

范 净,陈启亮,杨晓平,等. 砂梨种质资源石细胞团大小特性分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):145-151.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.019

砂梨种质资源石细胞团大小特性分析

范 净¹, 陈启亮¹, 杨晓平¹, 张靖国¹, 杜 威¹, 胡红菊^{1,2}

(1. 湖北省农业科学院果树茶叶研究所/果树种质创新与利用湖北省重点实验室,湖北武汉 430064;

2. 湖北洪山实验室,湖北武汉 430070)

摘要:为系统评价砂梨石细胞团大小的遗传多样性,并建立砂梨石细胞性状的综合评价指标,挖掘优异资源。以 216 份砂梨种质资源为研究材料,采用试验筛网过滤的方法检测石细胞团在不同直径区间的大小,并利用主成分分析对不同砂梨资源的石细胞相关性状进行综合评价。结果表明,随着砂梨石细胞含量增加, $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例逐渐增加。在不同种质类型间, $D \geq 250 \mu\text{m}$ 的石细胞团分布比例表现为野生资源(79.92%) > 地方品种(70.44%) > 国外引进品种(61.28%) > 国内选育品种(品系)(53.50%)。石细胞团为 $300 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$ 分布比例与石细胞含量、 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 分布比例与果肉硬度成显著正相关, $200 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ 分布比例与石细胞含量和果肉硬度呈显著负相关。基于主成分分析建立砂梨果实石细胞相关 8 个性状的综合评价模型,在此基础上提出石细胞含量 < 0.2%,石细胞团 $D < 250 \mu\text{m}$ 分布比例 > 50%,石细胞团 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 分布比例 < 15% 的评价指标,可用于石细胞含量少且石细胞团小的优异资源挖掘。本研究明确了砂梨石细胞团大小在不同砂梨种质资源的遗传多样性特点,阐明了石细胞团大小与石细胞含量和果肉硬度间的关系,并基于石细胞性状的综合评价模型,筛选出石细胞含量少、果肉硬度低、 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例少的优异砂梨资源 10 份。

关键词:砂梨;石细胞团;分布比例;种质资源;主成分分析

中图分类号:S661.201;S661.202 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0145-07

梨是国际性大宗水果,在世界各地均有栽培,深受广大消费者喜爱。我国作为世界梨起源中心之一,不仅具有悠久的栽培历史,拥有丰富的品种资源,也占据世界第一大梨生产国的国际重要地位。随着国民生活水平的提高,消费者对高品质水果的需求日益增加。梨果实中石细胞含量、石细胞团大小和石细胞团密度都直接影响梨果实的质地、鲜食口感和加工品质。石细胞是木质素或其他次生代谢物在初生壁上的沉积,再经过细胞壁次生加厚而形成的厚壁细胞。石细胞含量和石细胞团大小在梨的栽培种和野生种间、在不同品种间、在同

一果实不同部位均有明显差异^[1-3]。

梨果肉石细胞团的大小与品种驯化有密切关系^[4],同时,石细胞团大小也是评价果实品质的重要指标之一。前人通过显微镜观察^[5]和不同直径试验筛网过滤^[1-2]的方法分析不同梨品种的石细胞团大小,发现多数品种在石细胞团直径 > 250 μm 区间石细胞含量最多。田路明等提出以 100 g 果肉中石细胞团直径 > 250 μm 含量评价梨果肉质地的分级标准^[2]。前人对梨不同栽培种:砂梨(*Pyrus pyrifolia*)、新疆梨(*P. sinkiangensis*)、白梨(*P. bretschneideri*)、秋子梨(*P. ussuriensis*)、西洋梨(*P. communis*)和种间杂种的石细胞团大小进行评价分析^[2],但对砂梨种质资源的石细胞团分布情况、石细胞团大小与石细胞含量和果实硬度关系缺乏系统研究。因此,对砂梨不同品种的石细胞团大小进行系统精准鉴定,并阐明石细胞团大小与石细胞含量和果肉硬度的相互关系,将为高品质砂梨资源筛选提供数据支撑,为育种亲本选配提供参考依据,为梨果实品质改良提供研究材料。

收稿日期:2024-05-17

基金项目:湖北省自然科学基金(编号:2023AFB833_024AFB948);湖北洪山实验室重大项目(编号:2022hszd009);湖北省农业科技创新项目(编号:2021-620-000-001-022)。

作者简介:范 净(1982—),女,湖北钟祥人,博士,副研究员,主要从事梨种质资源鉴定评价及种质创新研究。E-mail:fanjing2013pear@163.com。

通信作者:胡红菊,研究员,主要从事梨种质资源研究,E-mail:hongjuhu@sina.com;杜 威,博士,副研究员,主要从事梨种质资源研究,E-mail:dww@hbaas.com。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料取自湖北省农业科学院果树茶叶研究所国家砂梨种质资源圃(武汉),216 份不同的砂梨种质资源为 10~15 年生健壮树,管理水平一致,砧木为豆梨。2022 年在树上不同方位取成熟果实 10 个,从不同果实上取果肉切块混合,根据四分法分成 90~110 g/份,放置于 -20 ℃ 冷冻。

1.2 试验方法

采用重量法^[6]测量每 100 g 果肉石细胞团含量,每个品种 3 次重复,取平均值,石细胞含量(stone cell content, SC) = 称量的石细胞重(g)/每份样品实际果肉重(g) × 100%。收集每个品种干燥石细胞,利用不同直径(150、200、250、300、500 μm)的试验筛网,从大到小进行逐级过滤,称量不同直径(diameter, D)区间的石细胞团重,计算每个品种不同直径区间石细胞团含量,统计不同品种各级石细胞团各直径区间所占的平均百分比例。采用数显硬度计 GY-4 测量果肉硬度,每个果实测量赤道面 2 个不同方位去皮后的果肉硬度值,每份资源测量 5 个果实,取平均值,果肉硬度单位为 kgf/cm²。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 对不同品种石细胞团相关数据进行平均值、标准差、变异系数计算和线性相关分析,SPSS 21.0 软件对石细胞相关性状的数据进行皮尔森相关性、主成分分析及标准化处理。

2 结果与分析

2.1 不同直径砂梨石细胞团分布情况

216 份砂梨种质资源不同直径石细胞团分布比例的变异情况如表 1 所示。6 个石细胞不同直径区间分布比例的变异系数在 44.17%~73.96% 之间,平均为 56.84%。石细胞团在 150 μm ≤ D < 200 μm 所占比例的变异系数最大,为 73.96%;其次为 D ≥ 500 μm 石细胞团,为 69.41%。石细胞团在

250 μm ≤ D < 300 μm 所占比例的变异系数最小,为 44.17%。石细胞团在 150 μm ≤ D < 200 μm 所占比例的平均值最少,为 8.70%;其次为 D < 150 μm,为 10.34%。石细胞团在 300 μm ≤ D < 500 μm 所占比例的平均值最多,为 37.44%;其次为 200 μm ≤ D < 250 μm,为 16.42%。D < 250 μm 的 3 个石细胞团区间累计平均值为 35.46%,D ≥ 250 μm 的 3 个石细胞团区间累计平均值为 64.54%。

表 1 砂梨不同直径石细胞团分布比例的多样性分析 %

不同直径石细胞团区间	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
D ≥ 500 μm	47.11	3.42	13.69	9.50	69.41
300 μm ≤ D < 500 μm	82.30	6.43	37.44	16.64	44.44
250 μm ≤ D < 300 μm	46.27	2.42	13.41	5.92	44.17
200 μm ≤ D < 250 μm	51.35	1.93	16.42	8.05	49.02
150 μm ≤ D < 200 μm	50.03	7.64	8.70	6.43	73.96
D < 150 μm	37.19	1.29	10.34	6.20	60.01

2.2 不同种质类型砂梨石细胞团分布

对 121 份地方品种、24 份国外引进品种、65 份国内选育品种(品系)和 6 份野生资源,共计 216 份不同种质类型砂梨石细胞团在不同直径区间的分布比例进行评价分析。由表 2 可知,不同种质类型石细胞团主要分布在 300 μm ≤ D < 500 μm,其中,野生资源在此区间的石细胞团所占比例最多,为 50.92%,地方品种在此区间的石细胞团所占比例达到 42.75%,国内选育品种(品系)石细胞团所占比例最少,为 26.88%。分布最少的区间是 150 μm ≤ D < 200 μm,在此区间野生资源、地方品种、国外引进品种和国内选育品种(品系)所占比例分别为 4.01%、7.41%、9.11% 和 11.39%。D ≥ 250 μm 石细胞团分布比例表现为野生资源(79.92%) > 地方品种(70.44%) > 国外引进品种(61.28%) > 国内选育品种(品系)(53.50%)。

2.3 不同分级指标的砂梨石细胞团分布

根据砂梨石细胞含量的 7 级分级标准^[7],计算

表 2 砂梨不同种质类型石细胞团分布比例

不同种质类型	不同直径石细胞团所占比例(%)					
	D ≥ 500 μm	300 μm ≤ D < 500 μm	250 μm ≤ D < 300 μm	200 μm ≤ D < 250 μm	150 μm ≤ D < 200 μm	D < 150 μm
地方品种	15.01	42.75	12.68	13.89	7.41	8.26
国外引进品种	11.54	35.88	13.86	18.60	9.11	11.01
国内选育品种(品系)	11.61	26.88	15.01	20.71	11.39	14.40
野生资源	19.98	50.92	9.02	10.34	4.01	5.73

同一级别中不同品种的石细胞团大小占比的平均值,由表 3 可知,在同一分级中,石细胞团分布比例最多的区间是 $300\ \mu\text{m} \leq D < 500\ \mu\text{m}$ 。石细胞含量 $SC < 0.1\%$ 分级中,石细胞团 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 比例最少,为 12.71%;在其他 $0.1\% \leq SC < 0.2\%$ 、 $0.2\% \leq SC < 0.4\%$ 、 $0.4\% \leq SC < 0.7\%$ 、 $0.7\% \leq SC < 1.1\%$ 、 $1.1\% \leq SC < 1.6\%$ 、 $SC \geq 1.6\%$ 等 6 个分级

中,石细胞团 $150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$ 比例最少,分别为 12.69%、9.37%、6.55%、4.02%、3.32%、2.43%。随着石细胞含量增加, $D \geq 250\ \mu\text{m}$ 石细胞团比例逐渐增加, $D < 250\ \mu\text{m}$ 石细胞团比例减少。石细胞含量分级为 $SC \geq 1.6\%$ 的资源中, $D \geq 250\ \mu\text{m}$ 平均比例达到 85.59%;在分级为 $SC < 0.1\%$ 的资源中, $D \geq 250\ \mu\text{m}$ 平均比例仅为 48.33%。

表 3 不同分级的砂梨石细胞团分布比例

不同分级	资源份数(份)	不同直径石细胞团所占比例(%)					
		$D \geq 500\ \mu\text{m}$	$300\ \mu\text{m} \leq D < 500\ \mu\text{m}$	$250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$	$200\ \mu\text{m} \leq D < 250\ \mu\text{m}$	$150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$	$D < 150\ \mu\text{m}$
$SC < 0.1\%$	11	12.71	21.68	13.94	19.74	16.05	15.88
$0.1\% \leq SC < 0.2\%$	38	13.13	25.09	14.75	19.01	12.69	15.32
$0.2\% \leq SC < 0.4\%$	82	12.87	33.48	14.07	19.36	9.37	10.85
$0.4\% \leq SC < 0.7\%$	48	13.91	43.90	13.33	14.71	6.55	7.59
$0.7\% \leq SC < 1.1\%$	23	13.88	55.34	12.17	8.98	4.02	5.62
$1.1\% \leq SC < 1.6\%$	12	19.87	53.78	8.42	8.06	3.32	6.56
$SC \geq 1.6\%$	2	19.27	61.95	4.37	4.98	2.43	7.00

2.4 砂梨石细胞团分布比例与石细胞含量相关性分析

由图 1 可知,不同石细胞团大小的分布比例与石细胞含量的线性相关分析表明,石细胞团为 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 时分布比例与石细胞含量呈显著正相关(皮尔森相关系数为 0.145, $P < 0.05$) (图 1 - A), $300\ \mu\text{m} \leq D < 500\ \mu\text{m}$ 分布比例与石细胞含量呈极显著正相关(皮尔森相关系数为 0.592, $P < 0.01$) (图 1 - B)。石细胞团为 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m} \leq D < 250\ \mu\text{m}$ 、 $150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$ 和 $D < 150\ \mu\text{m}$ 分布比例与石细胞含量呈极显著负相关(图 1 - C、图 1 - D、图 1 - E、图 1 - F),皮尔森相关系数分别为 -0.269、-0.489、-0.468 和 -0.431 ($P < 0.01$)。

2.5 砂梨石细胞团分布比例与果肉硬度相关性分析

由图 2 可知,不同石细胞团大小的分布比例与果肉硬度的线性相关分析表明,石细胞团为 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m} \leq D < 500\ \mu\text{m}$ 分布比例与果肉硬度呈极显著正相关,皮尔森相关系数分别为 0.361 和 0.320 ($P < 0.01$) (图 2 - A、图 2 - B)。石细胞团为 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m} \leq D < 250\ \mu\text{m}$ 、 $150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$ 和 $D < 150\ \mu\text{m}$ 分布比例与果肉硬度呈极显著负相关(图 2 - C、图 2 - D、图 2 - E、图 2 - F),皮尔森相关系数分别为 -0.346、-0.411、-0.265 和 -0.336 ($P < 0.01$)。

2.6 石细胞相关性状的成分分析

砂梨不同石细胞团大小分布比例、石细胞含量和果肉硬度等 8 个性状的成分分析结果见表 4,5 个主成分累计贡献率为 90.47%,能够反映石细胞相关 8 个性状的大部分信息。第 1 主成分特征值为 3.51,贡献率为 43.81%,主要反映石细胞团 $300\ \mu\text{m} \leq D < 500\ \mu\text{m}$ 分布比例和石细胞含量,特征向量值都为 0.81;第 2 主成分特征值为 1.57,贡献率为 19.64%,主要反映石细胞团 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 和 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 的分布比例,石细胞团 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的正特征向量值(0.77),石细胞团为 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的负特征向量值(-0.60);第 3 主成分特征值为 0.90,贡献率为 11.18%,主要反映石细胞团 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 和 $150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$ 的分布比例,石细胞团为 $D \geq 500\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的正特征向量值(0.48),石细胞团为 $150\ \mu\text{m} \leq D < 200\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的负特征向量值(-0.51);第 4 主成分特征值为 0.71,贡献率为 8.81%,主要反映果肉硬度和石细胞含量,特征向量值分别为 0.53、0.39;第 5 主成分特征值为 0.56,贡献率为 7.03%,主要反映石细胞团为 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m} \leq D < 250\ \mu\text{m}$ 的分布比例,石细胞团为 $250\ \mu\text{m} \leq D < 300\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的正特征向量值(0.44),石细胞团为 $200\ \mu\text{m} \leq D < 250\ \mu\text{m}$ 分布比例有较高的负特征向量值(-0.56)。

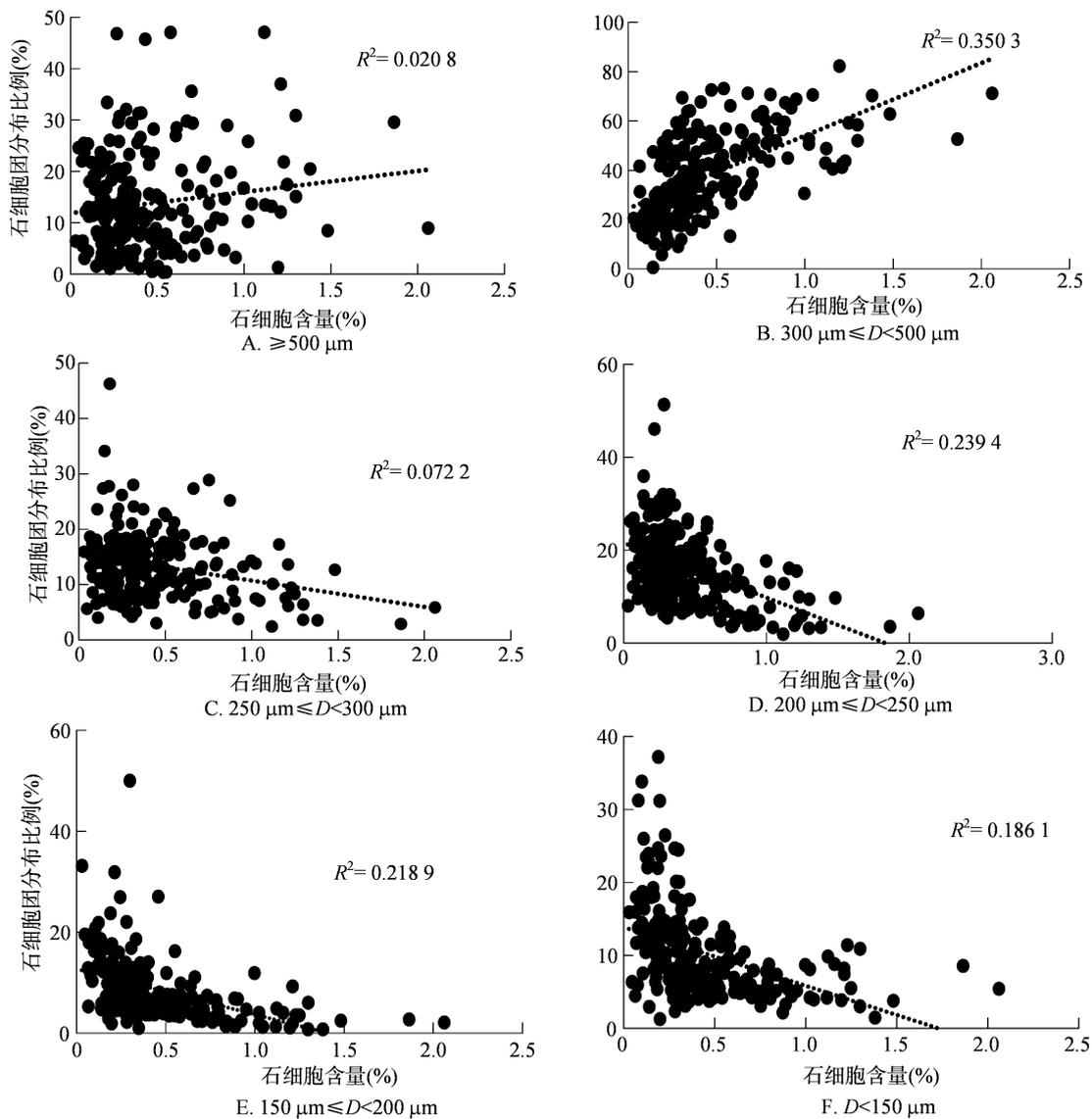


图1 砂梨不同石细胞团大小分布比例与石细胞含量的线性关系

2.7 基于主成分石细胞相关性状的综合评价

将石细胞团在 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m} \leq D < 300 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m} \leq D < 200 \mu\text{m}$ 和 $D < 150 \mu\text{m}$ 的分布比例,石细胞含量和果肉硬度 8 个指标的数据进行标准化处理,所得数据用 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 和 Z_8 表示。

从表 4 可得到 5 个主成分的计算公式为

$$\text{PC1}: F_1 = 0.31Z_1 + 0.81Z_2 - 0.46Z_3 - 0.72Z_4 - 0.65Z_5 - 0.69Z_6 + 0.81Z_7 + 0.70Z_8;$$

$$\text{PC2}: F_2 = 0.77Z_1 - 0.46Z_2 - 0.60Z_3 - 0.14Z_4 + 0.32Z_5 + 0.42Z_6 + 0.03Z_7 + 0.33Z_8;$$

$$\text{PC3}: F_3 = 0.48Z_1 - 0.29Z_2 + 0.36Z_3 + 0.35Z_4 - 0.51Z_5 - 0.24Z_6 - 0.06Z_7 + 0.09Z_8;$$

$$\text{PC4}: F_4 = -0.22Z_1 - 0.18Z_2 + 0.32Z_3 + 0.15Z_4 + 0.22Z_5 + 0.11Z_6 + 0.39Z_7 + 0.53Z_8;$$

$$\text{PC5}: F_5 = 0.15Z_1 - 0.06Z_2 + 0.44Z_3 - 0.56Z_4 + 0.03Z_5 + 0.15Z_6 - 0.04Z_7 - 0.08Z_8。$$

根据 5 个主成分及其对应的权重,建立基于主成分的砂梨果实石细胞相关 8 个性状的综合得分模型: $F = 0.4842F_1 + 0.2171F_2 + 0.1239F_3 + 0.0974F_4 + 0.0777F_5$ 。以石细胞相关 8 个指标的标准值,通过上述公式计算每份砂梨资源的综合得分 F 值。综合得分排名靠前的资源表现为石细胞含量多、果实硬度高、 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例多,与之相反的是排名靠后的资源表现为石细胞含量少、果实硬度低、 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例少,排名靠后石细胞少且石细胞团小的代表性优良选育

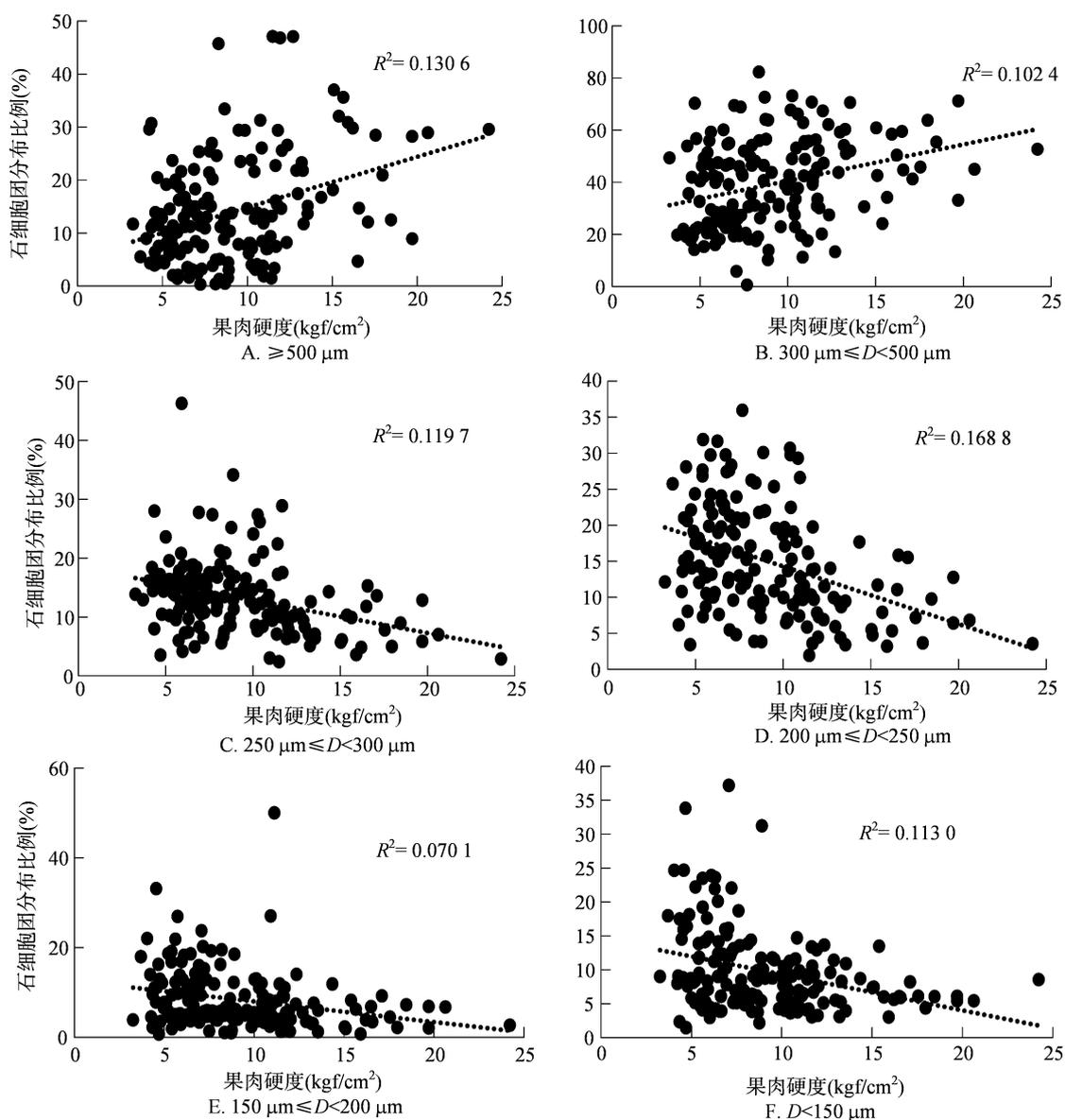


图2 砂梨不同石细胞团大小分布比例与果肉硬度的线性关系

品种见表 5。

3 讨论与结论

本研究对 216 份砂梨种质资源的不同直径石细胞团进行了鉴定评价,6 个石细胞不同直径区间分布比例的多样性分析表明了不同砂梨品种之间存在较大的变异,多样性较丰富。田路明等对不同栽培种梨的石细胞团大小评价分析发现,直径 $> 250 \mu\text{m}$ 的石细胞团含量约占 75%^[2],大于本研究中 216 份资源的 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 的石细胞团含量占比 64.54%,可能与本研究中 216 份砂梨种质资源中选育品种的资源较多,且不同栽培管理方式对梨果实石细胞的含量和大小也有一定的影响^[8-9]。Li 等

对野生群体、地方群体和改良群体的遗传变异分析发现,石细胞含量在驯化和改良过程中是一种功能缺失性突变的改良^[10]。本研究对不同种质类型砂梨石细胞团大小评价分析表明,野生资源中 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 的石细胞团含量较多,选育品种相对较少,也说明砂梨从野生资源驯化改良到选育品种时,石细胞含量逐渐减少,大颗粒石细胞团也逐渐丢失。

前人研究表明,梨石细胞团的大小和含量直接影响果实的质地,有的品种石细胞含量多,但是大颗粒石细胞团比例较少,果肉质地较细;而有的石细胞含量相对较少,但是大颗粒石细胞团比例较多,果肉质地较粗,石细胞团 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 含量是影响果肉质地的重要指标^[2]。本研究中发现,泸定王

表 4 砂梨石细胞相关性状主成分分析

性状	主成分载荷				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
石细胞团 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 分布比例	0.31	0.77	0.48	-0.22	0.15
石细胞团 $300 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$ 分布比例	0.81	-0.46	-0.29	-0.18	-0.06
石细胞团 $250 \mu\text{m} \leq D < 300 \mu\text{m}$ 分布比例	-0.46	-0.60	0.36	0.32	0.44
石细胞团 $200 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ 分布比例	-0.72	-0.14	0.35	0.15	-0.56
石细胞团 $150 \mu\text{m} \leq D < 200 \mu\text{m}$ 分布比例	-0.65	0.32	-0.51	0.22	0.03
石细胞团 $D < 150 \mu\text{m}$ 分布比例	-0.69	0.42	-0.24	0.11	0.15
石细胞含量	0.81	0.03	-0.06	0.39	-0.04
果肉硬度	0.70	0.33	0.09	0.53	-0.08
特征值	3.51	1.57	0.90	0.71	0.56
贡献率(%)	43.81	19.64	11.18	8.81	7.03
累计贡献率(%)	43.81	63.45	74.63	83.44	90.47
权重(%)	48.42	21.71	12.39	9.74	7.77

表 5 主成分评价筛选石细胞少且石细胞团小的优异资源

品种名称	不同直径石细胞团所占比例(%)						石细胞含量(%)	果肉硬度(kgf/cm ²)
	$D \geq 500 \mu\text{m}$	$300 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$	$250 \mu\text{m} \leq D < 300 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$	$150 \mu\text{m} \leq D < 200 \mu\text{m}$	$D < 150 \mu\text{m}$		
翠冠	11.84	11.96	11.98	28.56	11.20	24.47	0.06	5.00
新玉	5.54	19.78	12.95	25.76	17.99	17.99	0.07	3.70
苏翠 1 号	11.55	22.60	14.40	19.15	12.16	20.14	0.10	4.88
幸水	4.26	14.18	17.21	14.24	16.29	33.82	0.10	4.67
金晶	11.59	22.00	14.89	22.14	12.97	16.41	0.11	4.75
优系 0605-8	11.40	22.40	10.31	10.51	21.88	23.50	0.12	5.62
早夏	11.45	19.47	10.81	20.89	15.31	22.07	0.13	5.82
夏至	5.89	21.40	14.33	27.65	16.84	13.88	0.18	5.40
翠玉	11.62	17.78	16.88	28.10	11.09	14.54	0.18	4.46
早冠	13.92	19.21	15.42	15.61	11.16	24.69	0.19	4.58

皮梨与兴山糖梨子的石细胞含量分别为 0.39% 和 1.23%, 在石细胞含量的 7 级分级标准中, 分别属于石细胞含量较少和多的级别, 但 2 个品种的果肉硬度相差不大, 分别为 12.03、12.88 kgf/cm², 而这 2 个品种 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例都相对较高, 分别为 81.00% 和 75.05%, 说明石细胞含量、大小、分布比例等指标都影响果实的质地。本研究也表明在大多数品种中, 随着石细胞含量增加, $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例逐渐增加, $D < 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例减少。同时, 根据石细胞团分布比例与石细胞含量和果肉硬度相关性分析发现, 石细胞团区间为 $300 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$ 与石细胞含量、 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 分布比例与果肉硬度均呈显著正相关, 皮尔森相关系数分别为 0.592 和 0.361 ($P < 0.01$); 石细胞团为 $200 \mu\text{m} \leq$

$D < 250 \mu\text{m}$ 分布比例与石细胞含量和果肉硬度均呈显著负相关, 皮尔森相关系数分别为 -0.489 和 -0.411 ($P < 0.01$)。因此, 在石细胞团 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 含量评价果实质地的基础上, 建议增加砂梨石细胞团分布比例综合评价梨果实质地。

石细胞是制约梨果实品质提升的重要因素, 通过调控木质素的积累, 可以影响梨果实石细胞含量^[9,11-13]。不同石细胞含量和石细胞大小的梨种质资源是研究石细胞检测技术和挖掘调控木质素积累相关基因的基础。Xue 等通过 396 份种质资源石细胞性状的检测分析, 开发出一种基于视觉软件收集和计算机图像处理技术检测梨石细胞表型的工具 Pearprocess, 该软件可全面分析梨果实的石细胞数目、大小、面积和密度等参数^[14]。Zhang 等对

236 份砂梨种质资源幼果中的石细胞、木质素和纤维素含量及变化规律进行分析,通过转录组分析挖掘出与木质素合成和石细胞含量相关的转录因子 10 个^[15]。Wang 等通过 206 份砂梨种质资源果实的共表达网络分析,挖掘出调控石细胞形成的关键基因 *PbrNSC*^[16]。Gong 等利用不同石细胞分布的翠玉、砀山酥梨等资源,通过多组学的共表达网络分析,发现促进果核附近石细胞大量积累的关键转录因子 *PbbZIP48*^[17]。Zhang 等通过 312 份砂梨种质资源的全基因组关联分析,鉴定出调控梨果实石细胞和木质素形成的新基因 *PbrSTONE*^[18]。本研究通过石细胞团大小的特性分析筛选出不同石细胞团大小的资源,可作为木质素差异积累和石细胞遗传规律研究的基础材料。

梨杂种选育过程中,后代的石细胞数量有明显增多的趋势^[19]。以低石细胞含量的品种作父本,其后代果实石细胞含量较低,石细胞含量变化受父本的影响较大^[20]。库尔勒香梨杂交后代中果肉石细胞团大小的遗传力为 156.31%,呈现增多趋势^[21]。石细胞性状是育种家品种选育关注的重点^[22],石细胞少且石细胞团小的资源是亲本选配的关键。本研究通过主成分分析,建立砂梨果实石细胞相关 8 个性状的综合得分模型: $F = 0.484 2F_1 + 0.217 1F_2 + 0.123 9F_3 + 0.097 4F_4 + 0.077 7F_5$ 。综合得分相对低的资源表现为石细胞含量少、果实硬度低、 $D \geq 250 \mu\text{m}$ 石细胞团比例少。从中筛选出综合得分相对低、代表性优良选育品种翠冠、新玉、苏翠 1 号、幸水等 10 份,优异资源可直接生产利用,也可作为培育石细胞少石细胞团小优良品种的核心亲本。

本研究表明,石细胞团大小分布比例对梨果实品质亦有重要影响,在石细胞含量评价基础上,增加砂梨石细胞团大小分布比例指标综合评价梨果实质地。参考石细胞团大小分布比例与石细胞含量和果肉硬度相关性分析,以及石细胞相关性状的主成分分析,建议石细胞含量少且石细胞团小的优异资源筛选指标为石细胞含量 $< 0.2\%$,石细胞团 $D < 250 \mu\text{m}$ 分布比例 $> 50\%$,石细胞团 $D \geq 500 \mu\text{m}$ 分布比例 $< 15\%$ 。评价指标可用于梨优异资源筛选、梨育种亲本选配及石细胞基因调控研究的材料选择。

参考文献:

[1] 李晓刚,盛宝龙,蔺 经,等. 梨不同品种果肉石细胞含量研究[J]. 江苏农业科学,2004,32(4):65-67.

- [2] 田路明,曹玉芬,高 源,等. 梨品种果肉石细胞团大小对果肉质地的影响[J]. 园艺学报,2011,38(7):1225-1234.
- [3] 王红宝,朱 洁,王丹阳,等. 梨果肉石细胞含量分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(3):173-176.
- [4] 顾 模,林凤起,张冰冰. 梨果肉结构的解剖研究[J]. 中国果树,1989(4):31-34.
- [5] Cai Y P, Li G Q, Nie J Q, et al. Study of the structure and biosynthetic pathway of lignin in stone cells of pear[J]. Scientia Horticulturae,2010,125(3):374-379.
- [6] 聂继云,李 静,杨振锋,等. 冷冻法测定梨的石细胞含量[J]. 果树学报,2006,23(1):133-135.
- [7] 范 净,陈启亮,杨晓平,等. 砂梨石细胞含量多样性及其分级指标[J]. 福建农业学报,2021,36(4):433-439.
- [8] 王 斌,张 楠,闫冲冲,等. 套袋对砀山酥梨果实石细胞发育及木质素代谢的影响[J]. 园艺学报,2013,40(3):531-539.
- [9] 王 娅,曹雪慧,年 蕊,等. 梨石细胞形成的控制因素及对果实质地影响研究进展[J]. 食品科学,2024,45(7):340-347.
- [10] Li X L, Liu L, Ming M L, et al. Comparative transcriptomic analysis provides insight into the domestication and improvement of pear (*P. pyrifolia*) fruit[J]. Plant Physiology,2019,180(1):435-452.
- [11] 王红宝,王永博,王 晋,等. 梨果实石细胞木质素合成调控机制研究进展[J]. 果树学报,2024,41(4):750-763.
- [12] 田路明,董星光,曹玉芬,等. 梨属植物果肉和石细胞团木质素相关性分析[J]. 西南农业学报,2017,30(9):2091-2096.
- [13] 施 露,高庆超,李亚辉,等. 梨果实品质的研究进展与潜在技术应用展望[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):567-576.
- [14] Xue Y S, Xu S Z, Xue C, et al. Pearprocess: a new phenotypic tool for stone cell trait evaluation in pear fruit[J]. Journal of Integrative Agriculture,2020,19(6):1625-1634.
- [15] Zhang J Y, Li J M, Xue C, et al. The variation of stone cell content in 236 germplasm of sand pear (*Pyrus pyrifolia*) and identification of related candidate genes[J]. Horticultural Plant Journal,2021,7(2):108-116.
- [16] Wang R Z, Xue Y S, Fan J, et al. A systems genetics approach reveals *PbrNSC* as a regulator of lignin and cellulose biosynthesis in stone cells of pear fruit[J]. Genome Biology,2021,22(1):313.
- [17] Gong X, Qi K J, Chen J L, et al. Multi-omics analyses reveal stone cell distribution pattern in pear fruit[J]. The Plant Journal,2023,113(3):626-642.
- [18] Zhang M Y, Xue C, Hu H J, et al. Genome-wide association studies provide insights into the genetic determination of fruit traits of pear[J]. Nature Communications,2021,12(1):1144.
- [19] 崔艳波,陈 慧,乐文全,等. ‘京白梨’与‘鸭梨’正反交后代果实性状遗传倾向研究[J]. 园艺学报,2011,38(2):215-224.
- [20] 白 冰,刘 伦,秦梦帆,等. 砀山酥梨与丰水梨正反交群体果实性状的遗传特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):108-112.
- [21] 张 琦,姜 喜,段黄金,等. ‘库尔勒香梨’杂交后代果实石细胞特性与遗传倾向研究[J]. 果树学报,2018,35(增刊1):89-96.
- [22] 施 露,高庆超,李亚辉,等. 梨果实品质的研究进展与潜在技术应用展望[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):567-576.