_2)$	$f(X_3)$	$f(X_4)$		$f(X_1)$	$f(X_2)$	$f(X_3)$	$f(X_4)$
辽宁 701	0.41	0.05	0.37	0.59	泰引 2015004	0.54	0.69	0.74	0.61
辽宁 HN023	0.17	0.52	0.30	0.64	泰国 KP002	0.70	0.55	0.66	0.43
苏绿 19-013	0.30	0.39	0.42	0.62	泰国 KP006	0.59	0.56	0.83	0.55
吉绿 10 号	0.02	0.43	0.74	0.60	清迈 205	0.63	0.60	0.68	0.53
保定 2013	0.10	0.38	0.40	0.79	清迈 306	0.62	0.46	0.53	0.50
保定 6 号	0.69	0.27	0.37	0.72	皖资 208	0.52	0.39	0.93	0.68
苑绿 5 号	0.59	0.23	0.33	0.64	皖资 102	0.55	0.59	0.34	0.27
苑绿 6 号	0.00	0.66	0.17	0.69	皖资 107	0.25	0.46	0.81	0.44
渝绿 9 号	0.75	0.24	0.46	0.69	皖资 108	0.39	0.55	0.65	0.34
渝绿 10 号	0.68	0.12	0.53	0.62	冀绿 446	0.40	0.45	0.62	0.84
品绿 2014	0.78	0.25	0.41	0.67	冀绿 9 号	0.33	0.59	0.60	0.57
冀绿 13 号	0.49	0.11	0.41	0.89	保定 1028	0.59	0.55	0.93	0.75
潍绿 5095	0.62	0.17	0.28	0.67	保定 2015	0.49	0.53	0.64	0.78
皖绿 3 号	0.50	0.20	0.15	0.75	石家庄 2 号	0.54	0.57	0.52	0.69
辽绿 9B02	0.86	0.36	0.21	0.63	石家庄 6 号	0.52	0.59	0.33	0.36
同 11445	0.79	0.27	0.26	0.69	河南 302	0.59	0.59	0.76	0.65
张绿 2 号	0.67	0.45	0.24	0.07	河南大绿豆	0.23	0.58	0.46	0.71
吉绿 11	0.81	0.55	0.27	0.18	郑州青皮	0.56	0.47	0.62	0.54
吉绿 14 号	0.71	0.40	0.20	0.21	周口 2016	0.50	0.70	0.53	0.93
大樱哥 945	0.63	0.61	0.00	0.32	郑州豆芽豆	0.44	0.71	0.62	0.67
潍坊 535	0.32	0.63	0.10	0.10	南阳大绿豆	1.00	0.48	0.78	0.70
白城 13 号	0.64	0.39	0.34	0.29	南阳粉皮青	0.62	0.66	0.50	0.50
白城 15 号	0.42	0.60	0.45	0.14	南阳粉条青	0.67	0.59	0.48	0.67
品绿 2018	0.51	0.58	0.53	0.14	开封大绿豆	0.60	0.55	0.59	0.78
品绿 132-17	0.63	0.00	0.68	0.32	开封豆芽豆	0.64	0.57	0.56	0.56
苏绿 19-118	0.49	0.31	0.46	0.39	开封青籽绿豆	0.78	0.52	0.58	0.45
苏绿 336	0.33	0.27	0.33	0.32	河南周口绿	0.61	0.68	0.37	0.78
苏绿 802	0.46	0.30	0.63	0.26	四川大籽绿豆	0.64	0.75	0.63	0.49
皖绿 234	0.15	0.17	0.26	0.54	重庆农家种	0.50	0.56	0.75	0.00
冀绿 14 号	0.39	0.15	0.52	0.60	重庆三峡绿豆	0.55	0.52	0.67	0.73
沧州 6 号	0.59	0.19	0.62	0.68	化西 2019	0.66	0.61	0.61	0.65
沧州 12 号	0.48	0.44	0.30	0.69	苏绿 1 号	0.72	0.90	0.22	1.00
泰引 201501	0.58	0.63	0.67	0.42	苏绿 7 号	0.58	1.00	0.19	0.97
泰引 2015005	0.55	0.32	1.00	0.50					

排序,结果(表 8)表明,受试的 67 份绿豆种质中南阳大绿豆绿豆芽菜的芽用特性综合指标值最高,其芽用特性排名第一,而皖绿 234 绿豆芽菜的芽用特性综合指标值最低,其芽用特性排名最末。排名前 10 的绿豆品种依次为南阳大绿豆、苏绿 1 号、保定 1028、苏绿 7 号、四川大籽绿豆、河南 302、泰引 2015004、化西 2019、周口 2016 和泰国 KP006。

2.3.4 回归分析及芽用特性指标的选择 为筛选

出可靠的芽用特性鉴定指标并建立评价绿豆芽菜特性的数学模型,以芽用特性综合指标值(SQI 值)为因变量,以各单项指标的隶属函数值为自变量,用逐步回归法建立了最优回归方程: $SQI = -0.066 + 0.580EF + 0.301SP + 0.306TPC - 0.138DPPH + 0.111HL(R^2 = 0.964, P = 0.0013)$ 。由方程的确定系数 R^2 和 P 值可知,该方程可较好地评估不同绿豆品种芽用特性综合指标值。由方程可知,13 个单

表 8 不同品种绿豆芽菜芽用特性的综合评价值及排序

品种	<i>SQI</i>	排序	品种	<i>SQI</i>	排序
辽宁 701	13.12	63	泰引 2015004	35.29	7
辽宁 HN023	15.78	61	泰国 KP002	33.25	15
苏绿 19-013	17.94	57	泰国 KP006	34.56	10
吉绿 10 号	15.98	60	清迈 205	33.71	13
保定 2013	14.12	62	清迈 306	28.36	30
保定 6 号	26.45	34	皖资 208	32.51	17
苑绿 5 号	21.44	47	皖资 102	23.10	42
苑绿 6 号	12.66	64	皖资 107	21.82	45
渝绿 9 号	28.67	28	皖资 108	24.02	39
渝绿 10 号	24.54	37	冀绿 446	27.47	31
品绿 2014	28.52	29	冀绿 9 号	25.19	36
冀绿 13 号	20.69	51	保定 1028	38.25	3
淮绿 5095	20.74	49	保定 2015	31.17	23
皖绿 3 号	17.09	58	石家庄 2 号	30.28	25
辽绿 9B02	29.43	26	石家庄 6 号	23.50	41
同 11445	27.29	33	河南 302	35.43	6
张绿 2 号	19.85	53	河南大绿豆	21.62	46
吉绿 11	27.34	32	郑州青皮	28.74	27
吉绿 14 号	20.73	50	周口 2016	34.86	9
大樱哥 945	21.44	48	郑州豆芽豆	31.67	20
潍坊 535	12.25	65	南阳大绿豆	44.92	1
白城 13 号	21.84	44	南阳粉皮青	31.56	22
白城 15 号	20.39	52	南阳粉条青	33.34	14
品绿 2018	23.54	40	开封大绿豆	33.78	12
品绿 132-17	19.62	54	开封豆芽豆	32.09	19
苏绿 19-118	19.55	56	开封青籽绿豆	33.88	11
苏绿 336	11.63	66	河南周口绿	33.03	16
苏绿 802	19.55	55	四川大籽绿豆	35.86	5
皖绿 234	6.56	67	重庆农家种	24.51	38
冀绿 14 号	16.81	59	重庆三峡绿豆	32.34	18
沧州 6 号	25.33	35	化西 2019	35.19	8
沧州 12 号	22.76	43	苏绿 1 号	40.71	2
泰引 201501	31.66	21	苏绿 7 号	38.21	4
泰引 2015005	30.55	24			

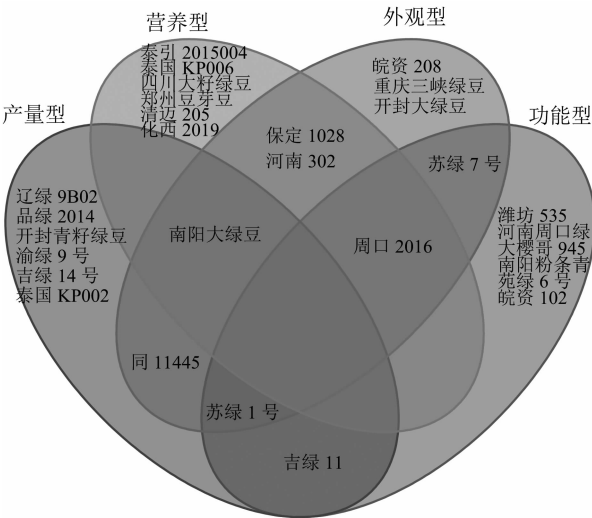


图1 不同芽用特性绿豆芽菜的 Venn 图

能性成分和基本营养成分等芽用特性指标进行了测定,并通过主成分分析、隶属函数法等对绿豆芽菜的芽用品质进行了综合评价。筛选出了产量、功能性成分、基本营养成分与外观品质特性较好的品种各 10 份,可作为优质芽用绿豆新品种选育的亲本材料。同时,通过综合评价 *SQI* 值筛选出了南阳大绿豆、苏绿 1 号、保定 1028、苏绿 7 号和化西 2019 等芽用特性优异的绿豆品种 10 份,可直接用于绿豆芽菜的生产。此外,建立了绿豆芽用特性综合指标值评价的数学模型,并提出可食鲜质量、可溶性蛋白含量、总酚含量、DPPH 自由基清除率和下胚轴长等 5 个指标可作为绿豆芽用特性的鉴定指标。本研究结果可为豆芽专用绿豆品种的发掘和优质芽用绿豆品种的选育提供材料资源。

参考文献:

[1] Hou D Z, Yousaf L, Xue Y, et al. Mung bean (*Vigna radiata* L.): bioactive polyphenols, polysaccharides, peptides, and health benefits [J]. *Nutrients*, 2019, 11 (6): 1238.

[2] Wei Y Y, Wang X X, Shao X F, et al. Sucrose treatment of mung bean seeds results in increased vitamin C, total phenolics, and antioxidant activity in mung bean sprouts [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7 (12): 4037-4044.

[3] Gan R Y, Lui W Y, Wu K, et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: an updated review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 59 (1): 1-14.

[4] Xu H, Zhou Q, Liu B, et al. Neuroprotective potential of mung bean (*Vigna radiata* L.) polyphenols in alzheimer's disease: a review [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69 (39): 11554-11571.

[5] Geng J, Li J, Zhu F, et al. Plant sprout foods: biological activities,

项指标中的可食鲜质量 (EF)、可溶性蛋白含量 (SP)、总酚含量、DPPH 自由基清除率 (DPPH) 和下胚轴长 (HL) 等 5 个指标对绿豆芽用特性有显著影响。所以只需测定上述 5 个指标,并利用该方程评估其 *SQI* 值就可以较好地对不同绿豆品种的芽用特性进行评估。

3 结论

本研究对 67 份绿豆芽菜的外观及生长特性、功

- health benefits, and bioavailability [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 46(3): 13777–13784.
- [6] Ma M, Zhang H, Xie Y, et al. Response of nutritional and functional composition, anti-nutritional factors and antioxidant activity in germinated soybean under UV-B radiation [J]. LWT – Food Science and Technology, 2020, 118(1): 709–719.
- [7] 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.
- [8] 王慧, 马春梅, 龚振平. 大豆品种与豆芽营养品质及产量的关系研究[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 374–378.
- [9] 李振华, 罗珊, 段玉, 等. 大豆籽粒大小差异对豆芽营养品质的影响[J]. 天津农业科学, 2011, 17(1): 28–31.
- [10] 肖伶俐, 康玉凡, 陶礼明, 等. 不同大豆品种芽用特性比较[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 955–959.
- [11] 康玉凡, 王丽艳, 肖伶俐, 等. 芽用大豆品种材料的种皮性状及生理特性[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 16–23.
- [12] 李振华, 康玉凡, 濮绍京, 等. 不同地区绿豆品种芽用特性的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 361–364.
- [13] 康玉凡, 刘腾飞, 程须珍, 等. 芽用绿豆品种种子粒性状及其豆芽生理特性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 986–991.
- [14] 赵天瑶, 张亚宏, 康玉凡. 绿豆品种筛选及萌发过程中生长特性、营养成分变化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(10): 170–175.
- [15] 李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 等. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1762–1771.
- [16] 荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳, 等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 179–184.
- [17] 郭静, 伏芳, 高同雨, 等. ‘京白梨’优质果实的评价指标分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 79–95.
- [18] 毕伟伟, 赵贵兴, 夏晓雨, 等. 黑龙江省主栽大豆品种豆芽品质特性的综合分析[J]. 大豆科学, 2021, 40(2): 209–216.
- [19] Pająk P, Socha R, Gałkowska D, et al. Phenolic profile and antioxidant activity in selected seeds and sprouts [J]. Food Chemistry, 2014, 143: 300–306.
- [20] Koodkaew I. NaCl and glucose improve health-promoting properties in mung bean sprouts [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 247: 235–241.
- [21] 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.
- [22] Lim J H, Park K J, Kim B K, et al. Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1065–1070.
- [23] Floegel A, Kim D O, Chung S J, et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011, 24(7): 1043–1048.
- [24] 李振华, 康玉凡, 程须珍, 等. 绿豆品种芽用特性的初步评价[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(5): 31–36.
- [25] Sawa T, Nakao M, Akaike T, et al. Alkylperoxyl radical-scavenging activity of various flavonoids and other phenolic compounds; implications for the anti-tumor-promoter effect of vegetables [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(2): 397–402.
- [26] 廉雪, 张耀文. 不同种皮色绿豆黄酮类含量的初步研究[J]. 山西农业科学, 2020, 48(1): 55–57, 113.
- [27] Xu B J, Chang S K C. Characterization of phenolic substances and antioxidant properties of food soybeans grown in the North Dakota – Minnesota region [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(19): 9102–9113.
- [28] Huang X Y, Cai W X, Xu B J. Kinetic changes of nutrients and antioxidant capacities of germinated soybean (*Glycine max* L.) and mung bean (*Vigna radiata* L.) with germination time [J]. Food Chemistry, 2014, 143: 268–276.
- [29] Prokudina E A, Havlíček L, Al-Maharik N, et al. Rapid UPLC-ESI-MS/MS method for the analysis of isoflavonoids and other phenylpropanoids [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2012, 26(1/2): 36–42.
- [30] Zhu L Y, Li W T, Deng Z Y, et al. The composition and antioxidant activity of bound phenolics in three legumes, and their metabolism and bioaccessibility of gastrointestinal tract [J]. Foods, 2020, 9(12): 1816.
- [31] Eggersdorfer M, Wyss A. Carotenoids in human nutrition and health [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 652: 18–26.
- [32] Li J Q, Lu Y Y, Chen H L, et al. Effect of photoperiod on vitamin E and carotenoid biosynthesis in mung bean (*Vigna radiata*) sprouts [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129915.
- [33] 赵天瑶, 张亚宏, 金涛, 等. 绿豆萌发过程中蛋白组分及亚基变化[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9): 1783–1794.
- [34] Mastropasqua L, Dipierro N, Paciolla C. Effects of darkness and light spectra on nutrients and pigments in radish, soybean, mung bean and pumpkin sprouts [J]. Antioxidants, 2020, 9(6): 558.
- [35] 熊先清, 胡广林. 外源锌浸种处理对绿豆芽生长和营养品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 170–174, 179.
- [36] 谭仁豪, 张艳, 曹亚兰, 等. 不同蓝光光质组合 LED 灯对绿豆芽苗菜生长的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(2): 112–116.