

100份菜用豌豆种质资源品质鉴定与评价

马天天, 孟俊璞, 陈 高, 陈禅友, 郭 瑞

(江汉大学生命科学学院/湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心/湖北省食用豆类植物自然科技资源中心, 武汉 430056)

摘要:本研究鉴定了国内外100份菜用豌豆种质的3个商品品质性状和5个营养品质性状,分析了其特征数据、遗传变异和性状相关性,同时分析了依食用器官不同划分的青豌豆和荷兰豆两大群体间的遗传分化程度,并开展了基于8个品质性状的聚类分析及综合评价。结果表明,8个性状在种质间均存在显著性差异,变异系数变幅为4.85%~95.04%,其中可溶性蛋白含量变异最大,含水量变异最小;遗传多样性指数在1.33~2.03之间,其中可溶性糖含量多样性最丰富,而可溶性蛋白含量多样性偏低;广义遗传力变幅为90.38%~99.77%,均大于90%,说明性状差异中的大部分可由基因差异解释。两两性状间有12对达极显著相关水平,其中总氨基酸含量与含水量相关系数高达0.75,而与可溶性蛋白含量的相关系数达-0.49。荷兰豆和青豌豆两大群体间8个性状的遗传分化系数在6.01%~92.45%之间,其中维生素C含量是分化最明显的性状,含水量分化不明显。聚类分析可将100份种质划分为3个品种群,青豌豆品种主要聚集在品种群II,多数荷兰豆品种聚集在品种群I,5份性状特异的荷兰豆构成品种群III。基于性状数据特征筛选出WD-123(中豌9号)、WD-135(蜜珍豌豆)、WD-147(奇珍76)等优质青豌豆品种,其中WD-123可溶性蛋白含量高达73.26 mg/g;筛选出WD-057(2015-11)、WD-072(麻皮豌豆)、WD-112(2015-44)等优质荷兰豆品种,其中WD-072的维生素C含量高达199.64 mg/kg。本研究揭示的豌豆品质性状遗传变异特征及种质间亲缘关系,可为菜用豌豆品种栽培应用及后续遗传育种提供优质种源和技术依据。

关键词:菜用豌豆;品质性状;遗传多样性;聚类分析;综合评价

Quality Identification and Evaluation of 100 Garden Pea Germplasm Resources

MA Tiantian, MENG Junying, CHEN Gao, CHEN Chanyou, GUO Rui

(School of Life Sciences, Jiangnan University/Hubei Province Engineering Research Center for Legume Plants/Hubei Natural Science Resources Center for Edible Legumes, Wuhan 430056)

Abstract: This study evaluated three commercial quality traits and five nutritional quality traits across 100 vegetable pea germplasm accessions of both domestic and foreign origins. The analysis focused on trait characteristics, genetic variation, and inter-trait correlations. Additionally, genetic differentiation between two populations, green peas and snow peas, classified based on their edible organs, was investigated. A comprehensive evaluation and cluster analysis were conducted using the eight quality traits. The results revealed significant variation among the germplasm for these traits, with coefficients of variation ranging from 4.85% to 95.04%. Soluble protein content exhibited the greatest variation, whereas water content showed the least. The genetic diversity index ranged from 1.33 to 2.03, with soluble sugar content displaying the highest diversity and soluble protein content showing lower diversity. The broad heritability ranged from 90.38% to 99.77%, all exceeding 90%, indicating that genetic factors predominantly account for the observed phenotypic variations. Twelve pairs of traits exhibited highly significant correlations, including a strong positive correlation ($R=0.75$)

收稿日期: 2024-07-29 网络出版日期: 2025-01-02

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240729001>

第一作者研究方向为植物资源与遗传育种, E-mail: mtt15971757241@163.com

通信作者: 郭 瑞, 研究方向为豆类(蔬菜)资源与遗传改良, E-mail: ruiguo@jhun.edu.cn

陈禅友, 研究方向为植物遗传学, E-mail: ccy@jhun.edu.cn

基金项目: 湖北省技术创新专项(2017ABA147); 湖北省食用豆类植物自然科技资源中心建设项目(2015BCE091)

Foundation projects: Technical Innovation Project of Hubei Province(2017ABA147); Hubei Natural Science Resources Center for Edible Legumes Construction Project(2015BCE091)

between total amino acid content and water content, and a negative correlation ($R=-0.49$) between total amino acid content and soluble protein content. The genetic differentiation coefficients between two populations ranged from 6.01% to 92.45%, with vitamin C content showing the highest differentiation and water content showing no significant differentiation. Cluster analysis classified this collection into three distinct groups. Green pea varieties were predominantly clustered in group II, while most snow pea varieties were grouped in group I. A unique cluster, group III, consisted five trait-specific snow pea varieties, highlighting the genetic relationships among the accessions. Based on trait characteristics and analytical findings, several high-quality green pea varieties were identified, including WD-123 (Zhongwan No.9), WD-135 (Mizhen Pea), and WD-147 (Qizhen 76). Notably, WD-123 exhibited a remarkably high soluble protein content (73.26 mg/g). Similarly, high-quality snow pea varieties like WD-057 (2015-11), WD-072 (Mapi Pea), and WD-112 (2015-44) were identified, with WD-072 showing an exceptional vitamin C content of 199.64 mg/kg. The genetic variation characteristics of pea quality traits and the genetic relationships among germplasm revealed provide valuable high-quality germplasm and a technical basis for the cultivation and subsequent genetic breeding of vegetable pea varieties.

Key words: garden pea; quality trait; genetic diversity; cluster analysis; comprehension evaluation

豌豆(*Pisum sativum* L., $2n=2x=14$)是一种自花授粉豆科植物,环境适应能力强,地理分布广泛,是重要的冷季蔬菜作物^[1]。作为世界第四大食用豆类,豌豆能够提供蛋白质、维生素、矿物质和粗纤维等多样化的营养成分^[2],以粮食、新鲜蔬菜、加工副产品等多种形式纳入人类饮食中,是人类的优质食品来源之一。豌豆分为干籽粒食用豌豆和菜用豌豆两种主要类型^[3],干豌豆是能提供低成本蛋白质、必需氨基酸和低消化性碳水化合物的重要豆类作物^[4],菜用豌豆是一种可食用嫩荚、鲜籽粒和嫩茎的优质绿色蔬菜。根据食用器官不同,菜用豌豆可细分为荷兰豆和青豌豆两种类型,荷兰豆的鲜嫩荚壳和籽粒均可食用,青豌豆是以鲜嫩多汁的嫩豆粒为食用部位。豌豆品质性状可分为商品品质和营养品质等,商品品质包括豆荚的外观、大小、形状、色泽等直观可感的特征,营养品质是指豆荚所含蛋白质、矿物质、维生素等营养成分,是营养价值的核心体现。商品品质和营养品质都是豌豆种质生产和产品消费的重要属性。

目前国内外对于豌豆营养成分展开了较多的研究,如Hacisalihoglu等^[5]利用ICP-MS技术测定了96份豌豆种质资源干籽粒的10种矿质元素;Thavarajah等^[6]对于豌豆种子的17个氨基酸组分、氨基酸总量以及蛋白质含量和蛋白质的消化速率进行了系统分析。李玲等^[7]在鲜食期测定了10个菜用豌豆品种的籽粒食用品质主要组分含量和积累动态。国内外对于豌豆品质的研究主要集中在干豌豆籽粒、豌豆茎尖^[8]以及无籽豌豆荚^[9-10],而对于菜用豌豆,特别是荷兰豆和青豌豆品质的研究报

道较少。目前,各地栽培的菜用豌豆品种较单一,优质菜用豌豆品种尚不能满足鲜食豌豆市场日渐增长的需求^[11]。为此,亟需开展菜用豌豆品质鉴定、优质资源挖掘和栽培及育种利用研究。

深入了解豌豆品质性状的遗传变异,对于豌豆品种的保存、保护和育种利用以及拓宽栽培品种的遗传基础都是至关重要的。本研究以100份代表性的菜用豌豆种质为研究材料,采摘豌豆商品荚,测定其商品品质与营养品质,通过品质特征数据、遗传变异及分化和聚类分析等,揭示菜用豌豆种质间的品质性状遗传变异特点,增进对现有种质资源品质性状的认识,挖掘优异菜用豌豆品种供生产利用,也为培育优质菜用豌豆新品种提供技术依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

从湖北省食用豆类植物自然资源中心保存的豌豆种质中选取100份菜用豌豆种质作为研究材料(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240729001>,附表1),其中46份材料为青豌豆,54份材料为荷兰豆。材料来源于我国北京、湖北、四川、广东、云南、河南、江西、甘肃、辽宁等地,以及美国、英国、非洲等国家和地区。

1.2 试验方法

田间试验于2023年10月至2024年4月在武汉博士都市农业科技生态园($E113^{\circ}25'$, $N30^{\circ}11'$)进行。2023年11月15日播种,每穴3粒种子,保苗2株。采取随机区组设计,3次重复;小区畦宽(包沟)1.3 m,畦长3.0 m;双行种植,行距60 cm,株距

30 cm, 生长期管理同常规种植操作。

在豌豆商品成熟期分小区随机取样30个豆荚用于测定商品品质和备用测定营养品质。参照《豌豆种质资源描述规范和数据标准》^[12], 每个品种挑选3个豆荚, 使用游标卡尺测定荚长、荚宽, 分析天平测定荚重。每个品种选取3个豆荚, 其中青豌豆取籽粒, 荷兰豆选取中间部位(包括荚皮和籽粒)进行营养品质成分的测定, 以考马斯亮蓝G-250法^[13]测定可溶性蛋白含量, 使用南京建成生物工程研究所的维生素C测定试剂盒测定维生素C含量。干样制备方法: 每个品种选取3个商品荚放入烘箱105℃杀青40 min, 60℃烘干至恒重, 称量烘干后的荚重。样品干样磨粉过60目筛, 以蒽酮比色法^[14]测定可溶性糖含量; 用茚三酮法^[15]测定总游离氨基酸含量。各个指标平行测定3次。

1.3 数据分析

用Microsoft Excel 2022整理性状数据并计算各性状的均值、极大值、极小值、标准偏差、变异系数、遗传多样性指数($H' = -\sum_i^n P_i \times \ln P_i$), 公式中 P_i 表示某一性状在第*i*级别内材料份数占总份数的百分比。利用SPSS 27软件进行单因素ANOVA检验, 计算各性状的广义遗传力($H^2 = \frac{V_G}{V_P} = \frac{V_G}{V_G + \frac{V_e}{r}}$), 公

式中 V_G 表示遗传方差, V_e 表示环境方差, V_P 表示总表现方差, r 表示样本重复数。利用Origin 2021软件绘制小提琴图和相关性热图。将荷兰豆群体和青豌豆群体的各性状指标进行巢式方差分析, 计算性状的表型分化系数($V_{ST} = \frac{\sigma_{T/S}^2}{\sigma_{T/S}^2 + \sigma_S^2}$), 公式中 $\sigma_{T/S}^2$ 和 σ_S^2 分别表示群体间方差分量和群体内方差分量; 将品质性状数据无量纲化处理(Z-score变换)后, 使

用Origin 2021软件对参试材料进行聚类分析。根据8个品质性状的测定结果排序筛选出各品质性状前10%的材料进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 参试豌豆种质品质性状的基本特征数据及其分布特点

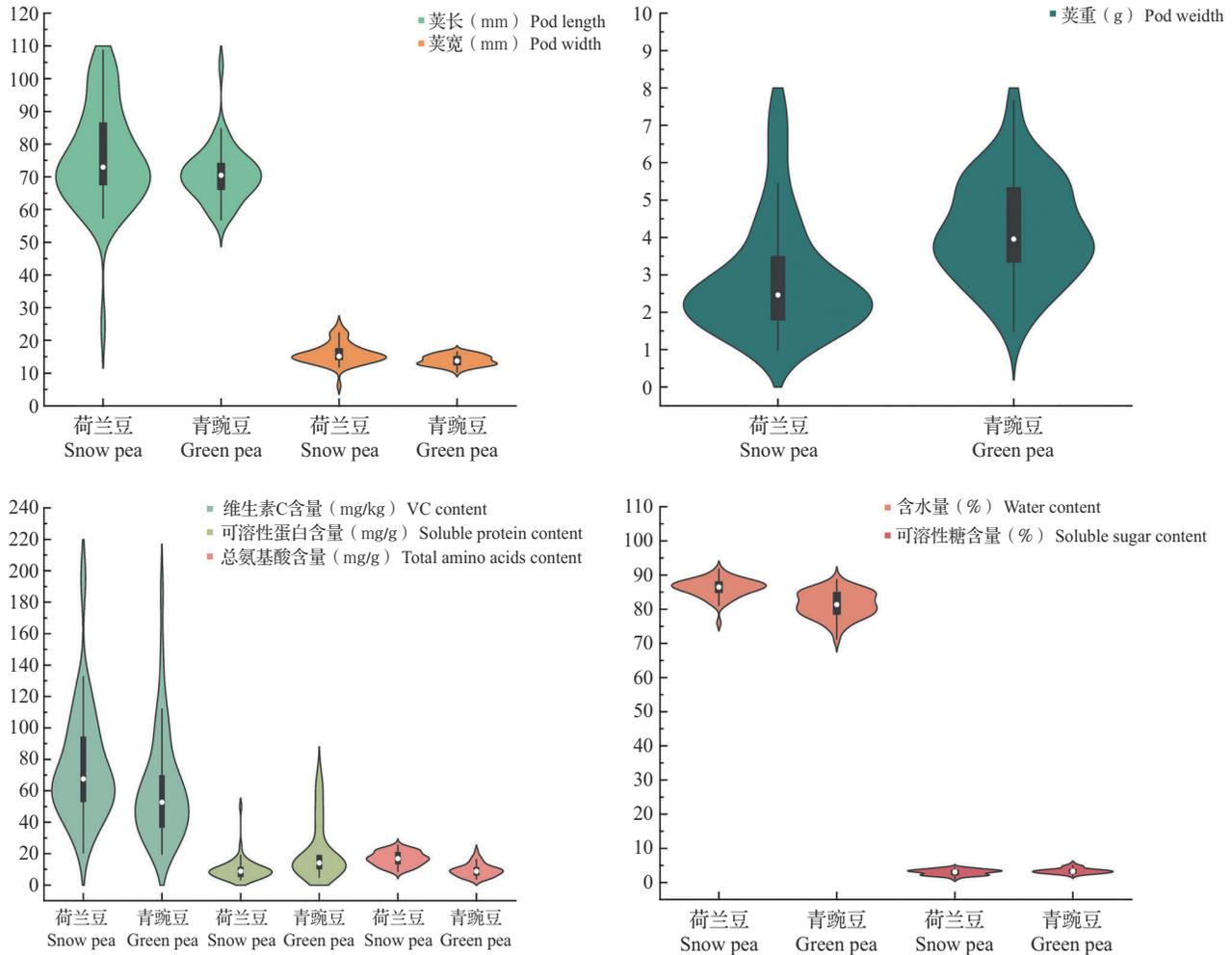
参试豌豆的商品品质和营养品质测定结果和变异程度如表1、附表2(<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240729001>)所示。豌豆种质品质性状的变异系数在4.85%~95.04%之间, 其中可溶性蛋白含量的变异系数最大, 变异幅度为3.28~73.26 mg/g; 其次是维生素C含量, 变异系数为51.13%, 变异幅度为19.64~199.64 mg/kg; 含水量变异系数最小, 说明受环境影响产生的变异幅度最小, 遗传较为稳定。荚长和荚宽的变异系数在10%~20%之间, 性状表现相对稳定。8个品质性状的遗传多样性指数差异明显, 其中可溶性糖含量的多样性指数最大(2.03), 可溶性蛋白含量的多样性指数最小(1.33), 多样性指数越高, 说明变异越丰富, 进行遗传改良的潜力更大。

为便于比较分析, 本研究依据食用器官将100份种质分为荷兰豆和青豌豆两大种质群体(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240729001>, 附表1), 并通过小提琴图展示8个品质性状在不同种质群体的分布情况(图1)。其中荚宽和可溶性糖含量在两群体之间差异较小, 群体内分布也较为集中, 表明性状变异较小; 荷兰豆的维生素C含量和总氨基酸含量总体上均高于青豌豆; 而青豌豆的荚重和可溶性蛋白含量普遍高于荷兰豆, 尤其是可溶性蛋白含量极高值的品种集中于青豌豆群体。结果与表1的性状变异系数高度吻合。

表1 品质性状特征数据及多样性指数

Table 1 Quality trait characteristics data and diversity indices

性状 Traits	均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准偏差 SD	变异系数 (%) CV	Shannon-Wiener 多样性指数 H'
荚长(mm)Pod length	73.42	108.69	24.41	12.93	17.61	1.84
荚宽(mm)Pod width	14.96	24.85	6.15	2.83	18.89	1.85
荚重(g)Pod weight	3.50	7.67	0.98	1.60	45.58	1.99
含水量(%)Water content	84.01	91.78	71.18	4.07	4.85	2.01
维生素C含量(mg/kg)VC content	69.07	199.64	19.64	35.31	51.13	1.86
可溶性蛋白含量(mg/g)Soluble protein content	15.19	73.26	3.28	14.44	95.04	1.33
可溶性糖含量(%)Soluble sugar content	3.19	5.60	1.00	0.83	25.98	2.03
总氨基酸含量(mg/g)Total amino acids content	13.41	25.34	3.88	5.62	41.93	2.02



同一性状左图为荷兰豆群体,右图为青豌豆群体;纵坐标刻度仅表示性状的具体数值;小提琴图的宽窄程度代表该性状在此区间内的分布概率密度,面积越大,数据越密集

The left figure shows the accessions distribution of the snow pea population, and the right figure presents the distribution of the green pea population for each of the same traits; The ordinate scale only refers to the specific value of the character; The width of the violin plot represents the probability density of the character within this interval, the larger the area, the denser the data

图1 8个品质性状种质分布小提琴图

Fig. 1 Violin diagram of accessions distribution of eight quality traits

2.2 菜用豌豆品质性状的遗传力估算

生物性状的遗传力是亲代传递给子代某一特定性状的能力,可应用于某一性状变异中,比较遗传因素和环境因素作用的大小关系。方差分析表明,100个菜用豌豆品种8个品质性状的差异均达到显著水平($P < 0.05$) (表2)。供试品种8个品质性状的广义遗传力变幅为90.38%~99.77%,均大于90%,说明性状的大部分差异可以由基因差异来解释。这与屈雪华等^[16]对长豇豆品质性状的研究结果相似。

2.3 两大菜用豌豆群体的遗传分化分析

对青豌豆群体和荷兰豆群体的品质性状进行遗传分化系数分析,结果如表3所示。荷兰豆和青

豌豆两个群体的8个品质性状均有显著性差异($P < 0.05$),除荚重和含水量以外,其余6个性状在群体间方差均比群体内方差大。8个品质性状的遗传分化系数在6.01%~92.45%之间,其中遗传分化系数最小的性状是含水量,遗传分化系数最大的性状是维生素C含量。荚重、含水量的遗传分化系数均小于50%,表现为群体内遗传,其他性状表现为群体间遗传^[17]。菜用豌豆8个品质性状群体间的遗传分化系数均值为58.17%,说明菜用豌豆在群体间的变异贡献了总遗传变异的58.17%,群体内变异贡献了41.83%,这说明群体间的遗传分化高于群体内,且群体间的变异是菜用豌豆品质性状变异中的主要来源。

表 2 品质性状方差分析

Table 2 Analysis of variance results of quality traits

性状 Traits	遗传方差 Genetic variance	环境方差 Environmental variance	误差 Error	F	广义遗传力(%) Broad-Sense heritability
荚长 Pod length	501.67	39.84	0.80	12.59*	97.42
荚宽 Pod width	23.95	0.85	0.17	28.12*	98.83
荚重 Pod weight	7.63	0.68	0.10	11.30*	97.14
含水量 Water content	49.17	15.70	0.30	3.13*	90.38
维生素 C 含量 VC content	4221.12	157.02	2.24	26.88*	98.78
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	625.51	5.58	0.84	112.03*	99.70
可溶性糖含量 Soluble sugar content	2.06	0.22	0.05	9.33*	96.56
总氨基酸含量 Total amino acids content	94.90	0.66	0.33	143.74*	99.77

*表示在 $P<0.05$ 水平下有显著性差异;下同

* represents significant differences at $P<0.05$ level; The same as below

表 3 荷兰豆群体和青豌豆群体的遗传分化系数

Table 3 Genetic differentiation coefficients of snow pea population and green pea population

方差分量 Variance component	荚长 Pod length	荚宽 Pod width	荚重 Pod weight	含水量 Water content	维生素 C 含量 VC content	可溶性蛋白 含量 Soluble protein content	可溶性糖 含量 Soluble sugar content	总氨基酸 含量 Total amino acids content
群体间方差 Among group variance	12.22*	24.70*	9.54*	2.31*	26.57*	94.69*	8.86*	83.71*
群体内方差 Within group variance	3.99*	14.70*	18.94*	36.12*	2.17*	19.13*	6.33*	72.00*
遗传分化系数(%) Fst	75.39	62.69	33.50	6.01	92.45	83.19	58.33	53.76

Fst: Genetic differentiation coefficients

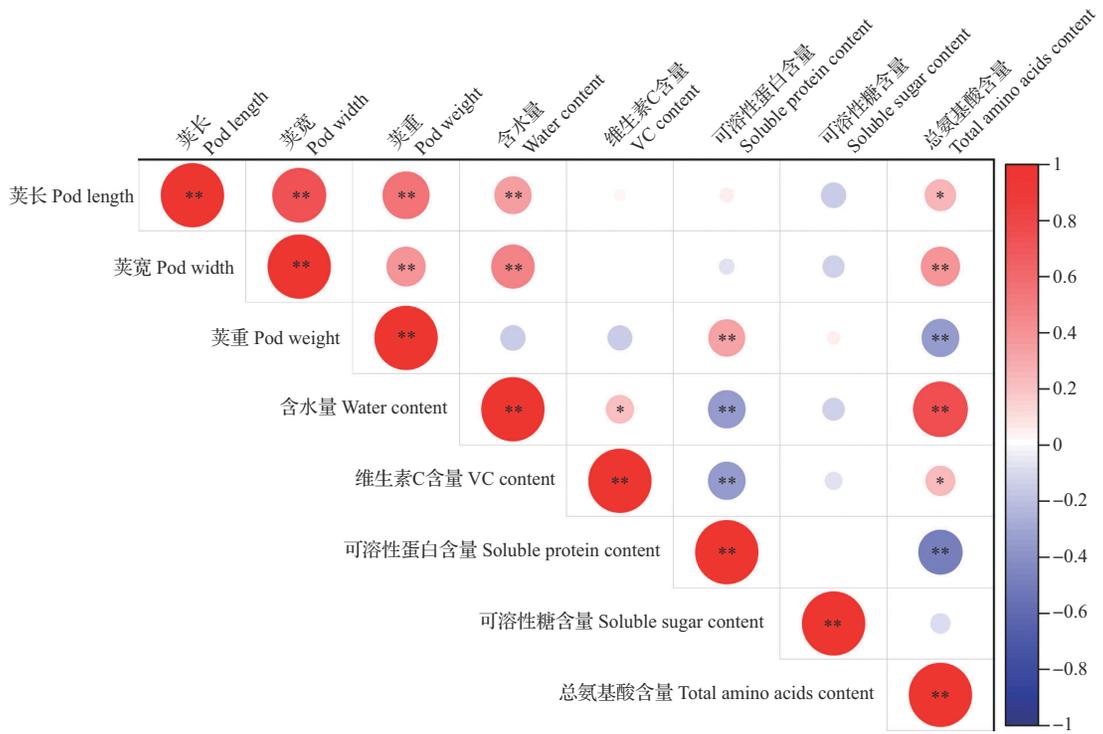
2.4 菜用豌豆种质资源品质性状的相关性分析

为了解种质资源性状间的相关关系,对 100 份豌豆种质资源的 8 个品质性状进行相关性分析(图 2),结果表明,8 个性状间有 12 个相关系数达到极显著水平,3 个相关系数达显著水平。荚长、荚宽、荚重 3 个商品品质性状两两之间均呈极显著正相关,其中荚宽和荚长之间的相关系数最大,为 0.72;在营养品质性状之间,总氨基酸含量与含水量呈极显著正相关,相关系数最大,为 0.75;可溶性蛋白含量与总氨基酸含量、维生素 C 含量、含水量均呈极显著负相关,其中可溶性蛋白含量与总氨基酸含量负相关系数最大,为-0.49。

2.5 菜用豌豆种质资源聚类分析

将品质性状数据无量纲化处理后,对 100 份菜

用豌豆品种进行聚类分析。当欧式遗传距离为 7.5 时,参试豌豆种质可分为 3 个品种群(图 3、表 4)。51% 的品种聚在品种群 I,代表着菜用豌豆的基准水平,其中有 41 份荷兰豆,10 份青豌豆,表现为维生素 C 含量和总氨基酸含量较高,可溶性蛋白含量较低,其中最具代表性的品种是 WD-074(2015-22);品种群 II 有 8 份荷兰豆,36 份青豌豆,表现为可溶性蛋白含量和可溶性糖含量较高,代表性品种是 WD-138(中豌 9 号);品种群 III 由 5 份性状特异的荷兰豆构成,表现出荚长、荚宽、荚重、含水量均较高的特征,可见荷兰豆遗传多样性较为丰富,其与另外 95 份种质性状差异较大,亲缘关系较远。

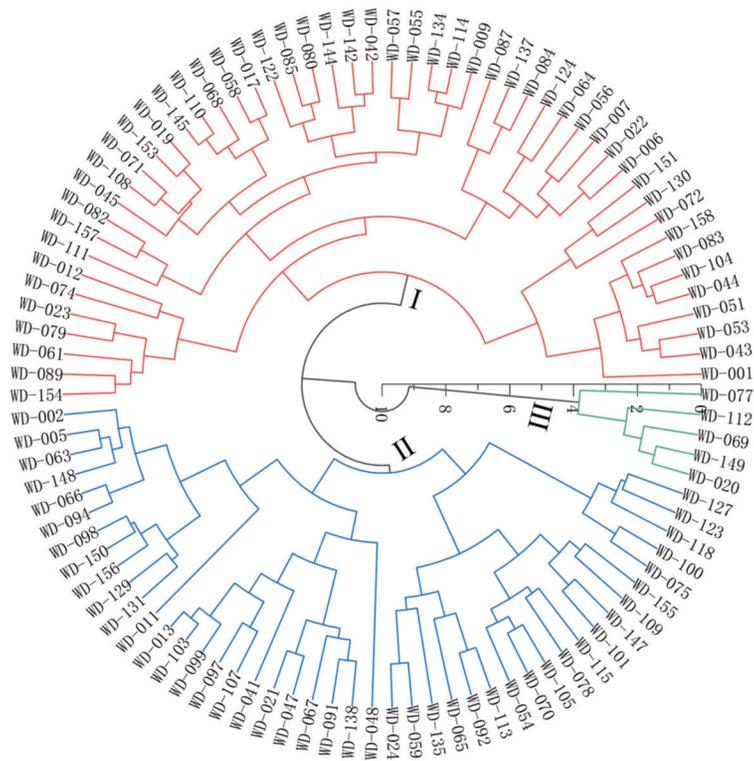


*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; **表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关

* represents significant correlation at $P < 0.05$ level ; ** represents extremely significant correlation at $P < 0.01$ level

图 2 8个品质性状的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of eight quality traits



材料编号同附表 1

The material number is attached with appendix 1

图 3 基于菜用豌豆品质性状的品种聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis based on the quality traits of garden pea

表 4 3 个类群 8 个品质性状的平均值

Table 4 Means values of eight traits within each of three groups

性状 Traits	I	II	III
荚长(mm) Pod length	75.19	68.02	102.84
荚宽(mm) Pod width	15.33	13.64	22.74
荚重(g) Pod weight	2.86	3.88	6.63
含水量(%) Water content	86.36	80.89	87.46
维生素 C 含量(mg/kg) VC content	81.43	54.40	72.00
可溶性蛋白含量(mg/g) Soluble protein content	8.58	22.36	19.56
可溶性糖含量(%) Soluble sugar content	2.93	3.50	2.99
总氨基酸含量(mg/g) Total amino acids content	17.08	8.75	17.01

2.6 优异菜用豌豆种质筛选

基于 8 个品质性状数据特征筛选出各性状排名前 10% 的优异品种, 如表 5 所示。根据地理来源区分, 国内资源为 50 份, 分别来自湖北(19 份)、甘肃(6 份)、四川(5 份)、广东(4 份)、北京(3 份)、河南(3 份)、江西(3 份)、河北(2 份)、辽宁(2 份)、湖南(1 份)、云南(1 份)、西藏(1 份); 4 份国外资源分别来自

英国(2 份)、非洲(1 份)、美国(1 份)。优异品种资源与地理来源之间并未表现出显著的相关性。筛选出的 54 个豌豆优异品种中有 25 份是青豌豆, 29 份是荷兰豆。两群体中均有品质性状表现优异的品种, 其中青豌豆品种 WD-123(中豌 9 号)的可溶性蛋白含量最高, 为 73.26 mg/g, 同时荚重 5.93 g 在前 10% 排名中, 品质性状表现优良; WD-135(蜜珍豌豆)的荚重最大, 为 7.67 g, 可溶性糖含量为 4.70%, 排名第 5; WD-147(奇珍 76)的可溶性糖含量最高, 为 5.60%。荷兰豆品种 WD-057(2015-11)的含水量和总氨基酸含量最高, 分别为 91.78%、25.34 mg/g, 与相关性分析结果含水量和总氨基酸含量呈极显著正相关的结果一致; WD-072(麻皮豌豆)的维生素 C 含量最高, 为 199.64 mg/kg, 同时可溶性糖含量为 4.30%, 排名第 9; WD-112(2015-44)的荚长、荚宽最大, 分别为 108.69 mm、24.85 mm, 荚重 7.63 g, 排名第 2, 商品品质性状最优。通过对不同菜用豌豆品种营养品质分析, 筛选出可作为改良育种材料的最优品种, 为高效利用菜用豌豆种质资源提供理论参考。

表 5 8 个品质性状前 10% 优质品种排名

Table 5 Rank of top 10% high quality varieties for eight quality traits

排名 Rank	荚长 Pod length	荚宽 Pod width	荚重 Pod weight	含水量 Water content	维生素 C 含量 VC content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	总氨基酸含量 Total amino acids content
1	WD-112 (2015-44)	WD-112 (2015-44)	WD-135 (蜜珍豌豆)	WD-057 (2015-11)	WD-072 (麻皮豌豆)	WD-123 (中豌 9 号)	WD-147 (奇珍 76)	WD-057 (2015-11)
2	WD-012 (2014-02)	WD-069 (2015-19)	WD-112 (2015-44)	WD-112 (2015-44)	WD-001 (Blue Podded)	WD-075 (2015-23)	WD-109 (2015-41)	WD-055 (甜麦豌豆)
3	WD-006 (Hurst Green Shaft)	WD-020 (菜豌豆 1 号)	WD-069 (2015-19)	WD-079 (2015-25)	WD-130 (小麻豌)	WD-118 (2003-01)	WD-101 (2015-39)	WD-157 (ZYZ-4968)
4	WD-069 (2015-19)	WD-061 (2015-14)	WD-059 (2015-13)	WD-108 (2015-40)	WD-151 (小麻)	WD-100 (2015-38)	WD-078 (成豌)	WD-082 (2015-27)
5	WD-020 (菜豌豆 1 号)	WD-077 (2015-24)	WD-149 (大白花)	WD-022 (菜豌豆 2 号)	WD-074 (2015-22)	WD-127 (盛源 98)	WD-135 (蜜珍豌豆)	WD-134 (改良 604 豌豆)
6	WD-149 (大白花)	WD-149 (大白花)	WD-020 (菜豌豆 1 号)	WD-012 (2014-02)	WD-044 (2015-04)	WD-077 (2015-24)	WD-115 (2015-47)	WD-144 (红花豌豆)
7	WD-077 (2015-24)	WD-007 (Onward)	WD-024 (15 号)	WD-134 (改良 604 豌豆)	WD-104 (2016-01)	WD-067 (2015-17)	WD-065 (软荚豌)	WD-089 (2015-32)
8	WD-089 (2015-32)	WD-154 (ZYZ-4962)	WD-087 (2015-31)	WD-114 (2015-46)	WD-158 (ZYZ-4991)	WD-138 (中豌 9 号)	WD-092 (团结豌豆)	WD-114 (2015-46)
9	WD-022 (菜豌豆 2 号)	WD-079 (2015-25)	WD-123 (中豌 9 号)	WD-009 (Green Feast)	WD-045 (2015-05)	WD-021 (中豌 4 号)	WD-072 (麻皮豌豆)	WD-045 (2015-05)
10	WD-065 (软荚豌)	WD-056 (食荚大菜豌)	WD-099 (2015-37)	WD-055 (甜麦豌豆)	WD-012 (2014-02)	WD-091 (2015-33)	WD-122 (朱砂红)	WD-012 (2014-02)

括号外为种质编号, 括号内为种质名称

The material germplasm number is outside the brackets, and the germplasm name is inside the brackets

3 讨论

豆类作物是全球食品体系的组成部分,与以动物蛋白为中心的食品体系相比,能够提供更低价格的蛋白质、更好消化的碳水化合物和更为丰富的微量营养元素,可满足全球8~9亿营养不良个体的饮食需求。干籽粒食用豌豆具有20%~25%的高蛋白和1%的低脂肪,一直是食品工业领域最受欢迎的原料^[6]。近年来菜用豌豆在国内市场需求量大幅提高,且种植效益比干籽粒食用豌豆高2~3倍,菜用豌豆产业的崛起和发展,构成了我国豌豆产业实现突破性发展的重要驱动力之一^[7]。优质品种的筛选不仅要关注产量相关性状,品质相关性状同样重要,且各指标对品种质量的贡献程度存在差异^[18],因此对现有种质资源进行综合性分析,是选育最佳品种的先决条件。

本研究结果显示,菜用豌豆资源品质性状具有丰富的遗传变异,这与沈宝宇等^[19]的研究结果较一致。通过菜用豌豆8个品质性状的变异系数可看出,各性状之间有较大差异,在变异程度上各不相同。一般认为变异系数大于10%则该性状在种质个体间差距较大^[20]。本研究中8个品质性状变异幅度为4.85%~95.04%,其中可溶性蛋白含量的变异系数最大,菜用豌豆的蛋白质含量高且不同品种之间的含量差异较大,在3.28 mg/g~73.26 mg/g之间,说明不同种质在可溶性蛋白质积累能力上差异显著,大幅度的变异不仅表现出豌豆作为高蛋白作物的重要潜力,也揭示了其在育种改良中针对蛋白质品质提升的广阔空间。相比之下,含水量的变异系数最小,表明该性状在不同种质间相对稳定,可能受环境因素影响较小。这与张佳欣等^[21]的研究结果相差较大,导致这种差异的原因可能与试验材料的观测时期和观测部位不同有关。遗传多样性指数能够表征群体异质状况,多样性指数越高,表明性状的表现形式丰富多样具有更大的潜在遗传变异能力^[22]。8个品质性状的多样性指数在1.33~2.03之间,含水量、可溶性糖含量和总氨基酸含量的多样性指数均高于2.00,说明这3个性状的指标呈均衡化趋势分布^[23],各个性状数值分布范围较广,且品种之间差异分布相对均匀,在优质豌豆资源选育中可利用度更高。本研究中,8个品质性状的变异系数以可溶性蛋白含量最高,含水量最低;遗传多样性指数以可溶性糖含量最高,可溶性蛋白含量最低,变异系数和遗传多样性指数之间并无相关关

系,这与李赢等^[24]研究结果相似。

根据食用器官的不同,本研究将菜用豌豆种质资源划分为青豌豆和荷兰豆两大群体,两群体间多个品质性状上均存在显著的遗传分化,8个品质性状的遗传分化系数变幅为6.01%~92.45%,平均分化系数为58.17%,说明总变异中58.17%来自群体间,表明群体间的变异是菜用豌豆品质性状变异的主要来源,此结果与Hamrick^[25]发现自交植物51.0%的遗传变异存在于居群间的结果相同,豌豆是严格意义上的闭花授粉植物,这是群体间分化程度高于群体内分化程度的主要原因。结合聚类分析3个品种群的品质性状数据,青豌豆群体的可溶性蛋白含量和可溶性糖含量高于荷兰豆群体;荷兰豆群体的荚长、荚宽、总氨基酸含量、维生素C含量优于青豌豆群体。这种差异可能与两种豌豆的生长发育阶段及生理过程密切相关,荷兰豆商品荚时期籽粒尚未形成,蛋白质等生物大分子合成过程缓慢,促进了氨基酸等小分子物质的积累;青豌豆籽粒饱满圆润,伴随着籽粒的成熟,细胞内积累了可溶性蛋白质和可溶性糖^[26],赋予其独特的甜度与风味,因而青豌豆又称为甜豌豆。青豌豆与荷兰豆品质性状上的差异,体现出两者在生长发育过程中的不同生理变化,也为满足不同消费者需求提供了多样化的选择。

相关性分析、聚类分析在种质资源性状遗传分析研究中广泛应用^[27-28]。对100份菜用豌豆资源的8个品质性状进行了相关性分析,结果显示可溶性蛋白含量与总氨基酸含量呈极显著负相关。已有的生理生化研究表明,作物籽粒中的游离氨基酸是蛋白质合成的前体,游离氨基酸同时也是植物中氮素同化物运输的主要形式^[29],在充足的氨基酸供应条件下,通过促进蛋白质的合成代谢,可以有效地增加植物内蛋白质的含量。在相同且受控的种植环境条件下,不同遗传特性的菜用豌豆品种在蛋白质合成能力上展现出显著的差异,高蛋白含量的豌豆品种,在达到其较高的蛋白质积累水平过程中,可能更为高效地利用了特定的氨基酸组合,因此相较于其他品种,组织内部呈现出较低的游离氨基酸含量。

基于品质性状的聚类分析,将100份豌豆种质划分为3个品种群,青豌豆主要聚集在品种群II,多数荷兰豆则集中在品种群I,品种群III由5份性状特异的荷兰豆单独构成,这不仅有助于明确不同豌豆品种间的亲缘关系,还为豌豆品种的分类管理和

遗传育种提供了新的视角。品种群 III 中的特异种质, 由于与其他种质间存在较大的遗传差异, 可能蕴含着独特的优良基因, 可进一步深入研究和利用。本研究筛选出的优异菜用豌豆品种, 可以根据实际需求选择各品质性状排名总体靠前或部分性状排名靠前的品种进行栽培推广和遗传育种研究, 如品种 WD-123(中豌 9 号)的可溶性蛋白含量最高, 品种 WD-072(麻皮豌豆)维生素 C 含量最高的同时可溶性糖含量在前 10% 排名中。此外, 聚类分析中青豌豆群体和荷兰豆群体聚集在不同的品种群, 遗传距离较远, 分别筛选两群体中优异品种进行杂交育种可能具有较强的优势, 如将可溶性糖含量最高的青豌豆品种 WD-147(奇珍 76), 与荚长、荚宽排名第 1, 荚重第 2 的荷兰豆品种 WD-112(2015-44)进行杂交, 可能会提高品种 WD-147(奇珍 76)的产量, 但该方案的可行性需在后续系统的育种试验中严格验证与评估。本研究揭示了菜用豌豆种质资源的品质性状遗传变异特征及亲缘关系, 为菜用豌豆的遗传育种和栽培应用提供了丰富的理论依据。

参考文献

- [1] Sharma A, Sharma S, Kumar N, Rana R S, Sharma P, Kumar P, Rani M. Morpho-molecular genetic diversity and population structure analysis in garden pea (*Pisum sativum* L.) genotypes using simple sequence repeat markers. *PLoS ONE*, 2022, 17(9): e0273499
- [2] Bari Md A A, Zheng P, Viera I, Worrall H, Szwiec S, Ma Y, Main D, Coyne C J, Mcgee R J, Bandillo N. Harnessing genetic diversity in the usda pea germplasm collection through genomic prediction. *Frontiers in Genetics*, 2021, 12: 707754
- [3] Ram H, Hedau N K, Chaudhari G V, Kant L. Peas with zero shelling edible pods: A review. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110333
- [4] Thavarajah D, Lawrence T J, Powers S E, Kay J, Thavarajah P, Shipe E, Mcgee R, Kumar S, Boyles R. Organic dry pea (*Pisum sativum* L.) biofortification for better human health. *PLoS ONE*, 2022, 17(1): e0261109
- [5] Hacisalihoglu G, Beisel N S, Settles A M. Characterization of pea seed nutritional value within a diverse population of *Pisum sativum*. *PLoS ONE*, 2021, 16(11): e0259565
- [6] Thavarajah D, Lawrence T, Boatwright L, Windsor N, Johnson N, Kay J, Shipe E, Kumar S, Thavarajah P. Organic dry pea (*Pisum sativum* L.): A sustainable alternative pulse-based protein for human health. *PLoS ONE*, 2023, 18(4): e0284380
- [7] 李玲, 沈宝宇, 张艳红, 郭晓雷, 宗绪晓. 菜用豌豆食用品质主要组分及其积累动态研究. *中国蔬菜*, 2023(2): 96-102
Li L, Shen B Y, Zhang Y H, Guo X L, Zong X X. Studies on main components of edible quality in vegetable pea varieties (*Pisum sativum* L.) and their dynamic accumulation. *China Vegetables*, 2023(2): 96-102
- [8] 崔翠, 孙建蓉, 赵愉风, 郝欢欢, 程闯, 王瑞莉, 王刘艳, 周清元. 豌豆嫩尖几个营养品质性状的遗传多样性分析及其综合评价. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(4): 932-948
Cui C, Sun J R, Zhao Y F, Gao H H, Cheng C, Wang R L, Wang L Y, Zhou Y Q. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of several nutritional quality traits in pea sprouts. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(4): 932-948
- [9] Nasir G, Zaidi S, Siddiqui A, Sirohi R. Characterization of pea processing by-product for possible food industry applications. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60(6): 1782-1792
- [10] Belghith-fendri L, Chaari F, Jeddou K B, Kallel F, Bouaziz F, Helbert C B, Abdelkefi-mesrati L, Ellouz-chaabouni S, Ghribi-aydi D. Identification of polysaccharides extracted from pea pod by-products and evaluation of their biological and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116: 947-954
- [11] 崔潇, 张晓艳, 郝俊杰, 仇世佐, 吕享华, 宋风景. 菜用豌豆资源农艺性状遗传多样性分析. *四川农业大学学报*, 2022, 40(4): 489-497, 590
Cui X, Zhang X Y, Hao J J, Qiu S Z, Lyu X H, Song F J. Genetic diversity analysis of agronomic traits in vegetable pea germplasm resources. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(4): 489-497, 590
- [12] 宗绪晓, 王志刚, 关建平. 豌豆种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005: 19-30
Zong X X, Wang Z G, Guan J P. Description specification and data standard of pea germplasm resources. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 19-30
- [13] 徐亚, 范会芬, 赵珂玲, 苏伟华, 冯雅茗, 肖付明, 张洁, 王冬梅. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化. *大豆科学*, 2022, 41(2): 196-202
Xu Y, Fan H F, Zhao D L, Su W H, Feng Y M, Xiao F M, Zhang J, Wang D M. Optimization of extraction method for water-soluble protein determination by coomassie bright blue method. *Soybean Science*, 2022, 41(2): 196-202
- [14] 孙晓玲. 蒽酮-硫酸法测定秋葵多糖条件的优化. *中国食品添加剂*, 2019, 30(9): 154-158
Sun X L. Optimization of polysaccharide determination in okra by anthrone sulfuric acid method. *China Food Additives*, 2019, 30(9): 154-158
- [15] 于虹敏, 陈小霞, 洪旖, 卢泽雨, 范世明, 温秀萍, 林羽. 闽产细叶石仙桃显微鉴别及总氨基酸含量测定. *亚太传统医药*, 2022, 18(2): 50-54
Yu H M, Chen X X, Hong Y, Lu Z Y, Fan S M, Wen X P, Lin Y. Pharmacognostic identification and determination of total amino acid of *Pholidota cantonensis* from Fujian province. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 2022, 18(2): 50-54

- [16] 屈雪华, 邵景杰, 严牧, 何冰冰, 潘磊, 郭瑞, 陈高, 万何平, 陈禅友. 长豇豆营养成分及其遗传和相关性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(4): 1034-1045
Qu X H, Shao J J, Yan M, He B B, Pan L, Guo R, Chen G, Wan H P, Chen C Y. Genetic and correlation analysis of asparagus bean nutrient composition. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(4): 1034-1045
- [17] 王妍欣, 陆彪, 管岳, 阿克居力得孜·努尔改里得, 刘春燕, 周龙. 伊犁野果林新疆忍冬表型多样性分析. 北方园艺, 2024(17): 8-16
Wang Y X, Lu B, Guan Y, Akejulidezi N, Liu C Y, Zhou L. Phenotypic diversity analysis of *Lonicera tatarica* L. in Yili wild fruit forest. Northern Horticulture, 2024(17): 8-16
- [18] 王晓磊, 康泽然, 魏云山, 刘迎春, 周学超, 胡海波, 李峰, 崔智慧, 杨志阁, 裴广利. 20份小豆种质资源农艺性状鉴定与综合评价. 江苏农业科学, 2023, 51(2): 98-104
Wang X L, Kang Z R, Wei Y S, Liu Y C, Zhou X C, Hu H B, Li F, Cui Z H, Yang Z G, Pei G L. Identification and comprehensive evaluation of agronomic traits of 20 vigna angularis germplasm resources. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 98-104
- [19] 沈宝宇, 李玲, 宗绪晓. 豌豆种质资源主要品质性状的分析与评价. 山东农业科学, 2022, 54(8): 46-53
Shen B Y, Li L, Zong X X. Analysis and evaluation of main quality characters of pea germplasm resources. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(8): 46-53
- [20] 康阳, 刘梓富, 陈进燎, 石晓玲, 周育真, 彭东辉. 十六份朱砂根品种表型遗传多样性分析. 北方园艺, 2022(12): 71-78
Kang Y, Liu Z F, Chen J L, Shi X L, Zhou Y Z, Peng D H. Analysis of phenotypic genetic diversity of 16 *Ardisia crenata* cultivars. Northern Horticulture, 2022(12): 71-78
- [21] 张佳欣, 李静妍, 朱少文, 盛云燕, 纪鹏. 引进豌豆种质资源遗传多样性分析. 北方园艺, 2021(2): 1-9
Zhang J X, Li J Y, Zhu S W, Sheng Y Y, Ji P. Genetic diversity analysis of pea germplasm resources. Northern Horticulture, 2021(2): 1-9
- [22] 张斌斌, 蔡志翔, 沈志军, 严娟, 马瑞娟, 俞明亮. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2406-2420
Zhang B B, Cai Z X, Shen Z J, Yan J, Ma R J, Yu M L. Diversity analysis of phenotypic characters in germplasm resources of ornamental peaches. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2406-2420
- [23] 张鹏, 鲍根生, 贾志锋, 刘文辉. 高寒区150份豌豆种质资源农艺性状的遗传多样性分析. 草地学报, 2023, 31(7): 2116-2127
Zhang P, Bao G S, Jia Z F, Liu W H. Genetic diversity analysis of agronomic traits of 150 *Pisum sativum* germplasm resources in alpine region. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 2116-2127
- [24] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 石吕, 韩笑, 刘建, 魏亚凤. 398份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(5): 1311-1320
Li Y, Liu H C, Shi X X, Shi L, Han X, Liu J, Wei Y F. Phenotypic diversity analysis of 398 naked barley germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(5): 1311-1320
- [25] Hamrick J L. Gene flow and distribution of genetic variation in plant populations. Differentiation Patterns in Higher Plants, 1987(1): 53-57
- [26] 乐帅, 郭瑞, 陈高, 屈雪华, 陈禅友. 豌豆种子发育进程中蛋白质组分的动态变化. 种子, 2023, 42(2): 51-58
Yue S, Guo R, Chen G, Qu X H, Chen C Y. Dynamic changes of protein components during pea seed developmental procedure. Seed, 2023, 42(2): 51-58
- [27] 唐桂梅, 李卫东, 周宇霞, 孔佑涵, 肖晓玲, 彭颖妹, 张力, 符红艳, 刘洋, 黄国林. 基于表型性状分析蕙兰种质资源遗传多样性. 中国农业科学, 2025, 58(2): 339-354
Tang G M, Li W D, Zhou Y X, Kong Y H, Xiao X L, Peng Y S, Zhang L, Fu H Y, Liu Y, Huang G L. Genetic diversity analysis of *Cymbidium faberi* germplasm resources based on phenotypic traits. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(2): 339-354
- [28] Nivedha R, Manonmani S, Kalaimagal T, Raveendran M, Kavitha S. Assessing the genetic diversity of parents for developing hybrids through morphological and molecular markers in rice (*Oryza sativa* L.). Rice, 2024, 17(1): 17
- [29] 徐寿军, 张凤英, 刘志萍, 郭萍, 李琲琲, 薛海楠, 王磊, 李国兴. 春大麦营养器官游离氨基酸含量变化特征及其与籽粒蛋白质含量相关分析. 核农学报, 2018, 32(1): 131-140
Xu S J, Zhang F Y, Liu Z P, Guo P, Li B B, Xue H N, Wang L, Li G X. Characteristics of changes in free amino acid content in nutritional organs of spring barley and its correlation with grain protein content. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 131-140

附表1 参试品种基本情况

Appendix 1 Basic information of tested varieties

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	分类 Classification	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	分类 Classification
WD-001	Blue Podded	美国	荷兰豆	WD-084	2015-29	中国甘肃	青豌豆
WD-002	Alaska	美国	青豌豆	WD-085	2015-30	中国甘肃	荷兰豆
WD-005	Shell Pea	美国	荷兰豆	WD-087	2015-31	中国甘肃	青豌豆
WD-006	Hurst Green Shaft	英国	青豌豆	WD-089	2015-32	中国甘肃	荷兰豆
WD-007	Onward	英国	荷兰豆	WD-091	2015-33	中国辽宁	青豌豆
WD-009	Green Feast	非洲	青豌豆	WD-092	团结豌豆	中国甘肃	青豌豆
WD-011	2014-01	中国云南	荷兰豆	WD-094	2015-34	中国河南	青豌豆
WD-012	2014-02	中国云南	荷兰豆	WD-097	2015-35	中国湖北	青豌豆
WD-013	2014-03	中国黑龙江	青豌豆	WD-098	2015-36	中国甘肃	青豌豆
WD-017	大黑眉	中国四川	荷兰豆	WD-099	2015-37	中国甘肃	青豌豆
WD-019	朱砂红	中国四川	荷兰豆	WD-100	2015-38	中国湖北	青豌豆
WD-020	菜豌豆1号	中国四川	荷兰豆	WD-101	2015-39	中国湖北	青豌豆
WD-021	中豌4号	中国四川	青豌豆	WD-103	仁寿豆	中国甘肃	青豌豆
WD-022	菜豌豆2号	中国四川	荷兰豆	WD-104	2016-01	中国西藏	荷兰豆
WD-023	玉佛指	中国四川	荷兰豆	WD-105	佳美168	中国湖北	荷兰豆
WD-024	15号	中国湖北	青豌豆	WD-107	2016-02	中国湖北	青豌豆
WD-041	2015-01	中国广东	青豌豆	WD-108	2015-40	中国辽宁	荷兰豆
WD-042	2015-02	中国广东	青豌豆	WD-109	2015-41	中国湖北	青豌豆
WD-043	2015-03	中国广东	荷兰豆	WD-110	2015-42	中国湖北	荷兰豆
WD-044	2015-04	中国广东	青豌豆	WD-111	2015-43	中国湖北	荷兰豆
WD-045	2015-05	中国广东	荷兰豆	WD-112	2015-44	中国湖北	荷兰豆
WD-047	2015-06	中国广东	青豌豆	WD-113	2015-45	中国湖北	青豌豆
WD-048	2015-07	中国广东	荷兰豆	WD-114	2015-46	中国湖北	荷兰豆
WD-051	2015-08	中国广东	荷兰豆	WD-115	2015-47	中国湖南	青豌豆
WD-053	2015-09	中国湖北	荷兰豆	WD-118	2003-01	中国湖北	青豌豆
WD-054	2015-10	中国湖北	青豌豆	WD-122	朱砂红	中国湖北	荷兰豆
WD-055	甜麦豌豆	中国湖北	荷兰豆	WD-123	中豌9号	中国湖北	青豌豆
WD-056	食荚大菜豌	中国河北	荷兰豆	WD-124	长寿仁	中国湖北	青豌豆
WD-057	2015-11	中国河南	荷兰豆	WD-127	盛源98	中国湖北	青豌豆
WD-058	2015-12	中国河南	荷兰豆	WD-129	白玉豌	中国湖北	青豌豆
WD-059	2015-13	中国河北	青豌豆	WD-130	小麻豌	中国湖北	青豌豆
WD-061	2015-14	中国湖北	荷兰豆	WD-131	双花豆	中国湖北	青豌豆
WD-063	2015-15	中国湖北	青豌豆	WD-134	改良604豌豆	中国广东	荷兰豆
WD-064	软荚豌	中国湖北	荷兰豆	WD-135	蜜珍豌豆	中国广东	青豌豆
WD-065	软荚豌	中国湖北	荷兰豆	WD-137	陇豌7号	中国甘肃	青豌豆
WD-066	2015-16	中国湖北	荷兰豆	WD-138	中豌九号	中国湖北	青豌豆
WD-067	2015-17	中国湖北	青豌豆	WD-142	清香胖豆苗	中国江西	荷兰豆
WD-068	2015-18	中国江西	荷兰豆	WD-144	红花豌豆	中国江西	荷兰豆
WD-069	2015-19	中国江西	荷兰豆	WD-145	白无须	中国湖北	荷兰豆
WD-070	2015-20	中国湖北	青豌豆	WD-147	奇珍76	中国湖北	青豌豆
WD-071	2015-21	中国湖北	荷兰豆	WD-148	白玉豌	中国湖北	青豌豆

WD-072	麻皮豌豆	中国湖北	荷兰豆	WD-149	大白花	中国江西	荷兰豆
WD-074	2015-22	中国河南	荷兰豆	WD-150	朱砂红	中国湖北	青豌豆
WD-075	2015-23	中国河南	青豌豆	WD-151	小麻	中国湖北	青豌豆
WD-077	2015-24	中国甘肃	荷兰豆	WD-153	ZYZ-4892	中国北京	荷兰豆
WD-078	成豌	中国四川	青豌豆	WD-154	ZYZ-4962	中国北京	荷兰豆
WD-079	2015-25	中国甘肃	荷兰豆	WD-155	ZYZ-4964	中国北京	荷兰豆
WD-080	2015-26	中国甘肃	荷兰豆	WD-156	ZYZ-4966	中国北京	荷兰豆
WD-082	2015-27	中国四川	荷兰豆	WD-157	ZYZ-4968	中国北京	荷兰豆
WD-083	2015-28	中国甘肃	荷兰豆	WD-158	ZYZ-4991	中国北京	荷兰豆

附表 2 参试豌豆品质性状测定结果

Appendix 2 Results of the determination of tested pea quality traits

编号 No.	荚长(mm) Pod length	荚宽(mm) Pod width	荚重(g) Pod weight	含水量(%) Water content	维生素C(mg/kg) VC	可溶性蛋白(mg/g) Soluble protein	可溶性糖(%) Soluble sugar	总氨基酸(mg/g) Total amino acids
WD-001	78.80±1.14	15.59±1.20	2.24±0.85	87.96±1.07	190.64±7.72	9.17±0.68	1.92±0.06	15.62±0.22
WD-002	66.19±7.58	12.74±1.92	3.61±1.08	81.05±3.61	49.91±2.78	7.05±1.03	2.35±0.07	9.90±0.53
WD-005	69.56±4.96	14.79±0.29	3.38±1.16	83.32±1.08	51.55±4.91	15.63±0.64	2.11±0.11	9.68±0.80
WD-006	104.02±2.68	16.36±0.78	4.85±0.14	86.46±2.66	43.36±6.18	14.00±0.21	2.76±0.05	18.22±0.55
WD-007	85.18±4.02	20.24±1.13	4.68±0.54	88.03±1.55	58.91±2.58	8.80±0.81	2.00±0.18	18.37±0.46
WD-009	82.54±4.26	16.48±0.12	2.74±0.21	88.70±2.84	63.82±1.42	8.76±1.37	3.36±0.18	18.14±0.76
WD-011	24.41±0.31	12.82±0.31	0.98±0.16	86.39±1.37	59.73±5.45	4.88±0.39	3.82±0.23	12.48±0.49
WD-012	106.95±10.46	17.52±0.47	3.48±0.87	89.28±2.35	117.82±5.11	9.42±0.72	3.49±0.12	21.95±0.61
WD-013	70.95±7.13	15.56±0.37	5.10±1.23	79.41±2.81	66.27±2.36	10.40±0.95	3.29±0.16	8.88±0.71
WD-017	73.13±10.12	15.08±0.22	1.73±0.84	84.56±2.34	71.18±2.60	9.34±0.92	2.17±0.26	16.93±0.36
WD-019	68.33±2.72	14.59±0.33	1.30±0.74	87.66±3.03	74.45±4.62	8.80±1.04	2.76±0.09	17.47±0.90
WD-020	101.42±4.05	22.26±0.21	6.38±0.11	87.30±2.86	63.82±4.91	13.83±0.19	2.20±0.22	14.76±0.58
WD-021	56.82±1.23	10.34±0.76	2.83±0.60	75.03±1.04	31.09±2.92	44.02±0.50	3.20±0.24	4.00±0.66
WD-022	96.60±7.33	16.11±0.47	5.44±0.33	89.33±1.98	54.82±4.25	10.73±0.74	2.28±0.20	15.30±0.79
WD-023	77.09±0.39	18.46±1.47	2.49±0.73	88.09±3.22	68.73±3.03	7.86±0.98	3.20±0.20	14.19±0.47
WD-024	77.85±5.14	16.46±0.64	6.22±0.59	83.82±1.76	24.55±3.96	11.75±1.03	3.74±0.32	5.94±0.30
WD-041	70.58±1.35	13.02±0.13	3.89±0.54	71.18±0.37	46.64±4.93	18.25±0.92	2.45±0.10	4.72±0.61
WD-042	59.15±0.99	13.19±0.41	1.50±0.67	85.30±2.49	43.36±3.75	8.89±0.37	3.29±0.24	21.87±0.30
WD-043	79.72±2.08	14.94±0.40	2.06±0.43	82.71±1.52	103.91±6.34	4.10±0.52	1.80±0.05	15.97±0.46
WD-044	75.63±2.64	14.67±0.83	3.46±0.79	85.07±1.31	125.18±11.07	10.85±0.22	2.83±0.34	13.67±0.36
WD-045	64.40±4.31	14.19±0.11	1.36±0.99	86.31±0.75	118.64±6.49	4.96±0.82	3.49±0.04	22.01±0.62
WD-047	63.42±3.13	11.54±0.43	3.71±0.98	74.82±1.25	32.73±3.49	32.16±0.53	3.45±0.15	3.97±0.16
WD-048	59.09±4.39	6.15±0.54	2.35±0.18	81.68±1.38	66.27±5.95	10.40±0.70	1.00±0.08	10.03±0.38
WD-051	68.96±4.17	15.16±1.29	2.58±0.70	86.82±1.30	108.82±5.67	7.70±0.49	1.43±0.14	18.60±0.43
WD-053	71.05±4.28	13.87±0.68	2.57±0.13	83.42±2.10	99.82±1.42	3.49±0.07	1.96±0.30	11.27±0.43
WD-054	62.85±3.43	15.26±0.37	4.13±0.35	78.85±2.77	34.36±5.11	18.78±0.53	3.75±0.20	4.56±0.26
WD-055	73.29±1.32	12.50±0.39	2.80±0.04	88.59±3.80	79.36±4.80	9.09±0.68	3.29±0.13	23.57±0.41
WD-056	82.05±3.64	18.48±0.49	4.34±0.66	85.10±3.38	31.09±1.60	18.90±0.82	1.86±0.12	14.21±0.68
WD-057	72.92±4.25	13.29±1.36	2.64±0.55	91.78±3.34	72.82±4.25	3.86±0.87	3.73±0.07	25.34±0.57
WD-058	72.50±3.28	15.15±0.55	2.36±0.50	87.41±3.29	58.91±3.75	8.03±0.90	2.28±0.07	17.51±0.36
WD-059	73.40±2.01	16.52±0.18	6.80±0.12	79.18±0.25	26.18±2.62	16.61±0.79	3.80±0.25	7.72±0.85
WD-061	88.49±3.31	22.24±0.44	4.53±0.36	88.00±0.53	90.00±8.85	10.93±0.51	3.41±0.07	21.13±1.12
WD-063	68.54±4.11	14.19±1.73	3.18±0.28	83.98±2.66	66.27±5.22	14.04±0.57	2.60±0.06	13.12±0.77
WD-064	90.77±4.36	16.72±0.66	4.00±0.63	81.10±1.64	49.91±4.25	13.79±1.46	2.29±0.08	10.94±1.34
WD-065	91.72±3.86	16.89±0.83	3.94±0.09	87.06±3.96	42.55±2.60	9.83±1.54	4.40±0.10	10.42±0.78
WD-066	62.33±4.77	12.35±0.77	2.17±0.35	83.56±0.45	20.45±2.99	16.94±0.92	3.11±0.21	8.65±0.59
WD-067	67.66±8.39	12.94±0.61	3.79±0.56	74.56±2.02	81.82±3.67	48.11±0.70	3.41±0.16	6.47±0.45
WD-068	67.62±2.70	15.64±1.81	1.80±0.26	85.34±3.56	71.18±4.15	3.28±1.28	3.01±0.10	16.69±0.99
WD-069	102.43±0.88	22.62±1.13	7.31±0.21	84.95±1.14	94.09±1.60	11.13±1.65	3.12±0.16	12.66±0.38
WD-070	66.57±0.49	11.29±0.50	3.50±0.88	77.60±3.64	61.36±3.52	17.43±1.38	4.16±0.20	5.94±0.54
WD-071	68.15±2.66	14.89±1.22	1.44±0.85	88.40±1.85	67.09±5.97	12.12±1.11	3.69±0.11	19.0±1.20
WD-072	60.04±1.33	11.82±0.17	2.25±0.01	82.94±0.44	199.64±4.91	8.97±0.32	4.30±0.08	12.03±0.55
WD-074	81.77±1.11	15.76±0.26	2.71±0.40	86.36±1.33	32.55±5.67	4.06±0.75	4.18±0.04	15.8±1.07
WD-075	71.55±6.47	15.06±0.88	4.29±0.34	80.25±0.82	34.36±4.64	63.44±0.53	2.98±0.24	3.98±0.70
WD-077	100.72±6.58	22.09±0.14	5.28±0.44	87.62±0.91	53.18±4.38	49.95±0.61	3.55±0.07	20.80±1.33
WD-078	73.92±2.81	12.56±0.34	5.42±0.04	77.60±0.32	24.55±7.36	14.16±0.52	4.81±0.06	7.88±0.32
WD-079	87.13±3.10	18.77±1.20	2.92±0.77	90.19±2.99	49.91±3.89	8.60±1.07	2.49±0.12	16.03±0.71
WD-080	65.88±2.50	14.55±0.21	1.80±0.32	86.30±3.26	36.82±1.18	8.93±1.07	3.19±0.10	17.72±0.55
WD-082	60.88±6.10	13.38±0.35	1.32±0.31	86.62±3.63	50.73±1.34	11.42±1.00	2.03±0.21	23.22±0.89
WD-083	74.47±5.11	15.84±1.23	2.99±0.63	86.75±3.12	102.27±3.00	9.58±0.25	2.74±0.16	10.58±0.15
WD-084	67.15±1.88	13.40±0.81	5.78±0.27	86.79±2.60	69.55±3.96	9.62±0.56	3.20±0.05	15.32±0.66
WD-085	70.19±1.66	13.41±0.79	1.78±0.26	86.33±1.42	32.73±6.39	4.18±0.80	3.44±0.10	13.57±0.84
WD-087	67.97±5.76	13.88±0.65	5.99±0.12	84.91±0.72	47.45±7.09	16.25±0.86	2.62±0.04	8.81±0.69
WD-089	99.59±4.95	18.45±0.53	3.56±0.33	87.83±1.48	53.18±4.25	4.88±0.31	2.97±0.12	22.68±0.71
WD-091	73.93±2.41	12.86±0.80	3.86±0.27	78.41±0.88	44.18±2.83	37.48±1.29	3.34±0.16	3.88±0.61
WD-092	67.82±5.16	12.57±1.11	4.50±0.34	83.86±2.23	44.18±2.64	10.93±1.14	4.34±0.07	10.15±0.29
WD-094	59.17±1.36	12.38±0.23	2.20±0.14	81.21±1.45	32.73±7.85	14.57±1.48	2.93±0.13	7.44±0.26
WD-097	70.03±3.36	12.25±0.36	4.79±0.55	77.65±2.57	68.73±6.49	17.96±0.26	2.79±0.05	7.88±0.30
WD-098	59.95±1.54	14.25±1.10	2.63±0.27	83.62±3.24	112.09±3.72	4.92±0.15	3.50±0.11	13.29±0.22
WD-099	74.74±4.87	15.80±0.53	5.86±1.05	77.13±1.03	57.27±4.91	11.91±0.32	2.87±0.09	10.18±0.08
WD-100	81.04±3.74	14.74±1.12	5.12±0.29	78.57±3.93	31.91±2.73	62.22±3.59	2.23±0.03	3.98±0.12
WD-101	58.36±3.00	13.51±0.04	2.86±0.27	81.72±5.42	52.36±2.45	7.70±0.39	4.83±0.32	10.27±0.23
WD-103	72.65±2.53	15.06±0.67	5.36±0.33	77.74±3.85	61.36±6.09	14.41±0.80	3.26±0.14	8.05±0.45
WD-104	67.62±4.65	14.84±0.41	2.68±0.09	85.70±1.43	122.73±4.91	13.59±0.86	2.29±0.12	14.12±0.18
WD-105	68.48±5.10	13.27±0.26	3.07±0.11	76.03±4.23	32.73±3.67	11.46±0.12	4.13±0.24	8.67±0.28
WD-107	71.02±6.09	12.01±0.84	4.03±0.18	79.92±1.77	99.00±1.82	12.32±0.84	3.27±0.25	10.47±0.15
WD-108	72.94±4.93	15.03±1.24	1.59±0.54	89.73±2.63	92.45±5.11	7.99±0.35	3.92±0.21	17.88±0.27
WD-109	64.94±4.46	14.16±0.84	2.67±0.23	81.50±2.69	103.91±4.91	15.67±0.32	5.03±0.07	11.02±0.54
WD-110	74.85±4.82	14.42±0.90	2.43±0.19	85.07±3.36	72.82±5.11	8.15±0.35	3.42±0.13	18.94±0.24
WD-111	58.01±2.75	12.15±0.71	1.51±0.16	84.96±2.37	60.55±6.18	9.62±0.70	2.04±0.15	13.80±0.09
WD-112	108.69±6.16	24.85±0.78	7.63±0.76	90.69±2.45	95.73±3.82	7.78±1.13	3.10±0.05	18.74±0.33
WD-113	76.86±1.74	13.42±0.15	4.51±0.34	82.69±1.12	67.09±5.04	13.18±0.43	3.68±0.11	11.23±0.37
WD-114	87.01±3.03	15.58±0.52	2.57±0.76	88.86±1.08	72.00±4.20	8.23±0.80	3.56±0.11	22.09±0.08
WD-115	67.55±1.30	11.57±0.63	3.37±0.09	77.47±0.72	27.82±2.83	34.41±0.83	4.70±0.23	7.94±0.15
WD-118	81.26±2.85	16.19±0.85	5.61±0.24	84.60±0.36	19.64±5.11	62.63±0.44	3.70±0.25	8.60±0.42
WD-122	72.81±4.27	14.57±0.68	1.77±0.26	85.66±1.12	49.91±5.89	4.35±0.14	4.30±0.20	17.21±0.25

WD-123	73.97±6.02	15.06±0.59	5.93±0.64	85.60±1.30	53.18±1.64	73.26±0.31	2.72±0.07	9.39±0.30
WD-124	84.69±3.68	15.56±0.68	4.41±0.42	85.55±0.97	48.27±5.77	17.76±0.68	1.92±0.18	5.97±0.11
WD-127	71.66±1.13	14.95±0.21	4.55±0.55	86.09±2.80	36.82±7.09	54.04±1.42	2.67±0.22	5.50±0.15
WD-129	64.91±1.78	15.08±0.21	3.63±0.88	81.93±1.70	75.27±4.48	11.42±0.51	3.52±0.14	15.35±0.42
WD-130	74.04±3.94	12.97±0.78	5.33±0.15	80.30±2.46	187.36±6.92	9.25±0.55	2.89±0.28	9.96±0.22
WD-131	67.77±2.88	14.58±1.13	1.84±0.02	83.36±0.77	60.14±5.67	7.70±0.69	3.46±0.17	11.90±0.19
WD-134	79.66±2.40	16.40±0.43	2.36±0.34	89.00±3.04	85.09±4.64	8.31±0.52	3.48±0.12	22.98±0.58
WD-135	76.47±4.63	13.59±0.58	7.67±0.22	85.22±1.21	96.55±8.53	13.38±0.69	4.70±0.09	7.10±0.37
WD-137	75.62±4.05	11.57±0.66	5.49±0.15	86.77±1.27	86.73±5.67	12.08±0.47	2.84±0.21	16.22±0.61
WD-138	72.07±2.64	12.37±0.47	3.68±0.48	80.34±1.04	40.91±7.72	46.27±1.80	3.89±0.14	8.77±0.59
WD-142	57.37±3.92	14.28±0.86	1.90±0.08	83.68±2.32	63.82±8.62	5.94±0.79	3.64±0.31	20.82±0.13
WD-144	58.61±3.64	16.01±0.58	1.83±0.11	87.41±2.50	40.91±2.74	3.90±0.03	3.59±0.33	22.95±0.68
WD-145	77.89±0.93	15.15±0.40	2.27±0.54	86.05±1.94	67.91±5.11	6.35±0.81	3.24±0.18	20.72±0.05
WD-147	60.67±2.27	12.60±0.40	3.80±0.16	85.26±2.22	48.27±3.75	9.01±0.31	5.60±0.13	10.64±0.45
WD-148	67.47±1.35	16.36±0.67	2.68±0.37	81.24±2.49	54.82±8.94	14.32±0.25	2.86±0.03	9.88±0.14
WD-149	100.95±3.90	21.85±0.53	6.57±0.41	86.76±1.75	53.18±8.50	15.10±0.97	3.00±0.16	18.07±0.28
WD-150	64.75±0.68	14.08±1.03	2.36±0.20	82.20±2.56	100.64±3.79	8.76±1.47	3.94±0.24	10.36±0.31
WD-151	70.35±1.49	12.57±0.62	3.34±0.12	80.06±1.90	148.09±4.82	6.15±0.82	3.21±0.48	6.90±0.18
WD-153	62.26±2.50	13.74±1.10	1.21±0.23	88.12±0.57	89.18±6.09	4.14±0.87	2.89±0.37	15.18±0.05
WD-154	86.41±3.27	18.97±0.30	4.24±0.33	87.03±1.85	42.55±2.83	8.64±0.07	3.87±0.31	21.39±0.38
WD-155	59.08±2.36	12.76±0.37	2.33±0.10	81.52±2.14	54.82±6.09	25.21±0.62	4.26±0.22	12.03±0.52
WD-156	69.00±3.16	14.34±0.48	2.58±0.23	84.88±2.43	96.55±5.11	14.73±0.48	3.58±0.40	12.84±0.76
WD-157	62.93±3.01	16.17±0.64	1.64±0.03	84.15±1.45	61.36±7.50	4.43±0.37	2.28±0.34	23.44±0.44
WD-158	69.41±2.21	17.43±1.09	2.00±0.09	86.00±2.63	122.73±3.75	5.53±1.27	2.64±0.32	16.75±1.33